

Análisis Estructural, Capacidad de Carga y Rehabilitación del Puente Histórico 1142

Ramón E. Hilerio López

Maestría en Ingeniería en Ingeniería Civil

Dr. Héctor J. Cruzado

Departamento de Ingeniería Civil, Ingeniería Ambiental y Agrimensura

Universidad Politécnica de Puerto Rico

Resumen — El objetivo de este proyecto es conocer la capacidad de carga de un puente histórico ubicado en el área Oeste de Puerto Rico para determinar el peso máximo que puede soportar. Para calcular la capacidad de carga resultante, se consideraron los efectos de pandeo local y lateral en la estructura y el método LRFR que utiliza el vehículo de diseño HL93. Tomando en consideración el deterioro que posee este puente, se calculó que la carga vehicular máxima que puede soportar es de 27 toneladas. Por otro lado, si se desea aumentar la capacidad de carga del mismo, se deben aplicar técnicas que no afecten su integridad histórica.

Palabras Claves — Capacidad de Carga, Puente de Coloso, Puente Histórico, Puente 1142.

PUENTE 1142

Durante el transcurso de los años, la sociedad se ha encaminado en fomentar proyectos de infraestructura que le brinden a la ciudadanía beneficios en el estilo de vida que llevan. Esto ha evolucionado de tal manera que hoy día existen edificios inteligentes, semáforos, puentes y otros. Los puentes son estructuras que se han construido para superar las barreras naturales que existen y permitir a la ciudadanía viajar de un lugar a otro, tomando como prioridad la seguridad del transeúnte y el tiempo de viaje. Para cumplir con esto, es necesario realizar inspecciones periódicas a los puentes que determinen la condición en que se encuentran y la capacidad que pueden soportar. Es por esto que este proyecto se enfocará en el análisis estructural de un puente histórico localizado en la colindancia de Aguadilla y Aguada para determinar la capacidad de carga que posee y las mejoras que deben realizarse, de ser necesario.

Este puente es conocido como el Puente de Coloso y está identificado por la Autoridad de

Carreteras y Transportación (ACT) como el Puente 1142. Se encuentra en el kilómetro 0.6 de la Carretera PR-418 cruzando el Río Culebrinas de Aguadilla. En la Figura 1, se puede observar su ubicación, la cual se encuentra en las coordenadas 18°23'56.60" N, 67°09'22.20" E según el programa "Google Earth".



Figura 1

Vista Aérea de Ubicación de Puente 1142

TRASFONDO HISTÓRICO

El Puente 1142 fue construido en el 1928 por la Central Azucarera Coloso como parte del sistema de ferrocarril privado que poseía esta empresa. Debido al lugar en que se ubicaba y al uso que se le dio en la década de 1920, se le conocía como el Puente de Coloso. Según los datos recopilados del Registro Nacional de Lugares Históricos [1], este puente se denomina como el puente de mayor extensión asociado con este sistema. El objetivo del mismo era brindar acceso al ferrocarril de la Central Coloso y a los vehículos que transitaban por esta área a través del Río Culebrinas para transportar la caña producida en las tierras agrícolas hasta el molino de azúcar para ser procesada. La ruta de este ferrocarril terminaba en la Hacienda Victoria de Aguadilla en la cual se conectaba con el sistema de ferrocarril conocido como "American Railway of Porto Rico" y con la carretera estatal PR-2. En la Figura 2, se puede observar una imagen que

demuestra la composición estructural del mismo en esta época.



Figura 2
Foto Antigua de Puente 1142

En 1940, el suplidor mayoritario de caña de la Central Coloso, Comunidad Agrícola Bianchi, utilizó esta ruta para transportar su cosecha hasta el molino de azúcar. Los terrenos agrícolas de la Comunidad Agrícola Bianchi estaban localizados cercanos de la Central Coloso. Los equipos utilizados por esta comunidad para transportar la caña consistían de una locomotora de gasolina de catorce toneladas, una locomotora de diésel marca Whitcomb de nueve toneladas, tres locomotoras de diésel marca Whitcomb de siete toneladas y dos locomotoras adicionales de tres y cinco toneladas.

