

Metodología para la evaluación del riesgo y la priorización de inversiones en el mantenimiento de obras de drenaje transversal

Javier Campos^a, Javier González^b, Sarai Díaz^c y Álvaro Galán^d

^aHidralab Spin-Off UCLM, Doctorado en Territorio, Infraestructuras y Medio Ambiente. Edificio Politécnico Av. Camilo José Cela s/n, 13071, Ciudad Real (España). E-mail: Javier.Campos@hidralab.com, ^bUniversidad de Castilla-La Mancha, ETSI Caminos, Canales y Puertos Ciudad Real, Departamento de Ingeniería Civil y de la Edificación. Edificio Politécnico Av. Camilo José Cela s/n, 13071, Ciudad Real (España). E-mail: Javier.Gonzalez@uclm.es, ^cUniversidad de Castilla-La Mancha, ETSI Caminos, Canales y Puertos Ciudad Real, Departamento de Ingeniería Civil y de la Edificación. Edificio Politécnico Av. Camilo José Cela s/n, 13071, Ciudad Real (España). E-mail: Sarai.Diaz@uclm.es y ^dUniversidad de Castilla-La Mancha, ETSI Caminos, Canales y Puertos Ciudad Real, Departamento de Ingeniería Civil y de la Edificación. Edificio Politécnico Av. Camilo José Cela s/n, 13071, Ciudad Real (España). E-mail: Alvaro.Galan@uclm.es

Línea temática D | Estructuras hidráulicas

RESUMEN

Las obras de drenaje transversal (ODT) son componentes esenciales de cualquier infraestructura de transporte. Si bien se presentan en gran número, el nivel de atención prestado a su correcto mantenimiento es en muchos casos una cuestión secundaria en el ámbito del mantenimiento ordinario. El objetivo del presente trabajo es presentar una metodología que dé respuesta a la necesidad de priorización de inversiones en el mantenimiento de ODTs. Dicha metodología, basada en técnicas de evaluación de riesgos permite obtener un diagnóstico preliminar del estado actual del parque de obras de drenaje transversal, identificando patologías y factores de riesgo a considerar en la óptima gestión de su mantenimiento. A modo de ejemplo, se presentan los principales resultados obtenidos en la red de carreteras de la provincia de Ciudad Real y en última instancia, una discusión del potencial de la metodología y las futuras líneas de investigación.

INTRODUCCIÓN

Las obras de drenaje transversal (ODT) son elementos esenciales de cualquier infraestructura de transporte. Si bien la entidad de dichas obras suscita que su nivel de relevancia (en cuanto a labores de mantenimiento ordinario) a menudo se considere mucho menor que el de otras estructuras de mayor entidad, como pontones y puentes, se ha de tener en cuenta que un eventual fallo en este tipo de elementos provoca igualmente el fallo del servicio global en la infraestructura. Actualmente existe a nivel nacional una regulación técnica relativa al diseño de este tipo de obras (Ministerio de Fomento, 2015), sin embargo no se tratan aspectos relativos a su mantenimiento y a la evaluación de su nivel de servicio en el tiempo. La experiencia en otros países muestra que contar con información actualizada del estado de estas estructuras es crucial en la gestión del mantenimiento de cualquier infraestructura de transporte (Federal Highway Administration, 2010) así como a la hora de planificar posibles actuaciones preventivas (Balkham et al., 2010). A medida que muchas de estas estructuras alcanzan el límite de su vida útil, las administraciones se ven en la necesidad de programar su reposición o reparación (Najafi y Bhattachar, 2010), sin embargo actualmente no se cuenta con una metodología objetiva para priorizar dichas actuaciones por lo que a menudo estas se acometen una vez se ha detectado la incidencia en el servicio (actuaciones de tipo correctivo).



Figura 1 | Ejemplos de corte del servicio en infraestructura fruto del fallo de una obra de drenaje transversal: colapso estructural, sobrevertido por falta de capacidad hidráulica.

