



*Rolando Chinchilla Castañeda*

**PERDIDAS POR PERCOLACION EN  
ESTRUCTURAS DE RETENCION**

*Guatemala, junio de 1970.*

T11551C

50

BIBLIOTECA CENTRAL-USAC  
DEPOSITO LEGAL  
PROHIBIDO EL PRESTAMO EXTERNO

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERIA  
Guatemala, Centro América

"PERDIDAS POR PERCOLACION EN  
ESTRUCTURAS DE RETENCION"

T E S I S

Presentada a la Junta Directiva de la  
Facultad de Ingeniería  
de la

Universidad de San Carlos de Guatemala

por

ROLANDO CHINCHILLA CASTAÑEDA

Al conferírsele el Título de

INGENIERO CIVIL

BIBLIOTECA CENTRAL-USAC  
DEPOSITO LEGAL  
PROHIBIDO EL PRESTAMO EXTERNO  
Guatemala, junio de 1970...

PROPIEDAD DE LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
Biblioteca Central

DL  
OB  
T(155)c

JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERIA  
DE LA

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

Decano:	Ing. Amando Vides Tobar
Vocal Primero:	Ing. Marco Antonio Cuevas
Vocal Segundo:	Ing. Rodolfo González M.
Vocal Tercero:	Ing. Adolfo Behrens
Vocal Cuarto:	Br. Alfredo Bonatti
Vocal Quinto:	Br. Eliseo Osorio R.
Secretario:	Ing. Héctor Centeno B.

TRIBUNAL QUE PRACTICO EL EXAMEN  
GENERAL PRIVADO

Decano:	Ing. Amando Vides Tobar
Examinador:	Ing. Pierre Castillo C.
Examinador:	Ing. Ernesto Rosales
Examinador:	Ing. Manuel Medina
Secretario a.i.	Ing. Rodolfo González M.

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR:

Cumpliendo con los preceptos que la Ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala establece, presento a vuestra consideración mi trabajo de tesis titulado:

"PERDIDAS POR PERCOLACION EN  
ESTRUCTURAS DE RETENCION"

Tema que me fue asignado por la Junta Directiva de la Facultad de Ingeniería.

ACTO QUE DEDICO:

A MIS PADRES:

Rolando Chinchilla Aguilar

María Castañeda de Chinchilla

## CONTENIDO

- I. **Introducción**
- II. **Teoría del flujo del agua a través del suelo**
- III. **Cálculo de pérdidas por percolación en suelos isotrópicos y anisotrópicos**
- IV. **Aplicación de los métodos en:**
  - a. **Presas de concreto**
  - b. **Presas de tierra**
  - c. **Otros tipos de estructuras**
- V. **Conclusiones**

## I. INTRODUCCION

Existe la necesidad de que el hombre aprenda a controlar la percolación, ya que la estabilidad de estructuras de tierra y de los depósitos naturales depende no sólo de las propiedades estáticas del suelo sino también de las fuerzas que produce el agua según fluye — o se percola — a través de la masa de suelo.

A través de la historia, la humanidad se ha podido dar cuenta del enorme poder destructivo del agua. Sin necesidad de recurrir a ejemplos lejanos en tiempo y distancia, el temporal que azotó a Guatemala en septiembre de 1969, hizo que este poderoso recurso natural destruyera obras de ingeniería y causara un desastre de tipo nacional.

El agua, libre en la superficie, por medio de mareas e inundaciones, nos demostró que es una de las más poderosas fuerzas de la naturaleza.

El agua, escondida en las fisuras de las rocas y en los poros del suelo, ejerce presiones increíbles que arrancan faldas de montañas y destruyen las obras de ingeniería.

Es debido a esto que el ingeniero civil que trabaja en los campos de carreteras, ferrocarriles, muros, presas, etc., debe darle gran importancia al control de esa agua que se encuentra en los poros y grietas del suelo y formaciones rocosas.

El ingeniero, para poder diseñar sus estructuras de retención, debe ser capaz de estimar por medio de análisis la magnitud de las fuerzas que la percolación causará, así como las cantidades de agua que van a fluir a través del suelo. Cuando no se le da la debida importancia y no es con-

trolada, la percolación puede redundar en fuertes pérdidas económicas y hasta en vidas humanas.

¿Cómo controlar el agua en las estructuras? A pesar de lo destructiva que pueda ser el agua, el ingeniero la puede controlar básicamente de dos formas:

1. Manteniendo el agua fuera de los lugares donde pueda hacer daño.
2. Controlando aquella que no se puede evitar que entre a esos lugares, por medio de métodos de drenaje.

En la mayor parte de los casos, combinando estos dos métodos fundamentales se pueden controlar el agua subterránea y el agua de percolación en las obras de ingeniería.

El propósito del presente trabajo es poner al alcance tanto del ingeniero como del estudiante, con la mayor claridad posible, el uso del método gráfico y sus aplicaciones en problemas que probablemente se presentarán en la vida real. Los objetivos se pueden concretar así:

Demostrar los beneficios que se pueden obtener de abordar analíticamente el diseño de estructuras de retención que impliquen problemas de percolación.

Presentar e ilustrar métodos prácticos de análisis y hacer énfasis en que el diseño de estas estructuras debe basarse en sus condiciones individuales y no en diseños tipo "standard". Dos principios básicos de la teoría de la percolación, la ley de Darcy y las redes de flujo, tienen gran valor práctico en la resolución de los problemas relativos a la percolación y drenaje que se le presentarán al ingeniero en el desarrollo de su profesión. También a esto se tratará de darle bastante énfasis.

## II. TEORIA DEL FLUJO DEL AGUA A TRAVES DEL SUELO

La base para el análisis de la percolación fue desarrollada por Henry Darcy en 1856. Sus experimentos lo llevaron a la conclusión —Ley de Darcy— de que la velocidad a la que el agua se percola bajo una gradiente de presión a través de los espacios de un medio poroso y fino como el suelo, es directamente proporcional a la primera potencia de la gradiente hidráulica. Darcy investigó las características del flujo del agua a través de filtros de tierra. Luego, en los 1880's Forchheimer demostró que la distribución de la presión del agua y la velocidad a través de un medio de percolación estaba gobernada por la ecuación diferencial de Laplace.

A principios de este siglo un poderoso método gráfico fue desarrollado independientemente por Forchheimer en Alemania y Richardson en Inglaterra para obtener soluciones aproximadas de la ecuación de Laplace.

Sin embargo, este método no fue usado mucho para presas de tierra y otras estructuras de retención hasta que Casagrande publicó su artículo "Seepage through dams" en 1937. En este artículo se aclaran conceptos y se desarrolla y explica claramente este método.

Desde entonces, la solución de la ecuación de Laplace por el procedimiento gráfico o con modelos eléctricos se ha vuelto un procedimiento standard para el análisis de la percolación.

La mayor parte de la responsabilidad de los problemas derivados del flujo del agua a través del suelo recae sobre una propiedad física de éste, PERMEABILIDAD, la cual re-

gula la relación del flujo del agua a través de los poros e intersticios del suelo y rocas. En otras palabras, permeabilidad es la mayor o menor facilidad con la que el agua pasa a través de la masa de suelo.

Para poder abordar el problema del flujo del agua a través del suelo se debe recordar que el flujo de los fluidos en general se puede dividir en dos clases principales: flujo laminar y flujo turbulento.

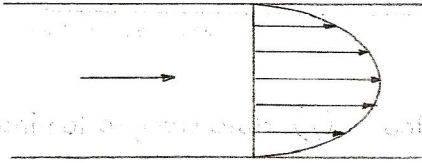
A bajas velocidades, el flujo es laminar, pero según aumenta la velocidad se llega a un punto en que el flujo se vuelve turbulento. Si luego se reduce la velocidad, el flujo se volverá laminar nuevamente, pero la transición (o punto de transición) ocurrirá a una velocidad menor que la anterior. Esto es indicativo de que hay una zona de velocidades en las que el flujo puede ser laminar o puede ser turbulento.

Investigaciones llevadas a cabo en el siglo pasado por Osborne Reynolds han demostrado que hay cierta velocidad bajo la cual para un diámetro dado de tubo y para un fluido dado a cierta temperatura, el flujo será siempre laminar. Esta velocidad se conoce como velocidad crítica.

De igual manera, hay una velocidad mayor, arriba de la cual el flujo siempre será turbulento. En el caso del agua, ésta será aproximadamente 6.5 veces la velocidad crítica. En el gráfico a continuación se muestra la variación de la velocidad con la gradiente hidráulica en flujo laminar y turbulento.



La energía que se pierde en el flujo laminar se puede decir que se debe a la fricción entre las capas que se deslizan unas sobre otras; a la resistencia viscosa entre lámina y lámina que se encuentran en deslizamiento relativo. Si una masa de agua se mueve con la misma velocidad a través de toda su masa, no hay pérdidas. Sin embargo, tal condición no existe nunca en un conducto debido a que los bordes ofrecen resistencia al flujo. Esto da como resultado una distribución de velocidades como la del gráfico a continuación:



Distribución de velocidades para flujo laminar en un conducto.

En cambio, cuando el flujo es turbulento, ocurre una pérdida continua de energía debido a las velocidades diferenciales existentes entre las partículas de agua adyacentes, pérdidas que existen aún si la masa misma está fluyendo a velocidad constante.

La velocidad promedio o velocidad media en un conducto debida a régimen laminar o turbulento es función de la pérdida de carga por unidad de distancia, la que es definida como gradiente hidráulica,  $i$ . En el caso del flujo turbulento, la velocidad media es proporcional aproximadamente a  $\sqrt{i}$ , o más exactamente a  $i^{2/7}$ . Sin embargo, para flujo laminar es proporcional a la primera potencia de la gradiente hidráulica,  $i$ .

Después de haber llevado a cabo numerosos experimentos utilizando filtros de arena fina, Darcy obtuvo una fórmula empírica para el flujo del agua a través del suelo y que es conocida como la ley de Darcy. Esta ley se puede expresar de la siguiente manera:

$$Q = kiAt$$

En la ecuación anterior,  $Q$  es la cantidad total de agua que fluye a través de una sección de masa de suelo que tiene un área  $A$  perpendicular a la dirección del flujo, bajo una gradiente hidráulica  $i$ , durante un período de tiempo  $t$ . En esta ecuación,  $k$  está definida como el coeficiente de permeabilidad.

El punto esencial de la ley de Darcy, es que la cantidad de flujo de agua a través de los suelos es proporcional a la gradiente hidráulica. Por eso se ha llegado a la conclusión de que el flujo del agua a través de los poros del suelo es laminar.

Extensas investigaciones hechas desde que Darcy estableció su ley en 1856 han confirmado que es válida solamente para los suelos de granos finos.

La fórmula de la velocidad de descarga es:

$$V = ki$$

El coeficiente de permeabilidad  $k$  es igual a la velocidad de descarga bajo una gradiente hidráulica de 100%.

$$q = kiA$$

En esta última fórmula,  $q$  es la cantidad de agua que fluye en la unidad de tiempo, o sea el gasto. No debe confundirse la velocidad de descarga ( $V$ ) con la velocidad de percolación ( $V_s$ ) ni con la velocidad real. La velocidad de descarga es la que hay en un tubo de la misma área que el área de la sección de suelo después de que el agua sale de la muestra, y determina la cantidad de flujo. La velocidad de percolación es la velocidad promedio de avance del agua a través del suelo en dirección del flujo. En la

obtención de la velocidad de percolación se supuso que el agua tenía una trayectoria recta al pasar a través del suelo, lo cual no es representativo de la velocidad a que el agua se está moviendo. Entonces, la velocidad a que va el agua recorriendo una trayectoria sinuosa es la velocidad real.

