

CONGRESO ESTRUCTURAS 2017
XIV SEMINARIO DE INGENIERÍA ESTRUCTURAL Y SÍSMICA
SAN JOSÉ, COSTA RICA 10 AL 11, AGOSTO 2017

**LA DIMENSIÓN SOCIAL DEL ARTE DE LA INGENIERÍA ESTRUCTURAL:
EL CASO DE LA DURABILIDAD Y LOS PUENTES INTEGRALES**

Ing. Esteban Villalobos Vega

Costa Rica, esteban.villalobos@ucr.ac.cr, Coordinador, Unidad de Puentes, PIE, LanammeUCR

Sofia Vignoli Vargas

Costa Rica, sofiavignoli1@gmail.com, Candidata a Lic. Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica

RESUMEN

El término Arte de la Ingeniería Estructural fue propuesto por el profesor David Billington a través del estudio de obras icónicas de ingeniería estructural alrededor del mundo, para los cuales se deben cumplir al menos tres dimensiones durante la etapa de diseño: científica, social y simbólica. La dimensión social tiene que ver con el costo a corto y largo plazo de las estructuras, y está asociado por lo tanto con el tema de durabilidad. Este se puede enfocar en el caso de puentes, por ejemplo, en eliminar al máximo las juntas de expansión. A propósito de esta última, una opción ampliamente difundida a nivel mundial son los llamados puentes integrales.

EL ARTE DE LA INGENIERÍA ESTRUCTURAL

La etapa de proyección y diseño de los puentes está inmersa en un contexto social, político y cultural que, aunque algunas veces se deja de lado, al final de alguna u otra forma los influye. Debido a esto, su diseño debería tomar en cuenta una gama de variables en las distintas etapas del proceso hasta llegar a los planos y especificaciones constructivas, tendientes a llegar a la mejor solución entre varias posibles opciones. Es precisamente dentro de esta visión de conceptualizar y ver las estructuras de una forma integral que se enmarca la idea del Arte de la Ingeniería Estructural (Billington, 1983).

El concepto fue propuesto y ampliamente desarrollado en el libro “The Tower and the Bridge” por el profesor David P. Billington de la Universidad de Princeton. La idea le surgió después de conocer, gracias a la sugerencia de estudiantes de arquitectura, de ciertas obras conceptualizadas por completo, o al menos en su gran mayoría, por ingenieros estructurales, que eran además verdaderas obras de arte a su criterio. Este es el caso de muchos de los proyectos de Robert Maillart, de quien por ejemplo el Museo de Arte Moderno de New York (MoMA) realizó una exhibición en 1947. El estudio exhaustivo de la obra y vida de este ingeniero estructural, y de muchos otros casos que se remontan incluso a la revolución industrial, le permitieron ver el patrón de un concepto existente pero aún sin revelar, y lo llamó: Arte Estructural.

Más que simples ideas o una discusión meramente académica o de historia, finalmente lo importante del concepto y la razón por la cual ha traspasado barreras culturales y ha perdurado a través de los años es, en primer lugar, el rol de importancia e injerencia que se da a la ingeniería estructural en el desarrollo del mapa urbano y cultural, y luego al papel de relevancia que se le da a la honestidad y la ética profesional, con el objetivo no llevar a cabo obras que afecten a los clientes o a la sociedad de forma

negativa. Para países del tercer mundo, como lo es Costa Rica, o para países desarrollados en crisis como ha sucedido en reiteradas ocasiones en este siglo, esto implicaría un uso más eficiente de los recursos; pero, también la certeza de que, solo porque los recursos son escasos, eso no significa que las obras tienen que ser de mala calidad o visualmente desagradables.

Ejemplos de ingenieros estructurales cuyas obras y vidas se pueden circunscribir al Arte Estructural, y cuyos trabajos incluyen puentes ferroviarios, mercados, puentes carreteros, edificios, naves industriales, torres, bodegas, rascacielos, restaurantes, gimnasios deportivos, puentes peatonales, estaciones de servicio, iglesias, domos, entre muchos otros tipos de estructuras, son los siguientes:

- Juan José Arenas de Pablo, Fazlur Rahman Khan, Isambard Kingdom Brunel, T. Y. Lin, Robert Stephenson, William Frazier Baker, Jörg Schlaich, Eladio Dieste, Gustave Eiffel, John Augustus Roebling, Michel Virlogeux, Othmar Ammann, Ulrich Finsterwalder, Robert Maillart, Pier Luigi Nervi, Eduardo Torroja Miret, Christian Menn, Felix Candela Outeriño, Laurent Ney, Eugène Freyssinet, Man-Chung Tang, Heinz Isler, Eugene C. Figg, Albert Irénée Caquot, Fritz Leonhardt, Thomas Telford, Anton Tedesko, René Greisch, *etc.*

LAS TRES DIMENSIONES DEL ARTE DE LA INGENIERÍA ESTRUCTURAL

De acuerdo con Billington (1983), el Arte Estructural puede ser entendido a través de lo que él llama las tres dimensiones:

- ***Científica:*** Se refiere a como la estructura es diseñada para transmitir de forma segura las cargas al terreno y los materiales que son usados para ello, y es medida a través de la eficiencia. Se relaciona directamente con la resistencia última y las cargas de servicio, y el uso mínimo de recursos para cumplir con estos requisitos. Requiere de una alta disciplina, pero a la vez un entendimiento tal que de igual forma la eficiencia pueda ser llevada al diseño, por medio del uso de cálculos simplificados y de la observación del comportamiento físico de las estructuras en la realidad.
- ***Social:*** La sociedad como tal está involucrada en el planeamiento de las obras estructurales, muchas veces a través del pago de impuestos o del comercio privado; esta dimensión es medida por ello a través de la economía, tanto en el corto como en el largo plazo, y del beneficio que le pueda brindar al público en general en relación con el costo, por lo que está comprendida también en el contexto político. Debido a lo anterior, la durabilidad de las estructuras, desde su concepción y a lo largo de su vida útil por medio de la evaluación y mantenimiento de las mismas, es un importante aspecto dentro del costo de ciclo de vida a tomar en cuenta dentro de esta dimensión.
Esta relación con la sociedad, ya sea de forma directa o indirecta, y el hecho de que en la gran mayoría de los casos las obras quedan a la vista o son utilizadas por el público en general, hacen que la idea de transparencia, esbeltez, claridad y luminosidad, sean propiedades que se deberían transferir no sólo a las estructuras sino al quehacer profesional haciendo del conocimiento y escrutinio público las memorias de cálculo, el proceso constructivo, los costos finales, los procesos de licitación y los imprevistos.
- ***Simbólica:*** Si bien es cierto un uso mínimo de materiales y una relación costo-beneficio óptima son imperativos en el diseño estructural, no necesariamente de esa combinación resultará una obra elegante o visualmente agradable: se requiere de una motivación estética consciente del ingeniero estructural. Cuando esta dimensión es alcanzada, las obras por sí solas se convierten en símbolos, ya sea de las ciudades o países en donde se erigen, del tiempo y época en los cuales se construyen, del reflejo y aspiraciones de la sociedad que las acoge. Es reconocida en el caso del arte de la ingeniería estructural por la elegancia y la estética de la obra, conceptos que requieren una evolución y búsqueda personal constante.

Cuando se logra la eficiencia, la economía y la elegancia en una obra de ingeniería estructural, cualquiera que esta sea, es entonces que se ha alcanzado el denominado Arte Estructural.

Ahora bien, ¿podrá un ingeniero estructural ser educado desde las aulas para crear grandes obras y de qué forma se deberían dar cursos enfocados con ese fin? Lo cierto es que al igual que en las disciplinas artísticas no se forma a los estudiantes con el objetivo de crear al próximo Bach, Picasso o Giacometti, e incluso en física al próximo Einstein, en ingeniería es más importante dotar a los estudiantes de un pensamiento crítico hacia el ejercicio de la profesión, y de las herramientas para buscar su propio camino, ya que incluso la gran mayoría de los grandes ingenieros estructurales llevaron a cabo sus mejores obras a una edad ya avanzada. En el peor de los casos, habrán recibido por lo menos una educación más integral de la que reciben ahora. Si en arquitectura no se ve como una amenaza a la profesión enseñar y estudiar la historia del área y casos específicos de arquitectos, pues en ingeniería civil todavía menos amenazante debería serlo. Al respecto, el esfuerzo del proyecto CASCE (“Creative Art of Structural and Civil Engineering”) de la Universidad de Princeton (<http://casce.princeton.edu/>), el cual se basa en el trabajo del profesor Billington, es un excelente ejemplo de cómo llevar a cabo esta tarea de enseñanza y provee además de las herramientas necesarias para hacerlo.

