

**XXV CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA
SAN JOSÉ, COSTA RICA, 9 AL 12 DE SEPTIEMBRE DE 2012**

**EVOLUCIÓN TEMPORAL DE LA PROFUNDIDAD DE EROSIÓN LOCAL
JUNTO DE PILAS DE PUENTES DE GEOMETRÍA COMPLEJA**

Mario Moreno¹, Lúcia Couto² y Rodrigo Maia³

1 Asistente de Investigación, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Portugal; email: mcastiblanco@lnec.pt

1 Estudiante Doctoral, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal; email: dec10007@fe.up.pt

2 Investigadora, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Portugal; email: lcouto@lnec.pt

3 Profesor Asociado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal; email: rmaia@fe.up.pt

RESUMEN:

La evolución temporal de la profundidad máxima de erosión alrededor de pilas simples con flujo sin transporte general de sólidos sigue una única tendencia logarítmica, de acuerdo con lo encontrado en la mayoría de los estudios experimentales. Sin embargo, en el caso de pilas de geometría compleja, correspondientes a una columna fundada en una losa cabezal y soportada por un grupo de estacas, la evolución de la profundidad de erosión puede tener diferentes tendencias, las cuales están asociadas a la presencia y exposición en el flujo de los tres elementos estructurales. En el presente artículo se presentan los resultados de la evolución temporal de la profundidad máxima de erosión en cinco ensayos de larga duración, entre 13 y 27 días. Estos ensayos son representativos de las diferentes situaciones en las que puede estar localizada la losa cabezal en relación con el nivel inicial del lecho de arena: encima del lecho, parcialmente o completamente enterrada en el lecho. Los ensayos realizados también permitirán verificar si el criterio utilizado por diversos autores para finalizar los ensayos experimentales es apropiado para pilas de geometría compleja.

ABSTRACT:

The scour depth evolution around single piers has a unique logarithmic trend under clear-water, according to diverse authors. However, in the case of complex piers, corresponding to a column funded in a pile cap supported by a pile group, the scour depth evolution can have different trends that are associated with the presence and exposure in the flow of the three structural elements. This paper presents the results of maximum scour depth evolution in five tests of long duration between 13 and 27 days. These tests are representative of different situations in which the pile cap can be localized in relation to the initial bed level: above the bed, partially or completely buried in the bed. The tests will also allow verifying if the criterion used by different authors to stop the experimental tests is appropriate for complex piers.

PALABRAS CLAVES: Erosión local, pilas de puentes, evolución temporal

INTRODUCCIÓN

La erosión local alrededor de las fundaciones de puentes puede conducir a la falla parcial o el colapso de las pilas y estribos de los puentes. En las últimas seis décadas, la erosión local en pilas simples (Figura 1-a) ha sido ampliamente estudiada, donde los estudios se han centrado en la comprensión y caracterización de (i) los fenómenos implicados en la profundidad de socavación del proceso, (ii) la evolución temporal de la profundidad máxima de erosión, (iii) la predicción de la profundidad máxima de erosión o (iv) la modelación matemática del proceso de erosión. En contraste, son más recientes los estudios sobre erosión local en pilas de puente con fundaciones no uniformes (Figura 1 b-e). Tal es el caso verificado en las tres últimas décadas, en que se ha estudiado la erosión local en grupo de pilotes (i.e. Hannah 1978, Jones 1989, Zhao & Sheppard 1999) y columnas fundadas en macizos o zapatas (i.e. Jones et. al 1992, Umeda et. al 2010).

Sin embargo, consideraciones de orden física y económica han llevado a que, cada vez más, las fundaciones de los puentes sean constituidas por columnas fundadas en losas cabezal soportadas por pilotes (Figura 1-e), designadas pilas complejas. Estudios sobre la erosión local correspondientes a este tipo de pila se llevaron a cabo principalmente durante la última década (i.e. Salim & Jones, 1998, Richardson & Davis 2001, Coleman 2005, Sheppard & Renna 2010).

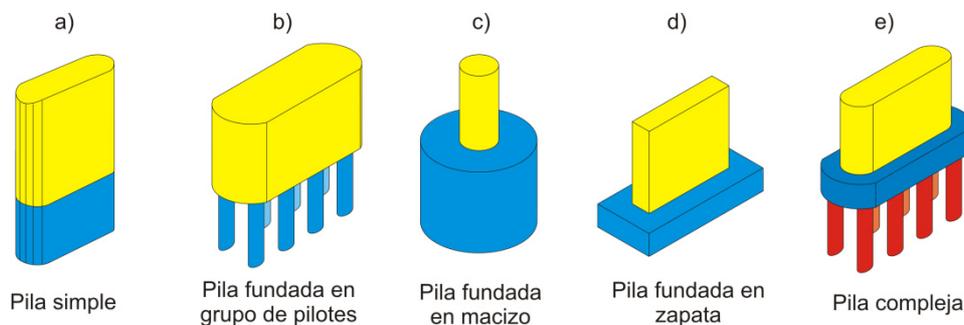


Figura 1.- Tipos de fundaciones de pilas de puentes

EVOLUCIÓN DE LA PROFUNDIDAD DE EROSIÓN (ESTADO DEL ARTE)

