METODO *HARDY CROSS*

para el análisis de las pérdidas de carga en las redes de distribución de acueductos.

En general, una red de agua potable puede proyectarse, fijando previamente los diámetros de las tuberías con cierto criterio. Formada así la red, corresponde verificar si las pérdidas de cargas, producidas por los consumos probables quedan dentro de ciertos límites admisibles, es decir, que las presiones resultantes en la red, considerando además las alturas topográficas, no bajen de un cierto mínimo ni excedan de un máximo dado. Además las velocidades no deben ser superiores a las admisibles.

Los cálculos necesarios para esta determinación son, generalmente, muy engorrosos. Por este motivo se han ideado diversos métodos científicos para facilitar la labor. Entre los métodos conocidos, contamos con tres de carácter especial:

1º—El método gráfico de Freeman: exige un trabajo enorme para la solución de redes complejas; por este motivo se usa muy poco.

2º—El analizador eléctrico para redes, de Camp y Hazen: se requiere el empleo de un equipo caro y delicado, además de un aprendizaje especial para su aplicación. Por esto, es poco probable que llegue a generalizarse.

3º—El método Hardy Cross: se detalla en las páginas que siguen. Consta, esencialmente, de un sistema de aproximaciones sucesivas, mediante cálculos efectuados con regla de cálculo o con ábaco de puntos alineados, a base de los datos de escurrimiento que dan las tablas corrientes. Su aplicación es bastante rápida, al extremo de que los cálculos de verificación para una red que abastece a una población, hasta de unos 15.000 habitantes, sólo requiere unas cuantas horas.

TEORIA DEL METODO HARDY CROSS.

Vamos a determinar, primeramente, cómo varía la pérdida de carga que se produce en una tubería dada, en función del gasto que escurre por ella (tubería sin gasto en camino). Tal tubería podría ser, por ej., un elemento de una red de agua potable, comprendido entre dos nudos de la malla.

Partamos de una fórmula de escurrimiento cualquiera, por ej., la de Scobey. En esta fórmula, se tiene.

$$u = C \times J^{0,5} \times D^{0,625} \qquad \Big| \qquad Q = \frac{\pi\, D^2}{4}\, u \quad \therefore \quad u = \frac{4.\, Q}{\pi .\, D^2}$$

Despejemos a J en la fórmula de Scobey, y sustituyamos a u por su valor en función del gasto; se tiene:

$$J^{0,5} = \frac{4\, Q}{C\, \pi\, D^{2,625}}$$

Ahora bien, para una tubería dada, C y D son constantes, de modo que podemos escribir:

$$J^{0,5} = K \times Q \quad \text{o bien} \quad J = K^2 \times Q^2$$

Esta sería la pérdida unitaria en el trozo de tubería considerado. La pérdida de carga total, entonces, será $J.\, L$; multiplicando ambos miembros por L, y considerando, además, que L también será constante para el trozo considerado, se llega finalmente a lo siguiente:

$$J \times L = r \times Q^2$$

Se acostumbra abreviar la expresión sustituyendo $J\, L$ por h; la fórmula queda entonces así:

$$h = r \times Q^2$$

Examinemos ahora la fórmula de escurrimiento de Ludin para cañerías de cemento-asbesto. En esta fórmula, se tiene:

$$u = 54{,}42 \times D^{0,65} \times J^{0,54}$$

Reemplazando u por su valor en función de Q, considerando que D es constante para el trozo de tubería considerado y, por tanto, se le puede englobar en la nueva constante, se tendrá:

$$\frac{4.\,Q}{\pi\,D^2} = K.\,J^{0,54} \quad \text{o bien} \quad J^{0,54} = K'.\,Q$$

de donde $J = K.\,Q^{1/054} = K.\,Q^{1,85}$

Nuevamente, multiplicando ambos miembros por L (que también es constante), se obtiene, finalmente:

$$h = J.\,L = r\,Q^{1,85}$$

Análogas consideraciones nos permitirán ver que las fórmulas de Darcy y de Manning, nos conducen a las expresiones:

$$h = r.\,Q^2$$

y la de William-Hazen a la expresión:

$$h = r.\,Q^{1,85}$$

Finalmente, observemos a qué resultado se llega con la fórmula de Flamant, que dice:

$$D^{514}\,J = a\,u^{714}$$

o bien

$$D^5\,J^4 = a^4\,u^7$$

reemplazando u por su valor en función del gasto, y englobando los términos en D, que son constantes, se llega a la expresión:

$$J^4 = m.\,Q^7$$

o bien:

$$J = m.\,Q^{1,75}$$

y finalmente, multiplicando por L, se obtiene:

$$h = J.\,L = r.\,Q^{1,75}$$

Vemos, pues, que las diversas fórmulas de escurrimiento consideradas, nos conducen a expresar la pérdida de carga, en una tubería dada, sin gasto en el camino, por una expresión de la fórmula:

$$h = r.\,Q^n$$

en que n es variable entre 1,75 y 2, según la fórmula de escurrimiento que se considere.

Cabe recordar la analogía entre una tubería y un conductor eléctrico. En el conductor eléctrico, la caída de tensión se expresa por:

$$E = R.\,I$$

En cambio, en una tubería, la pérdida de presión, h vale:

$$h = r.\,Q^n$$

Es sobre esta fórmula sobre la que se basa el método Hardy Cross. Vemos que r pasa a ser una constante para cada trozo de malla que se considere, y es función del largo, diámetro y rugosidad de la tubería considerada. Por tanto, es un factor que puede denominarse su resistencia. Respecto a su cálculo, lo veremos con más detalle en lo que sigue de este estudio. En cuanto a la potencia, su valor dependerá de la fórmula de escurrimiento que se elija para el cálculo.

Para el caso de que las tuberías tengan gasto en camino, se asimilará este caso al caso general de tuberías sin gasto en camino. Para esto se emplean las relaciones conocidas de la Hidráulica Aplicada, suponiendo que la tubería es recorrida, en toda su extensión, por un gasto menor, gasto que se supone entrega en su extremo. Como en el método Hardy Cross, la tubería considerada forma parte de una red, se considera entonces que este gasto es entregado al consumo en el nudo considerado.

DESCRIPCION DEL METODO DE HARDY CROSS.

El método de Hardy Cross se entiende mejor si mostramos la forma como se aplicaría a un caso sencillo, pues así nos posesionaríamos de la idea que su autor tuvo para deducir dicho método. Tomemos, por ej., el caso indicado en la fig. 1, de dos tuberías paralelas, cada una compuesta de dos trozos distintos; no hay gastos en camino. Se da Q de entrada que será igual al de salida, y, además, los largos y diámetros de los cuatro trozos de cañería.

Supondremos, todavía, que los valores de r para cada trozo hayan sido determinados (sobre esto se tratará más adelante detalladamente).

Se comienza por suponer que el gasto se divide en el nudo A, en 2 gastos: Q' y Q'', ligados por la relación $Q = Q' + Q''$. La proporción entre Q' y Q'' puede ser cualquiera, pero la práctica permitirá apreciar más o menos los valores Q' y Q'' que no sean demasiado alejados de la verdad. Por lo demás, lo único que pasaría al tomar para Q' un valor demasiado alejado de la realidad, sería que se aumentaría el número de aproximaciones por efectuar, sin que, por lo demás, esto influya en el resultado final que se va a obtener.

PRIMER PASO

Partiendo de un nudo en la malla, digamos A, se rodea la malla siguiendo un sentido determinado, digamos por ej., en sentido contrario a las agujas del reloj, y se calcula las pérdidas de carga que se producen en cada trozo de acuerdo con la fórmula fundamental:

$$h = r.\,Q^n \qquad (1)$$

y se suman las pérdidas de carga obtenidas, fijándose en su signo. Si la elección estuviera bien hecha para Q' y Q'', la suma debería dar por resultado cero (0), ya que se compensan todas las pérdidas de carga al volver al punto de partida, A. Nótese que el signo de

h queda determinado por el sentido de escurrimiento del gasto Q' o Q'' de acuerdo con el sentido en que estamos rodeando la malla.

En general, pues, el primer tanteo nos dará para Σh una suma distinta de cero. Sea su valor Δh. Esto representa el primer error. El error debe determinarse con su signo positivo o negativo.