CRITERIOS DEL ARTE ESTRUCTURAL EN EL DISEÑO DE PUENTES

El concepto del arte de la ingeniería estructural aplica por completo al diseño de puentes, que es además uno de los casos en donde más ejemplos es posible encontrar. Sin embargo, existen también criterios análogos por parte de organizaciones como la AASHTO o de diseñadores de puentes a nivel internacional, que también conciben el diseño de estas estructuras como un proceso integral que debe tomar en cuenta varios objetivos que interactúan entre sí.

MANUAL AASHTO LRFD 2014

En la sección 2 de dicho manual, se incluye el apartado *2.5-Objetivos de diseño*, según el cual a la hora del diseño de puentes carreteros, se deben tomar en cuenta al menos los siguientes aspectos:

- a. *2.5.1-Seguridad*: El AASHTO LRFD la denomina como la primera prioridad del ingeniero de puentes. Se refiere a cumplir los requisitos geométricos y de diseño, así como el control de calidad de los cálculos y planos constructivos.
- b. *2.5.2-Serviciabilidad*: Según el AASHTO LRFD su objetivo es proveer un diseño tal que el puente permanezca en servicio para la vida de diseño de 75 años. Dentro de este objetivo se incluyen, por ejemplo, los siguientes aspectos:
 - *2.5.2.1 Durabilidad*: La decisión más significativa de diseño para mejorar la durabilidad es reducir el número de juntas de expansión.
 - *2.5.2.2-Inspecciones*: Se refiere a contemplar desde el diseño características para facilitar las labores de inspección.
 - *2.5.2.3-Mantenimiento*: Además de que a los puentes se les debe dar mantenimiento, es necesario desde la etapa de diseño disminuir su necesidad al máximo posible y facilitar dicha labor.
 - *2.5.2.6-Deformaciones*: Una de sus intenciones principales es proveer confort al usuario.
 - *2.5.2.7-Consideraciones para futuras ampliaciones*: En el caso de que la flota vehicular aumente más de lo objetivamente previsto en peso o cantidad.
- c. *2.5.3-Constructibilidad*: El objetivo principal es proveer un diseño que es posible construir por una amplia gama de medios y métodos constructivos, sin que ello signifique instruir al contratista sobre cómo hacerlo o inhibirlo de usar metodologías novedosas.
- d. *2.5.4-Economía*: Por medio del estudio de varias alternativas de tipologías de puente y materiales. Se recomienda tomar en cuenta el costo del ciclo de vida, ya que un costo inicial más bajo no necesariamente conduce a la opción más económica en el tiempo.

- e. 2.5.5-*Estética de puentes*: AASHTO reconoce la importancia de este tópico y señala que los puentes deberán complementar su entorno, ser elegantes en forma, y presentar una apariencia de adecuada fuerza o carácter. Considera además de que para puentes importantes, se justifica en la mayoría de los casos un costo adicional con el objetivo de mejorar su apariencia. Establece adicionalmente una serie de parámetros que están acorde con los criterios dados por expertos reconocidos a nivel mundial en el diseño de puentes.

DISEÑADORES DE PUENTES

•**Christian Menn (Suiza)**: De acuerdo con el diseñador de puentes como el Felsenau, Ganter y Sunniber en Suiza, así como el Zakim en Boston, EUA, entre muchos otros, el ingeniero de puentes tiene el deber de diseñar puentes que satisfacen ciertas metas u objetivos mínimos (Schärer y Menn, 2015).

Los primeros objetivos tienen que ver con la función estructural y son generalmente definidos por las normativas: seguridad estructural, la cual significa brindar seguridad contra el colapso de la estructura o de componentes individuales. Dentro de estos mismos, Menn incluye como un objetivo individual a la durabilidad, la cual significa proveer una vida de servicio libre de mayor mantenimiento por al menos 75 años, entendiendo a la vez que el puente está integrado por componentes con diferentes vidas útiles, y que tanto la calidad de los materiales como los detalles estructurales influyen de manera importante. El último objetivo, la serviciabilidad, incluye límites en las deformaciones y las vibraciones, y tiene que ver con el confort del usuario y una aceptable condición visual de la estructura.

Los objetivos que Menn denomina como subjetivos y creativos, y los cuales no son gobernados por la normativa, son: un adecuado grado de economía, el cual debe incluir el costo de construcción, mantenimiento, y demolición al final de la vida de servicio. La última meta en mencionar, pero no por ello la menos importantes, es la calidad estética, el cual es el más importante componente de la esencia cultural de un puente.

En la Fig. 1 se muestran gráficamente estos objetivos representados como un juego de dardos, y en donde como tal, entre más pequeño el círculo, más difícil acertar. La razón por la cual los requisitos de la función estructural (seguridad, durabilidad y serviciabilidad) están agrupados en los círculos externos y en cambio los objetivos subjetivos (costo y calidad estética) están agrupados en el centro y además sombreados, son dos. En primer lugar, de acuerdo con Menn, los objetivos externos son normalmente especificados en la normativa, son enseñados ampliamente en las universidades, y no requieren de mayor experiencia, ni creatividad, ni imaginación; en cambio, los objetivos sombreados no pueden ser definidos por normas, y son tareas que deben considerar el entorno, el significado cultural, la exposición visual, los residentes locales y usuarios, y por lo tanto requieren de experiencia en aspectos técnicos de diseño, construcción, y estimación de costos, así como de creatividad e imaginación.

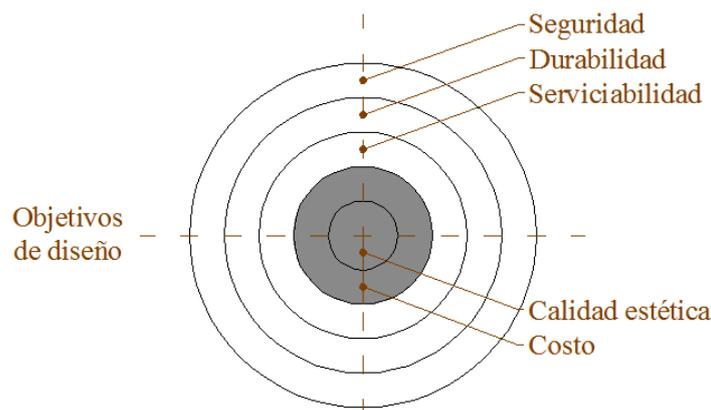


Figura 1.- Objetivos generalmente aplicables al diseño de puentes según Menn (2015).

En segundo lugar, según Menn, los objetivos técnicos son mutuamente compatibles, y en cambio, la economía y la calidad estética son normalmente incompatibles, y obtener un balance entre estas dos metas puede ser alcanzado sólo con ingenio durante el diseño conceptual. Al respecto, Menn sugiere que no obstante no se debe escoger la solución más simple y económica, el incremento en costo, con el objetivo de dar un concepto estéticamente más convincente para un proyecto específico en comparación con la solución más económica, no debería exceder los siguientes límites: para puentes largos alrededor del 5 %; para puentes medianos (longitud total menor a 500 m y luces promedio de 100 m) un 15 %; para puentes pequeños (longitud total menor a 100 m y luces promedio de 50 m) un 25 %. En el caso de puentes peatonales, dependiendo de la experiencia deseada para los usuarios, se podría permitir un sobre costo de hasta un 100 %.

•**Michel Virlogeux (Francia):** Diseñador de puentes como el Millau, Morbihan y Normandía en Francia, así como el Vasco da Gama en Portugal, entre muchos otros, propone que los ingenieros estructurales, especialmente en el caso de puentes, son y deberían ser capaces por sí solos de crear formas lógicas, eficientes y elegantes, dominando todos los aspectos conceptuales, desde las ciencias hasta la construcción, los materiales (incluyendo consideraciones de durabilidad en el caso del concreto) y la tecnología (apoyos, juntas, cables), y en donde los más talentosos pueden también producir lo que se podría considerar arquitectura elegante.

Considera también que no obstante la parte económica es importante, esta se ha convertido en la única meta de ingenieros de mentalidad cerrada, resultando en algunas estructuras pobres, feas y repetitivas que desacreditan a la profesión, y que incluso, en ocasiones se da demasiada importancia a detalles técnicos, y no la suficiente atención a lo que él llama la ingeniería real, que es la creatividad.