La evolución temporal de la profundidad máxima de erosión local junto de pilas simples, en flujos sin transporte generalizado de sólidos sigue una tendencia logarítmica, de acuerdo con lo constatado en la mayoría de estudios experimentales, i.e. Ettema (1980), Franzetti et al. (1982), Melville y Coleman (2000). De acuerdo con Couto y Cardoso (2001), en esta situación pueden ser identificadas tres fases del proceso erosivo: una fase inicial, en donde la profundidad de la cavidad de erosión aumenta muy rápido; una fase principal, en donde la profundidad y extensión de la cavidad se acentúan de manera sistemática, a un ritmo progresivamente decreciente; y una fase de equilibrio, en donde la cavidad de erosión deja prácticamente de evolucionar temporalmente, conforme se muestra en la Figura 2 (basada en los resultados de Lança et al. 2010, donde d_s representa la profundidad de erosión y D es el diámetro de la pila).

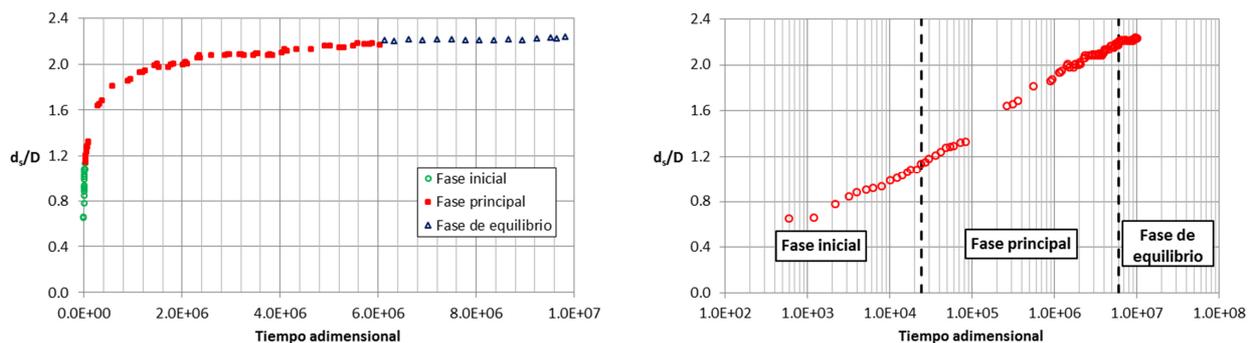


Figura 2.- Evolución temporal de la profundidad de erosión en pilas simples

En las mismas condiciones de flujo (sin transporte generalizado de sólidos), la evolución temporal de la profundidad máxima de erosión local junto de pilas con fundaciones no uniformes presenta variaciones de la tendencia logarítmica identificada en pilas simples. Estas variaciones están asociadas al número y tipo de elementos estructurales de la fundación de la pila expuestos al flujo a medida que se desenvuelve la cavidad de erosión.

Umeda et al. (2010) estudiaron la evolución temporal de la profundidad de erosión correspondiente a una pila (columna) fundada en un macizo cilíndrico, para tres posiciones relativas de la base de la columna con respecto al nivel inicial (por lo tanto, antes de comenzar el proceso erosivo) de la arena, correspondientes (i) a la columna encima del lecho, (ii) a la base de la columna al nivel del lecho y (iii) el macizo enterrado en el lecho. La evolución temporal de la profundidad máxima de la cavidad de erosión para la tercera posición referida (macizo enterrado en el lecho) se encuentra esquematizada en la Figura 3, en donde la profundidad de erosión fue normalizada con el diámetro de la columna, D_c . En este caso, la evolución temporal de la profundidad de erosión en la fase inicial solo es influenciada por la columna. En la fase principal de la evolución temporal se identifican tres etapas: una primera (A), correspondiente al proceso de erosión en la frente de la columna hasta que la cavidad llega a la parte superior del macizo; una segunda etapa (B), donde la profundidad de erosión no es alterada hasta que toda la parte superior del macizo quede totalmente expuesta al flujo; y una última etapa (C), correspondiente al proceso en frente del macizo como se muestra en la Figura 3. La fase de equilibrio está asociada con una tasa de erosión muy baja, cuasi nula.

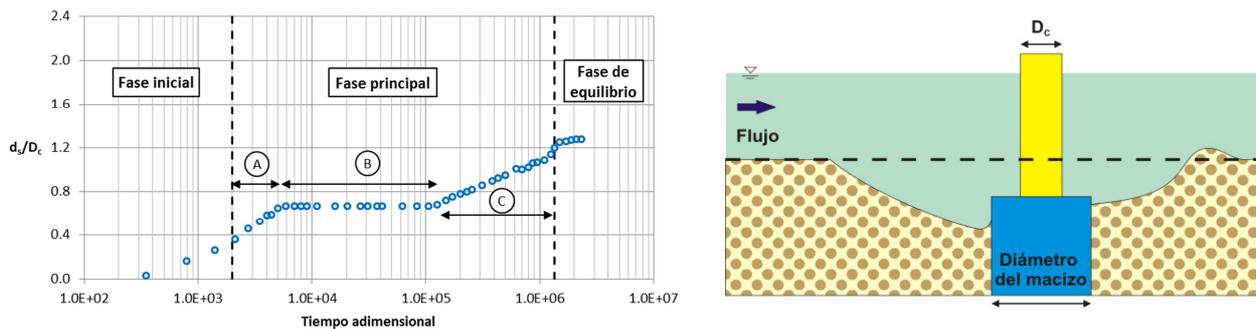


Figura 3.- Evolución temporal de la profundidad de erosión de pilas fundadas en macizos, para la posición del macizo enterrado en el lecho (adaptado del estudio de Umeda et al. 2010)

