Drenaje de aeropuertos

Por FRANCISCO L.-PEDRAZA, Ingeniero Aeronáutico.

Caudales de las corrientes superficiales.—Al comenzar un aguacero, el agua que no es absorbida por el suelo queda sobre la superficie de éste en forma de gotas que, al ir aumentando de tamaño, se unen formando una lámina de agua, la cual comienza a correr por la superficie en dirección de la máxima pendiente del suelo. Esta corriente va aumentando en intensidad hasta llegar al establecimiento del régimen de equilibrio, para el cual el caudal de la corriente es igual a la cantidad de agua a evacuar y que no es absorbida por el terreno.

El caudal de la corriente depende de varios factores. Mr. Robert E. Horton ha desarrollado una ecuación que relaciona el gasto con los diversos factores de que depende. Esta ecuación en unidades métricas es la siguiente:

$$Q = 2{,}756\ \sigma\ \mathrm{tgh}^{M}\left[\frac{M+1}{M}\left(\frac{\sigma K}{25{,}40}\right)^{\frac{1}{M}}\cdot\frac{t}{60}\right],$$

en la cual,

Q es el caudal en litros por segundo y hectárea,

σ es la cantidad de agua a evacuar, en mm. de altura,

M es un factor que depende de la turbulencia de la corriente,

t es el tiempo transcurrido desde el comienzo del aguacero, y

K es una constante que depende de la rugosidad de la superficie, de la pendiente, del coeficiente de turbulencia y del recorrido máximo de la coriente, estando ligada a ellos por la ecuación

$$K = \frac{414\sqrt{I}}{(3-M)\,n\,L},$$

en la que I es la pendiente, n es el coeficiente de rugosidad y L el recorrido máximo de la corriente en metros.

Se ha comprobado que el factor M varía entre 1,66 para corrientes muy turbulentas y 3 para corrientes laminares, por lo que se tiene buena aproximación en todos los casos tomando $M = 2$, que corresponde a turbulencias del 75 por 100, aunque debería tomarse un valor más bajo para superficies cubiertas de hierba muy densa, y más alto para superficies muy lisas.

Con esta hipótesis la ecuación anterior se convierte en

$$Q = 2{,}756\ \sigma\ \mathrm{tgh}^{2}\left[0{,}1\,.\,t\,.\left(\frac{\sigma}{n\,L}\right)^{0{,}50}.\,I^{0{,}25}\right].$$

El coeficiente de rugosidad tiene en esta fórmula los valores siguientes:

Pavimentos muy lisos	$n = 0{,}02$
Pavimentos lisos y compactos, sin piedras en la superficie.	$n = 0{,}10$
Pavimentos de poca hierba o firmes de alguna rugosidad.	$n = 0{,}20$
Pavimentos de hierba normal.	$n = 0{,}40$
Pavimentos de hierba muy densa	$n = 0{,}80$

Cuando la superficie a estudiar está compuesta por pavimentos de diferentes clases, se toma un coeficiente medio, proporcional a la superficie de cada uno de los pavimentos que intervienen.

Mediante la ecuación anterior y tomando los valores de $n = 0{,}40$, correspondiente a superficie de hierba normal, e $I = 0{,}01$, se han construído los ábacos de las figuras 1 y 2, con los cuales se obtiene la descarga en cada momento, para longitudes máximas de recorrido de aguas de $L = 6$, 12, 18, 24, 30, 37, 45, 60, 75, 90, 120, 150, y 180 metros. En estas curvas están

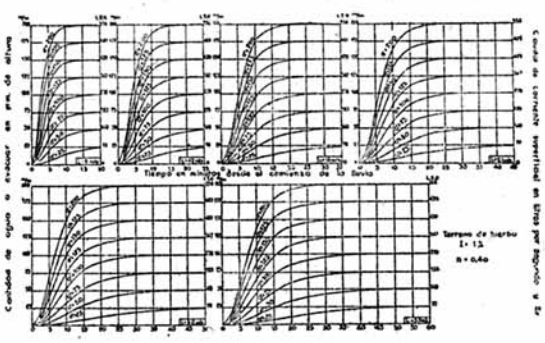

Fig. 1.

tomados en abscisas los tiempos t contados desde el comienzo del chubasco y en ordenadas, los caudales a evacuar en milímetros de agua por hora, es decir, los valores de $Q \times \frac{3.600}{10.000}$, estando dibujada una curva para cada valor de σ, altura de agua a evacuar.

