

VERTIDOS LÍQUIDOS SOBRE UN PLANO Y SISTEMAS DE EVACUACIÓN DE DERRAMES ACCIDENTALES EN TÚNELES CARRETEROS

Ignacio García-Arango Cienfuegos-Jovellanos.
Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.

Mº Fomento. Demarcación de Carreteras del Estado en Asturias.

Fernando Hacar Rodríguez.

Ingeniero Técnico de Obras Públicas.

Mº Fomento. Demarcación de Carreteras del Estado en Asturias.

Celestino González Nicieza.

Ingeniero de Minas.

Dpto. de Explotación y Prospección de Minas. Universidad de Oviedo.

Arturo Álvarez Vigil.

Ingeniero de Telecomunicaciones.

Dpto. de Matemáticas. Universidad de Oviedo.

RESUMEN

El estudio de vertidos líquidos sobre una superficie resulta de especial interés en túneles carreteros. El paso de mercancías peligrosas, en aquellos túneles en los que ello sea autorizado, significa una explotación con riesgos importantes en caso de producirse una fuga, por ejemplo, debido a la rotura, formación de un orificio en un compartimento de la cisterna. En pocos segundos puede verse ocupada una superficie importante de la calzada del túnel. Si el vertido además es de un producto en combustión las consecuencias pueden ser aún más graves. Se estudian algunos sistemas instalados en túneles carreteros para minimizar los daños que un accidente de tal índole podría provocar.

ABSTRACT

Liquids spilt on a road surface are a particularly serious problem in road tunnels. Where the transport of dangerous products is authorized in tunnels, there is grave risk when these leak as a result of a break or a hole in a section of the tank. A large area of the roadway may be flooded in a few seconds, with more serious consequences if the product catches fire. This article outlines some of the systems installed in road tunnels to reduce the damage caused by accidents of this kind.

Se admiten comentarios a este artículo, que deberán ser remitidos a la Redacción de la ROP antes del 30 de julio de 1997.

Recibido en ROP
enero de 1997:

NOTAS PREVIAS

OBJETO DEL PRESENTE ESTUDIO

Existen situaciones reales en las que el vertido de líquidos sobre un plano supone un riesgo elevado para las personas y un peligro para la maquinaria o vehículos. El vertido accidental de un líquido inflamable procedente de un camión cisterna sobre la capa de rodadura de una carretera es un buen ejemplo de ello, pero si además el vertido se produce dentro del túnel los riesgos son aún mayores.

DIFERENCIACIÓN EN LA EVACUACIÓN DE FLUIDOS LIMPIOS Y CONTAMINANTES

Es conocido que las aguas que provienen de un túnel pueden agruparse en dos clases bien diferenciadas. Unas son las aguas limpias de filtración, que serán recogidas por los sistemas de drenaje. Otras son las que provienen directamente de la escorrentía sobre la calzada del túnel, que pueden ser las que también por filtración alcancen dicha calzada (por ejemplo, debido a goteos, filtraciones por hastiales, por solera...etc.), las que resulten de las operaciones de limpieza¹, y los derrames que accidentalmente puedan producirse.

Las técnicas actuales permiten, y aconsejan, diferenciar esos dos tipos de flujos, pues el contaminante debe de poder ser almacenado para su tratamiento posterior, logrando así minimizar los daños ambientales que puedan producirse.

Los derrames pueden ser de sustancias peligrosas, resultado de un accidente, causando entonces daños, tanto por su vertido a los cauces ordinarios, como en su evolución a lo largo del túnel, antes de salir al exterior, lo que puede además significar un riesgo considerable para las personas que pudiera haber en el túnel en el momento del siniestro (Figura 1)².

ESTUDIOS DE REFERENCIA

Son interesantes los trabajos del C.E.T.U.^{3,4} sobre este asunto, analizando diferentes sistemas normalmente empleados en túneles para la evacuación de los fluidos que provengan de la calzada.

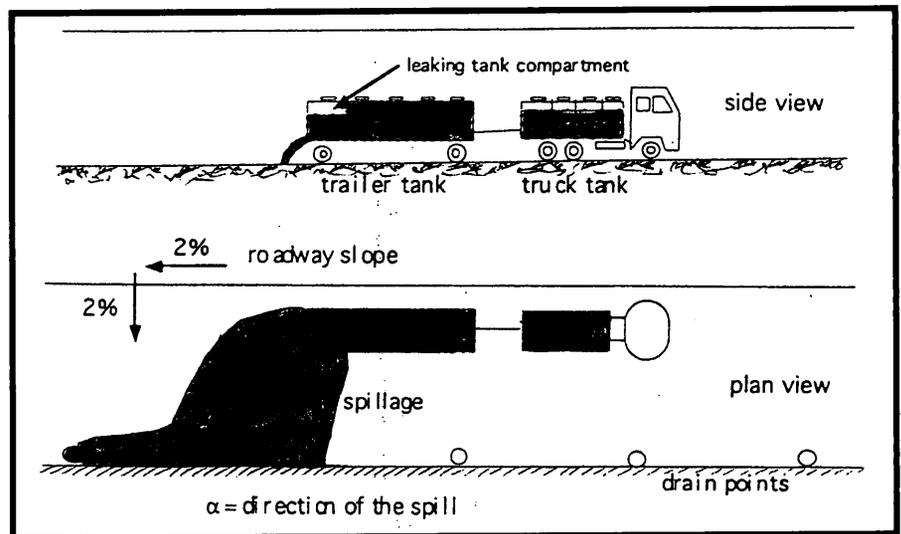
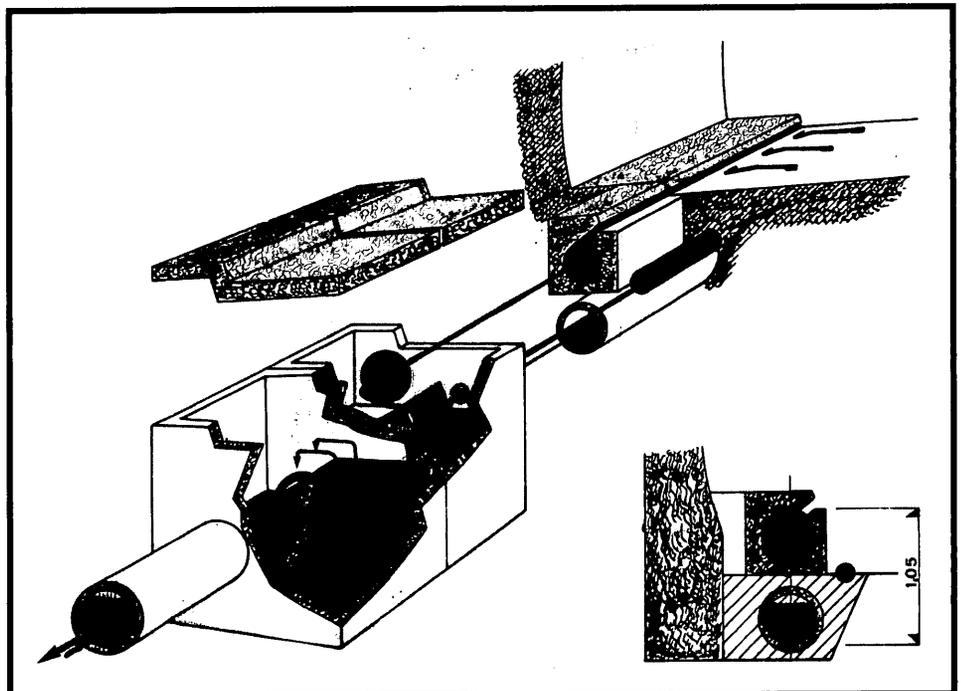


