

**CIMENTACIONES PROFUNDAS EN PUENTES INTEGRALES**

**JESÚS OMAR CONTRERAS GONZÁLEZ**

**Trabajo de Grado para optar por el título de  
Especialista en Estructuras**

**Director**

**DALTON MORENO**

**Ingeniero Civil, M.Sc.**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECAICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL  
ESPECIALIZACIÓN EN ESTRUCTURAS  
BUCARAMANGA**

**2017**

## Resumen

**Título:** Cimentaciones profundas en puentes integrales\*

**Autor:** Jesús Omar Contreras González\*\*

**Palabras claves:** Puente Integral, Suelo, Cimentación Profunda, Estribo, Pila, Fundación, Movimientos, Rotaciones.

**Resumen:** A continuación, se presenta un estado del conocimiento sobre las cimentaciones profundas utilizadas en la tipología de puente denominada “Puente Integral”. Los puentes integrales son estructuras que no cuentan con juntas de dilatación ni mecanismo o aparatos de apoyos, implicando una conexión monolítica entre el tablero, pilas, estribos y la fundación. Debido a la integración de los elementos del puente, los movimientos que permiten las juntas de dilatación en puentes convencionales son suplidos con la concepción de cimentaciones flexibles, que además de ajustarse a la expansión y contracción de la superestructura debido a diferentes solicitudes de carga, estas deben interactuar simultáneamente con el suelo circundante y los efectos que este presenta ante movimientos y fuerzas inducidas, resistiendo los esfuerzos a los que se ve sometido sin llegar al fallo estructural. Las diferentes opciones de estructuras de cimentaciones profundas utilizadas en puentes integrales brindan una variedad de soluciones tanto en materiales, como en tipos de estructuras a utilizar y procesos constructivos, ante los diversos escenarios que se pueden enfrentar la concepción de puentes integrales, como también las nuevas soluciones emergentes que se derivan de las tendencias de vanguardia y los resultados de últimas investigaciones. Los condicionamientos que conllevan el análisis, diseño y construcción de puentes integrales permiten ahondar el estudio de los diferentes tipos de cimentaciones profundas, su comportamiento, consideraciones específicas, nuevas tendencias y líneas de estudio.

---

\*Trabajo de monografía

\*\* Facultad de ingenierías fisicomecánicas. Escuela de ingeniería civil. Director. Dalton Moreno, Ing. Civil, M.Sc.

## Abstract

**Title:** Deep foundations in integral bridges\*

**Author:** Jesús Omar Contreras Gonzalez\*\*

**Key words:** Integral Bridges, Soil, Deep Foundation, Pier, Foundation, Movements, Rotations.

**Abstract:** Below is a state of knowledge about the deep foundations used in the bridge typology called "Integral Bridge". The integral bridges are structures that do not have expansion joints or supporting device mechanism, implying a monolithic connection between the deck, piles, abutments and the foundation. Due to the integration of the elements of the bridge, the movements that allow the expansion joints in conventional bridges are supplemented with the design of flexible foundations, which in addition to the adaptation to the expansion and contraction of the superstructure due to different loading requests, these must interact simultaneously with the surrounding soil and the effects that arise before induced movements and forces, resisting the efforts to which it is subjected without reaching the structural failure. The different options of deep foundation structures used in integral bridges provide a variety of solutions both in materials, as in the type of structure to be used and construction processes, in the different scenarios that can be faced with the design of integral bridges, as well as the new ones emerging solutions that derive from cutting-edge trends and the results of latest research. The conditions that lead to the analysis, design and construction of integral bridges allow us to deepen the study of the different types of deep foundations, their behavior, specific considerations, new tendencies and lines of study.

---

\*Monograph thesis

\*\* Facultad de ingenierías fisicomecánicas. Escuela de ingeniería civil. Director. Dalton Moreno, Ing. Civil, M.Sc.

**Tabla de contenido**

Introducción	8
1. Cimentaciones profundas	10
1.1. Clasificación de las cimentaciones profundas	10
1.2. Cimentaciones profundas en puentes integrales	12
1.3. Tipos de cimentaciones profundas en puentes integrales	14
1.3.1. Cimentaciones preexcavadas	14
1.3.2. Pilas de hormigón pretensado	15
1.3.3. Pilas de acero H	15
1.3.4. Pilas de tubos de acero	16
1.3.5. Pilas de madera	17
1.3.6. Combinación de pila de acero h y pila preexcavada	18
1.3.7. Micropilotes	18
1.3.8. Caissons	19
2. Análisis y diseño de cimentaciones profundas en puentes integrales	20
2.1. Interacción suelo estructura	20
2.2. Diseño de cimentaciones profundas en puentes integrales	22
3. Nuevas alternativas aplicadas a cimentaciones profundas de puentes integrales	24
Referecias Bibliográficas	30

**Tabla de ilustraciones**

Figura 1. Esquema General de Puente Integral	8
Figura 2. Pila de Fricción	11
Figura 3. Pila de soporte por punta	11
Figura 4. Pila de Soporte por Punta y por Fricción	12
Figura 5. Expansión y Contracción del Puente Integral	13
Figura 6. Proceso Constructivo de Cimentaciones Preexcavadas	14
Figura 7. Pila de Concreto Presfrozado en Proceso de Hincado	15
Figura 8. Orientación de Pilas de acero H	16
Figura 9. Pilas de Tubos de Acero	17
Figura 10. Construcción Típica de Micropilotes	19
Figura 11. Interacción Suelo-Estructura en Puente Integral	21
Figura 12. Modelo de Diseño de Pila	23
Figura 13. Propuesta de estabilización del Relleno	24
Figura 14. Sección Transversal de Pila UHPC en Comparación a una Pila de Acero H	25

según los códigos de diseño, ya que en diferentes partes del mundo donde se han usado este tipo de estructuras se han generado recomendaciones según los condicionamientos específicos de cada lugar y el comportamiento evidenciado por medio de la experiencia, pero ninguno código ha descrito un enfoque estándar para el análisis de estas estructuras (Rhodes, 2015).