SEGUNDO PASO

Para reducir el error, supongamos ahora que hacemos circular por la malla un gasto suplementario "q" siguiendo un sentido determinado y adecuado para que Δh disminuya. Este gasto "q" puede ser considerado como un incremento de los gastos Q' y Q'', y según el sentido en que suponemos que circula "q", aumentará o disminuirá los valores correspondientes de Q' y Q''. Tenemos un procedimiento para avaluar "q". En efecto, en la fig. 2, sea OE la curva representativa de la ecuación $h = r\,Q^n$. Sea AB el valor de h, correspondiente al valor de Q' en un determinado trozo de tubería, y sea $A'B'$ el verdadero valor que debe tener "h" para que este trozo de tubería llegue a compensar el error Δh en la malla. Tracemos por B la tangente BB' a la curva, y determinemos su intersección con la horizontal que pasa por B'; es decir, cuyo "h" sea igual al que verdaderamente se necesita. De la fig. se deduce:

$$\Delta h = \frac{d\,h}{d\,Q}\,.\,q$$

Pero, como $\qquad h = r.\,Q^n$

se tiene $\qquad \dfrac{d\,h}{d\,Q} = n.\,r.\,Q^{n-1}$

de donde $\qquad \Delta h = n.\,r.\,Q^{n-1}.\,q \qquad (2)$

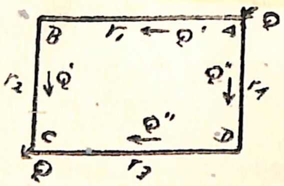

Fig. 1

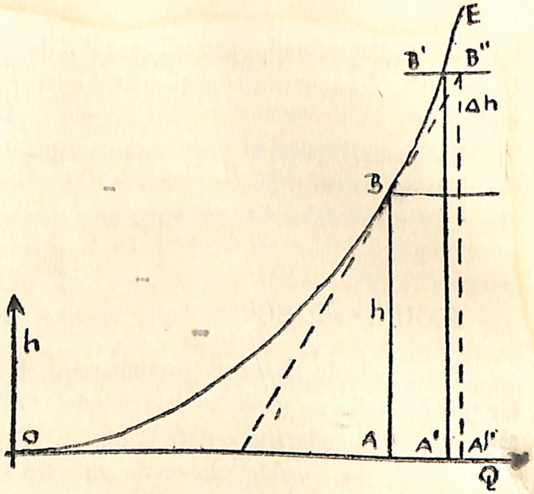

Fig. 2

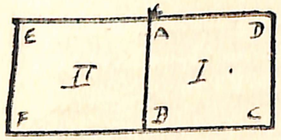

Fig. 5

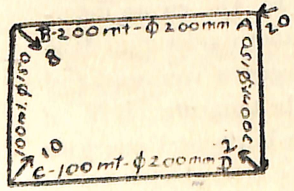

Fig. 3

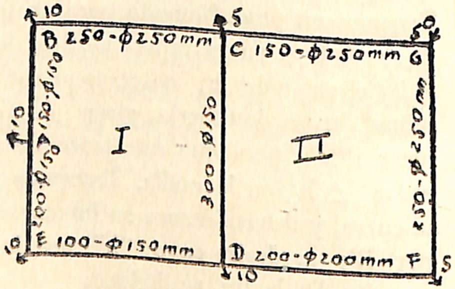

Fig. 6

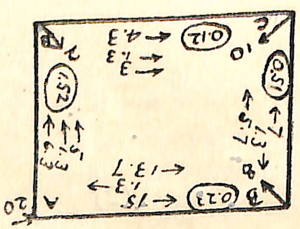

Fig. 4

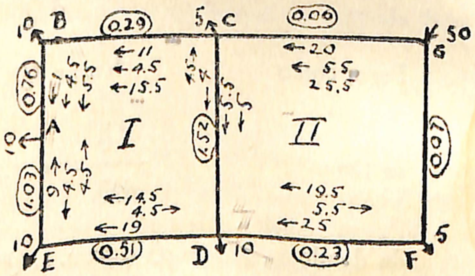

Fig. 7

Naturalmente, como se trata de un incremento, esta fórmula es válida tanto para "q" positivo como negativo. Aunque el valor de q depende del Q que escurre en la sección considerada, es posible formar su valor con relativa facilidad en las diversas secciones de la malla considerada, de modo que se obtenga un valor de "q" igual para todas. Apliquemos, en efecto, la ecuación considerada a la malla de la fig. 1. Habíamos establecido un error $\triangle$ h como resultado de nuestra primera aproximación. Hagamos ahora circular el gasto suplementario "q" en esta malla, que producirá los siguientes efectos: producirá diferencias de carga definidas por la fórmula (2). Si llamamos r_1, r_2, r_3 y r_4, respectivamente, las resistencias de cada trozo de tubería, en la fig. 1, el efecto de hacer escurrir el gasto "q" en esta malla, siguiendo un solo sentido, nos producirá una pérdida suplementaria de carga, cuya expresión es la siguiente:

$$\text{Psupl.} = n.\, r_1.\, Q'^{\,n-1}\, q + n.\, r_2.\, Q'^{\,n-1}.\, q + n.\, r_3.\, Q''^{\,n-1}.\, q + n\, r_4\, Q'^{\,n-1}.\, q$$