El objetivo de este trabajo es por tanto presentar una metodología objetiva para el análisis preliminar del riesgo de fallo en obras de drenaje transversal, base necesaria para construir modelos de priorización de inversiones en mantenimiento (actuaciones preventivas). La metodología principal se basa en la combinación de modelos probabilísticos asociados a los distintos modos o mecanismos de fallo que puede presentar una obra de drenaje transversal, en combinación con la repercusión o consecuencias que dicho fallo produce sobre el nivel global de servicio de la infraestructura, obteniendo en última instancia un nivel de riesgo global asociado a la ODT (Roads and Traffic Authority, 2010). La estimación de la probabilidad de fallo se basa en el estudio de los modos de fallo, situaciones donde se produce la caída total del nivel de servicio en la infraestructura y que están relacionados con fenómenos de colapso estructural, inestabilidad del terraplén, erosión y flujo sobre rasante. Con objeto de estimar la probabilidad de fallo en cada caso es necesario contar con modelos de evolución global del deterioro (Salem et al., 2012) así como llevar a cabo la caracterización hidrológica-hidráulica de la obra de drenaje transversal, realizar estudios preliminares de estabilidad en el terraplén y de erosión local en las embocaduras (Galán et al., 2016). Por otra parte, las consecuencias de la caída del servicio en la infraestructura implica no solo costes puramente económicos (Perrin and Jhaveri, 2003), que repercuten sobre el propio organismo gestor de la infraestructura, sino también para el conjunto de la sociedad.

Puesto que el objetivo principal del trabajo es la aplicación de la metodología de forma global al conjunto de obras de drenaje transversal de una infraestructura de transporte es prioritario poder abordar de forma conjunta la caracterización del nivel de riesgo para un gran número de elementos, por lo que para este efecto han sido desarrolladas aplicaciones destinadas a evaluar de forma masiva el conjunto de estudios requeridos para dicho análisis. El alcance del desarrollo de la metodología incluye el estudio de más de 750 obras de drenaje transversal situadas en vías de comunicación de distinta entidad dentro de la provincia de Ciudad Real.

La priorización de inversiones en el mantenimiento vendrá determinada por la rentabilidad de las actuaciones tipo previstas para una determinada obra de drenaje transversal según la naturaleza y la entidad de las patologías observadas. De esta forma no solo es posible priorizar el tipo de actuación necesaria en un determinado momento según criterios económicos, sino también analizar y comparar la rentabilidad del conjunto global de actuaciones preventivas a llevar a cabo en una infraestructura de transporte o en el conjunto de la red.

En el presente documento se analiza en primer lugar la metodología propuesta para el análisis de riesgos en obras de drenaje transversal, posteriormente se presentan los resultados obtenidos para un conjunto de obras de drenaje evaluadas en la provincia de Ciudad Real y en último lugar, se discute el potencial de aplicación de la metodología a modelos de priorización de inversiones basados en criterios de reducción del riesgo.

METODOLOGÍA

La metodología propuesta se basa en la cuantificación del nivel de riesgo de fallo asociado a obras de drenaje transversal. Se define el fallo como todo evento que conlleve un corte parcial o total del tráfico en la vía debido bien al colapso estructural de alguno de los elementos que componen la ODT o bien a deficiencias relacionadas con la falta de capacidad hidráulica. En todo caso, el nivel de riesgo se evalúa como la combinación de la probabilidad de que se produzca un determinado evento de fallo (llamados mecanismos de fallo) y del impacto o consecuencias derivadas de dicho evento de fallo.

Resulta evidente que para llevar a cabo la caracterización del nivel de riesgo asociado a cada elemento es preciso realizar una evaluación en campo de los diferentes parámetros necesarios para caracterizar el estado actual y las características de la ODT. Para ello es necesario realizar una caracterización de los siguientes componentes o zonas:

- Conducto/s y embocaduras: caracterización de su geometría, características básicas y nivel de estado actual (relativo al deterioro estructural).
- Taludes: caracterización de su geometría, características generales y posibles evidencias de inestabilidad o erosión.
- Cauce interceptado: caracterización aproximada de su geometría y características generales.
- Áreas adyacentes a la estructura: determinación de la ubicación y caracterización general de elementos que puedan verse afectados por un eventual fallo de la ODT: construcciones, cultivos, líneas de servicios básicos, otras infraestructuras de transporte, etc.

