

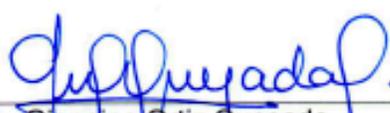
Uso de pruebas de carga en la recepción de puentes vehiculares nuevos.

CONSTANCIA DE DEFENSA PÚBLICA DE PROYECTO DE GRADUACIÓN

Proyecto de Graduación defendido públicamente ante el Tribunal Evaluador, integrado por los profesores Ing. Gustavo Rojas Moya, Ing. Giannina Ortiz Quesada, Ing. Ángel Navarro Mora, Ing. Mauricio Araya Rodríguez, como requisito parcial para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería en Construcción, del Instituto Tecnológico de Costa Rica.



Ing. Gustavo Rojas Moya.
Director



Ing. Giannina Ortiz Quesada.
Profesora Guía



Ing. Ángel Navarro Mora.
Profesor Lector



Ing. Mauricio Araya Rodríguez.
Profesor Observador

Abstract

The following research has as main objective to develop recommendations on the use of load tests for the reception of new bridges mainly, both locally and internationally according to the most common types of superstructures and material in our country. To achieve this, a questionnaire was initially made to find out about the subject of testing in several local institutions such as the MOPT, CONAVI, Municipalities and private construction companies. Similarly, several organizations were contacted internationally via email, including the Spanish Ministerio de Fomento, Switzerland (SIA 261:2014), Norway (Norwegian Public Roads Administration) and Austria (Austrian Ministry for Transport, Innovation and Technology).

Spain and Switzerland are the countries where these tests have been used most; in Spain they are mandatory according to the document of the Dirección General de Carreteras. Switzerland stopped using them; Only in special cases.

In the results chapter it is investigated the subject of load tests both locally and internationally. To illustrate this three bridges are selected that are within the most common types of superstructures in our country and recommendations are developed for the use of load tests.

In the analysis of results a lack of interest and monitoring by national institutions is detected. Internationally, Spain is the only country where they are mandatory.

Finally, a national regulation is recommended for the use of load tests in the reception of new bridges.

Keywords: load test, superstructure, bridges.

Resumen

La siguiente investigación tiene por objeto principal desarrollar recomendaciones sobre el uso de las pruebas de carga para la recepción de puentes nuevos, tanto a nivel nacional como internacional según los tipos de superestructuras y material más comunes en nuestro país.

Para iniciar la investigación se utiliza un cuestionario, el cual se envió vía correo electrónico a las instituciones nacionales tales como el MOPT, CONAVI, Municipalidades y empresas constructoras privadas. Similarmente a nivel internacional se contactaron varias organizaciones vía correo electrónico, entre ellas Ministerio de Fomento de España, Suiza (SIA 261:2014), Noruega (Norwegian Public Roads Administration) y Austria (Austrian Ministry for Transport, Innovation and Technology).

España y Suiza son los países donde se ha utilizado más estas pruebas; en España son de carácter obligatorio según documento de la Dirección General de Carreteras. Suiza las dejó de usar; solo en casos especiales.

En los resultados se investiga el tema de las pruebas de carga a nivel nacional e internacional. Para ilustrar se seleccionan tres puentes que están dentro de los tipos de superestructuras más comunes en nuestro país y se desarrollan recomendaciones para el uso de las pruebas de carga.

En el análisis de resultados se detecta una falta de interés y seguimiento por parte de las instituciones nacionales. A nivel internacional España es el único país donde son obligatorias.

Palabras clave: pruebas de carga, superestructura, puentes.

Uso de pruebas de carga en la recepción de puentes vehiculares nuevos.

Uso de pruebas de carga en la recepción de puentes vehiculares nuevos.

ORLANDO BRENES AGUILAR

Proyecto final de graduación para optar por el grado de
Licenciatura en Ingeniería en Construcción

noviembre del 2019

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
ESCUELA DE INGENIERÍA EN CONSTRUCCIÓN

Contenido

Prefacio	7
Resumen ejecutivo	8
Introducción	10
Marco teórico.....	13
Metodología.....	32
Resultados.....	36
Análisis de Resultados	66
Conclusiones y recomendaciones.....	69
Anexos.....	71
Referencias	76

Prefacio

Por medio de esta investigación se pretende despertar el interés sobre la importancia de utilizar las pruebas de carga en los puentes vehiculares de manera que se pueda verificar los parámetros y especificaciones de diseño, comportamiento, capacidad de carga máxima según los modelos analíticos y la carga viva utilizada en el diseño.

El objetivo principal de esta investigación es dar recomendaciones sobre los procedimientos existentes en el uso de las pruebas de carga. De modo que al final se pueda recomendar el desarrollo de una normativa en el ámbito nacional para el uso de estas pruebas según tipo de superestructuras y material más comunes utilizados en nuestro país.

Mi mas profundo agradecimiento a todas aquellas personas e instituciones como el Tec que de alguna manera me apoyaron e hicieron posible la realización de esta investigación en especial a mi familia padre, hermanas, sobrinos y en honor especial a mi querida madre fallecida que siempre

estuvo al pendiente y lo estará para siempre en cada uno de mis proyectos de vida.

Resumen ejecutivo

Esta investigación en particular tuvo como objetivo principal motivar y despertar el interés para que en nuestro país se desarrollen recomendaciones para el uso de pruebas de carga en la etapa de recepción de puentes vehiculares nuevos. Con el fin de dar un seguimiento al comportamiento y monitoreo de las estructuras nuevas hasta cumplir su vida útil. Dicha investigación se divide en tres etapas de desarrollo; según los objetivos planteados. Con el primer objetivo se obtiene la información de los procedimientos nacionales e internacionales utilizados a la fecha respecto al uso de las pruebas de carga ya sean dinámicas o estáticas. Los resultados en esta etapa nos demostraron que en nuestro país no se utilizan con regularidad estas pruebas y se asocian negativamente a un costo adicional dependiendo del tipo de prueba. No obstante, la Dirección de Puentes del Ministerio de Obras y Transporte (MOPT) realizó en el año 2006 dos pruebas de carga a los puentes sobre río Chirripó en ruta 4 y puente sobre río Chirripó en ruta 32. La prueba de carga estática se realizó en ambos puentes y una prueba de carga dinámica en el puente sobre río Chirripó en ruta 32. El proyecto e-Bridge del Tecnológico de Costa Rica (TEC) ha realizado varias pruebas estáticas entre ellas: puente sobre el río Purires ruta 2 (2012), puente sobre río Peje, ruta cantonal de acceso a Florida de Siquirres (2017), puente de acceso a toma de aguas, PH Reventazón (2017), puente sobre vertedor, PH Reventazón (2017) y puente cantonal (paso de Tobosi a Barranca, municipalidad de El Guarco (2018). Recién en marzo de 2019 el CONAVI realizó una prueba estática sobre el Puente Río Virilla en la ruta 147. El MOPT ha tenido siempre la participación en el proceso de ejecución de puentes, ya que por las

funciones establecidas es el ente rector principal en nuestro país para la realización de estas obras públicas. No obstante, por medio de la ley 9327 se les transfiere la autonomía a todas las municipalidades la contratación, diseño, ejecución y mantenimiento de la Red Vial Cantonal incluyendo los puentes. Sin embargo, el procedimiento actual de la mayoría de municipalidades consiste en una contratación por licitación pública del diseño, la ejecución y la inspección o valoración de la obra. Al constructor se le exige la entrega de un informe certificado por un laboratorio de materiales, de la calidad de los materiales utilizados sea de las pruebas de compresión del concreto o fichas técnicas del acero únicamente. Y finalmente si los resultados de las pruebas de calidad son satisfactorios entonces la obra es aceptada. A nivel internacional también existe conocimiento y uso en algunos países tal como en los EEUU en donde se ha desarrollado la mayor parte de la teoría de evaluación de estas estructuras, implementado por la AASHTO. La mayoría de puentes han cumplido su vida útil y han sido aprovechados para realizar pruebas antes de su demolición¹. La mayor parte de las pruebas que se han realizado son parte de investigaciones particulares de algunas universidades norteamericanas y no son preceptivas² excepto en casos particulares de diseño y de duda del comportamiento de las estructuras en su etapa constructiva. Sin embargo, se exige indicar la capacidad del puente o lo que llaman "load rating". Caso similar se vive en Europa ya que la mayoría de puentes europeos datan desde antes de la segunda guerra mundial, la reconstrucción ha sido lenta y en algunos casos se mantienen todavía. España es el único país

¹ (Bakht & Jaeger, 1992)

² Término tomado de documento Ministerio de Fomento de España. Sinónimo de obligatorio. Por mandato del (Cubero Cordero, 2012).

europeo donde es preceptivo, es decir de carácter obligatorio por mandato del Gobierno el uso de las pruebas de carga. Similarmente Suiza se caracterizo por un tiempo definido en el uso de pruebas de carga; en la actualidad no se usan excepto sean diseños nuevos e innovadores. Algunos países europeos como Noruega confían en sus códigos y diseños por lo que utilizan la modalidad de revisión de la calidad de los materiales por medio de laboratorios externos y una revisión adicional por parte del profesional responsable ante el propietario. Holanda ha utilizado las pruebas de carga para puentes de concreto reforzado, pero no es preceptiva.

Por medio del segundo objetivo se obtuvieron las recomendaciones para el uso de pruebas de carga según el tipo de superestructura. Se utilizaron como referencia las experiencias de los investigadores estadounidenses publicadas en el "*Manual for Bridge Rating Through Load Testing*" (NCHRP, 1998, cap. 2, las experiencias españolas, Ministerio de Fomento de España, y el proyecto de graduación del TEC³ en el cual se desarrollaron protocolos de ejecución para realizar las pruebas de carga con el fin de estimar la capacidad de carga del puente sobre el río Purires. Además, para poder recomendar se tuvo que investigar cuales podrían ser los elementos críticos estructurales ya sea por medio algunos programas de análisis estructural o por la bibliografía consultada y así poder determinar las actividades tales como la posición de los vehículos de carga y de los sensores los cuales nos ayudarían a verificar desplazamientos verticales y demás parámetros de diseño. Se hizo un extracto

de las mejores recomendaciones encontradas en dicha bibliografía de modo que se adapten a las condiciones actuales de nuestro país. En general, los procedimientos encontrados y sus recomendaciones se pueden utilizar en nuestro país. En esta investigación se mencionaron las recomendaciones para los tipos de superestructura comúnmente utilizados en nuestro país: es decir, para puentes tipo viga I, T y cajón en viga continua y simple con losa de concreto reforzado embebido, y la cercha de acero de paso superior e inferior. Como se menciona anteriormente España ha desarrollado una serie de recomendaciones de carácter preceptivo en una publicación realizada por la Dirección General de Carreteras del Ministerio de Fomento en cuyo documento se establecen todos los parámetros a seguir para realizar la prueba de la mejor manera posible. Dado esto nace la idea por medio del tercer y último objetivo de recomendar una normativa preceptiva⁴ a nivel nacional para fomentar la idea de realizar estas pruebas de carga en la mayoría de puentes importantes en servicio de nuestro país, así como de las futuras superestructuras por construir. De manera que se puedan monitorear su comportamiento y desempeño a lo largo de su vida útil.

³Cubero Cordero, Osvaldo Josué (2012)

⁴ fuente: Ministerio de Fomento, España. Preceptivo es sinónimo de obligatorio por precepto del gobierno.

Introducción

Dado el estado actual de la infraestructura, en particular de la antigüedad y condición de la mayoría de puentes vehiculares en nuestro país, el gobierno por medio del MOPT y junto con la Agencia de Cooperación Japonesa (JICA) desarrollan inicialmente un Manual de Inspección de Puentes y la herramienta para la administración de puentes SAEP con el fin de conocer el estado actual de los puentes y por medio de este inventario nos ayude a implementar programas de mantenimiento correctivo y / o hacer mejoras en el diseño de la estructura de los puentes acorde a los cambios de volúmenes y características del tránsito vehicular actual. Luego surgen el Lanamme de la UCR por medio de la Ley 8114 y después el proyecto e-Bridge patrocinado por el TEC con la idea de respaldar y cooperar técnicamente en la inspección de los puentes y así dar un seguimiento de la condición de los diferentes elementos estructurales que se compone un puente. Adicionalmente, a estas inspecciones surge la idea de parte del equipo de trabajo del proyecto e-bridge del desarrollo de un procedimiento para realizar las pruebas de carga y como material complementario las recomendaciones de esta investigación con el fin de mejorar dichos procedimientos y así verificar eficientemente el desempeño y comportamiento de la superestructura de los puentes nuevos y en servicio por medio de la aplicación de pruebas de carga en el sitio de modo que se verifiquen los parámetros de diseño y especificaciones de los materiales asumidos previamente en el modelo analítico. Recientemente en Costa Rica se desarrollaron procedimientos para el uso de pruebas con carga en la etapa de recepción de puentes nuevos; realizados independientemente por el TEC (proyecto e-Bridge),el cual recién presento al ente de Acreditación Costarricense por sus siglas ECA la implementación de los procedimientos para ejecutar las pruebas de carga como parte del programa de puentes del proyecto e-Bridge y por su parte la UCR (Lanamme) hizo entrega de una normativa: “Manual de Puentes y Alcantarillas de Costa Rica” al MOPT en noviembre

del 2016, para su revisión, la cual hasta la fecha no ha existido pronunciamiento, correcciones o alguna otra retroalimentación según comentarios del personal de esta institución. Aparte de lo mandado por Ley al Lanamme, la Contraloría General de la República les ordena al Lanamme y al MOPT desarrollar esta normativa. Con esta investigación también se llegará a las recomendaciones necesarias para la formulación de una normativa nacional en el uso de estas pruebas con carga según el tipo de superestructura y material. Lo cual será el objetivo principal de esta investigación.

Las pruebas pueden ser dinámicas o estáticas. La diferencia en utilizar un tipo de prueba u otra se debe primero en relación a los objetivos, de los resultados de la inspección preliminar, disponibilidad de los planos as-built, longitud del puente, y de los parámetros de diseño que deseamos medir, etc. Posteriormente en el desarrollo de esta investigación se mencionarán las recomendaciones en función del tipo de superestructura.

Los procedimientos actuales que se pueden utilizar como guía en nuestro país para realizar dichas pruebas se basan en el *Manual de Evaluación para Puentes de la AASHTO 3era edición 2018 en la sección 8 “pruebas de carga no destructivas”, el Manual for Bridge Rating Through Load Testing (NCHRP, 1998)* el cual es una de las referencias de respaldo que se basa dicho Manual de Evaluación y las recomendaciones dadas por la Dirección General de Carreteras de España perteneciente al Ministerio de Fomento español. España y Suiza son los países que han desarrollado la iniciativa de implementar procedimientos para la aplicación de pruebas de carga en puentes nuevos antes de la recepción y uso; en España estos procedimientos son de carácter obligatorio (preceptivos) utilizarlos de modo que deben incluirse en los planos constructivos y presupuesto. Siguiendo el enfoque español, se utiliza un grupo de carga constituido por camiones, cuyo número y características estarán definidos en el Proyecto de prueba; términos utilizados propiamente por los españoles para referirse a ese procedimiento de carga. El enfoque

suizo ofrece un compromiso entre una prueba de diagnóstico del desempeño y la verificación de la capacidad de carga. No obstante, en Suiza las pruebas dejaron de utilizarse y solo depende del propietario y de la complejidad o innovación del diseño lo que determinara la realización de dichas pruebas. España es el único país europeo donde las pruebas de carga en puentes son de carácter preceptivo. Mientras que en los EEUU a pesar que no son obligatorias las pruebas, se exige que todo puente tenga indicada su capacidad de carga viva máxima a soportar con un factor de seguridad asociado.

En el caso de nuestro país se investigo en varias instituciones tanto publicas como privadas por ejemplo MOPT, CONAVI, LANAMME, CIVCO (proyecto e-Bridge), Municipalidad de Belén y en la empresa privada tal como la Constructora CODOCSA y Puente Prefa. En general, se puede decir que la empresa privada considera que esto elevaría los costos del proyecto. No obstante, durante el desarrollo de esta investigación el CONAVI realizo pruebas de carga estática en el puente sobre el rio Virilla en la ruta 147 conforme a las recomendaciones del documento español mencionado. En forma similar el TEC ha realizado varias pruebas de carga estática.

Se plantean entonces en este proyecto los siguientes objetivos:

Objetivo general:

- Proponer recomendaciones para el uso de pruebas de carga en la etapa de recepción de puentes vehiculares en Costa Rica.

Objetivos específicos:

- Investigar sobre los procedimientos nacionales e internacionales utilizados para pruebas de carga de recepción.

- Proponer recomendaciones según tipo de superestructura y material y sus límites de uso.
- Proponer recomendaciones para una normativa de uso nacional para la aplicación de las pruebas de carga en puentes vehiculares nuevos.

Para el desarrollo de los objetivos propuestos tenemos al alcance el material bibliográfico de apoyo: "*The Manual for Bridge Evaluation*", publicado por la AASHTO 2018, también se utilizo el documento de la "*Manual for Bridge Rating Thru Load Testing*", NCHRP, 1998, number 234, investigaciones realizadas en Suiza⁵, España (Dirección General de Carreteras, Ministerio de Fomento España).

El problema principal en esta investigación consiste en desarrollar las recomendaciones necesarias para la realización de las pruebas de carga en la etapa de recepción de puentes vehiculares nuevos. Para desarrollar las recomendaciones se tomarán como base los tipos de superestructura mas comunes en nuestro país según las estadísticas e inventarios de octubre de 2018 pertenecientes al Proyecto e-Bridge del TEC de una cantidad estimada de 1586 puentes. Acorde a este inventario el 69% son tipo viga, ya sean viga simple o continua, 12% marco rígido, 9% alcantarilla, 6% cercha (inferior o superior), 3% arco, etc., tal como se muestra en la Figura 30. Y según dicho inventario el 37% de los puentes están entre 15m y 50m de longitud total ver Figura 31. La Figura 32 nos dice que el material predominante en estas estructuras es el concreto seguido por el acero. Por lo que los tipos mas comunes en nuestro país están lo de viga simple, viga continua y cercha con longitudes entre 15m y 50m de material sea de concreto o acero; no obstante, fuera de estos tipos de superestructuras se recomienda hacer verificación por medio de las pruebas de carga, de aquellos puentes con un TPD (transito promedio diario) considerable, de la importancia del puente y otras consideraciones técnicas en caso de duda que obliguen a una revisión de los parámetros de diseño y capacidad de carga.