Una velocidad media más real podría encontrarse sólo si se conocieran las variaciones del área de los poros a través de los cuales el agua hace su recorrido.

El coeficiente de permeabilidad de un suelo es un dato cuya determinación correcta es de fundamental importancia para la formación del criterio del proyectista en algunos problemas de Mecánica de Suelos y en muchos casos, para la elaboración de sus cálculos.

Hay varios procedimientos para la determinación de la permeabilidad de los suelos: unos "directos", así llamados porque se basan en pruebas cuyo objetivo fundamental es la medición de tal coeficiente; otros "indirectos", proporcionados, en forma secundaria, por pruebas y técnicas que principalmente persiguen otros fines. Estos métodos sólo serán enunciados pero no se entrará a describir cada uno porque no es ese el objeto del presente trabajo.

a. Directos:

1. Permeámetro de carga constante.
2. Permeámetro de carga variable.
3. Prueba directa de los suelos en el lugar.

b. Indirectos:

1. Cálculo a partir de la curva granulométrica.
2. Cálculo a partir de la prueba de consolidación.
3. Cálculo con la prueba horizontal de capilaridad.

En la tabla que está a continuación, debida a A. Casagrande y R. E. Fadum, aparecen las interrelaciones entre el coeficiente de permeabilidad, los tipos de suelo y los métodos de prueba aplicada en cada caso. El valor del coeficiente de permeabilidad se ha puesto en escala logarítmica, debido a que el intervalo completo de valores que se maneja en Mecánica de Suelos oscila entre  $10^2$  y  $10^{-9}$  cm./seg.

La permeabilidad se ve afectada por diversos factores particulares tanto del suelo como de las características del agua circulante.

Los principales son:

- La relación de vacíos del suelo
- La temperatura del agua
- La estructura y estratificación del suelo
- La existencia de agujeros, fisuras, etc., en el suelo.

Haciendo uso de la ley de Poiseuille y asumiendo que el agua fluye a través del suelo por cierto número de tubos cilíndricos de un mismo diámetro y de una longitud relacionada con la longitud de la muestra de suelo, se puede concluir que el coeficiente de permeabilidad es proporcional a la expresión  $e^2/(1 + e)$ , siendo:  $e$ , relación de vacíos, y  $(1 + e)$ , el volumen de la muestra. Esta relación es el producto de una complicada función que ha sido simplificada hasta llegar a la función:  $k = k_1 F(e)$ . Varias funciones  $F$  han sido desarrolladas, siendo entre ellas la más sencilla y de mayor valor práctico la de A. Casagrande;  $k = k_1 e^2$ . En esta expresión,  $k_1$  es el coeficiente de permeabilidad para una relación de vacíos unidad. En resumen, mientras más denso es un suelo y más pequeños los poros, su permeabilidad es menor.

Influencia de la temperatura del agua. La temperatura del agua afecta en importante proporción la permeabilidad de un suelo, ya que de ella depende su viscosidad. El coeficiente de permeabilidad es inversamente proporcional a la viscosidad cinemática del agua.

$$k_{20} = k_T \frac{v_T}{v_{20}}$$

En esta relación, para poder comparar fácilmente los resultados de pruebas de permeabilidad, se refieren a una temperatura constante, normalmente de 20°C. El subíndice T indica los resultados obtenidos a la temperatura de la prueba. Experimentalmente se ha encontrado que esta relación es correcta para arenas, habiéndose encontrado pequeñas desviaciones en las arcillas.

Influencia de la estructura y la estratificación. Un suelo puede tener permeabilidades diferentes en estado inalterado y remoldeado, aún cuando la relación de vacíos sea la misma en ambos casos; esto puede ser debido a los cambios en la estructura y estratificación del suelo inalterado o a una combinación de los dos factores.

Pueden observarse variaciones importantes en la permeabilidad debido a que en el remoldeo quedan libres partículas del suelo y que el agua al fluir las mueve y reacomoda, hasta cerrar los canales; en otras ocasiones, estas partículas son arrastradas al exterior de la muestra de suelo, causando turbidez en el agua que sale. Los fenómenos de formación de natas internas en los poros y la segregación de burbujas de aire, tienen efectos similares y son difíciles de distinguir entre sí, a menos que el carácter del suelo garantice que no pueden formarse esas natas limosas.

Algunas veces, aun las muestras inalteradas de suelo,



presentan inestabilidad interna bajo el flujo, característica que es de fundamental importancia en los estudios de cimentaciones de presas. La mayoría de los suelos están estratificados, por lo que es preciso determinar el coeficiente de permeabilidad tanto en dirección paralela, como normal a los planos de estratificación.

Influencia de agujeros, fisuras, etc., presentes en el suelo. El efecto no suele ser muy importante sobre las obras de ingeniería. Las características de permeabilidad de los suelos pueden cambiar convirtiéndose aun la arcilla más impermeable en material poroso. Estos agujeros y fisuras se pueden deber a heladas, efectos de la vegetación, etc.

Un factor importante de tomar en cuenta, es que existen ciertos tipos de suelos que no poseen un coeficiente de permeabilidad constante en cualquier dirección y por lo tanto hay que hacer ciertas relaciones para obtener un coeficiente de permeabilidad y poderlo aplicar en el análisis y solución del problema. Este aspecto se tratará en el siguiente capítulo.

La ley de Darcy para percolación del agua a través del suelo se puede escribir así:

$$V = ki = k \frac{dh}{dl}$$

$$q = kiA$$

$V$  = Velocidad de descarga del agua que se está percolando

$k$  = coeficiente de permeabilidad  $i$  = gradiente hidráulica

$h$  = carga de presión  $l$  = largo de la ruta de percolación

$A$  = sección de suelo a través de la cual el agua se está

percolando

$q$  = cantidad de percolación por unidad de tiempo

La ecuación hidrodinámica para el caso de percolación uniforme, ecuación de Laplace, puede ser escrita:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0$$

La aplicabilidad de la ecuación de Laplace puede ser fácilmente demostrada con la ley de Darcy y asumiendo que la cantidad de agua que fluye en cualquier elemento de volumen de suelo debe ser igual a la cantidad que fluye hacia afuera de éste en el mismo período de tiempo.

Para el análisis de la percolación en presas de tierra, el flujo se considera bidimensional y la ecuación se puede simplificar:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = 0$$

La solución de esta ecuación da la variación de la carga de presión y dirección del flujo en todos los puntos que están dentro del área de suelo a través de la cual el agua se está percolando. Los resultados son ploteados en forma de curvas de igual presión o potencial, llamadas líneas equipotenciales.

Estas están ilustradas en la figura, la que representa la solución de las ecuaciones de Laplace para el simple caso de percolación a través de una formación de suelo homogéneo bajo una lámina de acero parcialmente enterrada (tablaestaca).

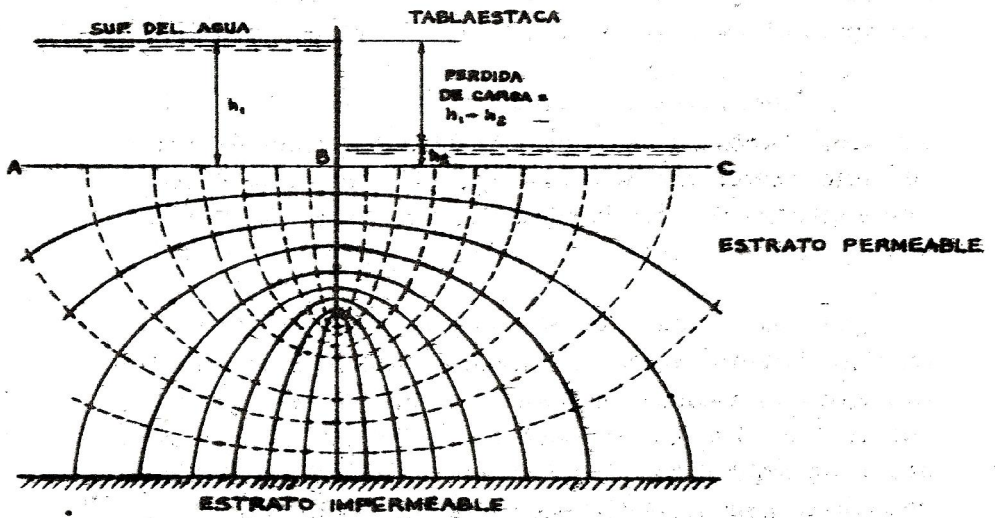


Fig. "A"

Como se muestra en el dibujo, la carga de presión en el agua cuando ésta entra en el suelo en el lado izquierdo de la plancha de acero, (a lo largo de la línea AB) es igual a  $h_1$ . Según el agua descarga del suelo del lado derecho de la plancha (a lo largo de la línea BC), su carga de presión es  $h_2$ . De tal manera que en haberse percolado abajo del muro, el agua ha sufrido una pérdida de carga de presión igual a  $h_1 - h_2$ .

Las líneas horizontales AB y BC son equipotenciales que están marcando los límites aguas arriba y aguas abajo del flujo a través del suelo. Las líneas curvas sólidas son líneas equipotenciales intermedias en la zona de percolación.

La dirección de la percolación es siempre perpendicular a las líneas equipotenciales. Las rutas a lo largo de las cuales las partículas individuales de agua se percolan a través del suelo (líneas punteadas) se llaman líneas de flujo. El estrato impermeable horizontal en el fondo es una línea de flujo que limita la frontera (o límite) inferior de percolación.

La otra línea de flujo límite es el límite entre el suelo y la plancha de acero.

Para cada problema de percolación hay una solución única de la ecuación de Laplace que puede ser planteada como líneas equipotenciales y de flujo, las que combinadas forman la RED DE FLUJO. A pesar de que la ecuación de Laplace es muy simple, las condiciones de frontera en una presa de tierra típica son demasiado complicadas para obtener una solución matemática. Sin embargo, en casi todas las situaciones más complejas, soluciones de exactitud muy razonable pueden ser obtenidas por el método gráfico o usando modelos eléctricos.

### III. CALCULO DE PERDIDAS POR PERCOLACION EN SUELOS ISOTROPICOS Y ANISOTROPICOS

Según se vio en el capítulo II, la ecuación de Laplace queda resuelta por dos familias de curvas ortogonales entre sí, que son las líneas de flujo y las equipotenciales. Dos familias de líneas que cumplan la condición de ortogonalidad y las condiciones de frontera de la región de flujo constituyen una solución única de la ecuación de Laplace, y por lo tanto, del problema de flujo que se quiere resolver.

El método de las redes de flujo hace uso de estas dos afirmaciones para resolver los problemas de un modo sencillo y puramente gráfico. Se trata primeramente de definir en cada caso particular las condiciones de frontera específicas del problema, y luego de trazar, cumpliendo estas condiciones, las dos familias de curvas, obteniendo así una verdadera imagen gráfica del problema.

