

Estudio numérico-experimental de la estabilidad de vehículos ante inundaciones

Martínez-Gomariz, E.^{a1}, Gómez, M.^{a2}, Russo, B.^b

^aInstituto Flumen. ETS de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Universitat Politècnica de Catalunya. Jordi Girona 1-3. D1. 08034 Barcelona. E-mail: ^{a1}eduardo.martinez-gomariz@upc.edu, ^{a2}manuel.gomez@upc.edu.

^bGrupo de Investigación de Ingeniería Hidráulica y Ambiental (GIHA). Escuela Universitaria Politécnica de La Almunia. Universidad de Zaragoza. Mayor 5, 50100 La Almunia de Doña Godina, Zaragoza. E-mail: ^bbrusso@unizar.es

Línea temática | M. Monográfico

RESUMEN

Cuando se producen eventos extremos de inundaciones en nuestras ciudades los vehículos, en muchas ocasiones, pueden perder la estabilidad, ocasionar numerosos daños económicos y comprometer la seguridad de los peatones. En esta investigación, mediante una campaña experimental con diferentes vehículos a escala reducida (1:14, 1:18 y 1:24), se ha desarrollado una formulación que permite definir el umbral de estabilidad para cualquier vehículo, a partir de sus características físicas y de las condiciones de flujo a las que se ve expuesto. Se han llevado a cabo, además, simulaciones hidrodinámicas tridimensionales, para uno de los vehículos ensayados experimentalmente. Las simulaciones numéricas permiten obtener resultados difícilmente obtenibles en laboratorio, habiéndose analizado en este caso condiciones de flujo de mayores velocidades. Dichas simulaciones han permitido validar la curva de estabilidad experimental obtenida para el vehículo escogido, así como simular el vehículo a escala prototipo y comprobar así que los efectos de escala no son significativos en los resultados obtenidos.

Palabras clave | inundaciones urbanas; umbral de estabilidad; vehículos; experimental y numérico.

INTRODUCCIÓN Y REVISIÓN DEL ESTADO DE LA CUESTIÓN

Los vehículos son elementos imprescindibles a considerar cuando se dan inundaciones en las ciudades y merecen el análisis de la peligrosidad a la que se ven sometidos en dichas inundaciones. Se trata de elementos cuya peligrosidad se determina con el análisis del inicio de pérdida de estabilidad, ya sea por flotación, deslizamiento o vuelco.

Los daños tangibles producidos en y por los vehículos pueden ser directos, afectando al vehículo, o indirectos cuando, una vez perdida la estabilidad, se encuentran en suspensión y pueden colisionar con cualquier estructura urbana al ser arrastrados por el flujo del agua. Es posible, por tanto, entender a los vehículos como grandes escombros arrastrados por el agua que pueden representar cuantiosos daños económicos y suponer graves consecuencias para la seguridad de las personas. Es un claro ejemplo la gran inundación producida en Boscastle (Reino Unido) el 16 de agosto de 2004, ocasionada por una lluvia extrema de 200 mm en 5 horas de duración, que supuso millones de libras en reparaciones de daños y un arrastre de más de un centenar de vehículos. Dicho arrastre de vehículos ocasionó el bloqueo de un puente que llegó a colapsar agravando notablemente los daños producidos. Las primeras investigaciones basadas en la estabilidad de vehículos se remontan al año 1967 con el trabajo de Bonham y Hattersley (1967), seguidas de los trabajos de Gordon y Stone (1973) y de Keller y Mitsch (1993). Después de 17 años sin investigaciones documentadas sobre este tema, Teo (2010) retomó el análisis de la estabilidad de vehículos en su Tesis Doctoral llevada a cabo en los laboratorios de la Universidad de Cardiff (Reino Unido), motivado por la gran inundación producida en Boscastle (Reino Unido). Dicha línea de investigación continuó los años posteriores en la misma Universidad de Cardiff con los trabajos de Xia et al. (2011, 2013) y Shu et al. (2011). En Japón, Toda et al. (2013) también llevaron a cabo ensayos experimentales con dos modelos de vehículos a escala, para evaluar la estabilidad de éstos.

Más recientemente Kramer et al. (2016) realizaron ensayos experimentales con dos modelos a escala reducida y comprobaron la flotabilidad de un vehículo a escala real. En el trabajo de Martínez-Gomariz et al. (2016) se realiza una completa revisión del estado de la cuestión sobre los diferentes criterios de estabilidad de vehículos encontrados en la literatura.

Sucesos como los ocurridos en Boscastle, con mayores o menores consecuencias, no dejan de producirse; y en España en los últimos años también se han producido inundaciones urbanas muy dañinas, como la acaecida en Tenerife el 19 de octubre de 2014 con 139.2 litros por metro cuadrado caídos en unas 15 horas (Figura 1). En los últimos 70 años, estos datos solo fueron superados el 22 de marzo de 2002, y en esta ocasión supuso la paralización completa de la ciudad e incluso se produjo el fallecimiento de una mujer de 56 años al ser arrastrada por la escorrentía. Gran cantidad de vehículos fueron arrastrados también, ocasionando daños económicos significativos. Se trata por tanto de una problemática importante en todas las ciudades del mundo que debe ser estudiada con la rigurosidad que merece.



Figura 1 | Inundación producida en Tenerife el 10 de octubre de 2014 (139.2 l/m² en unas 15 horas).

La estabilidad de los vehículos, quedará comprometida cuando las variables hidráulicas, calado y velocidad, superen un cierto umbral. Son varias las características que pueden influir en la estabilidad de un vehículo, pero en esencia será el peso, la altura libre hasta el suelo, la superficie en planta y la hidrodinámica de la forma del vehículo en la dirección del flujo las que afecten al grado de inestabilidad del mismo.

Desde los primeros vehículos, éstos han ido adaptándose a las nuevas tecnologías y adoptando formas con medidas diferentes. Algunos de estos cambios, como una mejor forma aerodinámica, benefician la estabilidad, pero, por el contrario, la adopción de menores alturas libres hasta el suelo favorece la inestabilidad. Se trata, por tanto, de factores que requieren ser estudiados desde el punto de vista de la estabilidad de vehículos cuando se ven sometidos a una corriente de agua, aunque estos parámetros van modificándose a lo largo del tiempo y cada vez se encuentran más variedades de modelos. En este sentido, los estudios requeridos deben ofrecer soluciones lo más generalizables posibles que puedan garantizar límites de estabilidad para cualquier tipo de vehículo, ya sea actual o más antiguo. En este trabajo se analizará experimentalmente la estabilidad de una muestra significativa de modelos de vehículos a escala y cuyos resultados, cumpliendo rigurosamente la semejanza de Froude, pueden ser escalados a prototipo.

En todos y cada uno de los estudios llevados a cabo hasta el momento, mediante modelos a diferentes escalas, los autores afirman que el fenómeno sigue la semejanza de Froude, pero lo cierto es que en ningún caso se lleva a cabo una justificación apropiada. Dicha semejanza debe ser justificada con solidez, pues se trata de la base fundamental de unos resultados realistas y sobretodo ofrece las garantías de poder ser escalados a la realidad (prototipos).

Los enfoques adoptados en las diferentes investigaciones no responden a un mismo patrón y entre los diferentes estudios algunos son experimentales y otros analíticos. Los estudios experimentales se basan principalmente en ensayos de laboratorio con modelos físicos, utilizando uno (Bonham et al., 1967), dos (Toda et al., 2013; Xia et al., 2013; Kramer et al., 2016) o tres (Teo, 2010; Shu et al., 2011) tipos de vehículos, los cuales suelen ser también diferentes entre autores. Resulta difícil proponer una metodología que sirva para determinar el límite de inestabilidad de cualquier vehículo debido a la limitación de modelos ensayados hasta el momento. Se debe ensayar, por tanto, una muestra suficientemente amplia y representativa para que los resultados permitan definir una metodología de obtención del límite de estabilidad para un vehículo cualquiera.

