

# EVALUACIÓN DE DAÑOS Y REPARACIONES PROPUESTAS POR LAS FUERZAS ARMADAS ESTADOUNIDENSES PARA PUENTES UBICADOS EN ZONA DE COMBATE<sup>1</sup>

James C. Ray<sup>2</sup>, Wilmel Varela-Ortiz<sup>2</sup>, Terry R. Stanton<sup>2</sup>, Carmen Y. Lugo-Cintrón<sup>2</sup> y Gerardo I. Velazquez<sup>2</sup>

Resumen: Este artículo provee un resumen de los daños ocasionados en puentes, los resultados de sus evaluaciones y las reparaciones sugeridas por los autores durante los pasados 10 años en apoyo a las fuerzas armadas estadounidenses. Aunque los daños encontrados por los autores son muy variables, éstos se pueden agrupar en las siguientes categorías: Daños debido a pobre construcción o negligencia; Daños causados por incendios; Daños causados por fuerzas armadas de avance; y Daños causados por fuerzas armadas de resistencia. Este artículo provee ejemplos de cada una de estas categorías en las cuales se ofrece una breve descripción de los resultados obtenidos de las evaluaciones. Además, se presenta una discusión general de la evaluación de estos daños ocasionados en puentes. Las categorías en las cuales se dividen las evaluaciones presentadas incluyen: Daños menores e inconsecuentes; Daños locales en miembros individuales; y Pérdida total del tramo o luz.

**Palabras Claves:** evaluación de puentes, daños en puentes, puentes militares.

## DAMAGED BRIDGE ASSESSMENT AND REPAIR FOR US MILITARY FORCES IN COMBAT ZONES

Abstract: This paper provides an overview of bridge damage and the resulting assessment carried out and repair recommended by the authors over the last 10 years of engineering support to US military forces deployed abroad. While the damage encountered by the authors has a very broad variation, typical bridge damage may be grouped into the following categories: Damage due to neglect or poor construction; Damage from fire; Damage from advancing forces; and Damage from resisting forces. Specific examples of each of these damage categories are provided along with a brief discussion of the resulting assessment. Additionally, a general discussion of issues associated with damaged bridge assessment is included. Typical assessment categories presented include: Minor and inconsequential damage; Damage to individual members; and Total span loss.

**Key words:** bridge assessment, damaged bridges, military bridging.

### INTRODUCCIÓN

Durante los pasados diez años las fuerzas armadas de los Estados Unidos de América se han desplegado a diferentes áreas de operaciones alrededor del mundo. En estos lugares se han encontrado una gran variedad de puentes con daños los cuales han sido evaluados y reparados. Durante este proceso se ha utilizado el concepto de “Tele-Ingeniería”, en el cual un experto en la materia le presta servicio de manera remota a un ingeniero militar o a un soldado en cualquier lugar del mundo. Este artículo provee un resumen de daños típicos encontrados en puentes alrededor del mundo junto con los resultados de las evaluaciones y reparaciones provistas por los autores quienes sirvieron como los expertos en la materia.

En el mundo civil los daños ocasionados en puentes son el resultado de muchos factores como socavación, terremotos, sobrecargas, etc. Considerando el aspecto militar, los daños encontrados pueden ser agrupados en las

---

<sup>1</sup> Artículo recibido el 12 de marzo de 2007 y en forma revisada el 5 de diciembre de 2007

<sup>2</sup> US Army Engineer Research and Development Center (ERDC), 3909 Halls Ferry Road, Vicksburg, Mississippi 39180. E-mails: [James.C.Ray@erdc.usace.army.mil](mailto:James.C.Ray@erdc.usace.army.mil), [Wilmel.Varela-Ortiz@erdc.usace.army.mil](mailto:Wilmel.Varela-Ortiz@erdc.usace.army.mil), [Terry.R.Stanton@erdc.usace.army.mil](mailto:Terry.R.Stanton@erdc.usace.army.mil), [Carmen.Y.Lugo@erdc.usace.army.mil](mailto:Carmen.Y.Lugo@erdc.usace.army.mil) y [Gerardo.I.Velazquez@erdc.usace.army.mil](mailto:Gerardo.I.Velazquez@erdc.usace.army.mil)

siguientes categorías: Daños debido a pobre construcción o negligencia; Daños causados por incendios; Daños causados por fuerzas armadas de avance; Daños causados por fuerzas armadas de resistencia. Cada una de estas categorías es discutida en las próximas secciones.

### DAÑOS DEBIDO A POBRE CONSTRUCCIÓN O NEGLIGENCIA

Muchos países han estado envueltos en guerras durante los pasados años, en los cuales la inspección y el mantenimiento de puentes se han limitado o removido de sus listas de prioridades. Como resultado, muchos de estos puentes sufren diariamente de diversos factores como corrosión, fatiga, socavación, ciclos de hielo y deshielo, sobrecargas, impacto, etc. Más allá del deterioro común, a menudo estas estructuras son utilizadas como fuente de materiales de construcción (como el acero) por la milicia local. Por lo tanto, durante tiempos de conflictos bélicos estas estructuras sufren tanto de deterioro como de vandalismo.

