

Aditivos para la mejora de la fluidez del agua en la extinción de incendios

En la extinción de incendios se dispone normalmente de un equipo de bombeo determinado con conducciones de diámetro y longitud dadas. El objetivo es entonces hacer llegar la mayor cantidad posible de agente extintor a un punto dado.

El transporte de fluidos por conducciones tiene una aplicación con características peculiares en los sistemas móviles de extinción de incendios. En el diseño de una conducción convencional se conocen el caudal de circulación y el trazado aproximado de la tubería, debiéndose calcular el diámetro y los requerimientos de bombeo de tal forma que se consiga el óptimo económico de la operación. En cambio, en la extinción de incendios se dispone normalmente de un equipo de bombeo determinado con conducciones de diámetro y longitud dadas. El objetivo es entonces hacer llegar la mayor cantidad posible de

CLAUDI MANS TEIXIDO
CARLOS DOMINGUEZ CASCON
*Facultad de Química
Universidad de Barcelona*

agente extintor a un punto dado. Se comprende que en este segundo caso no sean críticos los costes de operación, atendiendo a los bienes que se pretenden salvar.

El alcance y caudal que puede suministrar una determinada manguera dependerán de un conjunto de variables: de la presión a la salida de la bomba; de las características de la bomba de circulación; de la presión a la salida de la manguera; de las características físicas de la manguera (especialmente diámetro, longitud y rugo-

idad interna) y de los accesorios (lanzas, codos, tes, reducciones, uniones, etc.) en el recorrido. Dependerá asimismo de las características físicas del fluido que se impulsa, especialmente de su densidad y viscosidad.

Es un objetivo deseable el aumentar la capacidad de circulación de fluido por un sistema dado, por lo dicho anteriormente. Examinando las variables del sistema descritas se observa que, prácticamente, no es posible modificar ninguna de las correspondientes al sistema físico de circulación.

En cambio, sí es posible modificar una de las características del agente extintor, en un sentido favorable a los intereses de la extinción. Concretamente, existen determinadas sustancias que, añadidas al agua en concentraciones muy pequeñas, reducen notablemente su viscosidad, favoreciendo la reducción del rozamiento y permitiendo así el aumento de caudal circulante por un sistema dado.

El hecho de que los fluidos sean viscosos determina el que la circulación por el interior de conducciones lleve inherente un rozamiento, con la subsiguiente degradación de parte de la energía a calor, y la pérdida de presión y/o velocidad, en su caso.

Experimentalmente, y también a partir de consideraciones teóricas sobre la mecánica de los medios continuos, puede determinarse una expresión que relacione las distintas formas de energía mecánica implicadas en un sistema de flujo. La ecuación recibe el nombre de Teorema de BERNOUILLI, generalizando y, en términos estrictos, es aplicable a sistemas en estado estacionario isotermos, si bien esta última consideración no es muy crítica.

Si circula un fluido de densidad constante, y las secciones de entrada y salida de la conducción son del mismo diámetro, la ecuación de Bernouilli se reduce a:

$$g \Delta z + \hat{v} P - \hat{W} + \hat{E}_v = 0 \quad (1)$$

donde

- g es la aceleración de la gravedad (m/s^2)
- z la altura de cada extremo de la conducción (m)
- \hat{v} el volumen específico del fluido (m^3/Kg)
- P la presión en cada extremo de la conducción (Pa.)
- \hat{W} el trabajo que recibe la unidad de masa (J/Kg)

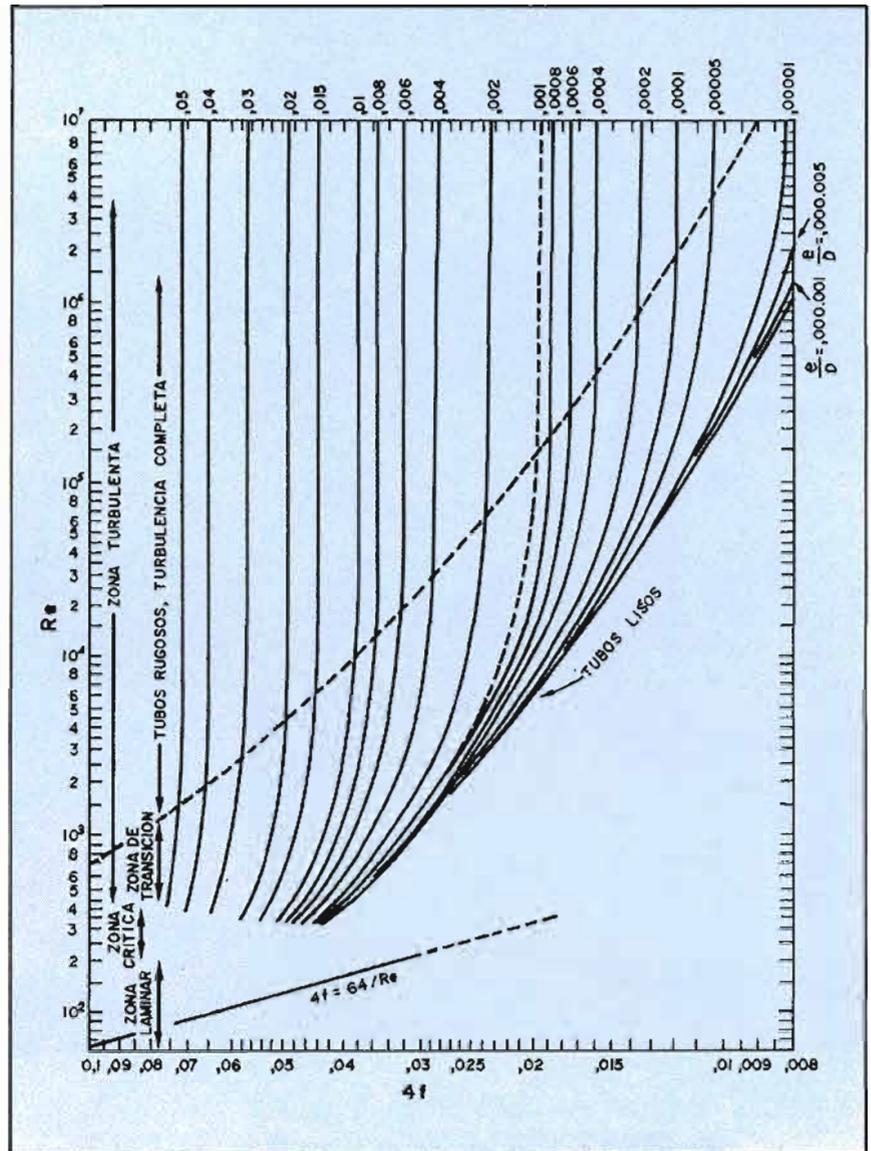


Fig. 1. — Gráfico de MOODY para el cálculo de factores de fricción (CRANE, 1965).