Sin embargo, según transcurría el tiempo, el Departamento del Interior comenzó a realizar mejoras a las carreteras, disminuyendo cada vez más el uso del ferrocarril y a su vez aumentando el uso de los camiones de carga. Para el año 1945, los camiones se convirtieron en el método de transportación dominante para la caña. Cuando la compañía “American Railroad Company of Porto Rico” cesó sus operaciones en el 1953, las vías del ferrocarril perdieron importancia y fueron abandonadas gradualmente. A finales de la década de 1950, la Central Coloso removió las vías del tren de su ruta y comenzó a utilizar única y exclusivamente camiones para transportación. En el 1956, el puente de Coloso se convirtió en parte de la carretera terciaria PR-418.

El 4 de agosto de 2000, la legislatura de Puerto Rico aprobó la ley Núm. 142 del año 2000 (Ley de la Reserva Agrícola del Valle de Coloso),

designando esta área como reserva agrícola para estimular la producción y el desarrollo agrícola de esta área y evitando que el área sea utilizada con otros fines que pudieran afectar esta estructura. Por último, el 29 de noviembre de 2010, el Registro Nacional de Lugares Históricos aprobó que este puente fuera incluido dentro del listado de Puentes Históricos de Puerto Rico.

METODOLOGÍA DE INSPECCIÓN DE PUENTES

Según la Oficina de Puentes de la ACT, las guías que se deben utilizar como referencia para la inspección de puentes en Puerto Rico son las generadas por “*Federal Highway Administration*” (FHWA) [2] y la “*American Association of State Highway and Transportation Officials*” (AASHTO) [3]. De acuerdo al Manual de Inspección de Puentes de AASHTO [3], los puentes deben ser inspeccionados en un intervalo de tiempo que no exceda los veinticuatro meses para determinar el estado en que se encuentran. Estas inspecciones deben ser realizadas para determinar la condición física y funcional del puente. A través de las mismas, se podrá comprobar el nivel de deterioro que posee y determinar si este aún posee la capacidad de soportar la carga para la que fue diseñado.

De acuerdo a estos manuales, las personas encargadas de realizar las inspecciones de puentes deben cumplir con los requisitos mínimos mostrados en “*National Bridge Inspection Standards*” [4]. Este estándar especifica que la eficiencia de la inspección está influenciada por el conocimiento del inspector sobre el funcionamiento de un puente y cuales elementos controlan su fuerza y estabilidad. Además, indica que el inspector debe tener conocimiento sobre el proceso constructivo de los puentes, interpretar correctamente los planos de construcción y realizar informes que expresen claramente lo encontrado durante la inspección. Existen programas de adiestramiento que se encargan en capacitar a los inspectores de puentes

para cumplir con estos estándares incluyendo inspecciones de puentes debajo del agua.

Por otro lado, los componentes con mayor relevancia al momento de realizar una inspección de un puente son la superestructura, la subestructura y el tablero como se puede apreciar en la Figura 3. La superestructura se refiere a la parte del puente que soporta el tablero y conecta un elemento de la subestructura con otro. La subestructura se refiere a la parte del puente que aguanta la superestructura y transfiere todas las cargas estructurales a las fundaciones del puente. Por último, el tablero es la parte del puente por la cual los vehículos transitan y que adquiere directamente las cargas de tráfico.

