

**XXVII CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA
LIMA, PERÚ, 28 AL 30 DE SETIEMBRE DE 2016**

**METODOLOGÍA PARA EL ESTUDIO DE LA INUNDACIÓN DE LAS
GALERÍAS DE SERVICIO DE UNA INSTALACIÓN DE PRODUCCIÓN DE
ENERGÍA ELÉCTRICA**

⁽¹⁾Sanz-Ramos, M., ⁽¹⁾Bladé Castellet, E., ⁽¹⁾Dolz Ripollés, J., ⁽²⁾Expósito Pérez, J.M.

⁽¹⁾Institut FLUMEN, E.T.S. d'Eng. de Camins, Canals i Ports de Barcelona, UPC Barcelona TECH
C/ Gran Capitán S/N, 08034, Barcelona, España
marcos.sanz-ramos@upc.edu ernest.blade@upc.edu j.dolz@upc.edu

⁽²⁾IDOM S.A.
Gran Via de Carles III 97, bajos, 08028, Barcelona, España
juan.exposito@idom.com

RESUMEN:

La reevaluación de los sistemas de seguridad de las Instalaciones de Producción de Energía Eléctrica (IPEE) es necesaria para mantener su correcto funcionamiento. Todo ello se realiza con el objetivo de salvaguardar a la población y al medio ambiente, además de a la propia instalación, cuando esta puede verse afectada por agentes geoclimáticos extremos (huracanes, inundaciones, etc.). El Sistema de Agua de Servicios Esenciales (SASE) es un sistema de seguridad que tiene como función suministrar agua de refrigeración a equipos u otros sistemas de seguridad. Generalmente se encuentra enterrado en unas galerías de servicio, donde comparte espacio con diferentes conducciones. La rotura del SASE puede ocasionar, de manera indirecta, problemas en la IPEE. El proceso de inundación de las galerías dependerá, por tanto, de la geometría, del índice de ocupación de la propia galería y del tipo de rotura. Es por ello que ha sido necesario implementar una nueva metodología para poder estudiar el proceso de inundación de las galerías de servicio utilizando el modelo numérico Iber.

ABSTRACT:

In order to maintain proper operations of the Electric Energy Production Facilities (IPEE), it is necessary the re-evaluation of its security systems. This is carried out to safeguard population and environment, and the facility itself when geoclimatics agents may affect it (hurricanes, floods, etc.). The Essential Service Water System (SASE) is a security system whose functions are to supply cooling water to the equipments or other security systems. It is usually buried in a service gallery sharing space with different lines. SASE' breaks may cause indirectly, troubles in of the IPEE. Floods inside the galleries will depend, therefore, on the geometry, the occupancy rate of the gallery itself and the type of break. Due to this, it has been necessary to implement a new methodology to study the flood processes of the galleries using the numerical model Iber.

PALABRAS CLAVE: inundación, sistema seguridad, índice de ocupación.

INTRODUCCIÓN

La creciente preocupación por la seguridad en las Instalaciones de Producción de Energía Eléctrica (IPEE) a raíz de los fallos en instalaciones de este tipo, ha llevado a los organismos internacionales y nacionales a reevaluar los sistemas de seguridad de las IPEE. Como parte de esta reevaluación, es necesario considerar el posible fallo por elementos externos tales como huracanes, inundaciones y terremotos. El posible fallo de uno o varios de estos sistemas podría ocasionar daños catastróficos no solo a nivel humano, sino material y medioambiental.

En una región como la Península Ibérica, no propensa a huracanes, los posibles fallos de una IPEE provocados por agentes geoclimáticos extremos son las inundaciones y los terremotos. Teniendo en cuenta el primer escenario (inundaciones), las IPEE cuentan con sistemas de evacuación del agua para evitar niveles críticos tanto en la IPEE como en los alrededores. Del mismo modo, en caso de terremoto las IPEE cuentan con sistemas de seguridad en los elementos esenciales (sistemas de primer nivel) para mantener su funcionamiento o, en caso grave, detener completamente su actividad atendiendo a criterios de seguridad. Es precisamente a fallos asociados a terremotos que sistemas de segundo nivel pueden ocasionar, en un tiempo no inmediato, el colapso de sistemas de primer nivel y, por tanto, el colapso de la IPEE.

El caso de estudio se centra en una IPEE que dispone de un sistema de galerías de servicio o trincheras, pudiendo estar abiertas (a cielo abierto o con tapas permeables) o completamente cerradas (cubiertas), ocupadas por distintos sistemas de conducción y/o comunicación (conducciones), y entre ellas, las tuberías del Sistema de Agua de Servicios Esenciales (SASE).

Con objeto de analizar el comportamiento hidráulico del proceso de inundación de las galerías de servicio de una IPEE por rotura de las tuberías del SASE, se ha implementado una nueva metodología en la que se incorpora la simulación numérica, mediante modelo bidimensional, del proceso de llenado de las galerías de servicio con diferentes hipótesis de rotura de las tuberías teniendo en cuenta las distintas ocupaciones de las galerías de servicio por conducciones y otros elementos, así como la posible entrada en carga de diversos tramos de las galerías de servicio. Para poder considerar en el modelo la reducción de la sección útil de las galerías por conducciones y otros elementos, se ha desarrollado un nuevo módulo de cálculo para incluir áreas no-útiles en las secciones de la galería.