La Figura 1 muestra una combinación de vandalismo y desgaste por la acción atmosférica. Las vallas de seguridad fueron removidas para utilizar su metal dejando un agujero en el lugar que se encontraban las conexiones con las columnas de suspensión, lo que disminuye la resistencia a la penetración del agua. Como resultado, ocurrieron daños causados por ciclos de hielo y deshielo. El tipo daño ocasionado a esta estructura fue catalogado como daño menor e inconsecuente y su evaluación será discutida más adelante.



a. Vista de lado



b. Vista a lo largo de la losa mostrando las columnas de suspensión

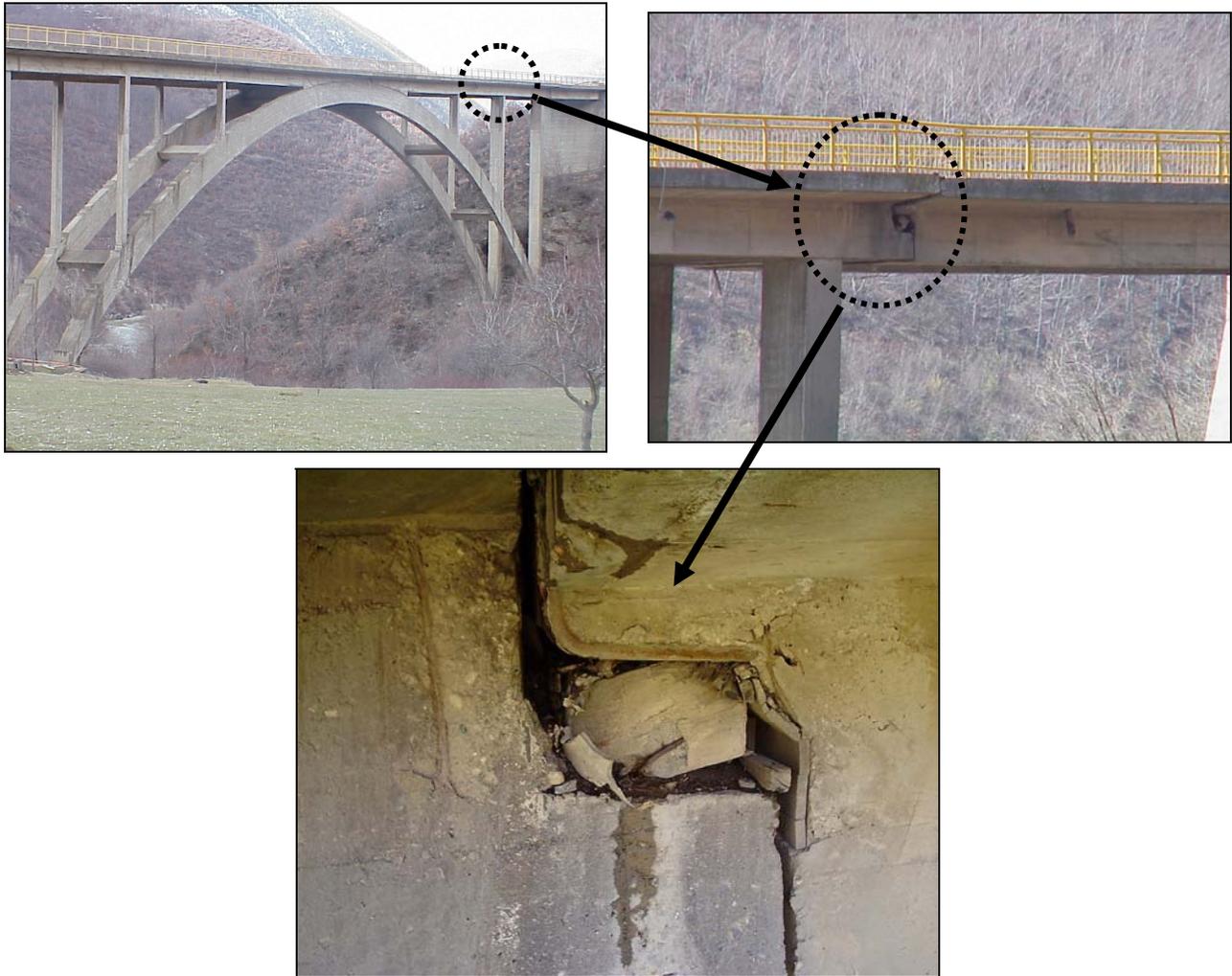


c. Deterioro típico en las columnas de suspensión

**Figura 1: Deterioro del concreto reforzado en el puente.**

El puente en forma de arco que muestran las fotografías en la Figura 2, presenta evidencia de pobre construcción así como negligencia debido a los muchos años que el país donde se halla el puente ha estado en guerra. Esta estructura tiene varios problemas, pero como se puede observar en la figura, el más importante es el deterioro y el sobre-giro de los apoyos en la conexión tipo voladizo utilizada en los tramos exteriores. Este problema

fue considerado como un riesgo considerable de inestabilidad por lo cual esta estructura fue reparada por las fuerzas armadas estadounidenses.



**Figura 2: Deterioro y sobre-giro de los apoyos en la conexión tipo voladizo.**

A menudo las fuerzas armadas encuentran estructuras que muestran deterioro debido a pobre construcción. Los problemas más comunes que se observaron han sido concreto deteriorado y refuerzo expuesto como se muestra en la Figura 3. Frecuentemente estos problemas son causados por la pobre calidad del concreto, la colocación inadecuada e insuficiente cobertura sobre el refuerzo. Para los soldados en el campo, estos daños parecen de alto riesgo pero una vez que fueron evaluados por los autores, generalmente no limitaban el uso del puente. En muchas ocasiones el concreto deteriorado se encuentra en las zonas de tensión y la pérdida de sección en el refuerzo es mínima por lo que no se afecta significativamente la capacidad de la estructura (Champion, 1961; Kay, 1992). De hecho, como se muestra en la Figura 3, el deterioro del concreto deja expuesta una información vital, el refuerzo utilizado en la estructura, la cual pueda ser utilizada para realizar un análisis de carga del puente dado que los planos de diseño o información relacionada al refuerzo raramente se encuentran disponibles en países que están en medio de un conflicto bélico.