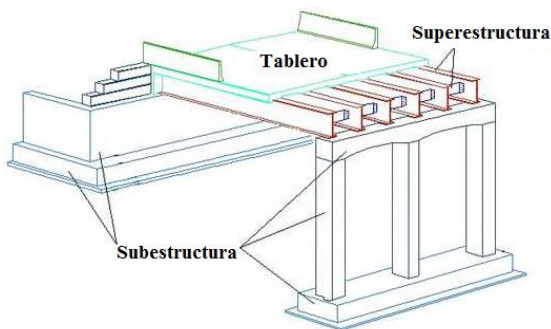


Figura 3

Detalle Típico de Elementos Estructurales de un Puente

Antes de realizar la inspección de un puente, se debe realizar un plan de trabajo apropiado. A través de este plan, se podrá anticipar los problemas que se pueden encontrar en la estructura y le permitirá al inspector utilizar las técnicas y el equipo adecuado para la inspección. Según el Manual de Inspección de Puentes de AASHTO [3], al realizar una inspección se debe tomar el tiempo necesario para encontrar la causa de los defectos encontrados y determinar la seriedad de lo encontrado. De ser posible, se debe observar el comportamiento del puente cuando pasan vehículos pesados y determinar si ocurre vibración, ruido excesivo o deflexión. Adicional a esto, se debe identificar riesgos adicionales que puedan ocasionar fuego en el puente como lo puede ser la acumulación de escombros, basura o hierba. Si no se poseen los planos estructurales del puente a ser analizado, se

deben realizar medidas en el campo de cada uno de los elementos. Estas medidas se deben realizar con suficiente precisión para poder luego identificar las propiedades de cada elemento.

Al momento de inspeccionar la superestructura del puente, se debe verificar la condición de los largueros y vigas principales e identificar si ha sufrido daño debido al sobrepeso de los camiones y si ocurre alguna deflexión o vibración excesiva cuando transitan los vehículos. Se debe verificar si hay almacenado algún material inflamable debajo o cercano al puente que pueda ocasionar algún fuego. También, se debe identificar si hay presente corrosión generalizada en elementos diagonales, montantes o uniones que haya ocasionado pérdida del área de la sección. Para esto se puede utilizar un calibre o micrómetro.

Luego de haber culminado la inspección del puente, se deben evaluar las deficiencias encontradas y, de encontrar una falla crítica, se le debe notificar inmediatamente a las agencias pertinentes para modificar el uso del mismo hasta que se realicen las mejoras necesarias.

INSPECCIÓN DE CAMPO

De la inspección realizada al Puente 1142, se desprende que el mismo está construido en hierro, hormigón y en forma de Cercha, como se puede observar en la Figura 4. Sus dimensiones son las siguientes: 85 pies de largo, 21.5 pies de ancho y 13 pies de altura. Posee un tablero en hormigón de 4.5 pulgadas de espesor con una capa de asfalto superficial de dos pulgadas y estribos en sus extremos para soportar la estructura. Adicional a esto, no posee elementos superiores que conecten la estructura entre sí.

En la Tabla 1 se desglosa las dimensiones de cada uno de los elementos medidos en sitio utilizando la nomenclatura del diagrama mostrado en la Figura 4. Para nombrar las secciones encontradas, se utilizó la base de datos históricos de la "American Institute of Steel Construction" AISC v14.1 y los datos provistos por la Oficina de Puentes de la ACT.

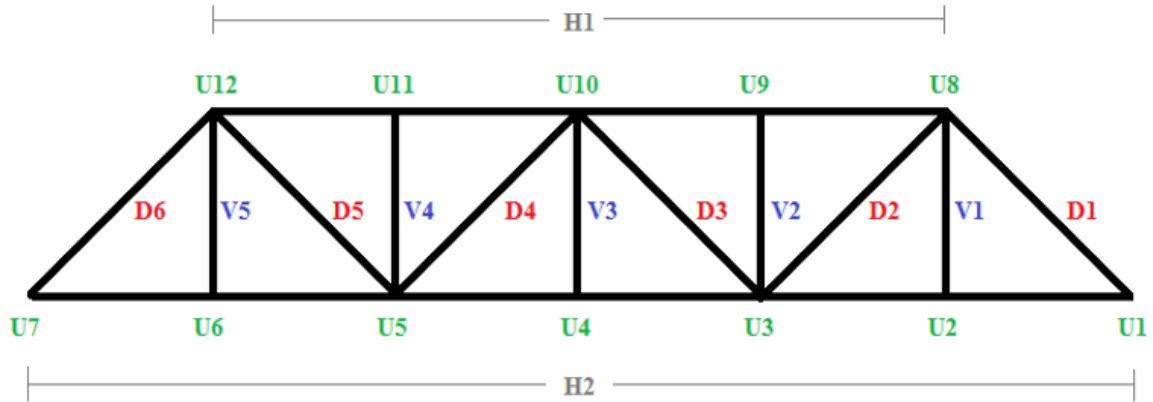


Figura 4
Diagrama de Elementos de las Secciones Laterales del Puente (Vista de perfil)