\hat{E}_v el trabajo perdido por rozamientos por la unidad de masa de fluido circulante (J/Kg)

El término \hat{E}_v es más conocido por la denominación de pérdida de carga del sistema. Viene a representar la pérdida de posibilidad de obtener trabajo del sistema debido a las irreversibilidades del proceso. Debe calcularse empíricamente. La ecuación más común que para ello se emplea es la ecuación de FANNING:

$$\hat{E}_v = 4f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{v^2}{2} \quad (2)$$

donde L y D son la longitud y diámetro de la conducción (m), y 4f un término empírico adimensional denominado

factor de fricción. 4f se calcula a partir de relaciones empíricas como el gráfico de MOODY (figura 1). En ella se aprecia cómo 4f es función de Re y de una característica de la conducción denominada rugosidad relativa, ϵ/D donde ϵ es la altura promedio de las rugosidades de la conducción (m).

Re es el denominado número de Reynolds, que es una magnitud adimensional que mide el grado de turbulencia de la circulación. Viene definido por

$$Re = \frac{D}{\mu} v \quad (3)$$

En el caso de que la conducción no sea totalmente recta y tenga estrechamientos, válvulas, y otros accesorios,

Es posible modificar una de las características del agente extintor, en un sentido favorable a los intereses de la extinción. Concretamente, existen determinadas sustancias que, añadidas al agua en concentraciones muy pequeñas, reducen notablemente su viscosidad, favoreciendo la reducción del rozamiento y permitiendo así el aumento del caudal circulante por un sistema dado.

difíciles de comprobar y de comparar entre sí. El trabajo con disoluciones extraordinariamente diluidas es delicado; la distribución de longitudes de cadenas de los propios polímeros hace difícil la comparación; la degradación del polímero a su paso por elementos mecánicos hace que muchos resultados varíen con el tiempo de experimentación en una misma instalación, sobre todo si se recircula el producto. A pesar de estas limitaciones, no cabe duda de que el efecto es indudablemente real y hay que realizar la experimentación adecuada a cada instalación, sin que sea posible casi nunca extrapolar resultados ajenos.

La explicación químico-física del efecto TOMS no está bien aclarada y debe buscarse en la estructura y gé-

mediante la técnica de anemometría láser. Determinó que en el centro de la conducción la turbulencia está prácticamente desarrollada por completo, mientras que en la región cercana a la pared se aprecia un ensanchamiento de la capa límite laminar, es decir, con un notable freno de la turbulencia de la pared. VIRK (1971) corrobora esta idea al observar que una mayor rugosidad de la conducción casi no aumenta la turbulencia, a diferencia del comportamiento del agua pura.

Todo ello sugiere que la forma de distribución del polímero a la conducción debería hacerse en puntos próximos a las paredes, para mejorar su eficacia.

OBJETIVOS DEL TRABAJO

El trabajo que se presenta se ha planteado con el objetivo principal de juzgar la viabilidad del uso de un aditivo reductor de la viscosidad para su empleo en los sistemas de extinción de incendios. Para ello se han planificado dos tipos de experimentos:

A escala de *laboratorio* se pretende estudiar detalladamente el fenómeno de reducción de la pérdida de carga, y determinar cuál es la viscosidad de la disolución y el efecto del cambio de concentración sobre la pérdida de carga.

Una vez realizada esta experimentación, a escala *industrial* se trata de determinar el grado de reducción de la pérdida de carga y el incremento de caudal que se consigue para distintos sistemas de manguera y lanzas de salida.

PRODUCTOS EMPLEADOS

Previamente a la experimentación definitiva se ha seleccionado el producto a emplear, entre un conjunto de aditivos comerciales, todos ellos polímeros lineales de cadena larga y de los tipos polióxido de etileno y poliácridamidas. Su empleo común es el de floculantes en el tratamiento de aguas potables y residuales. Se comprobó, en experimentos previos, que todos ellos disminuían apreciablemente las pérdidas de carga. Atendiendo a su precio y a su facilidad de solubilización se seleccionó para la experimentación el producto NALCOLYTE-8184, que viene presentado en forma de dispersión acuosa concentrada. Su densidad es aproximadamente la del agua. Es una poliácridamida de alto peso mole-



se emplea asimismo la ecuación de FANNING, pero al valor de L se añade la denominada longitud equivalente de los accesorios, L_{eq} .

En 1949, TOMS demostró experimentalmente que la disolución de pequeñísimas cantidades de un polímero (en su caso, poli-metacrilato de metilo) en un disolvente orgánico reducía de forma notable la pérdida de carga en flujo turbulento. Inmediatamente se buscaron procedimientos para la aplicación de esta idea y su extensión a soluciones acuosas. Se han empleado generalmente polímeros lineales tales como polióxidos de etileno, poliácridamidas y otros. Ver, por ejemplo, BOGUE (1963), MC. CONAGHY (1977), SMITH (1969), WHITE (1967) y otros autores.