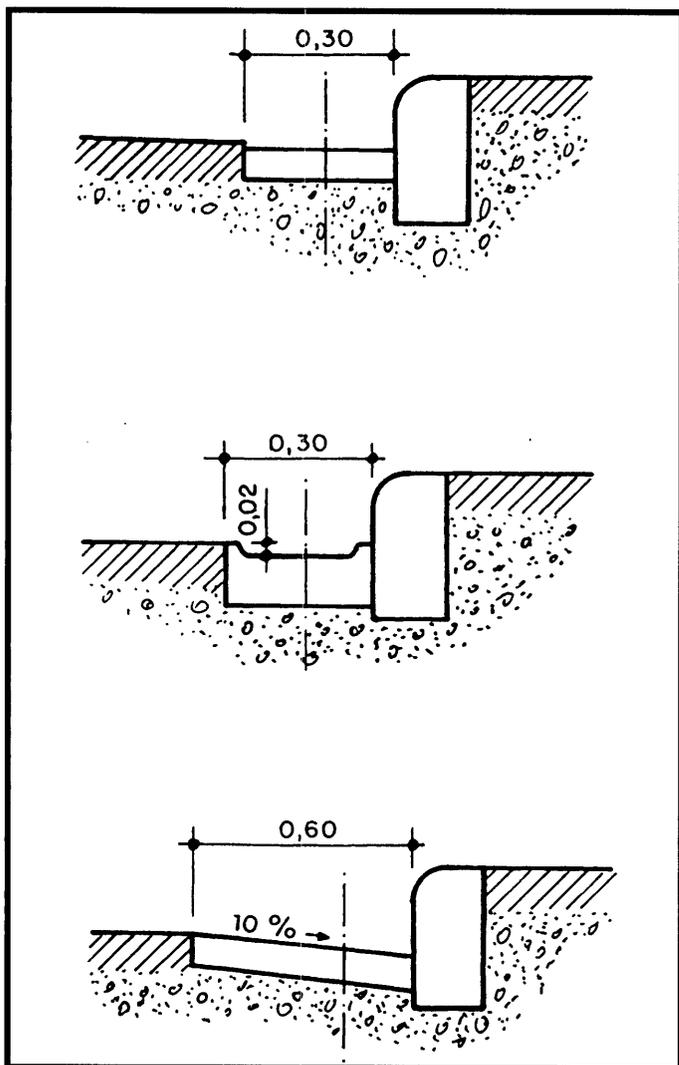
Figura 1. Esquema empleado para el análisis teórico del accidente en el túnel de Caldecott. (Ingason, Haukur, 1994).

Los ensayos de derrame en los túneles de Monts, Siaix, Grand Mare, Cornil, Châtillon, Saint Germain se realizaron simulando la rotura de un raccord o la rotura completa de un compartimento de una cisterna. En el primer caso se vierte agua durante 10 min con un caudal de 0,019 m³/s, 0,035 m³/s ó 0,037 m³/s. En el segundo se produce un vertido de un depósito de agua de 5 m³ ó 10 m³ en unos 6,5 s.

Analizamos la importancia de la diferente superficie que se afectaría en el caso de un derrame de un líquido en un túnel, y podemos referirnos al caso de que

Figura 2. Sistema de recuperación de vertidos en el túnel de Siaix. (Lingelser, S. 1994).





sea un producto en combustión, según sea uno u otro tipo de dispositivo para la evacuación de dicho vertido.

Igualmente, se ha demostrado en ensayos adicionales que el funcionamiento de los sifones corta-fuegos (Figura 2), ubicados a intervalos constantes a lo largo de las conducciones de

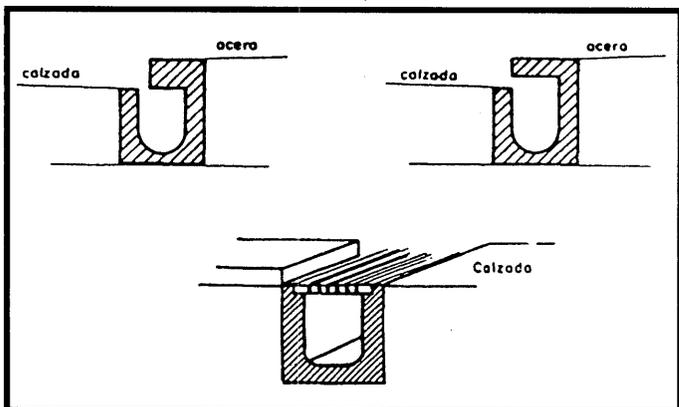


Figura 5. Sumidero en el túnel de Vallvidrera en construcción. (14 de junio de 1991).

evacuación, permiten reducir la propagación del fuego o de las explosiones a lo largo del túnel.