OBJETIVOS

En el caso particular de pilas de puentes de geometría compleja (tipo e, Figura 1) la cuestión de la evolución de la profundidad máxima de erosión no ha sido muy explorada. Por lo tanto, el objetivo principal de este trabajo es distinguir y describir las diferentes fases de evolución temporal del proceso erosivo en este tipo de pilas, para lo cual se utilizará un modelo de una pila compleja con cinco diferentes posiciones de la losa cabezal con respecto al nivel inicial del lecho de arena. Además, se analizará el criterio utilizado por varios autores para la finalización de los ensayos.

INSTALACIÓN Y PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Los ensayos experimentales fueron conducidos en un canal rectangular de inclinación variable de 40.0 m de largo, 2.0 m de ancho y 1.0 de profundidad máxima en el Laboratorio Nacional de Engenharia Civil, LNEC, en Lisboa, Portugal. En el canal se construyó un fondo falso de 0.4 m de altura para tener una zona experimental de 5.0 m de largo y 2.0 m de ancho con arena de diámetro medio de 0.86 mm. La pila compleja fue inserida en la zona media central del área experimental

(Figura 4-a). Los ensayos fueron conducidos con una profundidad de flujo de 0.20 m y un caudal de 134 l/s permitiendo tener condiciones de agua clara con una relación U/U_c de 0.97, donde U es la velocidad media del flujo y U_c es la velocidad crítica.

La pila compleja ensayada es constituida por una columna rectangular con caras semicirculares de 0.14 m de ancho y 0.46 m de largo; una losa cabezal de la misma forma de 0.20 m de ancho, 0.52 m de largo y 0.09 m de espesura; y un grupo de 2 filas de 4 pilotes de 0.05 m de diámetro y 0.125 m de separación entre ejes, como se muestra en la Figura 4-b.



Figura 4.- Pilar de geometría compleja: a) Implantación en el lecho de arena; b) Dimensiones del modelo (unidades en metros)

Para determinar la evolución temporal de la profundidad de erosión fueron diseñadas cinco situaciones en las que se puede identificar la posible influencia de los elementos estructurales de la pila compleja. Estas situaciones están asociadas con el posicionamiento de la parte superior de la losa cabezal en relación con el nivel inicial del lecho de arena (H_c): una primera situación en que la losa se encuentra afuera de la superficie de agua ($H_c = 0.30$ m), una segunda situación en que la losa se encuentra encima del lecho y dentro del flujo ($H_c = 0.133$ m), una tercera situación en que la losa se encuentra parcialmente enterrada en el lecho ($H_c = 0.067$ m), una cuarta situación en que el nivel superior de la losa coincide con el nivel del lecho ($H_c = 0.0$ m) y una quinta situación en que la losa se encuentra totalmente enterrada ($H_c = -0.047$ m), como se ilustra en la Figura 5. Estas situaciones permitirán distinguir las diferentes fases de evolución de la profundidad máxima en la cavidad de erosión.

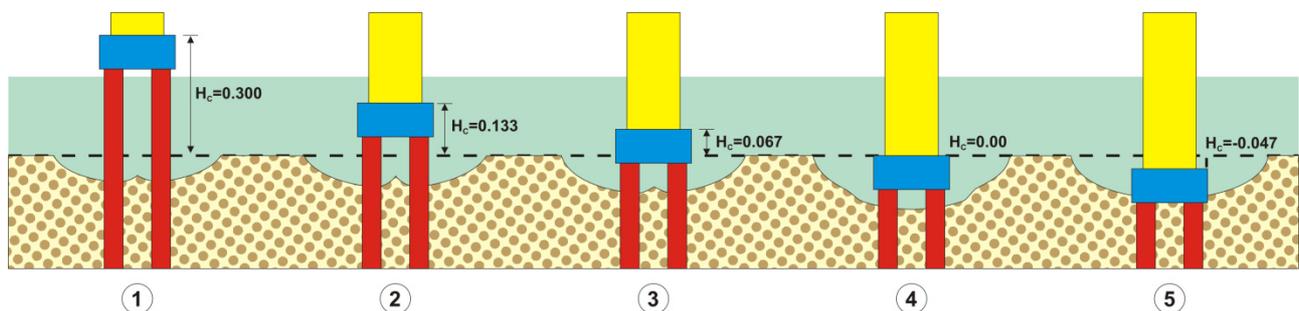


Figura 5.- Situaciones de los ensayos de la pila compleja y posiciones estudiadas

Para avalar la profundidad máxima de erosión (y su evolución temporal) fue necesario tener tres puntos de medición dependiendo de cuál de los tres elementos de la pila compleja se encontraba (en el instante de la medición) en contacto con la parte superior del lecho de arena. El punto 1 fue ubicado para mediciones en frente de la columna, el punto 2 fue ubicado para mediciones en frente de la losa y el punto 3 fue ubicado en frente del grupo de pilotes, como se puede observar en la Figura 6.