Por lo tanto, Virlogeux (1996) da una gran importancia a la elegancia y eficiencia de las estructuras civiles, las cuales se logran teniendo en cuenta una serie de objetivos al mismo tiempo, lejos de la pretensión y el exhibicionismo: un manejo directo de las fuerzas por medio de la forma para lograr eficiencia y que el público en general pueda hasta cierto punto entender el funcionamiento estructural, el diseño se debería mantener puro y no cambiar conceptos en el camino, las proporciones deberían ser elegantes, buscando la esbeltez, y finalmente, la estructura debe ser adaptada al entorno en el cual será construida.

Algo importante de destacar, es que Virlogeux si considera que para ciertas etapas avanzadas del diseño de una estructura de puente, el ingeniero puede y debería consultar a un arquitecto sobre ciertos aspectos que podrían mejorar la elegancia de la obra, enfoque que él mismo ha seguido en muchas de sus obras.

•**Fritz Leonhardt (Alemania):** Es el diseñador de puentes como el Cologne Rodenkirchen en Alemania y el Hegeland en Noruega. Además, es el autor de varios libros ampliamente reconocidos por el campo del diseño estructural, entre ellos el libro “Bridges: Aesthetics and Design” (Leonhardt, 1984), el cual es un tratado extensivo sobre la estética de una gran cantidad de tipologías de puentes.

Dando énfasis a la consideración de la parte estética, Leonhardt (1984) propone varias reglas para el diseño de puentes, entre las cuales están: mantener un adecuado orden de los distintos componentes y formas, establecer buenas y armoniosas proporciones no sólo entre altura y longitud, sino además en tres dimensiones, aspirar a la simplicidad y a la pureza de la estructura evitando el uso de aditamentos y ornamentos, en donde el diseño de un puente es perfecto si nada puede ser omitido o agregado, belleza en el uso de los productos técnicos que se utilicen que deberán cumplir un propósito y dar un adecuado servicio, la estructura deberá proyectarse de forma tal que sea fácil de construir, el diseño deberá considerar la parte económica como uno de sus principales objetivos, una perfecta integración con el entorno, y el uso en todo momento de la creatividad y la intuición.

DURABILIDAD EN PUENTES

Si bien es cierto las tres dimensiones del arte estructural son igualmente importantes, la parte de la eficiencia a través de la resistencia última y de servicio es la dimensión que en gran medida ha dominado la práctica profesional del ingeniero estructural en Costa Rica; en cuanto a la dimensión simbólica, esta es de naturaleza subjetiva, y por lo tanto, implica una búsqueda personal que va desde el estudio crítico de las estructuras en la realidad, hasta la lectura de expertos que han escrito sobre el tema.

El enfoque en este trabajo es por lo tanto en la dimensión social, y de esta, en aspectos de la durabilidad, debido a que en muchas ocasiones se minimiza su importancia en la etapa de diseño. Aunque la resistencia a la falla y las condiciones de servicio son de vital importancia, un puente que cumpla con estos dos aspectos a cabalidad pero que no tenga una buena durabilidad, podría llegar a tener una vida útil corta, debido a la afectación en la resistencia por los deterioros que sufra.

En un país como Costa Rica, con problemas de gestión serios en el área de infraestructura y cuyos puentes adolecen falta de un adecuado mantenimiento, diseñar estructuras que tengan una vida de servicio lo más larga posible con el mínimo mantenimiento, y teniendo en cuenta además los otros objetivos de diseño, podría ser una alternativa factible en vías de la solución al problema.

Algunas medidas a tomar en cuenta de acuerdo a la vida útil que se requiera del puente, son:

•**Detallado:** Una de las formas más efectivas y sencillas de proporcionar una adecuada durabilidad en estructuras de concreto, es asegurarse de proveer un adecuado recubrimiento, que esté acorde con la ubicación del puente y el grado de exposición del elemento. Para ello, los diferentes códigos, incluyendo el AASHTO LRFD (2014), facilitan recomendaciones al respecto. El "Model Code For Service Life Design" (FIB, 2006), es una buena referencia a ser utilizada en cuanto no sólo el detallado, sino además la predicción de la efectividad de las medidas tomadas.

En el caso de puentes de acero, es esencial especificar un adecuado sistema de protección de pintura acorde con la ubicación del puente. También es recomendable evitar uniones de fácil deterioro y difíciles de mantener, como lo son por ejemplo los elementos tipo angular unidos longitudinalmente.

•**Materiales:** Si bien es cierto la resistencia del concreto es un factor importante a especificar en planos, pues en ella se basan los supuestos de diseño por resistencia y serviciabilidad, es recomendable ir más allá, y especificar el concreto basado en el desempeño, para lo cual se puede limitar en algunos casos el contenido o tipo de cemento a utilizar, o establecer una permeabilidad deseada para cierto medio ambiente, entre otras medidas.

En el caso de puentes de acero, el material denominado como acero resistente a la intemperie ("weather proof steel") y el cual es ampliamente utilizado en Europa y Norteamérica, es una buena alternativa, siempre y cuando se cumplan a cabalidad las reglas para su uso.

Se recomienda revisar "Design Guide for Bridges for Service Life" (Azizinamini, 2013), la cual entre muchas otras recomendaciones, provee un capítulo completo dedicado al tema de materiales (concreto y acero) desde el punto de vista de la durabilidad y su influencia en la vida de servicio.

•**Accesibilidad para inspección y mantenimiento:** Las inspecciones y el mantenimiento rutinario de los puentes se basan en la necesidad de detectar y corregir deterioros relevantes y otras irregularidades a tiempo. Esta es la razón por la cual es necesario asumir que los puentes que se diseñan hoy, será necesario inspeccionarlos e intervenirlos periódicamente a lo largo de su vida útil, y es un tema que ha ganado relevancia en los últimos años debido al desarrollo de los sistemas de gestión de puentes. Es necesario por lo tanto, que desde la etapa de diseño se faciliten en la medida de lo posible estas tareas, o al menos que no se obstaculicen (Vogel y Schellenberg, 2012).

En el caso de puentes en donde es necesario utilizar camiones grúa de inspección, la operación de los mismos se puede facilitar y acelerar evitando o utilizando al mínimo obstáculos innecesarios a lo largo de los extremos de la sección transversal. En el caso de puentes colgantes y atirantados, en donde los cables pueden ser un obstáculo difícil de sortear, puede ser apropiado el uso de andamios móviles. En puentes tipo cercha de paso superior, es recomendable considerar utilizar pasarelas permanentes. Para puentes tipo cajón, dado que en la mayoría de los casos se carga con equipo y es necesario trabajar en el interior, es recomendable proveer alturas mínimas y adecuados accesos para los equipos de inspección y mantenimiento. Es importante evaluar y tomar las consideraciones del caso para colocar adecuados sistemas de control y de bloqueo con el objetivo de evitar, entre otras cosas, el vandalismo.

Para el caso de los elementos no necesariamente estructurales, pero si en muchas ocasiones muy importantes para el adecuado funcionamiento del puente, tales como apoyos, juntas de expansión, barreras de contención vehicular, guardavías, sistema de drenaje, ductos, señalización vial, entre otros, es importante que estos se diseñen accesibles, visibles, reparables, e incluso intercambiables (Vogel y Schellenberg, 2012).

Algunos de estos requerimientos citados podrían incrementar levemente el costo de construcción, pero en el ciclo de vida de la estructura ese costo es despreciable. Sin embargo, lo que es una realidad es que todo equipo adicional incrementa tanto los costos de construcción como de mantenimiento, debido a que se adicionan elementos que también deben ser inspeccionados y que requieren mantenimiento, y es por eso que ciertas de las soluciones mencionadas podrían no ser económicamente justificadas. La solución óptima puede ser escogida sólo luego de comparar los costos y los beneficios para cada caso en específico (Vogel y Schellenberg, 2012). En ninguno de los casos citados u otros adicionales, las soluciones que se implementen deben afectar de forma considerable la estética del puente, si es que esta se tomó en cuenta en el diseño.

•**Adecuado manejo del agua de escorrentía:** Además de ser un tema de seguridad para los usuarios, con el fin de evitar el hidropneumático debido a la acumulación de agua de escorrentía, un inadecuado diseño del manejo de agua puede provocar innecesarios problemas de durabilidad en el mediano y largo plazo.