Uno de los efectos que más solicita esta tipología de puentes son los gradientes de temperatura en el tablero, produciendo movimientos térmicos que desarrollan tensiones y contracciones debido a cambios diarios y estacionarios de temperatura, ya que dicho efecto no solo genera movimientos en la superestructura, y teniendo en cuenta que estos puentes son un conjunto monolítico, la cimentación y el suelo de fundación se ven expuestos a una interacción suelo estructura compleja donde la no linealidad del suelo, los empujes de tierra, los efectos dependientes del tiempo y las incertidumbres en la fluctuación de temperatura, dificultan predecir el comportamiento del puente (VTrans, 2008); este fenómeno se debe principalmente a que la respuesta del suelo influye en el movimiento de la estructura, y la respuesta estructural, a su vez, influye en el movimiento del suelo (Gentela, 2013).

De forma general, los puentes integrales se cimentan sobre una sola fila de pilotes flexibles (Ooi, 2010) que soportan los movimientos horizontales del tablero transmitiendo las cargas los estratos de suelo competente sin perder la capacidad resistente durante su vida útil, no obstante, existen varios tipos de cimentaciones profundas utilizadas con puentes integrales, diferentes materiales y métodos de análisis y diseño (Fomento, 2000). Por medio de este trabajo se realiza una revisión literaria para interiorizar en el estudio de las cimentaciones profundas que se utilizan para soportar puentes con estribos integrales.

## 1. Cimentaciones profundas

Las cimentaciones profundas son utilizadas cuando el suelo fundación no se encuentra aproximado a la superficie del terreno, esta situación genera la necesidad de mejorar las condiciones del suelo o llevar la cimentación hasta los estratos de roca o suelo competente para la transferencia de las cargas, cuando la primera no es una opción viable, tanto logística como económicamente, se opta por el uso de cimentaciones profundas como pilotes hincados, pilotes pre-excavados, micropilotes entre otros.

En lugares donde las condiciones del suelo normalmente permitan el uso de zapatas aisladas, pero existe la posibilidad de escurrimiento, licuefacción o expansión lateral, se deben usar cimientos profundos que se apoyen en materiales adecuados por debajo de tales suelos susceptibles como protección contra estos problemas. Las fundaciones profundas también se deben usar donde se pueden obtener asentamientos por consolidación de cantidades inaceptables (NYSDOT, 2016).

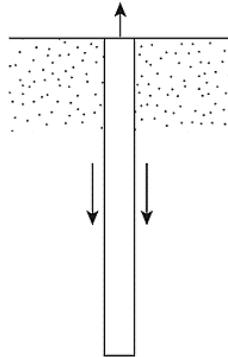
Las cimentaciones profundas tiene la funcionalidad de llevar las cargas provenientes desde la superestructura hasta los estratos de suelo competente, garantizando la estabilidad y sostenimiento de la estructura.

### 1.1. Clasificación de las cimentaciones profundas

Las pilas se pueden clasificar de la siguiente manera:

- Pila de fricción: Es una pila hincada cuya capacidad de soporte se deriva principalmente de la resistencia del suelo movilizado a lo largo de la superficie de la pila incrustada. También, una cimentación preexcavada o micropilote que transfiere fricción lateral del suelo.

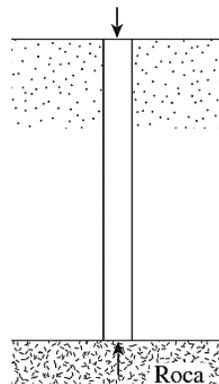
Figura 2. Pila de Fricción



Nota: Pila de fricción. Adaptado de “Fundamentos de ingeniería de Cimentaciones” por Das, B., 2012, p. 536

- Pila de soporte por punta: Es una pila hincada cuya capacidad de soporte sustenta su resistencia según el material de fundación, sobre el cual apoya la punta de la pila, dicha resistencia depende proporcionalmente al tamaño de la sección transversal de la pila. También se puede tratar de una cimentación preexcavada o micropilote, que basa su resistencia en el apoyo del extremo en suelo o en roca.

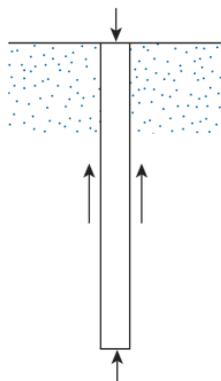
Figura 3. Pila de soporte por punta



Nota: Pila de soporte por punta. Adaptado de “Fundamentos de ingeniería de Cimentaciones” por Das, B., 2012, p. 536

- Combinación de fricción y soporte por punta: pila hincada que debe su capacidad a la contribución de la resistencia de la fricción movilizada a lo largo de la longitud de la pila incrustada y del apoyo de extremo desarrollado en la punta de la pila.

*Figura 4.* Pila de Soporte por Punta y por Fricción



*Nota:* Pila de soporte por punta y por fricción. Adaptado de “Fundamentos de ingeniería de Cimentaciones” por Das, B., 2012, p. 536

- Pila de prueba: Una pila, que se debe instalar verticalmente, designada para pruebas estáticas o dinámicas. Una pila de prueba puede ser una pila de soporte destinada a ser incorporada al sistema de cimentación.
- Pila inclinada: Una pila de fricción, apoyo extremo o pila combinada hincada en un ángulo con respecto de la vertical para proporcionar una mayor resistencia a las cargas laterales.

La mayoría de los puentes de pilares integrales se basan en pilotes de acero H. Sin embargo, se tiene más opciones en la elección del tipo de cimentación, incluyendo la pila prefabricada de concreto pretensado, pila de concreto reforzado, pila de tubería (pila de concreto encerrada en acero o pila de metal), pila de madera, pilotes hincados y caissons, entre otros (NYSDOT, 2016).