SISTEMAS DE DESAGÜE: CACES, SUMIDEROS

La nomenclatura que emplearemos para los diversos dispositivos que normalmente se utilizan en los túneles, para la evacuación de las aguas superficiales, es la que se viene utilizando en las diferentes Instrucciones de Drenaje^{5,6} así como en los textos al respecto.

Figura 3. Diversos tipos de caces de bordillo.

Un caz es una faja estrecha longitudinal, en forma de canal revestido, de muy poca profundidad, y generalmente situado al borde de la plataforma; junto a aceras el caz está limitado por un bordillo o barrera

(Figura 3). Un tipo de caz son los llamados de "caces de sumidero continuo", y distinguiremos entre los "caces de sumidero continuo con entrada horizontal", "caces de sumidero continuo con entrada vertical", y "caces de sumidero continuo con entrada horizontal con rejilla" (Figura 4).

Los sumideros se emplean para recoger el agua superficial que corre por los caces, y pueden agruparse en tres tipos; "sumidero de bordillo con entrada vertical", "sumidero con entrada horizontal con rejilla" (Figura 5 y Figura 6) y "sumidero con entrada horizontal y vertical o mixtos" (Figura 7).

SUPUESTOS BÁSICOS

Forma de producirse el derrame

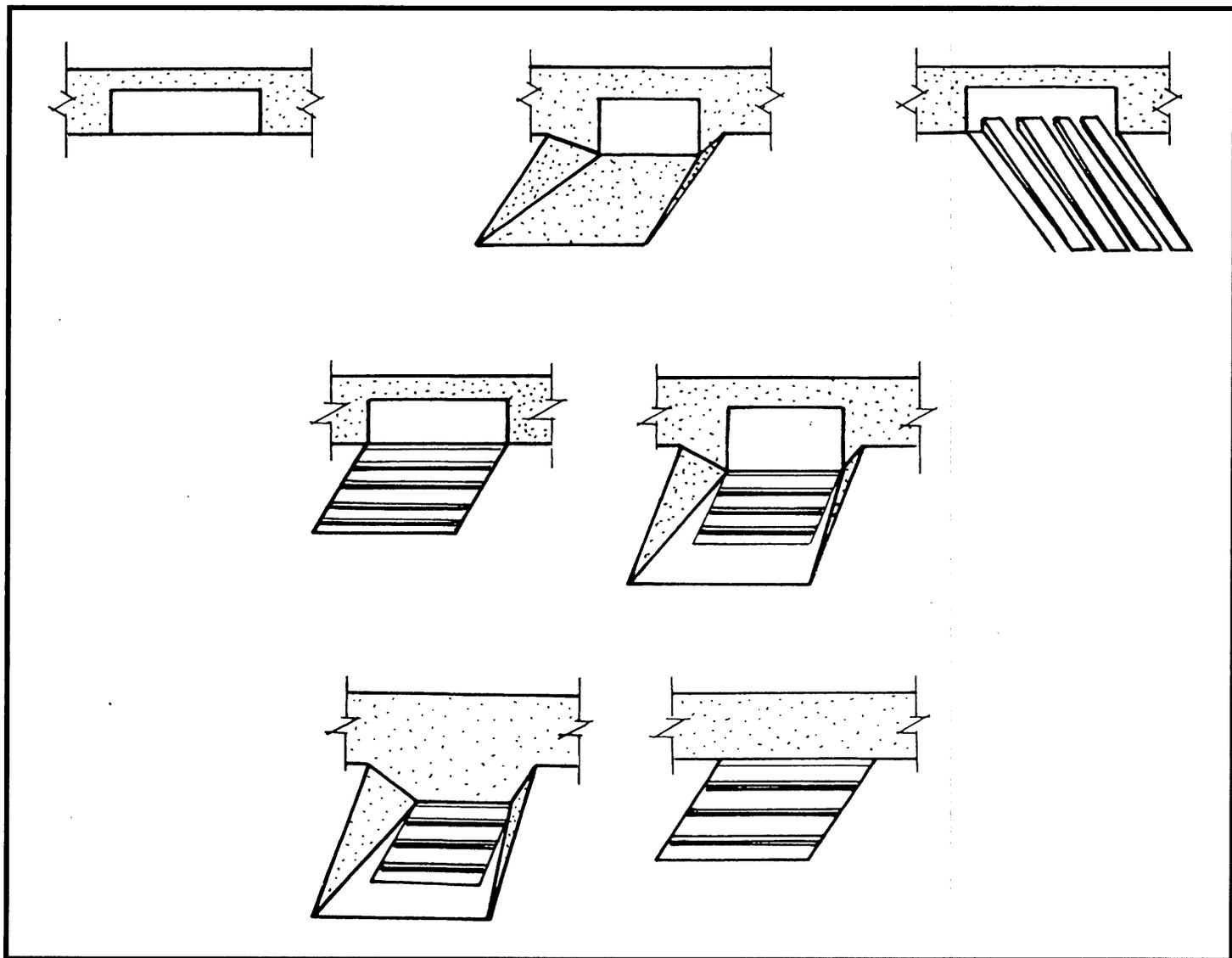
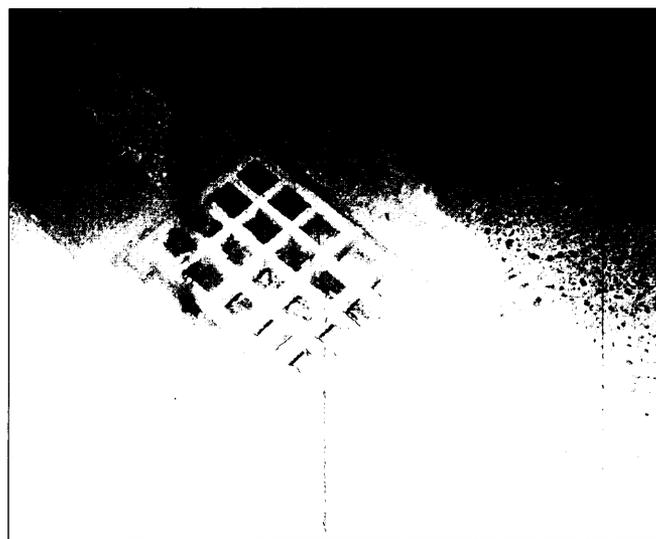
Figura 4. Caces de sumidero continuo con entradas horizontal, vertical y horizontal con rejilla.