Junto con la evaluación en campo, será necesario un análisis en gabinete para determinar el resto de parámetros necesarios para la evaluación del nivel de probabilidad y de impacto: análisis de la intensidad de tráfico y características de la vía, análisis de las condiciones de la cuenca de aportación del cauce interceptado, etc. El objetivo principal es obtener un diagnóstico preliminar del riesgo de fallo para un elevado número de elementos, de modo que posteriormente sea posible priorizar el orden de atención requerido en cada caso de forma objetiva.

Una vez valorado el nivel de riesgo, se pueden priorizar las actuaciones preventivas a llevar a cabo en cada caso atendiendo a criterios de reducción del riesgo. Según el diagnóstico preliminar, se identifican las patologías o factores de riesgo clave que afectan a la obra de drenaje transversal y en función de estos se proponen una serie de actuaciones tipo destinadas a subsanar las deficiencias encontradas. Cada actuación posee un coste determinado y provoca una repercusión económica definida como la reducción del riesgo anual de fallo que provoca dicha actuación, es decir, en función de estos parámetros es posible realizar un estudio de rentabilidad de cada una de las actuaciones previstas y en última instancia seleccionar la actuación o actuaciones en cada caso atendiendo a criterios de rentabilidad a corto, medio y largo plazo.

Las reparaciones o reposiciones seleccionadas y priorizadas, se encajan en la disponibilidad presupuestaria, dando lugar a las actuaciones a emprender en el periodo de estudio.

Probabilidad de fallo

La probabilidad anual de fallo de una ODT se define como la suma de las probabilidades de los distintos eventos o mecanismos de fallo que pueden provocar una corte parcial o total del nivel de servicio en la vía objeto de estudio. Se definen una serie de mecanismos de fallo agrupados en cuatro modos de fallo principales como situaciones o eventos tipo en los que se puede producir el fallo de la ODT (Roads and Traffic Authority, 2010) que se describen a continuación:

- Modo de fallo 1: Colapso estructural. Agrupa los siguientes mecanismos:
 - 1.1. Colapso estructural del conducto.
- Modo de fallo 2: Inestabilidad de los taludes del terraplén. Agrupa los siguientes mecanismos:
 - 2.1. Inestabilidad de taludes por saturación del terraplén.
 - 2.2. Inestabilidad de taludes por filtraciones desde el conducto.
 - 2.3. Inestabilidad de taludes por colapso del tímpano en la embocadura.
 - 2.4. Inestabilidad de taludes por erosión localizada en la embocadura.
- Modo de fallo 3: Colapso del terraplén por desarrollo de fenómenos de erosión interna (“piping”).
 - 3.1. Erosión interna localizada por flujos hacia el conducto.
 - 3.2. Erosión interna en el terraplén (tubificación).
 - 3.3. Erosión interna debido a filtraciones desde el conducto.
- Modo de fallo 4: Flujos sobre rasante.
 - 4.1. Flujo sobre rasante y erosión superficial en taludes (formación de cárcavas).
 - 4.2. Flujos divergentes en áreas adyacentes.

Puesto que todos estos mecanismos se producen de forma independiente, la probabilidad total de fallo se calcula como la suma de las probabilidades asociadas a cada mecanismo de fallo. Para un determinado mecanismo de fallo, el cálculo de la probabilidad se aborda mediante el producto de las probabilidades una serie de eventos que se han de producir de forma secuencial para que se produzca cierto mecanismo. De forma general se pueden clasificar estos eventos en dos categorías:

- Eventos precedentes: se trata de los eventos que preceden u originan la situación de fallo: dependen en la mayoría de los casos de la probabilidad con la que se produce el sobrevertido en la calzada (análisis hidrológico y de capacidad de la ODT) y del nivel de estado actual de los distintos componentes de la estructura (conductos, embocaduras, etc.)
- Eventos desencadenantes: se trata de los eventos que preceden al fallo y que dependen de las características y la geometría básica de los distintos elementos que componen la ODT.