Los resultados experimentales entre distintos experimentadores son

nesis de los remolinos turbulentos cercanos a la pared (DAVIES, 1972). Se supone que la turbulencia se genera por la interacción fluido-pared, creándose remolinos de distintos órdenes de magnitud, que se transmiten al seno de la fase fluida. Las cadenas lineales de polímero tienen una longitud del orden de una centésima de milímetro, equivalente a la de 300.000 moléculas de agua. Se extienden orientándose en el sentido del flujo, y se solvatan mediante atracciones coulombianas. Entonces los pequeños remolinos que se generan en las paredes ven obstaculizada su propagación debido a la presencia de estas grandes estructuras poliméricas paralelas a la pared. Actúan en cierto modo como "peinadores" del flujo, o como "alisadores" del flujo turbulento de la pared. Ello ha sido comprobado por RUDD (1969)

cular, de cadena lineal, fabricada por Nalco, S. A. en su fábrica de Celrà (Girona) y comercializado por la misma firma.

Se preparó, con el producto comercial, una disolución acuosa al 1%, que, a su vez, se diluía en el agua de los sistemas de experimentación. La concentración máxima a la que se ha trabajado ha sido de 0,044 ml de Nalcolyte comercial por litro de agua circulada.

A estas bajísimas concentraciones la viscosidad de la disolución, determinada con distintos viscosímetros comerciales (Brookfield, Rotovisco) es idéntica a la del agua. En su paso por tuberías, no obstante, se comportará como si redujera de forma muy importante la viscosidad.

EXPERIMENTOS DE LABORATORIO

La instalación empleada está ubicada en el Laboratorio de Fluidos del Departamento de Química Técnica de la Facultad de Química de la Universidad de Barcelona. En la figura 2 se da un esquema de la misma. Consiste simplemente en un tanque que contiene la disolución a emplear que descarga por gravedad a un tubo horizontal de vidrio de 6,3 cm de diámetro, en el que hay conectadas dos tomas de presión abiertas, espaciadas 1,30 m.

Se han llevado a cabo cinco series de experimentos a las siguientes concentraciones:

- Serie 1: agua de la red.
- Serie 2: disolución de 0,00185 ml de Nalcolyte por litro.
- Serie 3: disolución de 0,00369 ml/l.
- Serie 4: disolución de 0,00923 ml/l.
- Serie 5: disolución de 0,0406 ml/l.

Se han realizado en conjunto 135 experimentos distintos.

Modelo matemático

El hecho de que el valor de las pérdidas de carga dependan del número de Reynolds Re y del factor de fricción $4f$, y ambos a su vez de la viscosidad, μ , ha hecho necesario calcular el valor de la viscosidad de la disolución a partir de los datos experimentales. Deben ser compatibles los valores de las pér-

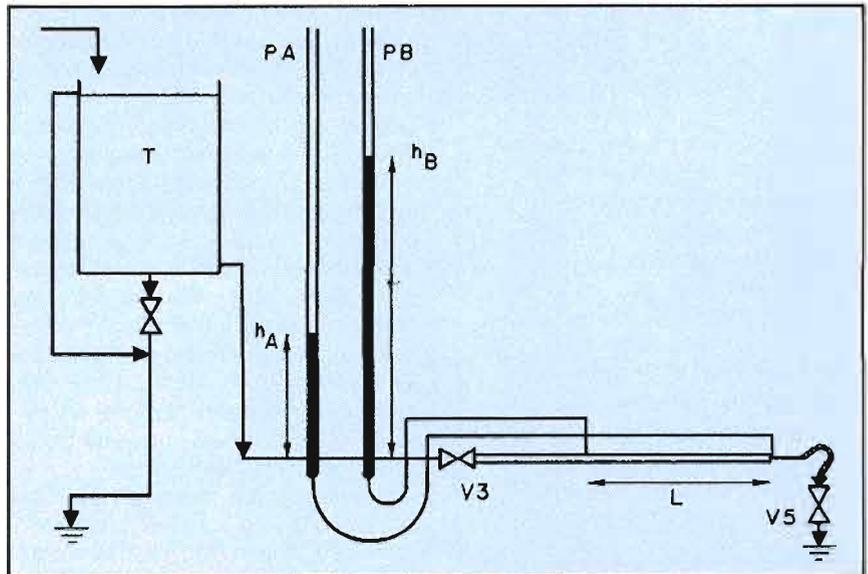


Fig. 2.—Instalación de laboratorio para la determinación de pérdidas de carga en tubo recto.

didas de carga determinadas —a partir de la disminución de presión en el tubo— con los valores de Re y $4f$ para el gráfico de Moody. La viscosidad calculada de este modo es válida sólo para unas condiciones hidrodinámicas dadas. Los viscosímetros comerciales

no permiten llegar a las drásticas condiciones de esfuerzo cortante necesarias para medir este valor.

Los resultados obtenidos del modelo matemático aplicado empleado pueden resumirse en forma gráfica en las figuras 3, 4 y 5.

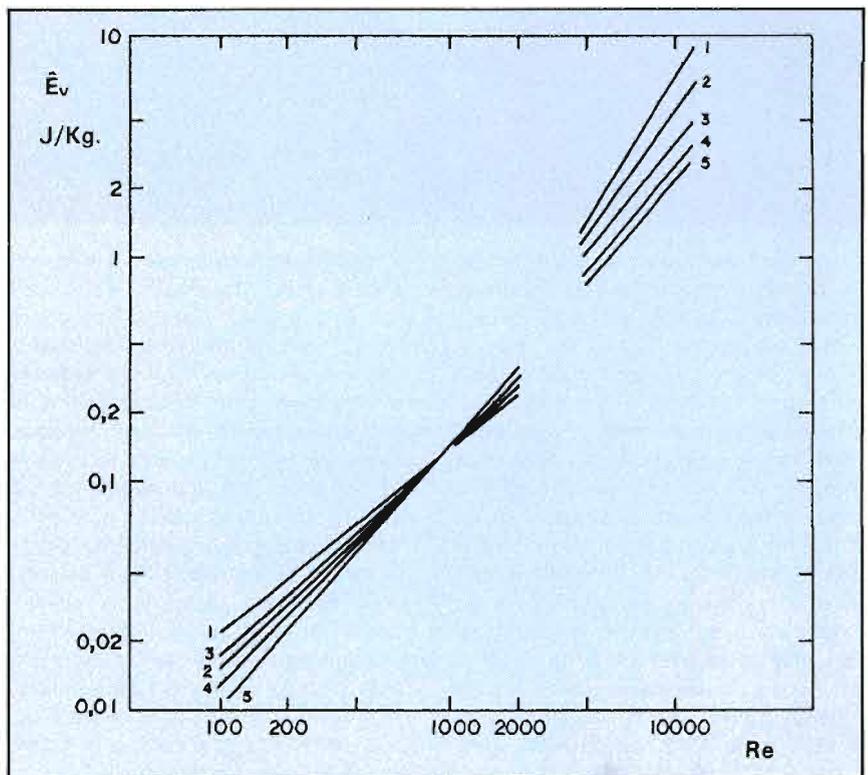


Fig. 3.—Variación de la pérdida de carga con el Número de REYNOLDS (calculado con la viscosidad de agua pura) en la instalación de laboratorio, para las distintas series de experimentos.