Por otro lado, el puente posee dos tipos de largueros de diferente tamaño que están encapsulados en hormigón. Según datos recopilados por el Registro Nacional de Lugares Históricos [1], el propósito de los más grandes era soportar la carga del ferrocarril, motores y carretas. Debido a que están encapsulados en hormigón y al difícil acceso para llegar a ellos, fue difícil identificar con exactitud el tamaño exacto de los mismos. Para identificar el tamaño de estos, se utilizó el diagrama provisto por la ACT, como se puede ver en la Figura 5.

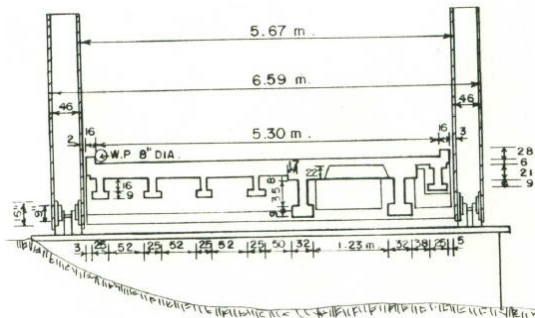


Figura 5
Vista de Perfil donde se Puede apreciar Tamaño de Largueros

Por último, el puente posee ciertas limitaciones otorgadas por la ACT. Por un lado, según se ilustra en la Figura 6, este posee un pórtico que limita a diez (10) pies de altura a los vehículos que transitan por el mismo. Por otro lado, posee un rotulo que especifica que la carga máxima que puede transitar por el puente es de cinco (5) toneladas, tal como se muestra en la Figura 7.

En resumen, el puente presenta corrosión generalizada en todos sus elementos. En algunos elementos la corrosión presentada es superficial, pero en otros ha afectado en tal magnitud que ha ocasionado pérdida del área de la sección. Esto puede ocasionar que el puente pierda capacidad de carga y que, por consiguiente, haya que limitar la carga de los vehículos que transitan por el mismo. Esto se puede apreciar mejor en áreas donde hay acumulación de basura, material vegetativo y agua.



Figura 6
Pórtico Instalado para Limitar la Altura de los Vehículos



Figura 7
Rotulación de Peso Máximo Permitido en el Puente

Tabla 1
Medidas de los Elementos Estructurales Obtenidas en la Inspección de Campo

Elemento	Peralte (in)	Ancho de alas (in)	Espesor de alas (in)	Largo del alma (in)	Espesor del alma (in)	Descripción
V1	10.00	6.00	0.38	9.25	0.30	Historic CB101
V2	10.00	6.00	0.38	9.25	0.30	Historic CB101
V3	10.00	6.00	0.38	9.25	0.30	Historic CB101
V4	10.00	6.00	0.38	9.25	0.30	Historic CB101
V5	10.00	6.00	0.38	9.25	0.30	Historic CB101
D1	12.13	3.00	0.38	11.38	0.30	C12x25 & 18x0.375 Top
D2	10.06	8.38	0.38	9.31	0.30	Historic CB102
D3	10.06	8.38	0.38	9.31	0.30	Historic CB102
D4	10.06	8.38	0.38	9.31	0.30	Historic CB102
D5	10.06	8.38	0.38	9.31	0.30	Historic CB102
D6	12.13	3.00	0.38	11.38	0.30	C12x25 & 18x0.375 Top
H1	12.13	3.00	0.38	11.38	0.30	C12x25 & 18x0.375 Top
H2	10.00	9.00	0.63	8.75	0.38	Historic H10s

ANÁLISIS Y RESULTADOS

Para modelar el comportamiento del Puente 1142, se utilizó el programa “CSiBRIDGE” de la compañía “Computers and Structures”. En la Figura 8, se muestra el modelo generado por este programa. Para la construcción de este modelo se utilizaron las medidas obtenidas en campo y se asumió que todos los elementos de hierro del puente están clasificados como Grado A7, basado en el periodo en que fue construido. Adicional a esto, se colocaron las cargas de asfalto (20.78 psf) y de un tubo ubicado en un extremo del puente (60 plf). Por último, se hicieron los ajustes necesarios en el programa para reducir el área de sección de cada elemento que poseía un nivel de corrosión avanzado.