Otro de los problemas comúnmente encontrados es la corrosión en vigas de acero o en cerchas o tizerillas. Sin embargo, hasta este momento el grado de pérdida de sección que se ha observado ha sido pequeño o su localización en el elemento estructural es tal que no representa una baja considerable en su capacidad y por lo tanto no requiere reparación inmediata.



**Figura 3: Desprendimiento del concreto; Corrosión del refuerzo expuesto.**

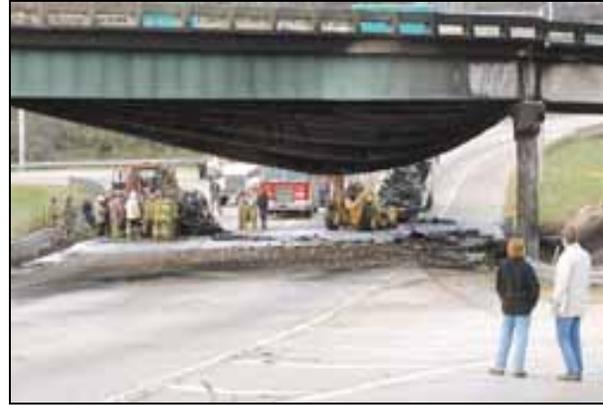
## DAÑOS CAUSADOS POR INCENDIOS

Experiencias pasadas han demostrado que la exposición prolongada o excesiva al calor causa que el acero primero pierda su elasticidad y luego pierda su resistencia (Gustafarro, 1985). Si el incendio ocurre cerca de elementos de acero se espera que ocurran daños similares a los que se muestran en la Figura 4. En esta figura se muestran los daños causados por el incendio de un vehículo de transporte civil en un puente en los Estados Unidos. Hasta el momento, los autores no han encontrado daños significativos causados por incendios en puentes de acero debido a combates militares. Sin embargo, este tipo de daño es incluido debido a que en combates militares a menudo ocurren incendios como resultado de explosiones.

Aunque no se incluyen fotos en este artículo, los autores han encontrado daños ocasionados por incendio en puentes con vigas de concreto pretensado. Estos daños ocurrieron debido a detonaciones de municiones de aire-a-tierra colocadas debajo del puente y como resultado de vehículos incendiados. El concreto por si mismo es bastante resistente a incendios y sirve de protección para el refuerzo interno de acero (Lie et al., 1986). Sin embargo, si el incendio es severo y prolongado el refuerzo interno eventualmente se verá afectado. La evaluación de este tipo de daño puede ser difícil pero en general, si la viga pretensada todavía tiene su precurvatura y no tiene grietas o aberturas en la zona de tensión, se puede asumir que la viga se encuentra en buena condición estructural. Por otro lado, si la viga está pandeada o si tiene grietas o aberturas en la zona de tensión, entonces es probable que el acero pretensado haya sufrido daños causados por el incendio perdiendo su elasticidad y parte de su resistencia última. En el caso de vigas de concreto convencionalmente reforzadas expuestas a incendios severos, a menudo se puede notar el desprendimiento del concreto como resultado de la expansión del refuerzo de acero junto con la expansión del agua que se encuentra dentro de la matriz del concreto.



a. Camión incendiado debajo del puente



b. Deflexión en vigas de acero debido al calor intenso

**Figura 4: Daño causado por incendio en un puente de vigas de acero en los EEUU. (accidente no-militar).**

### **DAÑO CAUSADO POR FUERZAS ARMADAS DE AVANCE**

La gran mayoría de las operaciones militares comienzan con un ataque aéreo para debilitar la resistencia enemiga y asegurar la ruta para las fuerzas armadas de avanzada. Los puentes juegan un papel vital en la habilidad del enemigo de avanzar o irse en retirada del campo de batalla por lo que muchos de ellos son el foco de ataques y son sometidos a daños o a su destrucción completa. Los armamentos de aire a tierra tienen grandes cantidades de explosivos, que producen grandes cantidades de fragmentos los cuales viajan a alta velocidad y son capaces de gran penetración. Por lo tanto, el daño producido en puentes por este tipo de armamento muchas veces es considerado como un daño mayor, como lo demuestran las Figuras 5 y 6. Sin embargo, si el armamento no fue apuntado o programado para detonar correctamente, muchas veces la bomba perfora la losa del puente y su detonación ocurre en el agua causando muy poco daño estructural.

Debido a que los principales miembros estructurales de un puente (vigas, columnas, etc.), son generalmente de grandes dimensiones y redundantes, el daño causado por los más grandes armamentos de aire a tierra en muchas ocasiones suele ser localizado. Por lo tanto, se requieren varios ataques por parte de este tipo de armamento para causar la destrucción total del tramo del puente. Estos armamentos requieren remover suficiente capacidad estructural para que el puente no pueda sostener su propia carga muerta y entonces falle por flexión o cortante (Figura 5a) o la localización del daño en el tramo debe ser capaz de causar que la superestructura sea removida totalmente de los apoyos del puente (Figura 5b).

Cuando el número de ataques a un tramo del puente no es suficiente para inducir el fallo catastrófico de la estructura, a menudo el daño es localizado y la estructura permanece estable como lo demuestra la Figura 6. Como se puede ver, aunque los miembros individuales tienen daños considerables, los puentes pueden resistir su peso propio. Y por lo tanto, el colapso de la estructura se evita debido a la redistribución de cargas, la redundancia de los miembros estructurales y a los factores de seguridad que se utilizan en los códigos de diseño los cuales tienden a ser conservadores. Los armamentos que producen fragmentos de alta velocidad pueden causar grandes daños, pero en un gran número de casos, éstos sólo causan daños superficiales como se puede apreciar en la Figura 7.