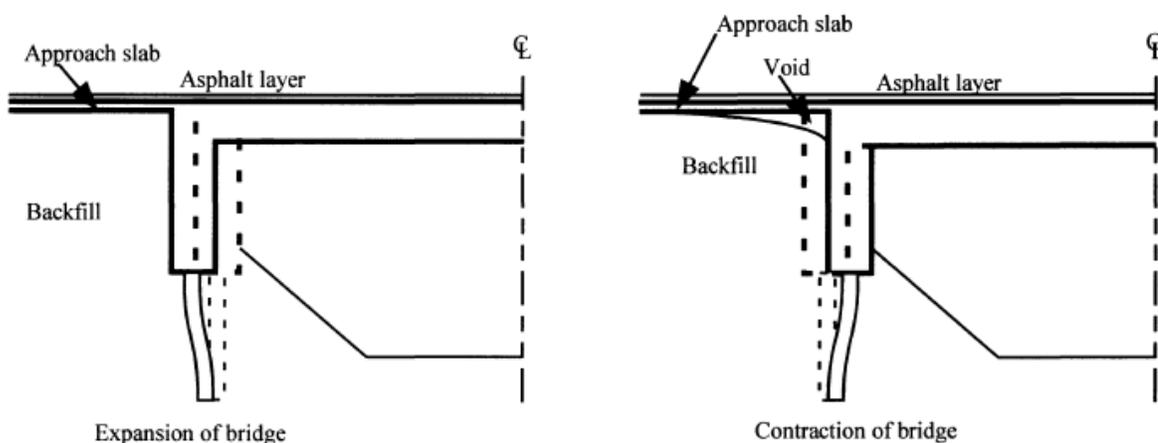
## **1.2. Cimentaciones profundas en puentes integrales**

La selección de algún tipo de cimentación profunda depende de las condiciones del subsuelo, estabilidad bajo carga vertical y horizontal, potencial de asentamiento, restricciones de instalación de pilotes, tipo de subestructura, comparación de costos, longitud de pila y cimentación presentado

por el Ingeniero Geotécnico, contrastado con el rendimiento del material y capacidad del sustrato de fundación (NYSDOT, 2016).

La preocupación de cuál es la capacidad que tiene la cimentación para resistir y transferir carga vertical existe ante la presencia de las diferentes cargas que afectan a la estructura. La capacidad de carga vertical de las pilas puede ser reducida por los movimientos asociados con la expansión o contracción térmica del puente, a medida que los puentes de estribos integrales se hacen más largos, los movimientos se hacen más grandes y potencialmente más perjudiciales para la capacidad de las pilas. En primer lugar, las tensiones de flexión inducidas por el movimiento en la cabeza de la pila, cuando se superponen a las tensiones axiales, podrían reducir la capacidad vertical, en segundo lugar, el movimiento lateral y vertical combinado de la pila podría interactuar para afectar el comportamiento del suelo, por ejemplo, la fricción y las fuerzas normales en la interface de suelo estructura, por último, la expansión en el puente podría inducir fuerzas adicionales en el sistema de pilotes que se añaden directamente a las fuerzas de gravedad (Greimann, 1986).

Figura 5. Expansión y Contracción del Puente Integral



*Nota:* Expansión y contracción del puente integral. Adaptado de “The Behavior of Integral Abutment Bridges” por Arsoy. S., Barker. R., and Duncan. M., 1999, p. 20

Por otro lado capacidad de las pilas para acomodar desplazamientos laterales es un factor significativo para determinar la longitud máxima posible de los puentes integrales. Para construir

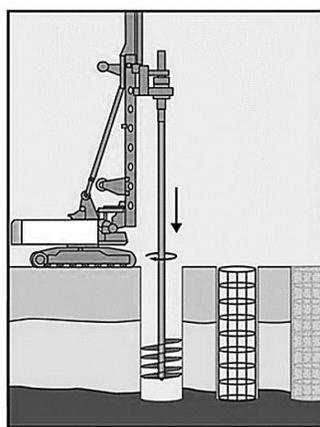
puentes integrales más largos, las tensiones de la pila deben mantenerse bajas. Además de la orientación de flexión de los ejes de eje débil, se pueden realizar disposiciones adicionales.

### 1.3. Tipos de cimentaciones profundas en puentes integrales

Se presentan a continuación los diferentes tipos de cimentaciones profundas utilizadas en puentes integrales:

**1.3.1. Cimentaciones preexcavadas.** Las cimentaciones preexcavadas son pilas de gran diámetro, para los cuales se requiere hacer perforaciones en el suelo, estos agujeros por lo general se extienden hasta el lecho rocoso para su apoyo, posteriormente se realiza el armado de acero tanto para el refuerzo transversal como para el longitudinal, este refuerzo suele ser en forma de jaula perimetral, axial y lateral, por último, se procede a fundir el hormigón. Si no se desecha, la formaleta se puede utilizar en la determinación de la resistencia de la pila, que puede aumentar significativamente su capacidad axial y lateral (NHDOT, 2015). Las cimentaciones preexcavadas se utilizan en condiciones especiales, ya que son alternativas costosas en comparación de cimentaciones profundas típicas, aunque las cimentaciones preexcavadas pueden resultar rentables cuando se puede usar un solo eje por columna en lugar de un grupo de pilotes con dado o cabezal de apoyo, especialmente cuando se requiere una ataguía o un apuntalamiento para construir el dado (NYSDOT, 2016).

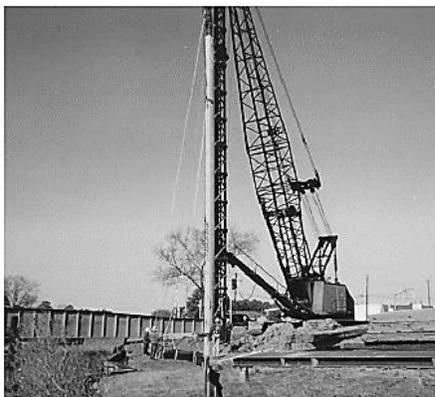
*Figura 6.* Proceso Constructivo de Cimentaciones Preexcavadas



*Nota:* Proceso Constructivo de Cimentaciones Preexcavadas. Adaptado de “Geotechnical Design Manual” por NYSDOT., 2016, p. 22

**1.3.2. Pilas de hormigón pretensado.** La gran industria del prefabricado ha impulsado la construcción de puentes integrales con pilas de hormigón pretensado, que tienen la ventaja de poseer un costo competitivo y un buen comportamiento ante la corrosión, su uso se ha implementado aun teniendo en cuenta la preocupación por la flexibilidad de las pilas en la concepción cimentaciones de puentes integrales y el comportamiento bajo tensiones de alta flexión, sin embargo, los estudios y ensayos realizados ponen en evidencia que la ductilidad de estos pilotes no parece la adecuada para resistir deformaciones reversibles impuestas, aunque, la última tendencia consiste en permitir la utilización de este tipo de pilotes pero limitando su uso dependiendo del intervalo de deformaciones horizontales que mantengan el pilote en su etapa de comportamiento elástico, por tanto, sólo podrán ser utilizados en puentes integrales de longitud muy moderada (Fomento, 2000). Las pilas prefabricadas de hormigón pretensado son octogonal, cuadradas o circulares en su sección transversal y están pretensadas para permitir longitudes de manipulación más largas y para resistir esfuerzos de transporte (NHDOT, 2015).