Una vez creado el modelo, se aplicaron las cargas vivas del vehículo de diseño HL93 de acuerdo al método de Factor de Capacidad de Carga y Resistencia (LRFR, por sus siglas en inglés) del Manual de Inspección de Puentes [3]. Con los resultados obtenidos, se procedió a calcular el factor de capacidad de carga de cada elemento según (1).

$$RF = \frac{C - (Y_{DC})(DC) - (Y_{DW})(DW) \pm (Y_P)(P)}{(Y_{LL})(LL + IM)} \quad (1)$$

En los elementos diagonales centrales (D3 y D4) y en los elementos del cordón superior se obtuvieron valores menores a uno. Según el Manual de Inspección de Puentes [3], si el resultado obtenido es menor a uno, se debe realizar el análisis estructural nuevamente utilizando las cargas de AASHTO o las Cargas Legales del Estado. Basado en los resultados obtenidos con estas cargas, se determinará la capacidad de carga que puede resistir el puente y aplicar la rotulación necesaria.

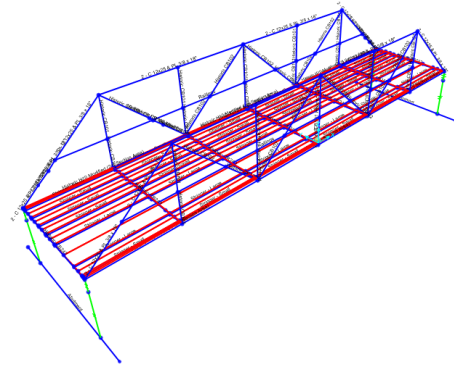


Figura 8
Modelo Analizado en el Programa “CSiBridge”

La Cargas Legales que se deben utilizar pueden variar dependiendo del lugar donde se realice el análisis. Según la ACT, las Cargas Legales que aplican a Puerto Rico para los vehículos de diseño son: SHV-3A, SHV-3S2 y FM 3-S2-2 [5]. En la Figura 9, se puede observar la configuración de estos vehículos. Esta configuración está especificada en la publicación de “*Transportation Research Circular*” [6]. Basado en las configuraciones de estos vehículos, se calculó la capacidad de carga del Puente 1142.

Por otro lado, para conocer la capacidad de carga, era necesario conocer la capacidad de los elementos estructurales que poseía el puente. Debido a que es un puente histórico que fue construido en la década de 1920, no existe información detallada que indique cuan resistente es cada elemento. Es por esto que se procedió a calcular la resistencia de estos utilizando la fórmula de Euler (2) para los elementos en compresión y la formula de fluencia (3) para los elementos en tensión, tomando en consideración los efectos de pandeo local y lateral.

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{KL^2} \quad (2)$$

$$T = F_y A_g \quad (3)$$

Para calcular el efecto de pandeo lateral que ocurre en el cordón superior del puente, se utilizaron dos métodos diferentes. Por un lado, se consultó con la ACT y fue recomendado calcular la resistencia del elemento según (2) utilizando el largo completo del cordón superior. Por otro lado, se utilizó el programa CRITICAR del Dr. Bernardo Deschappelles el cual provee un factor que al ser multiplicado por la carga axial del elemento obtenida en el análisis estructural, se obtiene la carga crítica axial que soporta el elemento. Para este cómputo se utilizaron varias verificaciones del Manual de Acero [7].