En los casos de tener que aplicar la fórmula anterior para otros valores de n e I, pueden utilizarse los mismos gráficos, haciendo las correc-

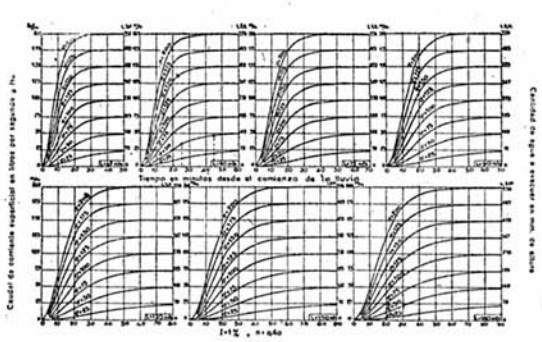

Fig. 2.

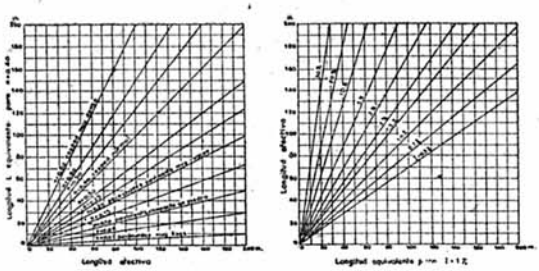

Fig. 3.

ciones convenientes por medio de los gráficos de la figura 3, en la siguiente forma:

a) *Corrección debida al coeficiente de rugosidad.*—Si el coeficiente de rugosidad, en vez de tener el valor de $m = 0{,}40$ tiene otro cualquiera y los demás valores son iguales, como la fórmula general que da el gasto viene en función del producto nL, para un valor constante de Q, los valores de n y L variarán inversamente. Así, por ejemplo, si $n = 0{,}20$, con dobles valores de L se tendrá la misma descarga, y así se ha construído el primer gráfico de la figura.

b) *Corrección debida a la pendiente del terreno.*—Como la descarga depende de $\frac{I^{0,25}}{L^{0,50}}$, si el resto de las condiciones son iguales, al variar I tiene que variar L en relación a sus potencias. Así, por ejemplo, del gráfico segundo se deduce, si $I = 0{,}02$ y $L = 100$ metros, la descarga que se obtiene es la misma que para $L = 70$ metros e $I = 1{,}01$.

c) *Corrección debida a la rugosidad y a la pendiente.*—Cuando los valores de la rugosidad y de la pendiente son al mismo tiempo diferentes de los valores de $n = 0{,}40$ e $I = 0{,}01$, pueden utilizarse los dos gráficos combinados del modo siguiente:

$$n = 0{,}20, \qquad I = 0{,}02 \qquad \text{y} \qquad L = 100 \text{ m.}$$

Entrando en el primer gráfico con $L = 100$ se sigue verticalmente hasta encontrar a la línea $n = 0{,}20$ y continuando por la horizontal hasta su encuentro con $I = 0{,}02$ se obtiene $L = 35$ metros; es decir, que la descarga en este caso es igual a la que resulta en terreno de hierba con $I = 0{,}01$ para $L = 35$ metros.

Para diferenciar los valores de L, llamaremos al valor real "longitud efectiva", y al correspondiente en terreno de hierba con $I = 0{,}01$, "longitud equivalente".

De las curvas de las figs. 1 y 2, obtenidas para

cualquier intensidad específica, pueden ser deducidos los caudales a evacuar en cada momento, con aguaceros de cualquier duración, ya que en este caso no hay que hacer más que restar de la curva de intensidad constante, las ordenadas de otra curva de la misma intensidad que comienza al terminar el aguacero. Así, por ejemplo, en la figura 4 se ha obtenido la curva (2) de descarga de un aguacero de veinte minutos de duración, con intensidad de evacuación de 100 milímetros de altura, para $L = 120$ m., $n = 0{,}40$ e $I = 0{,}01$. El caudal máximo en este caso es de

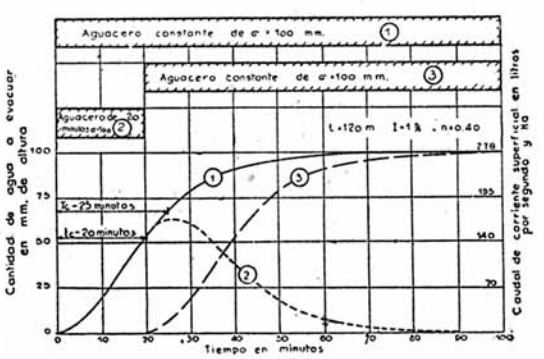

Fig. 4.

65 milímetros de altura por hora, es decir, de 180 litros por segundo y *Ha*, y ocurre a los veinticinco minutos de comenzar el aguacero, es decir, cinco minutos después de terminar.