Según sea el derrame correspondiente a la rotura de un raccord o a la del compartimiento de una cisterna, en los ensayos tiene una importancia fundamental los primeros instantes

Figura 6. Sumideros en el interior del túnel de "Tetuán", Santander. (Diciembre de 1995).



Figura 7. Sumideros de bordillo con entrada vertical, entrada horizontal con rejilla y mixtos (con y sin depresión).



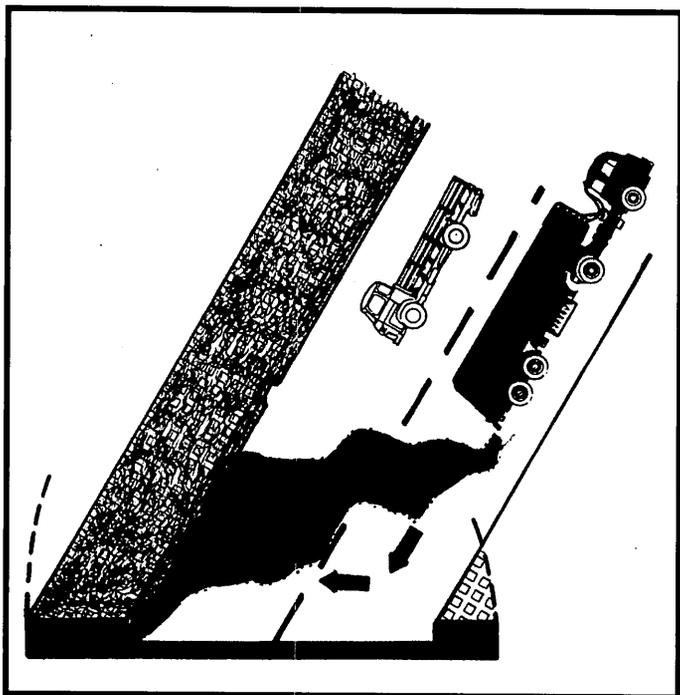


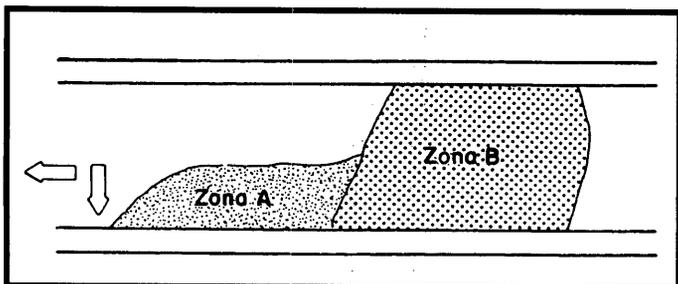
Figura 8. Primeros instantes del derrame.

del derrame, en los que jugará un papel fundamental la orientación del vertido, el caudal, la impulsión...etc., extendiéndose el fluido hasta alcanzar el bordillo aguas abajo del punto de vertido (Figura 8), entrando en los caces o sumideros y discurriendo la circulación, del fluido que no hubiera sido tragado, por la calzada. En los trabajos a que nos referimos, esas dos superficies ocupadas se denominan "B" y "A" (Figura 9). No siempre son claramente distinguibles, especialmente en aquellos casos en los que los caces o sumideros son capaces de tragar el flujo en escasos metros del lugar en que se produce el derrame.

Caudal circulante por el caz

En primera aproximación supondremos la calzada como un caz, de anchura indefinida, por la que circula el fluido derramado. Admitiendo que la anchura superior de la corriente "W" sea igual al perímetro mojado, lo que será aproximadamente cierto en

Figura 9. Superficies mojadas en un derrame. (Lingelser, S. 1994).



los canales anchos de escasa profundidad, el caudal circulante "Q" se puede expresar como:

$$Q = 0,377 \cdot \frac{1}{n \cdot t} \cdot S^{1/2} \cdot d^{8/3} \quad (1)$$

- Q = Caudal que discurre por la calzada, m³/s
- n = Coeficiente de rugosidad de Manning.
- S = Pendiente longitudinal.
- t = Peralte o pendiente transversal.
- d = Altura alcanza por el fluido medida en el borde del bordillo, m

(con las expresiones de la hidráulica elemental obtenemos una expresión similar con coeficiente 0,315).

Velocidad y caudal por orificios con salida al aire⁸

La velocidad teórica de salida de un fluido en caída libre por un orificio practicado en un depósito, con la sección del orificio muy pequeña en relación a la del depósito (fórmula de Torricelli), es:

$$V = \sqrt{2 \cdot g \cdot h} \quad (2)$$

- V = Velocidad de salida.
- h = Altura de la lámina de agua.
- g = Aceleración de la gravedad.

y el caudal que realmente desagua el orificio es:

$$Q = \mu \cdot f \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h} \quad (3)$$

- μ = Coeficiente de salida (o de gasto).
- f = Sección del orificio.

Para un orificio practicado en un depósito de pared delgada, de sección circular, en el supuesto de que la carga sea la misma para todo el área del orificio, el caudal que desaguará será entonces:

$$Q = \mu \cdot \pi \cdot r^2 \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h} \quad (4)$$

- r = Radio del orificio.

Si la carga no es la misma para toda la sección del orificio, y en el caso de sección circular de radio "r", el caudal toma la expresión:

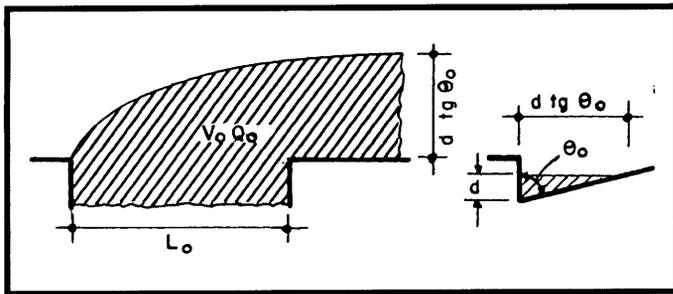


Figura 10.
Sumidero de bordillo con entrada lateral. (Metcalf; Eddy. 1997).

F = Sección del depósito.
f = Sección del orificio.
h₁ = Altura de la lámina de agua.
t = Tiempo requerido para el descenso del nivel del depósito de h₁ a h₂.