Uno de los parámetros fundamentales de la estabilidad de vehículos es el coeficiente de rozamiento entre el neumático y el suelo, cuyo valor, dada la dificultad de su acotación, presenta gran dispersión entre los diferentes estudios. En la Guía AR&R (Shand et al., 2011), así como en los estudios precedentes, asumen un valor de 0.3 afirmando que de esa manera se ofrecen

unos límites de estabilidad del lado de la seguridad. En los estudios de Teo (2010) no se proponen valores, Shu et al. (2011) los determinan experimentalmente (0.39, 0.5 y 0.68) y Xia et al. (2013) determinaron mediante ensayos los valores del coeficiente de rozamiento para dos modelos de vehículos, obteniendo en ambos casos un valor de 0.25 para una orientación del costado del vehículo paralela al flujo y de 0.75 para una orientación perpendicular. Finalmente, Kramer et al. (2016) determinan un discutible valor de 0.3 para dos modelos reducidos de materiales completamente diferentes, plástico y metal. La dispersión de los valores del coeficiente de rozamiento observada por los diferentes autores muestra una clara necesidad de determinar experimentalmente y con rigurosidad el valor para cada modelo ensayado. El coeficiente de rozamiento, como parámetro fundamental, debe aparecer en las formulaciones derivadas de resultados experimentales, permitiendo así delimitar la zona de seguridad para diferentes valores según la elección de los responsables de la toma de decisiones.

Si bien la investigación de la estabilidad de vehículos ante inundaciones se encuentra aún en un estado poco maduro, el uso de herramientas tridimensionales en este campo está aún menos extendido. Sin embargo, existen algunas referencias recientes como el estudio llevado a cabo por Buscariolo (2014) en el que, mediante un código 3D, se estudia el fenómeno que se produce cuando un vehículo cruza una carretera inundada. Más recientemente Arrighi et al. (2015a; 2015b) simularon, mediante el código 3D OpenFOAM, abierto y de libre distribución, un vehículo estático y parcialmente inundado para estudiar su inicio de movimiento. Mediante simulación tridimensional se pretendía evaluar la contribución de las fuerzas de ascensión y de flotación en la inestabilidad de vehículos expuestos a una inundación. Por último, el estudio más actual encontrado sobre arrastre de vehículos mediante simulaciones tridimensionales es el que Albano et al. (2016) llevaron a cabo para determinar la influencia de obstáculos, como son los vehículos, cuando se produce una inundación en áreas urbanas. Se trata de estudios, como se ha podido observar, muy recientes que pretenden incorporar los avances tecnológicos, como es la simulación tridimensional, en campos en los que hasta el momento no se han utilizado ampliamente. Por tanto, la estabilidad de vehículos al verse expuestos a inundaciones es un campo sobre el que se puede y se debe profundizar utilizando herramientas computacionales que hoy en día tenemos a nuestro alcance.

El presente trabajo se inicia con el estudio del sistema de fuerzas actuantes sobre un vehículo situado en un flujo de agua, y se describen los experimentos llevados a cabo para determinar el umbral de estabilidad de los vehículos envueltos en situaciones de inundación. Se presenta, en base a los resultados experimentales, una metodología para la obtención de umbrales de estabilidad para cualquier vehículo, según sus características físicas. Además, se llevan a cabo simulaciones numéricas tridimensionales para uno de los vehículos ensayados experimentalmente, obteniéndose resultados complementarios a los experimentales, que permiten conocer con mayor profundidad el fenómeno que se produce cuando un vehículo se ve sometido a una corriente de agua.

FUERZAS HIDRODINÁMICAS ACTUANTES SOBRE EL VEHÍCULO

Atendiendo a una situación en la que un vehículo aparcado se encuentra parcialmente sumergido, las fuerzas que actuarían sobre éste serían por un lado las debidas a la acción del agua, **fuerza de arrastre (F_D)** y de **empuje vertical (F_v)**, y por otro las producidas por la reacción del terreno, la **fuerza normal (F_N)** y la de **rozamiento entre el neumático y el terreno (F_R)**.

La fuerza de arrastre del agua se define analíticamente como:

$$F_D = \frac{1}{2} \rho_w v^2 C_d A \quad (1)$$

siendo,

ρ_w : Densidad del agua

v : Velocidad del agua

C_d : Coeficiente de arrastre que depende del flujo y la forma del obstáculo. Dependerá del número de Reynolds.

A : Área sumergida y proyectada en el plano perpendicular a la dirección del flujo

En situaciones hidrostáticas, es decir, cuando el agua no presente velocidad de aproximación al vehículo, el empuje vertical se debe únicamente a la **fuerza de Flotación (F_b)**, debido a la menor densidad del vehículo con respecto a la del agua. Sin embargo, cuando se trata de un flujo en movimiento (hidrodinámica), el empuje vertical se debe a la acción conjunta de la **fuerza de Flotación (F_b)** y de la **Fuerza de ascensión (F_L)**.

La fuerza de flotación se define analíticamente, según la teoría de Arquímedes, como:

$$F_b = \gamma_w \cdot V_w \quad (2)$$

siendo,

γ_w : Peso específico del agua y

V_w : Volumen del agua desplazada por el vehículo

La fuerza de ascensión se define analíticamente como:

$$F_L = \frac{1}{2} \rho_w v^2 C_L A \quad (3)$$

siendo,

ρ_w : Densidad del agua

v : Velocidad del agua

C_L : Coeficiente de ascensión que depende del flujo y la forma del obstáculo. Dependerá del número de Reynolds.

A : Área sumergida y proyectada en el plano perpendicular a la dirección del flujo

Considerando una situación de inestabilidad por deslizamiento, el equilibrio se daría cuando la fuerza de arrastre del agua fuera igual a la fuerza de rozamiento del vehículo con el terreno. Sin embargo, si se considera la inestabilidad únicamente por flotación, el punto de equilibrio se daría cuando el empuje vertical (igual a F_b en condiciones hidrostáticas) fuera igual a la fuerza gravitacional (en función del peso del vehículo).

Se define el peso efectivo o sumergido (F_G) como la fuerza resultante de la diferencia de la fuerza gravitacional (F_g) y el empuje vertical (F_v).

$$F_G = F_g - F_v \quad (4)$$

siendo,

$F_g = \gamma_c \cdot V_c$, con γ_c : peso específico del vehículo y V_c : volumen del vehículo

$F_v = F_b + F_L$

Por lo tanto, un **peso efectivo** positivo ofrece estabilidad en cuanto a la flotación (aunque no garantiza su estabilidad por deslizamiento). Respecto a la fuerza de rozamiento, se repartiría una cuarta parte en cada rueda, o lo que es lo mismo la mitad de la fuerza de rozamiento en cada eje, delantero y trasero. En la Figura 2 se representa el sistema de fuerzas descrito hasta el momento.

Para que el sistema de fuerzas descrito hasta el momento sea acorde con el planteamiento, se deben cumplir dos hipótesis fundamentales: 1) las cuatro ruedas deben estar bloqueadas, para que no rueden y puedan ofrecer resistencia al deslizamiento; y 2) se considera el vehículo estanco, de manera que su densidad sea inferior a la del agua, y así éste pueda flotar. Obviamente se trata de simplificaciones de la realidad, puesto que los vehículos aparcados pueden tener bloqueadas dos de las ruedas (eje trasero habitualmente), y no las cuatro; y por otro lado el nivel de estanqueidad de los vehículos es muy variable. En el segundo supuesto se podría considerar que, si bien en una situación real los vehículos no ofrecen total estanqueidad, éstos tardarían en llenarse de agua más tiempo del necesario para que el flujo de agua actuase y ejerciera la fuerza de flotación que desestabilizara al mismo (Kramer *et al.* 2016). En cualquier caso, parece obvio pensar que esta hipótesis está del lado de la seguridad.

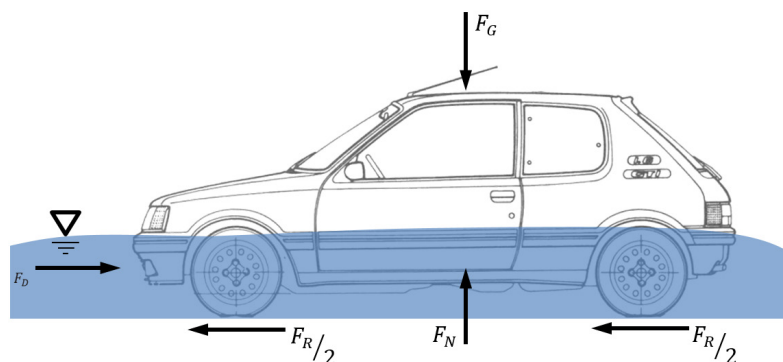


Figura 2 | Principales fuerzas actuando sobre un vehículo estacionado y parcialmente sumergido.