Si se colocan tubos de drenaje y estos no tienen un adecuado diámetro, no sólo favorecen la acumulación de agua sino que además promueven la acumulación de sedimento y potencian su obstrucción. Sistemas de drenajes con detalles complejos como una gran cantidad de cambios de dirección, canalización horizontal del agua, o detalles ocultos dentro de la estructura, pueden provocar ese mismo problema de obstrucción y además son difíciles de inspeccionar y de dar mantenimiento. Los tubos de drenaje muchas veces se especifican en los planos pero no se detallan y por lo tanto queda a criterio del constructor su colocación, lo cual podría reducir la vida útil del sistema, ya que en algunos casos se colocan una vez la obra está casi finalizada y las soluciones se improvisan. Además, una inadecuada extensión de los tubos de drenaje o su colocación en puntos vulnerables como las pilas del puente o cerca del bastión, llevan la descarga del agua directamente a los componentes del puente y los deteriora.

Si se utilizan juntas de expansión, es necesario evitar que el agua de escorrentía caiga directamente sobre la zona de los apoyos y los extremos de las vigas principales o diafragmas. Lo ideal sería además canalizarla para que del todo el agua de escorrentía no descargue sobre ninguna zona expuesta del puente.

•**Eliminar al máximo las juntas de expansión:** En Costa Rica, los puentes en su gran mayoría se han diseñado especificando el uso de juntas de expansión para permitir las deformaciones del puente por temperatura, y del uso de apoyos para permitir estos mismos movimientos. Sin embargo, al igual que se ha reportado internacionalmente, debido a una serie de factores como falta de mantenimiento cíclico o basado en la condición, uso de tipologías y materiales de juntas y apoyos inadecuados o de poca durabilidad, así como las mismas condiciones climáticas de una alta precipitación durante gran parte del

año, han provocado que de manera consistente, los puentes con varios años de servicio evidencien deterioros de diversa índole en las juntas de expansión y, debido al paso del agua de escorrentía, también deterioros en los apoyos y en otros elementos de los puentes (Ver Fig. 2).



Río Tenorio - RN01



Río Seco - RN01



Río Concepción - RN27



Río Kooper - RN04



Río Madre de Dios - RN32



Río Poás - RN01

Figura 2.- Ejemplos de deterioros en juntas de expansión y apoyos en puentes de rutas nacionales.

La tendencia en países desarrollados es, en la medida de lo posible, evitar el uso de componentes con menor vida útil que los elementos estructurales del puente y que requieran de mantenimiento, inspección, sustitución periódica, y que comprometen la durabilidad del puente, como es el caso de las juntas de expansión y de los apoyos (Martinez, 2012).

Cuando estos requisitos se cumplen: no utilización de juntas de expansión y un mínimo de dispositivos de apoyo, se habla entonces de los denominados *puentes integrales*.

En EUA, el primer puente denominado como integral se construyó en 1938 por el Departamento de Transportes de Ohio (ODOT) y ahora son usados en al menos 41 estados. En las últimas décadas, ha sido el Departamento de Transportes de Tennessee el que ha liderado su implementación y a finales del siglo pasado construyó el puente Happy Hollow Creek de 358 m de largo y de concreto presforzado (Burke Jr., 2009).

El AASHTO LRFD 2014 reconoce esta tendencia en el comentario C2.5.2.1.1, en donde indica: "*Además del deterioro del tablero de concreto como tal, el problema de mantenimiento de puentes más frecuente es la desintegración de los extremos de las vigas, apoyos, pilas y bastiones debido a la filtración de agua con sal a través de las juntas de expansión. La experiencia parece indicar que un tablero estructuralmente continuo provee la mejor protección a los componentes bajo el tablero*". Además, en el inciso 14.5.2.1, indica que el número de juntas de expansión en una estructura se deberá

mantener al mínimo, y en el respectivo comentario C14.5.2.1 señala: "Puentes integrales, puentes sin juntas de expansión, deberán ser considerados en donde la longitud de la superestructura y la flexibilidad de la subestructura son tales que los esfuerzos secundarios debido a la restricción del movimiento se encuentren dentro de límites tolerables".

En el Reino Unido, el Volumen 1 de la Sección 3-Parte 7: Diseño por Durabilidad (BD 57/01) del DMRB, indica de manera explícita (Highways Agency, 2001): "2.3-En principio para longitudes que no excedan 60 m y sesgos de no más de 30°, los puentes adicionalmente deberán ser diseñados como puentes integrales, con los bastiones conectados directamente a la superestructura, sin juntas de expansión o contracción en el tablero."

En Nueva Zelanda se ha vuelto común la construcción de puentes integrales desde hace varias décadas (Wood et al., 2015). En Japón el primero se completó en 1996, en Corea del Sur en 2002 (Burke Jr., 2009), y en China desde el año 2000 se construyen puentes integrales (Wood et al., 2015).

PUENTES INTEGRALES

Un puente integral es una estructura de uno o varios tramos en donde se eliminan las juntas de expansión, y en donde se limita al máximo el uso de dispositivos de apoyo. Visto de otra forma, en un puente integral se provee continuidad a todo lo largo de la estructura, incluyendo en los bastiones. En la Fig. 3 se muestra de manera esquemática un ejemplo típico de puente integral, en este caso de una estructura de un sólo tramo.

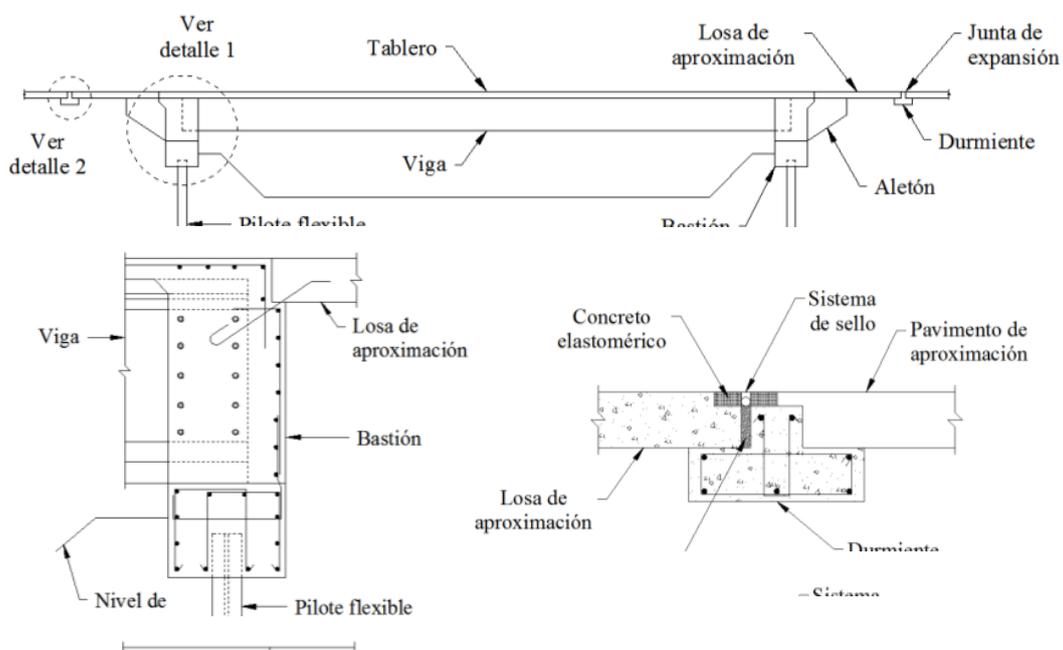


Figura 3.- Esquema de puente integral típico; caso de estructura de un sólo tramo.

Los puentes integrales se componen por lo general de los siguientes elementos (Burke Jr., 2009):

- Una superestructura continua construida integralmente con bastiones tipo cabezal con pilotes (Ver Fig. 3).
- Bastiones soportados por terraplenes y por una única línea de pilotes verticales (Ver "Detalle 1" en Fig. 3).

- Pilas flexibles construidas integralmente con la superestructura, pilas rígidas con apoyos móviles, pilas semi-rígidas, o pilas con goznes en la base e integrales con la superestructura (PCI, 2001).
- Una losa de aproximación unida al puente, y que es soportada por el bastión y el relleno de aproximación (Ver "Detalle 1" en Fig. 3).
- Juntas de control para el caso de los puentes más largos, localizadas entre la losa de aproximación y el pavimento de la carretera (Ver "Detalle 2" en Fig. 3).

