

# Comportamiento de las tuberías en abastecimientos de agua ante la presencia de bolsas de aire<sup>(\*)</sup>

Por JOSE LUIS SANCHEZ LOPEZ

Doctor Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.

*Una de las causas más frecuentes de rotura de tuberías en abastecimientos de agua es la acumulación de bolsas de aire en las conducciones. En el artículo se estudian las condiciones en que puede presentarse la rotura, coeficientes de seguridad y factores que intervienen en el fenómeno*

## 1. INTRODUCCION

Un porcentaje elevado de roturas de tuberías en los abastecimientos de agua potable tiene lugar durante el proceso de llenado, después de una operación de reparación o conservación que haya exigido el desagüe previo. Con el período de sequía que ha afectado a numerosas localidades de nuestro país en los últimos tiempos y las consiguientes restricciones durante varias horas diarias, las operaciones de llenado y vaciado de conducciones y redes de distribución se han visto multiplicadas, y con ellas el riesgo de apresar en su interior bolsas de aire, causa la más frecuente de las roturas a que nos estamos refiriendo. Afortunadamente los servicios de aguas son conscientes del grave riesgo que entraña el aire en las tuberías a presión y ello suele significar un máximo de prudencia en todas las actuaciones.

A pesar de lo indicado anteriormente suelen desconocerse, al menos en el aspecto cuantitativo, los efectos del aire apresado en las conducciones. En las líneas que siguen se trata de realizar esta valoración, analizando las condiciones en que teóricamente se presentará una rotura, así como el significado de cada uno de los factores causantes del fenómeno. Dado que las tuberías de amianto-cemento han alcanzado una gran profusión de empleo en este tipo de obras, se les presta una mayor atención en el momento de fijar cifras límites de peligrosidad. Para estas estimaciones se ha supuesto de total aplicación los resultados de la fórmula de los tubos,

o lo que es igual no se ha considerado para nada que el tramo de tubo sometido a la presión del aire es una estructura diferente al tubo con bordes libres.

Formando la última parte de este trabajo se estudia teóricamente el comportamiento del coeficiente de seguridad real a presión interior en las tuberías, cuando se presenta el estado de sollicitaciones que representa la aparición de bolsas de aire en determinadas longitudes del tubo, con unas condiciones de borde que se estiman aproximadas a la realidad.

## 2. SUPUESTO TEORICO

De las diferentes formas en que el aire puede presentarse en una conducción, solo nos ocuparemos del caso en que acabe originando un auténtico tapón, con interrupción brusca del caudal circulante. Como se comprenderá es indiferente la forma en que el aire haya aparecido, siendo solo condición previa que se produzca el fenómeno.

La brusca interrupción de la columna de agua significará que la energía cinética de la misma se transformará en energía de compresión sobre el obstáculo aparecido. La rápida y consiguiente compresión del aire origina que la presión inicial  $P_0$  puede verse multiplicada varias veces, llegando a un nuevo valor  $P_1$  que, en algunos casos, supera el máximo resistido por el tubo y acaba, por tanto, en la rotura.

La energía cinética de la columna de agua es:

$$E_c = \frac{1}{2} m v^2$$

(\*) Se admiten comentarios sobre el presente artículo, que podrán remitirse a la Redacción de esta Revista hasta el 31 de diciembre de 1986.

siendo

$m$  = masa de la columna (kg).

$v$  = velocidad del agua (m/s).

y si ahora llamamos:

$L_g$  = longitud de la columna de agua detenida por la bolsa de aire (m).

$S$  = sección de tubería (m<sup>2</sup>).

$g$  = gravedad (m/s<sup>2</sup>)  $\approx 10$ .

$\gamma$  = peso específico del agua (kg/m<sup>3</sup>).

la expresión de la energía cinética quedará:

$$E_c = \frac{1}{2} m v^2 = \frac{1}{2} \frac{L_g \cdot S}{g} \cdot \gamma \cdot v^2$$

$$\gamma \cdot v^2 = 50 \cdot L_g \cdot S \cdot v^2 \quad [1]$$

Admitimos que la compresión a que se va a ver sometido el aire es isotérmica y por tanto la energía necesaria para producirla será:

$$E_a = 2,3 \cdot P_o \cdot V_o \cdot \log \frac{P_1}{P_o}$$

siendo:

$P_o$  = presión inicial (kg/m<sup>2</sup>).

$P_1$  = presión final (kg/m<sup>2</sup>).