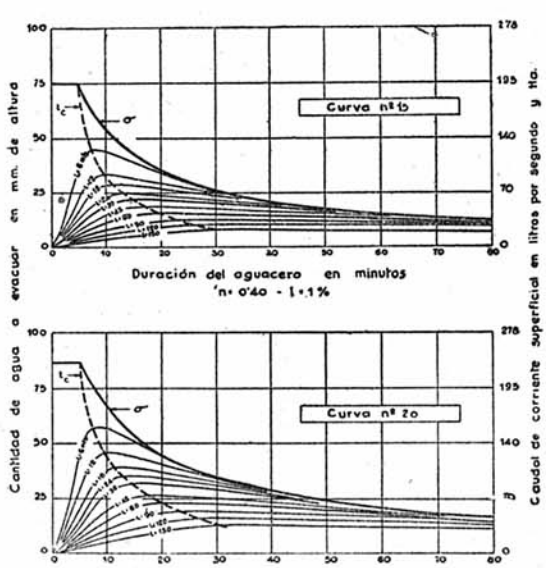

Fig. 5.

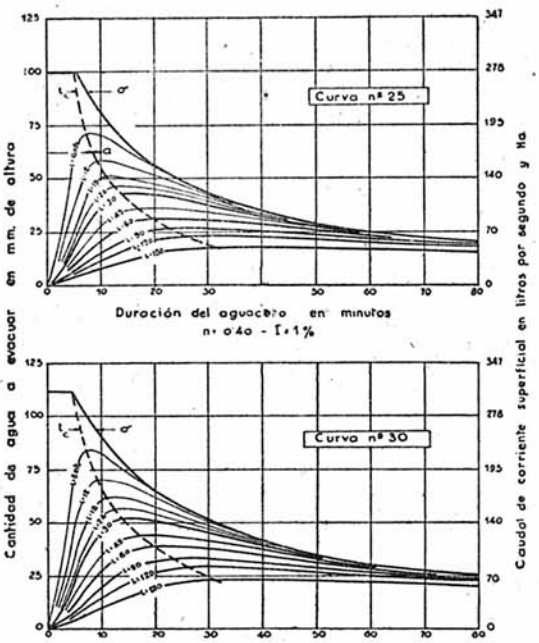

Fig. 6.

Con objeto de disminuir el número de operaciones, se han construído las curvas envolventes de máximos caudales a evacuar, en las figuras 5, 6, 7, 8 y 9, superponiendo a las

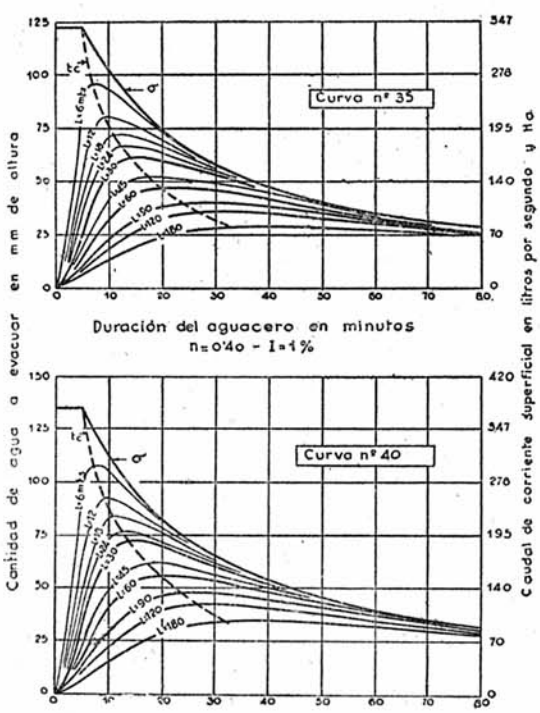

Fig. 7.

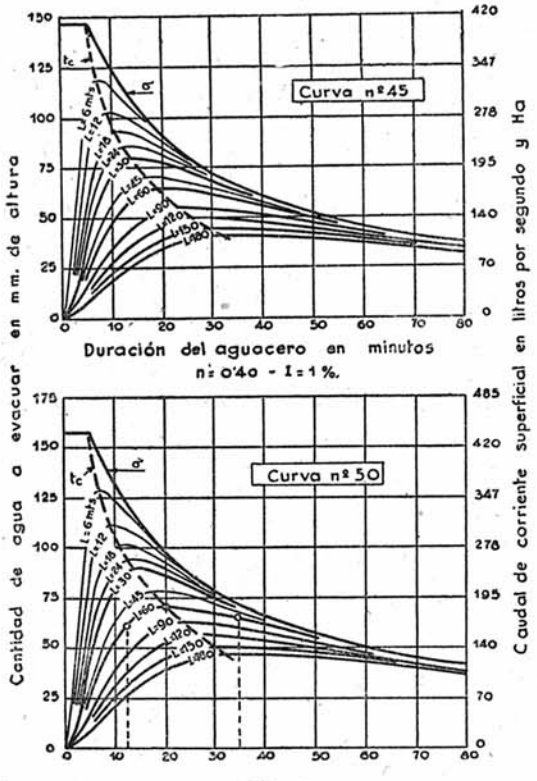

Fig. 8.