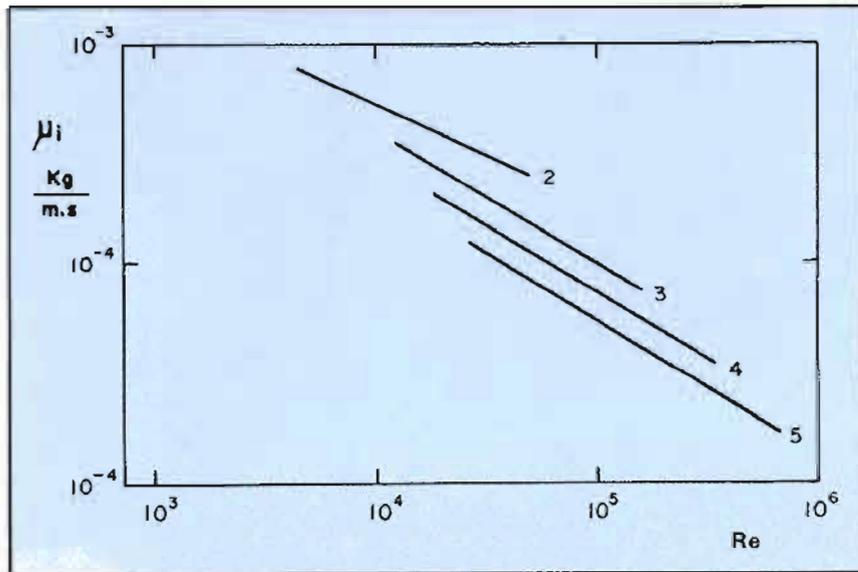


Fig. 4.—Viscosidad calculada de las disoluciones de NALCOLYTE frente al valor del Número de REYNOLDS calculado con esta misma viscosidad.

Resultados de los experimentos de laboratorio

El examen de los resultados representados en la figura 3 permite las siguientes constataciones:

a) En la instalación empleada, el paso del régimen laminar al turbulento no se ve afectado por la concentración de polímero en el agua.

b) Los resultados en régimen laminar muestran una ligera reducción de la pérdida de carga al aumentar la concentración de polímero. No obstante, los resultados experimentales en régimen laminar contienen mucho error

experimental debido a los bajos valores de pérdida de carga medidos, con la imprecisión inherente.

c) En régimen turbulento los resultados son mucho más precisos, y la reducción de la pérdida de carga con el aumento de caudal es más clara. Por ejemplo, a un número de Reynolds de 10.000 el agua pura presenta una pérdida de carga de 7 J/Kg, que baja a 2 J/Kg con la concentración de polímero más alta estudiada.

La figura 4 muestra las correlaciones obtenidas en el cálculo de los valores de la viscosidad de la disolución frente

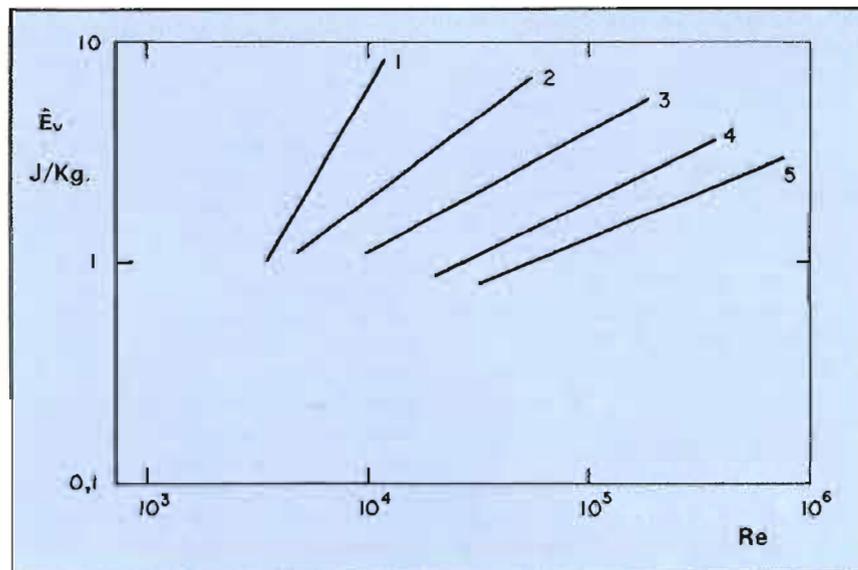


Fig. 5.—Variación de la pérdida de carga real con el Número de REYNOLDS en la instalación de laboratorio.

al número de Reynolds, a su vez calculado con esta misma viscosidad.

Se observa claramente que a medida que aumenta el valor de Re, la viscosidad de la disolución disminuye de forma notable. Una vez más debe repetirse que este valor de viscosidad no es el determinado con un viscosímetro convencional, sino el valor calculado.

La misma figura 4 muestra que esta viscosidad es tanto menor cuanto mayor la concentración de polímero. Evidentemente para agua pura el valor de la viscosidad es de 0,001 Kg/(m.s), constante con Re.

La figura 5 es similar a la figura 3 en el tramo turbulento, con la modificación de representar valores de pérdida de carga frente al valor de Re real, calculada con la viscosidad de la disolución y no con la viscosidad del agua. Cabe destacar que, al igual que ocurría en la figura 3, las pérdidas de carga disminuyen notablemente para un valor de abscisa constante, a medida que se concentra la disolución en polímero. Asimismo la pendiente de las rectas disminuye con la concentración de la disolución, lo cual es favorable a los efectos de ahorro energético.