De la misma forma, para orificios de sección rectangular "(a,b)", con carga "h" en el centro del orificio, el caudal viene dado por:

$$Q = \mu_1 \cdot \left(1 - \frac{1}{32} \cdot \left(\frac{r}{h} \right)^2 - \frac{5}{1.024} \cdot \left(\frac{r}{h} \right)^4 + \dots \right) \cdot \pi \cdot r^2 \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h} \quad (5)$$

$$Q = \mu_1 \cdot a \cdot b \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h} \quad (7)$$

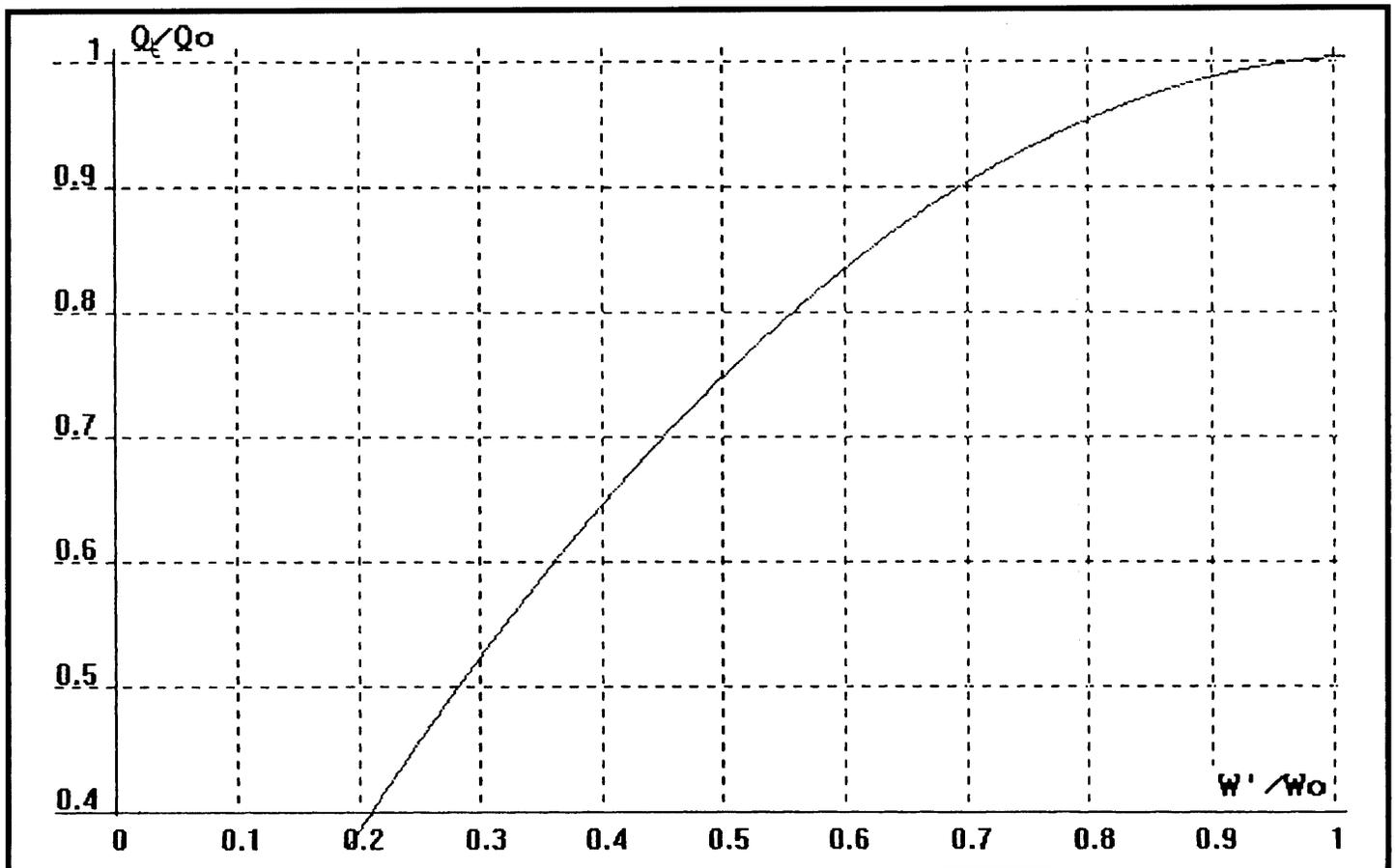
También podemos obtener de manera inmediata el tiempo requerido para que el nivel del depósito descienda una determinada altura:

$$t = \frac{F}{f} \cdot \frac{2}{\mu \cdot \sqrt{2 \cdot g}} \cdot (\sqrt{h_1} - \sqrt{h_2}) \quad (6)$$

Capacidad de desagüe de los sumideros

En el caso de un sumidero de entrada horizontal con rejilla sin depresión, con rejas de barras de anchura igual a las aberturas, con ancho del sumidero "W_o" igual a la de la corriente fluida "W", la longitud "L_o" precisa del sumidero⁹ pa-

Figura 11. Relaciones de caudal respecto a relaciones de interceptación para sumideros de cuneta triangular. (Metcalf; Eddy. 1977).



ra que sea capaz de tragar todo el caudal circulante "Q_o" sobre las rejillas es:

$$L_o = 1,2 \cdot \frac{2 \cdot Q_o}{d^2} \cdot \left(\frac{d - W_o \cdot t}{g} \right)^{1/2} \quad (8)$$

L_o = Longitud precisa del sumidero, m
 W_o = Ancho del sumidero, m
 g = Aceleración de la gravedad, m/s²

Para un sumidero de bordillo con entrada lateral (Figura 10) tal que trague al menos el 60% del caudal que transporte el caz, la capacidad del sumidero es proporcional a su longitud, y:

$$L = \frac{Q_o}{0,2 \cdot g^{1/2} \cdot d^{3/2}} \quad (9)$$

La corriente que discurre por la calzada será tragada total o parcialmente por el sumidero que la intercepte, dependiendo tanto de cómo sea esa corriente como de las características del propio sumidero. En cuanto al caudal que discurre por la calzada "Q" lo hará alcanzando una altura en el bordillo "d" deducida de la ecuación, con una ocupación de anchura "W", con una área de la sección transversal o sección mojada "A", y con velocidad media de la corriente "V".