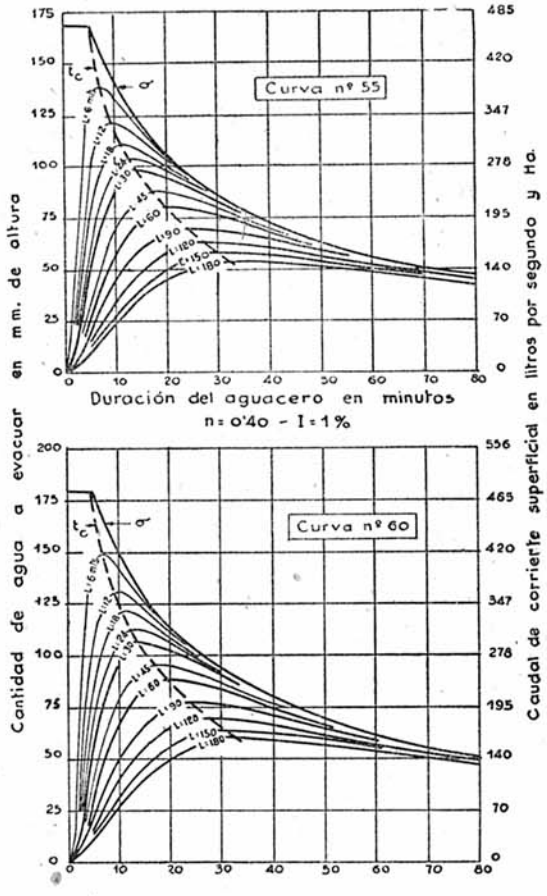

Fig. 9. →

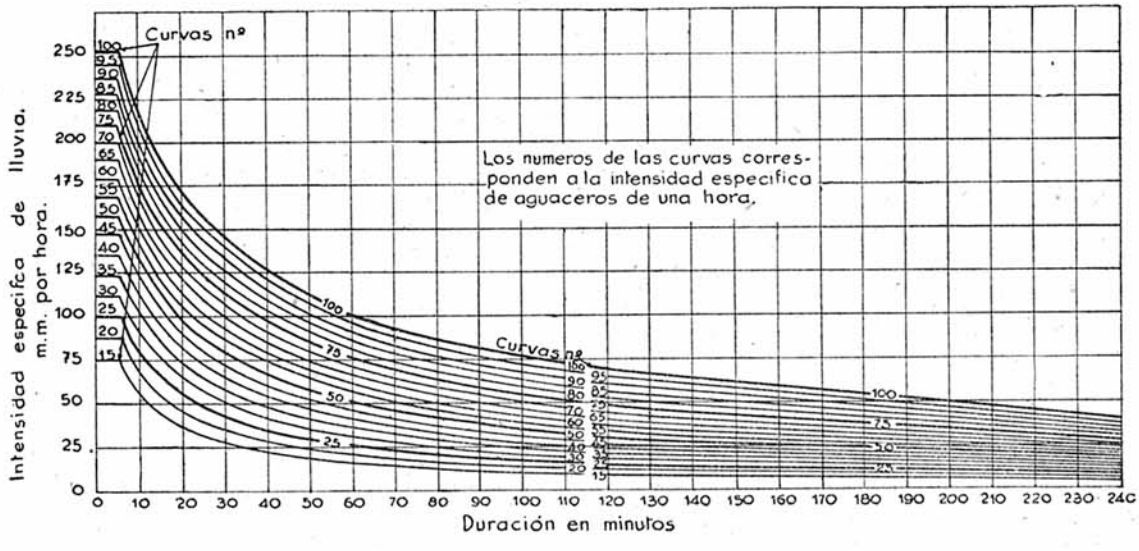

Fig. 10.

curvas de intensidad de lluvia (tomadas como intensidades de evacuación), de la figura 10, las curvas de descarga obtenidas del modo que se ve en la figura 11 (curva B), obteniéndose, por tanto, unos máximos de caudales a evacuar correspondientes al final del aguacero, con lo que

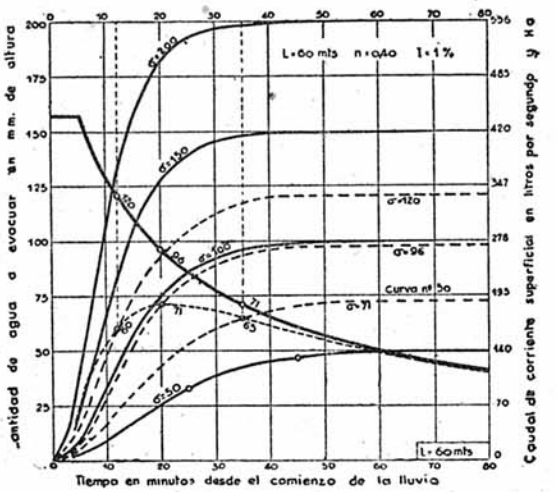

Fig. 11.

se desprecia el retardo con relación a dicho final y el pequeño aumento de caudal a partir de ese punto. Las líneas t_c corresponden, por tanto, a un tiempo muy próximo al crítico de máximo caudal; pero no hay inconveniente en tomar este valor porque es el correspondiente al máximo de todos los aguaceros y el error es muy pequeño.

