



IX CONGRESSO BRASILEIRO DE PONTES E ESTRUTURAS
18 a 20 de maio, 2016 - Everest Rio Hotel

Apeo de un puente arco de piedra del siglo XVII en Lima, Perú

José Luis Sánchez Jiménez¹, João Luis Casagrande²

¹Técnica y Proyectos S.A. (Tynpsa) / Director Estructuras/ jlsanchez@tynpsa.es

²Casagrande Engenharia / Diretor / jlcasgrande@cagen.com.br

Resumen

Para aliviar la fuertemente congestionada área central de Lima (Perú), se desarrolla en régimen de concesión la Línea Amarilla, una autopista urbana de 10 km de longitud total que incluye 13 viaductos y un túnel de 1.8 km bajo el cauce del río Rímac que se construye en el período de estiaje (mayo a noviembre). Debe cruzar bajo el Puente de Trujillo, un puente arco de piedra del siglo XVII con luces de 10 m y ancho de pilas de 6 m. Se emplea un sistema de apeo provisional mediante micropilotes de 170 mm de diámetro para dos de las cuatro pilas existentes, cada una con un peso de 3000 t. Un sistema de heavy-lifting con 37 gatos hidráulicos de 400 toneladas cada uno, sincronizados entre sí, soportan la carga y corrigen los asientos de las pilas. El apoyo de cada pila se consigue a través de seis vigas pretensadas transversales, excavadas manualmente en la cimentación del puente. Para controlar el riesgo de la aparición de un sismo durante los cuatro meses de la ejecución, se ha dispuesto un sistema temporal de arriostamiento y ha condicionado el diseño de la operación. También es preciso controlar la inestabilidad por pandeo de los micropilotes esbeltos, para lo que se disponen elementos de atado según progresa la excavación. Se ha conseguido mantener por debajo de los 5 mm el asiento máximo en cualquiera de las pilas, menor a las distorsiones máximas fijadas como admisibles para el control de los daños en el puente histórico, que no ha sufrido daños. El asiento acumulado ha quedado compensado y corregido por la acción de los gatos hidráulicos. El puente ha quedado finalmente apoyado sobre la estructura del túnel de hormigón armado, al que se le dota de *shear-walls* para garantizar un comportamiento rígido en eventos sísmicos.

Palabras-clave

Puente histórico; *heavy-lifting*; apeo; micropilote; asiento; sismicidad.

Introducción

El crecimiento sostenido de las grandes ciudades y las demandas de infraestructuras que ofrezcan capacidad para los nuevos volúmenes de tráfico para el transporte público y privado exigen intervenciones que afectan a la trama urbana consolidada. Cuando las actuaciones se sitúan en el entorno de los centros históricos, no es infrecuente encontrarse interferencias con elementos del patrimonio histórico y cultural que debe ser respetado. Su valor es un intangible que no puede, salvo casos muy particulares, compensarse; la estrategia más frecuente será la de evitar la afección a las construcciones con valor histórico o cultural. Si habitualmente dentro de esta categoría se incluyen edificios, es preciso incorporar también a puentes que forman parte de nuestro capital cultural, elementos imprescindibles para entender la historia y evolución de las ciudades y redes de comunicación.

Este es el caso del Puente de Trujillo en Lima (Perú), puente de arcos de piedra del siglo XVII. Una nueva vía de alta capacidad que debe aliviar la fuertemente congestionada zona a



IX CONGRESSO BRASILEIRO DE PONTES E ESTRUTURAS
18 a 20 de maio, 2016 - Everest Rio Hotel

Lo largo del río Rímac está siendo desarrollada en régimen de concesión por Línea Amarilla SAC (LAMSAC), una empresa de INVEPAR Vías. Tiene una longitud total de 9 km y cuenta con diez viaductos; en el tramo que cruza frente al centro histórico del ciudad, declarado Patrimonio Histórico de la ciudad, se exige que la infraestructura sea subterránea para no aumentar la afección paisajística en un tramo de 1,8 km. Esto conduce al proyecto de un túnel construido como *cut & cover* a lo largo del cauce del río Rímac, por debajo de éste. Para que la construcción sea viable mediante esta metodología constructiva, la construcción se limita al período de estiaje del río entre los meses de abril y diciembre.