*Figura 7.* Pila de Concreto Presfrozado en Proceso de Hincado



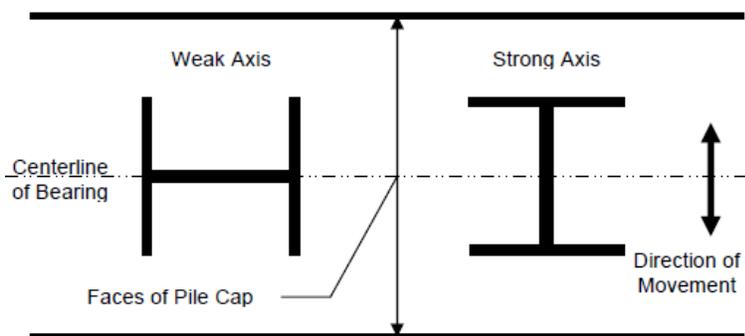
*Nota:* Pila de concreto presfrozado en proceso de hincado. Adaptado de “Steel Bridge Design Handbook: Substructure Design” por U.S. Department of Transportation., 2015, p. 15

**1.3.3. Pilas de acero H.** Las pilas de acero H son ideales donde hay capas duras que deben ser penetradas para alcanzar un estrato adecuado, donde pueden estar presentes rocas en el perfil del suelo o cuando se espera que las pilas alcancen la roca para el soporte final. Este tipo de pila son las más utilizadas en las cimentaciones profundas en puentes integrales, las cuales pueden actuar como pilas de fricción debido a su gran área de superficie. Las puntas de la pila suelen estar

protegidas con una punta de pila endurecida, además de ser relativamente fáciles de empalmar (NHDOT, 2015).

Las pilas de acero H pueden ser utilizadas orientándose sobre su eje débil o su eje fuerte con respecto al tránsito en el puente, la razón de ser orientada con respecto a su eje débil es que solo en las puntas de patín se producirán tensiones grandes, dejando el núcleo básico de la pila para la conducción de carga vertical, por otro lado, el uso con respecto a su eje fuerte se debe a que así son capaces de resistir el pandeo del alma. La carga muerta viva, de impacto y de largo plazo en los vanos finales causa momento en la cabeza de la pila, convirtiendo la orientación de la pila en una limitante para la longitud del puente, que pueden variar dependiendo de las disposiciones de los diferentes códigos (Dunker, 2007). Las orientaciones del perfil de la pila ayudan a equilibrar las tensiones en la superestructuras pero la condición de orientación adecuada es propia de la situación específica de cada puente (Huang, 2008), ya que al final su comportamiento plástico depende de la esbeltez de las alas de perfil, de tal manera, este se comportara de forma similar desde cualquier orientación (Fomento, 2000).

Figura 8. Orientación de Pilas de acero H

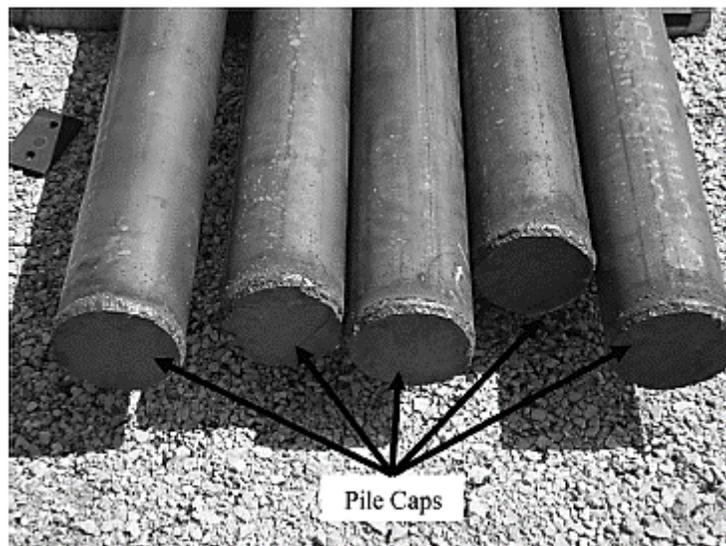


*Nota:* Orientación de pilas de acero H. Adaptado de “Integral Abutment Bridge Design Guidelines” por VTrans Structures Sections., 2009, p. 35

**1.3.4. Pilas de tubos de acero.** Las pilas de tubos de acero son utilizadas con su extremo abierto o cerrado, las pilas cerradas poseen una placa o una punta endurecida de forma cónica. Se usan pilas de tuberías donde se deben resistir tanto las fuerzas laterales como las transversales, ya que sus propiedades de resistencia son uniformes en todas las direcciones de carga. Las pilas de tubos cerrados por lo general están llenas con acero de refuerzo y hormigón, las capas duras de un

suelo, o los cantos rodados presentes, a su vez, pueden dificultar las condiciones de instalación para este tipo de pilas. Teniendo en cuenta su gran área superficial, las pilas de tuberías pueden actuar como pilas de fricción (NHDOT, 2015).

*Figura 9.* Pilas de Tubos de Acero



*Nota:* Pilas de tubos en acero. Adaptado de “Long-Term Behavior of Integral Abutment Bridges” por Frosch, R. & Lovell, M., 2011, p. 49

Los perfiles tubulares de acero rellenos de hormigón son elementos estructurales que proporcionan altas prestaciones estructurales, sus grandes ventajas se deben principalmente a la acción mixta que existe entre el hormigón y el acero, por una parte, el confinamiento del hormigón proporcionado por el perfil metálico induce un estado triaxial de tensiones al núcleo, por otra, el hormigón evita que el perfil de acero presente pandeo local hacia el interior de el mismo, incrementándose así la resistencia del conjunto (Chacon, 2012).

Debido a que las pilas de acero rellenas de concreto no son tan flexibles a comparación con las pilas de acero en H, estas se han limitado con longitudes de puentes máximas más cortas (Dunker, 2007).