Merece señalarse que el valor de viscosidad calculado permite obtener, por un lado, valores destacablemente bajos de viscosidad (hasta 10^{-5} Kg/(m.s), 100 veces menos a la del agua), lo que suministra entonces valores elevados del Número de Reynolds: hasta 600.000, muy superior al que se tendría con agua pura. Esto significa que un líquido que tuviera la misma densidad que el agua y presentara la misma pérdida de carga al circular con un caudal dado debería tener una viscosidad 100 veces menor que la del agua.

En resumen, de los experimentos de laboratorio pueden obtenerse las siguientes conclusiones principales:

1. El efecto del polímero es indudablemente real, pues reduce la pérdida de carga y aumenta el caudal notablemente.

2. El incremento de concentración del polímero, en el rango de concentraciones empleado, incrementa la reducción de la pérdida de carga.

3. La presencia de polímero no parece tener efecto en la transición de régimen laminar a turbulento.

4. Se dispone de un modelo matemático que permite el cálculo de la viscosidad y el Número de Reynolds que compatibiliza los resultados experimentales de valores de pérdida de

carga con los que se obtendrían para líquidos puros.

EXPERIMENTOS A ESCALA INDUSTRIAL

En esta parte del trabajo se ha empleado la instalación de bombeo para extinción de incendios que posee el Centro Tecnológico del Fuego, en el Instituto Tecnológico de Seguridad MAPFRE (ITSEMAP), en Avila.

La figura 6 es un esquema de la misma. Consiste en un depósito "D" de 90 m³ de capacidad, del cual toma agua una bomba centrífuga accionada por un motor Diesel, que puede trabajar entre 0 y 4.000 revoluciones por minuto.

El agua impelida por la bomba circula por un tramo del circuito denominado en el esquema "Sector A" por el cual no se ha inyectado todavía el polímero. En este sector se dispone de los siguientes accesorios:

- Una válvula VI, que permite regular el caudal total.
- Un banco de rotámetros R, compuesto por cuatro rotámetros. Puede medir caudales comprendidos entre 0,5 y 95,3 m³/h.

El segundo tramo del circuito, denominado en el esquema "Sector B" comprende aquella parte del mismo entre la inyección del polímero y su vertido exterior. La inyección se realiza de forma neumática a partir del depósito de polímero P. Tras la "t" de inyección se ha roscado un manómetro M1 y roscado un rácor que permite colocar fácilmente diversos accesorios independientemente. En la figura se observan esquematizados 12 distintos sectores B, constituidos respectivamente por:

1. 25 m de manguera de 45 mm de diámetro.
2. 45 m de manguera de 70 mm de diámetro.
3. Lanza americana de triple efecto de 25 mm de diámetro en posición de niebla.
4. Lanza americana de triple efecto de 25 mm en posición de chorro paralelo.
5. Lanza americana de doble efecto de 45 mm de diámetro en posición de niebla.
6. Lanza americana de doble efecto de 45 mm de diámetro en posición de chorro paralelo.
7. Lanza americana troncocónica de 45 mm de diámetro en posición de niebla.

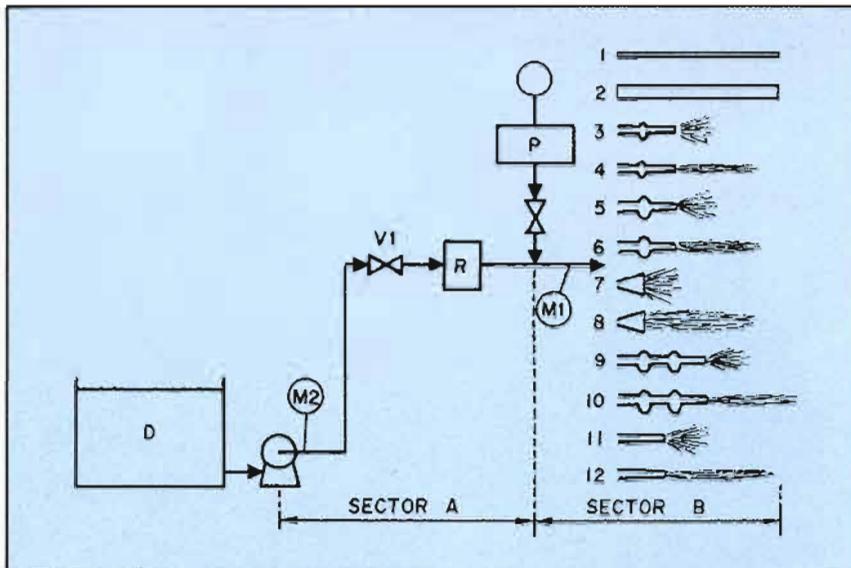


Fig. 6.—Instalación industrial.

8. Lanza americana troncocónica de 45 mm de diámetro en posición de chorro paralelo.

9. Lanza MECANINSA de triple efecto de 45 mm de diámetro en posición de niebla.

10. Lanza MECANINSA de triple efecto de 45 mm de diámetro en posición de chorro paralelo.

11. Lanza alemana de 45 mm de diámetro en posición de niebla.

12. Lanza alemana de 45 mm de diámetro en posición de chorro paralelo.

Se han llevado a cabo 12 series de experimentos correspondientes a cada uno de los sectores B indicados anteriormente. Se ha trabajado, para cada uno de los accesorios, con agua de red y con disolución de polímero, a distintos caudales, con un total de 170 mediciones distintas.

El caudal de polímero empleado en todos los experimentos se ha regulado de forma que la concentración del mismo en el agua se mantuviera aproximadamente constante, e igual a 0,044 ml de Nalcolyte concentrado por litro de agua circulada.

En cada experimentación se medían el caudal de circulación con o sin polímero (q o q' , en m³/h) y la caída de presión ($-\Delta P$, o $-\Delta P'$, en bar).

Los resultados experimentales se presentan en la figura 7. Se indican con (') las series de experimentos en los que se aprecia diferencia entre la circulación de agua y la circulación de agua y polímero.