Por supuesto las situaciones reales son mucho más complejas, debido a la impredecibilidad del agua, por lo que se debe considerar este sistema como una simplificación de la realidad, motivo por el cual se llevan a cabo ensayos experimentales que ayuden a entender mejor las inestabilidades de los vehículos sometidos a las fuerzas de un flujo de agua.

La fuerza de rozamiento entre el neumático y el terreno es la reacción producida cuando actúa la fuerza de arrastre el agua. Esta fuerza de rozamiento es la que ofrece la seguridad ante inestabilidades de deslizamiento de los vehículos y será mayor cuanto mayor sea el peso del vehículo y la adherencia neumático-terreno. La expresión de la fuerza de rozamiento es la siguiente:

$$F_R = \mu \cdot F_N \quad (5)$$

siendo,

μ : el coeficiente de rozamiento entre el neumático y el terreno

F_N : la fuerza normal de reacción del terreno, que será igual al peso efectivo (F_G) siempre que el vehículo se encuentre en una superficie horizontal.

El valor del coeficiente de rozamiento dependerá no solo del material de los neumáticos de los vehículos, sino de la combinación del material de los neumáticos y de la superficie del terreno en el que se encuentre. En este sentido dicho coeficiente en ningún caso será el mismo, sino que se darán rangos de valores. Las mediciones de algunos autores (Gerard, 2006) para el coeficiente de rozamiento entre neumático y carretera inundada estaban comprendidas entre 0.25 y 0.75. Se trata por tanto de un factor fundamental en la estabilidad al deslizamiento de los vehículos parcialmente inundados.

CAMPAÑA EXPERIMENTAL

Elección y características de los vehículos a escala ensayados y sus prototipos

La elección de los vehículos a escala para realizar los ensayos de estabilidad ante corrientes de agua es fundamental, puesto que los resultados obtenidos deben ser escalados a prototipo para que sean aplicables en situaciones reales de inundaciones. Se debe enfocar este estudio para que pueda ser aplicado de la manera más generalizable posible, para que dado un coche real se le pueda asociar una curva de estabilidad tal que se tengan garantías que el vehículo permanecerá estable si las condiciones hidráulicas a las que se vea sometido sean inferiores a las que determinan dicha curva.

Para llevar a cabo la elección de los vehículos se ha elaborado una lista de 54 turismos como muestra representativa de aquellas marcas y modelos que circulan por nuestras ciudades. Dicha muestra recoge vehículos de diversas características; desde vehículos de menos de una tonelada de peso hasta otros próximos a tres toneladas o de alturas libres hasta el suelo de apenas 10 cm hasta más de 20 cm.

Éstas últimas son algunas de las variables físicas de los vehículos que indican mayor o menor estabilidad ante situaciones de corrientes de agua. Por ejemplo, cuanta mayor altura libre hasta el suelo más calado será necesario para que la

fuerza de empuje vertical del agua haga efecto sobre el vehículo. La fuerza gravitacional, basada en el peso del vehículo, es una fuerza estabilizadora, en mayor medida cuanto más pesado sea el vehículo. Otras dimensiones físicas como la superficie en planta del vehículo también influyen en la estabilidad de estos, puesto que a menor superficie en planta se desplaza menos volumen de agua para un mismo calado y por tanto la fuerza de flotación es menor. Agrupando estas variables físicas, las cuales son fácilmente accesibles en las fichas técnicas para cualquier vehículo, se propone un coeficiente de estabilidad (SC) para cualquier vehículo según la expresión (6).

$$SC = \frac{GC \cdot M_c}{PA} \quad (6)$$

donde,

SC[kg/m]: Coeficiente de estabilidad

GC[m]: Altura libre del vehículo

M_c[kg]: Peso en vacío del vehículo

PA[m²]: Área en planta del vehículo. Calculado como la longitud por la anchura indicados en la ficha técnica.

Las variables del numerador de la expresión 6, reflejan que unos mayores valores de éstas suponen más estabilidad para el vehículo y, por el contrario, cuanta más área en planta más fuerza de flotación actuará para un mismo calado, con lo cual más inestabilidad. Se trata de un simple indicador que aporta una idea sobre la estabilidad de los vehículos y que puede ser fácilmente comparado entre más modelos.

El coeficiente de estabilidad descrito mediante la expresión 6 tiene sentido en caso de que se consideraran los vehículos con un neumático idéntico y sobre una misma superficie, es decir con un mismo coeficiente de rozamiento (μ). Este coeficiente (μ) no presenta tanta facilidad de obtención como los parámetros tenidos en cuenta hasta ahora, pues no se encuentra en la ficha técnica del vehículo. Se define en este caso el coeficiente de estabilidad modificado, según la expresión 7.

$$SC_{mod} = \frac{GC \cdot M_c}{PA} \cdot \mu \quad (7)$$

donde,

SC_{mod}[kg/m]: Coeficiente de estabilidad modificado

μ : coeficiente de rozamiento

Los vehículos a escala escogidos se han visto limitados por la disponibilidad de éstos en el mercado. Si bien la disponibilidad de vehículos tipo *die-cast* es muy amplia, éstos tienen un peso muy superior al que debieran para cumplir el requisito de misma densidad que su prototipo (semejanza de Froude). Por lo tanto, se ha recurrido a vehículos de radiocontrol, lo cual permite que sean más ligeros y el ajuste de peso pueda realizarse añadiendo pequeños sobrepesos hasta cumplir el requisito de misma densidad que su prototipo. Este tipo de vehículos de radiocontrol no presenta una variedad muy amplia de modelos habituales que se encuentran en nuestras ciudades.

Descripción del modelo de ensayos de estabilidad de vehículos

Para llevar a cabo los ensayos experimentales de estabilidad de vehículos ante inundaciones se han utilizado las instalaciones disponibles en el laboratorio de hidráulica del Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental (DECA) en la Escuela de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de la Universitat Politècnica de Catalunya. El laboratorio dispone de varios suministros de agua y en este caso se ha utilizado un sistema de bombeo compuesto por dos bombas no sumergidas en paralelo, con una capacidad nominal de bombeo de 90 l/s la mayor y de 60 l/s la menor. El agua impulsada por el sistema de bombeo es aspirada de un depósito enterrado, situado bajo el suelo del laboratorio, y que suministra agua a diferentes modelos mediante control de válvulas.

Para los ensayos de este estudio se ha utilizado un canal de cajeros de cristal y solera de baquelita, con unas dimensiones de prácticamente 20 m de longitud y una sección transversal de 60 cm de ancho y 60 cm de alto. Dispone de un vertedero motorizado aguas abajo, con el que se puede establecer la condición de contorno (calado) aguas abajo cuando se trabaja con régimen lento. La pendiente longitudinal del canal se puede variar mediante un sistema de gatos hidráulicos desde

pendiente 0 % hasta 4 %. Esta instalación, en adelante, será mencionada como canal de pendiente variable. El control del caudal se realiza mediante el vertedero triangular, a partir de la obtención de la carga hidráulica sobre el vértice de éste, con ayuda de un limnómetro situado en una posición tal que la lectura del vértice del vertedero triangular es de 8.90 cm y por tanto será el “cero” de las diferentes lecturas.

Para obtener las diferentes combinaciones de calados y velocidades que generen inestabilidades a los diferentes vehículos se propone la construcción de una rampa local, de unos dos metros de longitud, dentro del canal de pendiente variable del laboratorio. Dicha rampa continúa con 1.5 metros de superficie en horizontal y elevada 15 cm por encima de la solera del canal de pendiente variable, lugar en el que el vehículo se encontrará para verse sometido a las condiciones hidráulicas fruto de la combinación del caudal de ensayo y la pendiente establecida. En la Figura 4 se representa un esquema del modelo de pendiente local descrito.