Las subestructuras pueden ser atacadas resultando en pérdidas de tramos, como se observa en los dos casos que se muestran en la Figura 8. No obstante, esto no es muy común debido a las dificultades con la precisión de los armamentos. Aunque no sean específicamente atacados, los tramos adyacentes pueden ser destruidos debido a la continuidad que existe entre tramo y tramo. Un ejemplo de esto se muestra en la Figura 9. La pérdida de un tramo también puede ser causado por la rotación de las pilastras de soporte, como se observa en el caso presentado en la Figura 10.

A los ataques terrestres prosiguen los ataques aéreos, lo que muchas veces crea daños en los puentes debido a los proyectiles de gran calibre o armamentos lanzados de tierra a tierra. Aunque generalmente el daño causado por



a. Falla debido a la pérdida de capacidad a flexión o cortante



b. Fallas debido a cortes a través del tramo causado por municiones militares.

**Figura 5: Pérdida o daños mayores en tramos debido a municiones de aire a tierra.**

estos armamentos es mucho menor que el descrito anteriormente, puede ser suficiente para afectar la capacidad del puente. La Figura 11 muestra un ejemplo de una situación única en la cual una batalla entre fuerzas armadas estadounidenses y fuerzas armadas de resistencia tuvo lugar en el puente. Como las fotos muestran, varios de los cables de suspensión fueron dañados considerablemente por balas de alto calibre y la cobertura protectora del cable principal también fue dañada. Los autores determinaron que el daño al cable principal no tuvo consecuencias significativas y por lo tanto no redujo la capacidad de éste, por lo que no fueron requeridas reparaciones inmediatas (US Army, 2001; Ulstrup, 2003). Sin embargo, varios de los cables secundarios de suspensión requirieron reparaciones inmediatas debido a que el puente seguía siendo utilizado por la población civil y el tráfico militar en el área (AASHTO, 1998; AASHTO, 2002).

La Figura 12 nos muestra varios ejemplos de daños localizados en áreas pequeñas, causados por armamentos lanzados de tierra a tierra, tales por ejemplo como morteros, cohetes y misiles. Como ha sido discutido anteriormente, aún cuando los miembros individuales han tenido daños severos, los puentes tuvieron suficiente resistencia contra el colapso total debido a la redistribución de cargas, la gran redundancia de los miembros estructurales y los factores de seguridad y diseños conservadores que se usan hoy en día. La evaluación de estos tipos de daños localizados en áreas pequeñas se discute en una próxima sección.

## **DAÑOS CAUSADOS POR FUERZAS ARMADAS DE RESISTENCIA**

Muchas veces los puentes son averiados por ejércitos de resistencia a través de actos de terrorismo o para crear obstáculos para las fuerzas armadas de avanzada. Este tipo de daño se consigue muchas veces mediante la colocación de dispositivos de demolición precisa o grandes cantidades de explosivos en contacto con, o muy cercano

a, elementos estructurales críticos. Debido a que en diferentes países el grado de habilidad para actividades de demolición es muy variado, el daño como consecuencia estos ataques varía de menor e inconsecuente, hasta la completa destrucción del tramo del puente.



