

ESTIMACIÓN DEL DAÑO SÍSMICO PARA PUENTES DE VARIOS VANOS A PARTIR DE LOS MODELOS DE PARK Y DEL ATC - 6.2

AVELINO AMADO LAMUS
Integrante Grupo de Investigación INME
Universidad Industrial de Santander
avelinoa@latinmail.com

EDGAR HERNÁN MARTÍNEZ
Integrante Grupo de Investigación INME
Universidad Industrial de Santander
laava7@latinmail.com

ESPERANZA MALDONADO
Profesora Asociada
Universidad Industrial de Santander
emaldona@uis.edu.co

RESUMEN

En este trabajo se evalúan los daños que pueden alcanzar los puentes, de una ciudad Colombiana como Bucaramanga, ante la acción sísmica. Para ello, se tomó una muestra de los puentes carretables representativos de la ciudad, de varios vanos construidos en hormigón armado.

Los puentes fueron modelados como estructuras tridimensionales, donde la superestructura y la infraestructura se idealizaron como un emparrillado y un pórtico o columna simple, asumiendo apoyos simples en los extremos del puente.

En el estudio de la respuesta dinámica ante la acción sísmica se utilizaron espectros representativos de la zona de estudio, implementado herramientas computacionales como SAP 2000 [1] en su análisis.

En la estimación del daño se utilizó el modelo de Park y Ang [2] [3] [4] [5], utilizando el programa IDARC-2D [6] para su evaluación.

Finalmente, a manera de comparación se utilizaron los métodos propuestos en el ATC-6.2 [7] estableciendo las debidas diferencias.

PALABRAS CLAVE: Puentes, Daño sísmico, Vulnerabilidad Sísmica en Puentes.

INTRODUCCIÓN

El crecimiento acelerado de las ciudades trae consigo la necesidad de facilitar el desplazamiento de sus habitantes a través de ellas, ya sea para realizar labores cotidianas o para cumplir su papel en el sector productivo y económico. Para satisfacer esta necesidad es conveniente construir puentes que permitan una comunicación vial entre sectores estratégicos. que en algunos casos se encuentran aislados. A su vez, dentro de las ciudades es necesario

construir pasos elevados e intercambiadores para mejorar el flujo vehicular.

Los puentes se convierten entonces en elementos fundamentales y valiosos para el crecimiento económico y social de las ciudades. La falla de algunas de sus estructuras podría traer consigo, además de pérdidas en vidas humanas, trastornos al sector productivo, afectando el desarrollo regional.

Ante la probabilidad de que se produzca el colapso de los puentes por la acción sísmica, es importante contar con algunas herramientas que permitan prever su comportamiento.

Razón por la cual, ha surgido el interés de estudiar el posible daño que pueden sufrir los puentes del Área Metropolitana de Bucaramanga ante la ocurrencia de los eventos sísmicos más probables.

Por consiguiente, se inventariaron todos los puentes de la zona de estudio y se seleccionaron algunos de los más representativos y sobre los que se contaba con la suficiente información para poder realizar un estudio de daño sísmico. Los puentes de la muestra de estudio fueron 10, inicialmente se modelaron, se analizaron dinámicamente y luego se les evaluó el daño con IDARC-2D [6]. Posteriormente a los puentes se les realizó un análisis de la relación capacidad demanda de los elementos más vulnerables a sismos, siguiendo los lineamientos propuestos por el ATC-6-2 [7]. Los diferentes resultados fueron comparados y analizados para poder llegar a establecer que tipo de puentes serían los más afectados durante un posible sismo que ocurra en la ciudad.

A su vez, se espera que los resultados obtenidos sirvan como una etapa preliminar a la definición de funciones de vulnerabilidad y matrices de probabilidad de daño en puentes de dicha zona, de tal forma que trabajos de este tipo sirvan de base para la elaboración posterior de programas de prevención tales como obras de reforzamiento, y programas de emergencia que permitan proponer rutas de evacuación ante un desastre natural de gran magnitud como un sismo.

MODELAMIENTO Y ANÁLISIS

El objetivo principal del modelamiento y el análisis es la cuantificación de la respuesta sísmica en términos, de desplazamiento y fuerza o deformaciones y esfuerzos. Siendo esta cuantificación necesaria tanto para el diseño de nuevos puentes, como para la evaluación sísmica de los existentes [8].

Debido al dimensionamiento y detalle de los nuevos puentes, las herramientas de análisis y diseño se utilizan principalmente para determinar la demanda sísmica en forma de fuerzas y deformaciones, mientras que para la evaluación de la vulnerabilidad sísmica de

puentes existentes el énfasis se concentra en la deformación disponible y en la cuantificación de la capacidad de la estructura para resistir los esfuerzos que impone la acción sísmica.

Por consiguiente, al diseñar se utilizan modelos conformados por elementos de dimensiones aproximadas y características de materiales nominales. Pero, al calcular la demanda sísmica se desarrollan modelos que representan sistemas estructurales globales, utilizando técnicas de análisis, lineales con carga dinámicas o su equivalente estática.

Luego, la evaluación de la vulnerabilidad sísmica de puentes existentes se orienta a la cuantificación de capacidades basadas en dimensiones existentes, en los detalles de diseño con los que cuenta la estructura, en las propiedades de sección efectiva, en las características de los materiales reales. Consistiendo la evaluación en la caracterización detallada del comportamiento fuerza - deformación más probable de las componentes individuales del puente, el cual se combina con un análisis completo, no lineal, para obtener estimativos de capacidad. Finalmente, se calcula la relación demanda-capacidad, lo cual requiere, generalmente, de la determinación de los desplazamientos [8].