En esas condiciones la corriente alcanza el sumidero de anchura "W_o", y será completamente tragada por ese sumidero si la longitud de éste "L_o" es mayor o igual que la obtenida con la ecuación, que llamaremos "L'". Aquél caudal "Q' " tal que el valor obtenido de "L' " se iguale al real "L_o" que tenga el sumidero realmente instalado será la corriente que es capaz de tragar el sumidero para esas condiciones de circulación por la cuneta (con caudal "Q' " y ancho "W' ").

Pero la corriente que realmente discurre por la cuneta es de caudal "Q" y de ancho "W", por lo que, en el caso de sumideros con entrada horizontal, para una relación "W' /W" determinada, obtenemos el valor de "Q' /Q" con ayuda del gráfico que se adjunta (Figura 11) o mediante la siguiente expresión:

$$\frac{Q_1}{Q} = -0,877056 \cdot \left(\frac{W'_o}{W} \right)^2 + 1,824134 \cdot \left(\frac{W'_o}{W} \right) + 0,055952 \quad (10)$$

que nos permite deducir el caudal "Q_t" que traga el sumidero, y evidentemente lo rebasará "Q_r=Q-Q_t".

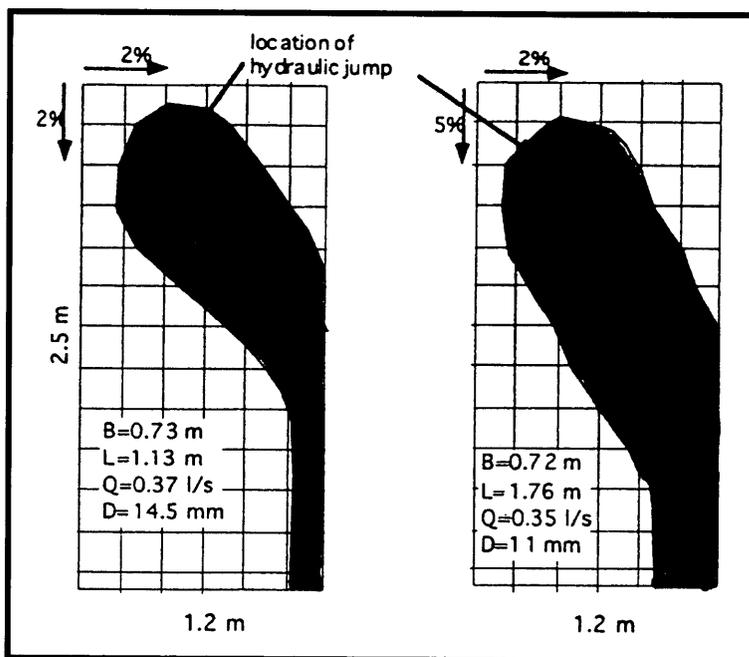


Figura 12. Esquema de las medidas efectuadas vertiendo agua sobre una superficie lisa pintada. (Ingason, Haukur. 1994).

VERTIDOS LÍQUIDOS SOBRE UNA SUPERFICIE

Los ensayos realizados¹⁰ vertiendo un chorro de agua verticalmente, a 70 cm, sobre una superficie lisa pintada de 1,20 m · 2,50 m, y sobre una bituminosa, resultan interesantes para el estudio de la extensión inicial del fluido que accidentalmente pueda derramarse sobre la calzada.

En los ensayos sobre la superficie pintada se estudió la extensión del fluido con varias combinaciones de caudales, pendientes longitudinales del 2% y 5%, transversal del 2% y diámetros del chorro de 11,0 mm y 14,5 mm. En los ensayos sobre la superficie bituminosa se estudió esa extensión del fluido con diversas combinaciones de caudales, pendiente longitudinal del 0%, pendiente transversal del 3,7% y diámetros del chorro de 14,5 mm y 25 mm. En la figura (Figura 12) se representan dos de esos ensayos sobre la superficie lisa pintada; en ambos casos la pendiente transversal es el 2%; en uno la longitudinal es del 2%, y en el otro del 5%

Las superficies mojadas varían según sea la superficie pintada o bituminosa, pero en ambos casos la relación caudal (l/s)-ancho (m), Q-B, se expresan por una función similar. El caso más conservador es el de la superficie asfáltica, resultando:

$$B = 2 \cdot Q^{0,46} \quad (11)$$

B = Ancho del derrame, m
 Q = Caudal vertido, l/s

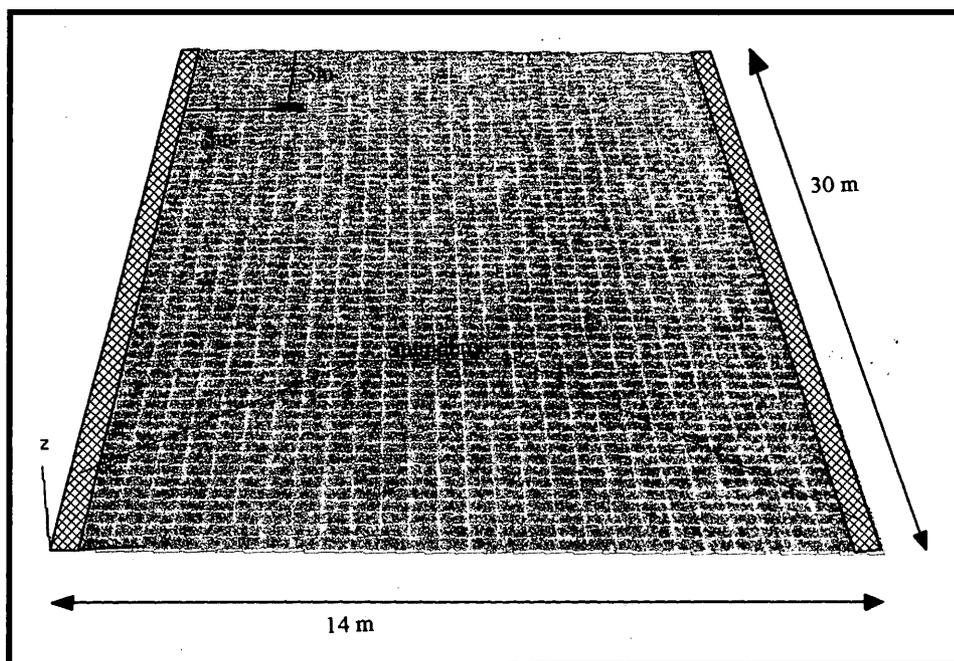


Figura 13. Tramo objeto de análisis. Pendiente longitudinal del 5,2% (ascendente según el eje OY') y transversal del 3,5% (descendente según el eje OX').