Cabe señalar las siguientes constataciones:

- a) Para los casos de manguera de 45 y 70 mm de diámetro (sector 1 y sector 2) se aprecia un aumento del caudal y una reducción simultánea de la pérdida de carga en la circulación de disolución de polímero. El efecto es mayor en la manguera de 45 mm de diámetro, llegándose a reducciones de la pérdida de carga de hasta un 50%, frente a un 14% en la manguera de 70 mm de diámetro.

- b) En ninguna de las lanzas (sectores 3 a 12) y para ninguna posición (niebla o chorro paralelo) se aprecia el menor indicio de una reducción de la pérdida de carga ni aumento de caudal.

- c) Todos los datos de pérdida de carga para las distintas lanzas se ajustan bien a curvas en función del cuadrado del caudal. De acuerdo con la ecuación de FANNING ello indicará que para los caudales estudiados, el término $4f$ se mantiene constante. Ello significa que las distintas lanzas se comportan como si se tratase de tubos rugosos en régimen totalmente desarrollado. Como se muestra en el gráfico de MOODY (figura 1) en la zona de la derecha de las curvas de $4f$ frente a Re , para un valor dado de rugosidad relativa $4f$ se mantiene constante al sobrepasarse un Re mínimo, que para rugosidades altas es de baja magnitud.

El nulo efecto del polímero en la circulación de agua por las lanzas es coherente con la interpretación dada en la introducción. Los bruscos cambios de sección, velocidad y, en algu-



El alcance y caudal que puede suministrar una determinada manguera dependerá de un conjunto de variables; de la presión a la salida de la bomba; de las características de la bomba de circulación; de la presión a la salida de la manguera; de las características físicas de la manguera (especialmente diámetro, longitud y rugosidad interna) y de los accesorios (lanzas, codos, tes, reducciones, uniones, etc.) en el recorrido. Dependerá asimismo de las características físicas del fluido que se impulsa, especialmente de su densidad y velocidad.

nos casos, dirección, que tienen lugar en las lanzas impiden que se cree la subcapa límite laminar pegada a las paredes, que el polímero ensancharía, y que es la responsable de la reducción de la pérdida de carga. En el caso de

mangueras, la disminución de la pérdida de carga lleva asociada un aumento del caudal suministrado por la bomba. La magnitud de este aumento será dependiente de los siguientes factores:

1. Forma de las curvas de presión a la salida de la bomba frente al caudal. Evidentemente, cuanto más horizontal sean estas curvas, tanto mayor será el caudal conseguido.
2. Presión a la salida de la bomba. Cuanto mayor sea ésta mayor efecto tendrá el polímero.
3. Distancia entre la salida de bomba y el punto de inyección de polímero. Cuanto menor sea esta distancia tanto mayor será el incremento de caudal.
4. Proporción entre las pérdidas de carga debidas a tubo recto y pérdidas menores debidas a accesorios, menor efecto relativo tendrá la disolución de polímero.

En la tabla I para manguera de 45 mm puede apreciarse el ligero aumento de caudal conseguido en la circulación, a pesar de que la reducción de pérdidas de carga puede ser considerable. Por ejemplo, en la medida n.º 14, la reducción de pérdida de carga es de un 36% mientras que el aumento de caudal es sólo de un 11%. Tendencias similares con valores absolutos menores pueden apreciarse en la tabla II para manguera de 70 mm.

Nótese asimismo que un mismo caudal de líquido (por ejemplo, 350 l/min aprox.) puede llevarse a 25 m con manguera de 45 mm y se tendrá una pérdida de carga de 1,20 J/Kg. En cambio podrá llevarse a 45 m con manguera de 70 mm y una pérdida de carga menor, 0,62 J/Kg. La adición de polímero a ambos casos es más ventajoso para la manguera de menor diámetro.

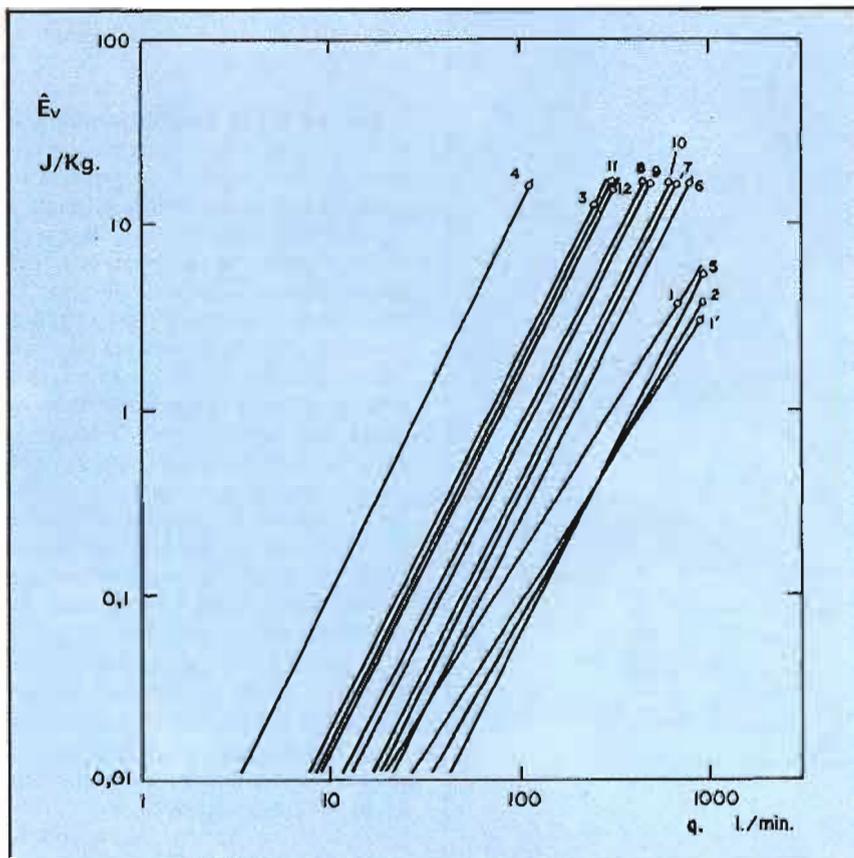


Fig. 7.—Pérdida de carga de cada uno de los circuitos de la instalación industrial, frente al caudal de circulación. La notación de cada circuito se da en el texto.