⁵ (Moses, Jean, & Bez, 1994)

Alcances y limitaciones

- Se desarrolla esta investigación con todo aquel material bibliográfico relacionado con las pruebas de carga en puentes encontrado en la base de datos de la biblioteca del Tec.
- Se utiliza solo la información generada en el inventario de puentes del proyecto e-Bridge para seleccionar los tipos de superestructuras mas comunes en nuestro país.
- No se realizaron pruebas de carga para comprobar procedimientos y así dar mejores recomendaciones de uso por cada tipo de superestructura seleccionado debido a limitación económica y por el tipo de contrato de confidencialidad firmado entre los propietarios de los puentes y el Centro de Investigaciones de la Vivienda y Construcción (CIVCO).
- Se nota cierto hermetismo por parte de las instituciones nacionales para obtener información.
- No corresponde en esta investigación verificar los porcentajes de carga máxima recomendados por instituciones internacionales. Sera en próximas investigaciones que se desarrollen los métodos y análisis de riesgos mejores adaptados a nuestro medio.

Marco teórico

Los puentes como algunas definiciones lo indican son el medio para sobrepasar de un lado a otro ya sea sobre un río, fosos y demás sitios. En general es uno de los componentes mas vulnerables de la red vial, la cual es fundamental para la competitividad y traslado de mercancías y personas de un sitio al otro.

Componentes principales Superestructura

Se compone de elementos principales y secundarios, tales como: vigas, cerchas, losas de concreto, vigas diafragma o secundarias, aceras, barandas, y superficie de ruedo.

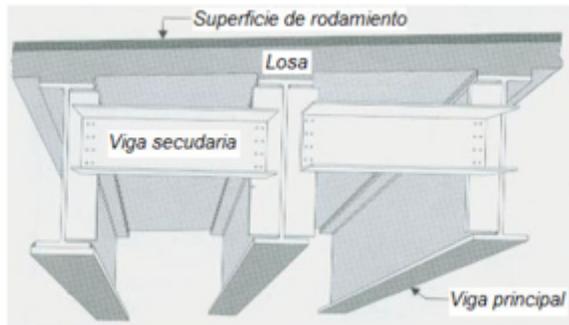


Figura 1. Elementos de una superestructura. (manual de inspección del MOPT)

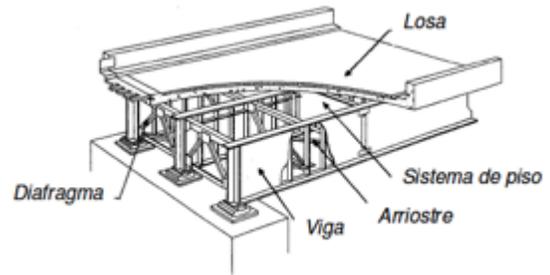


Figura 2. Elementos de superestructura. Viga Tipo I (Manual de inspección del MOPT)

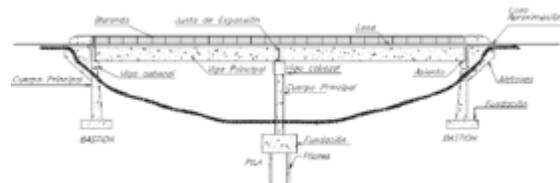


Figura 3. Superestructura. (manual de inspección del MOPT)

Subestructura

Esta compuesta de los bastiones y pilas que son parte de la cimentación, incluso los apoyos.

Clasificación de puentes

Los puentes por su evolución han alcanzado una variedad de tipos, formas y materiales, por lo que su clasificación es complicada y no existe un estándar para hacerlo y los criterios pueden variar. Dentro de las formas para su clasificación tenemos:

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

Se ampliará según su configuración estructural ya que el tipo de prueba con cargas dependerá principalmente de su estructura. Entre los mas comunes en Costa Rica:

- Vigas simples: su configuración se compone de vigas simplemente apoyadas, las juntas de expansión se encuentran al inicio y final del tramo.
- Vigas continuas: las vigas 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.
- Tipo cercha se compone de dos armaduras unidas entre si mediante sistema de piso, diafragmas transversales o portales y los sistema de arriostramiento superior e inferior.

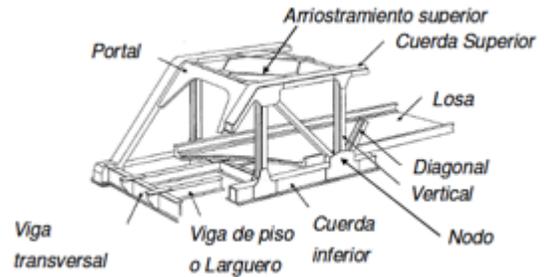


Figura 6. Tipo cercha paso inferior. (manual de inspección del MOPT)



Figura 7. Tipo cercha paso superior. (manual de inspección del MOPT)

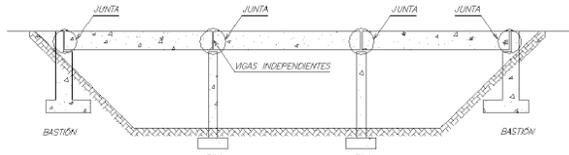


Figura 4. Tipo viga simple. (manual de inspección del MOPT)

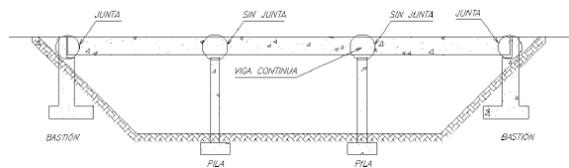


Figura 5. Tipo viga continua. (manual de inspección del MOPT)

Pruebas de carga no destructivas⁶.

En general, las pruebas de cargas se utilizan para cuantificar de manera científica la capacidad del puente y así verificar tanto diseño como especificaciones del modelo analítico. Se les llama pruebas no destructivas ya que se trata de ver la respuesta del puente sujeto a cargas predeterminadas y controladas sin causar cambios en la respuesta elástica de la estructura, es decir no se esfuerza más allá del rango elástico de la estructura.

Básicamente dos tipos de pruebas están disponibles la de diagnóstico o dinámica y la prueba de carga (proof test). Ambos tipos utilizan cargas, instrumentos y cálculos similares; las pruebas de diagnóstico se realizan para ciertas características de respuesta del puente, su respuesta ante las cargas (momentos, fuerza cortante, fuerza axial, esfuerzos y deflexión que ocurre en los elementos estructurales del puente), la distribución de cargas o para evaluar procedimientos analíticos o modelos matemáticos. Las pruebas de carga se utilizan para establecer la capacidad de carga máxima segura del puente, vigilando que el comportamiento de la estructura este dentro del rango elástico de modo que no se desarrollen deformaciones plásticas en los elementos críticos y que puedan recuperar su forma y dimensión después de haber aplicado las cargas. Por lo general estas cargas de prueba están dentro del rango de un 70%⁷ al 85%⁸ de la capacidad máxima estimada en los modelos analíticos.

Mas allá de esta clasificación están las pruebas con cargas estáticas y dinámicas. La prueba con carga estática se conduce usando cargas estacionarias para evitar vibraciones en el puente. La intensidad y posición de la carga se puede cambiar durante la prueba. Mientras que la prueba dinámica se conduce con cargas que varían con el tiempo o cargas en movimiento que provocan vibraciones en el puente. Las pruebas dinámicas se pueden usar para medir los modos de vibración, frecuencias (para respuesta ante sismos y amortiguamiento), la capacidad de carga dinámica y para obtener la carga histórica, los rangos de esfuerzo para la

evaluación de la fatiga, contribución de la sección transversal de los elementos. Las pruebas de carga son mayormente ejecutadas como pruebas estáticas. Y estas últimas son las que nos vamos a concentrar en esta investigación para desarrollar recomendaciones según los tipos de superestructura mas comunes en nuestro país y material del puente como se menciono anteriormente.

Recomendaciones internacionales generales

Previo a la realización de las pruebas con carga, se requiere de una evaluación completa de la condición física del puente de la mano con los planos constructivos as-built y de la memoria de cálculo. Se supone además que por ser un puente nuevo no ha sufrido daño alguno.

La selección del tipo de prueba ya sea estática o dinámica depende principalmente de los objetivos del propietario del puente, de los criterios de los profesionales encargados de la prueba, del tipo de superestructura y materiales. No obstante, se pueden mencionar una serie de recomendaciones generales dadas por el (Ministerio de Fomento, Dirección General de Carreteras, 1999) de España y por (NCHRP, 1998) que a continuación se van a mencionar.

En general, los pasos a seguir para la realización de una prueba de carga son los siguientes según ((NCHRP), 1998):

1. Inspección preliminar de la estructura.
2. Desarrollo del programa de la prueba de carga.
 - 2.1. establecer los objetivos de la prueba.
 - 2.2. seleccionar el tipo de prueba (diagnóstico o prueba de carga "proof test").
3. Planificación y preparación para la prueba de carga.
 - 3.1. mediciones de los efectos de la carga.
 - 3.2. selección del equipo.
 - 3.3. requerimientos del personal.
 - 3.4. Requerimientos de la carga:
 - 3.4.1. magnitud de la carga
 - 3.4.2. aplicación de la carga y los patrones de carga.

⁶ AASHTO, 2018.

⁷ (Dirección General de Carreteras, 1999)

⁸ (Moses, Jean, & Bez, 1994)

- 3.4.3. Combinaciones de carga a utilizar
- 3.4.4. Tipo de camión y peso a utilizar.
- 3.4.5. Seguridad y control del tránsito de vehículos.
- 4. Ejecución de la prueba de carga.
 - 4.1. Monitoreo del comportamiento del puente.
 - 4.2. Repetición de los resultados; en especial en los casos de carga crítica para asegurarse que los elementos recuperen su condición inicial.
 - 4.3. Monitorear los cambios de temperatura.
 - 4.4. Evaluación de los resultados de la prueba de carga.
- 5. Evaluación de los resultados de la prueba.
 - 5.1. Confiabilidad de la prueba
 - 5.2. Diferencias entre los magnitudes obtenidas y las estimadas en el modelo analítico.

Desarrollo del programa para la prueba de carga.

Previo al programa de la prueba de campo debe realizarse una inspección preliminar y estimación de la capacidad teórica del puente por medio del modelo analítico. Las condiciones de la inspección deben incluir medidas para determinar factores como desplazamientos, ancho de grietas, desalineamientos y movimientos en las juntas y soportes. Las mediciones deben hacerse para determinar las cargas muertas actuales incluyendo las capas adicionales de pavimento y otras modificaciones. En suma, la condición de las juntas de expansión, movimientos térmicos inusuales, la condición de las aproximaciones y otros factores que puedan tener efecto en la prueba.

Los objetivos del programa para la prueba de carga deben estar claramente definidos para seleccionar eficientemente el tipo de prueba y carga. Por ejemplo, si el objetivo de la prueba es para confirmar suposiciones hechas en relación a la distribución de la carga lateral, entonces una prueba de diagnóstico es necesaria (NCHRP, 1998, Cap. 4)

Selección del tipo de prueba.

- El tipo de prueba con carga depende de varios factores incluyendo el tipo de superestructura, disponibilidad de los diseños, detalles as-built, condiciones del puente, resultados de la inspección preliminar y la clasificación, disponibilidad del equipo y fondos y los objetivos de la prueba. En general, las pruebas de diagnóstico se recomiendan si hay suficientes datos e información en los detalles as-built del puente, dimensiones y materiales disponibles. Las pruebas de diagnóstico no son apropiadas cuando la magnitud del esfuerzo de la carga muerta y otros esfuerzos permanentes no pueden estimarse confiablemente. Mientras que las pruebas de carga estática se usaran cuando no esta disponible dicha información; pero de igual manera puede utilizarse esta ultima para estimar la capacidad de carga del puente. Otro factor determinante es el nivel de riesgo. Generalmente, la prueba de carga de diagnóstico se conduce próxima a un nivel de carga por servicio apropiada con poco riesgo asociado. De otro manera, si no se conduce apropiadamente la prueba de carga el puente tiene un riesgo alto.

Planificación y preparación para la prueba de carga.

- Una *planificación y preparación* de las actividades para la prueba se requieren para asegurar que los objetivos de la prueba se cumplan. En este punto, los efectos de la carga para ser medidos en el sitio durante la prueba son identificados, se seleccionan los instrumentos, los requerimientos del personal se establecen, y las cargas objetivo son definidas, todo con las medidas de seguridad pertinentes.
- Las *mediciones de los efectos de la carga* se deben seleccionar en consistencia con los objetivos de la prueba. Los desplazamientos, rotaciones, sobreesfuerzos, anchos de grietas y

movimientos de las juntas son los típicos efectos de la carga, los cuales podrían ser directamente monitoreados durante la prueba. El pandeo y los esfuerzos axiales se puede determinar de las mediciones de sobreesfuerzo.

- La *selección del equipo*. Los instrumentos deben ser seleccionados en consistencia con los objetivos de la prueba, con los efectos de la carga para ser medidos y la disponibilidad del equipo. La mediciones pueden ser recopiladas manualmente o automáticamente dependiendo de factores tales como tamaño y tipo de puente, localización de los instrumentos, número de lecturas y el tipo de carga a usar.
- *Requerimientos del personal*. un ingeniero calificado debe ser el responsable de la planificación y ejecución de la prueba de carga. Se requiere experiencia en pruebas e instrumentación, investigación de campo y conocimiento del comportamiento estructural de puentes.

Requerimientos para la carga.

- La magnitud, configuración y posición de la prueba con carga variara con base en el tipo de puente y el tipo de prueba a conducir. Sea de diagnóstico o de ensayo como se menciona anteriormente.
- La magnitud debe ser tal que provoque esfuerzos en todos los elementos críticos del puente. La puede ser con pesos muertos estacionarios o camión cargado completamente de peso y configuración de ejes conocidos o la carga aplicada con gatas hidráulicas. Para pruebas de diagnóstico, la carga es por lo general suficientemente inferior de modo que uno o dos camiones cargados son adecuados. Mientras que la carga requerida para la prueba de ensayo es considerablemente superior y posiblemente no este disponible para cada propietario del puente.
- Aplicación de la carga se debe localizar en el puente en posiciones preseleccionadas para obtener el mayor efecto posible de la carga a estudiar. De manera alternativa las cargas en vehículos en movimiento deben ser usados en varias posiciones

transversales sobre el puente para producir el mayor efecto de carga en cada punto.

- La configuración de las cargas por eje debe ser medida previo al inicio de la prueba y puede ser determinada por basculas portátiles en el mismo camión. Al completar la prueba, la carga total colocada en el puente debe ser confirmada por medio del pesaje de todos los componentes la carga máxima de ensayo.

Seguridad durante las pruebas.

Un elemento de riesgo esta inherente en todas las pruebas con carga, especialmente en las prueba de ensayo de puentes cuyo comportamiento no esta claramente identificado de antemano. El propietario del puente y el ingeniero que hizo la inspección preliminar son conscientes del posible daño estructural, seguridad de personal, etc.



Figura 8. imagen prueba de carga con camiones sobre Rio Fernando Reig. en puente tipo atirantado. Fuente: Ministerio de Fomento de España.

Evaluación de los resultados de la prueba

La evaluación se realizará en concordancia con los objetivos establecidos y según los parámetros que se quieren medir como se menciona anteriormente ya sea por medio de la prueba estática o dinámica. Es importante poder comparar los resultados obtenidos con los modelos teóricos o suposiciones en los cálculos previos a la construcción. En resumen, los factores que contribuyen a la confiabilidad de los resultados son: la experiencia del personal, el tipo y alcance de los instrumentos utilizados durante la prueba, incluyendo el uso de cualquier aparato de medida redundante, la repetición de los resultados para el mismo caso de carga, las condiciones de temperatura y la compatibilidad de los efectos medidos con aquellos predichos por la teoría (NCHRP, 1998, Cap. 4).

Luego de la evaluación se debe hacer un reporte el cual describa los resultados de la investigación de campo, los procedimientos utilizados, tipo y localización de los instrumentos, descripción de la prueba y los cálculos obtenidos. Dicho reporte debe contener lo siguiente según (NCHRP, 1999, Cap. 4):

- Identificación de la estructura del puente.
- Propósito de la prueba de carga.
- Condición de la inspección.
- Análisis previo de capacidad.
- Instrumentación.
- Descripción de la prueba de carga.
- Mediciones de los efectos de la carga.
- Observaciones de la prueba.
- Cálculos finales de la capacidad del puente.

La prueba de carga de recepción para una estructura implica una serie de operaciones consistentes en la reproducción de uno o varias combinaciones de carga sobre el puente antes de su apertura, con el fin de verificar diseño y construcción de manera satisfactoria y segura. A continuación, se menciona la propuesta de recomendaciones dadas por el (Ministerio de Fomento, Dirección General de Carreteras, 1999):

CAMPO DE APLICACION:

- en el caso de puentes nuevos, la prueba estática será preceptiva.
- Las pruebas podrían ser dinámicas o estáticas. Estas últimas serán siempre obligatorias, y las primeras serán preceptivas en aquellas estructuras en las que se sea necesario verificar que las vibraciones que se producirían no afectan el desempeño de la obra.
- La obligatoriedad de estas pruebas se entenderá para puentes con un TPD considerable, tipo de superestructura y luz entre apoyos desde los 12 metros en adelante. Otra condición adicional para realizar las pruebas dinámicas es cuando tengamos luces mayores o iguales a los 60 metros y en aquellos casos cuyo diseño sea inusual o se utilicen nuevos materiales.

DIRECCION Y REALIZACION DE LA PRUEBA:

- La realización de estas pruebas será llevada a cabo por personal calificado, cuya dirección estaría a cargo de un director de la prueba, el cual estará presente durante todo el desarrollo de la obra.
- El director de la prueba será responsable de finalizar cada combinación de carga y una vez que considere realizada en todas sus fases, de por terminada la prueba. Deberá, según se requiera, ordenar la suspensión de la misma si lo exige el comportamiento de la estructura.
- El director de la prueba será quien redacte el informe de la prueba de acuerdo a los resultados obtenidos.

PLANTEAMIENTO DE LA PRUEBA:

- La prueba de carga debe estar incluida en el proyecto de la obra. Constara de una memoria de calculo, planos con el tipo de vehículo a utilizar en las pruebas, peso de la carga, especificaciones y presupuesto.
- Se definirán los aspectos relativos a la realización de la prueba de

carga, tanto como a las combinaciones a utilizar, instrumentación, medios auxiliares, valores teóricos previstos para las medidas experimentales y apertura de fisuras.

- Todos los vehículos utilizados en una prueba serán preferiblemente iguales entre si en cuanto forma, peso y dimensiones. Para alcanzar el nivel de carga deseado, se aconseja disponer los camiones con su peso máximo autorizado y variar únicamente el número y la posición relativa de los vehículos.