METODOLOGÍA

Para poder evaluar el proceso de inundación en aquellos puntos de control (curva cota-tiempo) ha sido necesario implementar una nueva metodología (Figura 1) aplicable no solo al caso de estudio (descrito más adelante), sino también a otras IPEE de similares características.



Figura 1.- Esquema secuencial de la metodología.

Con el fin de poder incorporar el área no-útil en el modelo numérico, ha sido necesario el desarrollo de un nuevo módulo de cálculo en el modelo Iber denominado “ocupación”.

Escenarios de rotura

El primer paso de la metodología consiste en obtener los caudales de salida en los distintos puntos de rotura. Para ello es necesario identificar los puntos donde puede producirse la rotura y el tipo de rotura que se generará en los mismos.

En el caso de estudio, así como en otras IPEE de características similares, el SASE está formado por un conjunto de tuberías conectadas a un sistema de abastecimiento de agua (balsa) que permiten la distribución a presión hasta diferentes puntos de la IPEE. En este caso, el SASE está formado por dos tuberías de diámetros distintos que transcurren por las galerías de servicio y cuyos escenarios de rotura son: por cizalla (rotura total) o por fisura (rotura parcial). La ubicación, tipo de rotura y dimensiones de la rotura provocada por agentes externos de carácter geoclimático (seísmo) fueron definidos por los responsables de la IPEE.

Los caudales de salida en los puntos de rotura se obtuvieron mediante las ecuaciones de flujo en tuberías en régimen turbulento rugoso, considerando pérdidas locales y lineales (Colebrook, 1939), y vertido por orificio en la salida. Atendiendo a la geometría, capacidad de la balsa y al volumen necesario para llenar las galerías, se asumió que la lámina de agua permanecía prácticamente inalterable para calcular los caudales.

Los caudales simulados en el caso de estudio oscilaron entre 0.018 y 0.329 m³/s.

Geometría

En segunda instancia, y no menos importante en la metodología, estaría la definición geométrica de las galerías de servicio por donde transcurre, entre otros, el SASE.

El sistema de galerías de la IPEE a estudio se definen como un conjunto de canales rectos, continuos o discontinuos unidos por tuberías (orificios), con fondo plano, situados a distintas cotas y conectados mediante escalones, con un ancho y altura (gálibo) variables, tanto en cada uno de ellos como a lo largo de su longitud, y, en algunos tramos, pueden verse sometidos a flujo en presión (cubiertas). A todo ello se añade la constante entrada y salida de conducciones en las mismas, así como la presencia de estructuras auxiliares que las sostienen (soportes), y que modifican el espacio disponible para la libre circulación del agua (ocupación).

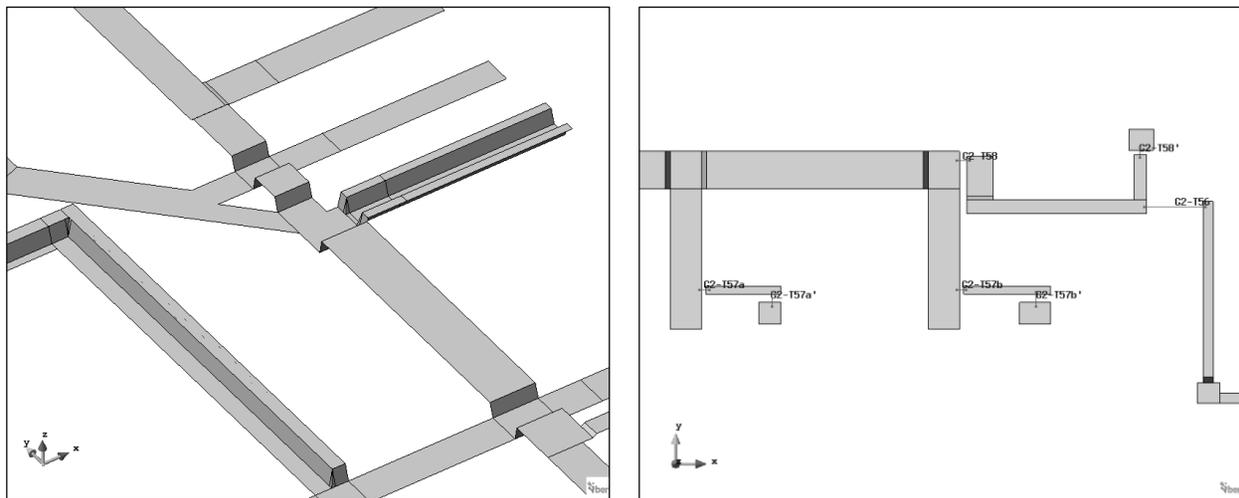


Figura 2.- Detalle de algunas galerías de servicio implementadas en Iber. A) Cambios de sección y alineación, escalones y tramos a diferente nivel. B) Secciones aisladas unidas por orificios.

Debido a la complejidad geométrica de las galerías fue necesario el análisis y tratamiento previo de la información topográfica para poder aplicar, sin perder precisión, una serie de simplificaciones que permitieran realizar la simulación numérica correctamente (disposición en alzado de las tuberías, situación de los soportes, entrada y salida de conducciones, identificación de zonas cubiertas, cambios de gálibo, muros interiores, cambios de rasante, etc.).