TABLA I

Pérdida de carga e incremento de caudal al adicionar disolución de polímero. Manguera de 45 mm de diámetro y 25 m de longitud.
(El valor de Re se ha calculado con la viscosidad del agua)

medida n.º	q l/min	- ΔP bar	q' l/min	- ΔP' bar	Re adim	Re' adim	Ê _v J/Kg	Ê' _v J/Kg
1	129,2	0,20	129,5	0,12	60.911	61.068	0,20	0,12
2	174,0	0,33	174,2	0,20	82.053	82.132	0,34	0,20
3	207,8	0,50	208,3	0,29	98.008	98.244	0,51	0,30
4	243,3	0,69	245,0	0,35	114.749	115.535	0,70	0,36
5	326,7	1,01	330,0	0,51	154.046	155.535	1,03	0,52
6	360,0	1,18	368,3	0,60	169.765	173.695	1,20	0,61
7	430,0	1,49	440,0	0,80	202.775	207.491	1,52	0,82
8	484,2	1,79	496,7	1,05	228.319	234.213	1,82	1,07
9	548,3	2,17	573,3	1,25	258.588	270.367	2,21	1,27
10	721,7	3,20	758,3	1,95	340.316	357.607	3,26	1,99
11	740,8	3,50	778,3	2,10	349.335	367.039	3,57	2,14
12	791,7	3,80	856,7	2,50	373.326	403.978	3,87	2,55
13	827,5	4,10	900,0	2,60	390.244	424.413	4,18	2,65
14	841,7	4,30	935,0	2,75	396.905	440.918	4,38	2,80

En efecto, se reduce entonces la pérdida de carga a 0,61 J/Kg y aumenta un 3% el caudal para 45 mm, mientras que para manguera de 70 mm el caudal aumenta sólo un 1% y la pérdida de carga se reduce a 0,53 J/Kg.

El hecho de que la instalación industrial empleada (figura 6) constara de un tramo o sector A por el que circulaba agua sin polímero y donde existe una importante pérdida de carga inamovible determina que la reducción de pér-

dida de carga conseguida con el polímero no se vea acompañada de un aumento proporcional del caudal. En este sentido, el sector A actúa como un parásito frente al aumento de caudal, inhibiéndolo.

APLICACION

Como aplicación de las ideas y resultados descritos anteriormente calcularán a continuación las reducciones de pérdida de carga y los aumentos de caudal que se conseguirán en un sistema de bombeo real, en el que la dosificación de polímero se efectúe justo a la salida de la bomba.

El sistema sería el mismo que en la figura 6 con el sector B compuesto por manguera y lanza simultáneamente. Se supone el empleo de la misma bomba Diesel, y manguera de 45 mm de diámetro y longitud L (variable entre 0 y 100 m). La manguera puede verter libremente al exterior o bien a través de alguna de las lanzas.

La aplicación del Teorema de Bernouilli a la conducción descrita, suponiendo tubería horizontal, es:

$$\Delta P \hat{v} + \hat{E}_v (\text{manguera}) + \hat{E}_v (\text{lanza}) = 0$$

La presión a la salida de la bomba se toma constante para un determinado valor de revoluciones. La pérdida de carga en la manguera es función de la presencia de polímero o no, del caudal de circulación y de la longitud de manguera tomada. La pérdida de carga en las lanzas se ha calculado según el caudal de circulación, como muestra la figura 7. Pueden escribirse ecuaciones empíricas para estas pérdidas de carga, que sustituidas en la ecuación anterior permitiría el cálculo de q, caudal de circulación de agua, y q', caudal de circulación de disolución de polímero. Asimismo puede calcularse el incremento relativo de caudal, en porcentaje. En la figura 8 se muestran los resultados de los cálculos.

El distinto comportamiento de las diversas lanzas es evidente de los resultados calculados. Cuanto menor es su pérdida de carga tanto mayor caudal suministrará. A su vez, el efecto de la longitud creciente de la manguera será más notable, reduciéndose el caudal que suministra de forma creciente, y el efecto del polímero sobre el aumento de caudal, más evidente. Ello

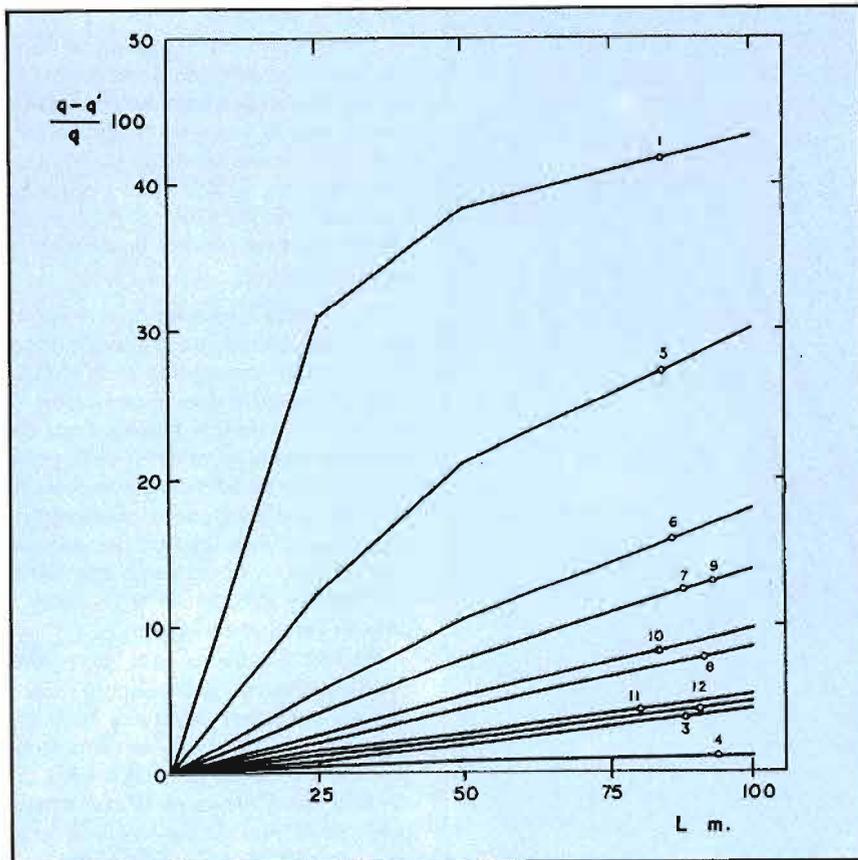


Fig. 8.—Aumento del caudal al hacer circular disolución de polímero, según el accesorio y la longitud de manguera de 45 mm instalada.