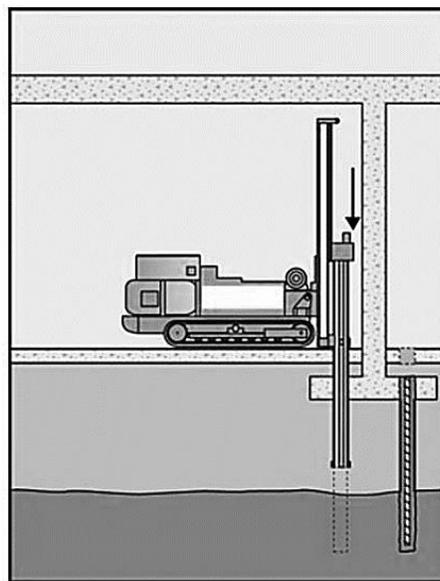
**1.3.5. Pilas de madera.** En la actualidad el tipo de pila de madera es usado con fines constructivos, ya sea con pilas de madera tratado o no tratada, dependiendo de la presencia del nivel freático (NHDOT, 2015). Existen muy pocos lugares donde se permite el uso de dicha pila,

además de contar con la limitante de uso para puentes de luces cortas, aunque es cierto que estructuras más antiguas de puentes integrales fueron sustentadas con este tipo de cimentación (Dunker, 2007).

**1.3.6. Combinación de pila de acero h y pila preexcavada.** Esta solución de pila toma importancia cuando las estructuras cercanas a la construcción del puente son sensibles a la vibración generadas por los martillos utilizados para conducir las pilas, o existen problemas en el proceso de hincado por las condiciones del suelo, como comúnmente se presenta para pilas de acero H, hay una opción innovadora la cual dispone en la parte superior de la cimentación pilas de acero H, y en la punta de la pila de acero H se empotra en cimentaciones preexcavadas fundidas in situ, ya sea de longitud total o parcial. Este sistema de cimentación híbrida, se ha denominado pila apuñalada, y proporciona la flexibilidad necesaria para los pilares integrales, y al mismo tiempo evitar cualquier problema asociado con el hincado de pilas (Dunker, 2007).

**1.3.7. Micropilotes.** Los micropilotes se conforman dentro de agujeros perforados de pequeño diámetro que por lo general se extienden en el lecho rocoso para su apoyo, poseen armadura de acero de refuerzo y hormigón. El refuerzo generalmente consta de una barra de acero centralizada, que proporciona una capacidad axial significativa, pero una capacidad lateral limitada en flexión. Los micropilotes pueden ser encofrados o no, y pueden ser hincados. Si no se desecha, la carcasa puede usarse en la determinación de resistencia del micropilote, que aumenta la capacidad axial y lateral. Los micropilotes se utilizan para condiciones especializadas, por lo que su uso es muy poco frecuente (NHDOT, 2015).

Figura 10. Construcción Típica de Micropilotes



*Nota:* Construcción típica de micropilotes. Adaptado de “Geotechnical Design Manual” por NYSDOT., 2016, p. 23

**1.3.8. Caissons.** Los caissons se instalan mediante la remoción de suelos y rocas utilizando métodos de perforación u otras técnicas de excavación y construcción del elemento de cimentación en el agujero excavado. El agujero excavado puede ser soportado usando una formaleta temporal o permanente, un lodo de perforación u otros métodos. El agujero se llena entonces con una jaula de refuerzo y hormigón fundidos in situ. Los caissons son elementos no desplazables, ya que el volumen del suelo requerido para el elemento se retira físicamente antes de la instalación, por lo tanto, la tensión normal efectiva adyacente a la pila permanece sin cambios o se reduce (debido a la expansión del suelo dentro del agujero antes de la inserción o construcción del elemento de soporte de carga) y las propiedades del suelo y la presión del agua de poro adyacente a los elementos de cimentación no son significativas.

Debido a que los caissons no requieren un martillo para la instalación y no desplazan el suelo, típicamente tiene un impacto mucho menor en las estructuras adyacentes. Dependiendo de la técnica de excavación utilizada, pueden penetrar obstrucciones considerables. Gracias a que el método de construcción a menudo permite una disminución de la tensión efectiva inmediatamente

adyacente y por debajo de la punta del elemento de cimentación, la resistencia desarrollada será a menudo menor que una pila hincada de tamaño equivalente (NHDOT, 2015).

## **2. Análisis y diseño de cimentaciones profundas en puentes integrales**

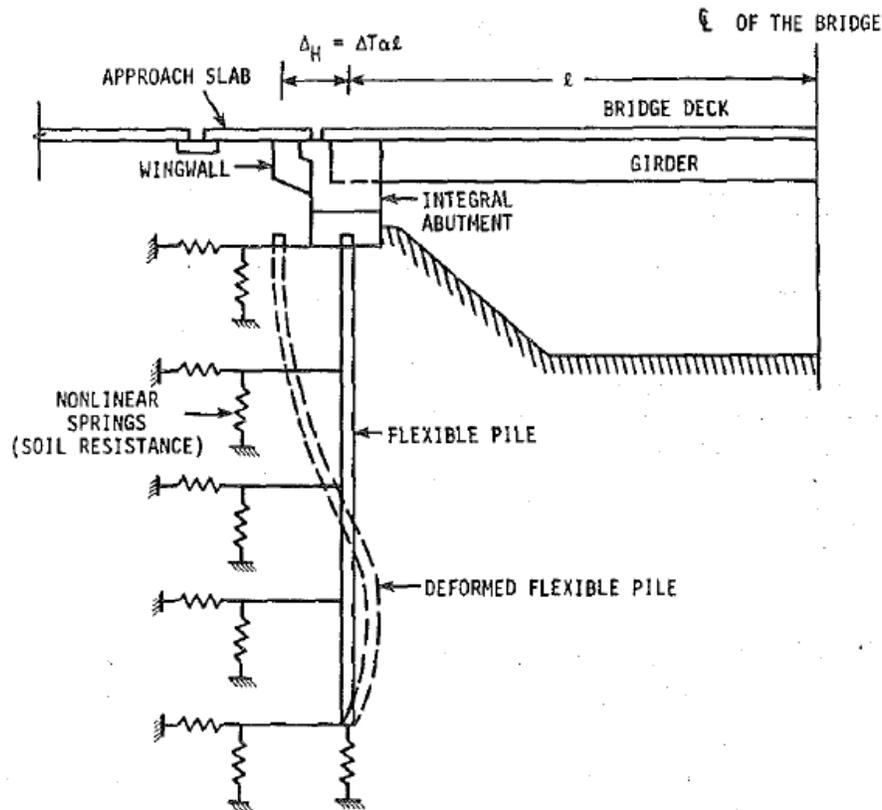
Debido a la interacción suelo-estructura, los métodos de diseño para uso práctico se vuelven demasiado complejos si se consideran todas las variables y condiciones posibles, con la complejidad también hay una pérdida de comprensión de los efectos esas mismas variables y condiciones. La experiencia y las variaciones en los resultados reales de las pruebas demuestran que un alto grado de precisión por lo general no es justificado. Por lo tanto, es una buena práctica seleccionar y considerar las variables y condiciones en el análisis estructural que representan la mayor importancia, como la resistencia y rigidez de la cimentación, la conexión a la superestructura y la resistencia y rigidez de la superestructura cerca del pilar. En muchos casos, los muros de ala, el pavimento de aproximación, las juntas de pavimento de aproximación y el relleno para reducir la presión pasiva se consideran para el detallado o en casos de diseño independientes. En general, los métodos de análisis y diseño disponibles en este momento se basan en principios estructurales y se han comprobado mediante pruebas e investigaciones (Dunker, 2007).