Por todo lo anterior, es importante definir un modelo a cada puente que represente de la mejor manera el comportamiento real de la estructura ante la acción del sismo. A su vez, es necesario asignarle a cada modelo las características existentes para evaluar el daño sísmico.

La idealización de los puentes estudiados se realizó por medio de un modelo global, el cual consistió en idealizar la superestructura como un emparrillado, y la infraestructura como una estructura reticular, formada por pilas tipo pórtico como se muestra en la Figura 1, con el fin de representar el comportamiento real del puente. Este modelo permite idealizar fácilmente la superestructuras con geometrías curvas o sesgadas, o puentes con juntas de expansión, obteniendo una respuesta sísmica considerablemente aceptable.

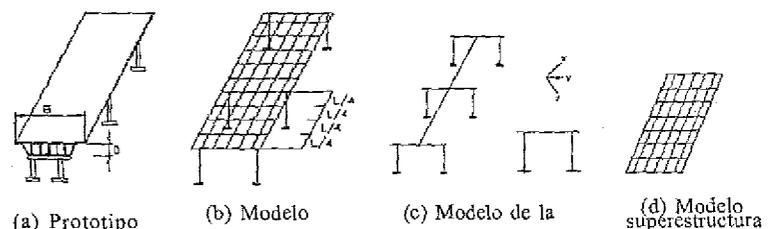


Figura 1. Modelo estructural utilizado.

DEFINICIÓN DE LA ACCIÓN SÍSMICA

Generalmente en el análisis y diseño estructural de los puentes la acción sísmica se representa por medio de los espectros de respuesta, los cuales se obtienen mediante la determinación probabilística de la amenaza sísmica. Sin embargo, en algunas circunstancias en las cuales se requerir representar el efecto del sismo en función de la aceleración o se solicita estudiar la respuesta a lo largo del tiempo, es necesario contar con acelerogramas correspondientes a escenarios sísmicos compatibles con la amenaza en la zona de interés. Es el caso de esta investigación, donde se buscó estudiar la respuesta dinámica de los puentes a lo largo del tiempo, para evaluar con ello el daño sísmico.

Por consiguiente, fue necesario contar con los registros de acelerogramas representativos de la amenaza en la ciudad. Para ello, primero se pensó en construir acelerogramas sintéticos que fueran compatibles con los espectros de respuesta de diseño. Esta opción fue descartada, dado que existía la inquietud si estos registros reflejarían adecuadamente el movimiento del terreno en términos de duración, energía, contenido frecuencial y de fases. Posteriormente, se tomo la opción de buscar acelerogramas más realistas, y para esto se seleccionaron registros apropiados de una base de datos real de movimiento fuerte correspondiente a escenarios sísmicos, compatibles con la amenaza como función de las magnitudes de las fuentes y sus distancias al sitio bajo estudio.

Para el caso se tomaron los acelerogramas utilizados en el estudio de Zonificación Sismogeotécnica Indicativa del Área Metropolitana de Bucaramanga [9], los cuales representan de manera muy simplificada los registros de aceleración que pueden ser tenidos en cuenta en posteriores análisis estructurales y de respuesta sísmica local del suelo. Los acelerogramas seleccionados corresponden a las dos fuentes posibles de la ciudad, la Falla Bucaramanga-Santa Marta y la Falla Frontal, como se puede ver el Tabla 1.

Tabla 1. Acelerogramas compatibles con el escenario sísmico [9].

FUENTE DEL SISMO	NOMBRE	MS seg	DURACIÓN	ESTACIÓN	FECHA
Falla Bucaramanga-Santa Marta	Helena	6.0	1.80	Carr. Coll	1935-10-31
	Friuli	6.0	0.20	Robic	1976-09-15
	Mam. Lak.	6.0	3.70	Long Val.D	1980-05-27
	Coalinga	5.8	8.30	Oil .Fie	1983-07-22
	Whittier Narr.	6.0	6.00	Wilson	1987-10-01
Falla Frontal	Umbria-Marche	5.9	7.50	Nocera Umbra	1997-09-2
	Montenegro	7.0	10.70	Herceg nov	1979-04-15
	Loma Prieta	7.1	9.70	Gilroy I	1989-10-18
	C. Mendocino	7.1	8.30	Butler Val.2	1992-04-25
	Duzze	7.3	14.2	Mud-Kaym.Bih	1999-11-12

De la base de acelerogramas compatibles con el escenario sísmico de la ciudad de Bucaramanga, se seleccionó para la evaluación de daño el acelerograma de Loma Prieta, y se escalo en amplitud a diferentes valores de aceleración, 0.15g, 0.2g, 0.25g, 0.30g, 0.35g y 0.40g. El acelerograma seleccionado sin escalar se representa en la Figura 2.

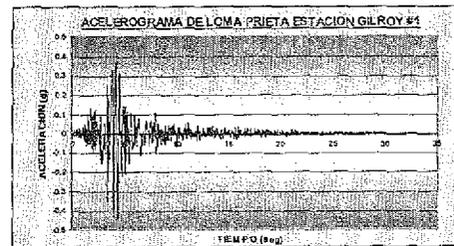


Figura 2. Acelerograma de Loma Prieta registrado en la Estación Gilroy # 1.