La geometría fue definida en CAD, contrastada con datos de campo y exportada al modelo numérico Iber (Figura 2.A y 2.B).

Modelo numérico

Iber (Bladé et al., 2014) es un modelo numérico de simulación de flujo turbulento en lámina libre en régimen no-permanente y de procesos medioambientales en hidráulica fluvial. La herramienta ha sido desarrollada conjuntamente entre el Instituto Flumen (Universitat Politècnica de Catalunya – CIMNE), el grupo GEAMA de la Universidade da Coruña y CIMNE, con la colaboración del Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX (Ministerio de Fomento y Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente de España).

Iber resuelve las ecuaciones de aguas poco profundas en dos dimensiones, o ecuaciones de Saint Venant bidimensionales, sobre una malla de volúmenes finitos, que puede ser irregular y no estructurada, formada por triángulos, cuadriláteros o combinaciones de ambos. Para su resolución Iber utiliza el método de los volúmenes finitos con el esquema de Roe.

Iber permite considerar también la interacción del flujo con diversas tipologías de estructuras, entre ellas tramos cortos de tuberías o alcantarillas (orificios). Las versiones recientes de Iber incorporan la posibilidad de considerar el flujo en colectores (cubiertas), tanto en lámina libre como a presión, mediante la aproximación de la ranura de Preissmann (Aragón, 2013). Por esta razón se consideró que el modelo Iber es una herramienta adecuada para poder conseguir una descripción detallada del flujo en las galerías.

Ocupación

El comportamiento hidráulico del fluido en una sección depende, entre otras variables, del área libre que esta disponga, es decir, de la sección útil por la que el fluido puede circular libremente.

Con el fin de considerar la reducción de la sección en las galerías de servicio por la disposición de conducciones y otros elementos (principalmente soportes de las propias conducciones), se ha desarrollado un nuevo módulo de cálculo en Iber que permite tener en cuenta la ocupación de una zona (sección útil). Para ello se modifica el área de cada elemento de la malla de cálculo o volumen finito.

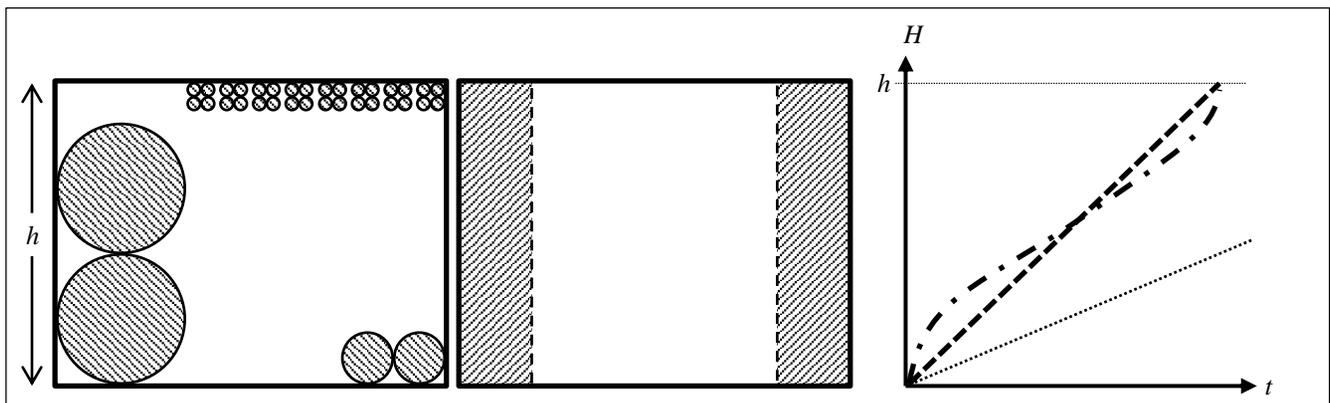


Figura 3.- Representación de una sección ocupada por diversos conductos. A) Alzado de una sección real con tuberías distribuidas en la sección. B) Alzado del esquema de representación de una sección en Iber (tramado: sección no-útil). C) Gráfica cualitativa de la evolución del calado en una galería de iguales dimensiones: sección real (- · -); sección en Iber (- -); sección sin ocupación (···).

Físicamente el fenómeno que se desea reproducir es aquel que provoca la circulación más rápida del agua por los tramos con una ocupación no-nula (como si de un estrechamiento se tratase), y como consecuencia, que el agua alcance antes los puntos de control. Si la ocupación es no-nula, para un mismo caudal, se espera que el tramo se llene antes que si su ocupación es nula.

El índice de ocupación se ha introducido como una modificación de la ecuación de conservación de la masa o de continuidad [1]:

$$\frac{\delta h}{\delta t} + \frac{\delta q_x}{\delta x} + \frac{\delta q_y}{\delta y} = 0 \quad [1]$$

siendo h el calado o tirante de la lámina de agua, q_x y q_y el caudal específico en dirección X e Y respectivamente.