Figura 1. Puente de Trujillo en Lima (Perú)

En el tramo en túnel bajo el cauce del río Rímac es preciso resolver el cruce de cuatro puentes existentes, dos de los cuales tienen valor histórico, el puente de Balta y el puente de Trujillo. En esta comunicación se detallarán los condicionantes, soluciones adoptadas y procedimientos constructivos desarrollados para la construcción del túnel bajo el puente de Trujillo, el que presenta un importante reto.

Descripción del puente histórico de Trujillo

El puente de piedra, más tarde conocido como puente de Trujillo, data de 1610. El constructor Juan del Corral recibe el encargo de su diseño y ejecución para sustituir a anteriores vados y puentes de madera. Resolvía definitivamente la conexión permanente para el cruce del río Rímac, hasta el momento interrumpida en época de crecidas y por el deterioro causado por las pesadas carretas de la creciente actividad comercial de la ciudad, que cumplía 75 años desde su fundación.

Inicialmente constaba de 8 pilas y 7 arcos de piedra, de los que sólo se conservan 4 arcos. Las proporciones son clásicas, con arcos de unos 10 m de luz con pilas masivas de unos 6 m. El ancho de la plataforma del puente era inicialmente de 9,6 m, que se completa con tajamares en punta y tambores semicirculares en las pilas, que le aportan una apariencia sólida. Cada pila transmite una carga a su cimentación de aproximadamente 3000 t. Los arcos y



IX CONGRESSO BRASILEIRO DE PONTES E ESTRUTURAS
18 a 20 de maio, 2016 - Everest Rio Hotel

paramentos resistentes están formados por piedras labradas de 1,6 m de espesor; el relleno de las pilas y entre tímpanos es un hormigón con piedras del río y morteros de cal. El cimiento original profundizó unos 4 m para garantizar un apoyo sobre las gravas rígidas que constituyen el sustrato en la región de Lima, operación que pudo hacerse en seco durante el estiaje del río.

Desafortunadamente, el puente original ha sufrido a lo largo de su historia pasada y reciente importantes afecciones. No sólo en lo más evidente, como la pérdida de tres arcos y su prolongación poco afortunada con tableros modernos, sino en reparaciones en las que se ha sustituido algunas piedras perdidas por ladrillo y ocultado bajo un enfoscado de cemento que los oculta. La plataforma se amplió con una estructura metálica vista. En la actualidad el uso del puente es peatonal para acceso al centro histórico, con acceso vehicular restringido a servicios de emergencia.

El cruce del túnel de Línea Amarilla bajo el puente de Trujillo, una vez ajustado el trazado para minimizar al máximo la afección, afecta a dos pilas (P2 y P3) que deben apearse, y la contención lateral de otras dos (P1 y P4) por la excavación de unos 10 m necesarios para la construcción del túnel. En cota, la coronación de la nueva infraestructura prácticamente coincide con la base del cimiento del puente histórico.

Principales condicionantes. Criterios de daño al puente histórico

La ciudad de Lima se asienta sobre terrazas aluviales cuaternarias de espesores cercanos a los 400 m. Se trata de formaciones con suelos granulares gruesos, con intercalaciones de materiales relativamente permeables con predominio de bolos y gravas gruesas, con capas lenticulares arcillosas de reducido espesor. Este tipo de materiales aporta mayor rigidez y resistencia que los suelos granulares arenosos. Su caracterización geomecánica no responde a las ecuaciones de Mohr - Coulomb, porque el efecto de la dilatancia y la energía de acomodación de las partículas es de gran importancia. El nivel freático en esta zona está a unos 70 m de profundidad.

Como es conocido, la región es de alto riesgo por sismicidad elevada, asociada a la fricción entre las placas de Nazca y Sudamericana. En la zona de Lima, epicentros cercanos han dado lugar a destructivos terremotos históricos con magnitudes entre 8 y 9. Para el proyecto se ha asumido un nivel de riesgo correspondiente a un período de retorno de 1000 años, para el que se ha asignado un valor de PGA de $0,53 \cdot g$.

Finalmente, el principal condicionante que determina la solución adoptada y el procedimiento de ejecución es la necesidad de preservar sin daños la estructura histórica del puente de piedra. Además es preciso recalcar el grado de alteración importante que ha experimentado a lo largo del tiempo, que puede inducir respuestas más heterogéneas de lo que inicialmente se pudiera prever. Los criterios de limitación de daño se asignan, por esta razón, con criterios conservadores.