Nótese especialmente, que como el gasto suplementario "q" recorre la malla en un solo sentido, *todos los términos de esta suma son del mismo signo.*

Para abreviar podemos escribir:

$$\text{Psupl.} = q.\, \Sigma\, n.\, r.\, Q^{n-1}$$

Ahora bien, esta pérdida suplementaria debe ser igual al error cometido en la primera aproximación, que valía $\triangle$ h. Sustituyendo y despejando la incógnita "q" se llega a la expresión:

$$q = \frac{\triangle h}{\Sigma\, n.\, r.\, Q^{n-1}}$$

Sustituyendo a $\triangle$ h por su valor, que se puede escribir en la siguiente forma:

$$\triangle h = \Sigma\, r.\, Q^n$$

se obtiene por fin: $$q = \frac{\Sigma\, r.\, Q^n}{\Sigma\, n.\, r.\, Q^{n-1}} = \frac{\Sigma\, h}{\Sigma\, h}, \qquad (3)$$

Nótese que este valor será solamente aproximado, pues, si se examina la fig. 2 nuevamente, vemos que el "q" determinado es mayor que el $\triangle Q$, valor efectivo que anularía el error. Queda, pues, un error residual indicado por la diferencia $q - \triangle Q$, que será tanto menor cuanto menor es el valor de $\triangle h$ en comparación con h. Vemos así que, con tanteos sucesivos será posible disminuír el error hasta cualquier límite deseable.

Debe hacerse una salvedad respecto al sentido que hay que atribuír a "q". Si bien es posible dar reglas matemáticas para este fin, es más sencillo hacer una determinación "visual" de dicho sentido. Volviendo a la fig. 1, supongamos que los valores Q' y Q" hubieran determinado un error $\triangle h$ en la pérdida de carga, de signo positivo, al recorrerse la malla en el sentido contrario al de las agujas del reloj. Esto quiere decir que las pérdidas de carga de los trozos A B y B C son superiores a lo que se necesita. Para corregirlo hay que disminuír el gasto en estos trozos en el valor "q", a la vez que se aumentan los gastos en los trozos C D y D A en el mismo valor. Tomando en cuenta este sencillo raciocinio, nunca podrá haber duda respecto al signo que hay que tomar en cuenta en la corrección. Lo más importante es, sin embargo, recordar que, en el cálculo de $\Sigma\, r.\, Q^n$, hay que tomar en cuenta los signos de las pérdidas de carga; no así en la expresión del $\Sigma\, n.\, r.\, Q^{n-1}$, en la cual todos sus términos son del mismo signo.

Hemos deducido las fórmulas de Hardy Cross en que se basa su método, dejándolas en el estado que hemos deducido. Otros autores las transforman un poco, para facilitar, en apariencias, los cálculos que demanda su aplicación, pero es mejor conservar las fórmulas con la forma que le hemos dado en este trabajo.

EL VALOR DE "R".

En ambas fórmulas figura el valor de "r", que representa la resistencia del trozo de tubería en consideración. Basándose en la fórmula (1), vemos que, de $h = r.\, Q^n$

podemos despejar a r, y se obtiene:

$$r = \frac{h}{Q^n}$$

La forma más fácil de obtener "r" es una tabla de escurrimiento, en la cual se calcula "r" haciendo Q igual a la unidad, por ej., un 1/seg. Además sabemos que $h = J.\, L$. Por consiguiente, $r = J.\, L.$ para un 1/seg.

Es de mucha importancia elegir las unidades en que se expresan y para fijar el valor de "r" que se usará en los cálculos. Al efecto, es útil recordar que, para unidades métricas, conviene expresar Q en 1/seg. y h en centímetros; con estos datos, generalmente "r" tiene valores bajos y con muy pocas decimales, lo que es muy útil para un cálculo de aproximación.