Con las modificaciones implementadas, expresado tal y como el modelo numérico lo resolvería, el calado en un elemento i en un instante $n+1$ (h_i^{n+1}) se calcula a partir del calado en el instante anterior (h_i^n) mediante la expresión [2]:

$$h_i^{n+1} = h_i^n - \frac{\Delta t}{V_i(1-i_o)} \sum_{k=1}^{n_l} Q_{i,k}^n \quad [2]$$

donde Δt es el intervalo de tiempo de cálculo, V_i el área del elemento i , n_l es el número de lados del elemento, $Q_{i,k}^n$ el caudal de salida del elemento i por el lado k en el instante n , e i_o es el índice de ocupación en tanto por uno.

Validación del modelo

Con el fin de dar validez al modelo, se han llevado a cabo una serie de modelos con geometrías simples en los que se pudiera determinar analíticamente los resultados.

Uno de los ejemplos realizados ha sido modelo con una geometría basada en una batería de canales rectangulares, rectilíneos y completamente horizontales, asimilables a galerías, que han sido situados en paralelo para poder comparar visualmente los resultados.

Los canales tenían una longitud de 3.33 metros y un ancho de 0.5 metros. Para cada uno de ellos se definió un índice de ocupación distinto, situado en la parte central de 0.67 metros de longitud y que ocupa todo el ancho del canal (Figura 4).

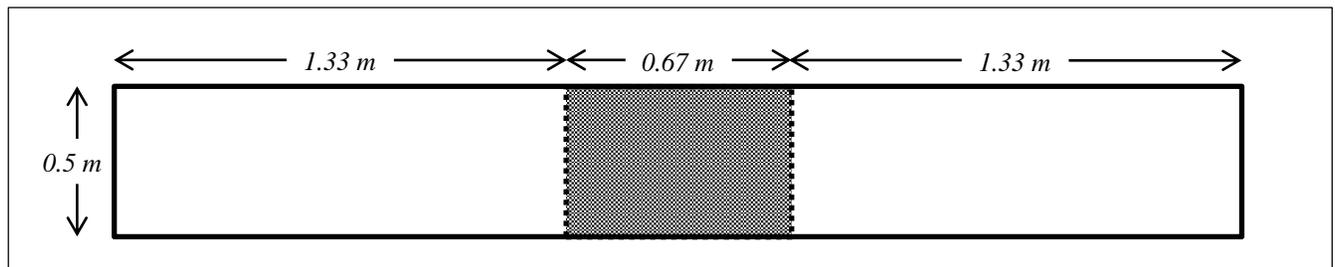


Figura 4.- Representación del canal. En tramado gris se muestra la ubicación y tamaño de la zona con índice de ocupación diferente de cero.

Los índices de ocupación analizados para este ejemplo han sido del 0, 20, 40 y 60 %, siendo el primero de ellos (0 %) el índice de ocupación de control. En la Figura 5.A se puede observar la representación del valor de dicho índice.

Las condiciones del modelo han sido: caudal constante de entrada (parte inferior) de valor $0.25 \text{ m}^3/\text{s}$ para cada canal; coeficiente de rugosidad constante (0.025); y condición de salida en régimen subcrítico. Se simuló hasta alcanzar el régimen estacionario (caudal de entrada igual al de salida).

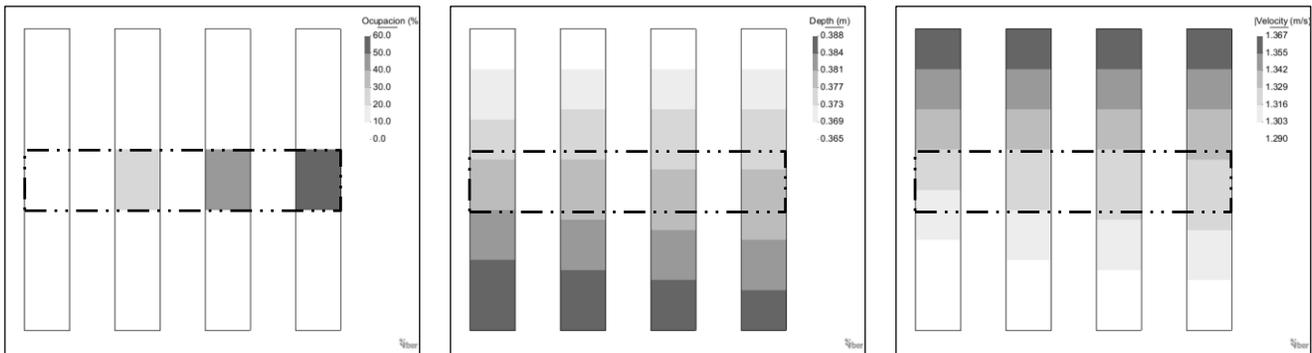


Figura 5.- Análisis de sensibilidad del índice de ocupación del 0, 20, 40 y 60 % para la velocidad de circulación. El rectángulo (.....) muestra la ubicación de la zona con ocupación. A) Representación del índice de ocupación. B) Campo de calados. C) Campo de velocidades.

En la Figura 6.A y B se muestra la influencia del índice de ocupación en el comportamiento hidrodinámico. Cuando se llegó al régimen estacionario, se produce un rango de mayores velocidades en la zona central, donde se había indicado un índice de ocupación diferente de cero. Sucede lo opuesto en referencia al campo de calados, reproduciendo el efecto “estrechamiento” descrito anteriormente. La tendencia lineal creciente de la velocidad y lineal decreciente del calado se debe a la influencia de las condiciones de contorno (salida).