### **2.1. Interacción suelo estructura**

Los movimientos horizontales de la superestructura inducen deformaciones en la infraestructura, llevando a una compleja interacción con el suelo. Debido a esta interacción, pueden surgir problemas geotécnicos que pueden comprometer el comportamiento de servicio del puente y los terraplenes de aproximación. Un fenómeno conocido como colisión en el extremo del puente (un asentamiento diferencial que aparece entre el estribo y el suelo) se encuentra en puentes integrales vulnerados al alcanzar el estado de tensión activa durante la contracción de la cubierta, por otro lado, la expansión de la plataforma conduce a un aumento de la presión lateral de la tierra. Con la carga cíclica del suelo, se produce un fenómeno conocido como trinquete detrás del pilar, lo que corresponde a un aumento de la presión lateral de la tierra, en cada ciclo de desplazamiento, debido a la compactación irreversible del suelo (Fartaria, 2010).

La interacción suelo estructura se realiza por medio del uso de los elementos finitos, con los cuales se permiten una idealización unidimensional de la pila y de los resortes no lineales para el suelo. Los parámetros importantes para el análisis son las características de la pila y del suelo por medio de elementos tipo viga-columna (Frame) que se modelan como voladizos o columnas equivalentes (Dunker, 2007), con no linealidades geométricas, materiales, características del suelo y con el uso de las curvas p-y, f-z y q-z (Greimann, 1986).

Figura 11. Interacción Suelo-Estructura en Puesto Integral



*Nota:* Interacción suelo-estructura en puente integral. Adaptado de “Nonlinear Analysis of Integral Abutment Bridges” por Greimann, L., Yang, P., & Wolde-Tinsae, A., 1986, p. 2

Las curvas P-y son una forma de resortes no lineales de Winkler que se supone que son adecuados para capturar complicadas interacciones suelo-estructura (Civjan, 2013). Las curvas p-y representan la relación entre la presión lateral del suelo contra la pila y el correspondiente desplazamiento lateral de la pila. Se supone que tienen la misma respuesta en tensión y compresión porque las pilas tienen resistencias similares cuando se mueven a una distancia igual en cualquier

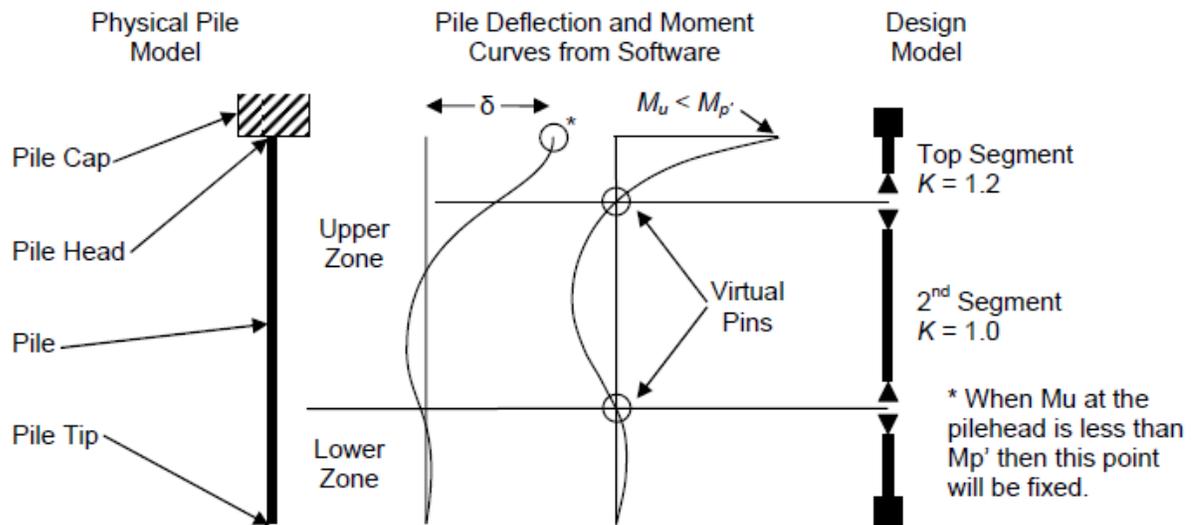
dirección. Las curvas f-z describieron la relación entre la fricción de la piel y el desplazamiento vertical relativo entre las pilas y el suelo circundante. Las curvas q-z describieron la relación entre la tensión del rodamiento en la punta de la pila y el asentamiento de punta (Huang, 2008)

## **2.2. Diseño de cimentaciones profundas en puentes integrales**

Las reglas de diseño varían considerablemente dependiendo de los diferentes códigos que contemplan la tipología de puente integral, que por lo general imponen arbitrariamente límites conservadores ya que los conceptos de diseño no siempre corresponden a los movimientos y deformaciones (Civjan, 2013). Lo que es interesante es que al momento de revisar los diferentes puntos de vista, como los resultados de pruebas de carga lateral, análisis de fatiga de bajo ciclo y análisis de ductilidad, proponen límites de longitud de puente muy similares aunque fluctuaciones en el clima y material de la superestructura establecen la cantidad de movimiento, movimiento que obviamente tiene un efecto sobre la longitud máxima del puente: además de la longitud del puente, se estandarizan parámetros de diseño como esviaje, radio de curvatura, y tipos de pilas a utilizar, límite de elasticidad de las pilas, entre otro, dentro de un orden de magnitudes similar (Dunker, 2007).