Para establecer los límites de desplazamientos asumibles por la estructura existente se ha empleado el criterio propuesto por Boscardin & Cording, en donde se establece un criterio de daño en base a términos de extensión y distorsión angular.

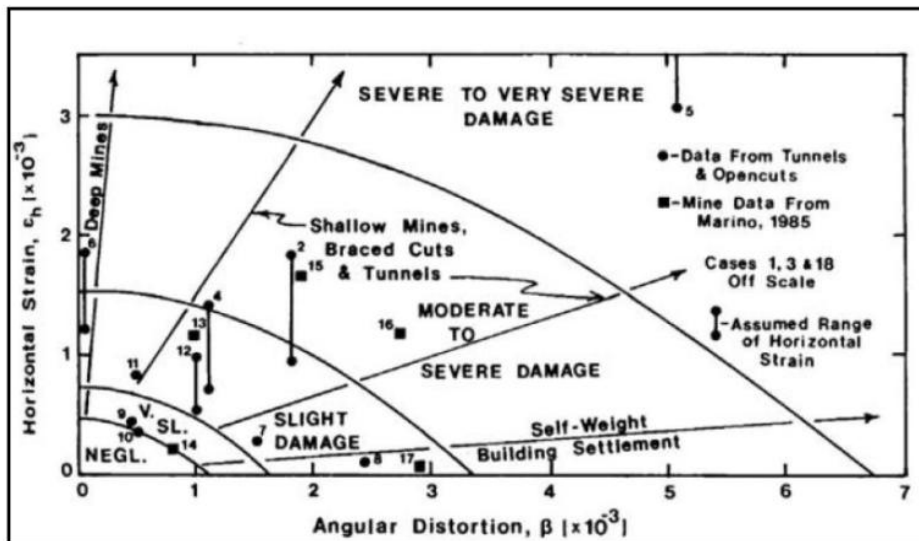


Figura 2. Niveles de daño según Boscardin & Cording

Para este caso se propone como criterio de control la categoría de *slight damage* como la máxima asumible; equivale a que posibles desperfectos locales fácilmente reparables. En base a la anterior formulación, y considerando movimiento monolítico de cada pila y sin giro desde su base, se obtiene como límite un máximo asiento de una pila respecto a las vecinas de 14mm. Las operaciones del apeo que a continuación se describen se diseñan para mantener la distorsión máxima dentro de la categoría *negligible damage*, con asiento relativo menor a 9 mm, para mantener un margen de seguridad en toda el proceso respecto a los límites marcados.

Descripción de la solución adoptada

El cruce del túnel bajo el Puente de Trujillo conlleva que dos pilas del puente histórico quedan encima de la cubierta de la nueva estructura (P2 y P3), y dos pilas quedan cargando sobre el trasdós de los muros laterales, requiriendo contenciones laterales para la excavación.

La sección del túnel se proyecta con elementos de hormigón ejecutado in situ, con una sección rectangular bicelular al que se añade un espacio lateral para alojar muros en dirección transversal que actúen como *shear walls* frente a las acciones sísmicas asociadas tanto al empuje de tierras como a las fuerzas inerciales correspondientes a la masa del puente de piedra apoyado en la cubierta.

Las principales dimensiones de los elementos estructurales son: losa de cimentación con espesor de 1,50 m que se recrece bajo los tres muros centrales hasta los 3,00 m; muros laterales con espesor de 0,80 m y 1,00 m; losa de cubierta con espesor de 1,50 m que se recrece en la unión con los muros hasta los 2,50 m. En total el módulo tiene 30 m en dirección longitudinal y 40 m en dirección transversal, con 5,5 m de altura interior libre.