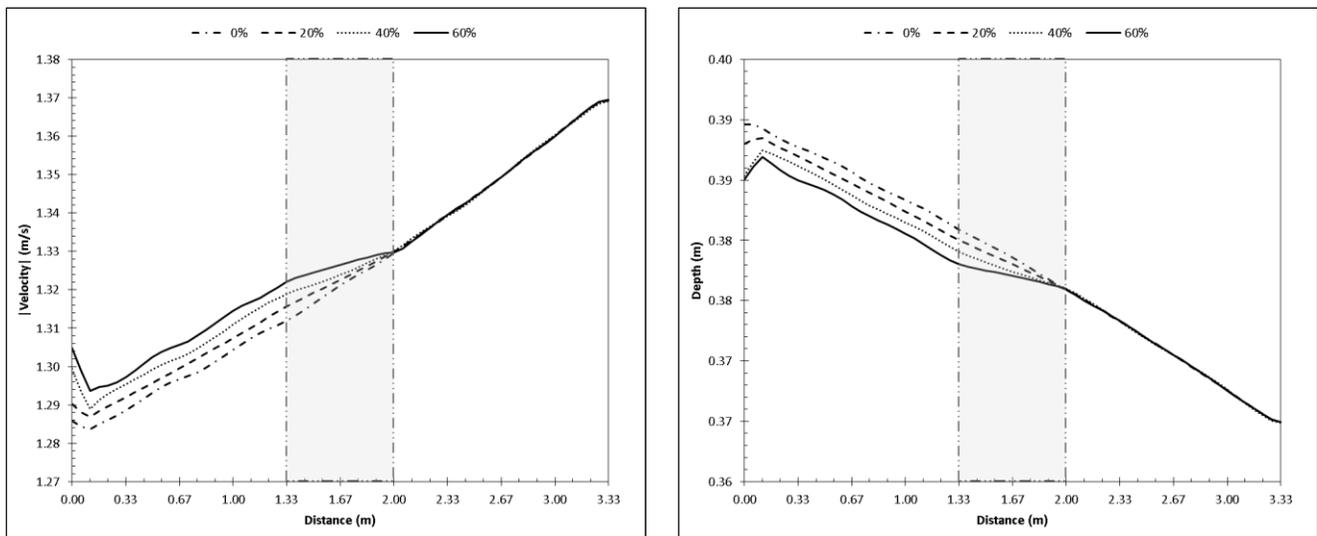


Figura 6.- Análisis de sensibilidad del índice de ocupación del 0, 20, 40 y 60 % para la velocidad de circulación. El rectángulo (.....) muestra la ubicación de la zona con ocupación. A) Gráfica del campo de velocidad a lo largo del canal. B) Gráfica de evolución del calado a lo largo del canal.

Otro de los casos estudiados ha sido la comprobación de si el llenado de un canal se producía más rápido en canales con un mayor índice de ocupación. La geometría empleada en este caso fue la misma que en el caso anterior (Figura 4) salvo que el índice de ocupación, en caso de existir, está aplicado a todo el canal. El caudal de entrada se redujo a $0.1 \text{ m}^3/\text{s}$ para que el llenado fuese más

progresivo. Se impuso que la cota de llenado se alcanzara para 1 metro, por lo que se implementó una condición de salida tipo vertedero a dicha altura (parte superior del canal) situada en el lado opuesto a la condición de entrada (parte inferior del canal).

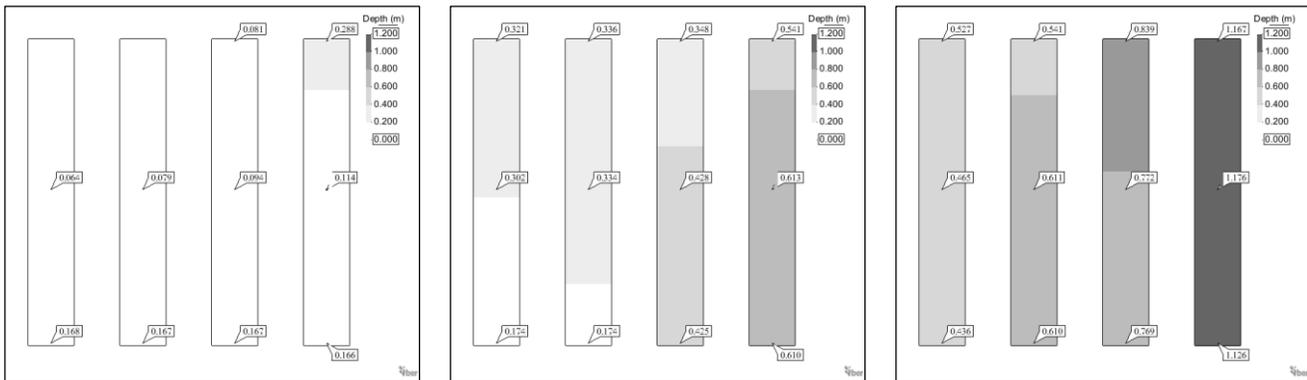


Figura 7.- Análisis de sensibilidad del índice de ocupación del 0, 20, 40 y 60 % para el llenado. A) Campo de calados a 1 segundo. B) Campo de calados a 4 segundos. C) Campo de calados a 8 segundos.