En la construcción de estos gráficos se han empleado las curvas de intensidad de lluvia, por lo que es necesario hacer antes la corrección debida al coeficiente de escorrentía o a la filtración en el terreno.

Pendientes necesarias para la evacuación de aguas.—Para conducir rápidamente las aguas a los imbornales de absorción de la red, convendría el empleo de fuertes pendientes; pero la necesidad de evitar derrapes hace que vengan las pendientes transversales limitadas a un máximo de 1,5 por 100; en cuanto a las pendientes mínimas, se aconseja emplear las siguientes:

En pavimentos de hormigón	0,5 %
En pavimentos de betún	1 %
En pavimentos de césped	1,2 %

En la figura 12 se ven diferentes soluciones de superficies a drenar, así como las pendientes de las mismas y situación de tuberías de evacuación.

Longitud efectiva "L" del recorrido del agua sobre la superficie del suelo.—Se ha definido el valor de la "longitud efectiva" L como el máximo recorrido del agua sobre la superficie del

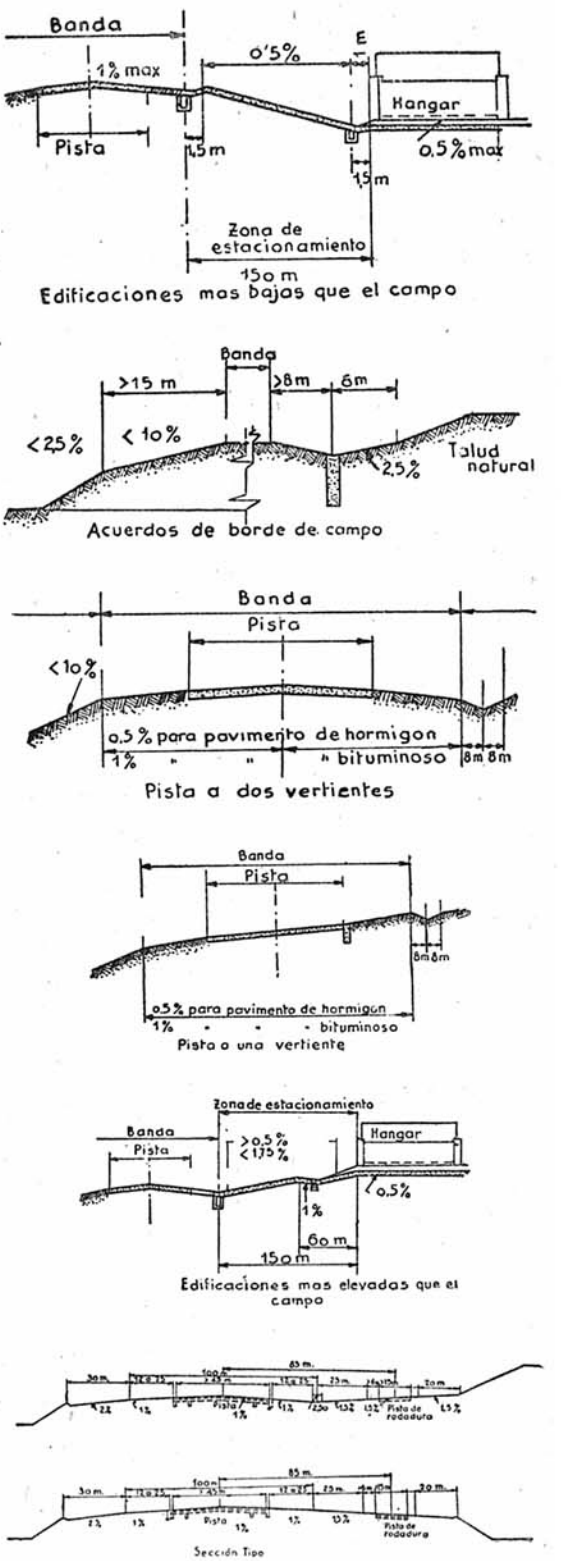

Fig. 12.

suelo, es decir, como la longitud en la dirección de la línea de máxima pendiente, de una franja de suelo de anchura unidad que se extiende entre el punto de acometida de aguas y el punto más alejado que vierte sus aguas en la acometida.