La construcción de redes de flujo requiere alguna habilidad manual, y el proyectista debe estudiar sus características y practicar su dibujo hasta que desarrolle cierta competencia. Para la mayor parte de estructuras de retención, soluciones bastante exactas para propósitos de diseño pueden ser obtenidas por un operador competente en menos de 30 minutos, a pesar de que presas con cimentación estratificada requerirán bastante más tiempo.

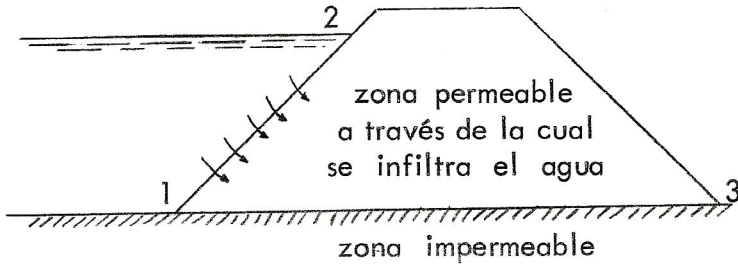
Al hacer que se cumplan en un dibujo las dos familias de curvas respetando tanto las condiciones de frontera como las de ortogonalidad, se tendrá una aproximación a la solución única del problema; ésta aproximación, si el dibujo se ha realizado con cuidado es lo suficientemente buena para los fines de la ingeniería y da soluciones del problema muy ventajosas respecto a las que se obtienen por

los métodos matemáticos rigurosos, algo más precisos tal vez, pero mucho más complicados y largos.

Fundamentalmente, el trazo de una red de flujo comprende en la práctica los siguientes pasos:

1. Delimitación de la zona de flujo que se desea estudiar, analizando sus condiciones específicas de frontera.
2. Trazo de dos familias de curvas ortogonales entre sí, que satisfagan las condiciones de frontera y que constituyen la solución única de la ecuación de Laplace.

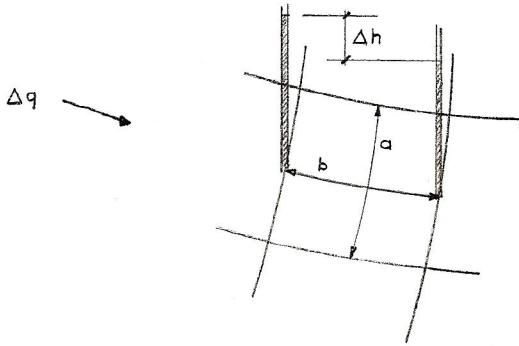
Condiciones de frontera. En el caso de una presa construida sobre un suelo impermeable la determinación de la condición de frontera para la línea de flujo que va a lo largo de este suelo impermeable no presentaría ningún problema; en otras palabras, puede establecerse como regla general que el contacto entre un medio impermeable y otro permeable a través del que se infiltra el agua, es una línea de flujo. De la misma manera, el contacto entre el agua libre y un medio permeable a través del cual se infiltra el agua es siempre una línea equipotencial. Siguiendo las normas expresadas anteriormente, se puede definir a qué tipo de línea corresponde cada una de las fronteras de la región de flujo. Cuando las condiciones de frontera no pueden determinarse a primera vista han de ser estudiadas como primer paso para el trazo de la red de flujo. En la figura a continuación la línea 1-2 es una línea equipotencial, y la línea 1-3 es una línea de flujo. En este caso la determinación de las condiciones de frontera ha sido muy sencilla. La línea 1-2 es equipotencial ya que para cada punto de ella, la suma de la carga de presión con la carga de posición (altura sobre un plano de datum) es la misma.



Una vez conocidas las fronteras, el trazo de la red de flujo consiste en dibujar las dos familias de curvas ortogonales entre sí y que cumplan dichas condiciones de frontera. El hacer cumplir las condiciones de frontera consiste simplemente en satisfacer en éstas los requerimientos teóricos de la red; así por ejemplo, si la frontera es una línea de flujo, la familia de líneas equipotenciales la deberá cortar ortogonalmente.

Cuando se inicia el trazo de las familias de líneas equipotenciales y de flujo surge el problema de que por cada punto de la región deberá pasar una línea de flujo y una equipotencial, porque en cada punto el agua tiene una velocidad y una carga hidráulica. Si se trazaran todas las líneas posibles se llegaría a una solución que formaría una mancha uniforme en todas las regiones de flujo; a este procedimiento le faltaría valor práctico, pues las soluciones obtenidas en los diferentes problemas serían inútiles. Entonces, no será preciso trazar todas las líneas equipotenciales y de flujo posibles, sino que se trazarán sólo unas cuantas seleccionadas de la siguiente manera: a) Se dibujarán todas las líneas de flujo de manera que el gasto que pase por el canal formado entre cada dos de ellas sea el mismo ( $\Delta q$ ), y b) Se dibujarán las líneas equipotenciales de manera que la caída de carga hidráulica entre cada dos de ellas se la misma ( $\Delta h$ ). En la figura a continuación

se ha trazado un fragmento de una red de flujo y se ha cumplido las dos condiciones anteriores.



El gasto  $\Delta q$  que pasa por el canal, según la ley de Darcy es:

$$\Delta q = ka \frac{\Delta h}{b}$$

$h$ , es la caída constante de potencial hidráulico entre las dos líneas equipotenciales;  $a$  es el área medida del rectángulo curvilíneo normal al flujo (se considera un espesor unitario); y  $b$  es la distancia media recorrida por el agua.

Si  $n_f$  es el número total de canales de flujo que tiene la red y  $n_e$  el número de caídas de potencial que hay en toda la zona de flujo, tenemos que:

$$\Delta q = \frac{q}{n_f}$$

$$\Delta h = \frac{h}{n_e}$$

$$q = kh \frac{n_f}{n_e} \frac{a}{b}$$

Siendo  $q$  y  $h$  el gasto total y la pérdida de carga total en toda la zona de flujo.

En la ecuación anterior  $q$ ,  $k$ ,  $h$ ,  $n_f$  y  $n_e$ , son constantes para una red de flujo dada. Así, se satisfacen las dos condiciones planteadas anteriormente. La relación  $a/b$  podrá ser cualquier constante, siendo lo más sencillo que sea igual a la unidad. De esta manera la red dibujada cumplirá la condición de que por cada canal pase el mismo gasto y de que entre cada dos líneas equipotenciales haya la misma caída de potencial, simplemente si las figuras definidas por estas líneas son cuadrados. Obviamente, el cuadrado es la figura más sencilla y conveniente de usar, y tiene la ventaja adicional de que permite comprobar lo bien dibujada que esté una red de un golpe de vista.

En tanto no se especifique otra cosa, todas las redes de flujo serán de cuadrados. La fórmula sencilla que permite calcular el gasto por unidad de longitud normal a la sección estudiada, que ocurre a través de una región de flujo en la que se ha dibujado la red correspondiente es la siguiente:

$$q = kh \frac{n_f}{n_e}$$

El término  $n_f/n_e$  se llama factor de forma, entonces,  $q = khF_f$ . En resumen, la solución se encuentra probando a mano el dibujo de los espacios formados por las líneas equipotenciales y de flujo y tratando de que estos espacios sean equidimensionales (aproximadamente cuadrados). A continuación se va afinando el dibujo. Las líneas de flujo se escogen de tal manera que la cantidad de percolación entre cada par de líneas (canales de flujo) sea igual; y las líneas equipotenciales de manera que la diferencia en la carga de presión sea la misma entre cada par de líneas. En

las páginas siguientes se pueden ver unos ejemplos de redes de flujo.

Conviene insistir un poco en ciertas normas para el trazo de las redes de flujo, y para ello, A. Casagrande en su artículo "Seepage through dams" da los siguientes consejos que siempre es conveniente tener presente:

1. Usense todas las oportunidades posibles para estudiar la apariencia de redes de flujo bien hechas, tratando después de repetirlas sin tener a la vista el modelo hasta obtener dibujos satisfactorios.

2. Usualmente es suficiente trazar la red con un número de canales de flujo comprendidos entre cuatro y cinco. El uso de muchos canales dificulta grandemente el trazo y desvía la atención de los aspectos esenciales.

3. Debe siempre observarse la apariencia de la red en conjunto sin tratar de corregir detalles hasta que toda ella está aproximadamente bien trazada.

4. Frecuentemente, hay partes de la red en que las líneas de flujo deben ser aproximadamente rectas y paralelas: en ese caso los canales son más o menos del mismo ancho y los cuadrados deben resultar muy parecidos. Puede facilitar el trazo de la red el hecho de comenzar por esa zona.

5. Las redes de flujo en áreas confinadas, limitadas por fronteras paralelas (especialmente la superior y la inferior) son frecuentemente simétricas y las líneas de flujo y las equipotenciales son entonces de forma parecida a la elíptica.

6. Un error común en los principiantes es el de dibu-

# REDES DE FLUJO

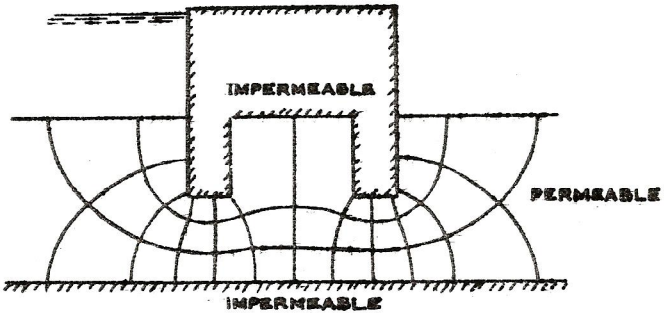
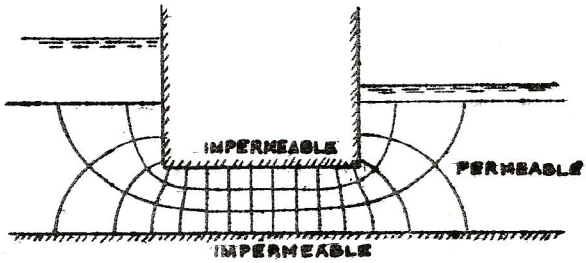


FIG. "B"

jar transiciones muy bruscas entre las partes rectas y las curvas de las diferentes líneas. Debe tenerse presente que las transiciones deben ser siempre muy suaves y de forma parabólica o elíptica; el tamaño de los diferentes cuadrados debe ir cambiando también gradualmente.

7. En general, el primer intento no conduce a una red de cuadrados en toda la extensión de la región de flujo. La caída de potencial entre dos equipotenciales sucesivas correspondiente a un cierto número de canales con el que se intentó la solución, no suele ser una parte entera exacta de la pérdida total de potencial, de manera que al terminar la red suele quedar una última hilera de rectángulos entre dos líneas equipotenciales en la que la caída de carga es una fracción de la  $h$  que haya prevalecido en el resto de la red. Generalmente esto no es perjudicial y esta última hilera puede tomarse en cuenta para el cálculo de  $n_e$ , estimando qué fracción de caída ha resultado. Si, por razones de presentación, se desea que todas las hileras de cuadrados queden con el mismo  $h$ , podrá corregirse la red, cambiando el número de canales de flujo, bien sea por interpolación o empezando de nuevo. No debe intentarse convertir la hilera incompleta en una de cuadrados por correcciones locales puramente gráficas, a no ser que el faltante o sobrante de espacio en la hilera incompleta sea muy pequeño.