➤ *SISTEMA DE MEDIDA:*

- magnitudes a medir y la localización de los puntos de medida serán los especificados en el proyecto de la prueba. Las medidas deberán efectuarse de tal manera que permitan una correcta evaluación del comportamiento de la estructura acorde también con los objetivos preliminares.
- Se tomarán medidas de niveles con instrumentos topográficos para luego hacer comparaciones.
- En general, se debe medir la flecha en todos los centros de vano y el descenso en líneas de apoyo.
- El número de puntos de medida en cada sección será en función del ancho del tablero y del tipo de estructura.

➤ *DETERMINACION DEL MODULO DE ELASTICIDAD DEL CONCRETO REFORZADO:*

- En puentes de concreto reforzado se recomienda realizar el ensayo a compresión de los cilindros y así obtener la gráfica de tensión-deformación.

➤ *EFFECTOS DE LAS TEMPERATURAS:*

- Para evitar efectos de la temperatura, se recomienda reducir la mínimo el tiempo de aplicación de la carga

➤ *COMBINACIONES DE CARGA:*

- Se definirán de tal forma que se cargue convenientemente las distintas zonas de la superestructura y se logren los porcentajes deseados de los esfuerzos máximos.

➤ *FORMA DE APLICACIÓN DE LA CARGA:*

- Los movimientos de los vehículos en la fase de carga y descarga se harán en forma lenta de tal manera de provocar efectos dinámicos no deseados.
- Antes de proseguir con la siguiente combinación de carga se debe descargar totalmente la estructura.
- Aumento controlado de carga progresiva para ir registrando la respuesta de la estructura.
- Criterio de estabilización de la carga:
 - Después de colocarse en la posición prevista la carga, se realizarán medidas a los 10 y 20 minutos (f_{10} y f_{20}) de la respuesta instantánea de la estructura con los instrumentos o aparatos de medida situados en los puntos significativos (ver figura).
 - Una vez lograda la estabilización, se vuelven a tomar las lecturas finales en todos los puntos.
 - De igual manera el proceso de descarga se espera para que los valores de las medidas se estabilicen.

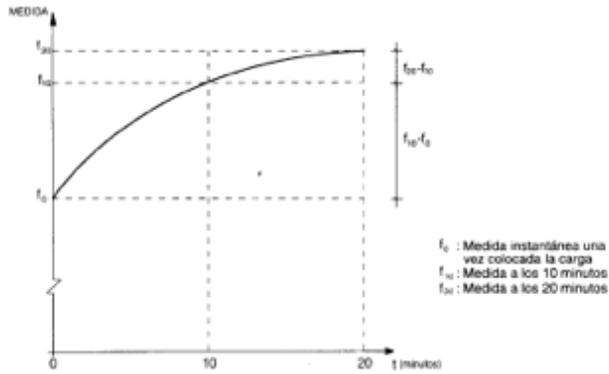


Figura 9. Proceso de Carga. Fuente: Ministerio de Fomento, Dirección General de Carreteras,1999)

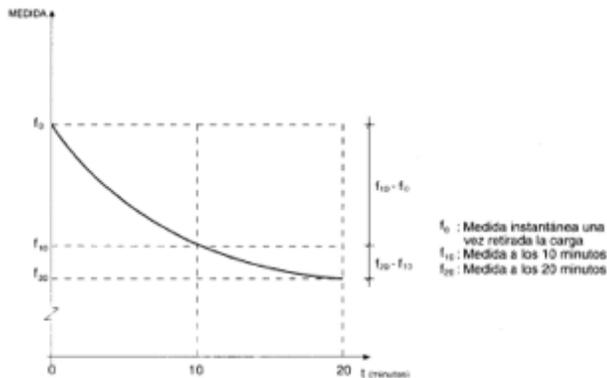


Figura 10. Proceso de descarga. Fuente: Ministerio de Fomento, Dirección General de Carreteras,1999)

➤ **CRITERIO DE REMANENCIA:**

- Estos valores remanentes corresponden a la diferencia entre los valores estabilizados después de descarga y los iniciales antes de la carga (ver figura)
- Los límites de remanencia máximos permitidos son:
 - Para puentes de concreto reforzado un 20%.
 - Para puentes de concreto pretensado o mixto de un 15%.

⁹ Ministerio de Fomento. Dirección General de Carreteras,1999.

- Para puentes de acero de un 1
- **CRITERIO DE ACEPTACION DE LA PRUEBA⁹**
 - En el caso de estructuras de concreto las flechas máximas obtenidas después de la estabilización, no superen en mas de un 10% a los valores estimados. Y de igual manera para las estructuras de acero. En general, la estructura debe recuperar su forma o posición inicial; siempre y cuando la deformación no supere el rango elástico del material.

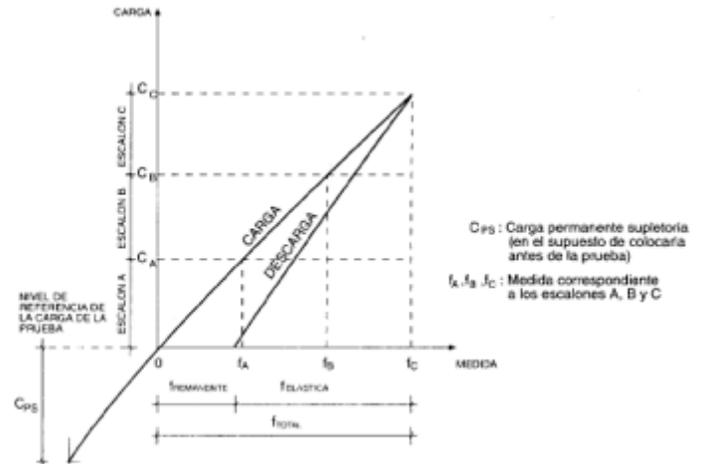


Figura 11. Proceso de Carga. Fuente: Ministerio de Fomento, Dirección General de Carreteras,1999)

Cuadro 1. Resumen de factores que influyen en la carga de prueba				
Variable/ Tipo de puente	Vig a y los a	Losa de concret o	Arriostr es (de acero)	Vig a de caj a
Acción compuesta involuntaria	P, I/T	N/A	S, I/T	P, I/T
Participación de parapetos y guías	P, A	P, A	N/A	P, A
Diferencias de las propiedades del material en sitio y las asumidas	S, I/T	S, I/T	S, I/T	S, I/T
Participación de arriostres y miembros secundarios	S	N/A	S	S
Diferentes características de soporte y continuidad no deseada	S, I/T	S, I/T	S, I/T	S, I/T
Efectos del análisis y distribución de carga	P, A	P, A	P, A	P, A
Efectos de la esquina	S, A	P	N/A	S, A

Fuente: ((NCHRP), 1998). *Manual for Bridge Rating Through Load Testing*

Simbología:

P= factor primario

S= factor secundario

A= incluido en análisis convencional

I/T= inspección y prueba requeridas

N/A= no aplica

Factores que influyen en la capacidad de carga de los puentes.

Se sabe que existen factores que pueden influir en la capacidad de carga del puente. La manera como los diferentes elementos estructurales estén conectados influye como se distribuye la carga de prueba aplicada. Por ejemplo, para determinar cuanto de la prueba de carga es soportada por los miembros secundarios, los parapetos y losa se deben colocar instrumentos adicionales para medirlo. A continuación, se resumen los factores ver Cuadro 1 (NCHRP, 1998, Cap.3):

Elementos críticos de las superestructuras y su comportamiento

Generalidades

Previo a la realización de las pruebas de carga es importante conocer las superestructuras, sus elementos estructurales críticos, los cuales toman la carga vehicular y peso propio de la estructura para luego transmitirlo a la subestructura como los pilares y bastiones. Por lo que es importante verificar su comportamiento y compararlo con las estimaciones del modelo analítico. Para realizar esto se necesita someter a las estructuras a pruebas de carga viva y verificar por medio sensores de medición los parámetros de diseño estimados. De ahí que para llevar a cabo dichas pruebas exitosamente es necesario seguir protocolos¹⁰ y las recomendaciones de esta investigación para su efectiva ejecución. Las recomendaciones pueden ser generales y en

¹⁰ (Cubero Cordero, 2012)

algunos casos específicas dependiendo de la complejidad estructural del puente. Como se ha mencionado anteriormente las pruebas pueden ser estáticas y dinámicas básicamente y el fin primordial es el de verificar diseño, especificaciones y obtener la capacidad real de carga del puente. Dichas pruebas en la etapa de recepción de un puente recién construido son primordiales ya que se puede dar un seguimiento y monitoreo desde el inicio de su vida útil y así tomar decisiones rápidas y efectivamente en caso de ocupar una rehabilitación y mantenimiento preventivo y no correctivo como se ha venido haciendo actualmente.

Para conocer los elementos estructurales de la superestructura se dividen en:

- Elementos secundarios
- Elementos principales

Los elementos secundarios como los diafragmas y arriostres son aquellos que distribuyen adecuadamente las cargas, generan mayor rigidez lateral y torsional restringiendo las deformaciones de los elementos principales, como los largueros o vigas principales, para mayor eficiencia, por ejemplo, los diafragmas en sentido transversal, los arriostros en planta inferior y en planta superior que unen entre si la vigas principales ver Figuras 12. En general, los arriostros y diafragmas se utilizan para la estabilidad lateral de las vigas y del sistema en caso de que vigas de peralte considerable. Los elementos principales soportan las cargas transferidas directamente por el sistema de piso y además transmiten los esfuerzos resultantes hacia la subestructura a través de los apoyos. Esta investigación se concentrará básicamente en solo tres tipos de superestructuras:

- Viga simple
- Viga continua
- Cercha (superior e inferior)

En general los sistemas de viga simple y continua se pueden componer de las mismas vigas principales. La diferencia la marca como se apoyan, sean apoyo simple o continuo. Las vigas principales

mas comunes sometidas a esfuerzos de flexión y cortante son:

- Viga I
- Viga T
- Viga cajón

Las cuales no se discutirán ampliamente en esta investigación.

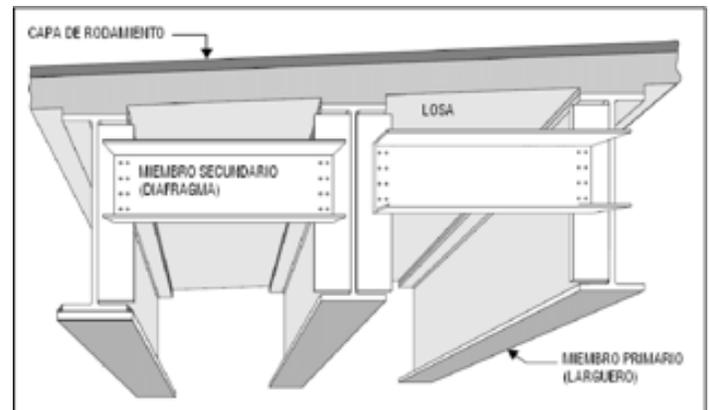


Figura 12. elemento primario el larguero y el secundario el diafragma.

fuelle:

<https://www.researchgate.net/figure/Superestructura-tipica-de-un- puente48>

Superestructura viga simple

Definición:

La viga principal esta apoyada simplemente en cada extremo a un bastión o muro con juntas de expansión. El comportamiento de esta estructura es el estudiado en estática como viga entre dos apoyos. Entonces la flexión máxima se dará en el centro del claro como muestra la Figura 14. Sin embargo, hay que considerar el efecto de distribución de la carga sobre la superficie de rodamiento del puente ver Figura 15 y 16. Ya que por lo general son varias la vigas que soportan dicha superficie como se muestra en la Figura 15. Es decir, las magnitudes de los momentos

aumentan conforme se acercan las vigas a donde esta la carga y viceversa cuando se alejan. Y este conocimiento nos ayuda a entender el uso de los sensores de medición y donde colocarlos. El cuadro 2 muestra los tipo de viga principal utilizados en algunos puentes nacionales.

Cuadro 2. Tipos de vigas principales, material, y elementos críticos estructurales		
Tipo de viga	material	Elementos críticos
Viga I	Acero y concreto prefabricado y preesforzado	Viga principal entre los apoyos, y algunos de los elementos secundarios como arriostres o diafragmas
Viga T	Concreto reforzado y preesforzado	Viga principal compuesta con Refuerzo longitudinal y aros. No requiere de arriostres y diafragmas.
Viga cajón	Acero y concreto	Viga principal. No requiere de arriostres y es muy resistente a la torsión.

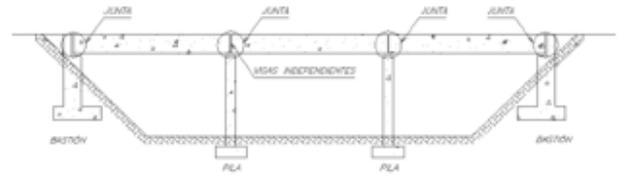


Figura 13. Superestructura tipo viga simple. Se notan 3 vigas apoyadas. Fuente: Manual de inspección de puentes del MOPT.

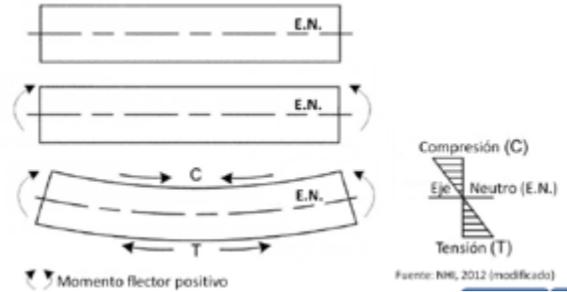


Figura 14. comportamiento Momento flector en una viga simplemente apoyada. fuente: NHI, 2012

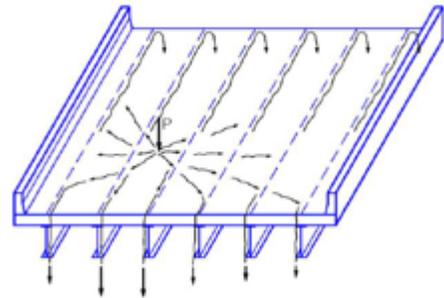


Figura 15. tipo viga I múltiple. Distribución de la carga "P" lateral concentrada tal como una carga de llanta a través de la losa hacia varios largueros y luego a los soportes de la viga. Las flechas representan la magnitud de los esfuerzos esperados. La tercera viga de izquierda a derecha absorbe mas % de la carga aplicada. fuente: Federal Highway Administration, December 2015.

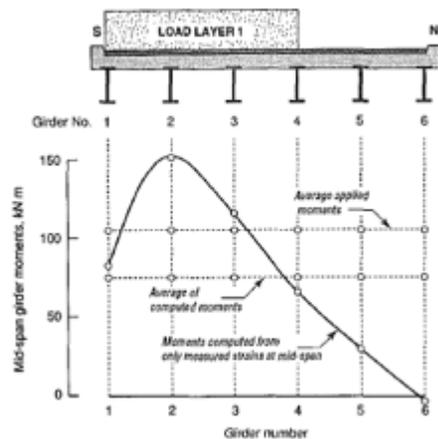


Figura 16. sección transversal de un puente tipo viga I múltiple. Distribución de momentos de la carga concentrada a través de la losa hacia varios largueros y luego a los soportes de la viga I múltiple. la viga 2 es la mas cargada y la 6 la menos cargada. fuente: By Baidar Bakht, member ASCE *Ultimate Load Test of Slab-on-girder Bridge*.

Superestructura viga continua

Definición:

A diferencia de la viga simple apoyada, la viga continua esta soportada por mas de dos apoyos que pueden ser bastiones y pilares en un puente.

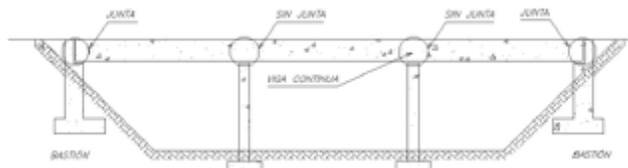


Figura 17. superestructura de viga continua en un puente: Manual de Inspección de Puentes. MOPT, enero 2007.

Elementos críticos y comportamiento.

El comportamiento de la viga sometida a cargas vivas y muerta es diferente en sus apoyos como se muestra en las siguientes figuras: se generan momento negativos en los apoyos. No obstante, los desplazamientos verticales o flechas se pueden medir en los puntos de inflexión máximos de los diagramas de momento y deflexión como se muestra en las Figuras 24, 25, 26 serian aproximadamente los puntos proyectados hacia la viga donde se colocarían los sensores (en este caso el LVDT como se vera mas adelante). Similar a la viga simple, la viga continua puede construirse de concreto pretensado y postensado y de acero con sistema de arriostres y diafragmas. En algunos casos la sección transversal de la viga de acero puede ser de sección variable. Por lo general este tipo de superestructura se utiliza para claros mayores a 50 m. Un ejemplo de puente de viga continua de acero de sección variable es el que se encuentra sobre el Rio Chirripo en la ruta 32 con una longitud total de 430m ver Figura 18.



Figura 18. puente #17 superestructura tipo viga continua de acero sección variable sobre el rio Chirripo ruta fuente: <https://www.nacion.com/el-pais/infraestructura/mopt-descarta-riesgo-en-puente-sobre-rio-chirripo-en-ruta-32/HDEMNQNI6JBRBO7KIIP4AAD4WE/story/> periódico La Nación 28 mayo 2015,



Figura 19. ejemplo diagrama de momentos en viga continua en un puente: programa Winbeam.

La carga de prueba se colocará en los puntos estimados de deflexión máxima tal y como lo indica el modelo analítico (ver figura 24 a 26).

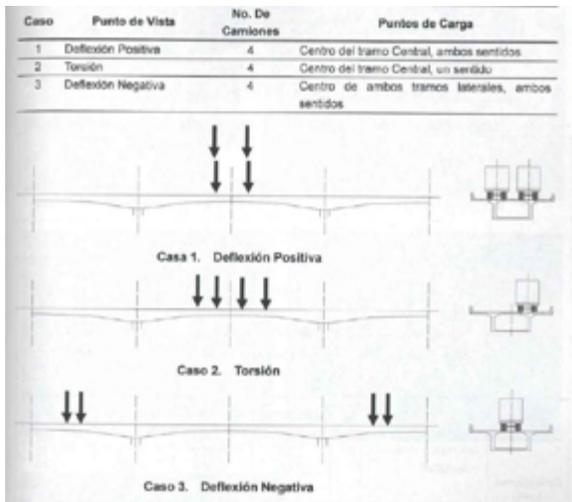


Figura 20 prueba estática puente sobre río Chirripó # 26 en superestructura de concreto tipo cajón continuo. Caso 1: deflexión positiva. Caso 2: torsión. Caso 3: deflexión negativa. Fuente: MOPT, febrero 2007. *El estudio sobre la el desarrollo de capacidad en la planificación de rehabilitación, mantenimiento y administración de puentes basado en 29 puentes de la red de carreteras nacionales en costa rica. Informe final 2 de 3 texto principal.*

Superestructura tipo cercha

Definición:

Se compone de dos armaduras unidas entre si mediante un sistema de piso, diafragmas transversales o portales y los sistemas de arriostramiento superior e inferior. Dichas armaduras son estructuras rígidas bidimensionales formadas con elementos rectos independientemente sometidos a esfuerzos de tensión y compresión que están unidos por juntas o nodos. Existen tres tipos principales:

- o Cercha paso inferior: cuando el paso vehicular es por debajo de la estructura de la cercha.