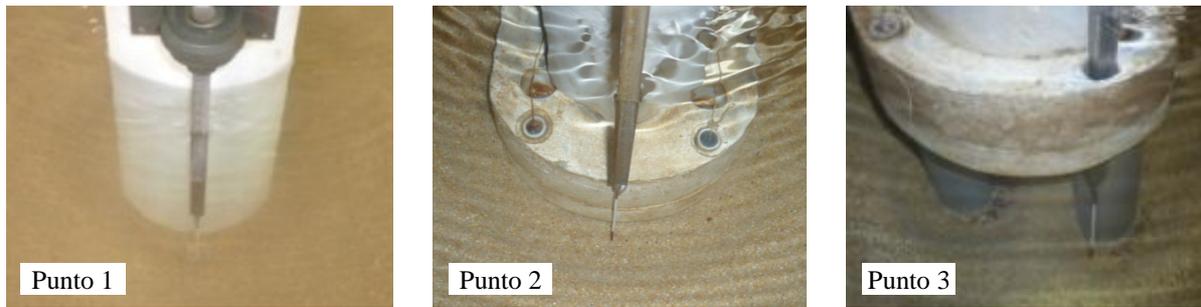


Figura 6.- Puntos de medición de la profundidad de erosión local.

El procedimiento experimental tuvo en cuenta los siguientes pasos:

- Colocación de la pila compleja y nivelación del lecho de arena;
- Llenado lento de la sección de teste y del canal, a través de un caudal bajo (en promedio 3 - 4 l/s), con el fin de no provocar transporte de sedimentos prematuro en la zona aledaña a la pila;
- Después de tener la mitad de la altura de agua deseada, se procedió a aumentar gradualmente el caudal hasta obtener el valor deseado;
- Cuando se obtuvieron los valores de la altura de agua y del caudal requeridos, se procedió a quitar las láminas de protección de la arena que se habían colocado junto de la pila después del nivelamiento antes referido, dándose inicio al ensayo;
- Las mediciones de la profundidad de erosión fueron hechas en promedio a los 6 min, 12 min, 24 min, 36 min, 48 min, 1 h, 1,5 h, 2 h, 3 h, 4 h, 5 h, 6 h, 7 h, 8 h durante el primer día, y en los siguientes días 2 o 3 mediciones dependiendo de la evolución.

RESULTADOS

Los cinco ensayos realizados son representativos de las diferentes situaciones en que puede estar localizada la pila compleja en relación con el nivel inicial del lecho de arena (Figura 5). Los ensayos fueron conducidos con duraciones entre 310 horas (13 días) y 646 horas (27 días) las cuales se consideran adecuadas para describir la evolución temporal de la profundidad de erosión.

Cuando la columna y la losa se encuentran afuera del agua (situación 1), la evolución temporal de la máxima profundidad de erosión sigue la misma tendencia que el proceso erosivo junto de pilas simples, la cual es caracterizada por una expresión logarítmica (única), como se observa en la Figura 7. El proceso de erosión comienza en frente de los pilotes de aguas arriba, con formación de cavidades individuales, luego de unas 4 horas se ha formado una cavidad de erosión en torno del grupo de pilotes con la presencia de pequeñas cavidades en los pilotes individuales; la profundidad máxima de la cavidad formada se ubica en la frente de los pilotes aguas arriba del grupo. En este caso, las mediciones de la profundidad máxima de erosión se llevaron a cabo en el punto 3 (Figura 6).

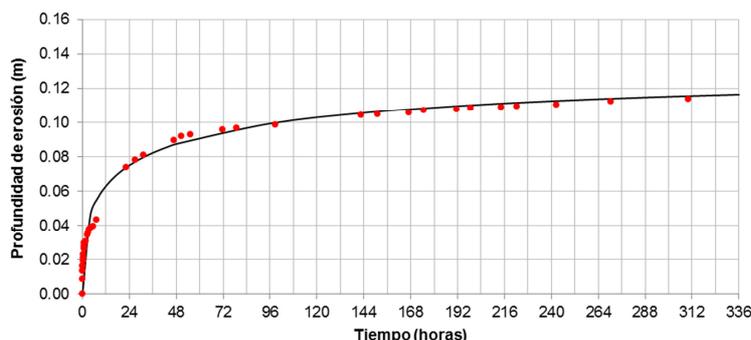


Figura 7.- Evolución temporal de la profundidad de erosión para la situación 1

Cuando la losa cabezal se encuentra encima del lecho y dentro del flujo (situación 2), la evolución de la profundidad máxima de erosión es análoga a la de la situación 1, mostrando una tendencia única tal como se indica en la Figura 8, puesto que la profundidad máxima de erosión se produce inmediatamente aguas arriba de los pilotes que se enfrentan al flujo. Sin embargo, la presencia de la columna y la losa en el flujo conlleva a que la profundidad máxima de erosión sea mayor que la obtenida en la situación 1. En este caso, las mediciones de la profundidad máxima de erosión también se llevaron a cabo en el punto 3 (Figura 6).