$V_o$  = volumen inicial.

y si llamamos  $L_a$  a la longitud de la bolsa de aire que obstruirá el tubo, y expresamos la presión en metros de columna de agua:

$$E_a = 2300 \cdot P_o \cdot L_a \cdot S \cdot \log \frac{P_1}{P_o} \quad [2]$$

Igualando ahora ambas energías, es decir las ecuaciones (1) y (2) obtenemos:

$$\log \frac{P_1}{P_o} = \frac{L_g \cdot v^2}{46 \cdot P_o \cdot L_a}$$

y llamando  $R = L_g/L_a$ , a la relación entre las longitudes de columna de agua y de bolsa de aire:

$$\log \frac{P_1}{P_o} = \frac{R \cdot v^2}{46 \cdot P_o}$$

o bien

$$\log \frac{P_o}{P_1} = - \frac{R \cdot v^2}{46 \cdot P_o} \quad [3]$$

Esta última es la ecuación que vamos a analizar. En ella intervienen tres variables de diferente significado y cuyo análisis y discusión se realizan en las líneas que siguen.

### 3. INFLUENCIA DE LA VELOCIDAD

En las conducciones para transporte de agua el campo de variabilidad de las velocidades admisibles suele limitarse superiormente por valores de 3 a 3,5 m/s. Tratando de ampliar al máximo las posibilidades se consideran velocidades hasta de 5 m/s., es decir se estudian velocidades de:

$$0 < v_i \leq 5 \text{ m/s}$$

Así pues, para cada velocidad considerada la ecuación (3) puede escribirse de la siguiente forma:

$$\log \frac{P_o}{P_1} = - \left( \frac{V_i^2}{46} \right) \cdot \frac{R}{P_o} \quad [4]$$

Las variables que aparecen son  $P_o/P_1$  y  $R/P_o$ . Si se considera que  $P_1$  es la presión final y nos trasladamos al estado último de rotura de la tubería, siendo  $P_o$  la presión de servicio, el cociente  $P_1/P_o$  es el coeficiente de seguridad del tubo. Por tanto  $P_o/P_1$  deberá oscilar entre 0 y 1, este último caso correspondiente a un máximo no superable. Tanto la presión de servicio del tubo como la de rotura serán conocidas y por tanto también su relación.

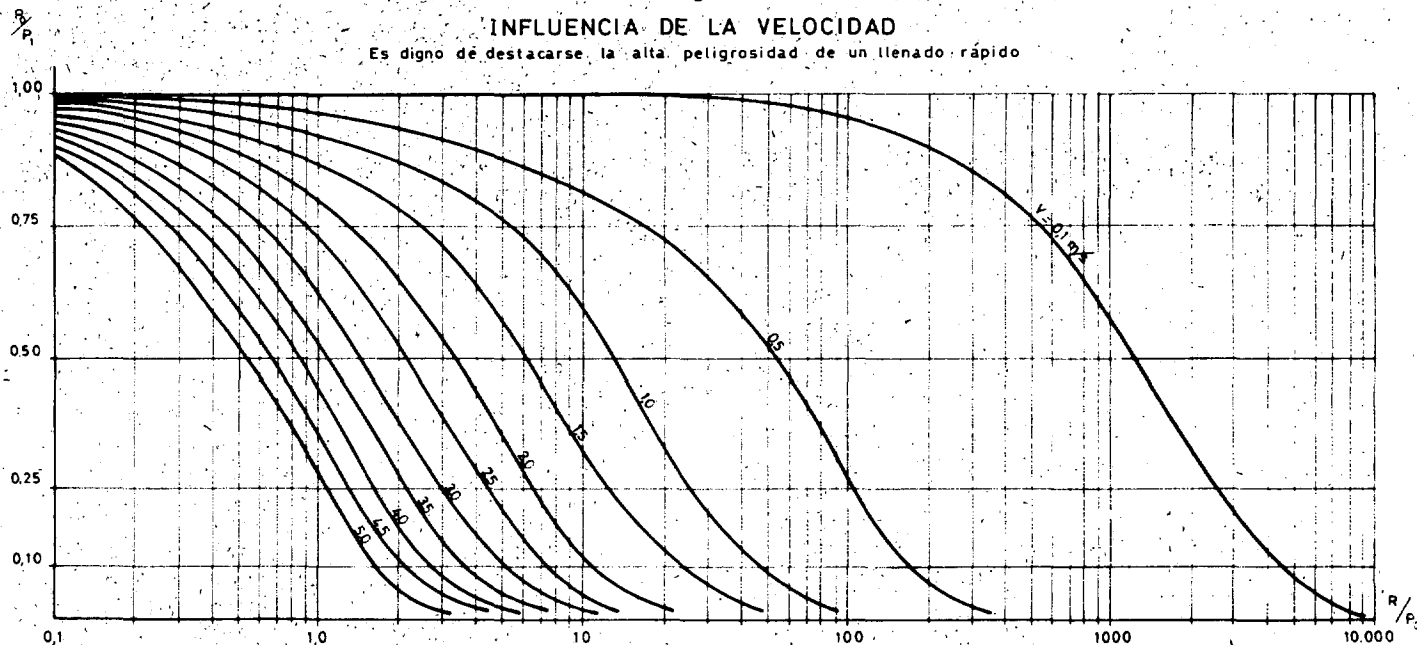
En el cuadro 1 se recogen los valores de  $R/P_o$  para diferentes  $P_o/P_1$  inversa de los coeficientes de seguridad, y para el campo de variabilidad de velocidades ya señalado.

