

VULNERABILIDAD SÍSMICA DE PUENTES EN COLOMBIA Y ESTRATEGIAS PARA REHABILITACIÓN

Luis E. Yamin¹

Daniel Ruiz²

Abstract

A general diagnosis concerning the seismic vulnerability of the bridges in the main Network of Roads in Colombia is presented based upon approximate appraisals. For those bridges identified as critical in this appraisal, a detailed methodology is presented to evaluate the seismic vulnerability considering simultaneously the problems of load capacity and residual useful life of the bridges due to the large increase of truckload in relation with the original design loads. General criteria are given to define alternatives of rehabilitation and/or reinforcement as well as general guidelines in order to choose the best solution.

Palabras Claves

Puentes, Vulnerabilidad sísmica, rehabilitación.

1. INTRODUCCIÓN

En el año 1996 se desarrolló en el Instituto Nacional de Vías, INVIAS, el Sistema de Administración de Mantenimiento de Puentes de Colombia, SIPUCOL [4], que incluye entre otros los siguientes aspectos:

- Inventario general de puentes
- Inspección principal y especial de puentes
- Inspección y mantenimiento rutinarios
- Priorización de obras de reparación y refuerzo
- Control de presupuestos, costos y avance de obras
- Diseño de obras de reparación y refuerzo
- Evaluación de la capacidad de carga de los puentes

El inventario general de puentes de Colombia cubre todos los puentes administrados por el Instituto Nacio-

nal de Vías que al momento del Inventario totalizaron 1958 puentes incluyendo únicamente aquellas estructuras con más de diez (10) metros de luz.

El inventario incluye la siguiente información específica:

- Nombre, número y localización de la estructura
- Tipo de cruce (carretera nacional, carretera concesionaria, río o corriente, paso peatonal, etc.)
- Fecha de construcción y posible reconstrucción
- Información de la capacidad de carga y camión de diseño
- Tipos de superestructura y subestructura incluyendo materiales de construcción
- Geometría de la estructura (ancho, longitud, gálibo principal, etc.)

1 Profesor Asociado de la Universidad de los Andes, Director del Centro de Investigación en Materiales y Obras Civiles, (CIMOC), de la Universidad de los Andes.

2 Asistente Graduado de Investigación del Centro de Investigación en Materiales y Obras Civiles, (CIMOC), de la Universidad de los Andes.

- Tipos de componentes de apoyo (apoyos rígidos, juntas de expansión, etc.)
- Calificación preliminar del estado del puente.

De acuerdo con el material principal de construcción, los puentes de la red vial se subdividen en puentes de con-

creto reforzado, de concreto pre-esforzado, acero-concreto, acero y otros que incluyen sin refuerzo, en concreto ciclópeo, piedra, madera y demás. La Figura 1 presenta la distribución relativa de los puentes de la red vial principal de acuerdo con el tipo de material principal.

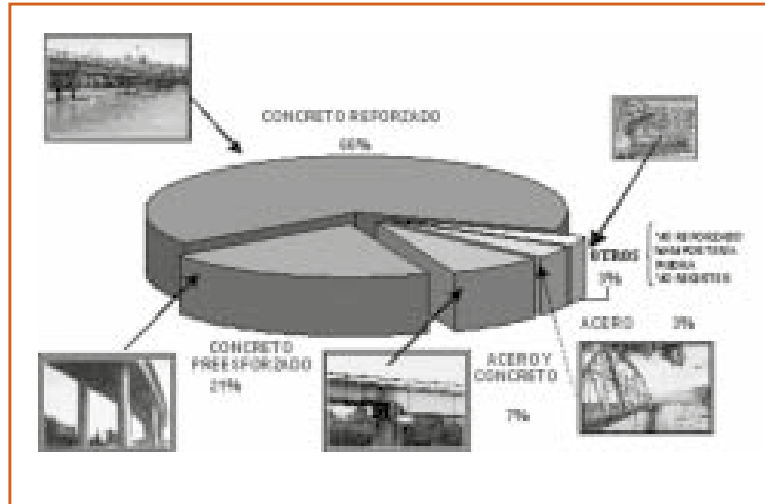


Figura 1 Clasificación de los puentes de acuerdo con el tipo de material

Cada uno de los grupos de puentes clasificados por material se pueden subclassificar a su vez según el tipo de estructura. Dentro de los tipos de estructuras están los siguientes:

- Concreto reforzado: losa y vigas, losa maciza, cajón, arco y otros.
- Concreto pre-esforzado: losa y vigas, cajón, otros
- Acero: armaduras, viga, provisionales, arco, otros

- Acero-concreto, estructura transversal: armadura, losas-vigas, arco, cajón, otros
- Acero-concreto, estructura longitudinal: simplemente apoyado, viga continua, colgante, atirantado, cajón, viga Gerber, otros.

Las posibles clasificaciones de los puentes se presenta en forma resumida en las Figura 2. La Figura 3 presenta las distribuciones relativas en cada tipo de puente para los diferentes materiales, según lo indicado.

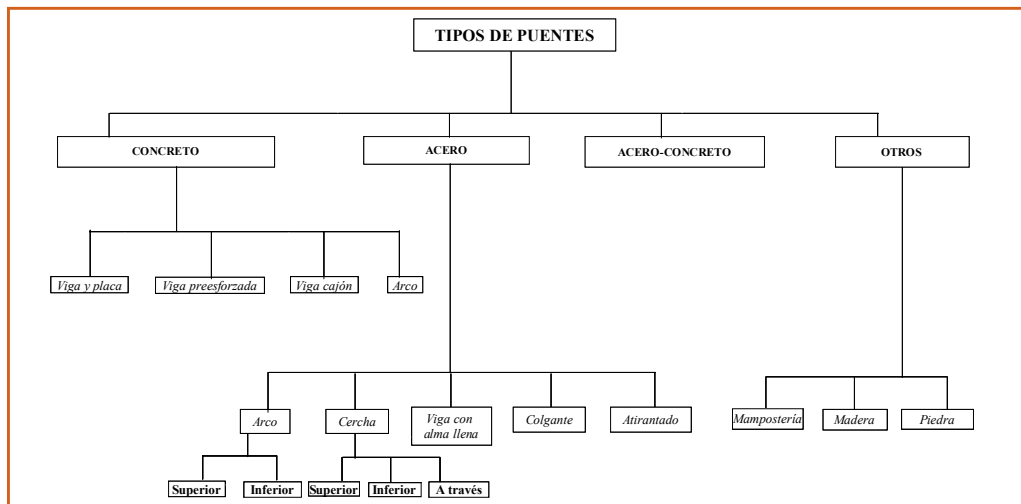


Figura 2 Tipos de puentes de acuerdo con el material