Definida la acción sísmica a nivel de la roca, se paso a estudiar la respuesta dinámica de los suelos donde se encuentran ubicados los puentes de la muestra de estudio. Para ello fue necesario conocer, según las características geológicas, geofísicas y geotécnicas, las zonas representativas de la ciudad para el cálculo de la respuesta dinámica. Nuevamente, del estudio de Zonificación Sismogeotécnica Indicativa del Área Metropolitana de Bucaramanga [9], se tomaron las siete zonas (Roca, Abanico de Bucaramanga, Bad Lands, Flujo de escombros, Terrazas Bajas y Medias, Llenos y Cañaveral), con sus correspondientes características mecánicas y dinámicas. En la Figura 3 se aprecia la descripción de la zona 2 la cual corresponde al Abanico de Bucaramanga.

PERFIL ZONA 22L	DESCRIPCIÓN	Espesor	γ _t (Ton/m ³)	V _s (m/s)
	GRAVAS	3	1.6	450
	Gravoso	27	2.3	600
	Organo	20	2.16	1300
	Roca		2.4	2000

Figura 3. Datos del perfil de la zona 2 correspondiente al Abanico de Bucaramanga.

Luego, se realizó el estudio de la respuesta dinámica de los suelos mediante análisis unidimensional utilizando la herramienta computacional SHAKE 91 [10], utilizándose como acción sísmica el sismo de Loma Prieta escalado a valores de aceleración entre 0,15g y 0,40g con incrementos de 0.05g, como se menciono anteriormente. Este análisis fue hecho en cada uno de los tipos de suelo que conforman el área de estudio.

Los resultados obtenidos fueron utilizados para calcular tanto la respuesta dinámica de los puentes como su correspondiente daño sísmico.

SELECCIÓN DE LA MUESTRA DE PUENTES

El área metropolitana de Bucaramanga la conforman las poblaciones de Floridablanca, Piedecuesta, Girón y Bucaramanga, contando con alrededor de 63 puentes carretables. La gran mayoría han sido construidos en hormigón entre reforzado y preforzado [11]. Muchos de ellos corresponden a estructuras viales de un solo vano, con superestructura conformada por vigas y losa. En su mayoría son rectos, existiendo algunos con superestructura curva o sesgada. En cuanto al sistema de pilas, los hay múltiples columnas y columna simple.

De los sesenta y tres, se seleccionaron diez como los puentes más representativos de los puentes de varios vanos, ver Tabla 2. Estructuras de un solo vano no fueron tenidas en cuenta por considerar que su vulnerabilidad es menor. Los puentes seleccionados corresponden a estructuras de hormigón tanto reforzado como preesforzado, con diferente número de luces que van desde 2 hasta incluso 9; con

longitud de vano desde 12 hasta 39 metros de longitud, con superestructura en vigas losa y vigas cajón. En cuanto a la forma de la superestructura predomina la recta, pero existe dentro de la muestra puentes curvos como el número 5 y el 10, uno sesgado, el puente número 6. En lo referente al tipo de pila, las hay de todas clases, desde la formada por varias columnas configurando un pórtico hasta la pila consistente en una única columna, ver la Tabla 2. Con secciones transversales de pila desde circulares, hasta de sección tipo cajón. Las alturas de las pilas también varían significativamente, incluso dentro del mismo puente como en el caso de las estructuras número 8 y 9.

Luego, a cada uno de los puentes de la muestra fue necesario visitarlos para conocer su estado de conservación y a su vez, se requirió levantar toda la información correspondiente a los detalles constructivos de las pilas, cantidad de refuerzos y su distribución, características de los materiales usados, tipos de dispositivos de apoyo y sus respectivas longitudes de apoyo. La recolección de toda esta información, no es una tarea fácil de realizar; pero gracias a la colaboración de las entidades gubernamentales y de los consultores y constructores, fue posible.

Tabla 2. Muestra de puentes [11]. (Primera parte)