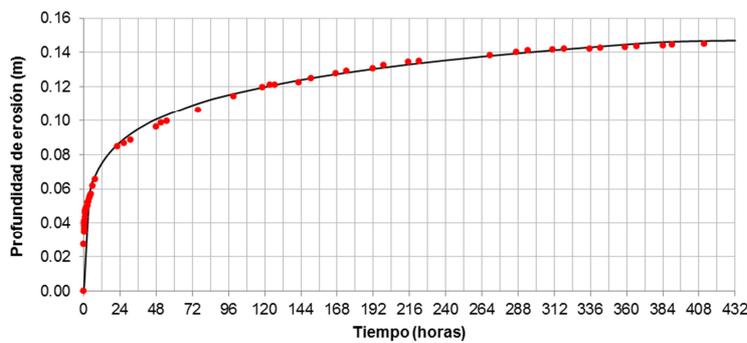


Figura 8.- Evolución temporal de la profundidad de erosión para la situación 2

Cuando la losa cabezal se encuentra parcialmente enterrada en el lecho de arena (situación 3), la evolución de la profundidad de erosión no sigue una tendencia única, como se identificó en las situaciones 1 y 2. En este caso, la evolución de la profundidad de erosión presenta diferentes cambios de curvatura que dependen de los elementos estructurales de la pila compleja que quedan expuestos al flujo. En el proceso de erosión se identifican tres fases de evolución, como se ilustra en la Figura 9: una primera correspondiente al proceso de erosión en frente de la losa hasta que la parte frontal de ésta queda totalmente expuesta al flujo; seguida de una fase de transición en la cual la cavidad de erosión continua debajo de la losa hasta destapar los pilotes de aguas arriba del grupo; y una última fase con un proceso similar al expuesto en la situación 1, donde se forman cavidades independientes alrededor de los pilotes dentro de la cavidad general de erosión, como se muestra en la Figura 9. En este caso, las mediciones de la profundidad máxima de erosión se llevaron a cabo en el punto 2 (Figura 6) para las fases 1 y 2, y en el punto 3 (Figura 6) para la fase 3.

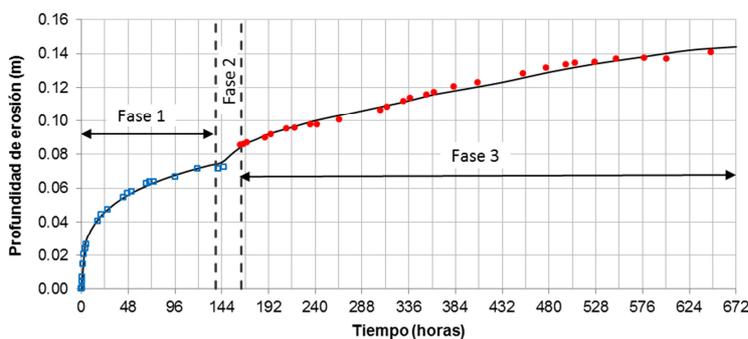


Figura 9.- Evolución temporal de la profundidad de erosión para la situación 3

Cuando la parte superior de la losa cabezal se encuentra al mismo nivel del lecho de arena (situación 4), el proceso de erosión es similar al de la situación 3, con tres fases de evolución. Una primera con el proceso en frente de la losa, una segunda de transición desde que la cavidad descubre todo el espesor de la losa hasta que el proceso erosivo comienza en torno de los pilotes de aguas arriba del grupo, y una tercera en donde el proceso continúa en la frente de estos pilotes de aguas arriba. Sin embargo, a pesar de que el ensayo de esta configuración tuvo una duración de 595 horas, 25 días, solamente se pudieron observar las dos primeras fases de evolución como se muestra en la

Figura 10. En este caso, todas las mediciones de la profundidad de erosión se realizaron en el punto 2 (Figura 6).

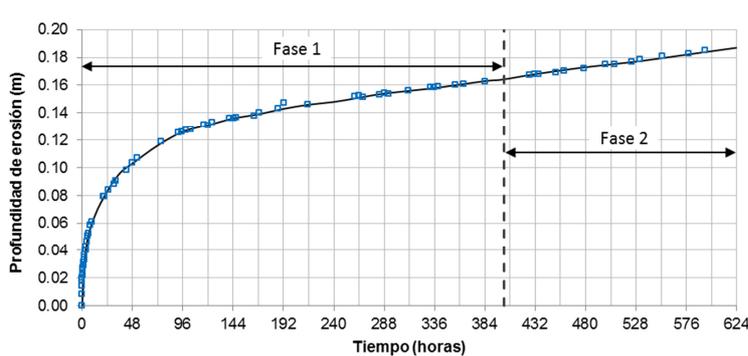


Figura 10.- Evolución temporal de la profundidad de erosión para la situación 4

Cuando la losa cabezal se encuentra totalmente enterrada (situación 5), se pudieron observar tres fases de evolución (Figura 11): una primera correspondiente, en este caso, al proceso de erosión en frente de la columna hasta que la cavidad llega a la parte superior de la losa; una segunda fase, en que la cavidad de erosión empieza a destapar la parte superior de la losa hasta que esta queda totalmente expuesta (en la parte superior); y, una tercera correspondiente al proceso de erosión en frente de la losa. Sin embargo, puede darse el caso en que estén presentes otras dos fases de evolución, una correspondiente a la transición de la erosión hasta el frente del grupo de pilotes y otra correspondiente a la erosión en la frente de estos. La presencia (o no) de estas últimas fases deberá depender del espesor de la losa y de la posición relativa de la parte superior de la losa en relación al nivel inicial del lecho de arena.