A destacar que en cada caso es necesario realizar una serie de estudios específicos al efecto para poder evaluar la probabilidad de ciertos eventos anteriormente descritos:

- Caracterización hidrológica de la cuenca de aportación y cálculo hidráulico de la capacidad hidráulica de la ODT mediante la aplicación de modelos hidrológicos semidistribuidos.
- Caracterización de la estabilidad de los taludes ante fenómenos de saturación del terraplén.
- Caracterización de la estabilidad de taludes ante fenómenos erosivos bajo las embocaduras (Galán et al., 2016).

La integración de estos estudios específicos a la evaluación global de la probabilidad de fallo de cada mecanismo estudiado es necesaria para identificar patologías asociadas a posibles deficiencias en la capacidad hidráulica de la obra de

drenaje transversal. Por otra parte, la probabilidad de cada mecanismo de fallo se puede disgregar adicionalmente en una serie de patologías tipo o factores de riesgo según la naturaleza del mecanismo:

- Obstrucción parcial o total del conducto/s.
- Deterioro estructural en el interior del conducto/s.
- Deterioro estructural en las embocaduras.
- Signos de erosión bajo las embocaduras.
- Deficiencias en la capacidad hidráulica del conducto/s.



Figura 2 | Ejemplos de patologías tipo o factores de riesgo: obstrucción del conducto/s, deterioro estructural del conducto, signos de erosión local bajo las embocaduras.

La identificación del grado de influencia de cada uno de los factores de riesgo/patologías en cada mecanismo de fallo es clave a la hora de identificar las medidas a adoptar para mitigar el riesgo de fallo de la ODT en cada caso.

Consecuencias del fallo/Impacto

Las consecuencias derivadas del evento de fallo se definen como el impacto socioeconómico tanto directo como indirecto que produce la caída del nivel de servicio en la vía debido al fallo de la obra de drenaje transversal. Dichas consecuencias se pueden clasificar en dos tipos principales:

- Daños sobre los usuarios de la vía: análisis cualitativo del riesgo de daños sobre vidas humanas evaluado como la combinación de la vulnerabilidad del usuario en caso de accidente provocado por el evento del fallo (según las condiciones de seguridad en el tramo, velocidad máxima permitida, altura de tierras del terraplén, etc.) y de la probabilidad temporal asociada al paso de un determinado usuario por la vía en el momento del fallo (directamente relacionada con la intensidad media de tráfico en la vía).
- Daños sobre la propia infraestructura, propiedades situadas en áreas adyacentes y costes derivados de la caída de servicio en la vía: análisis cuantitativo del riesgo por perjuicio económico sobre el gestor de la infraestructura y sobre la sociedad en conjunto. El impacto económico total se evalúa según las siguientes categorías:
 - Consecuencias económicas directas: se trata de aquellos costes que recaen directamente sobre el gestor de la infraestructura. Engloban los costes de restitución de la infraestructura afectados por un determinado mecanismo de fallo.
 - Consecuencias económicas indirectas: se trata de aquellos costes que recaen sobre el conjunto de la sociedad:
 - Coste de interrupción del servicio en la vía: calculado como el coste asociado al incremento del tiempo de viaje que se deriva de la circulación por vías alternativas de la red de transporte (Perrin and Jhaveri, 2003).

- Coste de indemnización por impacto/deslizamiento de tierras debido a inestabilidad del talud: a aplicar sobre propiedades situadas en zonas adyacentes como construcciones y líneas de servicios básicos. El nivel de afección dependerá de la vulnerabilidad del elemento (según el tipo) y de la gravedad de la afección (combinando altura de tierras y distancia del elemento a la plataforma).
- Coste de indemnización por anegamiento de propiedades aguas arriba: anegamiento provocado por deficiencias en la capacidad hidráulica de la ODT. El coste total dependerá de la superficie afectada en un año medio, la vulnerabilidad de las propiedades afectadas (cultivos) y del tiempo de retención de la masa de agua.
- Coste de interrupción del servicio en vías adyacentes: coste asociado al corte de interrupción del servicio en vías adyacentes aguas arriba debido anegamiento provocado por deficiencias en la capacidad hidráulica de la ODT objeto de estudio.