8. Las condiciones de frontera pueden introducir singularidades en la red.

9. Una superficie de salida en la red, en contacto con aire, si no es horizontal, nunca es ni línea de flujo ni equipotencial, de manera que los cuadrados limitados por esa superficie no pueden ser completos. Sin embargo, estas superficies deben cumplir la condición de que se tengan iguales caídas de posición entre los puntos de ellas cortados por las líneas equipotenciales.

Además de las normas anteriores, es conveniente que las líneas de flujo y equipotenciales se dibujen siempre completas. Los principiantes cometen numerosos errores de concepto en la red por dejar trazos incompletos que, de haber sido terminados, les hubieran revelado estos errores claramente.

Cuando se presenta el caso de un suelo anisotrópico, la Teoría de la Sección transformada es de gran utilidad para la resolución del problema de flujo a través de él. Esta teoría es un simple artificio de cálculo que se logra por una sencilla transformación de coordenadas y que modifica sobre el dibujo las dimensiones de la zona de flujo en estudio, obteniéndose una nueva sección supuestamente isotrópica con  $k_x = k_y$  y que tiene todas las condiciones de flujo que interesan, iguales a las prevalecientes en la sección real y en la cual sucede que  $k_x \neq k_y$ . En otras palabras, permite reducir el caso de un suelo anisotrópico — en el cual la permeabilidad horizontal  $k_x$  y la permeabilidad para el flujo del agua en la dirección vertical  $k_y$  son diferentes — en el caso de un suelo homogéneo e isotrópico. Como se verá a continuación, con la teoría de la sección transformada se logra que la ecuación de Laplace y sus soluciones sean aplicables para describir el flujo a través del medio anisotrópico.

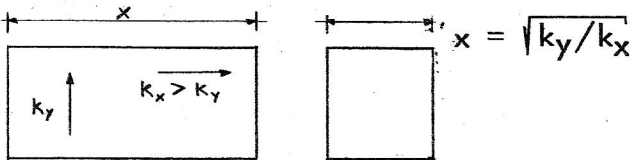
La ecuación de Laplace para flujo bidimensional se basa en que se asume que las permeabilidades son iguales en la dirección horizontal "x" y vertical "y". La mayor parte de rellenos y muchos depósitos de suelos son más o menos estratificados, muchas veces con capas de material que tienen permeabilidad horizontal mucho mayor que la permeabilidad vertical. Recordando que de acuerdo con la ley de Darcy las velocidades de descarga son proporcionales a las permeabilidades, la ecuación para flujo bidimensional puede escribirse:

$$k_x \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + k_y \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = 0$$

Para reducir esta expresión a una ecuación de Laplace, el sistema de coordenadas puede ser transformado a uno de  $\bar{x}$ ,  $\bar{y}$ , definido como  $\bar{x} = x/\sqrt{k_x}$ ;  $\bar{y} = y/\sqrt{k_y}$ ; entonces se tiene:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial \bar{x}^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial \bar{y}^2} = 0$$

La ecuación anterior expresa la condición de percolación a través de un medio anisotrópico como una ecuación de Laplace. Para construir redes de flujo para esta condición sólo es necesario encoger las dimensiones de una sección normal a la dirección de mayor permeabilidad. Como se ve en la siguiente figura, las distancias naturales horizontales se multiplicarían por  $\sqrt{k_y/k_x}$ .



Si la permeabilidad horizontal es mayor que la vertical, la sección transformada será encogida a una dimensión horizontal más estrecha.

Para obtener una red de flujo para condiciones de suelo anisotrópico, la sección se redibuja a una escala horizontal reducida, como se indica en la figura. Habiendo obtenido la red de flujo, ésta es luego reconstruida en la sección dibujada a escala natural.

La permeabilidad equivalente en la sección transfor-

formada es:

$$k = \sqrt{k_x k_y}$$

Haciendo uso de esta expresión, podrá hacerse en la sección transformada cualquier cálculo respecto a gasto, y se obtendrán los mismos resultados que si se estuviera trabajando con la sección de suelo anisotrópica.

Las gradientes hidráulicas para las condiciones de suelos anisotrópicos deben ser determinadas en las redes de flujo redibujadas en secciones a la escala horizontal natural, pues la distancia sobre la cual una carga es usada puede ser medida sólo en una sección real. Esta discusión hace énfasis en el punto siguiente que no debe subestimarse en la construcción de redes de flujo para las condiciones de suelos anisotrópicos: la sección debe ser transformada antes de construir la red de flujo. Además, se debe recordar que en la sección natural, la red de flujo no estará compuesta de cuadrados sino de rectángulos elongados en la dirección de mayor permeabilidad.

En resumen, cuando un suelo anisotrópico se presente en un caso práctico, se transformará previamente y a continuación se resolverá como si se tratara de un suelo isotrópico.

Formaciones heterogéneas. Otro problema que se presenta a menudo es del flujo del agua a través de formaciones heterogéneas. Un caso aparece como el más importante pues tiene muchas aplicaciones prácticas, y es el caso en el que se presentan formaciones estratificadas, y en el que cada estrato está constituido por un suelo homogéneo e isotrópico. Sin embargo, el conjunto de los diversos estratos ya constituye una formación heterogénea.

En la figura a continuación, se tiene un ejemplo en el que se han supuesto dos estratos con permeabilidades distintas  $k_1$  y  $k_2$  y en los que  $k_1 = 3 k_2$ .

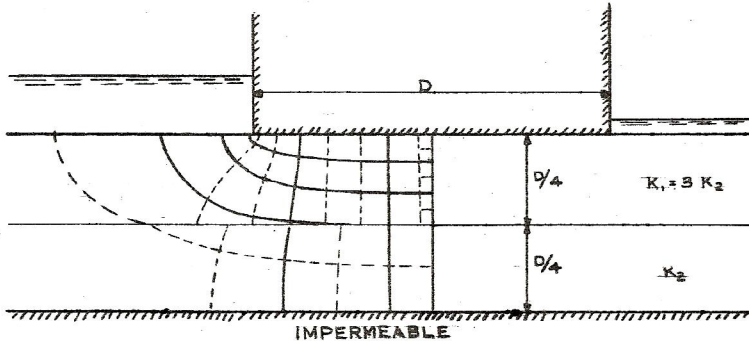
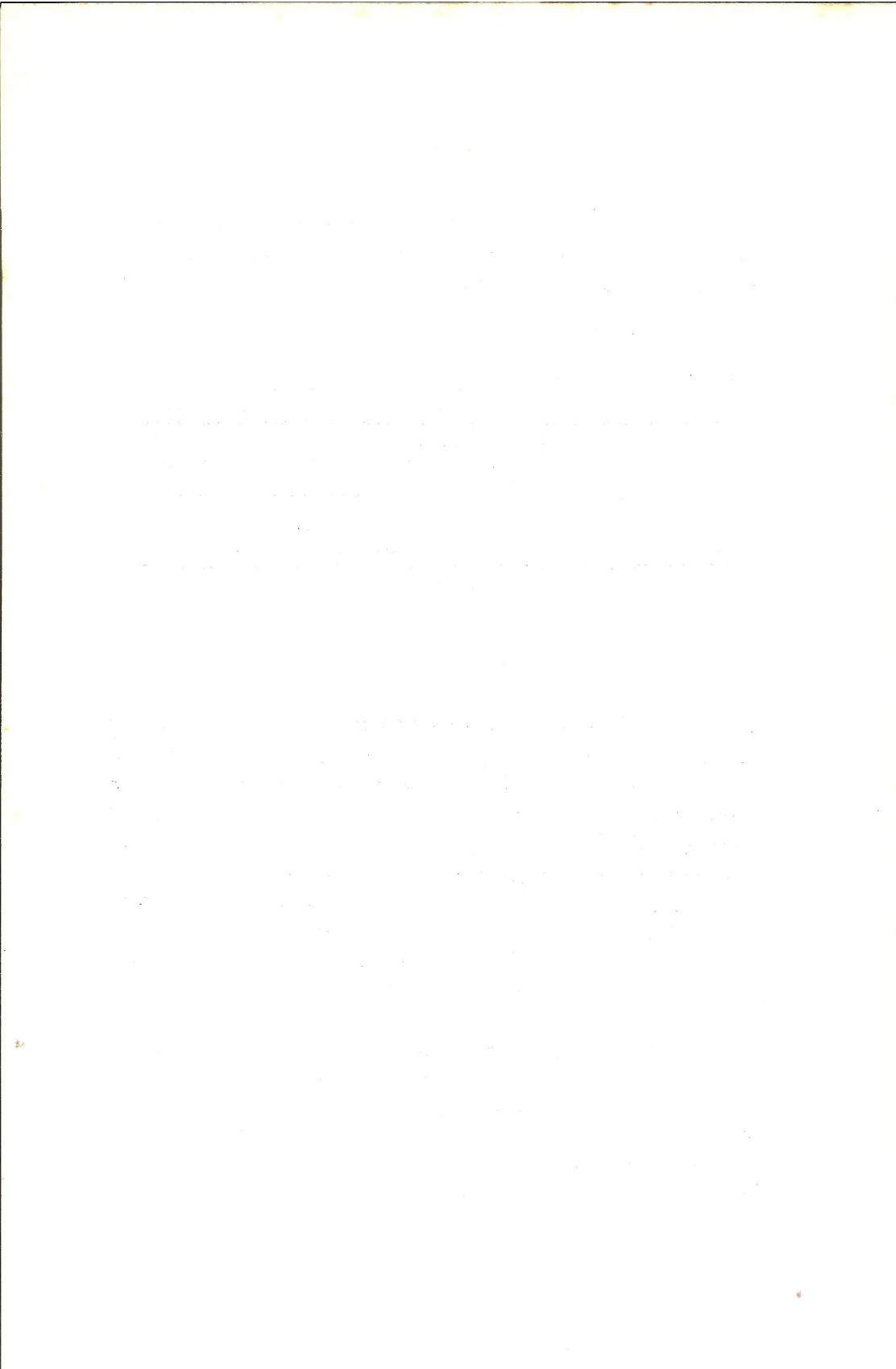


Fig. "C"

El problema se resuelve trazando la red de flujo en ambos estratos. Debido a que  $k_1 = 3 k_2$ , el procedimiento a seguir sería así: se dibuja una red de cuadrados en el estrato II y se tendrá entonces una red de rectángulos en el estrato I, con relación de largo a ancho precisamente igual a 3 (midiendo el largo en la dirección del flujo). Esto se debe a que como se conservará el mismo gasto por canal, éste deberá reducirse en área en la misma relación en que aumente la permeabilidad, pues según ésta aumenta la velocidad aumentará en la misma proporción.

La red de flujo debe cumplir una serie de condiciones especiales cuando las líneas de flujo y las equipotenciales cruzan la frontera entre los estratos (condiciones de transferencia). Estas condiciones son similares a las leyes de la refracción del rayo luminoso y deben ser estudiadas antes de proseguir con el trazo de la red de flujo.



## IV. APLICACION DE METODOS

### a. Presas de concreto

En la mayor parte de problemas relacionados con percolación abajo de tablaestacas o a través del cimiento de un dique o presa de concreto, todas las condiciones de frontera son conocidas. De manera que en los casos de presas de concreto el problema se reduce a la sencilla aplicación de la teoría expuesta anteriormente.