a. Daños en viga I pretensada



b. Daños mayores en viga de acero



c. Destrucción del acorde superior en la cercha



d. Daños en viga de concreto tipo caja

**Figura 6: Daños localizados debido a municiones de aire a tierra.**



**Figura 7: Daños superficiales causados por fragmentos de municiones.**



a. Cercha o tijerilla

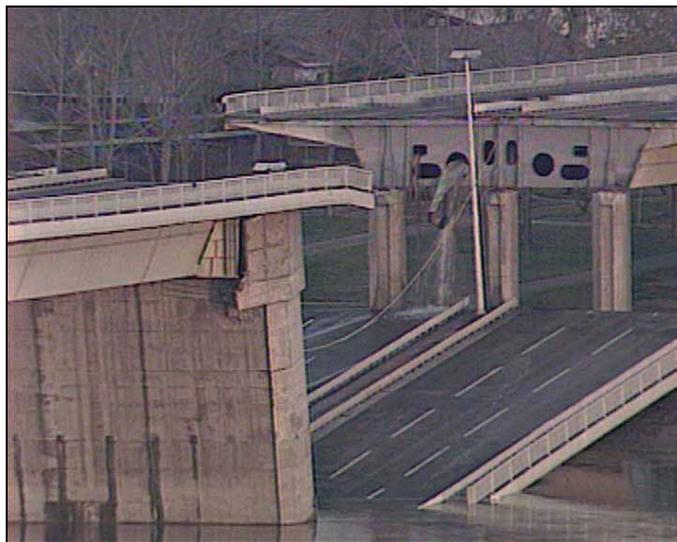


b. Puente atirantado

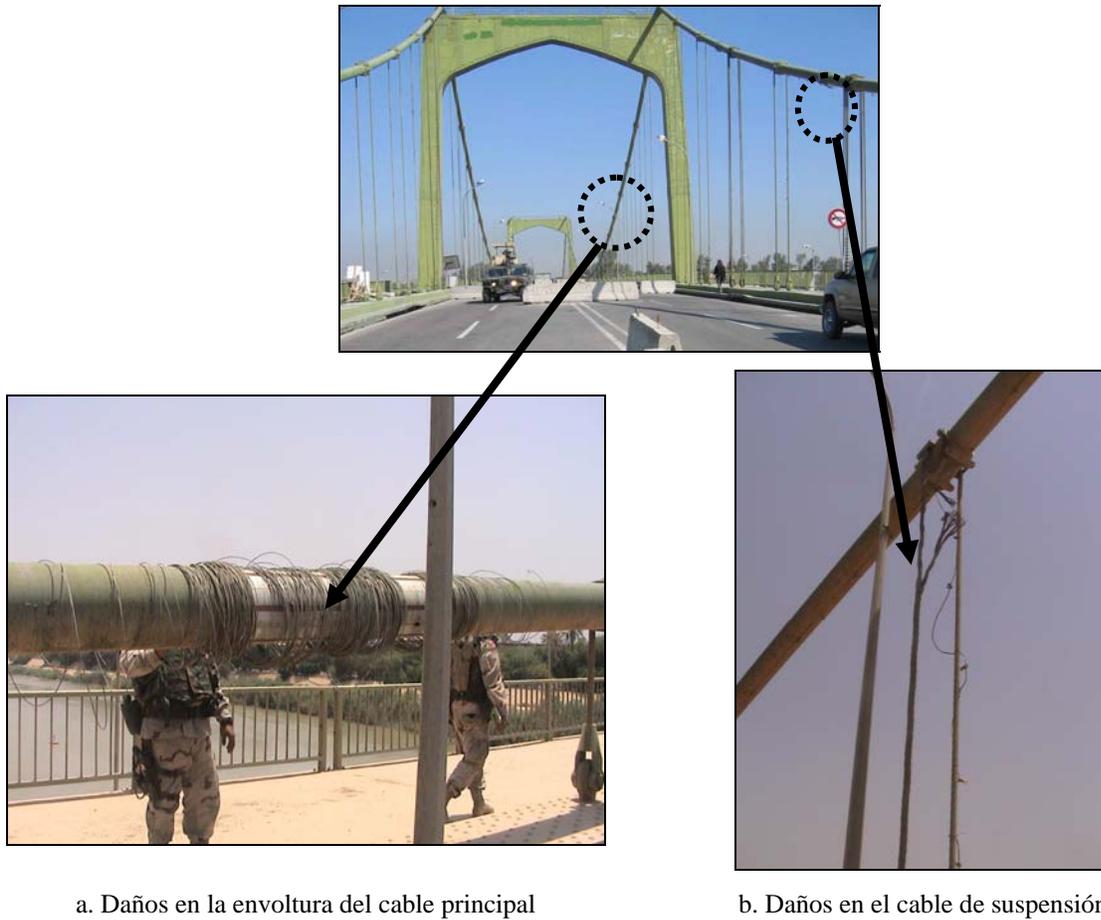
**Figura 8: Pérdida del tramo debido a ataques con municiones de aire a tierra a la subestructura.**



**Figura 9: Pérdida del tramo adyacente debido a su continuidad con el tramo atacado.**



**Figura 10: Pérdida del tramo debido a rotación en la subestructura.**



a. Daños en la envoltura del cable principal

b. Daños en el cable de suspensión

**Figura 11: Daños causados por balacera durante un combate.**



**Figura 12: Daños localizados causados por armas de superficie a superficie.**

La Figura 13 demuestra un ejemplo del resultado de un ataque a una pilastra de dos columnas. Esta figura muestra un caso aislado en el cual el daño fue bastante simétrico y el tramo del puente descendió directamente sobre el cabezal de la pilastra de los soportes. De hecho, como se puede apreciar en la Figura 13c, el tramo del puente aparenta estar suficientemente estable por lo que el puente siguió siendo utilizado por el tráfico local.

Los autores evaluaron este puente para el uso continuo por vehículos militares. Aunque el alineamiento vertical de las vigas del puente había cambiado considerablemente, la capacidad para tomar carga no había sido afectada

significativamente. Los tramos estaban descansando sobre las columnas dañadas, pero obviamente la capacidad de carga de las columnas fue reducida grandemente. Debido a los grandes daños, fue imposible tratar de predecir analíticamente la capacidad remanente de estas columnas. Por consiguiente, se diseñó un sistema temporero de apuntalamiento para estabilizar la pilastra in situ y transmitir las fuerzas axiales al suelo adyacente. Es importante reiterar que este tipo de daño es muy extraño. En la mayoría de los casos en los cuales han ocurrido ataques similares a éste, las columnas fallaron en una forma más severa (no simétrica) y los tramos del puente fueron removidos totalmente de los soportes mientras que las columnas cayeron al suelo.

Aunque el atacar un elemento en particular en los puentes no es una forma muy eficiente para destruir la estructura, muchos ejércitos de resistencia usan grandes cantidades de explosivos colocados cerca de elementos estructurales del puente, como las vigas (Figura 14). El daño a las vigas varía considerablemente en cada caso, dependiendo de la cantidad y la proximidad de los explosivos utilizados. En muchos casos donde son atacadas las vigas, éstas sólo sufren desprendimiento local de la superficie del concreto. Por lo tanto, no hay reducción significativa de la capacidad de carga del elemento. La evaluación de vigas con daño intermedio o severo se discute en la próxima sección.



a. Columnas destruidas resultando en la caída del tramo



b. Pérdida total de las columnas



c. Vista en planta del tramo caído (obsérvese que todavía se puede transitar por el puente)

**Figura 13: Daños en las columnas por fuerzas armadas de resistencia.**

## EVALUACIÓN DE DAÑOS OCASIONADOS EN PUENTES

En las secciones anteriores se han descrito varios métodos especiales de evaluación de daños ocasionados en puentes. Esta sección también se enfocará en la evaluación de daños ocasionados en puentes pero de una forma más genérica, aunque tratar de hacer esto sea difícil debido a la gran variedad de tipos de puentes y sus diferentes daños asociados. Aun después de considerar todas las evaluaciones de daños en puentes realizadas por los autores, todavía es necesario encontrar una manera de generalizar el proceso para llevar a cabo una evaluación de los daños

ocasionados. Este proceso generalizado está basado en los hallazgos encontrados por (Al-Shaleh y Al-Mutairi, 1994; Darwish et al., 1991)