Cabe destacar que el impacto económico total vendrá determinado por la naturaleza del fallo en cada mecanismo, considerando que los elementos afectados en cada caso vienen determinados por los efectos del fallo sobre los usuarios de la vía, los elementos adyacentes y la propia infraestructura.

Análisis del riesgo anual de fallo

Una vez obtenida la probabilidad anual de fallo asociada a cada uno de los diez mecanismos estudiados y conociendo el nivel de impacto económico y social asociado a cada ODT es posible determinar el nivel de riesgo preliminar asociado a dicho elemento. El nivel de riesgo asociado a una determinada obra de drenaje transversal es el resultado directo de la integración de las probabilidades anuales de fallo y el impacto económico y social eventual asociado a cada mecanismo de fallo. La naturaleza de estos mecanismos lleva a considerar que estos eventos son independientes por lo que el riesgo total será la suma de todos los riesgos evaluados para un mismo elemento.

RESULTADOS

En el presente apartado se muestran las principales conclusiones extraídas de la aplicación de la metodología de evaluación del riesgo a un conjunto de 757 obras de drenaje transversal situadas en la provincia de Ciudad Real. El conjunto abarca distintas tipologías de conductos, distintos materiales y estados de deterioro, etc. Por otra parte, la muestra abarca un área geográfica considerablemente amplia por lo que desde el punto de vista de la topografía y de las características de las cuencas de aportación se considera lo suficientemente representativa. Asimismo, se han evaluado obras de drenaje transversal en distintas vías de comunicación (autovías, carreteras nacionales y carreteras autonómicas) con diferentes intensidades de tráfico con objeto de cubrir completamente el espectro de impacto socioeconómico. Se han reconocido una serie de peculiaridades a tener en cuenta durante el proceso de diagnóstico que se enumeran a continuación:

- Evaluación de la capacidad hidráulica de agrupaciones de obras de drenaje transversal dispuestas en serie (infraestructuras dispuestas en paralelo).
- Evaluación de la capacidad hidráulica de agrupaciones de obras de drenaje transversal dispuestas en paralelo (pertenecientes a la misma infraestructura).
- Evaluación y reconocimiento particular de obras de drenaje transversal en ampliaciones de calzada, reconociéndose distintas tipologías y materiales en el mismo conducto o en varios de ellos.
- Obras de drenaje transversal dispuestas en vías en media ladera y obras de paso (pontones).