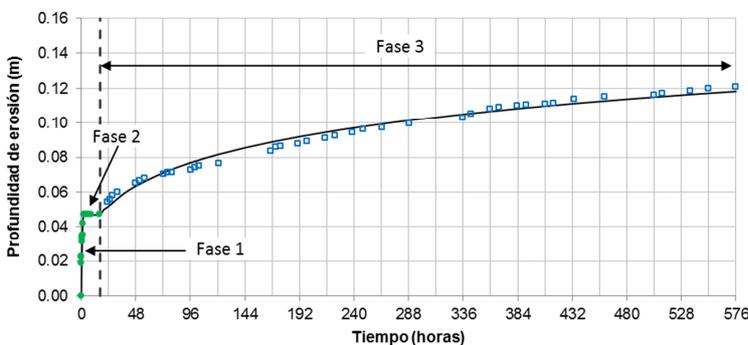


Figura 11.- Evolución temporal de la profundidad de erosión para la situación 5

DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

Conforme a los resultados obtenidos de las cinco situaciones estudiadas se encontró que la evolución temporal de la profundidad máxima de erosión presenta diferentes tendencias en comparación con la tendencia logarítmica observada para pilas simples. Estas tendencias varían dependiendo de la posición relativa de la losa cabezal en relación al lecho (arriba, parcial o totalmente enterrada). Los cambios más importantes se producen en la fase principal del proceso erosivo, en donde se pueden identificar diferentes etapas las cuales son función del número de elementos estructurales de la pila compleja expuestos al flujo a medida que se desenvuelve la cavidad de erosión.

Con el objetivo de obtener las tres fases del proceso erosivo (fase inicial, principal y de equilibrio), los ensayos fueron conducidos con duraciones de mínimo dos semanas, tiempo usado en las situaciones en donde la tendencia de la evolución temporal de la profundidad de erosión sigue la misma forma logarítmica de pilas simples. Sin embargo, en las situaciones en donde la fase

principal del proceso erosivo presenta más etapas, con cambios de la tendencia de la evolución, los ensayos fueron conducidos con duraciones más largas hasta cuatro semanas. Estas duraciones de los ensayos son mucho más grandes que las utilizadas en otros ensayos experimentales de pilas complejas (i.e. 3 días en promedio en Ataie-Ashtiani et al. 2010, 46 horas en Jones & Sheppard 2000).

En realidad, para obtener la última fase de evolución (fase de equilibrio) en los ensayos experimentales en pilares de puentes con fundación no uniforme, diversos autores (i.e. Coleman 2005, Melville et al. 2006 y Ataie-Ashtiani et al. 2010) sugieren el mismo criterio utilizado en pilares simples – establecido por Melville y Chiew (1999) – para calcular el tiempo necesario para obtener las condiciones de equilibrio. Ese criterio establece que el tiempo de equilibrio es obtenido cuando la tasa de erosión es menor que 5% del diámetro de los pilotes (o de la profundidad de flujo, si fuera de menor valor) en un período de 24 horas.

De acuerdo con los resultados de las cinco situaciones estudiadas en términos de la variación temporal de la profundidad máxima de erosión se puede determinar si el criterio de finalización de los ensayos arriba descrito es en realidad valido para pilas con geometría compleja. Para tal efecto, en la Figura 12 (izquierda) se representa la tasa de variación de la profundidad de erosión normalizada con el diámetro de los pilotes para los diferentes días de duración de los ensayos. Esta figura permite evidenciar que al utilizar el criterio de finalización del 5% (Melville & Chiew, 1999) se obtienen tiempos de equilibrio de 7, 10, 18, 10 y 10 días para las respectivas situaciones 1 a 5. Los puntos de finalización de los ensayos correspondientes al mismo criterio y ubicados en las curvas de evolución de la profundidad de erosión obtenidas (Figura 12, derecha), permiten todavía evidenciar mejor las diferencias comparativamente al criterio seguido en este trabajo experimental.