Las redes de flujo básicamente pueden ser de dos tipos dependiendo de la configuración y el número de zonas de suelo a través del que ocurre la percolación:

1. Flujo confinado, con las condiciones de frontera conocidas, como en el caso de presas de concreto.

2. Flujo no confinado, como en el caso de las presas de tierra.

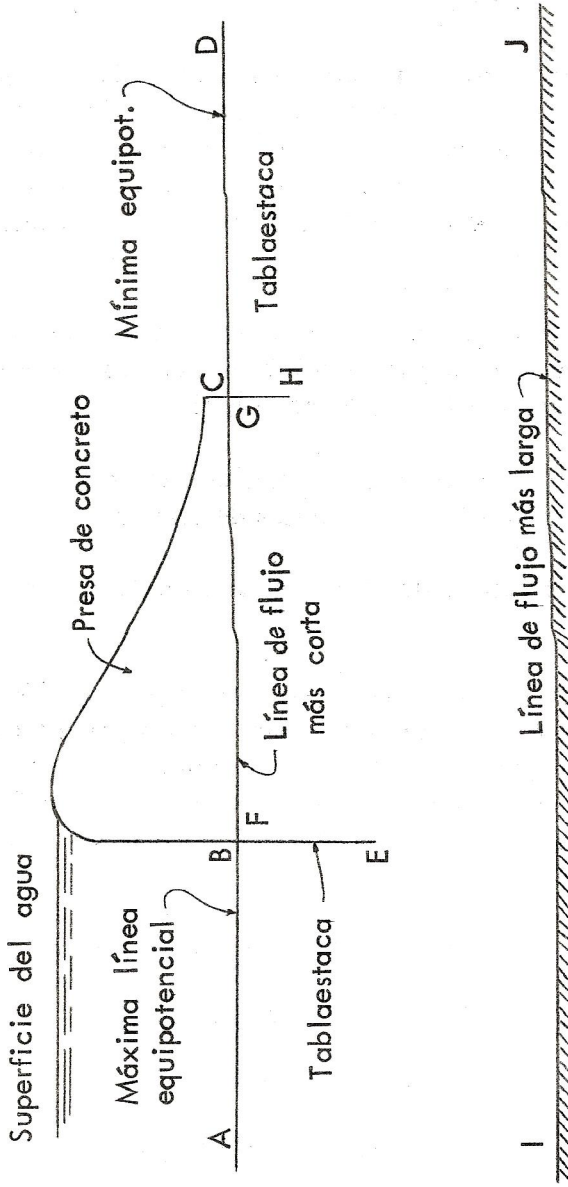
A continuación, se presenta el caso de percolación a través de estructuras de retención constituidas por presas de concreto cimentadas sobre un suelo permeable seguido de un estrato impermeable. Como se puede ver en la figura, todas las fronteras son conocidas. Las líneas de la red de flujo que ya se conocen son:

Línea AB: Máxima línea equipotencial

Línea CD: Mínima línea equipotencial

Línea BEFGHC: Línea de flujo más corta

Línea IJ: Línea de flujo más larga



En la figura 1 se puede ver la red de flujo ya terminada. Para llegar a esta solución se siguió el siguiente procedimiento: a) En base de las líneas ya conocidas, se trazaron las direcciones de líneas equipotenciales y de flujo. Estas se determinan fácilmente ya que deben intersectar en ángulo recto a las líneas prefijadas. b) A continuación se dibujó una familia de líneas de flujo (también se podrían haber dibujado primero las equipotenciales) que fuera consistente con las condiciones de frontera. c) Luego se dibujaron las equipotenciales tratando de que todas las líneas se intersectaran a  $90^\circ$ . d) Se borraron y se redibujaron las líneas hasta conseguir que todas las figuras fueran cuadrados. La red de flujo se puede dividir como se quiera a partir de este paso. En este ejemplo se usaron curvas francesas para que fuera más adecuado para propósitos de ilustración, pero las líneas trazadas a mano alzada no cambian en absoluto la exactitud y el valor práctico de la red de flujo, siempre que se hayan seguido los principios básicos estudiados anteriormente.

Las figuras 2 y 3 son otros ejemplos de aplicación de los métodos de cálculos de pérdidas por percolación. La figura 3 es el caso que se verá en el punto c. de este capítulo.

En la red de flujo de la figura 1 se puede ver que a los lados de la línea central las figuras no son cuadrados sino que son rectángulos en los que el ancho es 0.6 el alto. Entonces se tiene:

$$n_e = 12.6 \quad n_f = 4$$

## b. Presas de tierra

La percolación del agua en presas de tierra es uno de los casos de mayor importancia en la aplicación de la teoría del flujo del agua a través del suelo. Esto se debe a que la presa presenta características especiales distintas de las presas de concreto, y a que la presa en sí también tiene importancia como estructura.

Las presas de tierra y diques han protegido ciudades y tierras de cultivo desde los tiempos primitivos, y han sido usadas para el almacenamiento del agua para las necesidades del hombre por más de 2000 años. Por ejemplo, en el año 504 A.C., fue hecha en Ceilán una presa de más de 15 millones de metros cúbicos de tierra. Estas presas primitivas eran construidas simplemente poniendo el material en el punto en que se deseaba bloquear el paso del agua, y la compactación se obtenía solamente con el tráfico del hombre encima de la estructura. La construcción de presas de tierra se hizo empíricamente hasta a principios de este siglo, y aunque se puede afirmar que si bien es cierto que construyéndolas de esta manera generalmente quedaban sobrediseñadas, los desastres ocurridos se debieron a fallas en el diseño de algunos detalles o la negligencia de sus constructores. De 1930 para el presente, los métodos analíticos y experimentales han ido creciendo en importancia para obtener un buen diseño, pero la experiencia también juega un papel importante.

El problema del flujo del agua a través de las presas de tierra tiene la particularidad de que son necesarios métodos especiales para lograr trazar la red de flujo. La razón de esto es que en la región de flujo no se conoce de antemano una de las fronteras: la frontera superior, que hidráulicamente es una superficie libre y que se conoce como línea de percolación o línea de corriente superior.

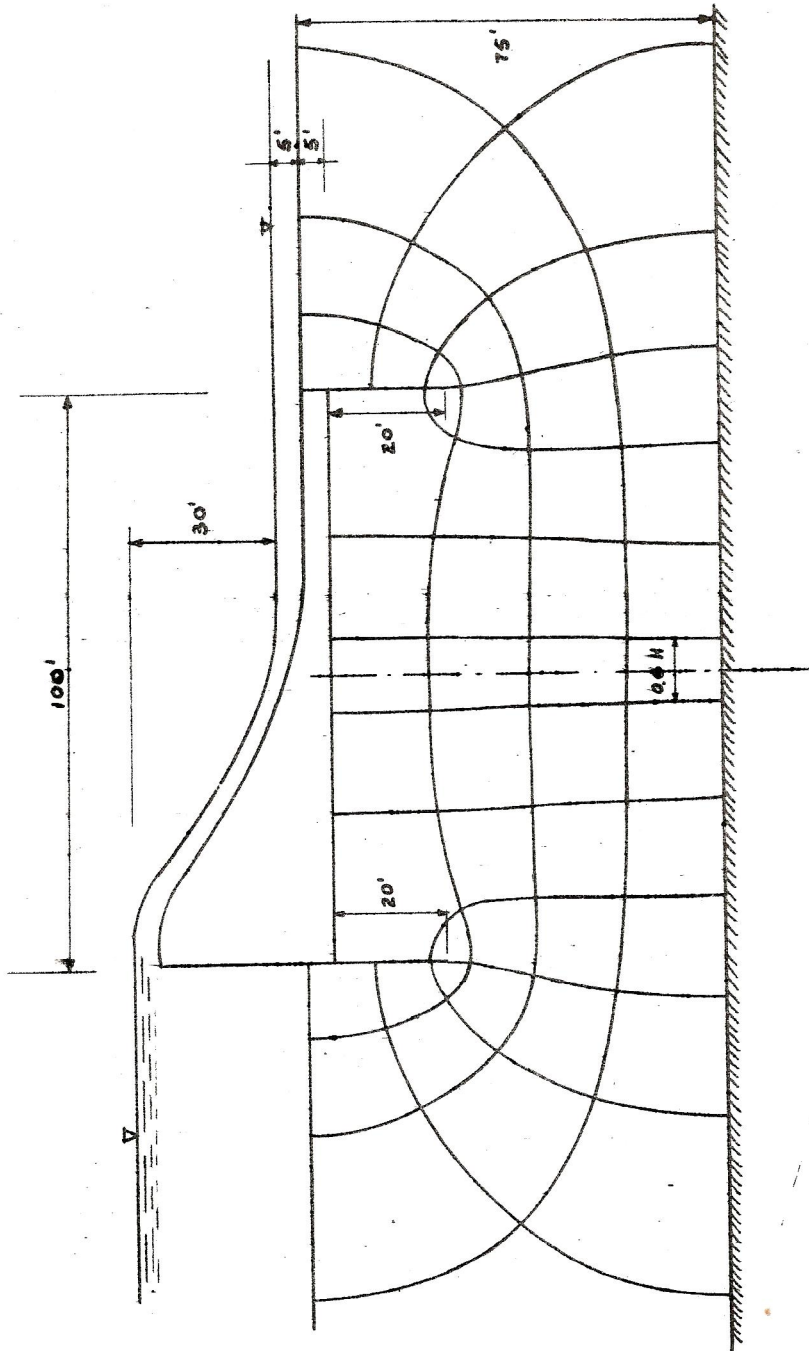
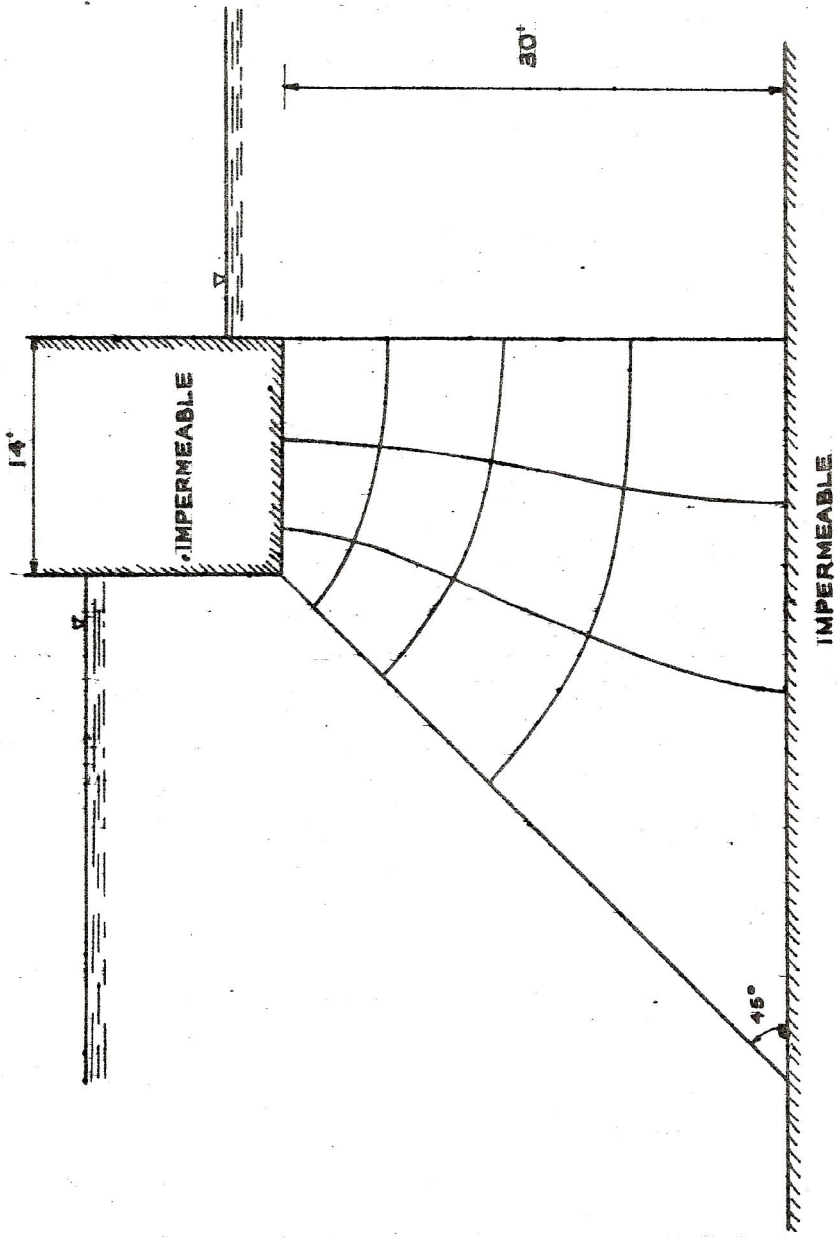