VENTAJAS

• **Mayor durabilidad y reducción de costos de mantenimiento:** Esta es la mayor ventaja y la razón por la cual nacieron y se ha extendido su uso a nivel mundial. Como ya se mencionó anteriormente, los apoyos y juntas de expansión tienen en algunos casos un alto costo de adquisición, instalación, mantenimiento, reparación y sustitución (Ver Fig. 4). El paso de agua contaminada a través de las juntas de expansión causa problemas de corrosión en los elementos inferiores, especialmente en vigas de concreto reforzado y metálicas. Además, las juntas pueden llegar a obstruirse con basura y otros desechos sólidos y perder su funcionalidad.

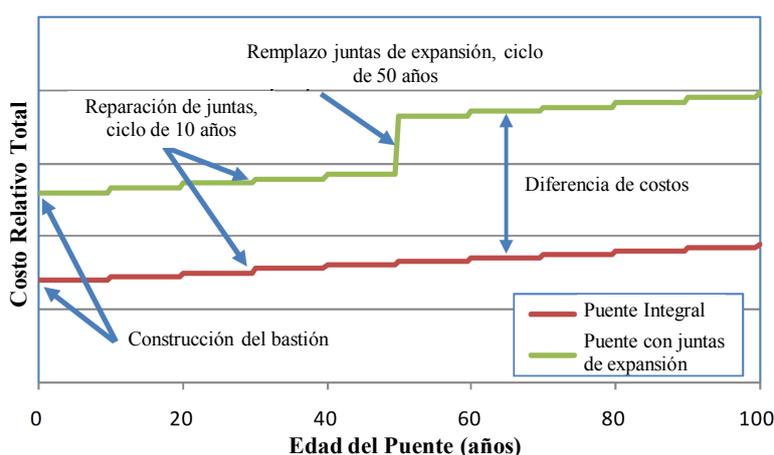


Figura 4.- Análisis comparativo de costo de vida entre puentes integrales y con juntas de expansión, sin tomar en cuenta los costos que son iguales en ambos casos (Tomado de Azizinamini, 2013).

• **Menor costo constructivo:** Para dos puentes construidos esencialmente de la misma forma, excepto que uno tenga juntas de expansión y el otro sea un puente integral, no en el 100% de los casos pero en la gran mayoría, los costos de construcción serán menores en el puente integral debido en parte a que los elementos son relativamente sencillos, las tolerancias son amplias, hay pocas juntas de construcción, pocas partes, pocos materiales y se evitan las prácticas en las que la mano de obra es intensiva (Burke Jr, 2009). Por lo general, también se puede obtener una mayor rapidez constructiva (Burke Jr, 2009), aún más si se utilizan sistemas de construcción acelerada de puentes (ABC por sus siglas en inglés).

• **Mayor eficiencia estructural:** La continuidad hace que los puentes cuenten con una mayor redundancia, y que se pueda hacer un uso más eficiente de los materiales al proveer una mayor distribución de las fuerzas. Se da también una mejor distribución de las cargas vivas, lo cual reduce los esfuerzos de servicio (Burke Jr., 2009). Continuidad y una mayor esbeltez mejoran las posibilidades de lograr una adecuada estética visual (Leonhardt, 1984). Además, tal y como se menciona más adelante, su diseño es por lo general más sencillo.

• **Reemplazo y ensanchamiento simplificado:** Son más fáciles de ensanchar o reemplazar en caso de que se haya subestimado el crecimiento en la demanda de peso o cantidad de vehículos. Las subestructuras de estos puentes, específicamente los pilotes, pueden ser reutilizados al colocar un nuevo cabezal o pueden ser retirados o dejados en su lugar (Burke Jr., 2009).

DESVENTAJAS

•**Aplicaciones limitadas:** Una de sus principales limitaciones es que a diferencia de los puentes con juntas de expansión, los puentes integrales no son aplicables a todas las situaciones ni tipologías (Burke Jr., 2009).

•**Falta de estandarización y normativa específica:** No existe un estándar interno y uniforme para el diseño de estas estructuras en ningún país, por lo que cada una de las agencias de transportes ha tenido que adoptar prácticas, detalles y suposiciones basadas en su propia experiencia (Kunin y Alampalli, 2000); lo anterior a pesar de su uso extensivo y de la gran cantidad de investigación que se ha realizado al respecto. No obstante, este aspecto también podría ser visto como una ventaja directa por algunos ingenieros, quienes, siempre desde la ética profesional, no están limitados por ningún código en el diseño de este tipo de puentes, y por lo tanto, pueden hacer uso del criterio, entrenamiento ingenieril y de la experiencia para llegar a soluciones integrales.

•**Longitud máxima:** Para puentes de longitudes mayores a 140 m se han evidenciado problemas relacionados con la losa y los rellenos de aproximación (Wolde-Tinsae; Klinger y White, 1988). Generalmente, las luces máximas admisibles para puentes integrales son entre 80 m y 100 m, lo cual depende del país y en el caso EUA, del estado. En la Fig. 5 se observa la gran variabilidad de longitudes máximas permitidas sólo en Norteamérica, lo cual está relacionado con la falta de estandarización.

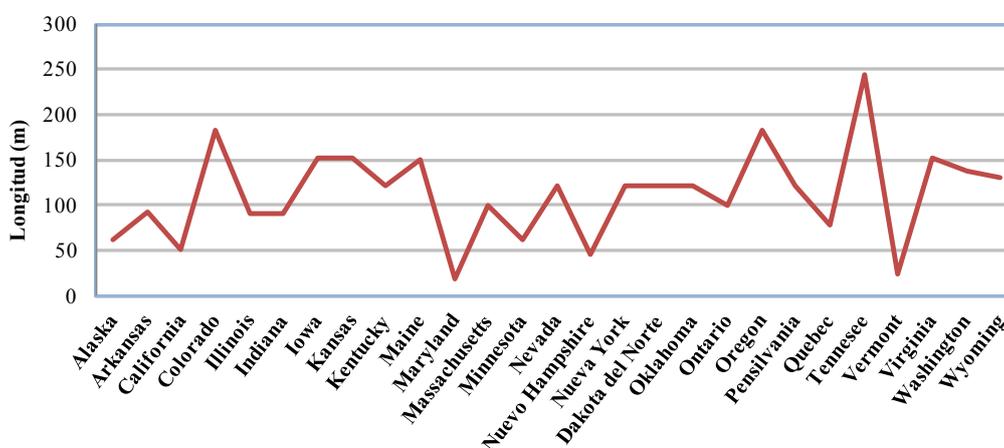


Figura 5.- Variabilidad de las longitudes máximas permitidas para puentes integrales en Norteamérica (Fuente: Kunin y Alampalli, 2000; PCI, 2001; Burke Jr., 2009).

•**Sesgo y curvatura máxima:** En Europa y en la mayoría de estados de EUA se limita el sesgo a 30° , aunque en algunas partes se han llegado a construir puentes con sesgos de hasta 70° . El problema del sesgo radica en la fuerza necesaria para estabilizar la rotación del bastión. Los puentes integrales poseen también limitación en cuanto a su radio de curvatura; generalmente, el radio se limita a 10 veces el ancho del tablero y el ángulo de apertura a 40° .

•**Esfuerzos en pilotes:** En el caso de pilotes de acero, se ha observado en puentes integrales muy largos, que los esfuerzos en estos elementos pueden acercarse, igualar o incluso exceder, el esfuerzo de fluencia del material. Esto puede generar rótulas plásticas que limiten la resistencia a la flexión para elongaciones adicionales de la superestructura (Burke, 2009). Además, este tipo de daño es costoso de reparar.

•**Necesidad de investigación:** Se requiere profundizar la investigación sobre la presión pasiva para poder describir adecuadamente la relación entre la cantidad de compresión y la generación de presión pasiva, y el efecto de los ciclos de compresión y expansión sobre el terraplén. De hecho, se considera que la falta de investigación en este campo y la consecuente falta de especificaciones para considerar los efectos de las presiones pasivas del suelo, es probablemente la razón principal de lento desarrollo de estándares de diseño y de procedimientos constructivos para puentes integrales (Burke Jr., 2009).

DESEMPEÑO SÍSMICO

Se considera que los puentes integrales poseen una buena resistencia sísmica, debido a que tienen una alta redundancia, desplazamientos reducidos, se elimina la posibilidad de la pérdida de asiento, y tienen un alto amortiguamiento debido a la interacción suelo-estructura (Masrilayanti y Weekes, 2014). Además, durante sismos reales, los bastiones continuos han probado tener un desempeño consistentemente bueno, y han reducido (o incluso evitado) daños y problemas en la pared posterior de los bastiones y en los apoyos, problemas que generalmente están asociados a puentes con bastiones con juntas (Yen y Khaleghi, 2016). Si bien es cierto algunas estructuras sufrieron ciertos daños leves en terremotos ocurridos en California y Nueva Zelanda, los puentes con bastiones integrales demostraron en general mejor desempeño comparativo durante esos eventos (Wood et al., 2015).