Habría, por tanto, que descomponer la zona de terreno correspondiente a un imbornal, en varias franjas y operar con cada una de ellas de modo independiente; pero por ser esto muy complicado, lo que se hace generalmente es tomar la distancia máxima de todas, o bien tomar una media entre los puntos más alejados y los más próximos al imbornal.

En las zonas inundables, el recorrido del agua sobre la superficie del suelo varía desde un máximo al comenzar el aguacero hasta un mínimo que corresponde precisamente al momento de máxima cantidad de agua almacenada. En este caso debe tomarse para valor efectivo de L la distancia media desde los bordes del área al contorno del agua en depósito en el momento de máximo caudal de corriente por la superficie, cuando el imbornal está situado en las proximidades del centro del depósito de agua; y en los casos en que el imbornal está muy alejado del centro del depósito, puede tomarse la distancia media desde el límite de la zona a los puntos en que el agua alcanza una profundidad igual a las dos terceras partes de la profundidad máxima a que puede llegar por causa del aguacero.

Distancia entre acometidas de agua en las zonas no inundables: caudales a evacuar por las mismas.—En las zonas donde no es posible admitir almacenamiento de agua, por corresponder a superficies de utilización continua por las aeronaves, la situación de los imbornales debe ser tal, que en todo momento se asegure la evacuación rápida de las aguas, para que éstas no lleguen a alcanzar una altura peligrosa.

En las zonas de pavimentos especiales, el tiempo crítico correspondiente al máximo caudal está generalmente comprendido entre cinco y diez minutos, variando con las pendientes y con la naturaleza del pavimento, resultando por esto la distancia entre los imbornales de borde de pistas comprendida entre 30 y 150 metros.

En las zonas de hierba resultan con las mismas distancias, tiempos críticos comprendidos entre diez y treinta minutos.

Conocidas las longitudes efectivas una vez situados los imbornales, se estudia la zona que evacua por cada acometida y se halla el caudal máximo correspondiente a cada uno de los imbornales.

Ejemplo: Calcular la capacidad de absorción y el tiempo de máximo caudal correspondientes a los imbornales del borde de una pista de 80 metros de anchura, con pendiente transversal a dos aguas $I = 0{,}01$ y pavimento de hormigón. La altura máxima probable en el lugar, una vez cada dos años, para aguacero de una hora de duración, es de 30 mm.; los imbornales están separados 80 metros.

Coeficiente de escorrentía: $\varphi = 0{,}80$.

$\sigma = 30 \times 0{,}80 \simeq 25$.

Coeficiente de rugosidad: $n = 0{,}06$.

Longitud efectiva: $L_{ef\,máx} = 60$ m.

Longitud equivalente para $n = 0{,}40$ (del gráfico de la figura 2): $L_{eq} = 10$ m.

De la figura 6, curva número 25, que es la correspondiente a $i\varphi = 25$ mm. por hora, se deduce que para $L_{eq} = 10$ m. (interpolando entre las curvas $L = 6$ y $L = 12$ m.) el caudal máximo es el correspondiente a una altura de agua de 61 mm. en una hora, o sea de 169 litros por Ha. y segundo. Como la zona que vierte aguas en cada imbornal tiene una superficie de $80 \times 40 = 3.200$ m², la capacidad de cada imbornal deberá ser de $169 \times 0{,}32 = 52$ litros por segundo.

El tiempo de máxima concentración ocurre a los $t_c = 9$ minutos de comenzar el aguacero, y el aguacero que produce este caudal es de nueve minutos de duración.

Caudales a evacuar por los imbornales en las zonas inundables.—Fijada la cantidad máxima que puede almacenar una zona inundable, de acuerdo con la condición de que en el momento de máxima altura del agua no sea ésta perjudicial para las zonas de pistas, es fácil hallar el caudal a evacuar por las acometidas.

Si se dibujan las curvas de caudales de corriente superficial, correspondientes a aguaceros de diferente duración que puedan ocurrir en la zona del aeropuerto, para la longitud efectiva, pendiente y coeficiente de rugosidad del caso que se trata de resolver, y se sitúa sobre las mismas el caudal máximo que admiten los imbornales, puede saberse en cada momento la cantidad de agua almacenada, el tiempo que dura la inundación, el chubasco que la produce, así como el tiempo en que ocurre la máxima corriente afluyendo al depósito de aguas.

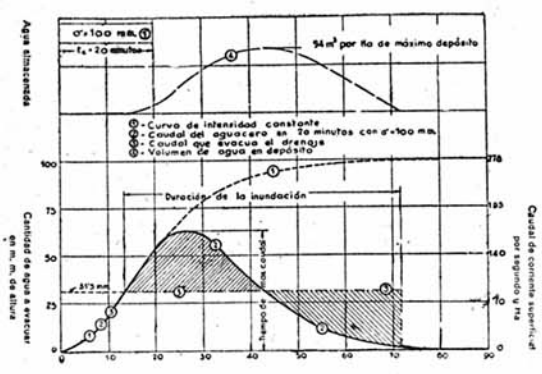

Fig. 13.