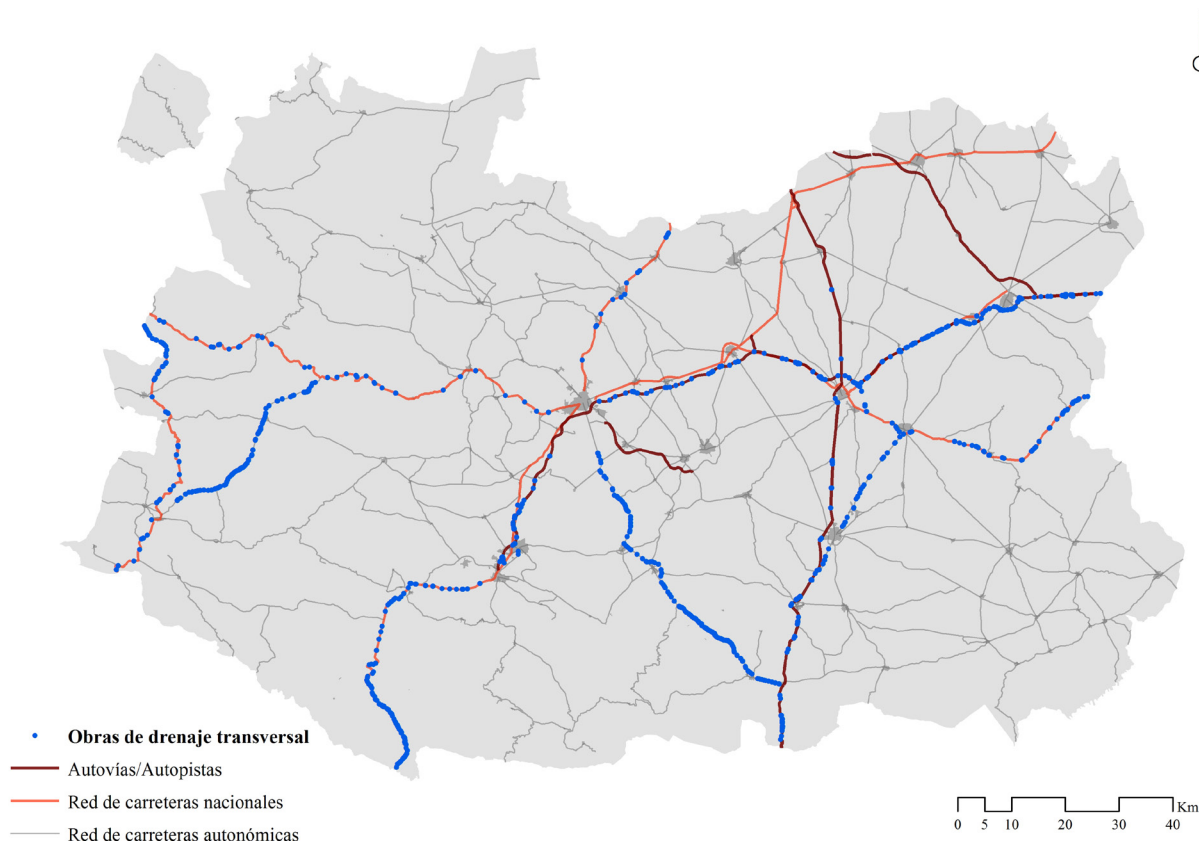


Figura 3 | Ubicación de las obras de drenaje transversal objeto de estudio.

En las tablas 1 y 2 se muestran las estadísticas de los resultados obtenidos en el análisis de riesgos asociado a obras de drenaje transversal en la provincia de Ciudad Real. La tabla 1 muestra los valores medios de probabilidad, impacto económico total y riesgo anual de los diez mecanismos de fallo estudiados. El impacto económico total se ha de desglosar en el impacto económico directo asociado a los costes de reparación/restitución que recaen directamente sobre el ente gestor de la infraestructura (representan de media un 69% del impacto económico total) y el impacto económico indirecto, asociado a los costes derivados del corte de servicio en la vía e indemnizaciones varias, que recaen sobre el conjunto de la sociedad (31% del total). Por otra parte, a efectos del presente estudio se muestran únicamente los indicadores de impacto y riesgo económico puesto que el impacto y riesgo personal sobre los usuarios de la vía se evalúa en términos únicamente cualitativos.

Los niveles de riesgo económico obtenidos son clasificados según su nivel de probabilidad y de impacto económico con el fin de presentar una escala cualitativa de riesgos que identifique con un código cromático el intervalo de riesgo al que pertenece cierta obra, es decir, el nivel de atención que requiere cierto elemento. Se ha establecido una escala de 5 categorías de riesgo definidas por intervalos de probabilidad anual de fallo e impacto económico (R1 a R5, donde R1 es el máximo nivel de riesgo) basados en recomendaciones de otros autores (Roads and Traffic Authority, 2010). Aplicando este sistema se obtiene que menos del 1% de elementos evaluados se encuentra en la categoría R1, mientras que en la mayoría de los casos estudiados (41%) el nivel de riesgo encaja en la menor categoría (R5).

Tabla 1 | Resultados (valores promedio) de probabilidad, impacto y riesgo económico por mecanismo de fallo.