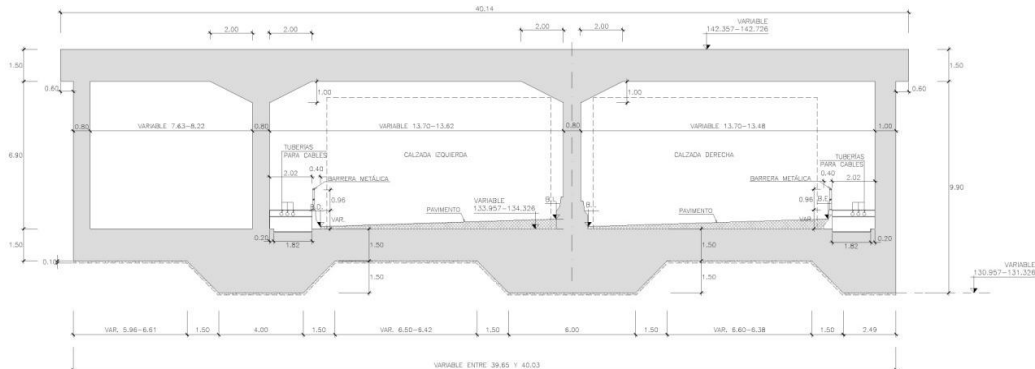


Figura 3. Sección transversal del túnel bajo el Puente de Trujillo

El proceso constructivo del túnel, condicionado por las restricciones de movimiento en el puente histórico, debe desarrollarse con soluciones de apeo activas, que permitan la compensación de los asentos previstos o inesperados que se pudieran producir durante la excavación. El sistema utilizado consiste en la utilización de un sistema de cilindros hidráulicos sincronizados a través de una centralita automatizada, que permiten levantar la carga de las pilas. Los cilindros hidráulicos se apoyan en micropilotes ejecutados con maquinaria de gálibo reducido, que transfieren la carga a niveles por debajo del nivel de excavación previsto. Una vez apeadas las pilas, puede realizarse la excavación y construir el módulo del túnel, sobre el que finalmente se dejará apoyado el puente histórico, manteniendo en todo momento un control exhaustivo de los movimientos para su eventual corrección.

El proceso desarrollado incluye las siguientes fases.

1. Ejecución de pantallas de micropilotes para contención lateral de las pilas 1 y 4 del puente histórico. Según se avance en la excavación, se ejecutarán cada 3,0 m niveles de anclajes activos tesados a 300 kN cada 1,5 m, para controlar los asentos y desplazamientos que afectarían a las pilas del puente histórico. Los micropilotes son de 300 mm de diámetro de perforación, con tubo metálico interior de 178 mm de diámetro y 9 mm de espesor. En total se disponen 77 micropilotes para configurar el recinto lateral de la excavación.



Figura 4. Pantalla de micropilotes de contención lateral

2. Ejecución de micropilotes verticales para cimentación provisional. Se ejecutan un total de 211 micropilotes de 300 mm de diámetro de perforación, con tubo de acero de 178 mm de diámetro y 9 mm de espesor recubiertos con hormigón, con capacidad nominal de cada uno de 600 kN. Tienen una longitud aproximada de 20 m, de los que 10 m quedarán libres durante la excavación. Se disponen en dos pantallas de micropilotes al trespaso envolviendo la cimentación de cada una de las dos pilas a apeo. Para reducir su esbeltez y controlar los modos de pandeo durante las fases de máxima excavación, se ejecutan losas de atado y tirantes a medida que progresa el movimiento de tierras.

3. Vigas de apeo para recoger la carga de las pilas. Para ello se excavan seis galerías transversales por cada pila, mediante medios manuales a modo de mina al abrigo de chapas onduladas. Cada galería excavada tiene una dimensión en sección de 2,0 m de altura y 1,7 m de anchura, para una luz de trabajo de entre 6 y 8 m. Una vez atravesada la pila se dispone la armadura y se rellena con hormigón estructural. Cada una de estas vigas se pretensa con un criterio de estado límite de descompresión, para garantizar que su comportamiento es elástico y no hay deterioro de la rigidez, con los consiguientes deflexiones adicionales.



Figura 5. Pretensado de las vigas transversales de apeo

La separación entre estas vigas de apeo es de 3,2 m, con lo que el espacio libre entre ellas es del orden de 1,5 m. Analizado el material de relleno de las pilas (morteros de cal con cantos rodado) y su grado de fracturación, esta separación garantiza la adecuada transmisión de las cargas a las vigas de apeo.

Las vigas de apeo se completan con sendas vigas de reparto en cada pila, atando sus extremos y zunchando la cimentación de la pila, con rigidez suficiente para transmitir la carga a los cilindros hidráulicos.