La Guía de Diseño Sísmico LRFD de AASHTO (2011), no se refiere explícitamente a puentes integrales, pero en algunas secciones se presentan algunas recomendaciones al respecto, por ejemplo, en cuanto a si el bastión contribuye o no a la resistencia sísmica en los apartados 5.2.3.2 y 6.7.1, entre otros.

Se recomienda revisar Wood et al. (2015), en donde para el caso de Nueva Zelanda, se presentan recomendaciones de diseño y análisis sísmico de puentes integrales, consideraciones geotécnicas, e incluso un ejemplo de cálculo de un puente integral de dos tramos.

DISEÑO

Ante la ausencia de criterios universalmente aceptados, existen de manera general dos enfoques usados para el diseño de puentes integrales (Modjeski and Masters, 2003):

•**Diseño simplificado:** Siempre que se cumplan ciertos límites y requisitos, es posible utilizar, sin modificaciones, los métodos de diseño estándar de superestructuras (los efectos de la ligera restricción rotacional provocada por los bastiones integrales pueden ser ignorados). Las fuerzas laterales y longitudinales sobre la superestructura pueden también ser ignoradas. Excepto por cargas laterales o longitudinales aplicadas directamente sobre las pilas y la presión pasiva aplicada directamente a los alerones de los bastiones, las pilas y los bastiones pueden ser diseñados únicamente para cargas verticales.

Burke Jr. (2009) recomienda que los requisitos sean los siguientes: limitar la longitud de los puentes a no más de 90 m, las superestructuras de varias luces deberán ser continuas, el sesgo se debe limitar a 30° y la curvatura a 5°, proveer terraplenes y una sola fila de pilotes verticales para soportar bastiones tipo cabezal, proveer pilotes flexibles (tipo "H" de acero para los puentes más largos) con longitudes de no menos de 3 m y preferiblemente de no menos de 4,6 m, los pilotes deberán ser orientados en el eje débil a flexión (almas paralelas al bastión), proveer losas de aproximación conectadas al bastión, proveer a las losas de aproximación con bordillos de 150 mm de alto para puentes con bordillos o parapetos, y proveer juntas en el pavimento para el caso de pavimentos rígidos con el objetivo de permitir el alargamiento cíclico del puente y del pavimento.

•**Diseño detallado:** Es especificado por algunos pocos estados para el diseño de cualquier puente integral (por ejemplo Pensilvania), y es también recomendado para cuando las características del puente, ya sea por la longitud, el sesgo, la curvatura, el tipo de suelo, el ancho, u otra característica especial, se salga de los rangos aceptados para el diseño simplificado.

Se recomienda revisar el ejemplo preparado por Modjeski and Masters (2003) para el FHWA de los EUA, en donde de manera muy detallada, se presenta el diseño completo paso a paso de un puente integral de dos tramos.

Con el objetivo de ejemplificar el análisis de un puente que se encuentra fuera de los límites recomendables para el uso de puentes integrales, se utilizará en el Anexo, además el ejemplo de un

punto existente que no fue diseñado para ser integral, como es el caso del puente sobre el río Seco en la ruta entre Naranjo y Florencia (Ver Fig. 6). El análisis propuesto es con el objetivo de tener una idea del orden de magnitud de las fuerzas, y no necesariamente significa que es suficiente para una estructura de la complejidad de este tipo. En el Anexo se puede revisar en detalle el ejemplo del caso de estudio.



Figura 6.- Vista lateral del puente sobre el río Seco utilizado para el caso de estudio (Ver Anexo).

CONCLUSIONES

1. El diseño de puentes debe ser visto de una forma integral, tomando en cuenta una gama de variables tendientes a la escogencia de la mejor solución entre varias opciones posibles.
2. El concepto del Arte de la Ingeniería Estructural fue desarrollado por Billington (1983) después de percibir un patrón en la creación de estructuras icónicas por parte de ingenieros estructurales a nivel mundial y a través de la historia, empezando desde la revolución industrial.
3. Las tres dimensiones del Arte Estructural: científica, social y simbólica, engloban la visión integral de diseño estructural, y en el caso de puentes es compartida por varias fuentes, entre ellas el manual AASHTO LRFD y diseñadores de puentes a nivel internacional.
4. La dimensión social incluye la durabilidad, aspecto que si es tomando en cuenta desde la etapa de diseño de los puentes, puede contribuir decisivamente en disminuir los costos de mantenimiento y aumentar la vida de servicio.
5. Los puentes integrales, sin el uso de juntas de expansión, no son la única solución al problema de durabilidad pero son una excelente y viable alternativa, que ha ganado terreno a nivel mundial gracias a su buen desempeño.

BIBLIOGRAFÍA

- AASHTO** (2014). "AASHTO LRFD Bridge Design Specifications", *American Association of State Highway and Transportation Officials*, 7^{ma} Edición, EUA.
- AASHTO** (2011). "AASHTO Guide Specification LRFD Seismic Bridge Design", *American Association of State Highway and Transportation Officials*, 2^{da} Edición, EUA.
- Azizinamini, Atorod** (2013). "Design Guide for Bridges for Service Life", *SHRP 2 Renewal Project - TRB*, Borrador, EUA.
- Billington, David P.** (1983). "The Tower and the Bridge: The New Art of Structural Engineering", *Princeton University Press*, New Jersey, EUA.
- Burke Jr., Martin P.** (2009). "Integral & Semi-Integral Bridges", *Wiley-Blackwell*, EUA.

- FIB** (2006). "Model Code For Service Life Design", *fédération internationale du béton*, Boletín 34, Alemania.
- Highways Agency** (2001). "Design Manual for Roads and Bridges - Part 7: Design for Durability (BD 57/01)", *The Stationery Office (TSO)*, Vol. 1 (Sección 3), Agosto, Reino Unido.
- Kunin, Jonathan y Alampalli, Sreenivas** (2000). "Integral Abutment Bridges: Current Practice in United States and Canada", *Journal of Performance of Constructed Facilities*, ASCE, Vol. 14 (3), Agosto, p.p. 104-111.
- Leonhardt, Fritz** (1984). "Bridges: Aesthetics and Design", *The MIT Press*, EUA.
- Martínez Muñoz, Francisco** (2012). "Estudio sobre la Redundancia Estructural de Puentes Integrales de Hormigón", *Universitat Politècnica de Catalunya*, Tesina de Especialidad, Barcelona, España.
- Masrilayanti, M. y Weekes, L.** (2014). "Behaviour of integral bridges under vertical and horizontal earthquake ground motion", *Seventh International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management (IABMAS 2014)*, China.
- Modjeski and Masters, Inc** (2003). "Comprehensive Design Example for Prestressed concrete (PSC) Girder Superstructure Bridge With Commentary", *The Federal Highway Administration (FHWA)*, Reporte FHWA NHI - 04-043, Noviembre, EUA.
- PCI** (2001). "The State of the Art of Precast/Prestressed Integral Bridges", *Precast/Prestressed Concrete Institute*, Illinois, EUA.
- Schärer, Caspar y Menn, Christian** (2015). "Christian Menn - Bridges", *Scheidegger & Spiess*, Zürich, Suiza.
- Virlogeux, Michel** (1996). "Bridges and the structural art", *IABSE Congress Report*, Vol. 15, p.p. 127-134.
- Vogel, Thomas. y Schellenberg, Kristian** (2012). "Design for inspection of concrete bridges", *Materials and Corrosion*, Vol. 63 (12), Diciembre, p.p. 1102-1113.
- Wolde-Tinsae, Amde M.; Klinger, James E. y White, Elmer J.** (1988). "Performance of Jointless Bridges", *Journal of Performance of Constructed Facilities*, ASCE, Vol. 2 (2), Mayo, p.p. 112-125.
- Wood, John; et al.** (2015). "Criteria and guidance for the design of integral bridges in New Zealand", *NZ Transport Agency*, Reporte de Investigación 577, Nueva Zelanda.
- Yen, W. Phillip y Khaleghi** (2016). "Design and Construction Challenges of Jointless Bridges in Seismic Regions", *Proceedings of the 11th US-Taiwan Bridge Engineering Workshop*, Octubre, Taipei, Taiwan.