Otras fórmulas de descubrimiento permiten determinar "r" con suma facilidad. En efecto la fórmula de Darcy dice:

$$J = \propto Q^2$$

Nuestra fórmula (1) dice: $h = r.\, Q^2$

($n = 2$ para la fórmula de Darcy).

Pero

$$h = J.\, L$$

luego

$$r = \frac{J.\, L}{Q^2}$$

y sustituyendo J por su valor: $$r = \frac{\propto Q^2.\, L}{Q^2} = \propto L.$$

La fórmula de Darcy puede consultarse en Lira, "Hidráulica Teórica" páginas 322-323 y en la Tabla XXIX del mismo texto, se dan valores de α para D en metros, y J resultaba expresado también en mts. para $L = 1$ met. Para tener, pues, los valores de r para l/seg. y cm. basta multiplicar por 10^2 y dividir por 10^6, lo que, en resumen, nos conduce a dividir por $10^4 = 10.000$ los valores encontrados para $r = \alpha$ de la tabla indicada.

Por ej.: Cuál es el valor que debe adoptarse para r, usando la fórmula de Darcy, para un trozo de tubería de 200 mm. de largo?

Se debe expresar el gasto en l/seg. y la pérdida total de carga en cm.

Para este caso la tabla indicada nos dice que α para un diámetro de 0,200 mts. vale 11,571; se multiplica este valor por L en mt. (es decir, por 200 en el caso del problema), y se divide por 10.000. Resulta entonces:

$$r = (1157 \cdot \times 200) / 10.000 = 0{,}23$$

Como se trata de tanteos, basta con conservar dos decimales en el valor indicado o encontrado. Consideraciones análogas nos permitirán determinar r para cualquier fórmula de escurrimiento que se emplee. Cabe recordar que r, entonces, es una función del diámetro, del largo y de la rugosidad del trozo de tubería que se considera. Para la tubería indicada la fórmula del escurrimiento aplicada nos indica que:

$$h = 0{,}23\, Q^2$$

con h en cms. y Q en l/seg.

Para mejor comprender la marcha del cálculo, resolveremos un ejemplo sencillo, como el indicado en la fig. 3. Se trata de una malla alimentada en A con un gasto de 20 l/seg. y que entrega en los nudos B, C y D los gastos de 8, 10 y 2 l/seg., respectivamente. En la fig. 3 se indican los largos y diámetros de las tuberías. Se

trata de determinar el escurrimiento de los diversos trozos y las cotas piezométricas que se producen en los diversos nudos.

Comenzamos con el cálculo de r, aplicando la fórmula de Darcy, y adoptando, por consiguiente, $n = 2$ en nuestros cálculos. El primer paso es determinar los valores de r, a base de la explicación dada para esta fórmula.

Resulta así:

$$r\,(AB) = 11{,}571 \times 200 \;:\; 10.000 = 0{,}23$$
$$r\,(BC) = 50{,}639 \times 100 \;:\; 10.000 = 0{,}51$$
$$r\,(CD) = 11{,}571 \times 100 \;:\; 10.000 = 0{,}12$$
$$r\,(AD) = 50{,}639 \times 300 \;:\; 10.000 = 1{,}52$$

Ahora supondremos que el gasto en A se divide en dos, a saber: $Q\,(AB) = 15$ l/seg. y $Q\,(AD) = 5$ l/seg., puesto que su suma debe ser 20 l/seg.

Estos valores se han elegido arbitrariamente, naturalmente que con un poco de lógica. Ahora se forma el diagrama siguiente, fig. 4. Aquí sólo se inscriben las resistencias de los trozos y los gastos, estos últimos afectados de una flechita que indica el sentido que hemos adoptado para ello. Los gastos en las ramas BC y CD resultan de la condición de continuidad del gasto en cada nudo. Por ej., al nudo B llegan 15 l/seg. por la tubería AB y se entregan 8 l/seg. en ese nudo. El sobrante que sigue por la cañería BC será, por tanto, igual a $15 - 8 = 7$ l/seg., y así sucesivamente.

Se forman ahora los valores de $\Sigma\, r\, Q^2$ y de $\Sigma\, 2\, r\, Q$, fijándose en que en la primera de estas sumas hay que respetar los signos, no así en la segunda de ellas. Para esto, se rodea la malla en cualquier sentido y partiendo de un nudo cualquiera, hasta llegar de vuelta al nudo de partida. Nosotros hemos partido del nudo A y rodeado la malla en el sentido A - B - C - D.