La pila puede dividirse en dos zonas primarias de diseño partiendo del hecho que la pila se deforma en doble curvatura al interactuar con las cargas a las que se ve solicitado el puente, la zona superior se somete a flexión y cargas axiales. La zona inferior sólo se somete a cargas axiales ya que las cargas de flexión se han resistido completamente en la zona superior. La pila está completamente apoyada por el suelo circundante. Cuando la zona superior experimenta muy poco daño debido a la conducción, la zona inferior puede resultar dañada hasta cierto punto, especialmente si es conducida hasta el lecho rocoso.

Figura 12. Modelo de Diseño de Pila



*Nota:* Modelo de diseño de pila. Adaptado de "Integral Abutment Bridge Design Guidelines" por VTrans Structures Sections., 2009, p. 37

En la zona superior, puede formarse una rotula plástica en el punto de la cabeza de pila, esto se debe a que la pila se desplaza horizontalmente o gira debido a cargas térmicas, muertas, vivas, o varias combinaciones de las solicitaciones. Una rotula plástica es una condición límite aceptable para el diseño de la pila, para diseñar una pila con una rotula plástica se supone que la pila está fijada con un momento constante en la cabeza de la pila y fijada en el punto del primer momento cero (0), este es el primer segmento para analizar, el segundo segmento estará entre los dos puntos de momento cero (0). El segmento que controla la fuerza axial se utiliza para determinar el tamaño de pila a suministrar en el diseño (Greimann, 1986).

Tradicionalmente, la carga de carga dinámica no se considera en el diseño de cimientos, sin embargo, para las pilas de pilares integrales, se puede argumentar que la carga dinámica debe ser considerada en el diseño de la parte superior de la pila. La razón de este requisito es que las pilas están unidas a la superestructura, por lo tanto, las porciones superiores de las pilas no se benefician del efecto amortiguador del suelo (Garder, 2012).

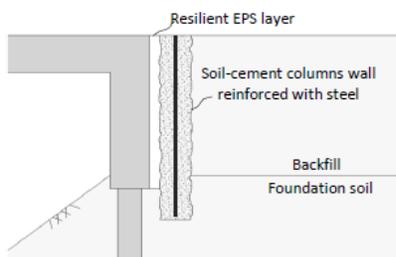
### 3. Nuevas alternativas aplicadas a cimentaciones profundas de puentes integrales

#### 3.1. Estabilizaciones del relleno

Esta alternativa se opta con el fin de buscar la disminución de las presiones en el estribo, lo cual se traduce en solicitaciones más bajas en la cabeza de las cimentaciones profundas. Teniendo en cuenta lo observado en puentes integrales con respecto a la interacción suelo-estructura, se entiende que se debe permitir que el tablero y el estribo se muevan libremente con las variaciones de temperatura estacionales para evitar la aparición de fuerzas inducidas térmicamente; el suelo retenido debe permanecer fijo espacial y temporalmente para evitar su asentamiento; el movimiento estacional relativo entre un puente y el suelo retenido debe acomodarse de manera ordenada y predecible a través de un elemento con función conjunta; además de tenerse en cuenta el aumento estacional en la presión lateral de la tierra debido al comportamiento de trinquete del suelo.

Las limitaciones descritas anteriormente se pueden superar utilizando materiales geosintéticos que permiten la construcción de puentes integrales más largos o reducir la demanda de presiones entre el suelo y la infraestructura. La mitigación de los fenómenos descritos es posible a través de la estabilización del suelo retenido y el uso de un elemento elástico detrás del estribo, que acomodará los movimientos cíclicos. Una solución de estabilización es mediante el uso de columnas de suelo-cemento, ejecutadas con la técnica de inyección de chorro y una capa de EPS resiliente (geofom de poliestireno expandido) (Fartaria, 2010).

*Figura 13.* Propuesta de estabilización del Relleno



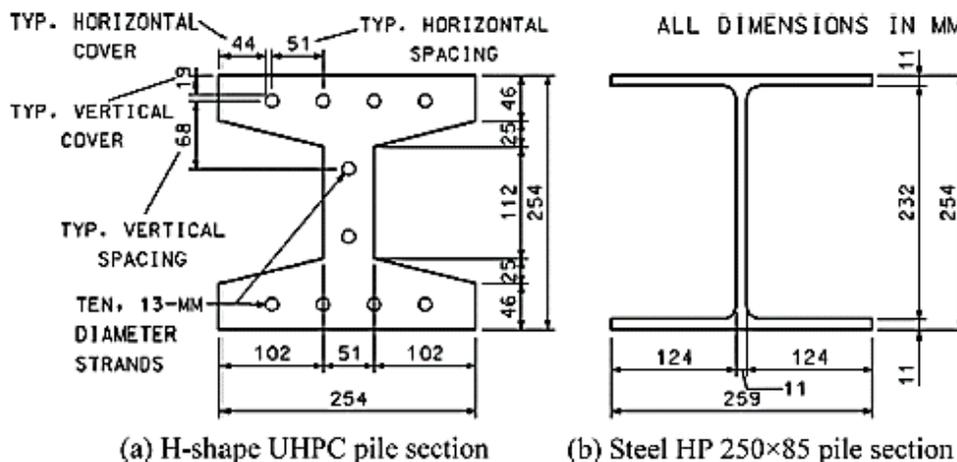
*Nota:* Propuesta de estabilización del relleno. Adaptado de “Soil-Structure Interaction in Integral Abutment Bridges” por Fartaria, C., 1986, p. 2

### 3.2. Pilas UHPC

Debido al costo y a la dificultad de mantener las infraestructuras de puentes, se necesitan soluciones creativas para extender la vida útil de los sistemas estructurales utilizando materiales existentes y nuevos de manera más eficiente. La alta resistencia disponible cuando se utiliza el Concreto Ultra Alto Rendimiento (UHPC) permite un diseño reducido de la sección transversal y un uso más eficiente del material. Además, la durabilidad de UHPC también indica la posibilidad de reducir drásticamente o eliminar el deterioro asociado con las pilas de uso común para las fundaciones de puentes.