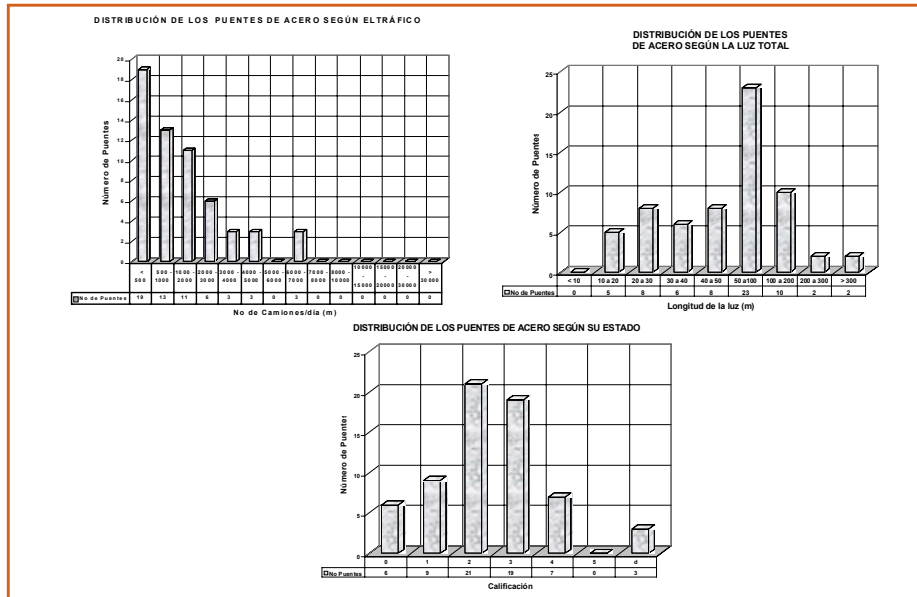


Figura 5
Clasificación de los puentes de acero de acuerdo con la longitud de la luz principal, el tráfico promedio diario y el estado del puente

El sistema de administración de puentes organiza entonces todas las actividades asociadas con los puentes de la red vial nacional. El esquema siguiente resume las actividades asociadas con los puentes. Los sombreados indican las actividades para las cuales no se han desarrollado aún los procedimientos y documentación necesarios que normalicen dichas actividades. Las demás actividades ya cuentan con dicha documentación y normalización.

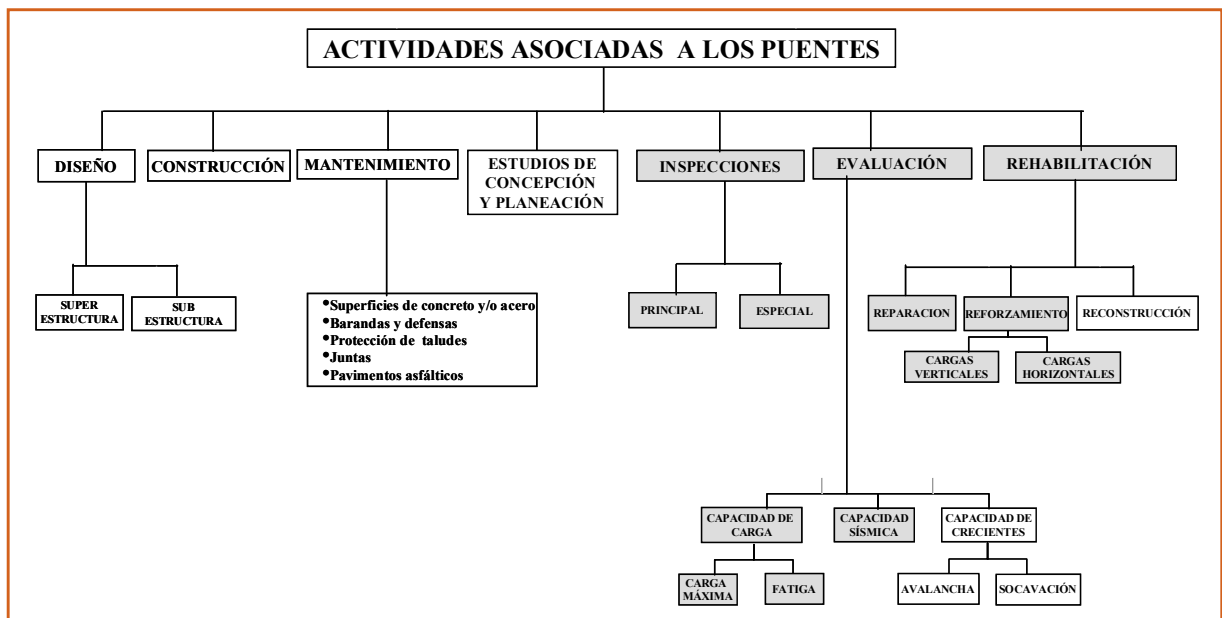


Figura 6
Resumen de las actividades asociadas con los puentes.