ANEXO: CASO DE ESTUDIO

El caso de estudio corresponde al puente sobre el río Seco en la ruta en construcción entre Naranjo y Florencia. Se utilizan las mismas dimensiones de los planos constructivos y los mismos materiales especificados, excepto que los bastiones se suponen integrales. El puente corresponde a una viga presforzada tipo cajón continua de tres tramos, con una longitud total aproximada de 150 m (Ver Fig. A1).

•**Pilas:** Para determinar la rigidez de las pilas se estudian dos situaciones. La primera (emp-emp), la cual corresponde al puente real, implica empotramiento tanto en la cimentación como en la superestructura (Ver Fig. A1). En el segundo caso (emp-art), se asume que la pila está empotrada en la superestructura y simplemente apoyada en la cimentación, detalle que ha sido utilizado en puentes de este tipo por el Departamento de Transportes de Tennessee (PCI, 2001). La ecuación correspondiente a la rigidez de la pila dependiendo del caso, es la siguiente:

$$K_{\text{emp-art}} = \frac{3E_c I_c}{H_1^3}$$

$$K_{\text{emp-emp}} = \frac{12E_c I_c}{H_1^3}$$

Donde,

- E_c es el modulo de elasticidad del concreto en la pila (kg/cm^2).
- I_c es el momento de inercia de la pila (cm^2).
- H_1 es la distancia entre la parte inferior de la superestructura y la parte superior de la fundación (cm).

$$E_c = 16000\sqrt{f'_c} = 16000\sqrt{286} = 270585 \text{ kg/cm}^2$$

$$I_c = \frac{\pi r^4}{4} = \frac{\pi(125)^4}{4} = 191747598 \text{ cm}^4$$

$$K_{\text{emp-art}} = \frac{3(270585)(191747598)}{2200^3} = 14618 \text{ kg/cm}$$

$$K_{\text{emp-emp}} = \frac{12(270585)(191747598)}{2200^3} = 58472 \text{ kg/cm}$$

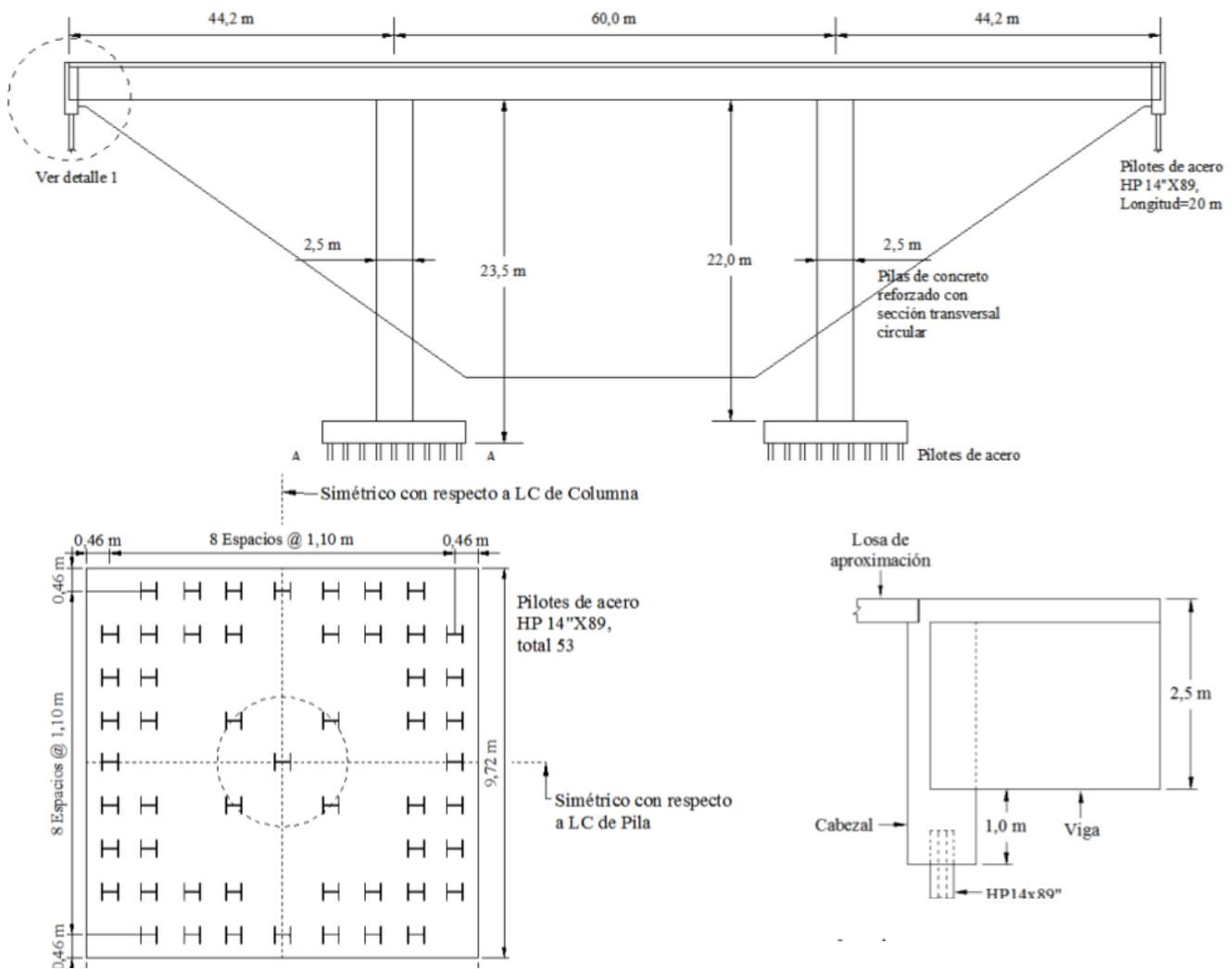


Figura A1.- Esquema del puente sobre el río Seco utilizando bastiones integrales.

La pila está cimentada sobre pilotes, por lo cual es necesario tomar en cuenta también la rigidez que aportan estos. De esta forma, la ecuación de la rigidez se modifica como se muestra a continuación (PCI, 2001):

$$K_{\text{emp-art}} = \frac{1}{\left(\frac{H_1^3}{3E_c I_c} + \frac{H_2^2 L_p}{I_g A_p E_p}\right)} \qquad K_{\text{emp-emp}} = \frac{1}{\left(\frac{H_1^3}{12E_c I_c} + \frac{H_2^2 L_p}{I_g A_p E_p}\right)}$$

Donde,

- H_2 distancia desde la unión de la pila con la superestructura hasta la base del cabezal de los pilotes (cm).
- I_g Momento de inercia del grupo de pilotes alrededor del eje en consideración (cm²).
- E_p Modulo de elasticidad de un pilote (kg/cm²).
- A_p área transversal de un pilote (cm²).

$$I_g = 2 [6 (110)^2 + 4 (220)^2 + 8 (330)^2 + 7 (440)^2] = 4985200 \text{ cm}^2$$

$$E_p = 2100000 \text{ kg/cm}^2$$

$$A_p = 168,0 \text{ cm}^2$$

$$K_{\text{emp-art}} = \frac{1}{\left(\frac{2200^3}{3(270585)(191747598)} + \frac{2350^2 (2000)}{(4985200)(168)(2100000)}\right)} = 13389 \text{ kg/cm}$$

$$K_{\text{emp-emp}} = \frac{1}{\left(\frac{2200^3}{12(270585)(191747598)} + \frac{2350^2 (2000)}{(4985200)(168)(2100000)}\right)} = 42768 \text{ kg/cm}$$

Se puede observar de los resultados anteriores, que la rigidez disminuye al tomar en cuenta los pilotes y que además, la rigidez disminuye considerablemente utilizando una articulación en la base. En este ejemplo no se incluye una reducción en la rigidez de las pilas debido al agrietamiento.

•**Bastiones:** En el caso del cálculo de la rigidez de los bastiones, se puede utilizar el método simplificado del voladizo, el cual se muestra en la Fig. A2(a).