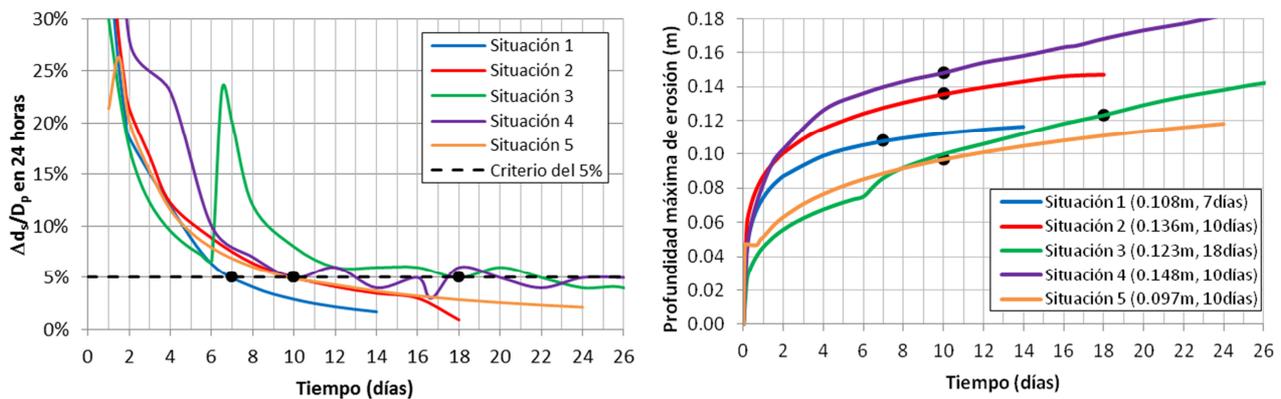


Figura 12.- Comparación del criterio de finalización de los ensayos

A partir de los resultados de la Figura 12, si el ensayo 4, por ejemplo, hubiera terminado a los 10 días, como el criterio de Melville & Chiew (1999) lo sugiere, no se podría haber observado la evolución de la cavidad aguas arriba del grupo de pilotes, fase que de acuerdo con la Figura 10 comenzó apenas alrededor de los 17 días. Claramente los resultados del presente estudio prueban que el criterio descrito para finalizar los ensayos experimentales no es apropiado para pilas complejas. Para este tipo de fundaciones es necesario conducir los ensayos con una mayor duración, especialmente en las situaciones donde el macizo se encuentra parcialmente o completamente enterrado en el lecho de arena.

De acuerdo con la apreciación de la estructura de flujo en torno a la pila compleja se puede mencionar que en cierta medida se presentan las mismas características de la estructura de flujo en pilas simples, donde el proceso de erosión es atribuido a la combinación del flujo descendente y de los vórtices de herradura formados; adicionalmente, los vórtices de estera ayudan en el proceso a través de un efecto de succión transportando el material hacia aguas abajo. En la Figura 13 se incluye una representación de la estructura de flujo en torno de los elementos estructurales de la pila compleja (configuraciones 2, 3 y 5), de acuerdo con los fenómenos antes mencionados. Hay que aclarar que el flujo descendente es alterado por la presencia de la losa cabezal llevando a cabo una

correspondiente disminución en el proceso erosivo. En la zona interior del grupo de pilotes, los vórtices de estera pierden fuerza por la presencia de la losa, reduciendo el efecto de succión y prologando el proceso erosivo en el tiempo.

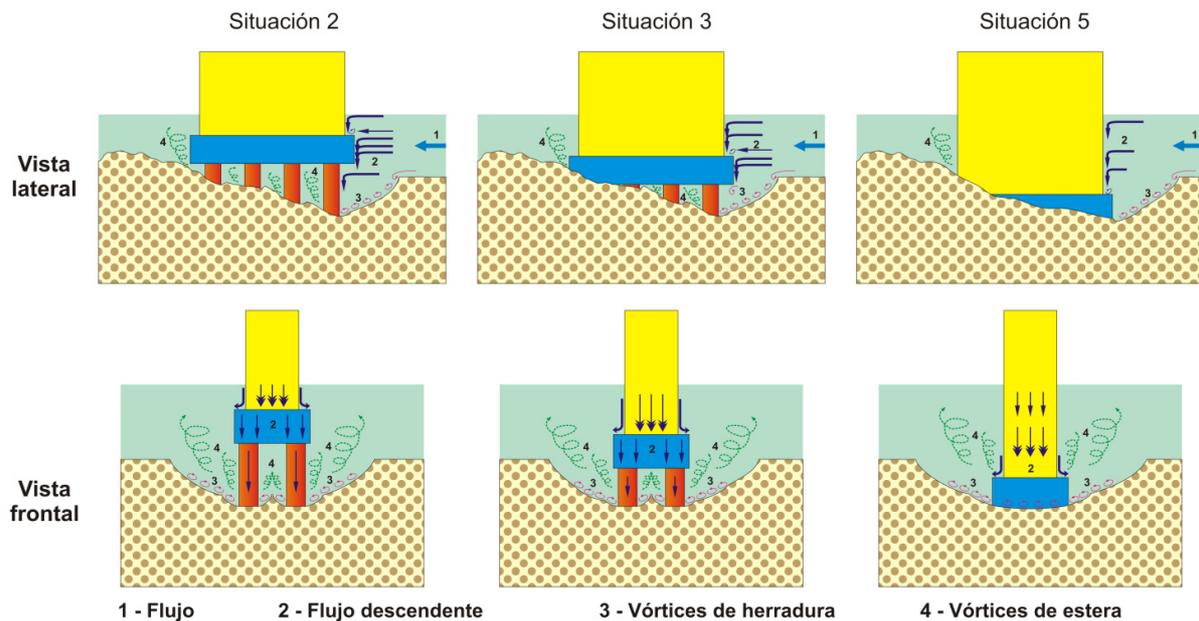


Figura 13.- Representación de la estructura de flujo junto de la pila compleja

CONCLUSIONES

Las siguientes conclusiones sobre el proceso de desenvolvimiento de la cavidad de erosión junto de pilares de geometría compleja se basan en los cinco ensayos experimentales con posiciones diferentes de la losa cabezal con respecto al nivel inicial del lecho de arena.