La superficie mojada será aproximadamente:

$$A = B \cdot L \quad (12)$$

L = Longitud del derrame, m

Es importante tener en cuenta que los ensayos que nos ocupan se realizaron con caudales máximos de 2,0 l/s y 0,8 l/s, en los casos de superficie asfáltica o pintada, respectivamente.

MODELIZACIÓN

PROPUESTA DE MODELO

Los líquidos vertidos en un accidente tal como el que nos ocupa pueden ser de distinta naturaleza (aceites, gasóleos, productos químicos...etc.), de distintas propiedades físicas y químicas (viscosidad, compresibilidad, movilidad, densidad... etc.) y su comportamiento puede ser muy diverso. Parece lógico hacer hipótesis simplificadoras, -al menos para un primer intento de simulación-, que nos permitan analizar los accidentes más frecuentes, para poder contrastarlos con medidas experimentales o resultados teóricos contrastados.

Hemos considerado que podríamos iniciar una línea de investigación en ese sentido optando, para tratar de simular el fenómeno que nos ocupa, por un código de flujo en medios

porosos en 3D que adaptaremos mediante los subprogramas correspondientes.

La adaptación de la teoría de flujo en medios porosos tridimensionales a la resolución de este tipo de problemas necesita algunos matices. El flujo en medios porosos se considera en régimen laminar, hipótesis que podemos mantener aquí, al menos en una zona razonablemente alejada del punto de vertido. La porosidad ha de hacerse igual a la unidad para que el líquido circule debido al gradiente de presión causado por la gravedad. La dimensión ortogonal al plano que ocupa la calzada ha de ser lo bastante pequeña como para despreciar la presión de la columna de líquido al llenar la zona de la malla en diferencias finitas y acercarse a la simulación de circulación por el plano. También debe hacerse una corrección del vector gravedad para orientarlo según

la dirección de la línea de máxima pendiente del plano de vertido y con el sentido correcto.

Datos de entrada y resultados

Como datos de entrada deben tenerse en cuenta:

- ▼ La disposición y las dimensiones del plano de vertido.
- ▼ Las coordenadas del punto o puntos de vertido.
- ▼ Las condiciones del vertido (presión, velocidad, duración...etc.).
- ▼ Las propiedades físicas del fluido: Densidad, Movilidad,
- ▼ La disposición, geometría y capacidad de los sumideros.

Como salida de resultados debe proporcionar:

- ▼ El área de la zona mojada por el vertido.
- ▼ El tiempo de circulación hasta el sumidero.
- ▼ El caudal recogido en el sumidero.
- ▼ Variables geométricas que caracterizan la zona mojada.

EJEMPLO

Datos de entrada

Como ejemplo de aplicación consideremos un vertido en un punto de una superficie plana (Figura 13) con pendiente longitudinal del 5,2% (ascendente según el eje OY') y transversal del 3,5% (descendente según el eje OX'). El mallado en diferencias finitas representado en la figura consta de 1680 elementos, y las dos hileras laterales de dicho mallado se corresponden a los sumideros, de capacidad ilimitada.

Como dato de entrada se conoce la presión en el punto de vertido, que dependerá de la altura en que éste se realiza, de la sección del orificio de fuga, y conociendo esos valores podemos calcular el volumen derramado:

$$P = \rho \cdot g \cdot h \quad (13)$$

$$V = S \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot P}{\rho}} \cdot t \quad (14)$$

P = Presión en el punto de vertido, Pa

ρ = Densidad del líquido, kg/m³

g = Aceleración de la gravedad, m/s²

H = Altura del vertido, m

V = Volumen del vertido, m³

S = Área del orificio, m²

t = Tiempo de vertido, s

Se supone que el líquido se comporta en régimen laminar, y las propiedades físicas y dimensiones consideradas son la indicadas en el cuadro 1.

RESULTADOS

La simulación se lleva a cabo en diez fases que dependen del tiempo de vertido, obteniendo en el transcurso de los cál-

**CUADRO 1
PROPIEDADES FÍSICAS Y DIMENSIONES
CONSIDERADAS EN EL EJEMPLO**

MAGNITUD	VALOR
Densidad	1.000 Kg/m ³
Movilidad	1·10 ⁴ m/s
Compresibilidad	1·10 ⁵ Pa
Presión del vertido	1·10 ³ Pa
Tiempo de vertido	30s
Pendiente OY*	+5,2%
Pendiente OX*	-3,5%
Ancho de la superficie	14m
Longitud de la superficie	14m
X del punto de vertido	3m
Y del punto de vertido	25m

culos las variables mencionadas anteriormente como salida de resultados. La duración de cada una de las cinco primeras fases es igual a la quinta parte del tiempo de vertido y las cinco últimas tienen una duración igual a dicho tiempo, de manera que el tiempo total simulado es igual a seis veces la duración del vertido.

Uno de los importantes resultados de la modelización es la evolución temporal de la superficie mojada, pudiendo obtener la extensión de dicha superficie, el área mojada en función del tiempo, el caudal recogido en el sumidero, anchura y longitud de la zona mojada en función del tiempo...etc. (Figura 14).

CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS DE FUTURO

Si bien los resultados obtenidos en este primer intento responden de forma cualitativa a lo esperado u obtenidos por otros autores, es preciso, en primer lugar, contrastarlos con resultados prácticos deducidos de ensayos reales con distintos líquidos. Además, es necesario hacer algunas aportaciones más al modelo para poder considerar sumideros de rejillas y laterales de bordillo discontinuos, caces de sumideros continuos con entradas verticales u horizontales...etc.; caracterizar dichos sumideros limitando su capacidad; posibilidad de tener dos vertientes; poder establecer como condición inicial un caudal en vez de una presión; poder considerar vertidos múltiples en distintos puntos o vertidos a lo largo de una recta suponiendo que la fuente esté en movimiento, etc.