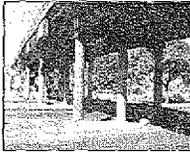
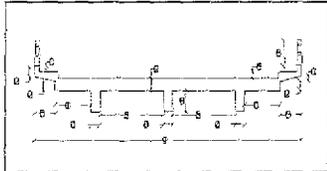
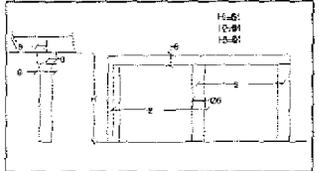
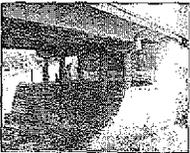
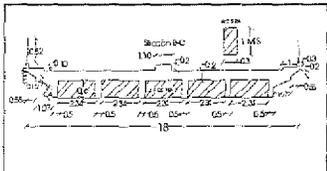
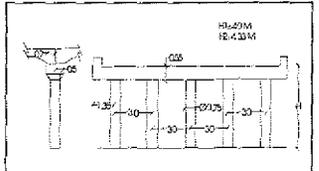
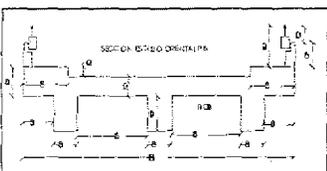
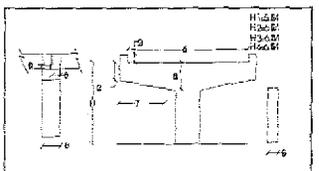
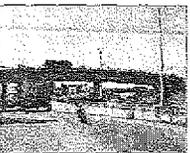
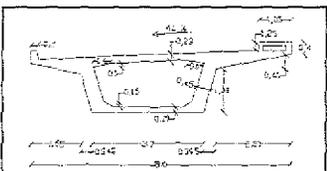
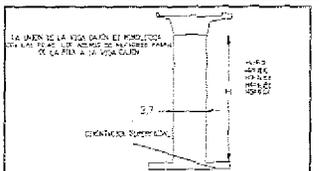
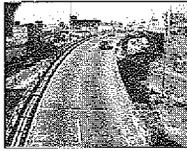
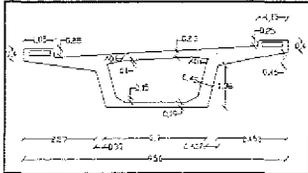
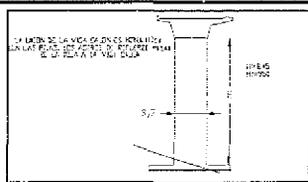
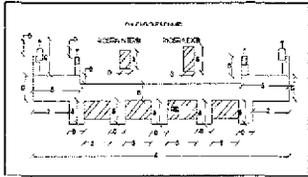
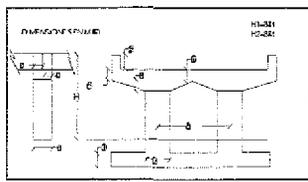
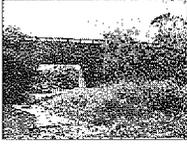
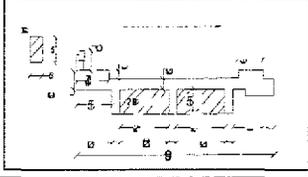
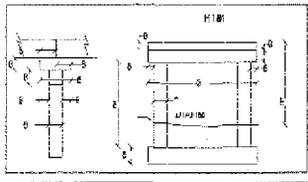
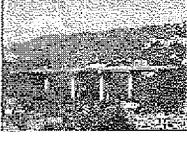
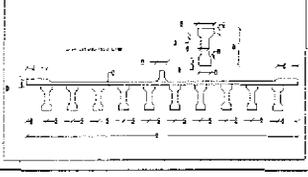
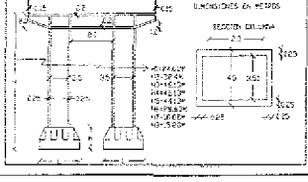
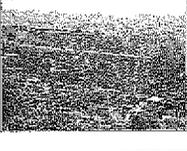
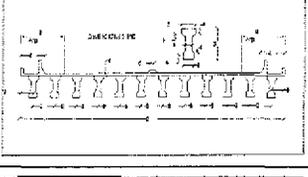
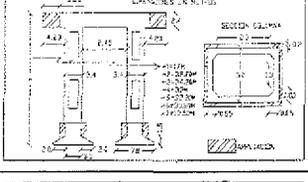
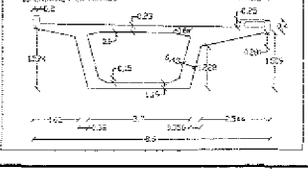
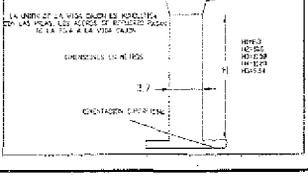
PUENTE	# VANOS VANO (M)	LMAX	FOTO	TIPO DE SUPERESTRUCTURA	TIPO DE PILA
1	4	12			
2	3	21.3			
3	6	23.5			
4	6	30			

Tabla 2. Muestra de puentes [11]. (Segunda parte)

PUENTE	# VANOS VANO (M)	L _{MAX}	FOTO	TIPO DE SUPERESTRUCTURA	TIPO DE PILA
5	3	30			
6	3	23.8			
7	2	20.6			
8	9	39			
9	8	34.2			
10	4	30			

ÍNDICES DE DAÑO ESTRUCTURAL

En la evaluación de la respuesta inelástica de estructuras de hormigón sometidas a acciones sísmicas, la evaluación del daño estructural es un aspecto de gran importancia. De hecho, esta evaluación contribuye significativamente a la interpretación objetiva de los resultados de un análisis no lineal. Siendo muy importante su utilización en los estudios de vulnerabilidad y riesgo sísmico.

Sin embargo, es de anotar que el problema de evaluar cuantitativamente el daño es complejo y que aún no existe un criterio unificado, tanto para la definición de los modelos analíticos como para la descripción del daño en sí, principalmente debido a la gran variedad de tipos estructurales y sus propiedades, así como a las características de las acciones aplicadas. Otro aspecto importante que hay que mencionar, es la relación entre los modelos de daño y las hipótesis utilizadas en la idealización de la estructura. Los modelos estructurales presentan

diferentes niveles de discretización, respondiendo cada uno de ellos a diversas hipótesis simplificadoras, las cuales deben ser consideradas en el planteamiento de los modelos de daño. La definición de un modelo de daño cubre la solución de dos problemas fundamentales, ambos asociados a las simplificaciones del modelo estructural, que son: a) El escoger uno o varios parámetros estructurales válidos para describir la evolución del daño en ciertas zonas de la estructura; b) La combinación de dichos parámetros en una función de daño, capaz de cuantificar el daño global mediante indicadores de daño y proporcionar una medida efectiva de la proximidad de fallar.