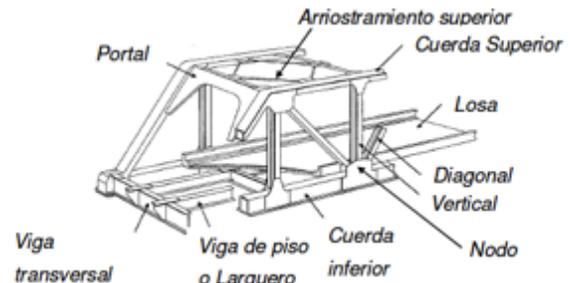


Figura 21 cercha de paso inferior. Fuente: Manual de inspección de puentes del MOPT.

- o Cercha de paso superior: cuando el paso vehicular se sitúa por encima de la estructura de cercha.



Figura 22. cercha de paso superior. Fuente: Manual de inspección de puentes del MOPT.

- Cercha de media altura: es una cercha de paso inferior sin ningún sistema de arriostramiento superior; los mas comunes en Costa Rica son el puente modular “Bailey” y el “pony”.

Elementos críticos y comportamiento.

Este tipo de superestructura tiene dos ventajas grandes estructurales:

- Las fuerzas de los elementos principales son axiales
- El sistema de alma abierto permite el uso de peraltes mayores generales que su equivalente en vigas solidas. Ambos factores ayudan a economizar en material y peso muerto reducido, y por consiguiente un peralte mayor, menor deflexión y mayor rigidez de la estructura.

Por lo general, esta estructura se utiliza para claros entre 90 y 550m¹¹. Se recomienda chequear la estructura antes de realizar una prueba de carga. Estas estructuras se han dejado de utilizar por factores económicos. Los elementos críticos en una

estructura como esta se pueden fácilmente identificar por medio de un modelo analítico. Y así colocar los sensores de medición en estos puntos.

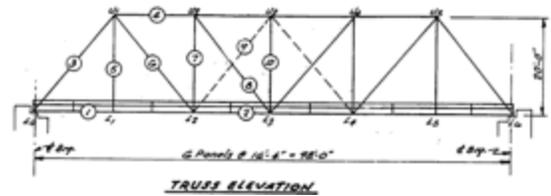


Figura 23. cercha de paso inferior. Ejemplo de marcación y colocación de sensores en los elementos críticos en tensión y compresión para verificar su capacidad. Fuente:

¹¹ (M. Barker & A. Puckett, 2013)

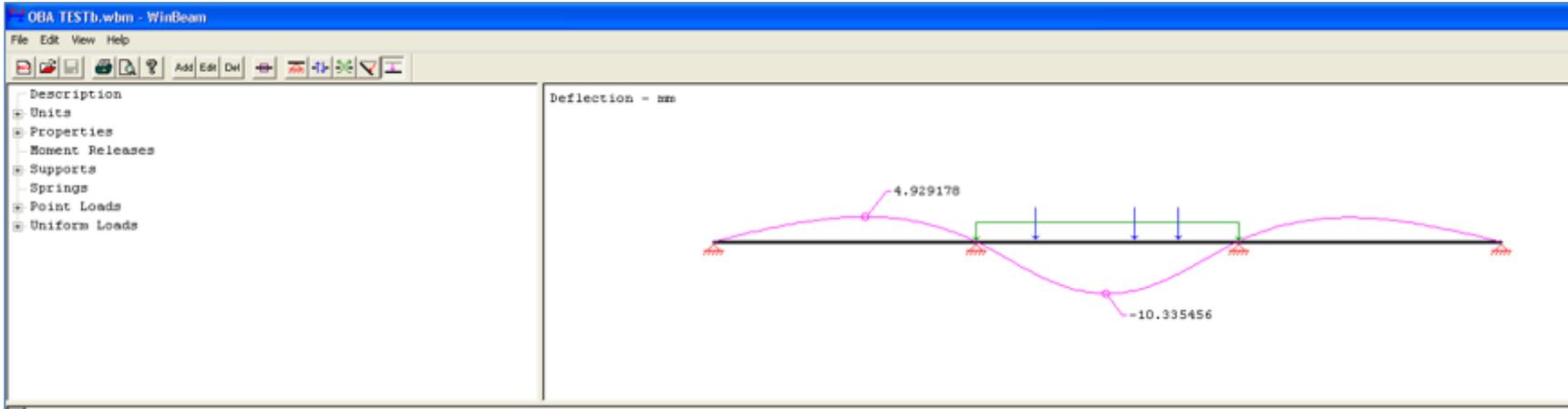


Figura 24 diagrama de deflexiones por la carga en el tramo central en la viga continua en un puente se indican en el dibujo los puntos máximos de deflexión. Fuente: programa Winbeam.

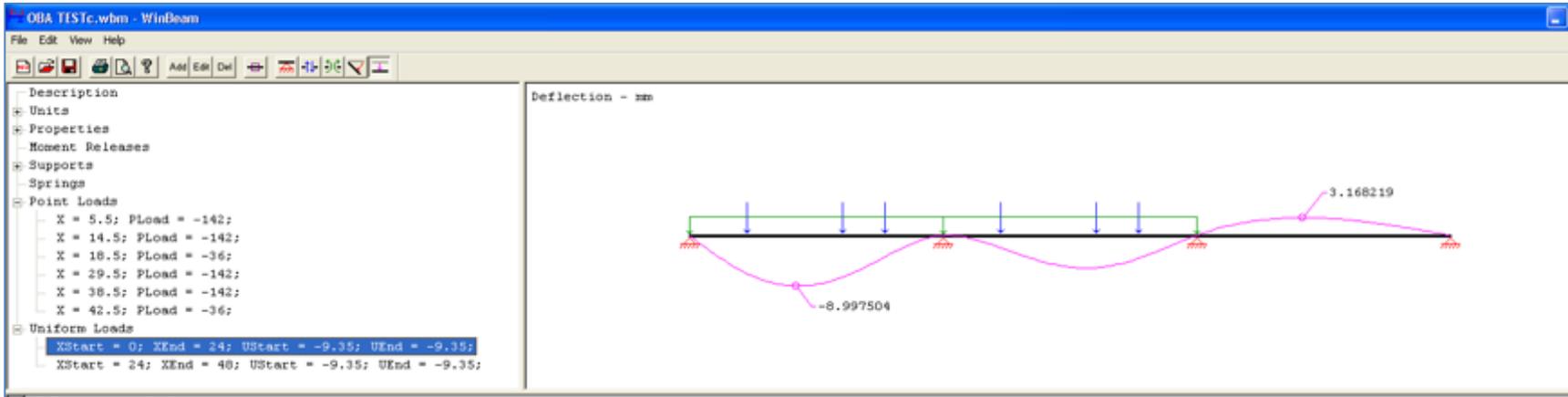


Figura 25 diagrama de deflexiones por la carga en el tramo extremo y central de la viga continua en un puente se indican en el dibujo los puntos máximos de deflexión. Fuente: programa Winbeam.

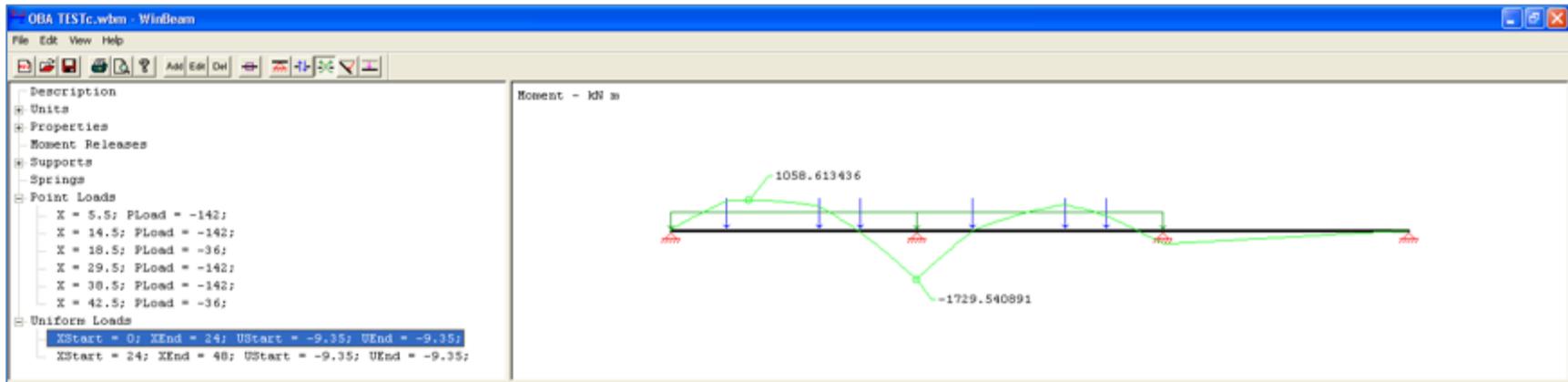


Figura 26 diagrama de momentos por la carga en el tramo extremo y central de la viga continua en un puente se indican en el dibujo los puntos de momento máximos. Fuente: programa Winbeam.

Uso de sensores para monitorear parámetros de diseño.

Los sensores en las pruebas de carga se utilizan para medir los siguientes parámetros de diseño:

- Esfuerzos en los componentes del puente.
- Desplazamientos absolutos o relativos de los componentes.
- La rotación absoluta o relativa de los componentes.

Antes de realizar la prueba, el ingeniero debe determinar los objetivos de la prueba, los tipos y mediciones que serán realizadas. Se analizará la mejor localización de los instrumentos según importancia del elemento a verificar sea de orden principal o secundario como se menciona anteriormente. Ver Cuadro 3 para los tipos de sensores.

Mediciones típicas:

- Galgas de Deformación unitaria (strain gages)

Los sensores de deformación unitaria se colocan usualmente en los elementos críticos para monitorear su respuesta, Figura 28. También, se seleccionan puntos para validar el modelo analítico. Esto se logra colocando los sensores en miembros críticos en tensión y compresión. Subsecuentemente, las respuestas obtenidas pueden ser comparadas con los valores estimados en el modelo.

- Desplazamientos

Estas mediciones son importantes para determinar el comportamiento lineal de la estructura mientras las cargas se incrementan y también para determinar si los desplazamientos son recuperables cuando se quita la carga. Las deflexiones verticales por lo general se requieren a la mitad del claro del puente. Las mediciones de los desplazamientos relativos verticales entre la parte superior e inferior de las alas de las vigas pueden establecer la integridad de la sección. En algunos casos como en los soportes de los apoyos el desplazamiento horizontal puede ser útil en la determinación si esta funcionando como se estimó en el diseño.

- Rotaciones y otras mediciones

La curva elástica de un miembro ladeado se puede desarrollar midiendo las rotaciones a lo largo de su longitud.

Dependiendo de los objetivos de la prueba, otra información puede medirse como la temperatura y la velocidad del viento.

Existen en el mercado una gran variedad de instrumentos para monitoreo de estructuras, algunos se embeben en el concreto, otros son temporales y nos ayudan a tomar lecturas de desplazamientos o deflexión de los elementos como los LVDT (Linear Variable Differential Transformers) (transductor) ver Figura 27. En el caso de los sensores LVDT se colocan en los elementos críticos donde se producen los esfuerzos y momentos máximos según previo análisis del modelo analítico para monitorear las deflexiones de dichos elementos. Para los puentes de viga I

múltiple se colocarían los sensores en el ala inferior (ver Figura 29). Como se muestra en la Figura 16 la viga 2 absorbe el máximo momento y luego se distribuye la carga de izquierda a derecha, es decir de la viga mas cargada hacia la menos cargada a la derecha (viga 6). Los mas comunes para la medición de la tensión son las galgas de resistencia eléctrica, indicadores de tensión mecánica, y los transductores, cuales transforman el desplazamiento a un cambio proporcional de voltaje eléctrico en un circuito.

Las galgas se fijan con adhesivo, soldadura o medios mecánicos a los miembros del puente en puntos seleccionados. El principio de funcionamiento de la medición de tensión se basa en el cambio de la resistencia eléctrica de la galga causado por su cambio en longitud cuando el miembro al cual se fija sufre la tensión.



Figura 27. Sensor de desplazamientos (LVDT)
Fuente: BDI (raw data. Refined results)

Figura 28. Deformacion unitaria (Strain gages)
fuente: BDI (raw data. Refined results)

Cuadro 3. Tipos de sensores	
tipo	uso
LVDT	Deflexión de estructuras en puentes. Monitoreo de grietas. Movimiento de juntas de expansión.
Strain gages (galgas de tensión)	Tensión en elementos estructurales, pretensados y post tensados

En la Figura 29 se muestran las posiciones de las galgas según el parámetro de diseño que deseamos medir o verificar.



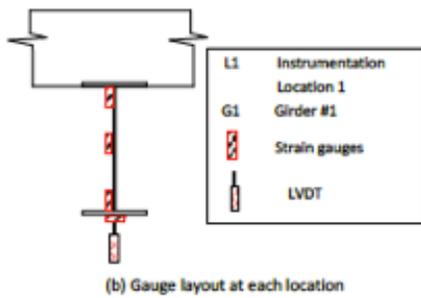
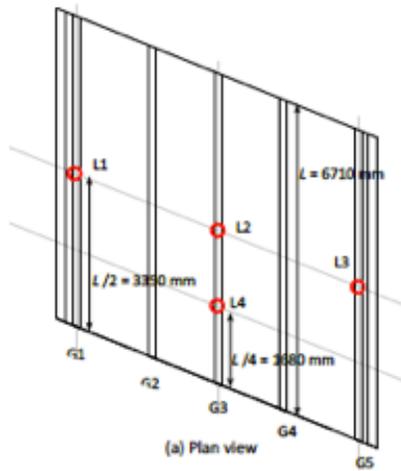


Figura 29. a) vista planta de ubicación de sensores, b) sección transversal viga principal tipo I colocación de los sensores según puntos máximos de momentos, eje neutro, en zona de tensión, compresión. fuente: Harik, I, Peiris A., (2016)

Metodología

El desarrollo de esta investigación se llevo a cabo básicamente en tres etapas según los objetivos propuestos desde un inicio a saber:

- a. Indagar los procedimientos nacionales e internacionales utilizados a la fecha con las pruebas de carga.

Para esta etapa se hizo una investigación de los posibles procedimientos nacionales e internacionales utilizados actualmente para las pruebas de carga. Para ello se realizaron entrevistas personales y vía correo electrónico con la ayuda de un cuestionario, como se muestra a continuación, a funcionarios del MOPT (de la Dirección de Puentes), Municipalidad de Belén y la empresa constructora CODOCSA y con ello se conocieron los puntos de vista, y condiciones actuales sobre el tema de las pruebas de carga en nuestro país.

Por otra parte, la investigación a nivel internacional se realizó con ayuda de la base de datos de la biblioteca del TEC, la ayuda del personal de la biblioteca y la búsqueda exhaustiva en internet por medio de las referencias encontradas en esas bases de datos; como research papers, investigaciones privadas, investigaciones por medio de Asociación Americana de Ingenieros Civiles (ASCE), la AASHTO, la Administración Federal de Carreteras (FHWA) del departamento de carreteras de EEUU entre otras organizaciones. Además, hubo respuesta vía correo electrónico de varias instituciones publicas europeas, las cuales explicaron en forma breve sus procedimientos, entre ellas Noruega, Suiza y Austria. Dichos procedimientos no incluyen las pruebas de carga ya que consideran suficiente seguir los códigos de construcción y de diseño de puentes junto con las pruebas de laboratorio de los materiales utilizados en la construcción; solo en casos de duda y que el diseño se innovador o diferente a lo tradicional. encontró además un documento de referencia con recomendaciones en el Ministerio de Fomento de España, en el cual se mencionan paso a paso todas las recomendaciones necesarias para llevar a

acabo le ejecución de las pruebas de carga así también como una norma Suiza, la cual se utilizo como referencia para la realización de las recomendaciones.

También se uso como referencia el Manual de Evaluación de Puentes de la AASHTO,2018 y las recomendaciones de la NCHRP, 1998.

Questionario.

- a. ¿Qué experiencia han tenido sobre el tema de pruebas con cargas?
- b. ¿Saben que son las pruebas de carga en puentes vehiculares?
- c. ¿Siguen alguna normativa nacional o internacional en caso de hacer dichas pruebas?
- d. ¿Cuál procedimiento tienen para la recepción de puentes vehiculares nuevos antes de ser puesto en servicio? O si las pruebas son posteriores a la puesta en servicio del puente, es decir, tiempo después de que han transitado vehículos.
- e. ¿Qué tipo de carga utilizan en este procedimiento, si aplica? Especifique.
- f. ¿son pruebas estáticas o dinámicas? ¿Cual utilizan?
- g. ¿cree que son de utilidad estas pruebas previas antes de ser puestos en servicio los puentes? ¿Cual podría ser el objetivo(s) de aplicar estas pruebas?
- h. ¿Como diseñadores, en caso que lo fueran, que reacción inmediata tienen cuando se menciona que el puente que han diseñado y construido va a ser sometido a pruebas para verificar sus diseños y especificaciones?

Luego se realizo un cuadro comparativo que se muestra en el anexo (ver Cuadro 4a,4b,4c y 4d) el cual resume lo indagado en cuanto a los procedimientos y legislación nacionales e internacionales en el uso de pruebas de carga. A continuación, se muestran tanto el cuestionario y el Cuadro 1.

- b. Proponer recomendaciones según el tipo de superestructura y material y sus límites de uso.

Para poder recomendar fue necesario conocer los diferentes tipos de superestructuras y los elementos críticos, los cuales debemos identificar y entender su comportamiento al aplicar una carga, para ello se hizo un análisis con la metodología FMEA (Failure Mode Effects Analysis) la cual nos ayudo a identificar los elementos críticos según el tipo de superestructura ver cuadro 6.

Para poder simplificar la investigación y enfocarla solamente en los tipos mas comunes de superestructura en nuestro país se acudió por ayuda al equipo de profesionales del proyecto e-Bridge el cual nos brindo las estadísticas mencionadas en la introducción mas la solicitud especifica según cada tipo de superestructura tal como se muestra en el Cuadro 5. Y con base en esto se desarrollan las recomendaciones para este objetivo.