Se obtiene:

Trozo	r. Q^2	2. r. Q
AB	+ 51,8	6,90
BC	+ 25,0	7,14
CD	— 1,1	0,72
DA	— 38,0	15,20
Sumas	+ 37,9	29,96

Aquí, evidentemente la primera suma indica el "error de cierre" que se ha obtenido, equivalente a 37,9 cms. Como es positivo nos indica que se ha elegido un gasto demasiado elevado para Q (AB) y que se le debe disminuír.

El término correctivo indica el valor de esta corrección, "q", pues, de acuerdo con nuestra fórmula (3), se tiene:

$$q = 37,7 \ : \ 29,96 = 1,3 \ 1/seg.$$

Este gasto suplementario , q = 1,3 1/seg. se ha supuesto que corre en la malla en sentido determinado, de modo que haga disminuír Q (AB). Luego se inscribe este gasto suplementario en el diagrama anterior, fig. 4, y se hace la composición de ambos gastos, para obtener el gasto corregido. Este gasto es el que está inscrito en ese diagrama subrayado dos veces.

Ahora, verificamos el valor de $\triangle$ h que se va a obtener con esta corrección.

Siempre a base del diagrama se llega a lo siguiente:

	r. Q^2
AB	+ 43,0
BC	+ 16,6
CD	— 2,2
DA	— 60,5
Suma . . .	— 3,1 cm.

Este error es menos del diez por ciento del error anterior, y dado su escaso valor, ya que solamente es un poco superior a tres centímetros podemos suspender aquí el tanteo. Si no se hubiere obtenido este resultado, se formaría la columna del término correctivo, y se determinaría un nuevo valor de q, procediéndose con el método en la misma forma como si se tratara de un primer tanteo, solamente que ahora se parte de la base de los gastos corregidos y no de los gastos supuestos en primer lugar.

En general, bastan de tres a cuatro tanteos para llegar a resultados suficientemente aproximados.

Como en nuestro problemas se propuso determinar las cotas de las presiones en los diversos nudos, tomemos como cota del nudo A el valor de 10 mts. En los demás nudos se tendrá, entonces, las siguientes cotas piezométricas:

B = A — 0,43 = 10 — 0,43 =9,57.
C = B — 0,166 = 9,57 — 0,166 = 9,404.
D = C + 0,22 = 9,404 + 0,022 = 9,426
Y para cerrar:
A = D + 0,605 = 9,426 + 0,605 = 10,031.

Nótese que, como h estaba en cms. lo hemos expresado en mts. para obtener las cotas piezométricas. También hemos debido cambiar los signos por cuanto h significa pérdida de carga, que debe restarse a la cota anterior para obtener la nueva cota. En cambio, entre C y D, hay pérdida de carga si se va en el sentido de D a C; pero como se va en el sentido de C a D, aquí se debe ganar carga, luego al valor negativo de la pérdida de carga en C D también hay que cambiarle signo para obtener la carga en el nudo D. El error de cierre fue como estaba previsto de 3,1 cms.

APLICACION DEL METODO A UNA RED SENCILLA.

En la aplicación del método a una red sencilla, se sigue un procedimiento muy semejante. Se forman circuitos lógicos según las mallas que se van a analizar. Desde luego, son datos del problema los consumos de agua que se deducen del estudio de las necesidades de la población. Algunos consumos grandes se podrán ubicar en el diagrama; los consumos de la vivienda (gastos en camino) conviene agruparlos en los diversos nudos según la técnica corriente. Se trata de estimar el consumo máximo en la red para su verificación, agregando el gasto de algunos grifos de incendio, en ubicación desfavorable en la red.

En general, puede decirse que una red debe verificarse para condiciones extremas tal como se hace para el cálculo de las vigas de un puente. Los consumos así determinados se inscriben en un diagrama de la red. Luégo, se computan los valores de "r" para cada trozo de tubería entre dos nudos y se inscriben también en el diagrama, rodeados de un círculo para evitar confusiones. (Recuérdese que $r = f(D, L, C)$, siendo C la rugosidad que se acepte). Estos valores de r se calculan una sola vez para la red.