Luego, para describir adecuadamente la evolución del daño, los indicadores de daño deben ser funciones monotónicas y no decrecientes con el tiempo, funciones adimensionales que representen todos los estados de daño, desde su ausencia hasta el colapso.

A continuación se describe el modelo de daño propuesto por Park y Ang [2] [3] [4] [5], y la metodología propuesta en el ATC-6-2 [7] para cuantificar la relación capacidad demanda sísmica en los puentes. Estas fueron a su vez las dos formas de evaluar el daño en este trabajo.

A. Modelo de daño de Park y Ang.

El modelo de Park y Ang [2] [3] [4] [5] ha sido ampliamente utilizado en edificios de hormigón, y en estudios como puentes que ha mostrado buenos resultados [12]. Este modelo expresa el daño como una función de la deformación máxima y la energía histerética absorbida, luego el daño estructural sísmico se expresa como una combinación lineal del daño causado por la deformación excesiva y por la contribución del efecto de la repetición de la carga cíclica. Está representado en términos de un índice de daño de la siguiente manera:

$$D = \frac{\delta_m}{\delta_u} + \frac{\beta}{Q_y \delta_u} \int dE \quad (1)$$

Donde δ_m es la deformación máxima alcanzada; δ_u es la deformación última del elemento; Q_y es la resistencia de fluencia calculada; la integral de $\int dE$ es la energía histerética normalizada, y β es un parámetro del modelo. Bajo respuesta elástica, el valor de D sería cero teóricamente. Sin embargo, la ecuación (1) no dará cero, pero si valores de D pequeños los cuales son despreciables en el rango elástico.

Valores del índice de daño D , tal que $D \geq 1.0$ significan colapso completo o daño total. Para valores menores a 1.0 Park y Ang han propuesto diferentes niveles de daño de las edificaciones, los cuales pueden así mismo ser utilizados para puentes, ver Tabla 3.

Tabla 3. Clasificación según índice de daño.

GRADO DE DAÑO	APARICIA FÍSICA	ÍNDICE DE DAÑO	ESTADO DE LA EDIFICACIÓN
Colapso	Colapso total o parcial de estructura	>1.0	Perdida de la estructura (no reparable)
Severo	Extensivo agrietamiento del concreto, descubrimiento del refuerzo	1.0 - 0.4	Más haya de la reparación
Moderado	Grietas extensas y profundas, descascaramiento de los elementos más débiles	0.4 - 0.25	Reparable
Ligero	Grietas menores, aplastamiento parcial del concreto en columnas	0.25 - 0.1	Reparable
Simple	Ocurrencia de grietas esporádicas	< 0.1	Reparable

B. Método ATC6-2

El ATC6-2 [7] propone determinar un índice de daño a partir de la relación Capacidad/Demanda de los elementos más vulnerables sísmicamente del puente como los apoyos, las pilas y la cimentación, resaltando a los apoyos entre ellos.

La demanda máxima esta representada en las fuerzas axiales, momentos y cortantes ocasionados por el peso propio y por carga sísmica. A su vez, la capacidad es lo que puede soportar la estructura dado sus características estructurales. Al final, un índice de daño = 1 significa que la estructura no presenta probabilidad de daño; pero si el índice es = 1 es evidente la probabilidad de daño.

Información requerida para la evaluación del daño sísmico

La evaluación del daño requiere de la determinación de las características reales de los puentes. Inicialmente esto involucra una revisión completa de los planos y las memorias de construcción y mantenimientos, si éstas son disponibles. Una revisión de los cálculos originales de diseño y de las especificaciones para los cuales se diseño el puente debería también realizarse, si es posible. La información que tendrá efecto sobre la respuesta sísmica del puente y la capacidad de los elementos individuales debe obtenerse de estos documentos. De los planos

pueden obtenerse usualmente suficientes detalles estructurales, la información sobre la resistencia de los materiales y la cimentación. Las memorias de mantenimiento a menudo contienen información sobre la condición actual de los materiales o elementos estructurales.

A su vez, debe hacerse una inspección de cada puente para verificar la información obtenida de la revisión de sus registros, y también se debe hablar con el personal de inspección y mantenimiento del puente. Los detalles que deben ser anotados en la inspección de campo son los siguientes:

- Movimiento lateral inusual bajo la carga de tráfico.
- Aberturas o desplazamientos inusuales de las juntas de expansión.
- Apoyos dañados o en mal funcionamiento.
- Daño o deterioro de los miembros estructurales principales y secundarios.
- Carga muerta extra que no se muestra en los planos.
- Erosión inusual del suelo cerca de la fundación.
- Detalles no estructurales no mostrados en los planos, tales como barandas separadoras, que podrían afectar la rigidez lateral de la estructura o su comportamiento bajo carga sísmica.
- Movimiento horizontal o vertical o volcamiento de los estribos, columnas o pilas.
- Cualquier incongruencia con los planos y especificaciones

Una vez se cuenta con toda la información se debe calcular la relación Capacidad/Demanda de los componentes del puente como juntas de expansión, apoyos, pilas y estribos. En la Tabla 4 se indica el aspecto que se debe evaluar de cada componente, por ejemplo en los apoyos como mínimo se debe calcular la relación Capacidad/Demanda en cuanto a la longitud de apoyo y sus cargas.