Luego para ubicar los puntos de inflexión de un elemento estructural como una viga se utilizo como medio ilustrativo el programa Winbeam el cual nos da las magnitudes y ubicación de los parámetros de diseño tales como momento flector, cortante y desplazamiento vertical en dicho elemento.

- c. Proponer recomendaciones básicas para el desarrollo de una normativa nacional para el uso de pruebas de carga.

Para lograr este objetivo se realizo una recopilación bibliográfica de las recomendaciones y procedimientos generales utilizados en países como España, Suiza, EEUU y con la ayuda de un proyecto de graduación del TEC; en el cual se trato de averiguar la capacidad de soporte de carga de un puente.

Luego se realiza la propuesta de recomendaciones para nuestro país producto de haber estudiado toda la información bibliográfica; no fue parte de los objetivos realizar esta prueba, aunque lo ideal hubiera sido complementar esta información con la ejecución de al menos una prueba de carga. Por ultimo se dan las recomendaciones básicas necesarias para la redacción de una normativa nacional la cual contenga lo primordial para la ejecución de las pruebas las cuales serán de carácter obligatorio.

Cuadro 4a. Resumen de procedimientos y legislación nacional e internacional de las pruebas de carga.					
Institución	Papel o función	¿solicitan prueba con carga antes de la recepción?	Tipo de prueba (estática o dinámica)	Breve descripción del procedimiento o actual y/o comentarios	¿Qué servicios ofrecen?

Cuadro 4b. Resumen de procedimientos y legislación internacional de las pruebas de carga.					
País	Institución encargada	¿son obligatorias las pruebas?	Mencionan la prueba estática	Mencionan la prueba dinámica	Breve descripción del procedimiento o actual y/o comentarios

Cuadro 5. Tipos de superestructuras mas comunes en C.R.					
Tipo de superestructura	Nombre	Ruta	Material viga principal y tipo sección	Especificación carga viva de diseño	Longitud del claro (15m -50m)

Cuadro 6. Análisis de elementos críticos por medio de FMEA

Tipo de superestructura	Elementos críticos	Función	Modo de falla potencial	Efectos locales de falla	Efecto final en la superestructura	Probabilidad de ocurrencia	severidad	Detección (uso de sensores)	Nivel de riesgo

Resultados

Dado que esta es una investigación mayormente bibliográfica, se mencionará todo lo encontrado tanto a nivel nacional como internacional. A continuación, se hace un resumen de lo investigado correspondiente a cada uno de los objetivos y luego se hablará sobre las recomendaciones internacionales principalmente, ya que en nuestro país no se han desarrollado plenamente los procedimientos; aunque ha habido intentos por parte del CONAVI, MOPT y algunas pruebas de carga realizadas previamente por el equipo de trabajo del Proyecto e-Bridge del TEC.

Condición actual nacional e internacional.

En el transcurso de esta investigación se pudieron distinguir tres grupos relacionados con el diseño y ejecución de proyectos de puentes en nuestro país a saber:

- *Los propietarios del proyecto* son principalmente el MOPT, CONAVI y Municipalidades. El CONAVI de ser necesario subcontrata bajo cartel de licitación la etapa de diseño. Y lo mismo sucede con las Municipalidades, las cuales por lo general contratan el diseño.
- *Diseñadores y Constructores*, en especial las constructoras de puentes, solo se encargan de ejecutar la obra, los cuales, en la mayoría de los casos, son adjudicados por medio de carteles de licitación. Pocas veces se les ha solicitado prueba de carga. Y no están de acuerdo a realizar estos

procedimientos ya que consideran que elevan los costos del proyecto.

- *Los laboratorios de control de calidad y principalmente los que están adscritos a las*
- *universidades públicas* tales como el CIVCO (con su proyecto e-Bridge) en el TEC y Lanamme de la UCR. Estos últimos intervienen solo con solicitud de los propietarios o en casos especiales por orden del Gobierno en caso que haya duda de las condiciones del puente.

El MOPT ha realizado pruebas de carga estática en dos puentes sobre el Río Chirripo con la ayuda y experiencia del grupo JICA. Por su parte el CONAVI recién realizó una prueba estática sobre el puente Río Virilla en la ruta 147 en el mes de marzo de este año. El procedimiento seguido parcialmente fue el recomendado por Ministerio de Fomento de España. Sin embargo, no utilizaron sensores de medición, como los sugeridos en esta investigación, sino que utilizaron teodolito para medir los desplazamientos verticales de las vigas principales de la superestructura tipo cajón. En caso de las municipalidades, tal como Municipalidad de Belén no tienen procedimiento ni mucho menos haber ejecutado pruebas de carga; solo se realizan pruebas de calidad de los materiales por laboratorios de materiales seleccionados por la misma municipalidad y sin embargo en la mayoría de las ocasiones los informes de calidad de materiales están por cuenta del contratista encargado de ejecutar la obra. El TEC recién acaba de introducir en sus proyectos de pruebas con carga, un procedimiento.

Se muestra en el Cuadro 4 un resumen-comparativo en el cual se mencionan las diferentes instituciones tanto nacionales como internacionales y se mencionan sus funciones y acciones en relación a las pruebas de carga. Se puede observar que en nuestro país las únicas instituciones interesadas en este tema son el TEC (proyecto e-Bridge) y Lanamme UCR. Además, no hay una

regulación y norma que prácticamente las obligue a realizarlas tal como el caso de España que es preceptivo la ejecución de las pruebas. En el ámbito internacional en general no se utilizan las pruebas de carga excepto el diseño sea innovador y cuando quizás haya dudas del proceso constructivo. Se encontró que los países del norte de Europa investigados no utilizan las pruebas de cargas, sino que utilizan los estándares de construcción y las normas ISO para la verificación de la calidad de los materiales por medio de laboratorios de calidad. En el caso de Noruega se utilizan en caso de que el diseño sea innovador o bien haya dudas de construcción. En Suiza se utilizaron la pruebas prácticamente por la iniciativa del personal del Instituto de Tecnología Federal de Suiza; sin embargo, una vez que este personal se acogió a la pensión se dejaron de realizar las pruebas. España es el único país europeo en el cual las pruebas son obligatorias. La institución encargada de esto es la Dirección General de Carreteras del Ministerio de Fomento de España. El cual redactó un documento completo con una serie de recomendaciones para la ejecución de las pruebas de carga. Por último, en el continente americano EEUU es el país que ha desarrollado por medio de la AASHTO 2018 el Manual de Evaluación de Puentes en el cual viene un sección dedicada a las pruebas no destructivas en puentes ya sean estas estáticas o dinámicas. Sin embargo, estas pruebas no son obligatorias excepto sea innovador el diseño o pues haya duda del comportamiento del puente.

...

cuadro 4a. Resumen de procedimientos y legislación actual nacional e internacional en el uso de pruebas de carga.

institución	papel o función	¿solicitan prueba con carga antes de la recepción?	tipo de prueba		breve descripción del procedimiento actual y / o comentarios	¿Que servicio ofrecen?
			prueba estática (proof test)	prueba dinámica		
CONAVI	<ul style="list-style-type: none"> • administra los proyectos por medio de la gerencia de contratación, gerencia de construcción. por medio de la ley 7798 (29 de mayo de 1998) (ley de creación del consejo de vialidad). es un órgano con desconcentración máxima, adscrito al MOPT. tendrá personería jurídica instrumental y presupuestaria para administrar el fondo de la red vial nacional, así como para suscribir los contratos y empréstitos necesarios para el ejercicio de sus funciones. entre sus funciones: • planear, programar, administrar, financiar, ejecutar y controlar la conservación y la construcción de la red vial nacional en concordancia con los programas que elabore 	no tienen procedimientos todavía.	la realizaría ya sea e-bridge o Lanamme bajo solicitud	no se obtuvo información	solo se hace comprobación de calidad de los materiales conforme avanza la obra por medio de subcontrato con un laboratorio privado. en general, el contratista hace solicitud indicando que el proyecto está finalizado, se propone visita al sitio donde se verifica contra planos y cambios realizados. en la recepción final están presentes todos los involucrados del proyecto a fin de firmar acta de recepción del proyecto. no se hacen pruebas ya que todavía no se incluye en el cartel de licitación.	regulación, ejecución y control de obras viales

	<p>la dirección de planificación MOPT.</p> <ul style="list-style-type: none"> fiscalizar la ejecución correcta de los trabajos, incluyendo el control de calidad. 					
MOPT	<p>ley 3155 (5 de agosto de 1963 crea el MOPT) ente rector. recomendar a sus superiores sobre la emisión de lineamientos técnicos sobre diseño, construcción, rehabilitación, mantenimiento y conservación de la red vial cantonal y nacional. Colaborar a solicitud de sus superiores con otras instituciones en la elaboración de anteproyectos, diseño y planos constructivos de puentes. planificar, construir y mejorar las carreteras y caminos. mantener las carreteras y colaborar con las municipalidades en la conservación de los caminos vecinales.</p>	casi nunca	<p>si. sobre el puente río Chirripó rutas 4 y 32 en el año 2006C</p>	no	<p>la recepción de puentes nuevos le compete al CONAVI en las rutas nacionales y a las municipalidades en las rutas cantonales. considera de utilidad realizar estas pruebas ante la duda por capacidad del puente debido a alguna situación extrema en el proceso constructivo.</p>	regulación

Cuadro 4b. Continuación resumen de procedimientos y legislación actual nacional e internacional en el uso de pruebas de carga.

institución	papel o función	¿como actúan en el caso de puentes?	¿realizan prueba estática (proof test)?	¿realizan prueba dinámica ?	breve descripción del procedimiento actual y / o comentarios	¿que servicio ofrecen?
--------------------	------------------------	--	--	------------------------------------	---	-------------------------------

TEC (proyecto e-bridge)	grupo de investigación multidisciplinario financiado por el Tec y adscrito CIVCO en el área de puentes.	intervención bajo solicitud solamente	si	si	realiza pruebas dinámicas y estáticas en puentes ya en servicio. bajo solicitud del gobierno o la empresa privada	ejecución de las pruebas. estudio y recomendaciones
UCR (Lanamme)	laboratorio de la UCR, recibe recursos de la ley 8114	libre intervención	si	si	pruebas dinámicas. entregaron al MOPT normativa, misma que está en proceso de revisión en el MOPT. les favorece la ley 8114	ejecución de las pruebas. estudio y recomendaciones.
Municipalidad de Belén	gobierno local. Administra y regula obras públicas del cantón de Belén. recién autonomía por ley 9329 (ley especial para la transferencia de competencias: atención exclusiva de la red vial cantonal. bajo esta ley es responsabilidad la atención plena y exclusiva de la red vial cantonal en la planeación, programación, diseño, administración, ejecución y control, conservación, señalamiento, demarcación, rehabilitación, reforzamiento, reconstrucción, concesión y operación de conformidad con el plan vial de conservación y desarrollo quinquenal de cada municipio. amparados también por la ley 8114.	pueden hacerlo. pero no utilizan la opción.	no	no	la misma empresa constructora contratada realiza autocontrol de calidad. se les pide informes de los resultados de la pruebas de calidad de los materiales. Los diseños los hacen bajo cartel por la lenta respuesta del MOPT.	fondos del estado para la ejecución de obras de infraestructura

Cuadro 4c. Continuación resumen de procedimientos y legislación actual nacional e internacional en el uso de pruebas de carga.

Empresa	Papel o función	¿como actúan en el caso de puentes?	¿realizan prueba estática (proof test)?	¿realizan prueba dinámica?	Breve descripción del procedimiento actual y / o comentarios	¿que servicio ofrecen?
<p>Empresa Constructora CODOCSA</p>	<p>ejecutar obras públicas y privadas</p>	<p>realizarían las pruebas solo si esta incluida en el cartel de licitación. se limitan a ejecutar la obra básicamente y no hubo comentario por parte de esta empresa.</p>	<p>si una vez. para un proyecto del ice.</p>	<p>no</p>	<p>comentario: no es común la realización de pruebas de carga. en pocos proyectos han sido especificadas. no necesariamente estas pruebas son de utilidad. en particular por los costos que implicaría en Costa Rica. considera que la normativa en costa rica es limitada y acudieron a normas internacionales para el uso. las experiencias fueron satisfactorias en el uso. no son diseñadores directos.</p>	<p>ejecución de obras y diseño según cartel de licitación</p>

Cuadro 4d. continuación resumen de procedimientos y legislación actual nacional e internacional en el uso de pruebas de carga.					
país	institución encargada	¿son obligatorias las pruebas?	mencionan la prueba estática	menciona prueba dinámica	breve descripción del procedimiento actual y / o comentarios
Suiza	sociedad suiza de ingenieros. (norma sia-505 261-2014:"actions sur les structures porteuses") y por personal del instituto de tecnología federal de suiza (swiss federal inst. of technology)	anteriormente se realizaban. en la actualidad no las realizan excepto las solicite el propietario del puente.	modelo de carga #1	en modelo de carga #3	prueba completa según lo que se requiera verificar. se rigen por el norma suiza sia-261 "actions sur les structures porteuses" se mencionan dos modelos de carga.
España	ministerio de fomento. dirección general de carreteras	si. aplican para puentes con claros mayores de 12 metros. las menores el director de obra decide.	si. cuando el claro o luz entre apoyos es mayor o igual a 12 metros	si pero depende si se quiere conocer comportamiento de la estructura. y el claro es mayor de 60 metros	prueba completa según lo que se requiera verificar. hay un manual de recomendaciones para el uso de estas cargas implementado por ministerio de fomento español. no se menciona en su regulación la AASHTO
México	secretaria de comunicaciones y transportes. instituto mexicano de transportes	si.es una norma.	si	si	consideran que modelo de cargas vivas de la AASHTO no refleja la realidad de las cargas que transitan por sus carreteras, obteniendo momentos flexionantes y fuerzas cortantes inferiores con modelo de la AASHTO.
Austria	federal ministry republic of Austria	no	no	no	no tienen procedimiento de pruebas con carga sin embargo la calidad durante la ejecución y planeación la realiza un

					ingeniero estructural y un supervisor externos. adicional hay una inspección interna antes de la apertura.
Noruega	Norwegian Public Roads Administration	no	no	no	<p>no tienen ninguna regulación para las pruebas de carga en puentes. no obstante, como miembros del comite europeo para la estandarización (cen), tiene una serie de regulaciones referidas como estándares europeos (en) que forman la base para el diseño estructural. entonces en lugar de las pruebas, tienen una serie de regulaciones para el diseño. empresas externas controlan el diseño y los cálculos asociados. todos los elementos de un puente (concreto, placas de acero, rieles, etc) son producidos y probados según los estándares de ejecución por ejemplo iso- y/o (en) y sus propios manuales. adicionalmente, se hacen inspecciones (por terceros e internamente) durante la construcción. más aún como una regulación nacional se hacen inspecciones principales cada 5 años</p>

					adicional a la inspección anual de cada puente.
Estados Unidos de América	AASHTO aplica para todos los estados. no obstante, cada estado tiene regulaciones propias. tal como el estado de california por su condición sísmica.	no	si	si	los procedimientos del manual de evaluación de la AASHTO se pueden utilizar para realizar las pruebas de carga y de diagnóstico.

Recomendaciones según tipo de superestructura y material.

Las recomendaciones para realizar las pruebas según el tipo de superestructura y material se pueden generalizar, no obstante, se analizaron los de tipo de viga simple, continua y cercha superior e inferior, ya que son los tipos de superestructuras más comunes en nuestro país ver Cuadro 5 y las Figuras 30 a 32 las cuales se generaron con la información suministrada del inventario de puentes del proyecto e-Bridge. Por lo que esta investigación se concentrara en dichos tipos de superestructuras (viga simple, viga continua, cercha inferior o superior, materiales de concreto y acero). Previo a las recomendaciones es necesario identificar los elementos críticos de estas superestructuras. Lo cual se puede lograr con un modelo analítico. Otra manera de poder identificar los elementos críticos es por medio de la metodología (Failure Mode Error Analysis) FMEA tal como se muestra en el cuadro 6.

A continuación, a modo ilustrativo la aplicación de las recomendaciones mencionadas del uso de pruebas de carga para los tipos de superestructuras mencionados en el Cuadro 5. Se escogen solo 3 puentes representativos del tipo de superestructura, material y por especificación de carga viva de la AASHTO de dicho cuadro para ilustrar las posibles recomendaciones ver Cuadros 6,7 y 8:

- Puente sobre el Río Olla Cinco
- Puente sobre el Río Uvita y
- Puente sobre el Río Aranjuez

Estas recomendaciones son el producto de haber investigado y extraído lo relevante de la bibliografía consultada.