4. Los cilindros hidráulicos se apoyan sobre vigas de encepado, uniendo las cabezas de los micropilotes, y recibiendo la carga de las vigas de reparto. Para prevenir los efectos de un eventual sismo durante las operaciones de apeo, frecuentes en Lima, las dos vigas (apeo y

encepado) disponen de una geometría compleja con almenados, de manera que se haga tope y se limiten los movimientos relativos. Debe tenerse en cuenta que los cilindros hidráulicos tienen una capacidad muy baja para asumir cargas horizontales, que se evitan con chapas engrasadas.

Agrupados en almenas con dos o tres gatos, se disponen 37 cilindros hidráulicos con capacidad nominal de 400 toneladas cada uno y carrera máxima de 100 mm, distribuidos en un total de 16 vías hidráulicas. Estas vías se conectan a una centralita con la bomba hidráulica, sistemas de control y automatización de las señales de los sensores en cada gato, de presión y carrera. Esta centralita permite controlar cada vía, sincronizando o actuando sobre cada una independientemente en caso de ser necesario.



Figura 6. Cilindros hidráulicos

5. La previsión de un posible sismo durante los cuatro meses que duró el proceso completo, exige adoptar sistemas de arriostramiento provisionales. La base de las pilas P2 y P3 quedan apoyadas sobre los gatos. Para garantizar su estabilidad lateral una vez que se ponen en carga los sistemas hidráulicos, se realiza un atado con tubos de acero en cruz con puntales de hormigón armado en el plano horizontal. Con estos elementos se consigue transferir las reacciones laterales a las dos pilas apoyadas firmemente en el suelo.

6. La puesta en carga de los gatos o cilindros hidráulicos se realiza en etapas, con minucioso control de cargas y desplazamientos. Para garantizar que se ha recogido el total de las cargas de las pilas se procede hasta un levantamiento de cada pila de 1 mm.

7. Descargado el suelo bajo el cimientto de las pilas, puede procederse a la excavación sin riesgo para los trabajadores salvo el posible desprendimiento de piedras sueltas, para lo que se adoptan las medidas habituales. Se realiza la excavación necesaria para la ejecución del hormigonado de la losa de cubierta, que se acodala contra las pantallas laterales. Esta losa



IX CONGRESSO BRASILEIRO DE PONTES E ESTRUTURAS
18 a 20 de maio, 2016 - Everest Rio Hotel

actuará durante las fases siguientes como elemento arriostrante del conjunto frente a posibles sismos, y de protección frente a eventuales caídas de elementos sueltos desde el puente.

La excavación se desarrolla por fases, para ir ejecutando los ya mencionados elementos de atado en los micropilotes para control del pandeo, y de los anclajes activos en el terreno para limitar los movimientos de las pantallas perimetrales. Una vez alcanzado el fondo de la excavación se completa la estructura del túnel, conectando con la losa de cubierta previamente ejecutada.

Durante todo el proceso se realiza un seguimiento de la instrumentación, que incluye control de desplazamientos en puntos de control en el puente, *strain gauges* en micropilotes, inclinómetros, convergencias, etc.



Figura 7. Puente de Trujillo apeado sobre micropilotes

8. Una vez completado la estructura del túnel, se rellena el espacio entre la cubierta y la base de las pilas con un macizo de hormigón en masa coronado con *grout* de retracción compensada. A partir de este momento se realiza el desapeo con la retirada de los gatos, en una operación lenta y controlada, en la que comienza a trabajar por flexión la losa de cubierta recibiendo la carga de las pilas.

9. Por último, y para completar el proceso, se realiza el corte de los micropilotes que quedan en el interior del túnel. Aunque la mayor parte de la carga de éstos se ha transferido a la estructura del nuevo túnel, queda una fracción de carga correspondiente al apoyo elástico de la cubierta sobre ellos. Por tanto la operación de corte de los micropilotes se realiza adoptando precauciones adecuadas, manteniendo la simetría y la transferencia de carga progresiva.



IX CONGRESSO BRASILEIRO DE PONTES E ESTRUTURAS
18 a 20 de maio, 2016 - Everest Rio Hotel

Control de los movimientos

El control de los movimientos de las pilas del puente histórico a lo largo de todo el proceso es la garantía del mantenimiento de su integridad; esta información se complementa con los datos de los *strain - gauges*, inclinómetros y mediciones de convergencia en los arcos. Las mediciones reales se han ido contrastando con los valores teóricos obtenidos de modelos numéricos de cada una de las fases, ajustados con los parámetros de comportamiento del suelo a partir de ensayos in situ.