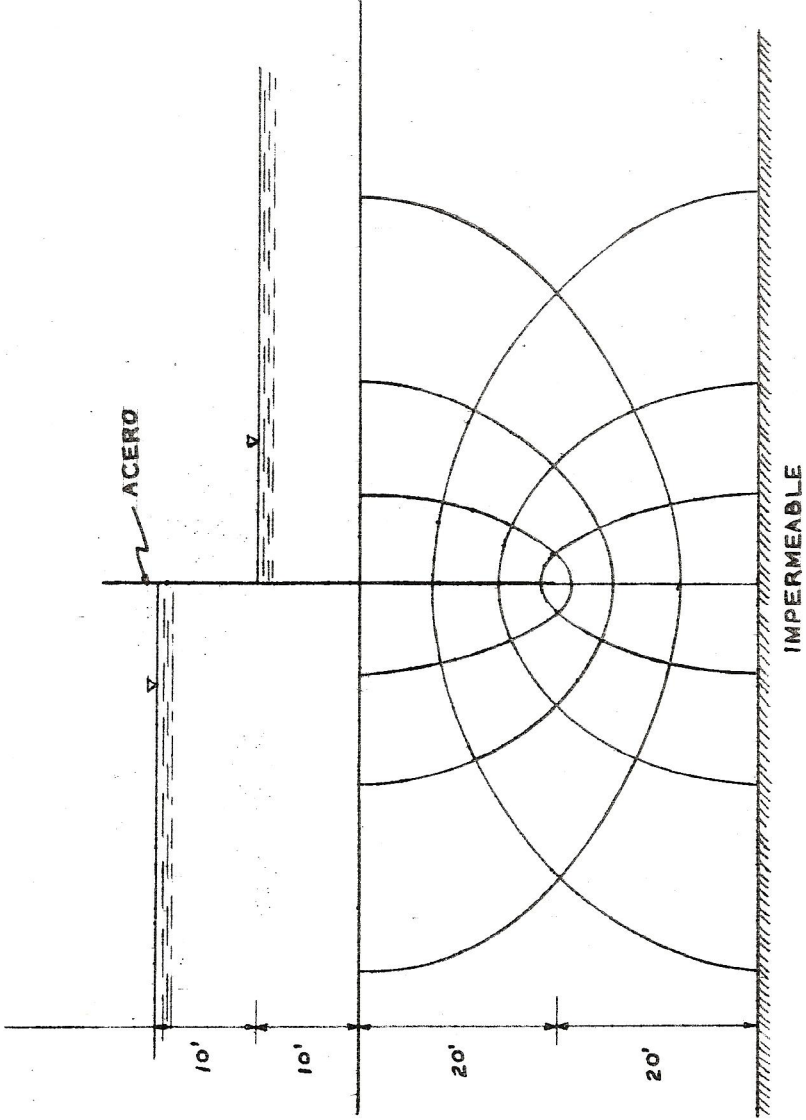
Fig. No. 1

Fig. No. 2



$n_f = 4$     $n_e = 5$   
 $F_1 = 1/5 = 1.33$

Fig. No. 3



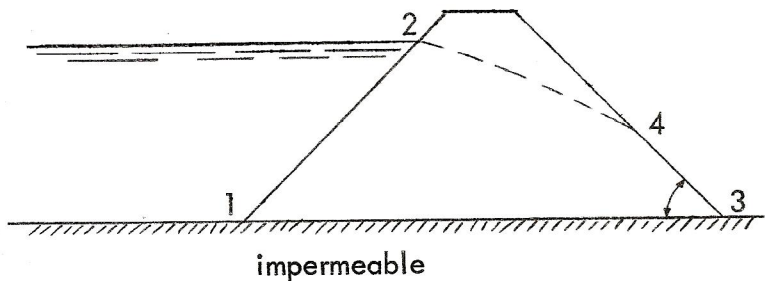
N<sub>f</sub> = 4    n<sub>e</sub> = 8

La línea de corriente superior no sólo es una línea de flujo sino que es una línea de igual presión, en la que todos los puntos tienen la presión atmosférica (o presión cero). Ahora bien, el problema de la determinación de la línea de corriente superior, que es el paso previo al trazo de la red de flujo va a ser el punto básico a abordar a continuación. Como se puede ver en la siguiente figura, las fronteras se pueden determinar así:

Línea 1-2: Línea equipotencial, contacto entre suelo permeable y agua.

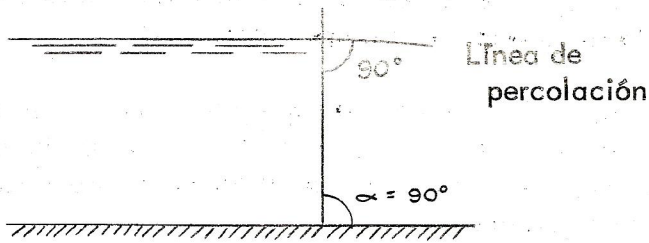
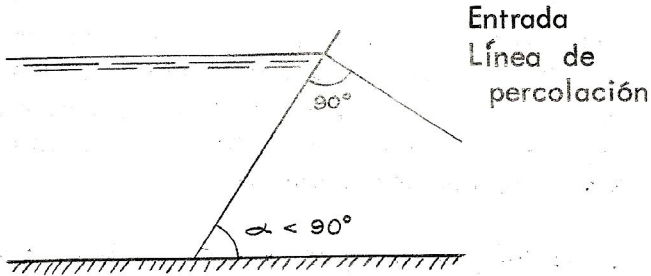
Línea 1-3: Línea de flujo, contacto entre una frontera impermeable y el material permeable.

Línea 2-4: Línea de flujo, abajo de la cual el suelo está saturado de agua, y arriba de la cual el suelo está seco. Es de hacerse notar que la forma de esta línea de flujo no se conoce.

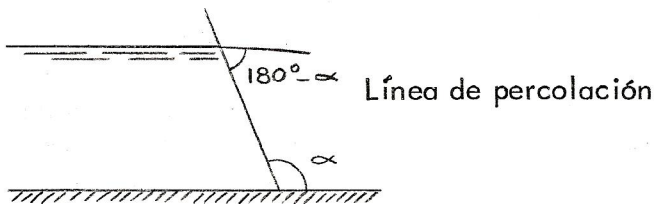


Condiciones generales de entrada y salida de la línea de corriente superior. La forma de la línea de percolación puede determinarse fácilmente tomando en cuenta que si la línea 1-2 es equipotencial y la línea de percolación es de flujo, se deberán intersectar formando ángulo recto. Así, según el ángulo  $\alpha$  que forme el talud del estrato permeable, aguas arriba con el estrato impermeable, así serán las condiciones de entrada en la línea de per-

colación en la presa de tierra.

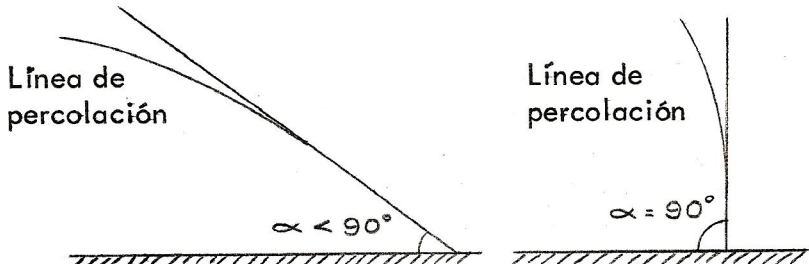


Ahora bien, cuando sucede el caso en que  $\alpha > 90^\circ$ , la línea de percolación entra horizontalmente, ya que no puede entrar normalmente al plano del suelo pues esto indicaría un flujo de agua hacia arriba, contra la gravedad, lo cual es imposible.

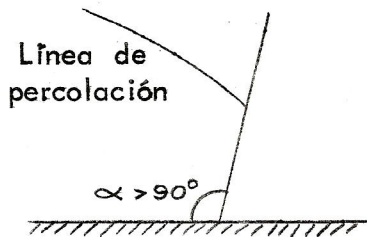


Las condiciones de salida de la línea de percolación o sea el ángulo con que ésta línea intercepta el talud aguas abajo de la presa dependen del ángulo que este talud forma con la horizontal. Cuando ese ángulo es menor o igual a

90°, la línea de percolación debe salir tangente al talud aguas abajo.



Si el talud aguas abajo es invertido ( $\alpha > 90^\circ$ ), a menos que la línea de percolación salga vertical no se puede lograr simultáneamente que la red de flujo sea de cuadrados y que se cumpla la condición de igualdad de las caídas de potencial  $\Delta h$  en las líneas equipotenciales sucesivas, arriba y abajo del punto de salida.



Las condiciones de entrada y salida de la línea de percolación en las presas de tierra han sido frecuentemente mal interpretadas y se ha afirmado que no se cumplen debidamente. La mayor parte de las veces, esto se debe al efecto capilar que hace que se confunda la línea de corriente superior con la línea de saturación del suelo, que comprende la zona capilar y que no está sujeta a estas condiciones.

El problema de determinar la posición de la línea de percolación dentro de una presa de tierra es de los que caen en el grupo denominado de flujo no confinado, pues

la región de flujo no está completamente determinada, siendo la frontera faltante precisamente la línea de percolación que es una superficie libre. El otro tipo de problemas de flujo, en que todas las fronteras son conocidas de antemano, se llama de flujo confinado, estudiado ya con anterioridad.

En 1863, J. Dupuit estableció las bases para una solución aproximada que es históricamente la primera de que se dispuso para tratar problemas de flujo no confinado, y la que se usa hasta la fecha.