2. METODOLOGIA DETALLADA PARA LA EVALUACION DE LA VULNERABILIDAD SISMICA Y CAPACIDAD DE CARGA

Con el fin de estandarizar los procedimientos para la evaluación de la vulnerabilidad sísmica y capacidad de carga de los puentes de la red vial nacional se ha definido una metodología general la cual debe aplicarse en su totalidad en la medida de las posibilidades. La metodología definida a continuación incluye diversas actividades que fueron implementadas sobre varios puentes como se ilustra en la referencia [9]:

- 1 Recopilación de la información : la recopilación de la información incluye la topografía general de la zona de los estribos del puentes, la información geotécnica de pilas y estribos, el levantamiento geométrico y características estructurales, propiedades de materiales y demás información relacionada. Esta actividad incluye la reconstrucción de los planos estructurales cuando estos no están disponibles incluyendo el esquema de la cimentación.
- 2 Pruebas de comportamiento: con el fin de garantizar que los modelos analíticos que se utilicen representan de manera adecuada el comportamiento real de la estructura se propone la realización de tres tipos de pruebas en el sitio que incluyen: aplicación de cargas verticales conocidas, registro de vibraciones ambientales o forzadas con carga cíclica y registro del comportamiento ante efectos térmicos. En todos los casos se debe contar con la instrumentación adecuada lo cual incluye balanzas para pesaje, equipo topográfico de alta precisión, registro de deformaciones unitarias en elementos seleccionados, sensores de vibración, excitador dinámico de estructuras, termocuplas, deformímetros para medición de desplazamientos, anchos de grietas y similares.
- 3 Inspección detallada: tiene por objetivo determinar la calidad y el estado de los elementos estructurales principales. Para el caso del concreto se deben evaluar los posibles efectos de corrosión o deterioro y determinar las propiedades principales para el análisis como son el módulo elástico y la resistencia a la compresión mediante ensayos no destructivos o mediante la recuperación de núcleos. Para el caso del acero se debe determinar igualmente las propiedades elásticas y de resistencia pero debe investigarse de manera detallada el estado real de la estructura para lo cual deben investigarse los posibles estados

de corrosión, fisuras, deterioros, etc. En particular deben adelantarse ensayos radiográficos, de tintas penetrantes, partículas magnéticas y/o ultrasonido. Para el caso de puentes metálicos debe estudiarse el eventual avance en los estados de fatiga mediante estimaciones analíticas de vida de servicio de manera conjunta con las evaluaciones anteriores.

- 4 Evaluación de la vulnerabilidad sísmica y capacidad de carga: incluye las actividades asociadas a la evaluación de la estabilidad global de la estructura y a la modelación analítica de la estructura para determinar el efecto de diferentes hipótesis de carga sobre los elementos estructurales. La estabilidad global de la estructura por su parte incluye la evaluación de las restricciones a los movimientos longitudinales y transversales, los anchos de los apoyos para evitar la pérdida de soporte, la presencia de llaves de cortante, conexiones entre tramos estructurales y otros aspectos relacionados. La modelación analítica permitiría contar con un modelo analítico calibrado de acuerdo con las pruebas de comportamiento realizadas y que permitiría evaluar los factores de sobreesfuerzos en los diferentes elementos estructurales ante hipótesis de cargas gravitacionales (capacidad de carga) e hipótesis de carga que incluyan la carga sísmica (vulnerabilidad sísmica estructural). Simultáneamente dichos modelos permiten la evaluación de la demanda de deformación y ductilidad, la capacidad de disipación de energía de la estructura, la capacidad ante cargas horizontales (análisis de "Pushover") y en general las características del comportamiento no lineal de la estructura. Esta actividad fue presentada a manera de manual en las referencias [6] y [7] y se basa en las referencias [1], [2] y [3].

Con base en los análisis de vulnerabilidad y capacidad de carga se pueden establecer las medidas de rehabilitación y reforzamiento necesarias para disminuir dicha vulnerabilidad y minimizar el nivel de daños esperado. Las medidas típicas de rehabilitación se presentan a manera de manual en la referencia [8].