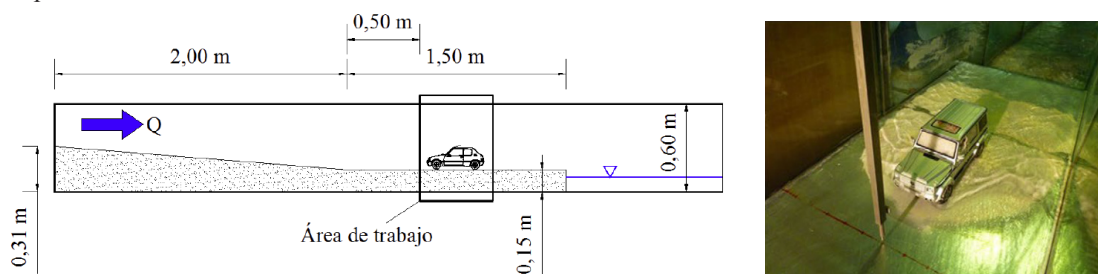


Figura 4 | Esquema del modelo de pendiente local diseñada para los ensayos de estabilidad de vehículos.

Este modelo ofrece la flexibilidad necesaria, en cuanto a variabilidad de combinaciones de velocidades y calados, y una gran operatividad, en cuanto a que optimiza los tiempos de los ensayos gracias a la localización y a la posibilidad de fijar las condiciones de contorno en el propio modelo local. En la Figura 5 se observa el modelo una vez instalado en el canal, con la zona de pendiente completamente horizontal, dispuesto para trabajar en condiciones de régimen lento.



Figura 5 | Modelo de pendiente local variable construido y colocado aguas arriba del canal.

Las configuraciones del modelo de pendiente local, rango de caudales y Números de Froude ensayados se resumen a continuación, distinguiendo entre condiciones de régimen rápido y lento:

En condiciones de régimen lento:

- Caudales: desde 0.49 l/s hasta 15.34 l/s
- N° Froude: dese 0.46 hasta 0.75
- Pendiente del modelo: 0% en todo caso

En condiciones de régimen rápido:

- Caudales: desde 2.96 l/s hasta 23.23 l/s
- N° Froude: dese 1.09 hasta 3.31
- Pendiente del modelo: 0.8%, 1.0 %, 1.2 %, 1.5 %, 2.0 %, 3.0 %, 4.0 %, 6.0 % y 8.0%.

Resultados experimentales: rozamiento, flotación y arrastre de vehículos

En primera instancia, se determinó el **coeficiente de rozamiento** para los diferentes vehículos ensayados. A partir de una superficie metálica mojada, del mismo material que el modelo de pendiente local sobre el que se realizan los ensayos de estabilidad de los vehículos, se determina el ángulo (α^*) para el cual el vehículo desliza. Realizando un balance de fuerzas es

sencillo llegar a la conclusión que el coeficiente de rozamiento μ es igual a la tangente del ángulo que forma el plano inclinado. El ángulo del plano se incrementaba manualmente y se determinaba el valor exacto del ángulo mediante un nivel electrónico calibrado respecto a la horizontal. Todos los coeficientes de rozamiento obtenidos se encuentran comprendidos entre 0.52 y 0.62 dentro del rango (0.25 y 0.75) determinado por otros autores (Gerard, 2006).

La inestabilidad por **flotación** se dará cuando el calado llegue a un cierto nivel tal que el volumen del agua desplazada por el vehículo sea el necesario para que la fuerza de flotación iguale a la gravitacional. En situaciones reales se suelen dar de forma combinada la inestabilidad por deslizamiento y flotación, pero para poder determinar el calado de flotación (h_b) se debe omitir del sistema de fuerzas actuantes sobre el vehículo (Figura 2) la fuerza de arrastre del agua (F_D). Para conseguir que únicamente actúe la fuerza de flotación se ha utilizado un recipiente de base rectangular y transparente en el que, para cada ensayo, se ha colocado cada uno de los vehículos a escala escogidos y mediante un tubo de plástico de 20 mm de diámetro se ha introducido un pequeño caudal de agua hasta que el vehículo deja de tener contacto con el fondo. Una cinta métrica adherida exteriormente al recipiente y la correspondiente grabación en video de cada ensayo de flotación para cada vehículo a escala han permitido encontrar con suficiente exactitud el calado de flotación. El rango de los calados de flotación (h_b) fue desde 2.85 cm (39.9 cm en prototipo) hasta 4.90 cm (68.6 cm en prototipo).

Los primeros ensayos de **arrastre** (acción conjunta de fuerza de empuje vertical y arrastre del agua) llevados a cabo fueron los correspondientes al modelo Mini Cooper, en las tres escalas disponibles. La representación conjunta de estos puntos, escalados a prototipo, debería ofrecer una misma tendencia y un elevado coeficiente de correlación, si es que la semejanza de Froude es válida en este caso. En la Figura 6 se muestra la representación de los puntos de inestabilidad para los tres modelos, así como la ecuación que mejor se ajusta al conjunto de puntos. Se observa una misma tendencia grupal y se obtiene un valor de $R^2=0.89$ al ajustar una función $(v \cdot y)=0.45$. Queda validada por tanto la idoneidad de la utilización de la semejanza de Froude en este fenómeno, pudiendo escalar directamente los resultados obtenidos en el modelo a valores en prototipo.

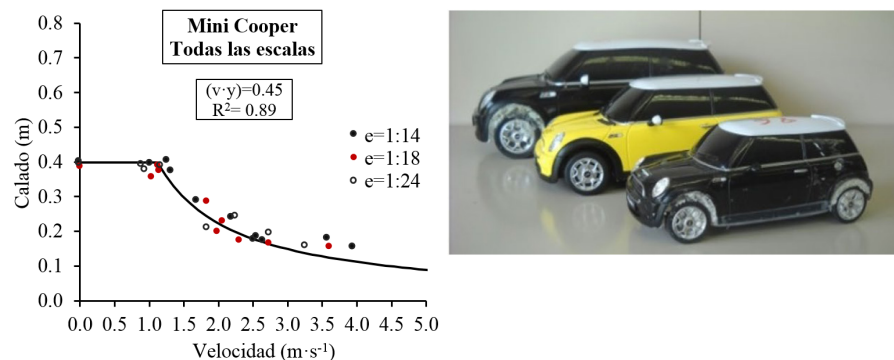


Figura 6 | Representación de los puntos de inestabilidad de los Modelos Mini Cooper a escalas 1:14, 1:18 y 1:24. Ajuste a una función $(v \cdot y)=0.45$.

El mismo procedimiento se llevó a cabo para cada vehículo ensayado (en una única escala esta vez), ajustando a los puntos de inestabilidad, representados en el gráfico Velocidad-Calado, una curva del tipo $(v \cdot y)=a_0$. La constante a_0 se ha obtenido minimizando el sumatorio de las diferencias entre la coordenada y_i de cada uno de los puntos de inestabilidad $P_i(v_i; y_i)$ con la evaluación de la función $y(v=v_i)=a_0/v$ en cada coordenada v_i . De esta forma se optimiza el ajuste de la función a una cierta a_0 obteniendo el mayor coeficiente de correlación R^2 posible en cada caso. En todos los casos se obtiene una correlación óptima, superior a $R^2=0.8$ y en gran parte de los casos superior a $R^2=0.9$, por lo tanto, se acepta tal ajuste como correcto. Dicho umbral de estabilidad se debe ver formado no solo por la curva $(v \cdot y)$, sino también por una línea horizontal a la altura del calado de flotación ($h_b(v=0)$) hasta que corta con la curva. Para velocidades bajas la inestabilidad del vehículo se produce siempre por flotación. Al representarse todas las funciones de ajuste para los diferentes vehículos ensayados se observó que las curvas asociadas a vehículos con menores SC_{mod} se encontraban por debajo de aquellas con valores superiores de SC_{mod} .

Una vez observado que el coeficiente de estabilidad modificado sigue una tendencia creciente, de la misma manera que lo hacen las curvas de estabilidad de los vehículos a escala ensayados, se ha determinado qué tipo de relación sigue dicho

coeficiente con el valor de la constante de la curva $(v \cdot y) = a_0$. Representando en un gráfico $SC_{mod} - (v \cdot y)_{ajuste}$ los pares de valores para cada vehículo se obtiene un buen ajuste lineal con un coeficiente de correlación de $R^2 = 0.92$ (Figura 7). Tal correlación ofrece la posibilidad de obtener una expresión general para cualquier coche real, es decir que a partir del cálculo del coeficiente de estabilidad modificado (SC_{mod}) se pueda obtener el valor a_0 correspondiente a la constante de la curva de estabilidad $(v \cdot y) = a_0$ de ese vehículo.