Figura 30. Tipos de superestructuras mas comunes en Costa Rica. Tipo viga es el mas común.
 Fuente: Inventario de puentes de rutas nacionales, octubre 2018. Grupo de investigación e-bridge, Escuela de Ingeniería en Construcción.
 Instituto Tecnológico de Costa Rica

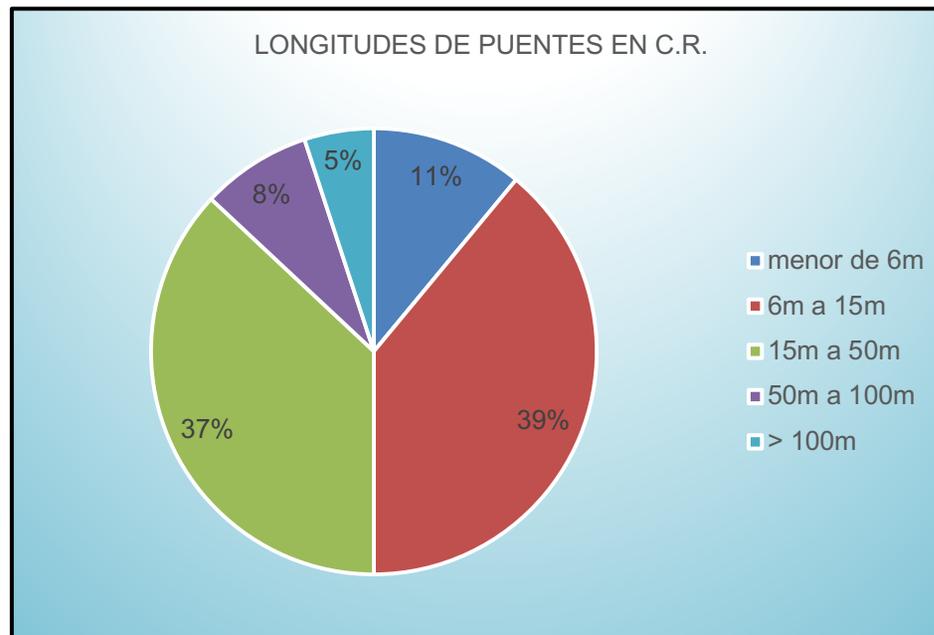


Figura 31. Longitud de puentes en C.R. Mayor cantidad de puentes entre 6m y 15m de longitud y le siguen los de 15m a 50m. Fuente: Inventario de puentes de rutas nacionales, octubre 2018. Grupo de investigación e-Bridge, Escuela de Ingeniería en Construcción. Instituto Tecnológico de Costa Rica

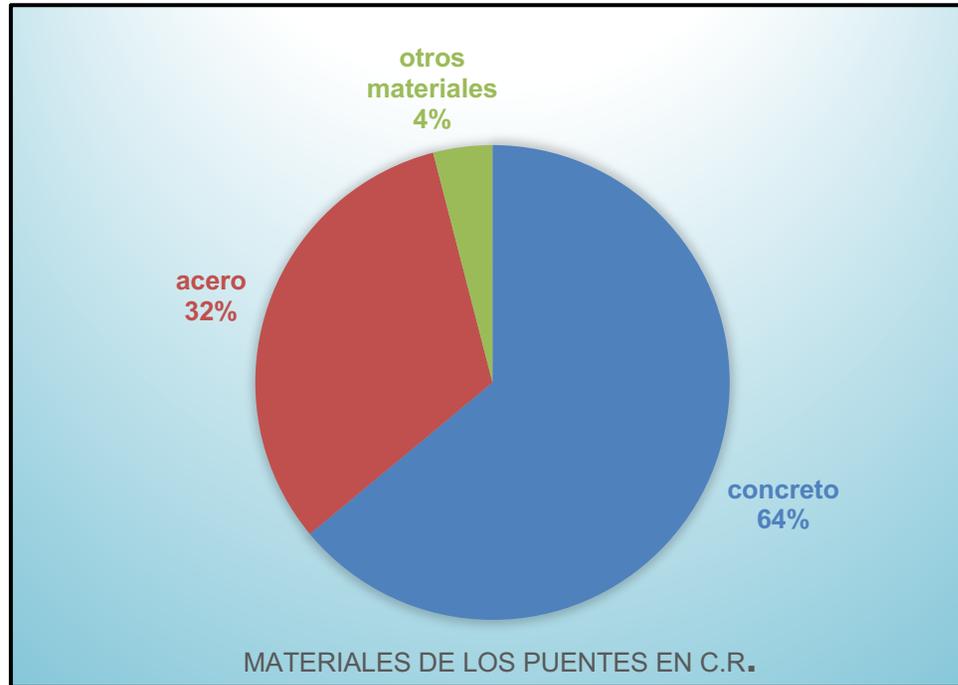


Figura 32. Materiales de los puentes. Material predominante es el concreto seguido por el acero.
Fuente: Inventario de puentes de rutas nacionales, octubre 2018. Grupo de investigación e-Bridge, Escuela de Ingeniería en Construcción.
Instituto Tecnológico de Costa Rica

Cuadro 5. Ejemplos de tipos de superestructuras mas comunes en C.R.

Tipo de superestructura	Nombre	Ruta	Material viga principal y tipo sección	Especificación carga viva de diseño	Longitud del claro (15m -50m o mayores)
viga simple	Río Olla Cinco	2	Acero, Tipo I (93cm)	HS15-44	30.48
viga continua	Río Caracol	2	Acero. Tipo I (90cm)	Carga viva no conocida. AASHTO 1953 6 Ed.	72
Viga continua	Río Uvita	34	Concreto Preesforzado, Tipo I, (180cm)	Carga viva no conocida	102.8
Cercha inferior	Río Aranjuez	1	Acero, (h=4.57m)	H15-44. AASHTO 1941 3 Ed.	87.78
cercha superior	Río Volcán	2	Acero, (h=8.8m)	HS15-44. AASHTO 1953. 6Ed.	77.42

Fuente: www.mopt.go.cr. Aplicación SAEP. Inventario de puentes de rutas nacionales,

Cuadro 6. Ejemplo de recomendaciones en el uso de pruebas de carga.					
Puente Río Olla Cinco					
Tipo de superestructura:	Ruta	Especificación carga viva de diseño	Tipo viga principal, material y cantidad	Longitud (m)	Numero de tramos
Viga simple	2	HS15-44	Tipo I, acero, 4	30.48	1
<p>Recomendaciones y observaciones con base en la información de este puente y lo investigado en la bibliografía:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Tener claro los objetivos de la prueba y los parámetros de diseño que se desean verificar. Cabe mencionar que dada la longitud de este puente no sería de provecho una prueba dinámica. No obstante, se podría verificar en el sitio por medio del tránsito en circulación alguna información dinámica del puente en caso de inconformidad de los usuarios por la vibración del puente o cualquier otro aspecto dinámico de la estructura. • Realizar planeamiento de ejecución según los protocolos mencionados en proyecto de graduación ¹². • Inspeccionar previamente el estado general de la superestructura por fisuras, grietas, en la superficie de ruedo y vigas principales y elementos secundarios. • Modelar fielmente la estructura en sitio en programa análisis estructural. Identificar en el modelo los puntos de inflexión máximos para luego colocar los sensores de medición. Ver Figura x para posible planos de colocación de los sensores. • Determinación de la carga a utilizar según la información de la carga viva de diseño supuesta (HS15-44) junto con el modelo analítico. Según las recomendaciones españolas esta carga debe ser de un 70% de la magnitud máxima con la idea de mantenerla siempre dentro del rango elástico. • Realizar prueba de carga estática según lo normado por documento de la Dirección General de Carreteras de España ver marco teórico. • Forma de cargar y descargar la estructura según recomendaciones españolas. • Ubicar en plano de sitio la posición de los vehículos según las combinaciones de carga que hayamos decidido realizar. Ver Figura 35 como posibles combinaciones de cargas de pruebas. • Utilizar al menos 4 vehículos de carga de 3 ejes tipo vagoneta tipo Mack. Pesarlos en estación de pesaje mas cercana y tener comprobante. • Programar la duración de la prueba con oficina de tránsito para posibles cierres y control del tránsito. • Luego de descargar la estructura. Verificar con los mismos sensores que no haya esfuerzos residuales y que haya recuperado la su posición inicial sin deformaciones considerables • 					

¹² (Cubero Cordero, 2012)



Figura 33. Puente Rio Olla Cinco Vista lateral. Fuente: MOPT, programa de administración de puentes SAEP



Figura 34. Puente Rio Olla Cinco Vista inferior superestructura. Fuente: MOPT, programa de administración de puentes SAEP

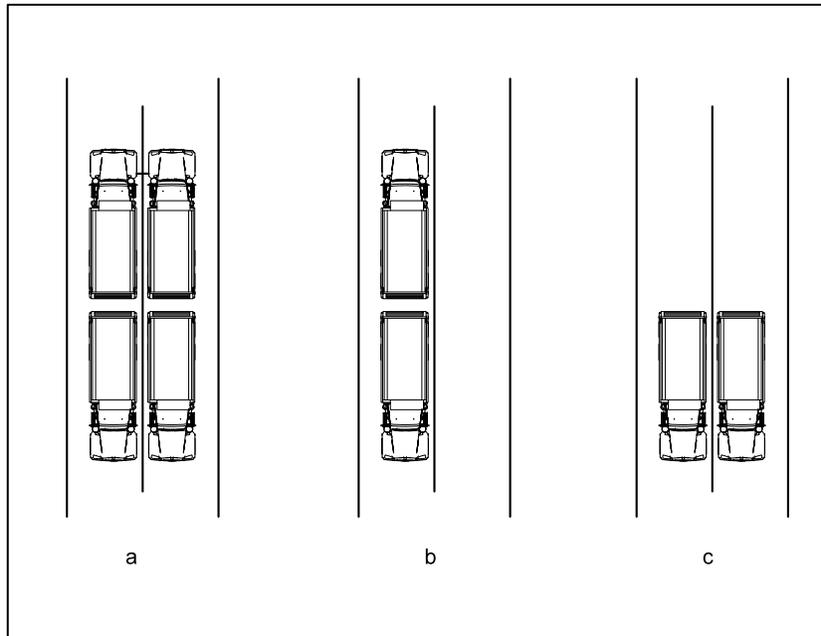


Figura 35. Tres combinaciones de prueba de carga de los camiones sobre la losa del puente para el puente Rio Olla Cinco. a) produce el momento máximo en la parte central de la viga principal; b) flexión viga extrema; c) momento máximo sobre la pila. Fuente: propia.

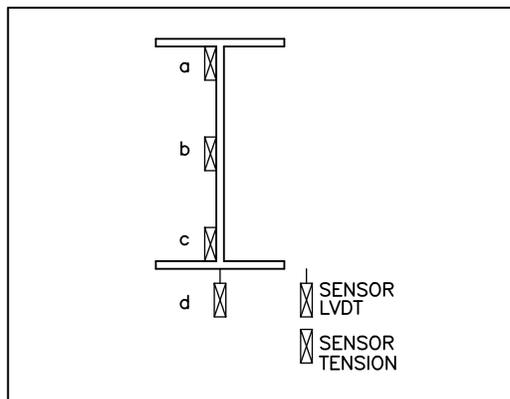


Figura 36. sección transversal viga principal del puente Rio Olla Cinco. Posición de los sensores. Fuente: propia.

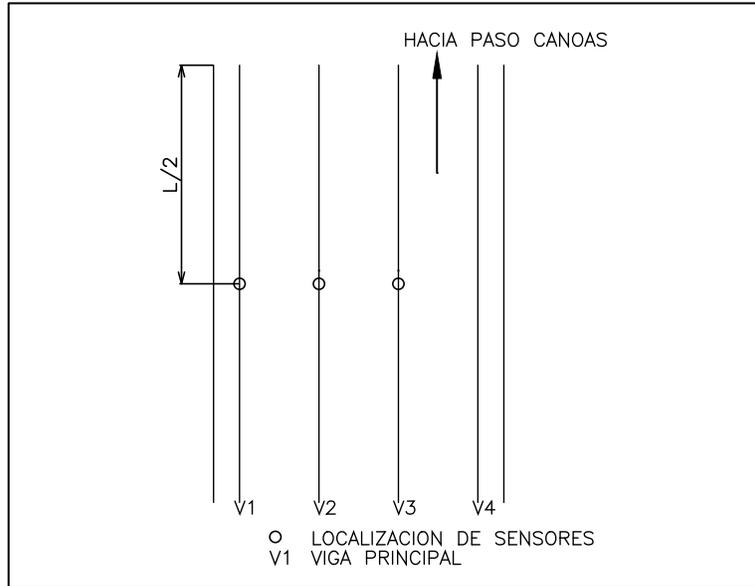


Figura 37. Sugerencia para la localización a $L/2$ del claro central de sensores sean LVDT o para deformación unitaria (strain gages) en planta para el puente Rio Olla Cinco. Fuente: propia.

Cuadro 7. Ejemplo de recomendaciones en el uso de pruebas de carga.

Puente Río Uvita					
Tipo de superestructura:	Ruta	Especificación carga viva de diseño	Tipo viga principal, material y cantidad	Longitud (m)	Numero de tramos
Viga continua	34	Desconocida.	Tipo I, concreto preesforzado, 4	102.8	4
<p>Recomendaciones y observaciones con base en la información de este puente y lo investigado en la bibliografía:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Como NO se tiene información sobre la carga viva de diseño utilizada ni los planos constructivos para este puente en particular, se recomienda primero modelar y representar fielmente la estructura en el programa estructural según la información en el sitio. Y en lo posible hacer pruebas de resistencia del concreto en este caso. • Chequear todos los elementos estructurales, juntas, apoyos, etc. para identificar posibles grietas y / o fisuras en las vigas principales. • La carga de prueba será al menos un 70% de las magnitudes estimadas en el modelo analítico. Se podría hacer una comparación de esfuerzos de su estado actual y la aplicación de una carga viva según HL-93. Y pues ver si la estructura actual ocuparía ser reforzada para las cargas actuales. • Seguir el procedimiento de carga y descarga descrito en el marco teórico. De tal manera que siempre se monitoree el comportamiento del puente dentro del rango elástico. Y pues que no se vayan a producir grietas en las estructuras. • La colocación de los sensores sería de acuerdo a los diagramas de momento máximos identificados en el mismo modelo analítico ver figuras de los posibles diagramas de viga continua en el marco teórico de esta investigación. Dado que es una viga continua a diferencia de la viga simple, en los apoyos se obtendrían momentos negativos. Mientras que aproximadamente en los centros de los claros entre apoyos los momentos máximos positivos. Deben colocarse sensores en los tramos adyacentes ya que también se generan momentos y cortantes a lo largo de la viga por ser esta continua. • Entonces la posición de los vehículos será aquella donde se ubiquen lo momentos máximos entre los apoyos. También se pueden colocar sobre los apoyos y tramos centrales ver figuras. • En general, se debe leer las recomendaciones dadas por la Dirección General de Carreteras del Ministerio de Fomento de España. 					



Figura 38. Puente Rio Uvita Vista general superestructura. Fuente: www.mopt.go.cr, aplicación SAEP. Inventario de puentes rutas nacionales



Figura 39. Puente Rio Uvita. Vista lateral superestructura. Fuente: www.mopt.go.cr, aplicación SAEP. Inventario de puentes rutas nacionales



Figura 40. Puente Rio Uvita Vista inferior superestructura. Fuente: www.mopt.go.cr, aplicación SAEP.
Inventario de puentes rutas nacionales

Cuadro 8 . Ejemplo de recomendaciones en el uso de pruebas de carga.

Puente Río Aranjuez					
Tipo de superestructura:	Ruta	Especificación carga viva de diseño	Tipo viga principal, material y cantidad	Longitud (m)	Numero de tramos
Cercha inferior (tipo Warren reforzado)	1	H15-44. AASHTO 1941 3 Ed.	Acero	87.78	3
<p>Recomendaciones y observaciones con base en la información de este puente y lo investigado en la bibliografía:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Previo a las pruebas se deben inspeccionar todos los elementos y juntas estructurales; por su antigüedad y como lo indican los planos originales constructivos en las uniones se utilizaron remaches por lo que deben inspeccionarse igualmente por posibles rupturas y oxidación. • se observa que este puente fue reforzado con arriostres en el sentido contrario forma de "x" con respecto a los planos originales de construcción. Esto para lograr posiblemente que cumpla con la nueva especificación de carga viva HL-93 de la AASHTO. • No es trabajo de análisis estructural propiamente de esta investigación el conocer exactamente los elementos críticos sino mas bien despertar el interés y a modo de ilustración los posibles elementos que podrían llevar al colapso o inestabilidad de la estructura. Por lo que se muestra en las Figuras 43 y 44 los elementos que podrían ser claves en la estabilidad de la estructura vemos que el elemento "1" esta claramente en compresión y el "2" en tensión. Se escogieron estos ya que, según lo indicado en los planos, tienen las mayores magnitudes de carga muerta y viva. Igual habría que hacer el modelo analítico junto con un análisis con metodología FMEA como se muestra en el Cuadro 4 y corroborar la inspección visual respecto a al estabilidad global. • Se usarían los sensores de deformación unitaria (strain gages) en estos elementos o los que hayan sido escogidos según el modelo analítico. • Igual se recomienda utilizar los procedimientos de la Dirección General de Carreteras Español principalmente en cuanto a carga y descarga de las pruebas de carga. • La posición de los vehículos para la prueba estática será aquella donde se produzcan las magnitudes máximas de momentos y deflexión acorde también al modelo analítico. • Este tipo de estructura podría presentar elementos redundantes, lo cual se podría corroborar en el modelo analítico. 					



Figura 41. Puente Rio Aranjuez Vista inferior superestructura. Fuente: MOPT, programa de administración de puentes SAEP



Figura 42. Puente Rio Aranjuez Vista lateral superestructura. Fuente: MOPT, programa de administración de puentes SAEP

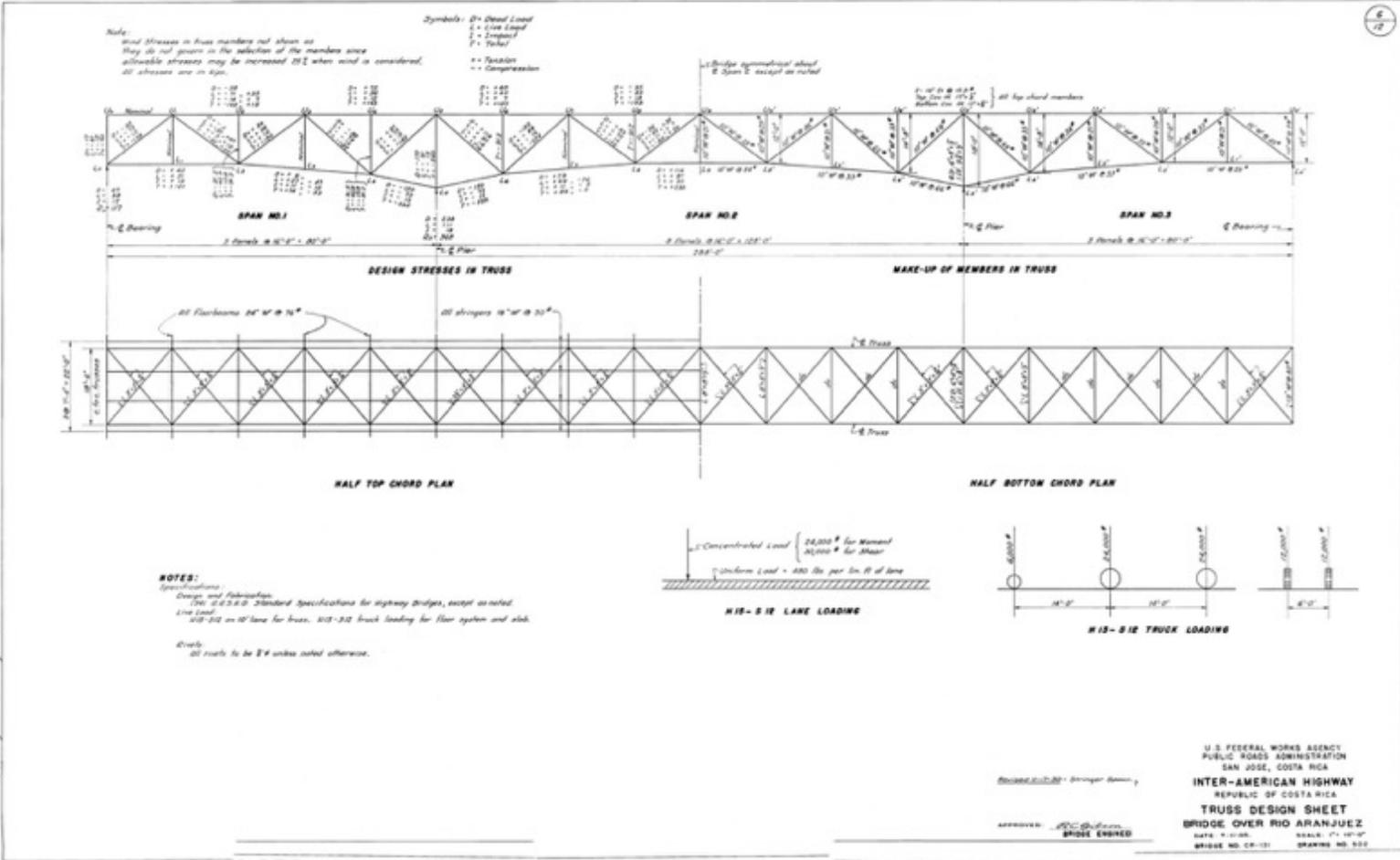


Figura 43. Puente Rio Aranjuez planos de superestructura. Fuente: MOPT, programa de administración de puentes SAEP