Mecanismos de fallo	Probabilidad anual	Impacto económico	Riesgo económico	Incidencia (Riesgo)
	(-)	(€)	(€/año)	(%)
Colapso estructural del conducto	0,00842	136.829	1151,5	49,3
Inestabilidad de taludes por saturación del terraplén.	0,00138	57.312	78,8	3,4
Inestabilidad de taludes por filtraciones desde el conducto.	0,00013	78.410	10,1	0,4
Inestabilidad de taludes por colapso del tímpano en la embocadura.	0,00220	57.308	125,9	5,4
Inestabilidad de taludes por erosión localizada en la embocadura.	0,00208	56.788	118,3	5,1
Erosión interna localizada por flujos hacia el conducto.	0,00264	117.859	310,6	13,3
Erosión interna en el terraplén (tubificación).	0,00004	112.439	5,0	0,2
Erosión interna debido a filtraciones desde el conducto.	0,00171	117.859	201,6	8,6
Flujo sobre rasante y erosión superficial en taludes (formación de cárcavas).	0,00472	70.461	332,4	14,2
Flujos divergentes en áreas adyacentes.	0,00032	524	0,2	0,1

Tabla 2 | Resultados (valores promedio) del nivel de incidencia de las patologías detectadas.

Factores de riesgo / Patologías	Incidencia
	(%)
Patologías asociadas a la capacidad hidráulica del conducto/s	34,50
Patologías asociadas a signos evidentes de erosión local bajo las embocaduras	7,83
Patologías asociadas al deterioro estructural en embocaduras	14,34
Patologías asociadas al deterioro estructural en el interior del conducto/s	29,60
Patologías asociadas a la obstrucción / aterramiento del conducto/s	13,73

Se observa como los mecanismos de fallo con un mayor nivel de incidencia sobre el riesgo total son el colapso estructural del conducto (directamente relacionado con el nivel de deterioro observado en el interior de la obra de drenaje) y la formación de flujos sobre rasante (anegamiento de la calzada bien por obstrucción/aterramiento del conducto o bien por presentar deficiencias en la capacidad de evacuación de las avenidas de proyecto). Puesto que muchas de las obras de drenaje

V Jornadas de Ingeniería del Agua. 24-26 de Octubre. A Coruña

transversal poseen una antigüedad considerable y el impacto ocasionado por el colapso estructural del conducto implica el corte total de la vía y la restitución completa de la ODT, el nivel de incidencia sobre el riesgo total en este mecanismo de fallo se mantiene elevado.

Por otra parte, se han identificado las patologías más comunes que afectan a las obras de drenaje transversal. Cada una de estas patologías afecta a uno o varios mecanismos de fallo, según su naturaleza. La necesidad de extraer estos factores de riesgo del diagnóstico final se debe a que representan el indicador más fiable a la hora de planificar actuaciones preventivas de reparación y/o reposición basadas en el diagnóstico preliminar. Según se observa en la tabla 2, el factor de riesgo que mayor porcentaje de incidencia posee sobre el riesgo total es el vinculado a la capacidad hidráulica del conducto/s. Este valor promedio incluye los casos donde la obra de drenaje no presenta ningún tipo de patología en concreto, por lo que el riesgo remanente que posee (100%) se debe a la probabilidad residual asociada a mecanismos de fallo desencadenados por lluvias torrenciales. En orden de relevancia destacan las patologías asociadas al deterioro estructural de conductos y obras de fábrica en embocadura, fenómenos de aterramiento y obstrucción parcial o total de los conductos y fenómenos de erosión local bajo las embocaduras (socavación).

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

En el presente apartado se discute el potencial de la metodología de evaluación de riesgos en obras de drenaje transversal aplicado al desarrollo de sistemas de priorización de inversiones en el mantenimiento de este tipo de estructuras. Por otra parte se discute la incorporación de los efectos del cambio climático a la metodología de cálculo propuesta, orientado al desarrollo de modelos de previsión de la evolución del riesgo en el tiempo.