3. CASO DE ANALISIS: PUENTE "LUIS IGNACIO ANDRADE"

El puente Luis Ignacio Andrade está ubicado en la población de Honda sobre el Río Magdalena y en una zona de amenaza sísmica intermedia con una aceleración máxima de diseño a nivel de la roca base de 0.20 g. Se trata de un puente de 140 m de luz principal sobre el

río. La estructura principal es colgante con vigas longitudinales en armaduras de acero, vigas transversales y viguetas de acero y tablero en concreto reforzado. El puente fue sometido a varias pruebas de comportamiento tales como aplicación de cargas gravitacionales conocidas, registro de vibraciones ambientales, excitación cíclica y registro de la respuesta dinámica, evaluación de la calidad de los materiales estructurales principales. El puente se instrumentó con acelerógrafos de alta sensibilidad, "strain gages" en elementos estructurales principales, termocuplas y se llevó un registro topográfico durante las diferentes pruebas realizadas.

Se realizó la inspección detallada del puente en especial del estado o posible avance de la corrosión en algunas uniones del cordón inferior, haciendo énfasis en las conexiones de la celosía a las torres principales del puente colgante. En las diversas pruebas realizadas que incluyen ultrasonido, tintas penetrantes además de una inspección visual detallada se encontró en general que existían problemas de porosidad, socavados y de cordones irregulares en la soldadura de armado del puente. Así mismo en algunos remaches se observó desgaste generado por la corrosión.

También se adelantó un modelo analítico tridimensional calibrado con las pruebas de comportamiento realizadas. La Figura 7 presenta las características generales del modelo desarrollado. La Figura 8 compara los resultados de la aplicación de la carga en el puente con los resultados equivalentes arrojados por el modelo. También se pudo comparar la respuesta dinámica del puente y del modelo ante la carga cíclica producida por un excitador dinámico de estructuras (ver Figura 9). Se evaluaron posteriormente los índices de sobreesfuerzos de los diferentes elementos estructurales ante diferentes situaciones de carga. Los índices de sobreesfuerzo correspondientes a la situación de carga crítica de análisis se presentan en la Figura 10.



Figura 7. Características generales del modelo desarrollado para el puente "Luis Ignacio Andrade".

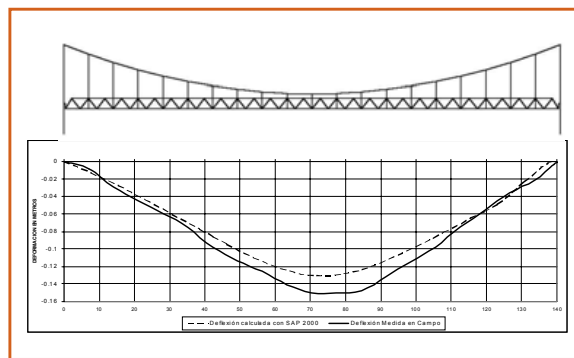


Figura 8. Comparación entre los resultados de la aplicación de la carga en el puente "Luis Ignacio Andrade" con los resultados equivalentes arrojados por el modelo analítico computacional.

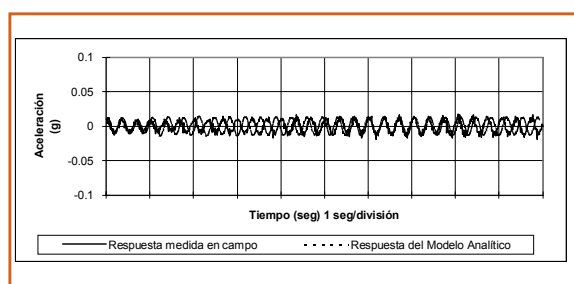


Figura 9. Comparación entre la respuesta dinámica del puente y la del modelo analítico computacional ante la carga cíclica producida por un excitador dinámico para el puente "Luis Ignacio Andrade".