La composición de imágenes de la Figura 7 muestra la evolución de la lámina de agua en tres instantes de tiempo diferentes (1, 4 y 8 segundos). Se aprecia como el canal con una mayor ocupación (del 60 % y situado a la derecha) presenta mayores calados a instantes tempranos fruto de la reducción de la sección y, por ende, de la capacidad de almacenaje. En el instante 8 segundos de simulación ya se produjo el llenado completo del canal de 60 % de índice de ocupación mientras que en el resto no (cota de agua por encima de la cota de vertido).

El volumen del canal en función del índice de ocupación evaluado es de 1.667, 1.333, 1 y 0.667 m³. Por tanto, el tiempo de llenado teórico de cada uno de los es de 16.7, 13.3, 10 y 6.7 segundos, respectivamente. Como se puede comprobar en la Figura 8 se cumplen los tiempos de llenado teóricos.

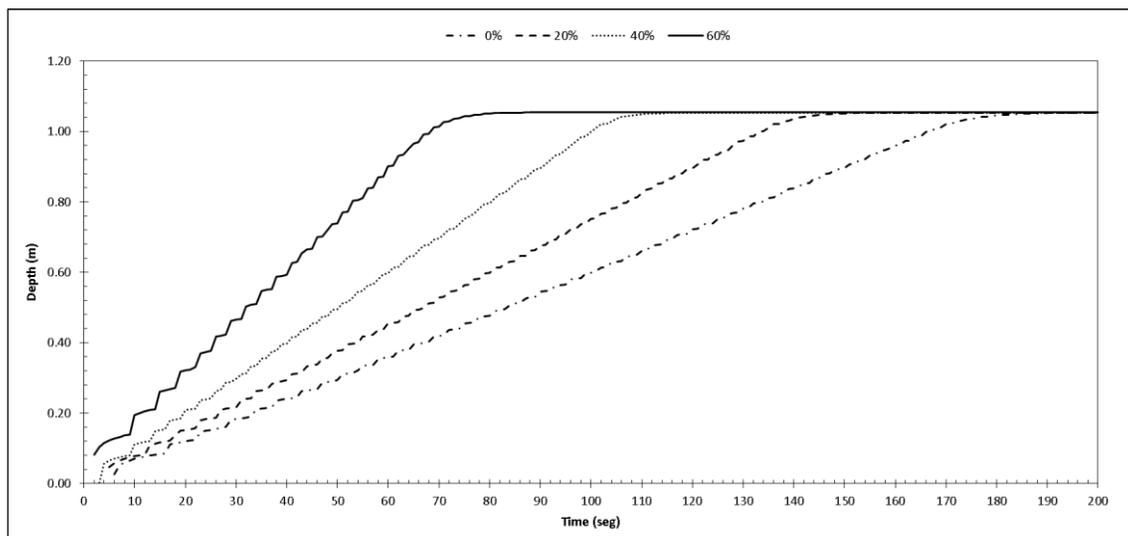


Figura 8.- Análisis de sensibilidad del índice de ocupación del 0, 20, 40 y 60 % para el llenado. Evolución del calado en cada uno de los canales.

El efecto de la ocupación es más acusado cuanto más extensa sea la zona y mayor sea el índice de ocupación. Se puede concluir que el nuevo módulo de Iber que permite tener en cuenta la reducción

de la sección útil mediante un índice de ocupación, es válido para reproducir el fenómeno de ocupación en geometrías tipo canal, y por tanto es aplicable a galerías de servicio cuya disposición geométrica se pueda asimilar a la de un canal.

CASO DE ESTUDIO

El caso de estudio se centró en la evaluación del proceso de inundación de las galerías de servicio de una IPEE por rotura del SASE y en la obtención de curvas cota-tiempo en puntos de control de la IPEE. Estos puntos de control se situaban en diferentes zonas de las galerías de servicio y, cada uno de ellos, a una distancia distinta respecto a los puntos de rotura del SASE. En este caso se estudió la rotura de las tuberías del SASE de manera independiente.

La geometría del modelo numérico, realizada en CAD e importada a Iber, incluye la geometría completa en planta (tramos continuos y discontinuos conectados mediante alcantarillas), en alzado (considerando escalones), ambos representados en la Figura 2, y aquellos tramos que pudieran entrar en presión (cubiertas). Los modelos, con geometrías y condiciones idénticas, fueron modelados para distintas hipótesis de cálculo (caudales por rotura del SASE). Se impuso un vertedero a la cota del terreno como condición de salida del modelo salvo en las zonas con cubierta.

Las zonas sujetas a entrar en presión (cubiertas, Figura 9.A) y las que tienen un índice de ocupación distinto de cero (Figura 9.B) juegan un papel importante en el comportamiento hidráulico del flujo, ya que una zona cuya ocupación sea elevada y tenga un gálibo reducido (cota inferior de la cubierta cercana a la cota de la solera de la galería), será más propensa a entrar en carga (flujo en presión), y como consecuencia provocará la inundación más rápida de otras zonas. En el caso de estudio se pudo observar este fenómeno en diversos puntos de las galerías de servicio.