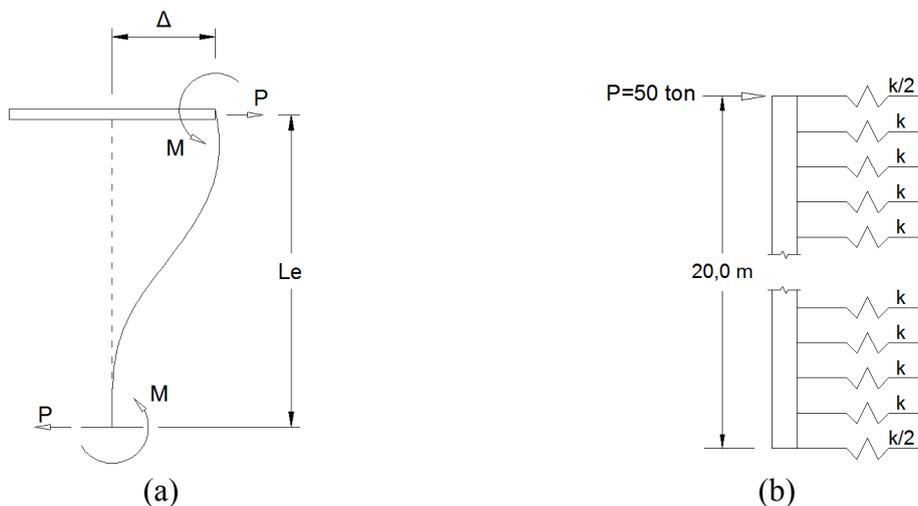


Figura A2.-Modelado de los pilotes en los bastiones: (a) Modelo simplificado de deformación; (b) Modelo para la interacción pilote-suelo.

En este caso, las ecuaciones a utilizar son las siguientes:

$$P = \frac{12 E_p I_p \Delta}{L_e^3} \qquad M = \frac{6 E_p I_p \Delta}{L_e^2}$$

Como se puede observar de las ecuaciones anteriores, es necesario conocer la longitud efectiva (L_e) del pilote en la cual se generan deformaciones. Lo anterior se puede realizar aplicando un modelo que represente la interacción entre el suelo y el pilote, en donde el suelo se simplifica como resortes horizontales con rigidez k espaciados uniformemente, y se aplica una carga horizontal en la parte superior del pilote, tal y como se muestra en la Fig. A2(b).

Para determinar la rigidez del resorte, se utiliza la siguiente ecuación:

$$k_{\text{resorte}} = K_h d s$$

Donde,

- K_h es el coeficiente de balasto horizontal, el cual se tomará como $1,1 \text{ kg/cm}^3$ para el suelo del sitio (MH-ML).
- d es el ancho del pilote (cm)
- s es el espaciamiento entre los resorte en el modelo (cm).

$$k_{\text{resorte}} = 1,1 (50)(35,1) = 1931 \text{ kg/cm}$$

El modelo de la Fig. A2(b) se hizo utilizando el software SAP2000. Se eligió un espaciamiento de los resortes de 50 cm y una fuerza horizontal de 50 ton. Los resultados que arrojó el modelo se presentan en la Tabla A1.

Tabla A1.- Resultados del modelado simplificado de los pilotes.

Tipo de suelo	K_h (kg/cm ³)	Desplazamiento (cm)	Momento (kg-cm)
Suelo del sitio (MH-ML)	1,1	1,52	5754505

$$L_e = \sqrt[3]{\frac{12 E_p I_p \Delta}{P}} = \sqrt[3]{\frac{12(2100000)(13510)(1,52)}{50000}} = 218 \text{ cm} \rightarrow \text{despejando para el valor de P.}$$

$$L_e = \sqrt{\frac{6 E_p I_p \Delta}{M}} = \sqrt{\frac{6 (2100000) (13510) (1,52)}{5754505}} = 212 \text{ cm} \rightarrow \text{despejando para el valor de M.}$$

$$L_{e \text{ prom}} = 215 \text{ cm}$$

$$K_{\text{bast}} = \frac{12 E_p I_p}{L_e^3} = \frac{12(2100000)(13510)}{215^3} = 34347 \text{ kg/cm}$$

•Fuerzas en la subestructura: Para el caso del puente de estudio se utilizará un incremento de temperatura de 20°C y un decremento de temperatura de 10°C.

A raíz de dichos cambios en la temperatura se tiene las siguientes deflexiones en las pilas:

$$\Delta_{\text{inc}} = \alpha \Delta T L = (1,20 \times 10^{-5})(20)(3000) = 0,72 \text{ cm}$$

$$\Delta_{\text{dec}} = \alpha \Delta T L = (1,20 \times 10^{-5})(10)(3000) = 0,36 \text{ cm}$$

Las fuerzas generadas por las deformaciones anteriores en el caso en el que se toma en cuenta la existencia de los pilotes son:

$$F_{\text{inc_emp-art}} = (0,72)(13389) = 9640 \text{ kg}$$

$$F_{\text{inc_emp-emp}} = (0,72)(42768) = 30793 \text{ kg}$$

$$F_{\text{dec_emp-art}} = (0,36)(13389) = 4820 \text{ kg}$$

$$F_{\text{dec_emp-emp}} = (0,36)(42768) = 15396 \text{ kg}$$

Mientras que en el caso en el que se toma en cuenta únicamente la placa aislada, las fuerzas son:

$$F_{\text{inc_emp-art}} = (0,72)(14618) = 10525 \text{ kg}$$

$$F_{\text{inc_emp-emp}} = (0,72)(58472) = 42100 \text{ kg}$$

$$F_{\text{dec_emp-art}} = (0,36)(14618) = 5262 \text{ kg}$$

$$F_{\text{dec_emp-emp}} = (0,36)(58472) = 21050 \text{ kg}$$

Como se puede ver, al utilizar una articulación en la cimentación y tomar en cuenta los pilotes, se obtiene una reducción en la fuerza de hasta tres veces en la magnitud de la fuerza.

En el caso de los bastiones, los valores de deflexión se presentan a continuación:

$$\Delta_{\text{inc}} = \alpha \Delta T L = (1,20 \times 10^{-5})(20)(7420) = 1,78 \text{ cm}$$

$$\Delta_{\text{dec}} = \alpha \Delta T L = (1,20 \times 10^{-5})(10)(7420) = 0,89 \text{ cm}$$

Las fuerzas generadas por las deformaciones anteriores en los bastiones son las siguientes:

$$F_{\text{inc}} = (1,78)(34347) = 61166 \text{ kg}$$

$$F_{\text{dec}} = (0,89)(34347) = 30583 \text{ kg}$$

Al darse un incremento en la temperatura, la superestructura del puente experimenta un alargamiento, lo cual genera presión pasiva del suelo sobre la cara posterior del bastión. Asumiendo que el relleno detrás del bastión tiene un coeficiente de fricción $\phi = 28^\circ$ y un peso específico $\gamma = 1,9 \text{ T/m}^3$, la fuerza pasiva y la fuerza total se calculan como sigue:

$$F_{\text{pasiva}} = \frac{\gamma H^2 L}{2} \tan^2 \left(45 + \frac{\phi}{2} \right)$$

$$F_{\text{pasiva}} = \frac{1,9(3,5)^2(11,92)}{2} \tan^2 \left(45 + \frac{28}{2} \right) = 384228,0 \text{ kg} \approx 384,2 \text{ Ton}$$

$$F_{\text{total}} = F_{\text{inc}} + F_{\text{pasiva}} = 61166 + 384228 = 445393,7 \text{ kg} \approx 445,4 \text{ Ton}$$

Como se puede observar al comparar las fuerzas entre las pilas y los bastiones, las pilas son relativamente flexibles, y como resultado, estas experimentan fuerzas relativamente bajas. Para este ejemplo, las fuerzas de temperatura generadas en los bastiones son independientes de las fuerzas generadas en las pilas, lo cual es cierto si existe simetría en la rigidez longitudinal de la subestructura. De acuerdo con la literatura, no obstante las presiones pasivas generadas en los bastiones debido al incremento de la temperatura son altas, generalmente tienen poco efecto en los bastiones tipo cabezal y pueden ser fácilmente acomodadas con refuerzo en la pared posterior (PCI, 2001).

La reducción en la longitud de la losa producto de un decremento de temperatura, genera en los pilotes esfuerzos de flexión que deben ser verificados:

$$\sigma = \frac{M}{S} = \frac{6 E_p I_p \Delta}{S L_e^2} = \frac{6 (2100000)(13510)(0,89)}{(724,4) (214,8)} = 4534 \text{ kg/cm}^2$$

Por lo tanto: $4534 \text{ kg/cm}^2 > 3500 \text{ kg/cm}^2$ (Acero A709 grado 50)

Como se puede observar, en este caso el esfuerzo del pilote en flexión supera el esfuerzo mínimo especificado de fluencia del material en un 30%, para la máxima caída de temperatura esperada para este puente de 150 m de largo.