Las hipótesis básicas de la Teoría de Dupuit son dos:

1. Para pequeñas inclinaciones de la línea de percolación las líneas de flujo pueden considerarse horizontales, y consecuentemente, las líneas equipotenciales como verticales.
2. La gradiente hidráulica es igual a la pendiente de la línea de percolación en el punto de que se trate y es constante en cualquier punto de la vertical que se trace por éste. Por ejemplo, si se tomaran dos líneas verticales muy próximas una de la otra, la caída de carga sería constante entre la misma distancia horizontal. La validez de la aplicación práctica de la teoría de Dupuit depende principalmente de la inclinación de la línea de percolación.

Solución de Schaffernack y Van Iterson. El primer método aproximado para conocer la forma de la línea de percolación fue desarrollado simultáneamente por Schaffernack y Van Iterson en 1917. Este método se basa en las hipótesis de Dupuit y en las condiciones de entrada y salida estudiadas anteriormente.

En la figura a continuación el gasto en cualquier sección, tomando en cuenta las hipótesis de Dupuit es:

$$q = ky \frac{dy}{dx}$$

Integrando esta ecuación se obtiene la ecuación de la línea de percolación, que indica que ésta es una parábola:

$$q (d - x) = k \frac{h^2 - y^2}{2}$$

De esta manera se puede determinar la forma de la línea de percolación. Ahora bien, cuando se está tratando de obtener una solución por medio del método gráfico, lo que interesa es determinar el punto de salida, o sea el punto 3.

Como se puede ver en la figura, la parábola no pasa por el punto 2 sino que pasa por el punto 5. La localización del punto 5 es en base de lo propuesto por A. Casagrande en su artículo "Seepage through dams". En base de la ecuación anterior, en el punto 3 se tiene:

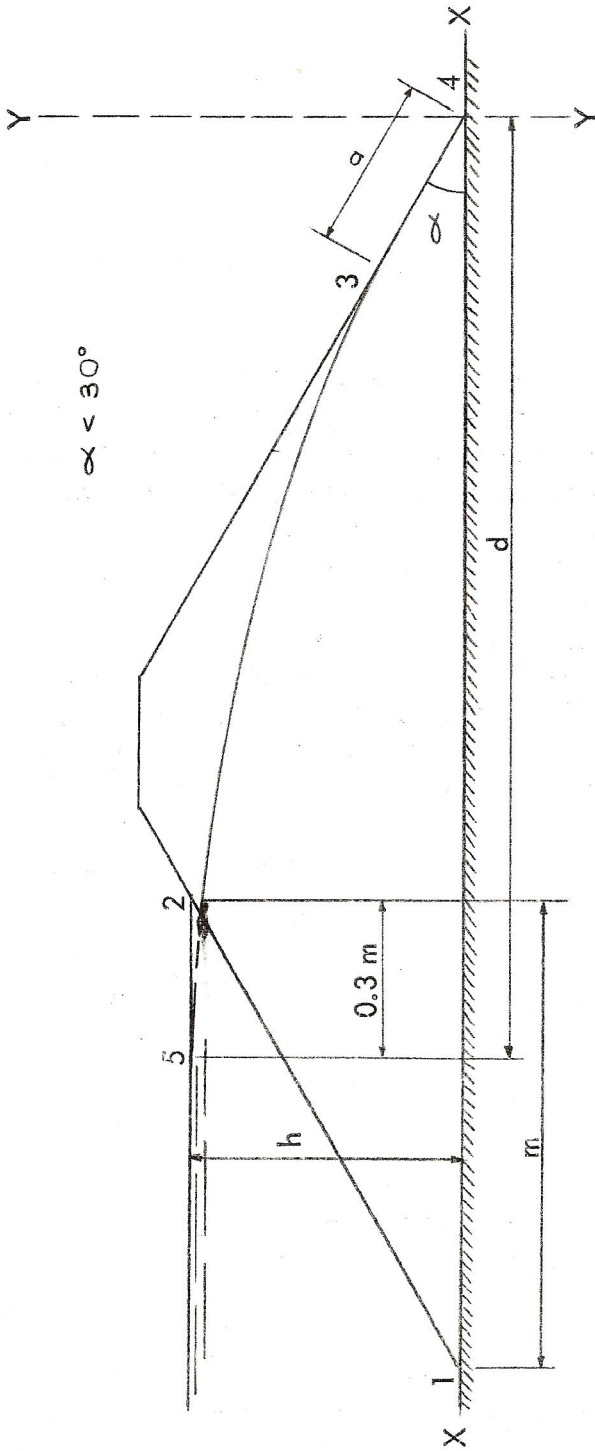
$$a = \frac{d}{\cos \alpha} - \sqrt{\frac{d^2}{\cos^2 \alpha} - \frac{h^2}{\sin^2 \alpha}}$$

El valor del gasto en ese punto será:

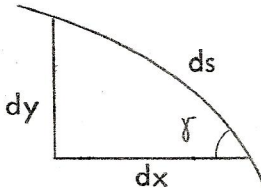
$$q = k \sin \alpha \operatorname{tg} \alpha$$

Esta última ecuación se conoce como fórmula de la tangente. Haciendo uso de esta fórmula se puede calcular el gasto a través de la presa de tierra sin necesidad de trazar la red de flujo.

La solución de Schaffernack y Van Iterson da buenos resultados solamente cuando la línea de percolación es bastante tendida; en otras palabras, sólo cuando el ángulo es pequeño. A. Casagrande recomienda que se utilice para ángulos menores de 30°.



Solución de L. Casagrande. Para ángulos mayores, Leo Casagrande propuso su método en 1932, que toma en cuenta las condiciones de entrada y salida y substituye la gradiente hidráulica de las hipótesis de Dupuit (pendiente de la línea de percolación) por su valor real:



$$i = \frac{dy}{dx} = \operatorname{tg} \gamma \quad (\text{Dupuit})$$

$$i = \frac{dy}{ds} = \operatorname{sen} \gamma \quad (\text{L. Casagrande})$$

De acuerdo con esto, el gasto en una sección vertical es igual a:

$$q = k y \frac{dy}{ds}$$

$$\text{Integrando:} \quad q (s_0 - s) = k \frac{h^2 - y^2}{2}$$

Siendo  $s_0$  la longitud de la línea de percolación desde el punto 5 al punto 4. En el punto 3 se tiene para el gasto:

$$q = k a \operatorname{sen}^2 \alpha$$

Esta ecuación se conoce como fórmula del seno y permite, como en el caso anterior, calcular el gasto a través de la presa de tierra sin necesidad de trazar la red de flujo. Sin embargo, como lo que interesa es la forma de la línea de percolación para el trazo de la red, interesa conocer el valor de  $a$ , y éste se puede deducir de las ecuaciones anteriores:

$$a = s_0 - \sqrt{s_0^2 - \frac{h^2}{\operatorname{sen}^2 \alpha}}$$

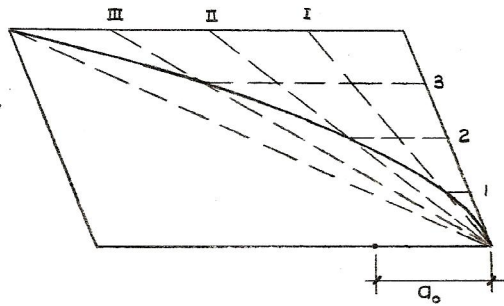
Casagrande recomienda calcular  $s_0$  como una primera aproximación con la fórmula:

$$s_0 = \sqrt{d^2 + h^2}$$

Para obtener un valor más exacto de  $s_0$  se puede usar la aproximación y luego medir gráficamente la distancia así obtenida al hacer el primer intento de trazo de la red de flujo. La hipótesis de L. Casagrande de que la gradiente es constante en una línea vertical e igual a  $dy/ds$  es satisfactoria para el rango de valores:  $30^\circ \leq \alpha \leq 60^\circ$ ; e inclusive para valores de  $\alpha$  mayores de  $60^\circ$ . Por ejemplo, para  $90^\circ$  se puede usar, pero la probabilidad de error es del 25%.

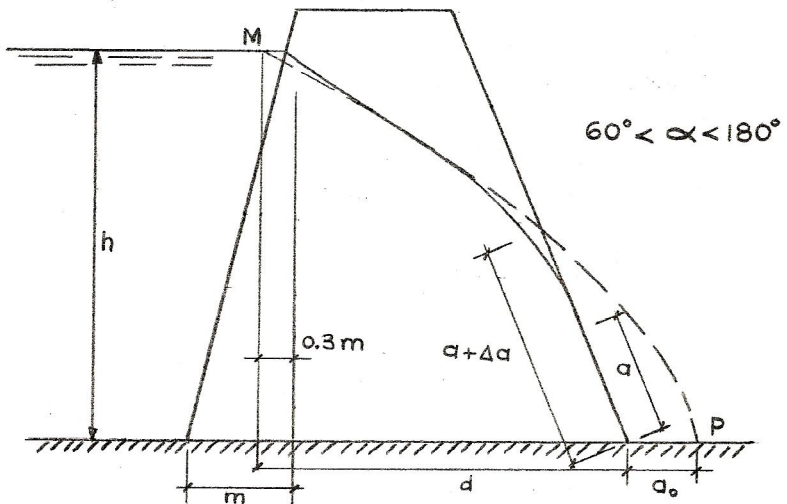
Solución de A. Casagrande. En 1931, J. Kozeny propuso una solución para  $\alpha = 180^\circ$ , según la cual las familias de líneas de flujo y equipotenciales son dos familias de parábolas del mismo foco. La parábola que forma la línea de percolación se conoce como parábola básica. De esta solución, que es un poco rigurosa, Arthur Casagrande llegó a una solución para valores entre  $60^\circ$  y  $180^\circ$  para el ángulo  $\alpha$ . Esta solución es suficientemente aproximada para fines prácticos, pues con ella se obtienen resultados con un error máximo del 3%. Esto viene a confirmar que los métodos gráficos son de gran valor para el proyectista. Básicamente, la solución de A. Casagrande para encontrar gráficamente la forma de la línea de percolación en una presa de tierra consiste en adoptar como primera aproximación la parábola básica de Kozeny para luego corregir la entrada y la salida, de manera que todas las condiciones queden satisfechas. En la figura a continuación se puede ver el procedimiento gráfico para dibujar la parábola básica de Kozeny.