- Se verificó que la presencia y natural interferencia de los diferentes elementos estructurales de la pila compleja en el flujo influyen el proceso erosivo y por lo tanto su cavidad. Se constató que para el caso de pilas con geometría compleja, la tendencia logarítmica (única) de la evolución de la profundidad máxima de erosión presenta variaciones en comparación con las pilas simples. En general, las variaciones más notorias ocurren en la fase principal del proceso erosivo, tornándose más evidente en las situaciones donde la losa cabezal se encuentra parcialmente o completamente enterrada en el lecho (Figuras 9 a 11), en las cuales la losa cabezal se encuentra expuesta dentro de la cavidad de erosión. El número de etapas en la fase principal dependerá también del espesor de la losa cabezal.
- Se observó que la estructura de flujo junto de la pila de geometría compleja presenta los mismos componentes ya estudiados en pilares simples; sin embargo, estos componentes pueden sufrir variaciones por la presencia de la losa cabezal, la cual interrumpe el flujo descendente de la columna y genera un nuevo flujo descendente asociado a los pilotes de aguas arriba como se observa en la Figura 13. En situaciones cuando la losa se encuentra parcialmente enterrada o la parte superior de la losa coincide con el nivel inicial del lecho, la losa bloquea el desenvolvimiento de los vórtices de estera afectando la tasa de transporte del material erosionado.
- Se confirmó que el criterio de finalización de los ensayos experimentales establecido por Melville e Chiew (1999) no es aplicable para el caso de pilas con geometría compleja, ya que con su utilización se obtendrían tiempos de ensayo menores a los necesarios para obtener las diferentes fases de evolución, incluyendo las distintas etapas de la fase principal. Por lo tanto, para ensayos experimentales con modelos semejantes a los del presente estudio se deben utilizar tiempos de duración de por lo menos dos semanas; sin embargo, los ensayos

pueden ser conducidos con una duración mayor, poniendo atención al progreso de las diversas fases y etapas descritas con el fin de obtener la expresión más completa de las mismas.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue desarrollado en el ámbito del proyecto de investigación “Estudo experimental de erosões localizadas junto de pilares complexos” (PTDC/ECM/101353/2008) co-financiado por la FCT – Fundação para a Ciência e a Tecnologia, Portugal.

REFERENCIAS

- Ataie-Ashtiani, B., Baratian-Ghorghi, Z. and Beheshti, A. A.** (2010). “Experimental investigation of clear-water local scour of compound piers”. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 136, No. 6, June 2010, pp. 343-351.
- Coleman, S.E.** (2005). “Clearwater local scour at complex piers”. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 131, No. 4, April 2005, pp. 330-334.
- Couto, L.T. and Cardoso, A.H.** (2001). “Local scour at bridge piers and abutments, Part I – Characterisation of the reference situation”. *Recursos Hídricos*, Vol. 22, pp. 65-74, (en Portugués).
- Ettema, R.** (1980). *Scour at bridge piers: Report N° 236*. University of Auckland, School of Engineering, New Zealand.
- Franzetti, S., Larcán, E. and Mignosa, P.** (1982). “Influence of tests duration on the evaluation of ultimate scour around circular piers”. *Proceedings of the International Conference on the Hydraulic Modelling of Civil Engineering Structures*, Coventry, England.
- Hannah, C.R.** (1978). *Scour at pile groups, Rep. N° 78-3*. Department of Civil Engineering, University of Canterbury, Christchurch, New Zealand.
- Jones, J.S.** (1989). *Laboratory studies of the effects of footings and pile groups on bridge pier scour. Proceedings of the Bridge Scour Symposium*, Subcommittee on Sedimentation, Interagency Advisory Committee on Water Data, Federal Highway Administration, Washington, D.C., 340-359.
- Jones, J.S. and Sheppard, D.M. (2000). “Local scour at complex pier geometries”. *Proceedings of World Environmental and Water Resources Congress 2000*, ASCE, USA.
- Jones, J.S., Kilgore, R.T. and Mistichelli, M.P.** (1992). “Effects of footing location on bridge pier scour”, *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 118, No. 2, February 1992, pp. 280-289.
- Lança, R., Fael, C. and Cardoso, A.** (2010). “Assessing equilibrium clear water scour around single cylindrical piers”. *Proceedings of River Flow 2010*, Germany.
- Melville, B.W. and Chiew, Y.M.** (1999). “Time scale for local scour at bridge piers”. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 125, No. 1, January 1999, pp. 59-65.
- Melville, B.W. and Coleman, S.E.** (2000). *Bridge Scour*. Water Resources Publications, LLC, Colorado, USA.
- Melville, B., Coleman, S. and Priestley, S.** (2006). “Local scour at complex piers”. *Proceedings of World Environmental and Water Resources Congress 2006*, ASCE, USA.
- Richardson, E.V. and Davis, S.R.** (2001). *Evaluating scour at bridges*. Fourth edition. Publication No. FHWA NHI 01-001, Hydraulic Engineering Circular No. 18. National Highway Institute, U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration.
- Salim, M. and Jones, J.S.** (1998). “Scour around exposed pile foundations”. *Compilation of Conf. Scour papers (1991-1998)*, ASCE, pp. 335-346.
- Sheppard, D.M. and Renna, R.** (2010). *Florida bridge scour manual*. Florida Department of Transportation, Tallahassee.
- Umeda, S., Yamazaki, T. and Yuhi, M.** (2010). “An experimental study of scour process and sediment transport around a bridge pier with foundation”. *Proceedings of International Conference on Scour and Erosion 2010*, ASCE, pp. 66-75.
- Zhao, G. and Sheppard, D.M.** (1999). “The effect of flow skew angle on sediment scour near pile groups”. *Stream Stability and Scour at Highway Bridges*, ASCE, pp. 377-391.