La expresión propuesta según el ajuste lineal obtenido es la siguiente:

$$(v \cdot y) = 0.0158 \cdot SC_{mod} + 0.32 \quad (8)$$

Para definir completamente la curva de estabilidad de cada vehículo se debe calcular el calado de flotación de cada uno, de manera que la curva de estabilidad presente la discontinuidad en el punto de cruce de la línea horizontal que pasa por el calado de flotación y la propia curva $(v \cdot y)$. El calado de flotación (ecuación 9) se obtiene imponiendo que el peso de agua desplazada por el vehículo sea igual al peso de éste. Se comprobó en los ensayos experimentales que existía muy poca diferencia entre el obtenido durante el ensayo y el calculado teóricamente.

$$h_b = \frac{M_c}{\rho_w \cdot l_c \cdot b_c} + GC \quad (9)$$

La velocidad que determina el punto de discontinuidad o cambio de tendencia se obtiene igualando el calado de flotación h_b al calado de la curva $y = a_0/v$, según la expresión 10.

$$v = \frac{M_c}{\rho_w \cdot l_c \cdot b_c \cdot a_0} + \frac{GC}{a_0} \quad (10)$$

Por tanto, conociendo los datos geométricos de un vehículo cualquiera y a partir de las expresiones 8, 9 y 10 es posible determinar la curva de estabilidad para cualquier vehículo. La única variable desconocida a priori, a la hora de calcular el coeficiente de estabilidad modificado, es el coeficiente de rozamiento μ .

Puesto que estudios previos (Gerard, 2006) determinaron que el rango para el coeficiente de rozamiento entre un neumático y una carretera puede estar comprendido entre 0.25 y 0.75, se propone la determinación de un par de curvas $(v \cdot y)_{min}$ y $(v \cdot y)_{max}$ asociadas al valor del coeficiente de rozamiento mínimo y máximo respectivamente. De esta manera para cada vehículo se obtiene una zona de seguridad, por debajo de la curva asociada al valor mínimo del coeficiente de rozamiento, y una zona de incertidumbre situada entre ambas curvas. En la Figura 7 (derecha) se han representado de forma esquemática estas zonas.

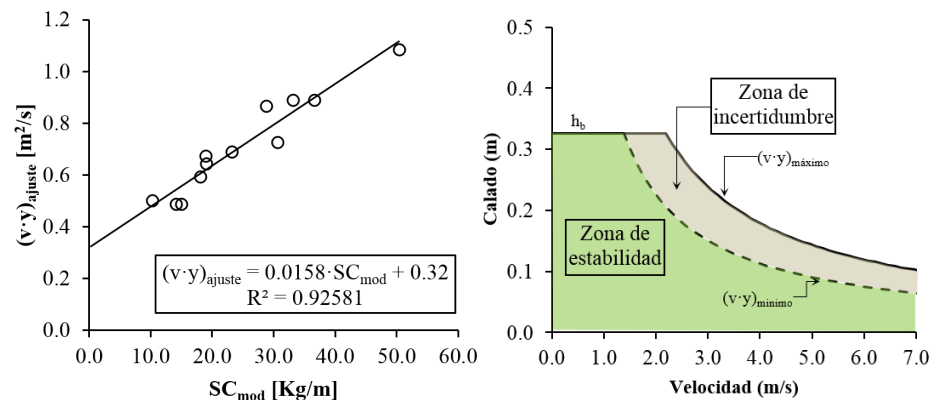


Figura 7 | Representación de la correlación lineal entre el valor de la constante de la curva $(v \cdot y)$ propuesta para cada vehículo y el coeficiente de estabilidad modificado asociado a cada uno de ellos (izquierda) y esquema de la metodología general para determinación de la estabilidad de un vehículo cualquiera (derecha).

SIMULACIONES NUMERICAS 3D

Simulaciones numéricas propuestas

Flow-3D es el software utilizado como herramienta de análisis en este estudio y es del tipo denominado CFD (Computational Fluid Dynamics) para estudios tridimensionales. Flow-3D resuelve, mediante aproximaciones numéricas, las ecuaciones RANS a partir del método de los volúmenes finitos (diferencias finitas en las tres direcciones del espacio). Las ecuaciones RANS son un sistema de 4 ecuaciones (continuidad (1) y Navier-Stokes (3)) con 4 incógnitas ($v(x, t)$ y $p(x, t)$) que debe ser resuelto. Utiliza el método FAVOR (Fractional Area/Volume Obstacle Representation) para definir geometrías con elementos curvos con gran precisión y el método VOF (Volume of Fluid) para definir la interfaz entre dos fluidos (agua aire en este caso).

Los modelos numéricos desarrollados, pretenden complementar los estudios experimentales llevados a cabo para el análisis de la estabilidad de vehículos. Al tratarse de modelos numéricos basados en modelos físicos experimentales es posible la calibración de los mismos y ofrece la garantía por tanto de presentar resultados fiables.

El hecho de realizar un modelo numérico calibrado con los resultados obtenidos experimentalmente, permite en este caso la modelación de cualquier vehículo y determinar su punto de inestabilidad ante inundaciones. Se pueden obtener, además, las fuerzas actuantes sobre el vehículo, tanto la de arrastre como la de empuje vertical, de manera que el fenómeno puede ser comprendido con mayor detalle.

El planteamiento de las simulaciones realizadas responde a tres fases diferenciadas. Las Fases 1 y 2 siguen el mismo procedimiento que el llevado a cabo en los ensayos experimentales, de manera que inicialmente (Fase 1) se determina el calado de flotación del vehículo, para velocidad de flujo nula, y posteriormente (Fase 2) se determina el punto de inestabilidad del vehículo cuando se ve sometido a una corriente de agua. Tanto en la primera como segunda fase el objetivo principal es obtener la misma respuesta del vehículo que se obtuvo experimentalmente. En la Fase 1 se debe verificar que el vehículo flota para el calado de flotación experimental. En la Fase 2 se reproduce uno de los casos evaluados experimentalmente, modelando la pendiente local con el vehículo situado en la misma posición y orientación que cuando se produjo la inestabilidad y utilizando el mismo caudal de circulación por el modelo. Por último, se presenta la Fase 3 tras haber validado el comportamiento del vehículo, desarrollando un modelo “simplificado” que reproduzca condiciones hidráulicas que no fueron ensayadas y con la suficiente sencillez para minimizar al máximo posible el coste computacional de la simulación. De esta manera se pueden llevar a cabo varias simulaciones que aporten más puntos de inestabilidad para representar junto con aquellos obtenidos experimentalmente.

Resultados numéricos

Fase 1: Flotación del vehículo

Se ha comprobado, mediante la simulación del ensayo de flotación, que el vehículo Mercedes Clase C (e:1/8) responde de la misma forma que en los ensayos experimentales. La pérdida de contacto de las ruedas se produce cuando el calado de agua llega a los 2.5 cm. Al comprobarse la correcta flotación del vehículo, de acuerdo a los experimentos, ya se puede estudiar el efecto combinado de fuerza de empuje vertical junto con la fuerza de arrastre del agua (Fase 2).

Fase 2: Comprobación del correcto comportamiento del vehículo

Para esta segunda fase se reprodujo el modelo de pendiente local utilizado en laboratorio, para tratar de reproducir exactamente uno de los ensayos. En el caso escogido se produjo el desplazamiento del vehículo Mercedes Clase C (e:1/8) con orientación perpendicular al flujo, una velocidad de 0.96 m/s y un calado de 1.04 cm. Estas condiciones se generaron estableciendo una pendiente del 8% y permitiendo la circulación de un caudal de 5.99 l/s. Además, se simula también un caudal

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

de paso un 20% inferior (4.80 l/s) al que generó la inestabilidad experimentalmente, generando así una velocidad y un calado ligeramente por debajo del umbral de estabilidad $(v \cdot y) = 0.67 \text{ m}^2/\text{s}$.

Antes de la incorporación del vehículo, se realizó una **calibración hidrodinámica del modelo**. El parámetro a ajustar es la rugosidad absoluta K que Flow-3D considera en el cálculo. Los valores de rugosidad considerados fueron de $K_1 = 2 \cdot 10^{-4} \text{ m}$, $K_2 = 5 \cdot 10^{-5} \text{ m}$, $K_3 = 1 \cdot 10^{-5} \text{ m}$ y $K_4 = 3 \cdot 10^{-7} \text{ m}$. Según diferentes autores (Sotelo, 1995; Lencastre, 1998) para conducciones de acero galvanizado un valor habitual de rugosidad absoluta sería de $1 \cdot 10^{-5} \text{ m}$, con lo cual, observando que la sensibilidad del modelo para valores inferiores a éste era insignificante, se opta por adoptar este valor para considerar válido el modelo y utilizarlo en las sucesivas simulaciones.