Comparando ambos métodos, se puede concluir que el método que utiliza el largo completo del puente para calcular el pandeo lateral es más conservador debido a que no toma en

consideración la resistencia que presentan los elementos verticales y diagonales al pandeo lateral. Sin embargo, el método del programa CRITICAR es uno más preciso debido a que en su modelo utiliza resortes para demostrar la resistencia que ocurre en el cordón superior debido a los elementos verticales y diagonales que existen en el puente. En la Tabla 2, se presenta los resultados obtenidos de la resistencia axial nominal del cordón superior del puente utilizando los métodos discutidos.

Tabla 2
Resultados de Resistencia Nominal de Cordón Superior
utilizando Diferentes Métodos

Método	Resistencia (lbs)
Euler	97,511.00
CRITICAR	290,790.00

En las Tablas 3 y 4 se desglosan los resultados de capacidad de carga del Puente 1142 utilizando ambos métodos. La capacidad de carga utilizando el programa CRITICAR fue de veintisiete (27) toneladas. En este caso, el pandeo local fue el efecto dominante en la estructura. Por otro lado, al utilizar el método que toma en consideración el largo completo del puente para analizar el pandeo lateral, se obtuvo que la capacidad de carga del puente es de cero (0) toneladas. Como se mencionó anteriormente, este método es más conservador y no toma en consideración la resistencia que generan los elementos verticales y diagonales, lo cual influye considerablemente en la capacidad de carga final. En ambos métodos, el vehículo de diseño que controló la capacidad de carga fue el vehículo SHV-3A (Tablas 3 y 4).

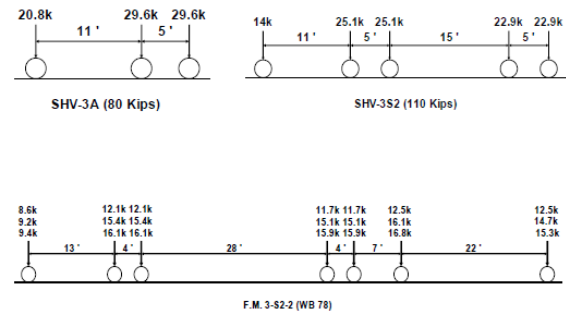


Figura 9
Cargas Legales utilizadas en Puerto Rico

Tabla 3
Capacidad de Carga del Puente 1142 utilizando el Programa CRITICAR para el Análisis del Pandeo Lateral

Carga Viva	Peso (Kip)	Pandeo Local		Pandeo Lateral		Controla	Rotulación (Tons)
		Elemento	Restricción (Tons)	Elemento	Restricción (Tons)		
SHV-3A	80	D4	27	D4	42	D4	27
SHV-3S2	110	D4	35	U11-U12	51	D4	35
FM 3-S2-2	100	D4	52	U11-U12	72	D4	52

Tabla 4
Capacidad de Carga del Puente 1142 utilizando Método sugerido por ACT para el Análisis del Pandeo Lateral

Carga Viva	Peso (Kip)	Pandeo Local		Pandeo Lateral		Controla	Rotulación (Tons)
		Elemento	Restricción (Tons)	Elemento	Restricción (Tons)		
SHV-3A	80	D4	27	U9-U10	0	U9-U10	0
SHV-3S2	110	D4	35	U10-U11	0	U10-U11	0
FM 3-S2-2	100	D4	52	U10-U11	0	U10-U11	0

Tabla 5
Capacidad de Carga del Puente 1142 Rehabilitado utilizando el Programa CRITICAR para el Análisis del Pandeo Lateral

Carga Viva	Peso (Kip)	Pandeo Vertical		Pandeo Lateral		Controla	Rotulación (Tons)
		Elemento	Restricción (Tons)	Elemento	Restricción (Tons)		
SHV-3A	80	D4	44	U10-U11	45	D4	44
SHV-3S2	110	D4	58	U10-U11	52	U10-U11	52
FM 3-S2-2	100	D4	86	U10-U11	74	U10-U11	74