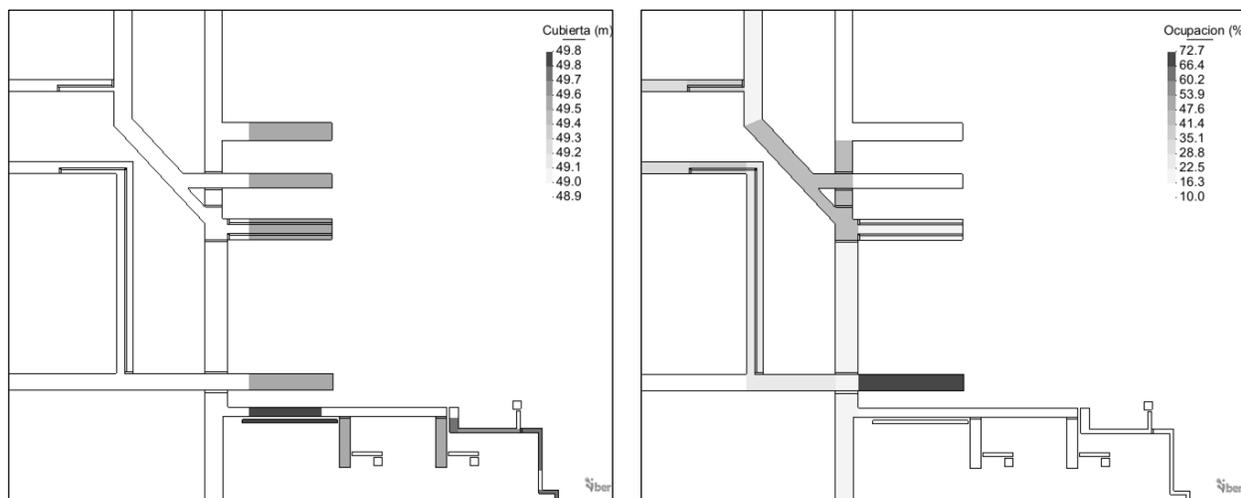


Figura 9.- Detalle de algunas galerías de servicio implementadas en Iber. A) Distribución de tramos con igual cota de cubierta (paramento inferior). B) Distribución de tramos con igual índice de ocupación en %.

Por otro lado, las tuberías que transcurren por el SASE entran y salen de las galerías a distintos lugares de la IPEE y viceversa, por lo que no fue posible considerar un único índice de ocupación para todas las galerías. Para ello se dividieron las galerías en subtramos y se determinó la sección total de cada uno de ellas y la sección de tuberías basándose en la documentación aportada y considerando dos hipótesis que permitieran obtener resultados del lado de la seguridad: i) si el índice de ocupación era menor que el 10 %, se tomaron como mínimo un 10 % de ocupación; y ii) si el índice de ocupación era igual o mayor que el 10 %, el índice de ocupación se incrementó por un factor de seguridad de 1.25.

El índice de ocupación, por tanto, varió entre valores del 10 al 100 %. Valores cercanos a 10 % indicaban poca ocupación (reducido número de tuberías), mientras que valores cercanos al 100 % indicaban una alta ocupación.

Todos los escenarios analizados mostraron resultados satisfactorios. Dado que los caudales analizados eran bajos en comparación con el volumen de las galerías, el flujo alcanzó los puntos de control en instantes de tiempo altos. Sin embargo, hubo tramos donde se había impuesto una cubierta y estos entraron en presión. También se realizó transferencia de caudal entre galerías conectadas por orificios. Quedó patente la importancia ambos en el proceso de inundación de las galerías.

Análisis de sensibilidad

Más allá de los resultados del estudio, es importante verificar la influencia de aquellas variables que pudieran modificar considerablemente los resultados. Para ello se realizó un estudio de sensibilidad para el coeficiente de rugosidad (Manning) y para el índice de ocupación.

En el caso del coeficiente de rugosidad se escogió el escenario de cálculo que mayor repercusión tenía en los puntos de control por estar a una distancia y tener un caudal más críticos. Se analizó la variación de un $\pm 20\%$ con respecto al coeficiente empleado en el estudio, de $0.018 \text{ s/m}^{-1/3}$. Se tomaron 4 puntos en el modelo para analizar las diferencias.

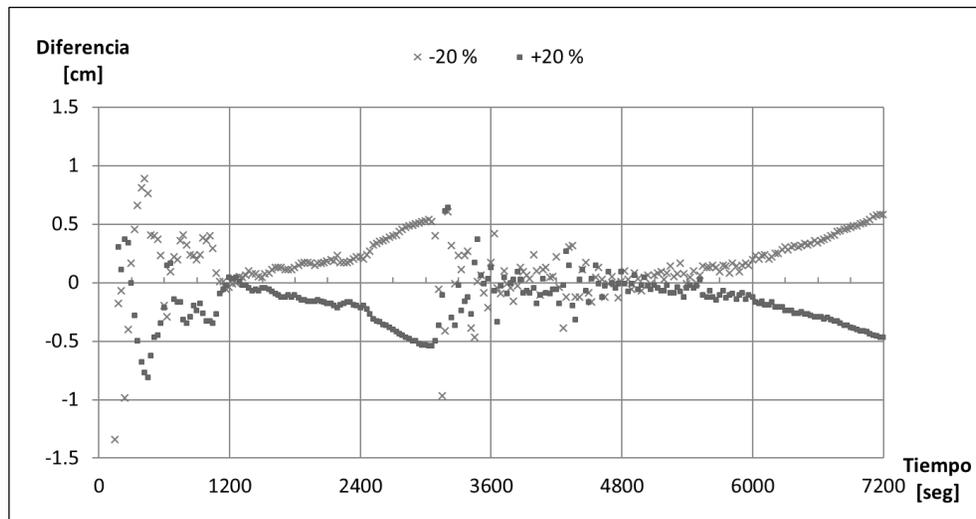


Figura 10.- Coeficiente de Manning. Diferencias (en cm) de la cota de agua en uno de los puntos analizados.