Tabla 4. Componentes para los cuales deben calcularse las relaciones capacidad/ demanda sísmica.

ELEMENTO ESTRUCTURAL	ASPECTO POR EVALUAR
JUNTAS DE EXPANSIÓN Y APOYOS	-Longitud de Apoyo -Cargas
PILAS Y CIMENTOS (Columnas de concreto reforzado)	-Anclaje -Empalmes -Cortante -Confinamiento -Rotación de la cimentación
ESTRIBOS	-Desplazamientos

No se debe olvidar evaluar el efecto de licuefacción, pues es uno de los aspectos que mayor daño ha causado en sismos pasados.

Siendo, la ecuación básica para determinar la relación de Capacidad/Demanda sísmica, r , es:

$$r = \frac{R_c - \sum Q_i}{Q_{EQ}} \quad (2)$$

Donde

R_c = Capacidad de fuerza o desplazamiento último nominal del componente estructural que se está evaluando.

$\sum Q_i$ = Sumatoria de las demandas de desplazamiento de fuerzas para cargas diferentes a las sísmicas las cuales están incluidas en el grupo de cargas definidas por las normas de diseño.

Q_{EQ} = Demanda de desplazamiento o fuerza para la carga sísmica de diseño en el sitio.

Las relaciones Capacidad/Demanda deben calcularse en la capacidad última nominal sin el uso de los factores de reducción de la capacidad (ϕ) para considerar una posible resistencia baja o un subdimensionamiento de los miembros. Esto se hace porque el objetivo de las relaciones Capacidad/Demanda es determinar el nivel más probable de falla.

Por lo anterior, este procedimiento, resulta ser muy apropiado para hacer un chequeo a los resultados obtenidos utilizando la herramienta computacional IDARC-2D [6].

RESULTADOS

Definida tanto la muestra de puentes como la aceleración que representa la acción sísmica para cada uno de los escenarios sísmicos seleccionados, el siguiente paso fue evaluar el daño mediante el modelo de Park y Ang por medio de la herramienta computacional IDARC-2D [6]. Para la evaluación del daño mediante esta herramienta se modeló, del puente, solamente la infraestructura, asumiendo a su vez, que esta era la parte más resistente a la acción del sismo [13]. Los resultados obtenidos se muestran a continuación, de manera que en la Tabla 5 se presentan los índices de daño alcanzados por los puentes cuando la acción sísmica tiene un valor de aceleración máximo de 0.2 g. En las Tablas 6 y 7 se presentan, a su vez, los resultados ante acciones sísmicas cuyos valores máximos son 0.3 g y 0.4 g respectivamente. En la tabla 8, 9, 10 se presentan los resultados de daño obtenidos por la metodología propuesta por el ATC 6-2 de los puentes en estudio.

Tabla 5. Índices de Daño ante la acción sísmica de 0.2g. utilizando el modelo de Park y Ang.

PUENTE	ACCIÓN SÍSMICA (m/seg ²)	ÍNDICE DE DAÑO	GRADO DE DAÑO	DESCRIPCIÓN DEL DAÑO
1	0.2g	0.06	Simple	Ocurrencia de grietas esporádicas -- Reparable
2	0.2g	0.00	Simple	Ocurrencia de grietas esporádicas -- Reparable
3	0.2g	0.03	Simple	Ocurrencia de grietas esporádicas -- Reparable
4	0.2g	0.14	Ligero	Grietas menores, aplastamiento parcial del concreto en columnas - Reparable
5	0.2g	0.09	Simple	Ocurrencia de grietas esporádicas -- Reparable
6	0.2g	0.03	Simple	Ocurrencia de grietas esporádicas -- Reparable
7	0.2g	0.03	Simple	Ocurrencia de grietas esporádicas -- Reparable
8	0.2g	0.01	Simple	Ocurrencia de grietas esporádicas -- Reparable
9	0.2g	0.02	Simple	Ocurrencia de grietas esporádicas -- Reparable
10	0.2g	0.15	Ligero	Grietas menores, aplastamiento parcial del concreto en columnas - Reparable

Tabla 6. Índices de Daño ante la acción sísmica de 0.3g. utilizando el modelo de Park y Ang.

PUENTE	ACCIÓN SÍSMICA (m/seg ²)	ÍNDICE DE DAÑO	GRADO DE DAÑO	DESCRIPCIÓN DEL DAÑO
1	0.3g	0.13	Ligero	Grietas menores, aplastamiento parcial del concreto en columnas - Reparable
2	0.3g	0.07	Simple	Ocurrencia de grietas esporádicas -- Reparable
3	0.3g	0.07	Simple	Ocurrencia de grietas esporádicas -- Reparable
4	0.3g	0.20	Ligero	Grietas menores, aplastamiento parcial del concreto en columnas - Reparable
5	0.3g	0.12	Ligero	Grietas menores, aplastamiento parcial del concreto en columnas - Reparable
6	0.3g	0.17	Ligero	Grietas menores, aplastamiento parcial del concreto en columnas - Reparable
7	0.3g	0.05	Simple	Ocurrencia de grietas esporádicas -- Reparable
8	0.3g	0.03	Simple	Ocurrencia de grietas esporádicas -- Reparable
9	0.3g	0.02	Simple	Ocurrencia de grietas esporádicas -- Reparable
10	0.3g	0.20	Ligero	Grietas menores, aplastamiento parcial del concreto en columnas-Reparable

Tabla 7. Índices de Daño ante la acción sísmica de 0.4g. utilizando el modelo de Park y Ang.