D	Diámetro de la conducción, m.
f	Factor de fricción (adim.).
g	Aceleración de la gravedad, m/s ² .
E _v	Pérdida de carga por unidad de masa de fluido, J/Kg.
L	Longitud de la tubería, m.
L _{eq}	Longitud equivalente de un accesorio, m.
P	Presión, Pa o bar.
q	Caudal de líquido, m ³ o l/min.
Re	Número de Reynolds, adim.
v	Velocidad, m/s.
ŷ	Volumen específico, m ³ /Kg.
W	Trabajo por unidad de masa, J/Kg.
z	Altura, m.
ρ	Densidad, Kg/m ³ .
μ	Viscosidad, Kg/(m.s) o daP.

ocurre, por ejemplo, en la lanza americana de doble efecto en ambas posiciones (5 y 6) en que se consiguen aumentos apreciables de caudal, hasta del 30% para longitudes de manguera de 100 m. En cambio la lanza americana de triple efecto de chorro paralelo (4) con su elevadísima pérdida de carga (cfr. figura 7) da el menor de los caudales calculados, y no viene influida ni por la longitud de la manguera anterior ni por la presencia de polímero en el agua.

El resto de lanzas tiene un comportamiento intermedio entre los dos citados. Obviamente, el caso más favorable de los calculados es el de ausencia de lanza en el extremo de la manguera, en cuyo caso se llega a incrementos de caudal del 45% para longitudes de 100 m de manguera.

El coste de la adición de polímero en el agua debe ponderarse con el aumento de los caudales que se pueden conseguir en cada caso. Las condiciones para las que se ha hecho el cálculo son las mismas que las de la experimentación a escala industrial: es decir, empleando 0,044 ml de Nalcolyte por cada l de agua circulada. El precio (1984, bidón de 60 Kg) de Nalcolyte es de 350 ptas./Kg, lo cual permite obtener el valor de 15,50 ptas. por cada metro cúbico de agua circulada tratada con Nalcolyte.

En cada caso deberá realizarse el estudio económico para dilucidar si los aumentos de caudal previsibles vienen justificados por el coste total del tratamiento. ■

TABLA II
*Pérdida de carga e incremento de caudal al adicionar disolución de polímero. Manguera de 70 mm de diámetro y 40 m de longitud.
(El valor de Re se ha calculado con la viscosidad del agua).*

medida n.º	q l/min	- ΔP bar	q' l/min	- ΔP' bar	Re adim	Re' adim	E _v J/Kg	E' _v J/Kg
1	280,0	0,41	280,0	0,38	84.883	84.883	0,42	0,39
2	350,0	0,61	353,3	0,52	106.103	105.114	0,62	0,53
3	458,3	1,01	460,0	0,90	138.945	139.450	1,03	0,92
4	573,3	1,42	573,3	1,22	173.807	173.807	1,45	1,34
5	668,3	1,90	685,0	1,70	202.607	207.659	1,94	1,73

BIBLIOGRAFIA

Se detallan a continuación diversas referencias bibliográficas usadas en la elaboración de este trabajo, explícitamente citadas en el texto o no.

- BARNES, H. A.; WALTERS, K. (1968); NATURE, 219, 57.
- BOGUE, D. C.; METZNER, A. B. (1963); Ind. Eng. Chem. Fundamentals, 2, 143.
- CRANE (1965); "Flow of Fluids through Valves, Fittings and Pipes".
- COSTA, J.; CUNILL, F.; CERVERA, S.; ESPLUGAS, S.; MANS, C.; MATA, J. (1984); "Curso de Química Técnica", Reverté. Barcelona.
- DAVIES, J. T. (1972); "Turbulence Phenomena". Academic Press.
- FULFORD, G. D.; ARUNACHLAM, V. (1969); Can. J. Chem. Eng. 47, 208.
- HAND, J. H.; WILLIAMS, M. C. (1973); Chem. Eng. Sci. 28, 63.
- HENDERSON, C. M. (1974); Lubr. Eng. 30, 458.
- LUMLEY, J. L. (1973); J. Polymer Sci.. Macromolecular Reviews, 7, 263.

- MAUS, J. R.; WILHEM, L. R. (1970); J. Hydraulics, 4, 35.
- McCONAGHY, G. A.; HANRATTY, T. J. (1977); A.I.Ch.E.J. 23, 493.
- POREH, M. (1972); J. Hydraulics, 6, 27.
- RUDD, M. J. (1969); Nature, 224, 587.
- SEYER, F. A.; METZNER, A. B. (1967); Can. J. Chem. Eng. 45, 121.
- SEYER, F. A. (1970); J. Fluid Mech. 40, 807.
- SMITH, K. A.; KEUROGHIAN, G. H.; VIRK, P. S.; MERRILL, E. W. (1969); A.I.Ch.E.J. 15, 294.
- TAYLOR, A. R. (1974); A.I.Ch.E.J. 20, 454.
- TIEDERMAN, W. G. (1976) J. Fluids Eng. Trans. A.S.M.E. 98 Ser. I, 563.
- TOMS, B. A. (1949) Proc. Int. Congr. Reol. Ist. 2, 135. North Holland Publ. Amsterdam.
- VIRK, P. S. (1971); J. Fluid Mech. 45, 225.
- WALTERS, R. R.; WELLS, C. S. (1971); J. Hydraulics, 5, 65.
- WHITE, A. (1967); Hendon (London) Coll. of Tech. Res. Bull. 4, 75.