Frecuentemente se piensa en la “evaluación de daños ocasionados en puentes” como simplemente volver a calcular la capacidad de carga del puente tomando en consideración la capacidad reducida de los miembros estructurales dañados o afectados. Sin embargo, los autores han encontrado muy pocos casos en donde la capacidad de carga residual de un miembro estructural fuera el problema en realidad. Como se ha podido observar en secciones anteriores, el daño local en los miembros estructurales es usualmente de tal magnitud que la única pregunta en consideración es: “¿Cómo se puede apuntalar la estructura?” o “¿Cómo se puede sobretender un puente sobre el área o pasar alrededor del área afectada?”.



a. Daño en viga de concreto convencionalmente reforzada



b. Daño en viga de concreto pos-tensada

**Figura 14: Daños en puentes de vigas múltiples por las fuerzas armadas de resistencia.**

De hecho, muy pocos cálculos de capacidad residual se han podido llevar a cabo en su totalidad principalmente debido a las siguientes razones: Actualmente no existen medios confiables para el análisis de miembros estructurales que han sido severamente o extensivamente dañados; y porque las fuerzas armadas de los Estados Unidos de América no cuentan con el tiempo o recursos necesarios para llevar a cabo este tipo de análisis durante movimientos u operaciones militares en tiempos de guerra. El desarrollo de una capacidad analítica, confiable y abarcadora para la evaluación estructural de miembros severamente dañados sería muy difícil, si no imposible, porque los tipos y el grado del daño son altamente variables y dependientes del tipo de estructura, que en este caso, sería el tipo de puente en consideración. Además, para realizar un análisis de este tipo se requeriría que se llevaran a cabo reconocimientos muy detallados para obtener las condiciones existentes del puente. Los autores han encontrado que este tipo de reconocimientos no son posibles debido a las restricciones de tiempo, los recursos de las unidades de combate y el alto riesgo que significa para la seguridad del personal militar.

A pesar de esto, consideraciones, tácticas o métodos generalizados para la evaluación de daños ocasionados en puentes pueden y deben ser desarrollados. Los párrafos a continuación proveen algunos de los métodos generales utilizados por los autores en el pasado. Estos métodos se deben clasificar en las siguientes categorías:

#### **Daños menores e inconsecuentes**

En muchos casos, personal de reconocimiento sin la debida experiencia encuentran daños que, a su entender, aparentan ser significativos pero al éstos ser evaluados por personal experimentado en el área, se determina que dicho daño no produce consecuencias adversas en términos de la utilidad militar del puente. El hormigón deteriorado mostrado en la Figura 3 y los daños causados por fragmentos en la columna mostrada en la Figura 7 son ejemplos de esta situación. A pesar de que el ciclo de vida a largo plazo de estas estructuras puede verse afectado (NRC, 1994), su capacidad de carga y utilidad inmediata para movimientos y operaciones militares no se ven afectadas.

El daño aparentemente severo en los tensores del puente de arco mostrado en la Figura 1c es un ejemplo más interesante de esta situación. Sin duda alguna, el daño ocasionado en el concreto fue muy severo y se repitió a través de todos los tensores del puente. Sin embargo, los tensores son miembros que obviamente actúan puramente en tensión y la resistencia a tensión solamente es provista por las barras de acero localizadas dentro del concreto. Este concreto solamente es utilizado para proteger las barras de acero contra el desgaste causado por la exposición a la acción atmosférica y no se utiliza con propósitos estructurales reales. Por lo tanto, la recomendación para la evaluación de este daño fue “monitorear la estructura durante su uso” y reportar cualquier cambio en las condiciones existentes.

El monitorear durante el uso de la estructura ha sido una recomendación muy común y razonable para muchos de los problemas encontrados por los autores. Los puentes en campos de operaciones militares solamente se necesitan por periodos de tiempo muy limitados. Por lo que, aunque un problema o daño represente implicaciones negativas a largo plazo, puede ser que el puente pueda ser utilizado para propósitos militares inmediatos sin causar consecuencias negativas en la estructura.

Si existen algunas dudas con respecto al potencial de una posible progresión rápida del problema, un programa de monitoreo cuidadosamente diseñado debe ser establecido. Este programa deberá consistir principalmente de inspecciones detalladas frecuentes de las áreas problemáticas mientras el puente está siendo utilizado por el tráfico, pero también puede consistir en requerimientos más detallados tales como mediciones de deflexión continua o mediciones de deformación.

### **Daños locales en miembros individuales**

Ejemplos de daños locales en vigas se mostraron en las Figuras 6, 12 y 14. Las vigas ligeramente dañadas se podrían clasificar dentro de la categoría de “daños menores y sin consecuencias” discutida en la sección anterior. La evaluación de vigas en condiciones de mediana a severamente dañadas (como se muestra en la Figura 14) es más difícil. Como se mencionó anteriormente, actualmente no existen medios confiables para el análisis estructural de miembros que han sido severa o extensivamente dañados.