Luégo, comenzando por los puntos más alejados de la red, se van asignando gastos individuales para cada trozo de tubería, siguiendo cierto criterio. (Esto no se puede definir ni explicar con exactitud; dejamos al lector que en esto use su sentido común). Por lo demás, el mayor o menor acierto en la determinación de estos gastos previos, sólo influye en el mayor o menor número de tanteos que se deban hacer. La única condición que debe cumplirse es la continuidad del escurrimiento en cada nudo.

Ahora estamos en condición de hacer el primer tanteo. En una red grande, no será posible hacer el tanteo para cada malla individual, pero siempre será posible elegir ciertos "cuarteles" definidos por estar circunscritos por algunas tuberías llamadas principales, en tal forma, que los ramales secundarios, tengan poca influencia en el resultado general. Es a estos "cuarteles" a los que se aplica el procedimiento. Se presenta ahora la particularidad de que dos cuarteles contiguos tendrán una tubería en común (como el lado AB de la malla indicada en la fig. 5). En estos casos, se procede a calcular el valor de q' y q" que corresponda a cada uno de los cuarteles, y el segundo tanteo se hará tomando como gasto en AB aquél que resulte de hacer las dos correcciones al gasto primitivo adoptado por Q (AB). Si bien es cierto que este procedimiento está sujeto a la crítica de que no es rigurosamente exacto por consideraciones matemáticas, en la práctica conduce a resultados muy satisfactorios.

Con algunos tanteos sucesivos, aplicando el método a cada circuito, extendiéndose a todos los circuitos contiguos a la vez, se llegará a obtener un resultado aceptable para la red, que se traduce en lo siguiente:

Partiendo de la cota piezométrica en A, origen de la red, se calculan sucesivamente las cotas piezométricas en el resto de los nudos, según los gastos determinados finalmente con los diversos tanteos. Luego, se conocen las cotas del terreno en los mismos puntos. Sus diferencias nos darán la presión del agua resultante en cada nudo. Si estas presiones son adecuadas para nuestros fines, el cálculo nos habrá conducido a la conclusión de que la red proyectada está conforme con las necesidades. Al contrario, si no se cumplen las condiciones impuestas, habrá llegado el momento de hacer cambios en la red, variando los diámetros de algunas tuberías; pero, con el cálculo ya hecho se tendrá una visión respecto a los posibles cambios que se deben introducir, siendo esta también una de las grandes ventajas del procedimiento.

Aunque parece engorroso el sistema, en realidad no lo es. Basta conseguir un cierto método en los cálculos, en el sentido en que se rodean las diversas mallas principales (cuarteles), y la excepción hecha para aquilatar los sentidos de escurrimiento, principales y correctivos, para que se pueda proceder con rapidez a los diversos tanteos.

EJEMPLOS DE REDES CALCULADAS.

Sea la red indicada en la fig. 6 que vamos a calcular de acuerdo con la fórmula de Darcy. Se han indicado los gastos en los diversos nudos más un gasto concentrado en A (se supone ahí una fábrica grande), expresados en litros por segundo. Además, las tuberías se indican por su largo y su diámetro en metros y en milímetros, respectivamente. Se supone que se trata de tuberías en uso.

El primer paso es el cálculo de los r. Para esto usaremos una tabla de la fórmula de Darcy que encontramos en un manual de

"Pont a Mousson". Esa tabla nos da los valores de J para el largo de las tuberías en metros, de diferentes diámetros; es decir, h queda expresado en metros. Como los queremos en centímetros y nos conviene expresar además h para cada 100 mts. de longitud de tubería de diversos diámetros, basta multiplicar por 10.000 los valores de las tablas que se encuentran. Además, usaremos la relación:

$$r = \frac{h}{Q^2}$$

ya que $n = 2$ para la fórmula de Darcy. Comenzamos por el diámetro menor que hay en nuestra red, o sea, 150 mm. La tabla nos da $J = 0{,}042572$ para una gasto de 30,042 l/seg., que se ha fijado arbitrariamente; es precisamente 30 l/seg. Luego el valor de r que da h en cm. para 100 de longitud de tubería de 150 mm. es:

$$r = \frac{10000 \times 0{,}04572}{30 \times 30} = 0{,}505$$

La tubería A B de este diámetro tiene 150 mts. de longitud; luego

$$r\,(A\,B) = 1{,}5 \times 0{,}505 = \underline{0{,}76}$$

Análogamente tendremos:

$$r\,(AE) = 2 \times 0{,}505 = \underline{1{,}03}$$

$$r\,(ED) = 1 \times 0{,}505 = \underline{0{,}51}$$

$$r\,(CD) = 3 \times 0{,}505 = \underline{1{,}52}$$

Luégo, pasamos al diámetro de 200 mm. La tabla nos da, para $Q = 10{,}996$ o sea 11 l/seg. $J = 0{,}00140$. Aplicando la relación anterior, el "r" para 100 mts. de esta tubería, con h en cms., resulta ser de 0,116.