RECOMENDACIONES

De acuerdo a las observaciones realizadas durante la inspección de campo y el análisis estructural ejecutado, se puede apreciar que debido al tiempo de construcción que tiene el Puente 1142, es necesario realizar varias mejoras para que este opere a un nivel de funcionamiento óptimo. El objetivo principal de estas mejoras debe ser prolongar la vida útil de este puente y aumentar su capacidad de carga. Por lo tanto, se recomienda que se realicen mejoras que lleven al puente a su estado original, realizando arreglos que vayan de acuerdo a la realidad económica de Puerto Rico y que no afecten su integridad histórica. Las mejoras deben estar dirigidas a eliminar la corrosión existente y reparar los elementos estructurales deteriorados. El alcance de los trabajos que se recomiendan realizar para cumplir con estos objetivos son:

- Limpieza de puente y periferias.
- Remoción de corrosión.

- Reparación de elementos estructurales según INDOT [8].
- Reforzar cordón superior instalando una placa inferior similar a la que posee en el extremo superior.
- Cambiar todos los pasadores existentes.
- Instalar nuevos pasamanos.
- Aplicar pintura anticorrosiva.
- Reemplazar apoyo elastomérico en la subestructura.
- Resanar hormigón de cobertura de vigas inferiores.
- Remover y aplicar nueva capa de asfalto.

Tomando en consideración estas mejoras y asumiendo que no hay pérdida del área de sección en los elementos estructurales, se encontró que la capacidad de carga de este puente puede aumentar considerablemente. El resultado obtenido indica que si se realizan estas mejoras, la capacidad de carga que este puede soportar es de 44 toneladas, según se puede apreciar en la Tabla 5. Esto

significa un aumento de 63 % en la capacidad que puede soportar el puente. Por lo tanto, se recomienda que se realicen las mismas para aumentar la capacidad de carga y evitar el deterioro de este puente.

CONCLUSIÓN

De acuerdo a los resultados obtenidos del análisis estructural del Puente 1142, la capacidad de carga que puede soportar el puente en la condición existente es de veintisiete (27) toneladas. Debido a que el puente se encuentra en una vía terciaria (PR-418) que no es muy concurrida, se puede inferir que el puente está apto para soportar la carga vehicular de los vehículos que transitan por esta área. Sin embargo, debido a que el puente posee una limitación de carga de cinco (5) toneladas, se recomienda que se realice una prueba de carga que demuestre cual es la capacidad real del mismo. La diferencia que existe entre este análisis y la rotulación existente del puente puede deberse a cuan conservador fue la persona encargada al momento de realizar sus cálculos para implementar esta limitación de carga o a que se tomó en consideración elementos internos del tablero que no fueron analizados en este estudio.

Por otro lado, si en el futuro se fueran a realizar mejoras en el área de la central azucarera que incremente el flujo vehicular y la carga de los vehículos que se transita por el mismo, sería conveniente realizar las mejoras recomendadas. Estas mejoras aumentarían la capacidad de carga del puente brindando mayor seguridad a los transeúntes y a su vez aumentarían la vida útil del mismo.

REFERENCIAS

- [1] J. E. Marull, "National Register of Historic Places Registration Form," Oficina Estatal de Conservación Histórica, San Juan, PR, Ago. 13, 2010.
- [2] *Bridge Inspector's Reference Manual*, Vol. 2, Federal Highway Administration, Washington, DC, 2012.
- [3] *The Manual of Bridge Inspection*, 2nd ed., American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, DC, 2011.

- [4] *National Bridge Inspection Standards*, 23 CFR Part 650, 2009.
- [5] *Bridge Safety Inspection Manual*, Autoridad de Carreteras y Transportación, San Juan, PR, 2014.
- [6] L. David Suits et al., "Transportation Research Circular," *Fifty Years of Interstate Structures: Past, Present, and Future*, no. E-C104, Sept. 2006.
- [7] *Steel Construction Manual*, 13 ed., American Institute of Steel Construction, Chicago, IL, 2008.
- [8] M. D. Bowman and A. M. Piskorowski, "Evaluation and Repair of Wrought Iron and Steel Structures in Indiana," Purdue Univ., Indiana, 2004.