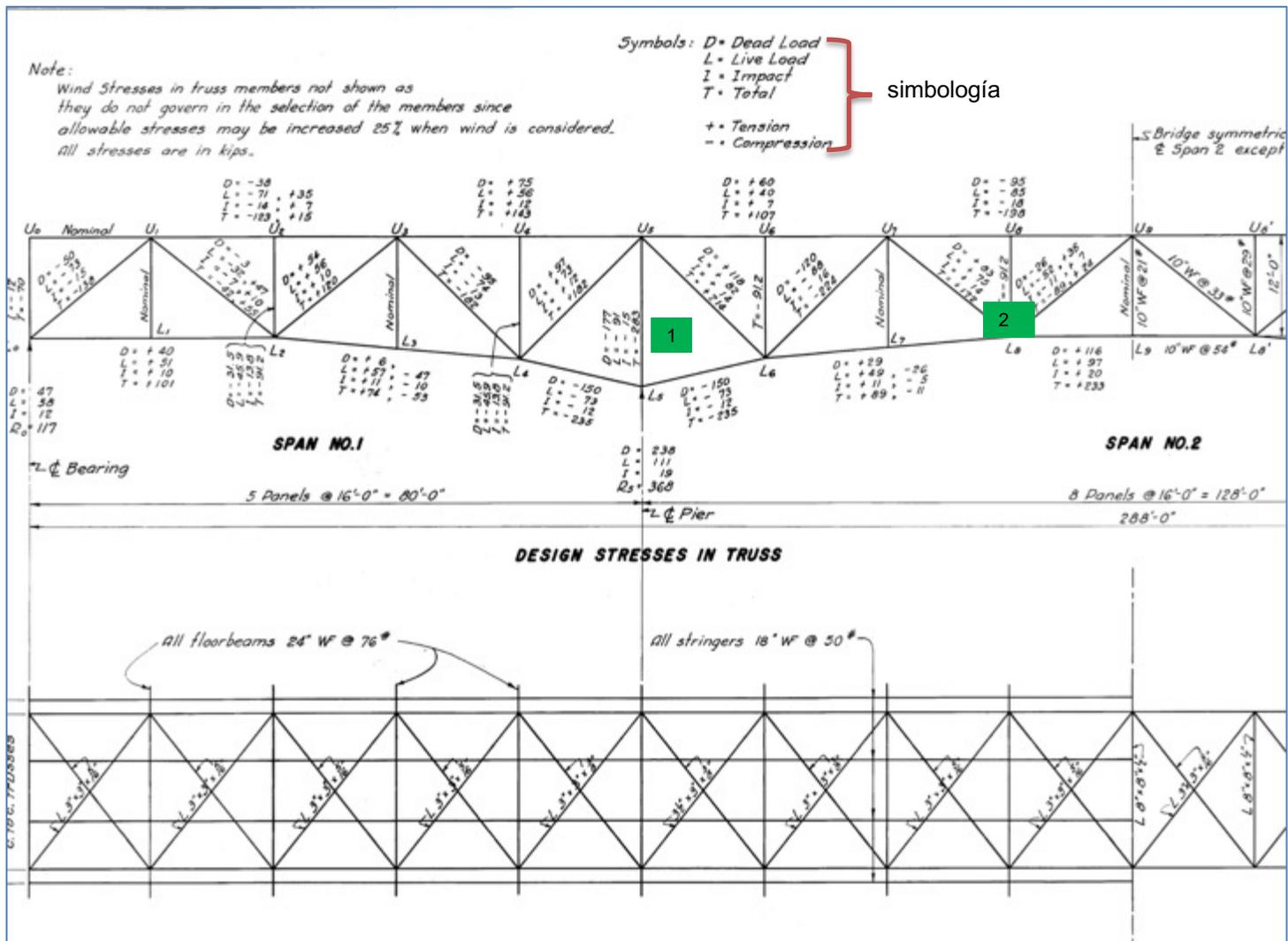


Figura 44. Puente Rio Aranjuez. Detalle de superestructura y marcación elementos críticos "1" en compresión y "2" en tensión para la colocación de los sensores de tensión. Fuente: MOPT, programa de administración de puentes SAEP

Cuadro 6. Análisis de elementos críticos por tipo de superestructura utilizando la metodología FMEA

tipo de superestructura	elemento(s) crítico(s)	función	modo de falla potencial	efectos locales de falla	efecto final en la superestructura	(P) probabilidad de ocurrencia	(S) Severidad	(D) detección (uso de sensores) deflexión mayor	nivel de riesgo P*S (+D)
Tipo de viga simple y continua	viga principal (elemento primario)	Los elementos primarios soportan la carga muerta y viva de la superficie de rodamiento y la transmite a los apoyos y luego a las subestructura	Elemento principal falla por ruptura por flexión y /o cortante en los apoyos.	hundimiento de la capa superficial de rodamiento.	desestabilización lateral y posible hundimiento y afectación en la uniformidad en la superficie de rodamiento.	ocasionalmente(C)	critico (IV)	con certeza por la inspección visual y el uso de sensores	alta
	arriostres y diafragma (elementos secundarios)	los elementos secundarios distribuyen las cargas laterales como sismo y viento. Generan mayor rigidez lateral y torsional. Los elementos	los arriostres por fatiga, ruptura del elemento por tensión, ruptura en las uniones.	torsión y /o flexión de la viga principal por falta de soporte lateral	desestabilización lateral y posible hundimiento y afectación en la uniformidad en la superficie de rodamiento.	ocasionalmente(C)	danos menores (III)	con certeza por la inspección visual y el uso de sensores	moderado

	primarios soportan la carga muerta y viva de la superficie de rodamiento y la transmite a los apoyos y luego a las subestructura .							
acero refuerzo longitudinal y aros en la losa (superficie de rodamiento)	soporte del elemento viga principal ante la flexión y esfuerzo cortante tanto de la carga muerta como viva	ruptura por flexión en elemento viga principal	ruptura de la viga principal	hundimiento de la superficie de rueda	ocasionalmente(C)	critico (IV)	con certeza por la inspección visual y el uso de sensores	alta
pilares y apoyos extremos	soporte vertical de la superestructura.	volcamiento, aplastamiento y socavación en la base.	hundimiento de la capa superficie de rodamiento.	colapso	ocasionalmente(C)	critico (IV)	moderada	moderado
acero de refuerzo o acero	conformación del cajon (vigas + losa de cierre)	por torsión, flexión.			ocasionalmente(C)	critico (IV)	con certeza por la inspección visual y el uso de sensores	alta

Cuadro 7. resumen de recomendaciones según tipo superestructura y prueba				
tipo de superestructura	material	tipo de prueba (la mas recomendada)		recomendaciones adicionales para realizar las pruebas
		estática (proof test)	dinámica (diagnostico)	
marco rígido	concreto	x		debido a la naturaleza del diseño de los marcos rígidos, se recomienda la prueba estática.
cercha de paso superior e inferior	acero	x	x	se recomienda realizar la prueba estática después de haber chequeado la losa, vigas, y conexiones para determinar la habilidad de soportar la carga propuesta.
losa prefabricada o losa de concreto reforzado embebida en viga múltiples de acero	acero y concreto	x	x	cualquiera de los dos tipos de pruebas se puede utilizar.
colgantes	acero	pendiente encontrar información	pendiente encontrar información	no se encuentra un procedimiento en particular. sin embargo, se podrían utilizar lo aplicado para puentes atirantados ya que muestran similitudes en cuanto a tipo de material. Cabe mencionar que la estimación de la resistencia de los cables es por medios probabilísticos.
atirantados	acero	x	x	para este tipo de estructura no hay un procedimiento universal. depende de los objetivos de los ingenieros. por ejemplo, para el caso del puente Quingzhou en china se utilizaron 9 combinaciones de prueba de carga estática. se recomendó hacer las pruebas entre las 8pm y las 5am para evitar interferencia de la temperatura. para cada combinación de carga se tomaron los datos iniciales antes de colocar los camiones. los ciclos de carga y descarga fueron de 10 minutos. esto para lograr medir las deformaciones y también en la descarga la estabilización de la estructura. antes de hacer las pruebas se calculo la eficiencia de la prueba estática.

Recomendaciones para desarrollar una normativa de uso nacional.

Este tiene como objeto de proponer las recomendaciones para una normativa nacional la cual debe desarrollarse lo mas pronto posible en nuestro país. Esta normativa es muy importante ya que nos ayudara a verificar y revisar con certeza las estructuras tanto nuevas como en servicio y conocer la capacidad máxima de carga con respecto a las estimaciones hechas en los modelos analíticos y además implícitamente habrá un monitoreo diario del comportamiento hasta cumplir su vida útil. Como consecuencia de esta normativa se espera mas compromiso y profesionalismo de parte de los diseñadores y constructores a la hora de planear y ejecutar la obra. En esta investigación se habla mayormente sobre las pruebas de carga estática, sin embargo, dadas las condiciones sismológicas en nuestro país, deberían de incluirse en esta normativa las pruebas dinámicas también. Por lo general una normativa trata de dirigir y determinar una actividad, la cual en nuestro caso trata dirigir el proceso de planeamiento y ejecución de estas pruebas de carga. En el cuadro siguiente se muestra en resumen los apartados que debe contener la normativa:

Cuadro 8. Recomendaciones para una normativa nacional para el uso de pruebas de carga

Apartado	Descripción
a. Denominación	"Normativa para el uso de pruebas de carga en puentes vehiculares nuevos y en servicio."
b. Objetivos	Dirigir, regular y definir las funciones en el proceso de las pruebas de carga. Ayuda en la verificación del diseño, especificaciones y construcción del proyecto de carga para un puente.
c. Fundamento técnico	Cumplimiento de las disposiciones de la AASHTO y Dirección General de Carreteras Ministerio de Fomento de España.
d. Ámbito de aplicación	<p>Los actores responsables en el cumplimiento de esta normativa serán las entidades que emitan los carteles de licitación principalmente y la empresa adjudicada para la ejecución de la obra completa incluyendo las pruebas de carga:</p> <ul style="list-style-type: none">○ MOPT○ CONAVI○ Municipalidades○ Contratistas <p>El MOPT junto con el CFIA y la CGR serán los entes rectores principales. Esta norma aplicara para todo el territorio nacional sean rutas nacionales o cantonales. Comprenderá todos aquellos puentes mayores a 15m sean de acero sean tipo cercha inferior o superior, como viga principal tipo I, y concreto reforzado las vigas principales y con TPD considerables. Luego por medio de un consenso entre las dos universidades estatales (Lanamme UCR y e-Bridge TEC) convendrán en el uso de esta normativa común. La norma deberá ser de carácter obligatorio especialmente para recepción de puentes nuevos.</p>
e. vigencia	La vigencia de esta norma será a partir de su aprobación y será de carácter preceptivo y retroactivo para los puentes existentes y en construcción. Se hará una revisión del contenido cada vez que se actualice el manual de evaluación de puentes de la AASHTO y de la Dirección General de Carreteras del Ministerio de Fomento de España o cualquier otra investigación fundamentada.
f. disposiciones generales	<p>Para el cumplimiento y ordenamiento de la norma se utilizará lo siguiente¹³:</p> <ul style="list-style-type: none">○ Esquema general de planeamiento.○ Esquema general de ejecución.○ Programa de pruebas.○ Protocolo de seguridad (incluya equipo y personal)○ Protocolo de demarcación (equipo y personal)○ Protocolo de demarcación.○ Protocolo de pesaje de vehículos.○ Protocolo de pruebas de carga.

¹³ (Cubero Cordero, 2012)

Análisis de Resultados

En general se observa que hay poco interés y preocupación a nivel mundial en la realización de las pruebas de carga; incluso en los EEUU no son obligatorias estas pruebas a pesar que la AASHTO ha desarrollado la teoría y base para poder lograr una normativa prescriptiva. Sin embargo, España ha sido el único país donde las pruebas son obligatorias en función del tamaño y tipo de puente. Prácticamente la mayoría de los países utilizan la metodología de la evaluación de la AASHTO, la cual marca la pauta y dirección de como debe realizarse la evaluación o inspección de los puentes. Sin embargo, México hizo modificación al peso del vehículo modelo de la AASHTO, ya que se determino que no representaba el actual peso de los vehículos pesados que transitan por la carreteras mexicanas. Suiza por otra parte estuvo haciendo pruebas de carga en puentes nuevos. Según (Moses, Fred et al.,1994) afirma: Suiza tiene larga experiencia en la prueba de puentes nuevos antes de permitir que sean utilizados. La respuesta vía correo de uno de los autores en (Moses, Fred et al.,1994) dice que únicamente se realizan pruebas en puentes de estructura especial o diseño innovador a diferencia de los puentes de diseño estándar o comunes. Por ejemplo, en el caso de Noruega y Austria, según las respuestas vía correo electrónico con los encargados de las instituciones responsables respectivamente, no tienen un procedimiento para hacer la pruebas ni las utilizan dado que confían en los diseños y códigos de construcción. Similar a nuestro país, la revisión es solo en la calidad de los materiales y especificaciones de diseño por empresas y profesionales externos, pero aquí el propietario del puente hace una verificación de los resultados que les están entregando. Como se observa en el

Cuadro 4, son pocas las instituciones y países que realizan las pruebas ya sean dinámicas o estáticas. Las posibles limitantes pueden estar relacionadas con el costo-beneficio, importancia de la estructura y si la estructura tiene un diseño especial no usual. En el caso de Costa Rica recién se ha implementado un procedimiento con base en las recomendaciones españolas, realizado por el CIVCO con el proyecto e-bridge. Otra institución que ha realizado algunas pruebas de cargas ha sido el MOPT en dos puentes sobre el río Chirripo, las cuales se apoyaron en: *“EL ESTUDIO SOBRE CAPACIDAD EN LA PLANIFICACIÓN DE REHABILITACIÓN, MANTENIMIENTO Y ADMINISTRACIÓN DE PUENTES BASADO EN 29 PUENTES DE LA RED DE CARRETERAS NACIONALES EN COSTA RICA”* y la última prueba estática realizada por el CONAVI en conjunto con UNOPS en el puente sobre el río Virilla en la ruta 147.

Las municipalidades no realizan pruebas de carga sino mas bien una verificación de la calidad de los materiales por medio de laboratorios de materiales. Dichas pruebas las realiza la empresa constructora adjudicada junto con la presentación de un informe de calidad final. La municipalidad no tiene la forma de comprobar la veracidad de los resultados dados en dicho informe, excepto contraten un laboratorio externo. La mayoría de los diseños de superestructuras de puentes en nuestro país son repetitivos y de hecho en la pagina electrónica del MOPT están disponibles al público una serie de diseños de puentes según modelos HS20+25%, por lo que son diseños comunes y que aparentemente no necesitan de prueba de carga. No obstante, se deberían de probar como referencia y así dar mayor garantía y seguridad del diseño. Además, el MOPT

debería actualizar sus diseños con la nueva especificación de carga viva de la AASHTO HL-93. Por otra parte, las empresas constructoras no tienen interés de realizar las pruebas excepto les sean solicitadas y se les reconozca el gasto incurrido. Las empresas consultadas fueran CODOCSA y Puentes Prefa, esta última se abstuvo de responder al cuestionario. Obviamente estas pruebas implican un costo, pero el beneficio es alto y podría ahorrar mucho dinero en mantenimiento correctivo en caso que se detecten problemas constructivos o incluso de diseño en forma temprana.

Dada la situación actual económica de nuestro país, el gobierno y en general los propietarios de puentes deberían de tener una normativa con los procedimientos junto con las recomendaciones para la recepción de estas obras tan delicadas e importantes y así minimizar reconstruirlas y hasta demolerlas en caso que no cumplan.

Se desarrollaron las recomendaciones para 3 tipos de superestructuras con base en la información del Cuadro 5 y Figuras 1, 2 y 3 los cuales contienen los tipos de superestructuras y material más comunes en nuestro país. En general, no difiere la posición y colocación de los vehículos de carga para los dos tipos de superestructura de viga simple y viga continua. Es exactamente la misma según la Figura 35 sea para verificar momento máximo en la viga central (a), momento máximo de la viga extrema (b), y capacidad de una de las pilas, no obstante, la posición de los sensores difiere según se observan los diagramas de momento para ambas superestructuras. Es obvio que para la viga continua se tenga que colocar sensores en el tramo adyacente al que es cargado con el vehículo, debido al efecto del momento. En estas estructuras no se verifica torsión sino más bien la distribución lateral de la carga. La colocación de los sensores puede hacerse como muestra la Figura 36 según los parámetros que deseamos medir y verificar (a, b, c y d) tanto las fibras en tensión y compresión, así como el desplazamiento vertical de la viga principal (posición d). Estas estructuras con viga principal simple y continua se representan respectivamente por los puentes Río Olla Cinco y Río Uvita. Son puentes largos y perfectamente podrían aplicar para las pruebas de carga sea estática o dinámica. Los puentes con viga principal continua son

mayores a los 50m. mientras que los de viga simple están entre 15 y 30m.

Por otra parte, el tipo de superestructura de cercha inferior de acero, puente sobre el Río Aranjuez, presenta un comportamiento estructural diferente ya que esta compuesto por arriostres y cuerdas inferior y superior los cuales trabajan a tensión y compresión como se muestra en la Figura 43 y 44. Además, por lo general estas estructuras fueron construidas con remaches en las uniones y no pernadas. Esto la hace más rígida. Este puente en particular fue reforzado para cumplir con las especificaciones de carga viva existentes. La colocación de los vehículos de carga obedecerá a lo analizado en el modelo analítico es decir donde se produzcan los máximas tensiones y compresiones para los elementos críticos. Haciendo una inspección visual se seleccionaron los elementos marcados 1 y 2 de la Figura 44 como los elementos críticos ya que tienen los mayores valores de compresión y tensión respectivamente de modo que al fallar podrían provocar serio daño de la estructura. Sin embargo, debe hacerse el modelo analítico y así identificar de mejor manera aquellos elementos más cargados.