Luego:

$$r\,(DF) = 2 \times 0{,}116 = \underline{0{,}23}$$

$$r\,(BC) = 2{,}5 \times 0{,}016 = \underline{0{,}29}$$

Finalmente pasamos en forma semejante al diámetro de 250 mm. La tabla nos da $J = 0{,}00181$ para $Q = 22{,}089$, o sea 22,1 l/seg.. Se obtiene entonces:

$$h = 18{,}1 : 489 = 0{,}037$$

Las resistencias de las tuberías restantes son así:

$$r\,(CG) = 1{,}5 \times 0{,}037 = \underline{0{,}06}$$

$$r\,(CD) = 2 \times 0{,}37 = \underline{0{,}07}$$

Estos valores se inscriben en el diagrama siguiente, figura 7, y nos damos una distribución provisoria de los gastos, basados groseramente sobre las resistencias así calculadas:

El cuadro I que sigue indica la marcha del cálculo y la distribución conveniente para efectuarlo. Se podrían agregar, en el comienzo, columnas que contengan los valores calculados de "r" para cada trozo y el valor inicial del gasto tomado para el primer tanteo.

Se forman después los productos $r\,Q^2$ y $2.r.Q$. Se suman estos valores para obtener $\Sigma\, r\,Q^2$ y $\Sigma\, 2.r.Q$. El término correctivo será, según hemos visto:

$$q = \frac{\Sigma\, r\,Q^2}{\Sigma\, 2\,.\,r.\,Q}$$

Estos valores correctivos se traspasan al diagrama de la red, y se hace la composición de gastos en cada trozo, para obtener los valores del gasto corregido para iniciar el segundo tanteo. Nótese que, en las tuberías que son comunes a dos mallas contiguas, el gasto corregido, es el que resulta de la aplicación simultánea de las dos correcciones obtenidas, una para cada una de dichas mallas contiguas.

Si bien el método está sujeto a la crítica de que el gasto correctivo en un trozo de tubería, común a dos mallas, es la resultante de dos correcciones, es decir, que no se introduce una corrección matemáticamente determinada; en la práctica resulta que estas correcciones sucesivas se van afinando de tal modo, que los resultados obtenidos, después de unos cuatro o cinco tanteos, conducen a resultados suficientemente buenos dentro de la aproximación general que producen las ecuaciones de la Hidráulica.

IMPORTANCIA DE UNA ESPECIALIZACION

La Facultad de Hidrocarburos

Conocedores de la importancia de este suceso, nos dirigimos al Dr. Alejandro Delgado T. para pedirle que destacara desde estas páginas el valor que, para estudiantes y profesionales, tiene la especialización aludida en lo que se refiere a Hidrocarburos.

El Dr. Delgado conoce ampliamente la situación de nuestra industria petrolera a través de sus varias excursiones de estudio en los campos de Barrancabermeja y el Catatumbo así como por los datos estadísticos esenciales para llegar a conclusiones económicas de importancia. Como profesor de la materia en la Facultad, se distingue por su preparación técnica, siempre al tanto de los nuevos adelantos, y por su ejemplar consagración al adelanto de la cátedra.

R. P.

Se inicia, en el presente año, como una especialidad el estudio de Geología y Petróleos.

Desde hace muchos años, se ha estudiado en la Escuela de Minas, hoy Facultad Nacional de Minas, la Geología y un curso que podía llamarse de información de Petróleos. En los últimos años se ha prestado mayor interés a estas materias, ampliando los programas o pénsumes e iniciando trabajos en el Laboratorio de Petróleos, recientemente adquirido, interés que hoy ha venido a dar nacimiento a la especialización.

Hace algunos años, el Gobierno Nacional envió a estudiar en los Estados Unidos estas materias a varios ingenieros, por la gran necesidad que tiene el país de personal preparado en ellas. Algunos ya han regresado y prestan sus servicios; otros más vendrán, pero su nú-