Procedimiento gráfico  
para dibujar la parábola  
básica de Kozeny



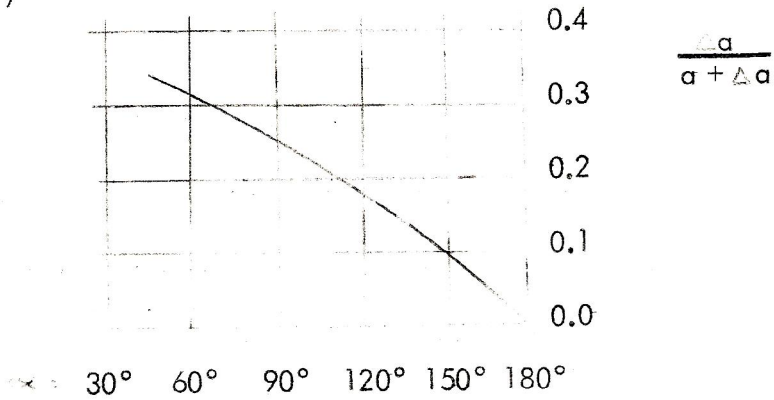
La distancia  $a_0$  determina la posición del foco de la parábola y está dada por la fórmula:  $a_0 = 1/2 (\sqrt{d^2 + h^2} - d)$

En el siguiente ejemplo se siguió el método de A. Casagrande para el trozo de la línea de percolación:



Se trazó la parábola básica colocando el foco en el punto A. La posición del punto P de la parábola se determinó haciendo uso de la fórmula, y la posición del punto M se determinó en la forma ya vista anteriormente. Para determinar el punto de salida de la línea de percolación se debe determinar la magnitud de la distancia  $a$ , y para

esto, Casagrande obtuvo la corrección para distintos ángulos del talud aguas abajo en base de la relación  $\Delta a / (a + \Delta a)$



Haciendo uso de la gráfica de corrección se tiene que  $a + \Delta a$  es una distancia conocida gráficamente; y se tiene también  $\Delta a / (a + \Delta a)$ , relación que se determina haciendo uso de la gráfica. Así, se puede despejar el valor de  $a$ . Se puede notar que el valor  $\Delta a / (a + \Delta a)$  decrece cuando  $\alpha = 180^\circ$ . Ya obtenido el punto de salida se corrige a mano la parábola básica cumpliendo la condición de que sea tangente al talud para el caso en que  $\alpha \leq 90^\circ$ , y tangente a la vertical pasando por el punto cuando  $90^\circ < \alpha < 180^\circ$ . También se debe corregir a mano la entrada de la línea de percolación, cumpliendo las condiciones discutidas con anterioridad.

Ya terminado el problema de determinar la línea de percolación para cualquiera de los casos tratados, se puede proceder al dibujo de la red de flujo como se hizo en los problemas de flujo confinado.

En la figura 4 se puede ver el ejemplo de una red de flujo para una presa de tierra trazada a partir de la línea de percolación y en la que se puede calcular el gasto co-

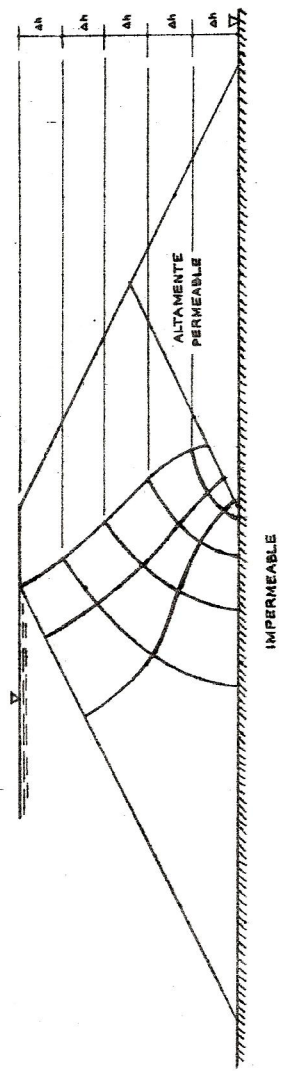


Fig. No. 4

mo se hizo con las redes de flujo vistas con anterioridad:  $q = khF_f$ . Cabe hacer notar que para evaluar  $F_f = n_f/n_e$ ,  $n_e$  se cuenta sobre la superficie impermeable que es la frontera inferior de la red.

### c. Otros tipos de estructuras

Además de estructuras de retención consistentes en presas de concreto y presas de tierra cabría mencionar el uso de tablaestacado, caso que no presenta complicación alguna como se pudo ver anteriormente en la figura 3. En esta figura se presenta el caso en el que se usa una plancha de acero que se asume impermeable. Desarrollando este ejemplo con una permeabilidad:  $k = 20 \times 10^{-4}$  cm/seg, se tiene:

$$n_f = 4, n_e = 8, \quad q = \frac{20 \times 10^{-4} \times 60}{30.48} \times 10 \times \frac{4}{8}$$

$$q = 1.967 \times 10^{-2} \text{ pies}^3/\text{min}/\text{pie}$$

Ahora bien, "q" es el gasto por unidad de longitud - normal a la dirección de la percolación. Para obtener el gasto total, si se tuviera una longitud,  $L = 100$  pies

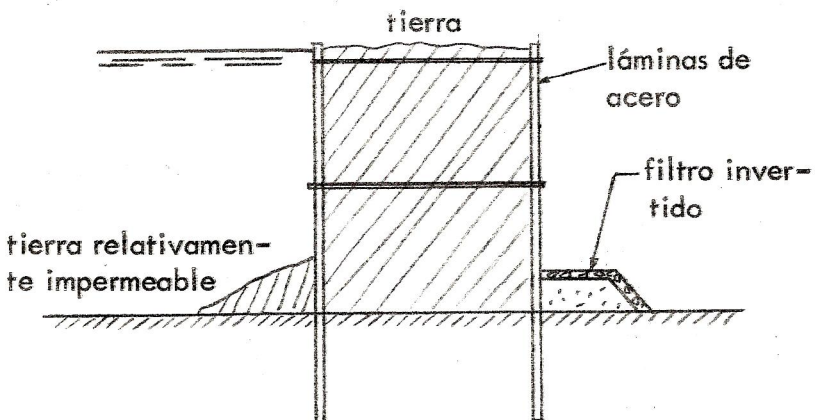
$$Q = q \times L = 1.967 \times 10^{-2} \times 100 = 1.967 \text{ pies}^3/\text{min}$$

La construcción de plantas, presas y otras obras de ingeniería en los lechos de los ríos requiere el uso de diques provisorios (cofferdams). Si el agua es poco profunda - hasta 2.00 m. - y las velocidades son de pocos pies por minuto, con usar sacos de arena o tablaestacado queda resuelto el problema, pero si el agua es más profunda y más rápida se debe recurrir al uso de diques provisorios más elaborados. Por ejemplo, para una profundidad bastante grande se puede usar un dique provisorio consistente en dos láminas de

acero conectadas por medio de barras de acero y el espacio entre ellas relleno de tierra.

Los diques provisorios deben ser capaces de resistir las fuerzas hidrostáticas de volteo, erosión del subsuelo debida a percolación, deslizamiento sobre el cimiento, y deben tener resistencia al colapso debido a las presiones internas del suelo. Si están cimentados sobre roca o grava su estabilidad está asegurada si tienen suficiente ancho y peso para resistir la presión del agua, pero si están sobre arena u otro material que pueda ceder, se debe buscar una reducción adecuada de la percolación para prevenir la erosión del subsuelo. Esto se consigue por medio del uso de filtros, es decir, colocando materiales de distintas permeabilidades sucesivamente para ir disminuyendo la percolación. Un ej. de este tipo de reducción aplicado en una presa de tierra es el que ocurre en la figura 4.

En la figura a continuación se puede ver un ejemplo de un dique provisorio en el que se ha usado un filtro invertido para evitar que ocurra erosión del subsuelo debida a la percolación



## V. CONCLUSIONES

1. La teoría del flujo del agua a través del suelo está basada en la Ley de Darcy que concluye que la velocidad a que fluye el agua a través del suelo bajo una gradiente de presión es directamente proporcional a la gradiente hidráulica.

2. La ley de Darcy es válida solamente para suelos de granos finos, y el flujo del agua a través de los poros del suelo es laminar.

3. El coeficiente de permeabilidad es inversamente proporcional a la viscosidad del agua, y por lo tanto, directamente proporcional a la temperatura.

4. Mientras más denso es un suelo y más pequeños los poros, su permeabilidad es menor, y viceversa.

5. La permeabilidad es una propiedad física del suelo y es lo más importante en la resolución de los problemas relacionados con la percolación.

6. El coeficiente de permeabilidad del suelo en cuestión, en vista de ser el factor más importante, deberá ser objeto de un análisis cuidadoso para su obtención.

7. Para cada problema de percolación hay una solución única de la ecuación de Laplace que puede ser trazada como líneas equipotenciales y de flujo, las que combinadas forman la red de flujo.

8. Los métodos gráficos para la resolución de los problemas relacionados con la percolación son de gran valor práctico y el tiempo invertido en aprenderlos y ejercitarse en su uso estará bien aprovechado.

9. La construcción de las redes de flujo requiere alguna habilidad manual, pero si el proyectista logra que en una red de flujo se cumplan, para las dos familias de curvas, las condiciones de ortogonalidad y de frontera, se tendrá una aproximación a la solución única del problema lo suficientemente buena para los fines de la ingeniería y muy ventajosa con respecto a las que se obtengan por métodos matemáticos rigurosos.

10. Un operador competente puede obtener, en la mayor parte de problemas de ingeniería, soluciones muy satisfactorias para redes de flujo en término de pocas horas y en algunos casos hasta en 30 minutos, sin el uso de curvas francesas, las cuales no afectan en absoluto el grado de exactitud y deben ser usadas solamente para propósitos de ilustración.

11. Cuando se presenta el caso de un suelo anisotrópico, se transforma previamente, tanto la sección en estudio como su permeabilidad, usando la teoría de la sección transformada y a continuación se resuelve como si se tratara de un suelo isotrópico.

12. Para el caso de formaciones heterogéneas la red de flujo debe cumplir las condiciones de transferencia al cruzar los estratos las líneas equipotenciales y de flujo.

13. Los problemas en que todas las fronteras de la región de flujo son conocidas, son de flujo confinado; tal es el caso de las presas de concreto cimentadas sobre un estrato permeable y a continuación uno impermeable. En los problemas de presas de tierra no se conoce la línea de percolación superior, por lo que estos son de flujo no confinado.

14. La confiabilidad y la exactitud de los resultados de los cálculos depende también del grado en que las con-

diciones de percolación del problema a resolver sean similares a las condiciones ideales postuladas por la teoría.

15. Cuando el proyectista se le presenta problemas de percolación debe abordar el problema haciendo uso de los métodos existentes para determinar sus resultados y así diseñar sus estructuras, y no basarlo en otros diseños tipo "standard" sino usar estos sólo como comparación o referencia.

16. Los desastres ocurridos se han debido a fallas en el diseño y/o a errores de construcción, pero los métodos analíticos y experimentales han ido creciendo en uso y confiabilidad de 1930 para la actualidad.



## BIBLIOGRAFIA

1. Cedergren, Harry R.: "Seepage, drainage and flow nets", John Wiley & Sons, Inc., 1968.

2. Casagrande, Arthur: "Seepage through dams", artículo publicado por New England Water Works Association Journal, Vol LI, No. 2, 1937.

3. Juárez Badillo, Eulalio; Rico Rodríguez, Alfonso: "Mecánica de Suelos", Tomo I, 2a. edición, México, 1969.

4. Juárez Badillo, Eulalio; Rico Rodríguez, Alfonso: "Mecánica de Suelos", Tomo III, 2a. edición, México, 1969.

5. Sherard, Woodward, Gizienski, Clevenger: "Earth and Earth-Rock Dams", John Wiley and Sons, Inc., 1967.

6. Means R. E., Parcher J. V.: "Physical Properties of Soils", Charles E. Merrill Books Inc., Columbus, Ohio, 1963.

7. Hermosilla, Rodolfo: Notas de clase "Hydraulics of Seepage and Ground Water", A. Casagrande, Harvard University, 1969.

Rolando Chinchilla Castañeda

Vo. Bo.:

(f) Ing. Rodolfo Herosilla Montano  
Asesor.

Vo. Bo.:

(f) Ing. Adrián Juárez  
Director del Centro de Investigaciones  
de la Facultad de Ingeniería

IMPRÍMASE:

(f) Ing. Amando Vides Tobar  
DECANO.