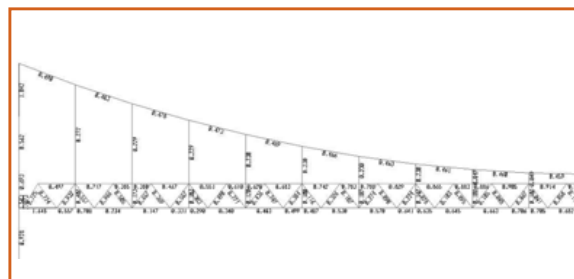


Figura 10. Factores de sobreesfuerzo para la situación de carga crítica para el puente "Luis Ignacio Andrade".

A partir del análisis de vulnerabilidad realizado se adelantó el diseño de las medidas de rehabilitación y de uso con el fin de subsanar las deficiencias que presentaban algunos elementos estructurales [5].

CONCLUSIONES

Con base en la información disponible se establecen las siguientes conclusiones generales:

- a De los 1958 puentes incluidos en la base de datos de puentes en la red vial nacional, aproximadamente el

66.1% se clasifican en primera instancia como de vulnerabilidad media o alta y el porcentaje restante como de vulnerabilidad baja.

- b En general los puentes en acero son los que presentan la mayor vulnerabilidad ante cargas gravitacionales y sísmicas, de acuerdo con los análisis simplificados realizados. No obstante debe aclararse que dentro de la muestra estudiada se encontró que el 3% de los puentes corresponden a puentes de acero, mientras que el 88.3% corresponde a puentes en concreto.
- c El procedimiento detallado propuesto para evaluación de la vulnerabilidad sísmica y capacidad de carga de los puentes de la red vial permite simultáneamente evaluar el estado estructural y estudiar las alternativas de rehabilitación y reforzamiento.
- d Los análisis detallados de vulnerabilidad y capacidad de carga desarrollados hasta el momento permiten prever la necesidad de intervención de un porcentaje alto de puentes de la red vial debido al cambio radical en los tráficos actuales en comparación con los de diseño, la edad y estado de las estructuras y la falta casi generalizada de diseño sismorresistente en los puentes de más de 5 años de construidos.

REFERENCIAS

- 1 American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). LRFD Bridge Design Specifications. 1994
- 2 Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica. Código Colombiano de Diseño Sísmico de Puentes. 1995
- 3 CALTRANS. Seismic Design Criteria Version 1.1. 1999.
- 4 Instituto Nacional de Vías (INVIAS). Sistema de Administración de Mantenimiento de Puentes de Colombia (SIPUCOL). 1996
- 5 Prospección Sondeos Instrumentación S.A.(PSI). Estudio y Diseño para la Rehabilitación del puente Luis Ignacio Andrade de la red Vial Nacional sobre el Río Magdalena. 1998
- 6 Universidad de los Andes, Centro de Investigación en Materiales y Obras Civiles (CIMOC). Manual para la evaluación de la capacidad de carga y fatiga de elementos estructurales de puentes en acero. Preparado para el Instituto Nacional de Vías (INVIAS). Diciembre de 2000
- 7 Universidad de los Andes, Centro de Investigación en Materiales y Obras Civiles (CIMOC). Manual para la evaluación de la vulnerabilidad sísmica y recomendaciones para la rehabilitación de puentes. Preparado para el Instituto Nacional de Vías (INVIAS). Diciembre de 2000.
- 8 Universidad de los Andes, Centro de Investigación en Materiales y Obras Civiles (CIMOC). Manual para el reforzamiento y la rehabilitación de puentes. Preparado para el Instituto Nacional de Vías (INVIAS). Diciembre de 2000
- 9 Universidad de los Andes, Centro de Investigación en Materiales y Obras Civiles (CIMOC). Informe Final de la Fase III: Caso de aplicación de evaluación, diagnóstico, reforzamiento y rehabilitación de tres puentes característicos. Preparado para el Instituto Nacional de Vías (INVIAS). Diciembre de 2000.