Cabe señalar que los movimientos relativos entre las pilas del puente, y entre las pilas apeadas y sus estribos, han estado claramente por debajo de los límites marcados en todo momento. Los movimientos han sido algo menores a las predicciones de los modelos numéricos, en buena medida gracias al buen comportamiento del suelo, y a la buena rigidez conseguida en los micropilotes.

Desde el momento de la puesta en carga de los gatos, la carga del puente es transferida a los micropilotes. Dado que la transferencia de carga es activa, esta operación compensa automáticamente los movimientos. A medida que se va procediendo a la excavación, los micropilotes van transfiriendo cargas al extremo empotrado, con el consiguiente acortamiento elástico del tramo que queda exento. A lo largo de todo este proceso se midieron asientos en las pilas, homogéneos, de aproximadamente 5 mm en ambas pilas apeadas, sensiblemente menor al límite fijado como criterio de daño a la estructura (14 mm) y también menor al asiento de referencia para actuar con los gatos para su corrección (9 mm).

En la operación del desapeo, la carga de las pilas se transfiere a la losa de cubierta, que provoca asientos adicionales asociada a su flexión. En función de la posición relativa de las pilas respecto los muros verticales de la estructura del túnel bicelular, el asiento previsible por este efecto varía entre 2 y 3 mm. Este asiento se materializa en la última fase, cuando se cortan todos los micropilotes que retienen parcialmente a la losa.

En la operación de retirada de los gatos se realiza un levantamiento para compensar los asientos experimentados durante la excavación, y una fracción de los movimientos previstos tras la transferencia de carga. Tras el desapeo, se han dejado las pilas aproximadamente 1 mm por encima de su situación original. A lo largo del proceso de corte de micropilotes se han producido asientos entre 2 y 4 mm, dentro del rango de lo previsto, por lo que el asiento final respecto a la situación inicial está en el orden de 3 mm, equivalente a una distorsión 1/3000, muy inferior a los valores de riesgo. La situación final del puente es netamente mejor por haber consolidado la cimentación, sin que se hayan apreciado daños durante la operación.

Reconocimientos

El éxito de la operación se debe a la colaboración de un equipo multinacional de varias empresas, sin cuya intervención no la actuación no hubiese sido posible. Han intervenido técnicos especialistas de al menos 7 países, entre América y Europa. Las empresas destacadas han sido, entre otras, las siguientes.



IX CONGRESSO BRASILEIRO DE PONTES E ESTRUTURAS
18 a 20 de maio, 2016 - Everest Rio Hotel

Propiedad y Concesionario	Municipalidad de Lima, EMAPE, GPIIP LAMSAC
Construcción	OAS
Diseño y proyecto ejecutivo	TYPSA
Asesoría y metodología constructiva	OAS Casagrande Engenharia
Asistencia técnica a la obra	TYPSA
Supervisión y control de calidad	NKLAC LAMSAC Intecsa-Inarsa Casagrande Engenharia
Movimiento de cargas y pretensado	FREYSSINET
Instrumentación	Bureau de Projetos e Consultoria Ltda.

Conclusiones

La construcción de nuevas infraestructuras en los centros históricos de las ciudades interfieren con patrimonio histórico que es preciso conservar, lo que impone fuertes condiciones a los procedimientos constructivos, que frecuentemente tienen que incluir sistemas que permitan compensar los movimientos que aquellas experimentan.

En Lima se ha ejecutado un túnel construido por *cut & cover* bajo el cauce del río Rímac, que ha obligado a apear dos pilas de un puente arco datado en los primeros años del siglo XVII. Se ha realizado una operación de *heavy lifting* de un total de 6000 toneladas, manteniendo durante todo el proceso los asientos máximos en el puente con distorsiones por debajo de 1/2000, menos de 5 mm. El puente histórico a quedado finalmente apoyado sobre la nueva estructura de hormigón armado, sin daños provocados por la operación, con distorsión menor a 1/4000.

Referencias

- HART-TERRÉ, E.; MÁRQUEZ ABANTO, A. El Puente de Piedra de Lima. Librería e Imprenta Gil, 1961.
- BOSCARDIN, M.D.; CORDING, E.J. Building response to excavation-induced settlement. ASCE. Journal of Geotechnical Engineering, Jan. 1989, Vol. 115, No. 1, pp. 1 -21.