Es importante mencionar el efecto redundante¹⁴ en algunas estructuras. Se define redundancia como la reserva de resistencia disponible para prevenir la falla de toda la estructura, en este caso de un puente, cuando falla un solo elemento. Por ejemplo, los puentes con losa de concreto con múltiples vigas de acero embebidas en el mismo, son estructuras compuestas redundantes de lo cual se tiene conocimiento y es una característica de estos tipos de superestructuras por lo que hay que tomarlo en cuenta a la hora de preparar la prueba. Se sabe que el comportamiento del acero y concreto son variados y difieren entre sí. El comportamiento de una estructura de acero es más predecible y lineal por lo que se considera un material ortotrópico. Mientras que una estructura de concreto depende de factores tales como calidad de los agregados, proporcionamiento de la mezcla, relación A/C, etc lo cual produce un material anisotrópico. Es por eso que se recomiendan las pruebas de diagnóstico en lugar de las pruebas de carga por las incertidumbres de los materiales. En caso que no se tenga la información del puente antes mencionada, las pruebas de carga (estática) serían las de mejor ayuda en predecir la capacidad de carga viva para este tipo de puentes de losa de

¹⁴ ((NCHRP), 1998)

concreto. Es importante recordar aquí sobre los dos tipos de pruebas: las dinámicas (de diagnóstico) y las estáticas (de pruebas de carga).. En general, para la predicción del comportamiento del puente se requiere del conocimiento de las resistencias de los materiales utilizados, los cuales usualmente son mayores que aquellos asumidos en el diseño.

Es de suma importancia la identificación de los elementos críticos por medio de la metodología FMEA ver cuadro 6, el cual nos ayuda a seleccionar e identificar dichos elementos conociendo su modo de falla, los efectos de la falla, y la probabilidad de ocurrencia. Adicionalmente a esto se tiene la información del modelo analítico para encontrar la posición o puntos donde debemos aplicar las cargas y así verificar los parámetros de diseño deseados.

Para la realización de la normativa nacional se tiene variada información dada por el documento del Ministerio de Fomento de España y por AASHTO 2018 en su *Manual de Evaluación de Puentes*, así como el material de referencia (NCHRP,1998). Se observa en el Cuadro 7 el contenido mínimo sugerido para el desarrollo de esta normativa y que cumpla para tal propósito, el cual como se indica en sus objetivos es el de dirigir, regular y definir las funciones a realizar durante todo el proceso de la prueba de carga desde un inicio (la conceptualización hasta los resultados de la prueba). Debido a que en nuestro país apenas se esta desarrollando y utilizando procedimientos internacionales a la fecha, no se han desarrollado estadísticas, probabilidades de riesgo, que apliquen propiamente a nuestro entorno. Por ejemplo, según la información española se recomienda utilizar el 70% de la carga máxima para realizar la prueba y los criterios de aceptación de la prueba son propios del entorno español. Entonces, se deben empezar a desarrollar nuestros propios criterios para la ejecución de estas pruebas.

Por otra parte, respecto a los principales autores responsables de la aplicación de esta normativa deberían ser el MOPT, CFIA y CGR. Y se exija por medio de los carteles de licitación el uso de estas pruebas de carga sea sobre ruta nacional o cantonal.

Conclusiones y recomendaciones.

- Con relación al primer objetivo se concluye que los propietarios de puentes, en este caso el Gobierno, no aplican procedimientos de evaluación por medio de pruebas con carga para verificar si los puentes cumplen con las especificaciones, capacidad y comportamiento según el diseño.
- Las municipalidades por sus limitaciones de personal, equipo y de laboratorio, múltiples funciones del ingeniero encargado, falta de tiempo para realizar un diseño, no pueden realizar las pruebas de carga. Adicional a esto recién se aprobó Ley 9329 (ley especial para la transferencia de competencias), la cual permite a las municipalidades el control exclusivo de la red vial cantonal. Con lo que se desliga del MOPT y CONAVI en los procesos del cartel de licitación y el control de estas obras. No obstante, estos intervienen si se les hace la solicitud respectiva. Entonces prácticamente los diseños y ejecución se revisan a criterio y conocimiento del profesional responsable de la municipalidad sin las herramientas necesarias. Por lo que este profesional debe capacitarse en el tema de la pruebas de carga y además la municipalidad debe otorgarle las herramientas necesarias para la ejecución de estas pruebas.
- Las constructoras de puentes solo ejecutan las obras para las cuales fueron contratados y por supuesto llevan control de la calidad los materiales utilizados por medio de laboratorios privados. Mas que eso consideran que es un costo adicional del proyecto el realizar las pruebas de carga. A su vez el CONAVI recibe las obras con solo hacer verificación de la calidad de los materiales según resultados de las pruebas de laboratorio de los materiales utilizados.
- Los laboratorios tales como el CIVCO (proyecto e-Bridge) y el LanammeUCR, solo intervienen bajo solicitud del cliente, el cual puede ser el Gobierno o la empresa privada. Es decir, falta activar mas estas instituciones y que puedan tomar decisiones independientemente si el Gobierno requiere o solicita las pruebas de carga.
- Por medio del segundo objetivo se determina que uno de los puentes seleccionados (Rio Uvita) se desconoce la especificación de carga viva en su diseño. Lo cual genera mas incertidumbre de los componentes estructurales y esto es un factor importante a la hora de determinar la magnitud de la carga de prueba.
- Las estructuras tipo cercha pueden presentar redundancia.
- La estructura tipo cercha inferior del puente sobre Rio Aranjuez fue reforzada y no se encontraron los planos as-built de dichas modificaciones por lo que habría que hacerse el levantamiento de la estructura existente y así poder realizar el modelo analítico; solo se encontraron los planos constructivos y de diseño originales por medio de la aplicación SAEP en la pagina electrónica del MOPT.
- La colocación de las cargas vehiculares tanto para tipo de superestructura viga simple y viga continua son similares. La diferencia radica en que para el tipo viga continua los sensores tendrían que

colocarse en los tramos adyacentes por el efecto de carga según los diagramas de momento y cortante vistos en las figuras anteriores.

- No hay cooperación mutua entre las universidades encargadas de estas pruebas.
- El MOPT y CFIA como entes rectores no se unen para mutua cooperación y comunicación con las universidades involucradas.

- Desarrollar criterios propios de evaluación y aceptación de estas pruebas de carga en próximas investigaciones.
- Utilizar por el momento las recomendaciones dadas en: (Dirección General de Carreteras, 1999) ; el instructivo mejor desarrollado como guía y dirección en el planeamiento de las pruebas de carga a la fecha.

Recomendaciones

- El gobierno debería exigir por medio de una normativa la aplicación de pruebas de cargas en la etapa de recepción de puentes nuevos. Sobre todo, en aquellos puentes donde el TPD sea considerable y según el tipo de superestructura y tamaño.
- Las pruebas de carga deberían de realizarse en puentes nuevos con claros mayores o iguales a 30m para las pruebas estáticas y a partir de 60m para pruebas dinámicas. Y utilizar la clasificación por importancia operacional del puente dada en: (Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos de Costa Rica, 2013, p. 39) para la selección de los puentes.
- Incluir en el presupuesto del gobierno local estas pruebas de carga y el equipo necesario para llevarlas a cabo.
- Que en general los presupuestos para proyectos de puentes se incluyan en el cartel de licitación la realización de estas pruebas y por ende que los costos aproximados de estas pruebas se incluyan dentro del presupuesto.
- Concientizar el uso de estas pruebas con carga a las empresas constructoras de puentes. Que sea parte de la garantía de cumplimiento con el diseño y especificaciones.
- Instruir por medio expertos internacionales al personal encargado de estas pruebas.
- Debe desarrollarse la teoría estadística y de probabilidad de riesgos según el tipo de superestructura y material para nuestro entorno.

Anexos

Se anexa información extraída de los siguientes informes:

- A. Grupo de Estudio JICA, Oriental Consultants CO, LTD CHODAI, CO, LTD. Febrero 2007. *El Estudio de Desarrollo de Capacidad en la Rehabilitación, Planificación, Mantenimiento de Puentes basado en los puentes de la Red Vial Nacional en Costa Rica. MOPT.*
 - a. Flujo de prueba de carga.
 - b. Horario de las pruebas de carga
 - c. Prueba de carga para el puente Chirripo.

- B. Cubero Cordero, Osvaldo Josué. 2012. *Metodología para la determinación de la carga viva real sobre un puente utilizando instrumentación electrónica.* Informe proyecto final de graduación. Escuela de Ingeniería en Construcción, ITCR
 - d. Esquema general de ejecución de una prueba de carga.

10.2.5 Flujo de Prueba de Carga

La Figura 10.2.4 muestra el flujo de pruebas de carga

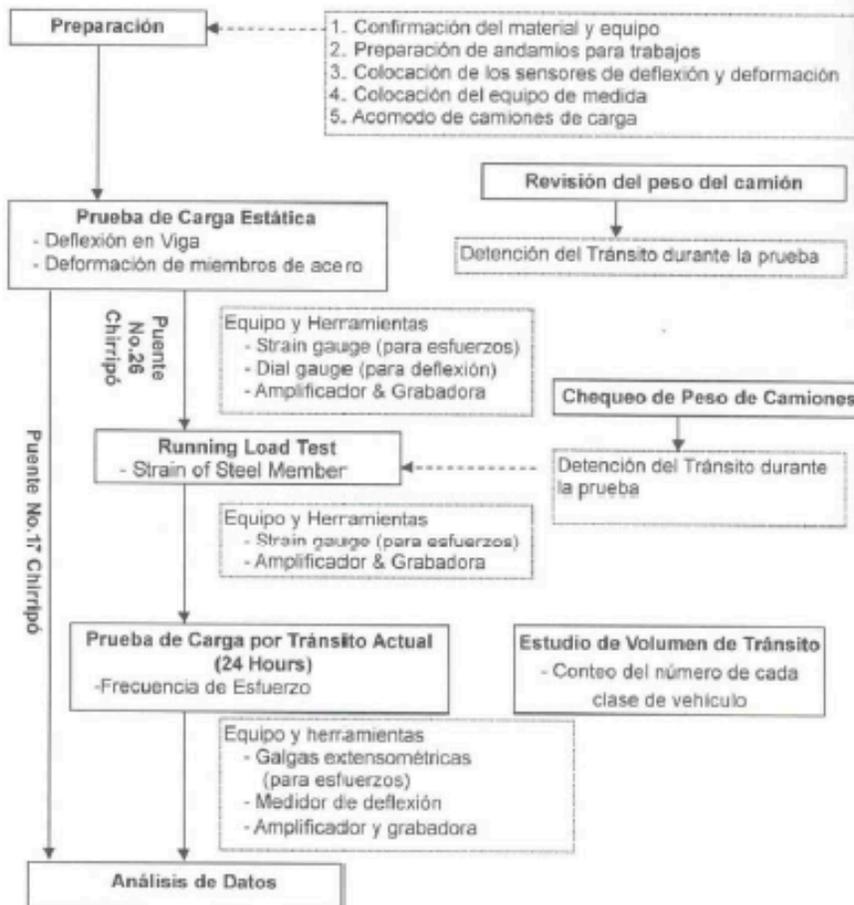


Figura 10.2.4. Flujo de Prueba de Carga

Tabla 10.2.3. Horario de las Pruebas de Carga en los Puentes

Fecha		Ítem de Trabajo	
Mediados de Julio		<ul style="list-style-type: none"> • Explicación acerca de Pruebas de Carga de Puentes por la Contraparte • Comienzo de Arreglos de Materiales y equipo • Seminario uso de galgas extensométricas y equipo recolector de datos 	
Finales de Julio		<ul style="list-style-type: none"> • Selección de Contratistas para Andamios y Camiones de Carga 	
Inicios de Agosto		<ul style="list-style-type: none"> • Información y Solicitudes a Organizaciones Relacionadas y Gobierno <ul style="list-style-type: none"> - Oficina de Transito: suspensión durante las pruebas - ICE: Suplir de energía eléctrica provisional - Organizaciones y usuarios de vía: Informar sobre las suspensiones 	
Mediados de Agosto		<ul style="list-style-type: none"> • Seminario sobre uso de Strain Gauges y Grabador de Datos • Fabricación de Herramientas de Medida de Deflexión 	
Agosto	Semana	No. 17 (Ruta 4)	No. 26 (Ruta 32)
22	Mar		- Inicio del Colocado de Andamios
23	Mier		- Culminación de Colocado de Andamios
24	Jue	14:00: Chequeo de Herramientas de Deflexión (Pre-colocado)	09:00: : Chequeo de Herramientas de Deflexión (Pre-colocado) 09:30: Instalación de Servicio Eléctrico 10:30: Tamaño y Peso de Camiones
25	Vier		
26	Sab		06:00: Colocación de Gauges 10:00: Marcas de Posición de Camiones
27	Dom	8:00 Marcas de Posición de Camiones	06:00: Colocación de Gauges
28	Lun	11:00 instal. Herram. Deflexión (Anclaje)	06:00: Chequeo de Colocación de Gauges
29	Mar	02:30 Reunión en Campo 03:00 Medida del Peso de Camiones 03:00 Coloc. de Herreram. de Deflexión 05:00 Prueba Carga Estática hasta 7:00 07:00: Remover de equipo de prueba	13:00: Conexión de Sistema de Recolección de Datos
30	Mier		01:30 30 Reunión en Campo 02:00 Chequeo Sis. Recolección de Datos 02:00 Colocar Herramientas de Deflexión 02:00 Medida de Peso de Camiones 04:00 Prueba Carga Estática & Dinámica hasta las 8:00 12:00: Prueba Carga de Tránsito
31	Jue		12:00: Fin Prueba de Carga de Tránsito 13:00: : Remover de equipo de prueba
1	Vier		08:00: Remover Andamios

10.2.7 Prueba de Carga para Puente No.17 Chirripó

La prueba de carga en el Puente No.17 Chirripó fue llevada para confirmar las relaciones entre la carga y la deflexión de la viga principal. La evaluación de la capacidad de carga con la prueba de carga se desarrollo de acuerdo con la secuencia que se muestra en la figura 10.2.5



Figura 10.2.5 Secuencia Evaluación para Capacidad de Carga

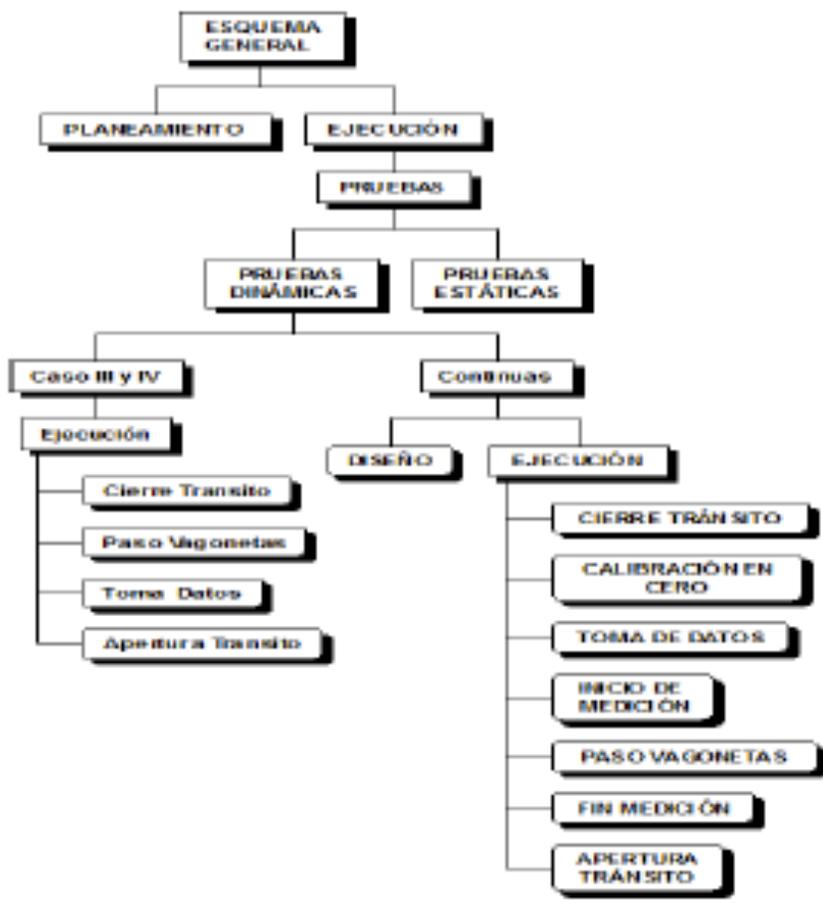


Figura 38. Esquema General Ejecución.

Referencias

- Ministerio de Fomento. Dirección General de Carreteras, 1999. *Recomendaciones para la realización de pruebas de carga de recepción en puentes de carretera*. España: Centro de Publicaciones Secretaría General Técnica.
- NCHRP, 1998. *Manual for Bridge Rating through Load Testing*. Research Results Digest, Transportation Research Board, National Research Council. Washington, DC, #234
- Moses, Fred, Lebet, Jean Paul, Bez, Rolf (1994) *Application of Field Testing to Bridge Evaluation*. Journal of Structural Engineering Vol.#120, N6, June. ASCE
- AASHTO, 2018. *The Manual for Bridge Evaluation*. 3rd Edition. (Section 8 nondestructive load testing). Washington, DC
- Eva O.L. Lantsoght, Cor Van der Veen, Dick A. Hordijk, Ane de Beer. September 2017. *Development of recommendations for proof load testing of reinforced concrete slab bridges*. Science Direct, Engineering Structures.
- Harik, I, Peiris A., (2016) *Load testing bridges for load rating*. ICSBE2016-116
- Federal Highway Administration, December 2015. *Steel Bridge Design Handbook, Structural Analysis*. Publication #FHWA-HIF-16-002, vol 8. U.S. Department of Transportation.
- Cubero Cordero, Osvaldo Josué, 2012. *Metodología para la determinación de la carga viva real sobre un puente utilizando instrumentación electrónica*. Informe proyecto final de graduación. Escuela de Ingeniería en Construcción, ITCR.
- Ministerio de Obras Publicas y Transporte (MOPT), enero 2007. *Manual de Inspección de Puentes*. Dirección de Puentes
- M. Barker, Richard, Pucket, Jay A., (2013) *Design of Highway Bridges*. Wiley
- Bakht, Baidar , member, ASCE, Jaeger, Leslien G., (1992). *Ultimate Load Test of Slab-on Girder Bridge*. Journal of Structural Engineering, 118 (6): 1608-1624
- Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos de Costa Rica. (2013). *Lineamientos para el Diseño Sismorresistente de Puentes*. Lanamme UCR.