Una vez obtenido el diagnóstico preliminar del conjunto elementos estudiados, se presenta el siguiente nivel de desarrollo de la metodología: el análisis de inversiones en mantenimiento y su priorización basada en criterios de reducción del riesgo. Las posibles actuaciones a llevar a cabo en una determinada obra de drenaje transversal vendrán determinadas en primer lugar por restricciones operativas (tipos de reparación según material y tipología, nivel de acceso a la estructura, condiciones generales, etc.) y en segundo lugar, por el estudio de los factores de riesgo o patologías detectadas. Es decir, se plantea la solución tipo según basada en los resultados del análisis de riesgo efectuado y se evalúa la repercusión que produce dicha actuación en términos de reducción del riesgo total. El coste de la actuación tipo se determina según las características de la obra de drenaje (mediciones generales) mientras que la repercusión que produce se evalúa considerando la reducción total de riesgo que se produce entre la situación actual y la prevista. Puesto que la repercusión económica de la actuación no es más que la reducción total del riesgo anual de fallo en términos monetarios (€), es decir un beneficio virtual, es posible llevar a cabo un análisis de rentabilidad, donde se ha de considerar también la vida útil de cada actuación y el periodo medio de explotación de las labores de mantenimiento en la infraestructura. Una vez realizado dicho análisis es posible priorizar las actuaciones a realizar en función de los indicadores de rentabilidad proporcionados a corto, medio y largo plazo, no evaluando la rentabilidad únicamente en un mismo elemento, sino seleccionando las actuaciones más rentables asociadas al conjunto de obras de drenaje transversal de la red de transportes y priorizando su implantación en un determinado periodo de tiempo (explotación).

Las actuaciones tipo a implementar en el análisis de rentabilidad dan respuesta a las patologías más comunes detectadas en obras de drenaje transversal:

- Actuaciones de reposición de la obra de drenaje, aumento de la capacidad hidráulica.
- Actuaciones de prevención de la erosión local bajo embocaduras: medidas de mitigación de la erosión.
- Actuaciones de reconstrucción y/o reparación de obras de fábrica en embocaduras, según su nivel de deterioro actual.
- Actuaciones de reconstrucción y/o reparación de conductos, incluyendo medidas que aumenten la estanqueidad de los mismos (frente a filtraciones).
- Actuaciones de limpieza de conductos..

Por último, se pone de manifiesto la necesidad de contar con modelos de evaluación del riesgo destinados a orientar las inversiones a realizar en el mantenimiento de obras de drenaje transversal. La retroalimentación de la metodología con información de la evolución de los elementos analizados en el tiempo conllevará mejores estimaciones en los modelos de previsión de riesgo. La implementación de este tipo de modelos constituye una herramienta potente y de fácil aplicación a la hora de optimizar las inversiones atendiendo a las inevitables restricciones presupuestarias.

AGRADECIMIENTOS

El desarrollo de la metodología propuesta en el presente documento y su aplicación práctica ha sido posible gracias al desarrollo de herramientas de cálculo y de gestión específicas desarrolladas en Hidralab S.L. dentro del proyecto HidraSmart-CM (Culvert Management).

REFERENCIAS

- Balkham M., Fosbeary C., Kitchen A., Rickard C., 2010. *Culvert design and operation guide*. CIRIA Publishing, London, UK.
- Federal Highway Administration, 2010. *Culvert assessment and decision-making procedures manual*. U.S.Department of Transportation
- Galán A., Diaz S., Gonzalez J., 2016. Erosión local a la entrada y a la salida de obras de drenaje transversal. XXVII Congreso latinoamericano de Hidráulica, 2016.
- Najafi M., Bhattachar, D., 2010. Development of a culvert inventory and inspection framework for asset management of road structures. *Journal of King Saud University-Science* 32, 243-254.
- Ministerio de Fomento, 2015. Instrucción 5.2-IC Drenaje Superficial.
- Perrin J., Jhaveri C., 2003. The economic costs of culvert failures. Transportation Research Board, USA.
- Roads and Traffic Authority, 2010. *Culvert risk assessment guideline*. NSW, Australia.
- Salem O., Salman B., Najafi M., 2012, Culvert asset management practices and deterioration modelling. Transportation Research Record: *Journal of the Transportation Research Board* 2285, 1-7.