Para la elección del **modelo de turbulencia**, se llevaron a cabo simulaciones con un único bloque de malla para todo el dominio y un tamaño de celda de 5 mm. Para un mismo caudal de inestabilidad ($Q = 5.99 \text{ l/s}$) se consideraron diferentes modelos de turbulencia: $k-\epsilon$, RNG, $k-\omega$ y Large Eddy Simulation (LES). El último (LES) se descartó directamente tras la simulación, al observar un mal comportamiento del flujo alrededor del vehículo, muy diferente al observado en laboratorio. Para los otros tres modelos de turbulencia se llevó a cabo un análisis de las fuerzas hidrodinámicas ejercidas sobre el vehículo llegando a la conclusión que el modelo RNG representaba las fuerzas con menores oscilaciones una vez superada la fase transitoria del flujo. El análisis de fuerzas, obtenidas mediante Flow-3D, cumplía el criterio de deslizamiento del vehículo, pues sabiendo que para el caudal de cálculo éste es inestable, la fuerza de arrastre (F_D) superaba la fuerza de rozamiento (F_R) entre los neumáticos y el terreno.

Una vez escogido el modelo de turbulencia, se llevó a cabo un exhaustivo estudio de la influencia de la malla en las fuerzas actuantes sobre el vehículo. Bajo la premisa de obtener resultados suficientemente buenos y un coste computacional asumible, se propone un tamaño de celda de 2 mm en las proximidades del vehículo y de 4 mm en el resto del dominio. Se han probado diferentes configuraciones de malla de cálculo, empezando por considerar un único bloque en todo el dominio y un bloque malla para el conjunto del dominio con otro bloque anidado de menor tamaño de celda alrededor del vehículo. En ambos casos la reducción del tamaño de celda ofrecía resultados de fuerzas hidrodinámicas inferiores. Las pequeñas dimensiones del vehículo a escala 1:18 limitaban el tamaño de celda, de manera que para definir correctamente un parámetro tan importante como la altura libre desde el suelo hasta el vehículo (GC) se requiere de un tamaño de celda de 2 mm o inferior según se observó en este análisis.

Finalmente, para las dos simulaciones de esta Fase 2 (caudal de estabilidad y caudal de inestabilidad) se ha utilizado el coeficiente de rozamiento experimental entre el neumático y el modelo de pendiente local ($\mu = 0.602$), el tensor de inercia del modelo 3D del vehículo, el peso del vehículo (268 g), la rugosidad absoluta obtenida en el proceso de calibración de la hidrodinámica del modelo ($K = 1 \cdot 10^{-5} \text{ m}$), el modelo de turbulencia RNG y una configuración de malla de tamaño de celda de 4 mm para todo el dominio y un bloque anidado alrededor del vehículo de 2mm. En definitiva, con estas simulaciones se debe garantizar que el comportamiento del vehículo en el modelo numérico responde de la misma forma que en el laboratorio.

Los resultados obtenidos en esta segunda fase han sido de acuerdo a los esperados, muy similares a los ensayos experimentales, tanto desde el punto de vista cualitativo como cuantitativo. Para el caudal de inestabilidad ($Q = 5.99 \text{ l/s}$) simulado se han obtenido unos valores de velocidad y calado de aproximación de 1.1 m/s y 1 cm respectivamente, ligeramente diferentes que los determinados experimentalmente ($v = 0.96 \text{ m/s}$; $y = 1.04 \text{ cm}$) para el mismo caudal de circulación. La segunda simulación ($Q = 4.80 \text{ l/s}$) ha dado lugar a una velocidad de 0.95 m/s y un calado de 0.9 cm. Aunque algunas ligeras desviaciones con respecto a lo esperado, el punto azul (Figura 8) se sitúa por debajo del umbral de estabilidad, y los puntos rojos (inestabilidad experimental y numérica) se encuentran sobre el umbral ($(v \cdot y) = 0.67 \text{ m}^2/\text{s}$).

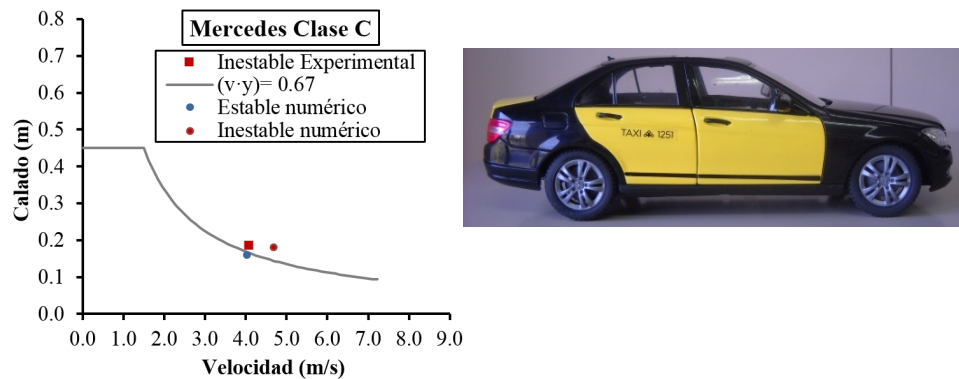


Figura 8 | Representación del punto de inestabilidad experimental, el correspondiente numérico para el caudal de inestabilidad ($Q = 5.99$ l/s) y el par velocidad- calado obtenido para la simulación con un caudal un 20% inferior ($Q = 4.80$ l/s).

El postproceso de la simulación muestra una gran similitud en el comportamiento del flujo alrededor del vehículo. Sin embargo, se observa una gran influencia de las paredes sobre el flujo, apreciable en la forma del resalto en comparación con el desarrollo producido en laboratorio. En la Figura 9 se observa un perfil de uno de los ensayos experimentales junto con varias visualizaciones de instantes de tiempos para la simulación.

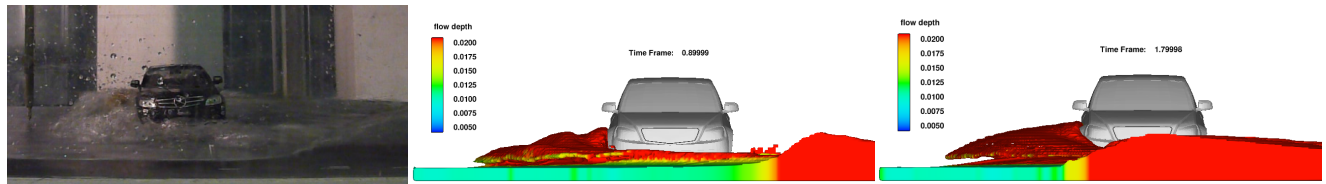


Figura 9 | Comparativa de un ensayo experimental con diferentes instantes de una simulación en Flow-3D.

Se observa (Figura 9) como el perfil es muy similar para los primeros instantes de la simulación ($t = 0.89$ s), pero el punto de contacto entre el resalto y la pared se desplaza aguas arriba hasta situarse a la altura del vehículo en los instantes finales. El ángulo de abertura del resalto en los ensayos experimentales era más cerrado y, por tanto, el contacto entre el resalto y la pared se producía aguas abajo del vehículo.

Cualitativamente no fue posible conseguir ninguna mejora, pero el adecuado resultado de fuerzas (sin permitir el movimiento del vehículo) permite validar la simulación. La primera simulación llevada a cabo, reproduciendo el caso experimental ($Q = 5.99$ l/s), supuso una fuerza de arrastre ligeramente superior a la fuerza de rozamiento. A partir del segundo 1.5 de la simulación en adelante se aprecian mayores valores en todo momento, habiendo sido intermitente el cruce de la línea negra discontinua (F_D) con la roja continua (F_R) (Figura 10) en los primeros instantes de flujo transitorio. Es muy apreciable la proximidad de la fuerza de arrastre a la fuerza de rozamiento, aspecto que indica que se trata de una inestabilidad muy cercana al umbral de estabilidad del vehículo.