En la figura 13 se ha dibujado la curva (2), correspondiente a aguacero de intensidad específica de 100 mm. que corresponde a su vez a la curva 50 (aguacero de 19 minutos) de la figura 10 para $L = 120$ m., $I = 1$ % y $n = 0{,}40$ (curva 100 de la figura 2, $L = 120$). También se ha dibujado la recta (3), que corresponde al caudal máximo que admite el imbornal: 31,5 milímetros de altura de agua por hora, o sea, 87 litros por Ha. y segundo. A los trece minutos de iniciarse el aguacero comienza a embalsarse el agua en el depósito, alcanzándose el volumen máximo a los cuarenta y tres minutos; a partir de ese momento empieza a decrecer hasta los setenta y dos minutos, en que termina la inundación. La duración de la inundación es, por tanto, de cincuenta y nueve minutos, y el volumen máximo almacenado se obtiene por medición del área rayada, habiéndose obtenido en este caso la cantidad de 94.000 litros por Ha.

El momento de máxima afluencia de agua ocurre a los veinticinco minutos de comenzar el aguacero.

Haciendo lo mismo con todos los aguaceros que pueden ocurrir con la curva 50 de la figura 10, es decir, de cinco minutos con $\sigma = 157$ milímetros; de diez minutos con $\sigma = 120$ mm.; de treinta minutos con $\sigma = 80$ mm., y comparándolos, se ve el caso más desfavorable y los efectos que produce. Por este procedimiento se han obtenido las curvas de las figuras 14 a 19, con las cuales pueden resolverse rápidamente los problemas de evacuación superficial. Estas curvas están limitadas por las líneas (4), correspondientes a los tamaños mínimos de drenes que deben colocarse.

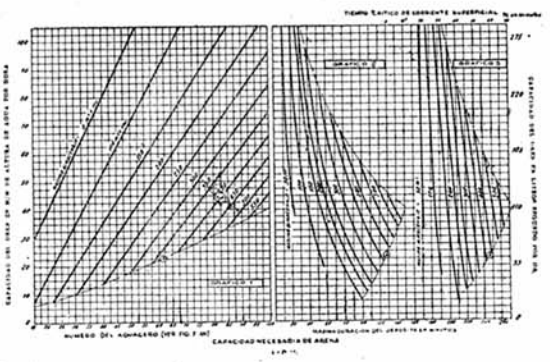

Fig. 14.

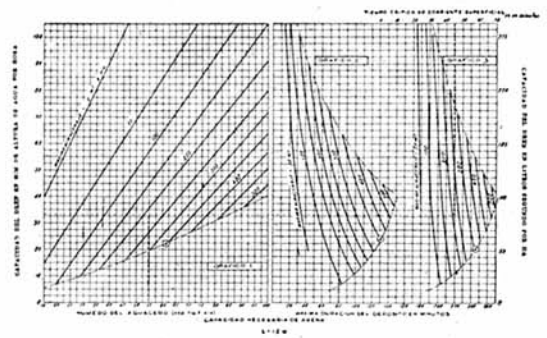

Fig. 15.

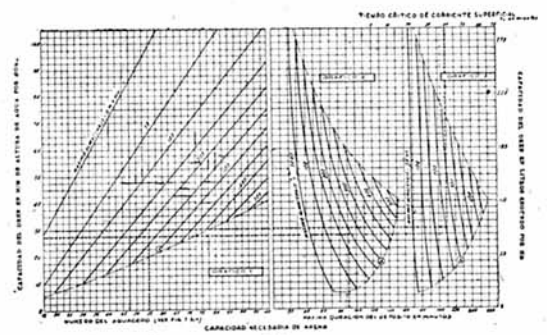

Fig. 16.

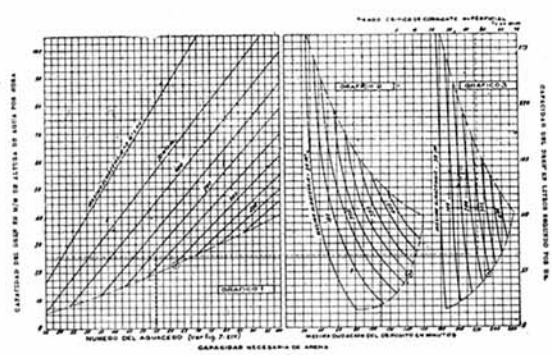

Fig. 17.