En lugar de esto, evaluaciones pasadas han resultado en soluciones simples pero al mismo tiempo eficaces: siempre que sea posible, el tráfico es desviado de las áreas dañadas y se localiza o encamina sobre vigas en buen estado estructural. En caso de que múltiples vigas adyacentes estén dañadas, la recomendación recae en cuántas vigas adyacentes, en buen estado estructural, son necesarias para soportar un carril de tráfico. Para este propósito, los autores han utilizado factores de distribución de carga convencionales. Los factores de distribución de carga representan el grado de distribución de carga transversal que produce un carril de tráfico, por lo que el inverso de estos factores representa cuántas vigas en buen estado estructural son necesarias para soportar la carga aplicada (Ray, J.C. y Seda-Sanabria, Y., 2002). Para estos tipos de evaluaciones, se debe recordar que las vigas adyacentes en buen estado estructural pueden estar soportando el peso muerto adicional de las vigas dañadas, especialmente en el caso donde el extremo entero de la viga se separa como se muestra en la Figura 14b.

Si el cambiar la ruta del tráfico no es posible o si se requiere tráfico en más de un carril, los miembros estructurales deben ser reparados o apuntalados. Hasta el momento, todos los daños encontrados por los autores han sido de tal grado que no se han encontrado métodos de reparación factibles para recuperar la fuerza del miembro. Es posible que este caso pueda ocurrir, y existan muchas técnicas prácticas viables dentro de la comunidad civil para reparar miembros estructurales ligeramente dañados. Sin embargo, las unidades militares de construcción actualmente no están entrenadas o equipadas para este tipo de reparaciones y además su utilidad en un ambiente militar sería limitada.

Si no es posible hacer una reparación, es posible que los miembros estructuralmente dañados puedan ser apuntalados. Las columnas de los pilares en la Figura 13 o las vigas en la Figura 14 definitivamente habrían podido ser beneficiadas del apuntalamiento por lo que opciones/diseños de apuntalamiento fueron proveídos por los autores. A pesar de esto, las unidades de construcción localizadas en el lugar no tenían los recursos de tiempo o materiales para llevar a cabo la operación. En lugar, el sobre-tendido de un puente sobre el tramo afectado (discutido abajo) fue la técnica empleada como una solución rápida pero que a su vez resultó muy costosa.

Los daños locales en uno de los cables tensores de un puente de suspensión se mostraron en la Figura 11 y su evaluación fue discutida en la sección anterior. El método de reparación resultante según recomendado por los autores basados en Buckland (2003) se muestra en la Figura 15. Este ejemplo sirve para enfatizar varios puntos generales:

(1) Las reparaciones no son necesariamente requeridas si es para uso militar solamente. Anteriormente se mencionó que debido al alto grado de redundancia en el número de cables tensores, no era necesario que esta reparación se llevase a cabo si el puente iba a ser utilizado solamente para propósitos tácticos (es decir para tráfico militar a corto plazo solamente). El personal militar, por su propia naturaleza, usualmente debe aceptar riesgos más altos, pero esto no se permite si hay personal civil involucrado, por lo que cualquier grado de riesgo debe ser reducido al mínimo.

(2) La carencia de datos se debe considerar apropiadamente. Al momento de llevar a cabo esta evaluación, la única información conocida acerca del cable tensor era su diámetro. No se conocía nada acerca de las propiedades del material que componía el cable o de la capacidad de carga requerida del cable. La solución mas práctica fue la de reemplazar el cable completamente por un cable de alta resistencia y utilizar el doble del área de sección transversal original. Esto demuestra que estas evaluaciones deben errar siempre por el lado conservador y la carencia de datos aumenta considerablemente el grado de conservatismo requerido.

(3) Reparaciones prácticas impactan de una manera negativa la estética de la estructura. En este caso, la solución mas simple era la de colocar el cable nuevo directamente sobre el cable existente. Ésta no era de ninguna manera la solución más apropiada en cuanto a estética y sirve para recalcar que las reparaciones de puentes en ambientes militares nunca estarán en igualdad de condiciones con las reparaciones hechas en el ambiente civil.



**Figura 15: Reparación del cable de suspensión (daño mostrado en la Figura 11).**

### **Pérdida total del tramo o luz**

Unos ejemplos de la pérdida de todo el tramo o luz se muestran en las Figuras 4, 8 a 10, y 13. En estas situaciones, el reemplazo rápido del tramo o luz es mandatorio. El ejército de los Estados Unidos posee recursos tácticos de puentes para resolver este problema, como por ejemplo, el M60A1 “Armor-Vehicle-Launched Bridge” (AVLB) que se muestra en la Figura 16, recursos de Línea-de-Comunicación como lo son el puente de paneles “Bailey” o el puente “Medium-Girder”, u otros puentes de paneles comercialmente disponibles como se muestra en la Figura 17.

Varias consideraciones importantes de evaluación se presentan al momento de sobretender un tramo dañado o caído:

(1) Como se muestra en la Figura 5b, los tramos dañados pueden obstruir en las maniobras de sobretender un puente sobre otro dañado si todavía se encuentran en el lugar. Al momento de determinar métodos prácticos para remover o eliminar los tramos dañados se deben tomar en cuenta cuidadosamente varias consideraciones. La demolición controlada es usualmente la solución más utilizada.

(2) El puente a ser sobretendido sobre el tramo dañado usualmente es construido sobre, lanzado desde, y por último sus extremos deben ser apoyados en los tramos adyacentes no dañados. Estas operaciones, especialmente los soportes en los extremos van a inducir cargas pesadas en los tramos de soporte por lo que su capacidad para soportar estas cargas debe ser determinada. No existe ninguna metodología o regla militar de los Estados Unidos existe para este propósito. Este problema fue grandemente experimentado durante el sobretendido del puente sobre el tramo del puente de tijerillas que se muestra en la Figura 8a. El puente de panel indujo cargas muy pesadas y extraordinariamente compresivas en los postes extremos del puente de tijerillas. Esto limitó severamente la cantidad de carga viva a la cual se podía someter el puente reparado.