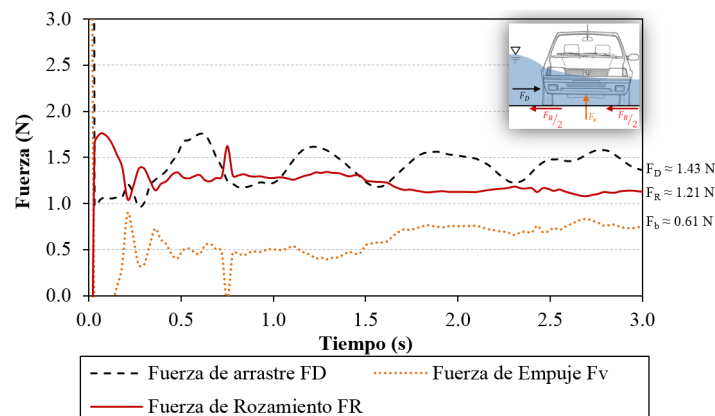


Figura 10 | Fuerzas actuantes sobre el vehículo Mercedes Clase C (e: 1/18). Reproducción numérica del caso experimental que produjo una inestabilidad del vehículo. Caudal de circulación de 5.99 l/s y una pendiente del modelo del 8%.

La simulación llevada a cabo con un caudal inferior al anterior ($Q=4.80$ l/s), como se esperaba, dio lugar a fuerzas de arrastre inferiores a las de rozamiento en todo momento. La fuerza de arrastre no superaba la fuerza de rozamiento en ningún momento. Estos resultados no solo garantizan una correcta simulación numérica, sino que se comprueba que los valores del coeficiente de rozamiento determinados experimentalmente fueron medidos correctamente y se valida que efectivamente el punto de inestabilidad experimental se trata de un punto situado en las cercanías del umbral de estabilidad del vehículo.

El análisis de las fuerzas hidrodinámicas actuantes sobre el vehículo es fundamental para entender su inestabilidad, aunque Flow-3D, mediante la activación del módulo GMO, ofrece la posibilidad de reproducir la inestabilidad del vehículo directamente (vehículo con 6 grados de libertad). Se trata de un módulo ciertamente útil cuando, una vez comprobado que responde correctamente al análisis de fuerzas.

Fase 3: Obtención de nuevos resultados no determinados mediante ensayos experimentales

Una vez analizado el correcto comportamiento numérico de la estabilidad del vehículo, sometido a fuerzas de arrastre y de empuje vertical combinadas, se discuten los resultados obtenidos a partir de las simulaciones con el modelo simplificado. En primer lugar, se presentan los resultados referentes a la **validación de la curva de estabilidad obtenida experimentalmente** para el vehículo Mercedes Clase C (e: 1/18). Para 6 diferentes condiciones de flujo propuestas, tres superando el umbral de estabilidad y tres en la zona estable, se presentan las fuerzas de arrastre (F_D) y de empuje vertical (F_v) a las que se ve sometido el vehículo.

Como se describió en la segunda fase, el vehículo presentará una inestabilidad cuando la fuerza de arrastre supere la fuerza de rozamiento (F_R). Esta última no es más que el producto del coeficiente de rozamiento experimental ($\mu=0.602$) por el peso sumergido ($M_c g - F_v$). Se trata de un valor instantáneo, dependiente del valor de la fuerza de empuje vertical (F_v) en cada instante que hace variar el peso sumergido del vehículo. En los gráficos de la Figura 11 se presentan las fuerzas actuantes sobre el vehículo para una de las tres condiciones de flujo establecidas por encima del umbral de estabilidad (izquierda) obtenido experimentalmente y para una de las condiciones de flujo situada en la zona de estabilidad (derecha). Se observa como las fuerzas son coherentes con la condición de estabilidad del vehículo en cada caso.

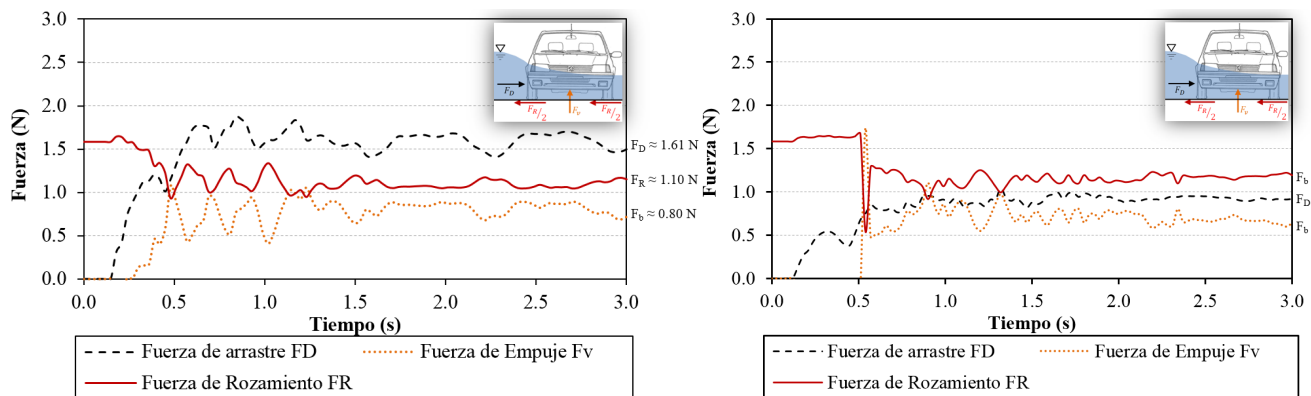


Figura 11 | Fuerzas hidrodinámicas sobre el vehículo a escala 1:18, resultado obtenidas mediante simulación del modelo reducido. $v=1.2$ m/s $y=0.88$ cm (izquierda) y $v=1.4$ m/s $y=0.50$ cm (derecha).

Estos resultados validan la curva para velocidades superiores a las ensayadas experimentalmente. El desarrollo de simulaciones análogas a éstas, utilizando diferentes modelos de vehículos, lleva a poder obtener las curvas o umbrales de estabilidad para cualquier tipo de vehículo. De esta manera el trabajo llevado a cabo en laboratorio se hace extensible a unas simulaciones numéricas calibradas y comprobadas. Otros aspectos como la variación del centro de masas, acercándolo más a la posición del motor del vehículo, o la consideración de infiltración del agua en el vehículo, podrán ser analizados en futuras simulaciones.

El segundo aspecto a tratar ha sido la comprobación de la correcta asunción de que este fenómeno seguía la **semejanza de Froude**, sin que los efectos de escala afectaran de manera sustancial a los resultados de estabilidad de los vehículos. Las

simulaciones del modelo (e: 1/18) y del prototipo (e: 1/1) han resultado en unas fuerzas hidrodinámicas actuantes sobre ambos muy similares (acorde a su respectiva escala en cada caso).

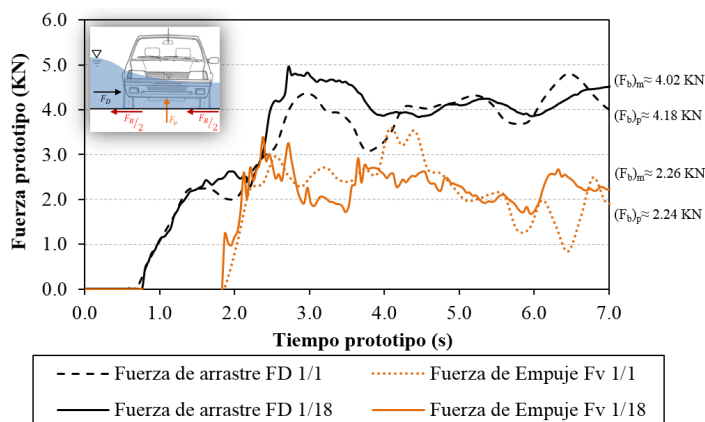


Figura 12 | Comparativa de las fuerzas hidrodinámicas sobre el vehículo a escala 1:18 y sobre su prototipo (e:1/1). $v = 1.0$ m/s (4.24 m/s) y $\gamma = 0.70$ cm (12.6 cm).