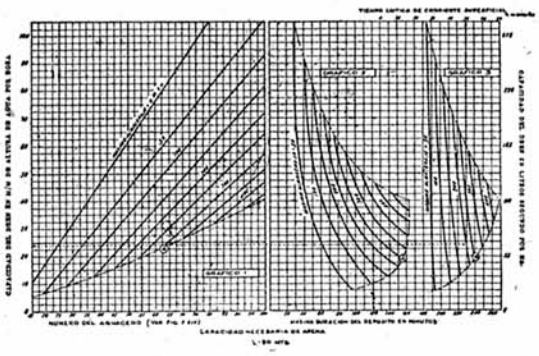

Fig. 18.

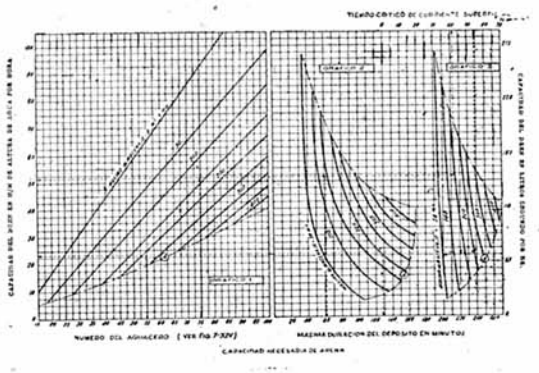

Fig. 19.

Ejemplo: Calcular el caudal a evacuar por el imbornal de la zona de hierba de la figura 20.

La zona que evacua sus aguas por el imbornal tiene una superficie de 4,8 Ha., y en esta zona se admite un depósito momentáneo de 400 m³, o sea, una almacenaje por hectárea drenada de $\frac{400}{4,80} = 83$ m³.

Las lluvias probables en el lugar corresponden a 40 mm. de altura en aguacero de una hora.

Considerando una filtración del suelo de 10 milímetros por hora, la cantidad de agua a evacuar será la correspondiente a los caudales de la curva 30 de la figura 10.

La longitud efectiva de máxima es 120 metros, y como $n = 0,40$, empleando la figura 19 encontramos que la capacidad del imbornal debe ser 42 litros por Ha. y segundo; o sea, que el imbornal debe tener una capacidad de $42 \times 4,80 = 200$ litros por segundo.

El tiempo que dura la inundación es de cien minutos (gráfico 2), y la afluencia máxima de agua ocurre a los cuarenta minutos de comenzar el aguacero (gráfico 3).

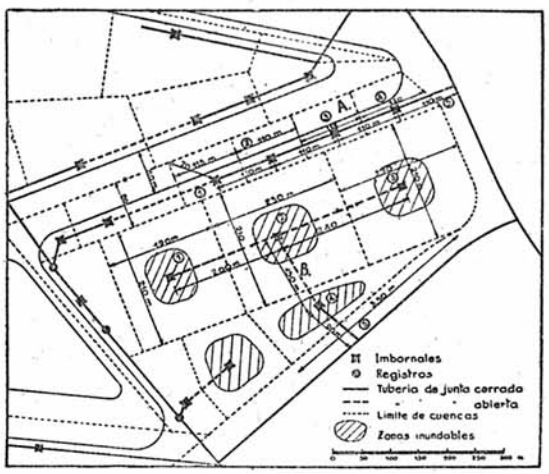

Fig. 20.

En algunos casos se prescinde de los cálculos anteriores y se parte solamente de la cantidad de lluvia para aguacero de una hora de duración, que es probable que ocurra una vez cada dos años, y este agua se evacua en una o dos horas más, según la pendiente del suelo; es decir, que la inundación dura una o dos horas para aguaceros de una hora de duración.

Si llamamos T a la duración del chubasco (una hora) y t al tiempo en que se debe evacuar el agua una vez terminado aquél, se ha obtenido prácticamente que la relación entre la pendiente I del suelo y el valor de t debe ser:

$I < 0,5\ \%$ ..... $t = 2$ horas.

$I > 0,5\ \%$ y $< 1\ \%$ ..... $t = 1,5$ horas.

$I > 1\ \%$ ..... $t = 1$ hora.

Es fácil entonces obtener el caudal a evacuar por cada imbornal; ya que si llamamos:

Q al caudal en litros por segundo;

σ a la cantidad de agua a evacuar en una hora en milímetros;

A a la superficie a drenar en Ha.,

tendremos:

$$Q = \frac{\sigma \times 10.000 \times A}{(T + t) \times 3.600} = 2,78 \frac{\sigma A}{(1 + t)}.$$

Ejemplo: El mismo anterior con $t = 1$ hora:

$$Q = \frac{30 \times 10.000 \times 4,8}{(1 + 1)\ 3.600} =$$

$$= \frac{30 \times 10.000 \times 4,80}{7.200} = 200 \text{ litros por seg.}$$