No cabe duda que es preciso investigar mucho más en este campo para llegar a obtener resultados satisfactorios. Quizás sea necesario cambiar de modelo de comportamiento, al menos en algún caso. De cualquier forma, parece que se puede continuar una línea de investigación con buenas perspectivas en una materia que es tan importante (y de significativo coste los sistemas que ahora se proyectan) para aumentar la seguridad en el servicio de los túneles carreteros.

INTERÉS DEL TRABAJO DE S. LINGELSER

Aquellos lectores que quieran recibir una copia en castellano del interesante trabajo de S. Lingelser "Essais hydrauliques des systemes de recueil des liquides repandus sur la chaussee des tunnels routiers. Rapport de recherche. C.E.T.U.: Centre d'Etudes des Tunnels. Lyon. Août 1994" pueden solicitarlo a los autores del presente artículo.

NOTAS

(1) **Gabet, Marie-Claude.** Pollution des eaux de lavage des tunnels routiers. Revue Générale des Routes et des Aérodro-mes, N° 687. Juillet-Août 1991.

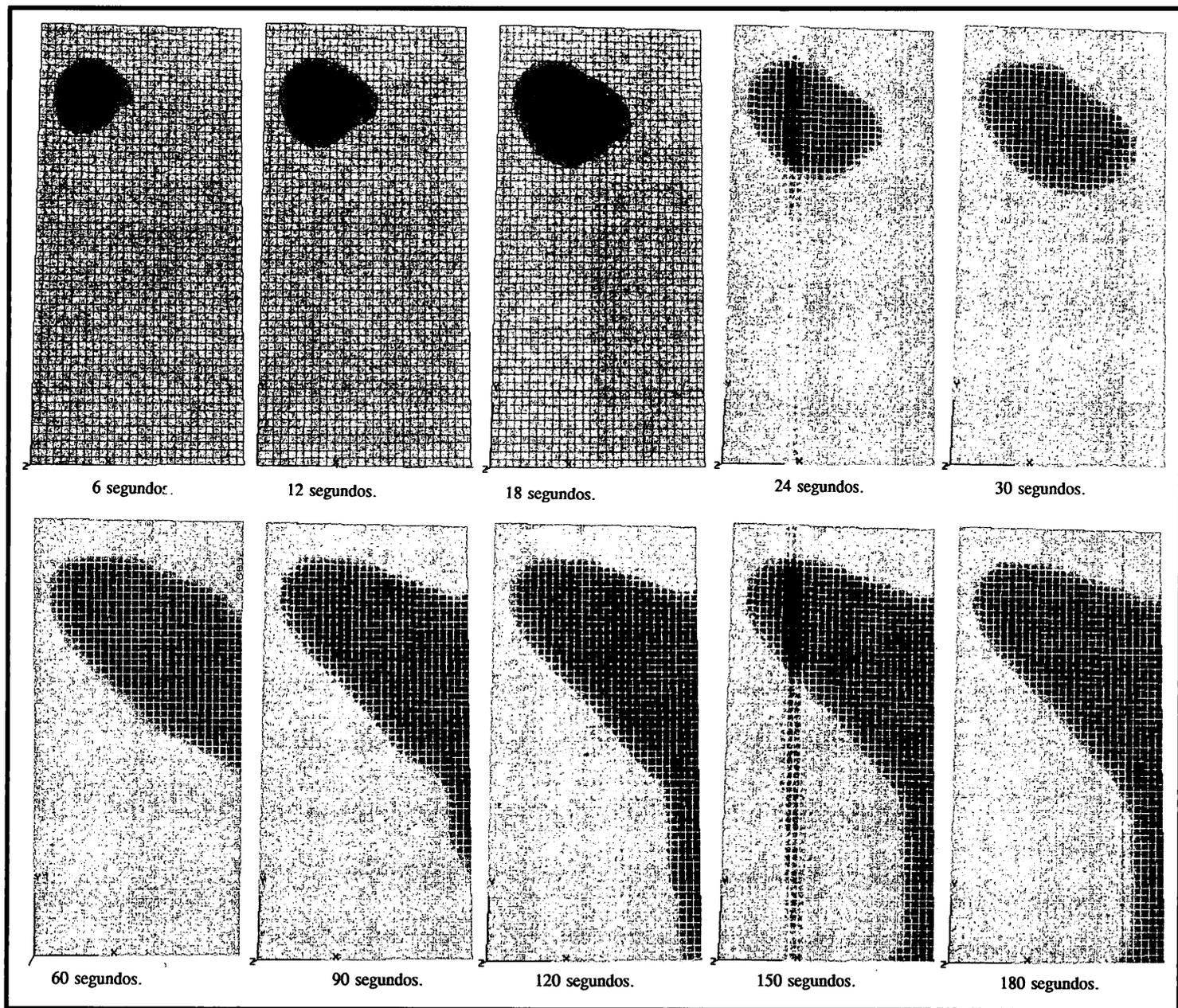


Figura 14. Evolución temporal de la superficie mojada (tiempos respecto al inicio de vertido).

- (2) **Ingason, Haukur.** Small Scale Test of a Road Tanker Fire. International Conference on Fires in Tunnels. Boras, Suecia. 10 y 11 de Octubre de 1994.
- (3) **Lingelser, S.** Essais hydrauliques des systemes de recueil des liquides repandus sur la chaussee des tunnels routiers. Rapport de recherche. C.E.T.U.: Centre d'Etudes des Tunnels. Lyon. Août 1994.
- (4) **Lacroix, D.; Casale, E.; Cwiklinski, C.; Thiboud, A.** Full size testing of drainage systems for burning liquids in road tun-

nels. World Tunnel Congress and S.T.U.V.A. Stuttgart, Alemania. 6 al 11 de Mayo de 1995.

- (5) **M.O.P.** Norma 5.1-IC: Instrucción de Carreteras: Drenaje. 1965.
- (6) **M.O.P.U.** Instrucción 5.2-IC: Drenaje superficial. Julio de 1990.
- (7) **Metcalf, Eddy.** Tratamiento y depuración de las aguas residuales. Editorial Labor S.A. Barcelona. 1977.
- (8) **Forchheimer, Philipp.** Tratado de hidráulica. Editorial Labor S.A. 1935.
- (9) Ref. 7
- (10) Ref. 2