En la Figura 10 se muestra, en uno de los puntos analizados, cómo a lo largo de la simulación se producen diferencias escasas en la cota de agua (menos de 1 cm). En los primeros instantes de tiempo las diferencias son más acusadas, siendo valores de cota correspondientes a valores bajos del coeficiente de rugosidad, y viceversa. Paradójicamente esta tendencia se invierte, para valores bajos del coeficiente de Manning se produjeron mayores cotas de agua, y viceversa. Este fenómeno está asociado a que el proceso de llenado de las galerías se produce más rápido para coeficientes bajos de y más lento para coeficientes altos de Manning. Este patrón se reprodujo en los todos los puntos evaluados

En el caso del índice de ocupación, se comparó uno de los escenarios del estudio con la ocupación real y sin ocupación en las galerías. Se analizó uno de los puntos de control, y los resultados obtenidos (Figura 11) mostraron i) una rápida respuesta para el caso con ocupación (el agua llega antes) y ii) la cota del agua es mayor. Por tanto, para un mismo punto de control, la cota crítica se alcanzó en tiempos más tempranos confiriendo un menor margen de maniobra en caso de rotura del SASE.

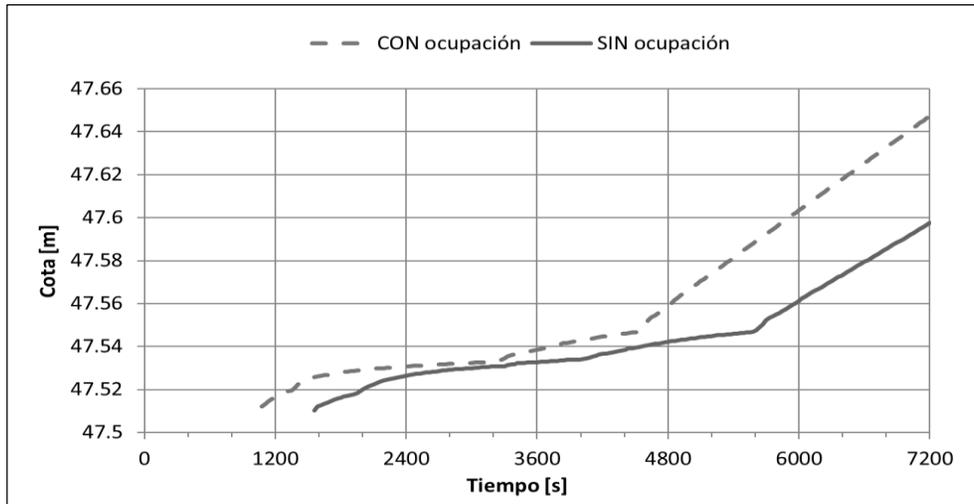


Figura 11.- Índice de ocupación. Diferencias (en cm) de la cota de agua en un punto de control.

CONCLUSIONES

La metodología desarrollada ha permitido calcular satisfactoriamente el proceso de llenado de las galerías de una IPEE por rotura del SASE, considerando las singularidades de la geometría tales como: variaciones bruscas de la rasante (escalones) y de la sección (cambios geométricos); conexiones entre galerías por orificios (alcantarillas); reducción de la sección útil de las galerías por la ocupación de las mismas por varios sistemas de conducciones que pueden entrar y salir de la galería; y la posible entrada en carga de los tramos cubiertos por estructuras o viales (flujo en presión).

El nuevo módulo de Iber (“ocupación”) presentó resultados satisfactorios en el comportamiento hidráulico del fluido en las galerías de servicio, representando adecuadamente el fenómeno físico real y permitiendo considerar la influencia de la ocupación de las galerías. Ello ha dado como resultado una respuesta más rápida en todos los puntos de control (el agua llega antes al punto de control por un llenado más rápido de la galería y mayor velocidad en los tramos con mayor índice de ocupación).

REFERENCIAS

- Aragón Hernández, J.L.** (2013). *Modelación numérica integrada de los procesos hidráulicos en el drenaje urbano*. Institut Flumen, Universitat Politècnica de Catalunya. *Tesis doctoral*.
- Bladé, E., Cea, L., Corestein, G., Escolano, E., Puertas, J., Vázquez-Cendón, E., Dolz, J., y Coll, A.** (2014). “Iber: herramienta de simulación numérica del flujo en ríos”. *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*, CIMNE (Universitat Politècnica de Catalunya), 30(1), 1–10.
- Colebrook, C.F.** (1939). “Turbulent flow in pipes, with particular reference to the transition region between smooth and rough pipe laws”. *Journal of the Institution of Civil Engineers* (London).