Existen diferentes tipos de pilas usadas para soportar las cargas a las que se ve sometida los puentes integrales, a grosso modo se encuentran las pilas de concreto, acero, madera y sección compuesta, que luego se dividen en otras tipologías. La cimentación profunda más utilizada para cimentar puentes con estribos integrales son las pilas de acero H y las pilas prefabricadas de hormigón pretensado, las cuales poseen ciertas limitaciones cuando se trata de durabilidad y manejabilidad. La aplicación de hormigón de alta rendimiento (UHPC) pretende tomar las bondades de este material para sacarle su mayor provecho contrastando las limitaciones de los demás tipos de estructuras de cimentación.

Figura 14. Sección Transversal de Pila UHPC en Comparación a una Pila de Acero H



Nota: Sección transversal de pila UHPC en comparación a una pila de acero H. adaptado de “Investigation of ultra high performance concrete piles for integral abutment bridges” por Ng a, K., Garder, J., & Sritharan, S., 2015, p. 2

El hormigón de alto rendimiento (UHPC) es una matriz de cemento utilizada con frecuencia con acero Fibras con una resistencia a la compresión que varía de 22 ksi a 36 ksi. UHPC tiene varias ventajas incluyendo la fuerza, la ductilidad, la durabilidad, y la flexibilidad estética del diseño, que fueron alcanzadas eliminando las falencias características del concreto normal. La naturaleza apretada del diseño de la mezcla da a UHPC sus características excelentes de la durabilidad. Como resultado de la baja relación agua-aglutinante, la porosidad capilar de un espécimen UHPC no agrietado es mucho menor que la del hormigón normal o del hormigón de alto rendimiento y también tiene el beneficio de una permeabilidad a los cloruros reducida. Debido a que UHPC es un material muy duradero, el grosor de la capa de concreto requerido para el refuerzo de acero se reduce típicamente, permitiendo una reducción adicional en el tamaño de la sección, lo que resulta en un uso eficiente del material. Un beneficio adicional resultante de la durabilidad del material es su potencial para prolongar la vida útil de los puentes y reducir los costos de mantenimiento (Wassef, 2003).

## CONCLUSIONES

- El estado del arte sobre las cimentaciones profundas en puentes integrales brinda una visión amplia sobre los conocimientos de este tipo de estructuras, sus diferentes tipologías, ventajas y desventajas que poseen, implicaciones de análisis y diseño, además de las nuevas tendencias sobre el desarrollo tecnológico de cimentaciones profundas.
- La tipología de puentes integrales por defecto debe convertirse en la primera alternativa ante la evaluación de este tipo de proyectos infraestructura.
- Los cambios de temperatura afecta directamente los estados de esfuerzos en puentes integrales, desde la superestructura hasta la cimentación, tomando un papel importante en el análisis y diseño de puentes integrales.
- Existen variedades de cimentaciones profundas para los puentes con estribos integrales, los cuales presentan sus ventajas y desventajas a los diseñadores para optar por la solución más adecuada para cada proyecto.
- A pesar de no contar con metodologías de análisis y diseño estandarizadas de puentes integrales, los diferentes códigos y autores que estudian estas estructuras cuentan con similitudes en sus recomendaciones, las diferencias entre uno y otro van de la mano con la diversidad de situaciones particulares propias de las condiciones locales de cada lugar.
- La interacción suelo estructura es un componente esencial en el análisis y diseño de puentes con estribos integrales.
- La inventiva de los profesionales e investigadores promueven el desarrollo de nuevas tecnologías en materiales y alternativas para aplicar a futuro en el análisis, diseño y construcción de las cimentaciones profundas en puentes integrales.

### Referencias Bibliográficas

- Chacon, R. (2012). *Capacidad resistente de pilas metálicas tubulares circulares rellenas de hormigon (CFT) en puentes integrales*. Barcelona: Informes de la Contruccion. doi:10.3989/ic.11.098
- Civjan, S. A. (2013). Observed integral abutment bridge substructure response. *ELSEVIER*.
- Dunker, K. F. (2007). *Foundations For Integral Abutments*. ASCE.
- Fartaria, C. (2010). *Soil-Structure Interaction in Integral Abutment Bridges*. Lisbon: Department of Civil Engineering, Architecture and GeoResources, Instituto Superior Técnico.
- Fomento, M. d. (2000). *Guia Para la Concepcion de Puentes Integrales de Carreteras*. Madrid: Centro de Publicaciones .
- Garder, J. A. (2012). Use of UHPC piles in integral abutment bridges. Amen, Iowa, United States: Iowa State University.
- Gentela, S. R. (2013). Influence of Soil-Strcuture Interaction on Seismic Design of Reinforced Concrete Intregal Bridges. India: Springer . doi:10.1007/978-81-322-0757-3\_48
- Greimann, L. f. (1986). NONLINEAR ANALYSIS OF INTEGRAL ABUTMENT BRIDGES. *Journal of Structural Engineering*.
- Huang, J. (2008). Parametric Study of Concrete Integral Abutment Bridges. *Journal of Structural Engineering*.

- Masrilayanti, M. (2012). Integral Bridge: A Review on Its Behaviour under Earthquake Loads. *Bridge Maintenance, Safety, Management, Resilience and Sustainability – Biondini & Frangopol*, 1- 5.
- Muñoz, F. M. (2012). Estudio Sobre la Redundancia Estructural de Puentes Integrales de Hormigon. *Tesis de Especialidad*. Universidad Politecnica de Catalunya, Barcelona.
- NHDOT, D. o. (2015). *Bridge Design Manual*. New Hampshire.
- NYSDOT. (2016). *GEOTECHNICAL DESIGN MANUAL*. New York.
- Ooi, P. S. (2010). Field Behavior of an Integral Abutment Bridge Supported on Drilled Shafts. *JOURNAL OF BRIDGE ENGINEERING*.
- Rhodes, S. (2015). *Integral Bridges and the Modelling of Soil-Struture Modeling*. LUSAS.
- VTrans, I. A. (2008). *Integral Abutment Bridge Design Guidelines*. Montpelier, Vermont: VTrans, Structures Section.
- Wassef, W. G. (2003). *Comprehensive Design Example for Prestressed Concrete (PSC) Girder Superstructure Bridge with Commentary (in US Customary Units)*. Modjeski and Masters, Inc.