PUENTE	ACCIÓN SÍSMICA (m/seg ²)	ÍNDICE DE DAÑO	GRADO DE DAÑO	DESCRIPCIÓN DEL DAÑO
1	0.4g	4.04	Severo	Extensivo agrietamiento del concreto, descubrimiento del refuerzo -- Mas haya de la reparación
2	0.4g	0.08	Simple	Ocurrencia de grietas esporádicas -- Reparable
3	0.4g	0.08	Simple	Ocurrencia de grietas esporádicas -- Reparable
4	0.4g	0.39		Moderado Grietas extensas y profundas, descascaramiento de los elementos mas débiles - Reparable
5	0.4g	0.20	Ligero	Grietas menores, aplastamiento parcial del concreto en columnas - Reparable
6	0.4g	0.21	Ligero	Grietas menores, aplastamiento parcial del concreto en columnas
7	0.4g	0.07	Simple	Ocurrencia de grietas esporádicas -- Reparable
8	0.4g	0.04	Simple	Ocurrencia de grietas esporádicas -- Reparable
9	0.4g	0.03	Simple	Ocurrencia de grietas esporádicas -- Reparable
10	0.4g	0.39	Moderado	Grietas extensas y profundas, descascaramiento de los elementos mas débiles - Reparable

A manera de comparar los valores de índices de daño obtenidos anteriormente, se calculo la relación Capacidad/Demanda siguiendo los lineamientos formulados por el ATC-6-2. En las Tablas 8, 9 y 10 se muestran los resultados obtenidos para los diferentes valores de acciones sísmicas.

Es de resaltar que el modelo del ATC-6-2 permite evaluar la relación Capacidad/Demanda en cada uno de los elementos de la estructura, pudiéndose identificar los

puntos donde se produce el daño. A su vez, se puede identificar un valor de relación Capacidad/Demanda total para el puente el cual corresponde al menor valor obtenido.

En las siguientes Tablas 8, 9 y 10 se indican los valores obtenidos en cada elemento y el correspondiente para el puente. Así mismo, en la última columna se indica el elemento más crítico de la estructura el cual corresponde a menor valor de relación Capacidad/Demanda.

Tabla 8. Índices de Daño ante la acción sísmica de 0.2g utilizando el modelo del ATC 6-2.

PUENTE	RELACIÓN CAPACIDAD/DEMANDA DE LOS ELEMENTOS						RELACIÓN C/D PUENTE	ELEMENTO MÁS CRÍTICO
	APOYO		PILAS					
	LONGITUD DE APOYO	FUERZA EN LOS APOYOS	ANCLAJE	CONFINAMIENTO	EMPALME	CORTANTE		
1	1.00	<1	1.00	>1	No	>1	<1	APOYOS
2	<1	<1	<1	>1	No	<1	<1	PILA
3	<1	<1	1.00	>1	No	>1	<1	APOYOS
4	>1	<1	1.00	No	No	>1	<1	APOYOS
5	>1	<1	1.00	>1	No	>1	<1	APOYOS
6	<1	<1	1.00	No	No	>1	<1	APOYOS
7	>1	<1	1.00	>1	No	>1	<1	APOYOS
8	<1	<1	1.00	No	>1	>1	<1	APOYOS
9	<1	<1	1.00	No	>1	>1	<1	APOYOS
10	>1	<1	1.00	No	No	>1	<1	APOYOS

Tabla 9. Índices de Daño ante la acción sísmica de 0.3g utilizando el modelo del ATC 6-2

PUENTE	RELACIÓN CAPACIDAD/DEMANDA DE LOS ELEMENTOS						RELACIÓN C/D PUENTE	ELEMENTO MÁS CRÍTICO
	APOYO		PILAS					
	LONGITUD DE APOYO	FUERZA EN LOS APOYOS	ANCLAJE	CONFINAMIENTO	EMPALME	CORTANTE		
1	<1	<1	1.00	>1	No	>1	<1	APOYOS
2	<1	<1	<1	>1	No	<1	<1	PILA
3	<1	<1	1.00	>1	No	>1	<1	APOYOS
4	>1	<1	1.00	No	No	>1	<1	APOYOS
5	>1	<1	1.00	>1	No	>1	<1	APOYOS
6	<1	<1	1.00	No	No	>1	<1	APOYOS
7	>1	<1	1.00	>1	No	>1	<1	APOYOS
8	<1	<1	1.00	No	>1	>1	<1	APOYOS
9	<1	<1	1.00	No	>1	<1	<1	APOYOS
10	>1	<1	1.00	No	No	>1	<1	APOYOS

Tabla 10. Índices de Daño ante la acción sísmica de 0.4g utilizando el modelo del ATC 6-2