(3) Las capacidades de largo de tramo de los puentes de panel son a menudo insuficientes. Incluso los mejores puentes de panel se limitan generalmente a tramos menores de 61 metros para las cargas militares requeridas. Para el puente en la Figura 8a, faltaban los pilares intermedios y se requería un tramo de mucho más de 61 metros. Para solucionar este problema, los autores diseñaron reparaciones prácticas para los pilares.



**Figura 16: Puente AVLB sobre uno de los tramos perjudicados.**



**Figura 17: Puente de paneles sobre el tramo perjudicado.**

## CONCLUSIONES

El poder desarrollar conceptos generales y metodológicos para la evaluación de puentes con daños ha sido el anhelo de la comunidad de ingenieros civiles y militares por mucho tiempo. Sin embargo, como se ha discutido en este artículo, esta tarea es muy difícil, debido a que los puentes y los posibles tipos de daños varían grandemente.

Aún después de cientos de evaluaciones, los autores no han podido encontrar una manera de generalizar el proceso de evaluación de puentes con daños para así crear una metodología que puedan utilizar los ingenieros militares. Por lo tanto, el propósito de los autores en este artículo es presentar un resumen de sus experiencias y proponer algunas categorías de daños generales y reparaciones que pueden ser útiles en el futuro para esos propósitos.

Para facilitar la investigación de daños en puentes, se recomiendan dos áreas adicionales para futuras investigaciones:

(1) Desarrollo de una base de datos, específica para cada país, sobre los métodos de diseño y construcción de puentes: Cualquier investigación de puentes requiere un entendimiento detallado de las estructuras, incluyendo factores como las dimensiones estructurales, propiedades de los materiales, calidad de construcción, y cargas de diseño. Estos factores varían de país a país por lo cual una base de datos detallada de información por país para estos elementos ayudaría grandemente a facilitar futuras evaluaciones de puentes.

(2) Desarrollo de un sistema rápido temporal de apuntalamiento y métodos para instalar un puente sobre otro con daños: Como se ha mencionado anteriormente, la gran mayoría de los puentes con daños que los autores han evaluado han requerido el establecimiento de un apuntalamiento temporal rápido o la instalación de puentes temporales sobre puentes con algún tipo de daño en vez de la evaluación y reparación de elementos con daños estructurales. Los métodos de apuntalamiento temporales existentes son muy limitados. Hay muchas oportunidades para mejorar esta área. Los sistemas que existen hoy día para instalar puentes sobre otros puentes con daños trabajan muy bien, pero están limitados en el largo máximo del tramo. Además los sistemas disponibles escasean rápidamente durante operaciones militares de gran escala. Se requieren otras alternativas, incluyendo métodos que utilicen materia prima que se encuentre en el país de operación y capacidades de construcción y fabricación disponibles en la región.

## RECONOCIMIENTOS

La información presentada aquí, a menos que se haya especificado diferentemente, fue obtenida a través del programa de fondos directos AT-40 del Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos (USACE). El permiso para esta publicación fue otorgada por el Director del Laboratorio de Geotécnica y Estructuras del Centro de Investigación y Desarrollo de Ingeniería (GSL-ERDC).

## REFERENCIAS

- AASHTO (1998). *AASHTO LRFD Bridge Design Specifications*, 2nd Edition, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C.
- AASHTO (2002). *AASHTO Standard Specifications for Highway Bridges*, 17th Edition, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C.
- Al-Shaleh, M. S., y Al-Mutairi, N. M. (1994). "Assessment of structures damaged during the Iraqi invasion and occupation", *Technical Report. KISR 4540*, Civil and Building Department, Engineering Division, Kuwait Institute for Scientific Research.
- Buckland P.G. (2003). "Increasing the load capacity of suspension bridges", *Journal of Bridge Engineering*, ASCE, Vol. 8, Nro. 5, pp. 288–296.
- Champion, S. (1961). *Failure and Repair of Concrete Structures*, John Wiley & Sons Inc., New York, N.Y.
- Darwish, A. H., Hafez, J., y Karim, N. A. (1991). "Structural war damages, impact and remedial solutions", *Proceedings of the Damage Assessment Repair of Concrete Structures Workshop*, Civil Engineering Department, Kuwait University, Kuwait.
- Gustafarro, A. H. (1985). "Fire Resistance", en: *Handbook of Concrete Engineering*, 2nd ed., M. Fintel, editor, Chapman and Hall, Ltd., London, U.K., pp. 212–228.
- Kay, T. (1992). *Assessment and Renovation of Concrete Structures*, John Wiley & Sons Inc., New York, N.Y.
- Lie, T.T., Rowe, T.J., y Lin, T.D. (1986). "Residual strength of fire-exposed reinforced concrete columns." *Evaluation and Repair of Fire Damage to Concrete*, ACI SP-92, American Concrete Institute, Detroit, Michigan, pp. 153–174.

- NRC (1994). *Concrete Rehabilitation-Users Manual*, Strategic Highway Research Program, National Research Council, Washington, D.C.
- Ray, J.C. y Seda-Sanabria, Y. (2002). *Technical Commentary on FM 3-34.343 "Military Nonstandard Fixed Bridging"*, TR 02-15, US Army Corps of Engineers, ERDC, Vicksburg, Mississippi.
- Ulstrup, C.C. (2003). "Rating and Preliminary Analysis of Suspension Bridges", *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 119, Nro. 9, pp. 2653–2679.
- US Army (2001). *Military Nonstandard Fixed Bridging*, FM3-34.343, Headquarters, Department of the Army, Washington, DC.