La simulación para el prototipo se preparó escalando el modelo 18 veces en cada dirección del espacio y estableciendo una condición de contorno de entrada con unos valores de calado ($\lambda \cdot \gamma_m$) y velocidad ($\sqrt{\lambda} \cdot v_m$) escalados de acuerdo a la semejanza de Froude. La evolución de estas fuerzas a lo largo del tiempo simulado responde a idénticas tendencias para ambas escalas, tal y como se presenta en la Figura 12. Para llevar a cabo esta comparación se han escalado a prototipo las fuerzas sobre el modelo ($\lambda^3 \cdot F_m$), así como el tiempo de cálculo ($\sqrt{\lambda} \cdot t_m$), de acuerdo a las escalas de la semejanza de Froude.

Quedó demostrado experimentalmente, mediante la técnica de series de escala, que el fenómeno seguía la semejanza de Froude y los efectos de escala no alteraban sustancialmente las variables hidráulicas determinantes en el análisis de la estabilidad. Mediante simulaciones numéricas, se ha comprobado que las fuerzas hidrodinámicas escaladas desde modelo a prototipo corresponden a las obtenidas directamente simulando el prototipo.

CONCLUSIONES

Tras la revisión del estado de la cuestión referente al estudio de la estabilidad de vehículos expuestos a inundaciones, se vio la necesidad de llevar a cabo una completa y rigurosa campaña experimental ensayando una gran variedad de vehículos con el objetivo de obtener una metodología generalizable para definir la zona estable en el dominio calado-velocidad para cualquier tipo de vehículo.

En la campaña experimental llevada a cabo se han ensayado doce modelos de vehículos a escala reducida y, en base al análisis de los resultados, se propone una metodología para obtener el umbral de estabilidad para cualquier vehículo real expuesto a una inundación. Los ensayos fueron realizados con tres escalas diferentes (1:14, 1:18 y 1:24), en los que se incluían además el análisis de flotación y de rozamiento, los cuales hacen que el presente estudio sea el más completo hasta el momento. Esta metodología permite definir una zona estable en el dominio calado-velocidad con la suficiente precisión para cualquier vehículo real. Con esta metodología se proporciona una herramienta que puede ser utilizada por los responsables en la toma de decisiones en el campo de la gestión del riesgo de inundaciones en zonas urbanas, definiendo un coche de diseño y obteniendo su correspondiente umbral de estabilidad.

En cuanto al análisis numérico de la estabilidad de vehículos, se han llevado a cabo 3 fases de simulaciones para un único vehículo Mercedes Clase C (e: 1/18). La primera responde a la simulación del vehículo únicamente sometido a la fuerza de flotación, de manera que se valida que el calado de flotación numérico corresponde al experimental. Para la segunda fase se comprueba el correcto comportamiento del vehículo cuando se ve sometido a ciertas condiciones hidrodinámicas. Como última fase, se analizan diferentes situaciones que no fueron ensayadas en laboratorio. En primer lugar, se evalúa el comportamiento del vehículo ante seis diferentes condiciones de flujo (calados y velocidades), comprobando así la adecuación de la curva de

estabilidad propuesta en base a los resultados experimentales. De las seis condiciones de flujo, tres debían ser estables y otras tres inestables, correspondiendo el análisis de fuerzas con lo previsto. El desarrollo en esta última fase de un modelo de un dominio de cálculo menor, permitió llevar a cabo, con unos costes computacionales razonables, el análisis de fuerzas para un vehículo prototipo ($e: 1/1$) que al compararse con las fuerzas escaladas del modelo ($e: 1/18$) correspondían adecuadamente. Queda comprobado numéricamente que los efectos de escala no alteran las fuerzas aplicadas sobre el vehículo prototipo y que, por tanto, los ensayos realizados en laboratorio son perfectamente escalables a prototipo.

El hecho de realizar un modelo numérico calibrado con los resultados obtenidos experimentalmente, permite en este caso la modelación de cualquier vehículo y determinar su límite de estabilidad ante diferentes condiciones de flujo. Se pueden obtener, además, las fuerzas actuantes sobre el vehículo, tanto la de arrastre como la de empuje vertical, de manera que el fenómeno puede ser comprendido con mayor detalle. Es posible, por tanto, el desarrollo de curvas de estabilidad para cualquier vehículo a partir de simulaciones numéricas como las llevadas a cabo para el modelo Mercedes Clase C simulado para este estudio. Se ha presentado con este estudio una aplicación de herramientas hidráulicas tridimensionales para el estudio de la gestión del riesgo de inundaciones en zonas urbanas, con la que se abre una nueva y amplia línea de trabajo para futuros desarrollos.

AGRADECIMIENTOS

El primer autor del presente artículo desea agradecer al Ministerio de Economía y Competitividad en relación a la colaboración financiera correspondiente a la Beca FPI2012 con número de referencia BES-2012-051781.

Este trabajo se enmarcaba en el proyecto de investigación Criterios de riesgo a aplicar en el diseño de sistemas de captación ante inundaciones en medio urbano. Este proyecto fue financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad registrado con el código CGL2011-26958.

REFERENCIAS

- Bonham, A. J., Hattersley, R. T. (1967). Low Level Causeways. WRL Report No. 100. University of New South Wales. Sidney, Australia. 30p.
- Gordon A.D., Stone P.B. (1973). Car Stability on Road Causeways. WRL Technical Report No. 73/12. University of New South Wales. Sidney, Australia.
- Keller R.J., Mitsch B. (1993). Safety Aspects of the Design of Roadways as Floodways, Research Report No. 69. Urban Water Research Association of Australia. 41p.
- Teo, F. Y. (2010). Study of the hydrodynamic processes of rivers and floodplains with obstructions. Tesis Doctoral. University of Cardiff. Reino Unido.
- Xia, J., Falconer, R. A., Xiao, X., Wang, Y. (2013). Criterion of vehicle stability in floodwaters based on theoretical and experimental studies. *Natural Hazards*, 70(2), 1619–1630.
- Xia, J., Teo, F. Y., Lin, B., Falconer, R. A. (2011). Formula of incipient velocity for flooded vehicles. *Natural Hazards*, 58(1), 1–14.
- Shu, C., Xia, J., Falconer, R. A., Lin, B. (2011). Incipient velocity for partially submerged vehicles in floodwaters. *Journal of Hydraulic Research*, 49(6), 709–717.
- Toda, K., Ishigaki, T., Ozaki, T. (2013) “Experiments study on floating car in flooding” en International Conference on Flood Resilience: Experiences in Asia and Europe. Exeter, Reino Unido. 6p.

- Kramer, M., Terheiden, K., y Wieprecht, S. (2016). Safety criteria for the trafficability of inundated roads in urban floodings. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 17, 77–84.
- Martínez-Gomariz, E., Gómez, M., Russo, B., Djordjević, S., 2016. Stability criteria for flooded vehicles: a state- of-the-art review. *Journal of Flood Risk Management*. 10p. (record online).
- Shand, T. D., Cox, R. J., Blacka, M. J., Smith, G. P. (2011). Australian Rainfall and Runoff (AR&R). Revision Project 10: Appropriate Safety Criteria for Vehicles (Report Number: P10/S2/020). Sidney, Australia.
- Buscariolo, F. F., Volpe, L. J. Della (2014). “Water ingestion and pressure analysis of automotive vehicles using multiphase CFD” en XXII Simpósio Internacional de Engenharia Automotiva (SIMEA). Brasil. 8p.
- Arrighi, C., Alcèrrec-Huerta, J. C., Oumeraci, H., y Castelli, F. (2015). “Dynamics of vehicle debris during a flood: incipient motion conditions and numerical experiments” en 36th IAHR World Congress. La Haya, Países Bajos. 4p.
- Arrighi, C., Alcèrrec-Huerta, J. C., Oumeraci, H., y Castelli, F. (2015). Drag and lift contribution to the incipient motion of partly submerged flooded vehicles. *Journal of Fluids and Structures*, 57, 170–184.
- Albano, R., Sole, A., Mirauda, D., y Adamowski, J. (2016). Modelling large floating bodies in urban area flash-floods via a Smoothed Particle Hydrodynamics model. *Journal of Hydrology*. (Aceptado).
- Gerard, M. (2006). Tire-road friction estimation using slip-based observers. Department of Automatic Control. Lund Institute of Technology. Tesis de Master. Lund, Suecia. 68p.
- Sotelo, G. (1995). Hidráulica general. Limusa. México.
- Lencastre, A. (1998). Manual de Ingeniería Hidráulica. Universidad Pública de Navarra. España.