PUENTE	RELACIÓN CAPACIDAD/DEMANDA DE LOS ELEMENTOS						RELACIÓN C/D PUENTE	ELEMENTO MÁS CRÍTICO
	APOYO		PILAS					
	LONGITUD DE APOYO	FUERZA EN LOS APOYOS	ANCLAJE	CONFINAMIENTO	EMPALME	CORTANTE		
1	<1	<1	1.00	>1	no	>1	<1	APOYOS
2	<1	<1	<1	>1	no	<1	<1	PILA
3	<1	<1	1.00	>1	no	>1	<1	APOYOS
4	>1	<1	1.00	no	no	>1	<1	APOYOS
5	>1	<1	1.00	>1	no	<1	<1	APOYOS
6	<1	<1	1.00	no	no	>1	<1	APOYOS
7	>1	<1	1.00	<1	no	>1	<1	APOYOS
8	<1	<1	1.00	no	>1	>1	<1	APOYOS
9	<1	<1	1.00	no	>1	<1	<1	APOYOS
10	>1	<1	1.00	no	no	>1	<1	APOYOS

CONCLUSIONES

Comparando los resultados obtenidos se puede concluir lo siguiente:

Observando los resultados del IDARC-2D los puentes solamente presentan daños ante una acción donde la aceleración máxima es de 0.4 g, en los restantes escenarios sísmicos los daños fueron

ligeros. Por el contrario, mediante el ATC6.2 los puentes registran relaciones Capacidad/Demanda menores de 1, evidenciando el daño en la estructura. Daño que generalmente se esta presentando en los apoyos.

La explicación a lo anterior esta en el hecho de que mediante el IDARC-2D se modeló solamente la pila del puente, sin considerar la estructura completa, de esta forma aspectos como los apoyos quedaron

fuera del alcance de esta evaluación. Por el contrario el ATC6-2, además de las pilas involucra otros elementos vulnerables a la acción sísmica; permitiendo que los valores obtenidos indiquen la susceptibilidad que presenta la estructura del puente a sufrir daño, para localizar los elementos que deben ser mejorados o reforzados.

Por lo anterior se concluye que el ATC-6-2 ofrece un buen estimativo en el momento de identificar los puentes que pueden llegar a ser más vulnerables sísmicamente.

A su vez, para suplir la deficiencia encontrada en la utilización del IDARC-2D se recomienda el empleo de la versión desarrollada para puentes IDARD-BRIDGE [14], la cual permite modelar todos los componentes de los puentes.

REFERENCIAS

- [1] SAP2000: Integrat Finite Element Analysis and Design of Structures, Computers and Structures. Inc., Berkeley, California, USA (Versión 6.1). 1997.
- [2] Park, Y. J., Ang, A. H-S., y Wen, Y. K., (1987). "Damage-Limiting Aseismic Design of Buldings", Earthquake spectra, Vol. 3 No. 1, pp 1-25.
- [3] Park, Y. J, y Ang, A. H-S., (1985). "Mechanistic Seismic Damage Model for Reinforced Concrete, Journal of Structural Engineering", ASCE, Vol. 111, No. 4., pp 722-739
- [4] Park, Y. J., Ang, A. H-S., y Wen, Y. K., (1985). "Seismic Damage Analysis of Reinforced Concrete Buildings", Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 111, NO. 4., pp 740-757
- [5] Park, Y. A., Ang, Y. Wen, (1984). "Seismic Damage Analysis and Damage Limiting Desing of R. C. buildings", Civil Engineering studies structural research series N.- 516, University of Illinois at urbana - Chanpaign, Illinois, ASCE, Vol. 111, NO. 4., pp 740-757
- [6] Park, A. Reinhorn, S. Kunnath, N. (1988). "Modeling of R/C building structures with flexible floor diaphragms (IDARC-2D)", Technical Report NCEER-88-0035, Buffalo: National Center for Earthquake Engineering Research, State University of New York at Buffalo.
- [7] ATC-6-2, (1983). Seismic Retrofitting Guidelines for Highway Bridges, Applied Technology Council.
- [8] Priestley, M.J., Seible, F. y Calvis, G.M. (1993). Seismic Design and Retrofit of Bridges, John Wiley & Somms, Inc, 686 pg.
- [9] Zonificación Sismogeotécnica Indicativa del Área Metropolitana de Bucaramanga, (2001), Subdirección de Amenazas Geoambientales, INGEOMINAS, Bogota, Colombia.
- [10] I. Idriss and Joseph I. Sun, (1992). SHAKE 91," Program for Conducting Equivalent Linear Seismic Response Anal ices of Horizontally Layered Soil Deposits", Department of Civil & Environmental Engineering, University of California.
- [11] Ortiz P y Rúguelos M, (2001). Inventario de los Puentes Carreteables del Área Metropolitana de Bucaramanga, Trabajo Final de carrera, Escuela de Ingeniería Civil, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga.
- [12] Bahrenberg, M.E. y Routch, D.A. (1988). "Evaluation of seismic design procedures for Highway bridges », Journal of Structural Divisions, ASCE, 114(7), 1588-1605.
- [13] Amado L y Martínez C, (2002). Estimación del Índice de Daño de los Puentes del Área Metropolitana de Bucaramanga, Trabajo Final de Carrera, Escuela de Ingeniería Civil, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga.
- [14] <http://civil.eng.buffalo.edu/idarc-bridge>
- [15] Zafra y Rueda, (2001). Estudio Comparativo de los Modelos de Daño para Puentes, Trabajo Final de Carrera, Escuela de Ingeniería Civil, Universidad Industrial de Santander.