Al ser más ilustrativa una figura que un cuadro se ha representado gráficamente la ecuación (4) en la figura 1. El eje de abscisas, en que se recoge  $R/P_o$ , está con escala logarítmica dado el amplio margen en que se mueven los valores posibles de la variable  $R/P_o$ . Por el contrario el eje de ordenadas alcanza el valor máximo de 1. La primera ojeada de la figura muestra claramente el alto grado de peligrosidad de velocidades altas, o lo que es lo mismo de un llenado rápido de la conducción. Basta comparar una velocidad de llenado de 0,5 m/s.

CUADRO 1

| $P_0/P_1$ | Valores de $R/P_0$ para velocidad de |       |       |       |        |        |        |        |        |         |          |
|-----------|--------------------------------------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|----------|
|           | 5                                    | 4,5   | 4     | 3,5   | 3      | 2,5    | 2      | 1,5    | 1      | 0,5     | 0,1      |
| 0,75      | 0,229                                | 0,283 | 0,359 | 0,469 | 0,639  | 0,920  | 1,438  | 2,555  | 5,748  | 22,989  | 574,717  |
| 0,50      | 0,554                                | 0,684 | 0,865 | 1,129 | 1,539  | 2,215  | 3,462  | 6,155  | 13,848 | 55,389  | 1384,738 |
| 0,25      | 1,108                                | 1,109 | 1,369 | 2,261 | 3,077  | 4,432  | 6,923  | 12,310 | 27,694 | 110,780 | 2769,476 |
| 0,10      | 1,840                                | 2,272 | 2,875 | 3,756 | 2,811  | 7,360  | 11,500 | 20,445 | 46,000 | 184,000 | 4600,000 |
| 0,01      | 3,680                                | 4,543 | 5,750 | 7,510 | 10,221 | 14,720 | 23,000 | 40,889 | 92,000 | 368,000 | 9200,000 |

Fig.1



con otra de 3 m/s., con coeficiente de seguridad de 2 en servicio para ambos casos, para comprobar que la relación existente, entre las R es de 41, y por tanto la rotura se producirá para una longitud 41 veces. más pequeña de columna de agua cuando la velocidad sea de 3 m/s., si permanecen las restantes variables en iguales condiciones.

El empleo del gráfico es muy simple. Conociendo el coeficiente de seguridad, de la conducción en servicio y la velocidad del agua en la misma, se deduce el valor de  $R/P_0$ , y de aquí:

$$L_g = \left( \frac{R}{P_0} \right)_{v=v_i} \times P_0 \times L_a$$

Queda como única variable a fijar la longitud de la bolsa de aire. Para longitudes de conducción aguas arriba de la bolsa de aire menores

a  $L_g$  no existirá riesgo teórico de rotura, para longitudes mayores debería producirse.

## 4. INFLUENCIA DE LA PRESION DE SERVICIO

En un intento de aproximarnos a la realidad de la práctica cotidiana, aunque para ello hayamos de perder generalidad en los resultados obtenidos, vamos a referirnos al caso en que la velocidad está definida. Efectivamente las velocidades usuales suelen moverse entre límites bastante estrechos, por ello realizaremos dos supuestos según el tipo de obra en que se sitúa la conducción.

### a) Sifones

Normalmente las velocidades oscilan alrede-

dor de 1 m/s. La expresión general (3), en este supuesto, quedaría reducida a:

$$\log \frac{P_0}{P_1} = - \frac{R}{46 P_0} \quad [5]$$

### b) Impulsiones

Las velocidades normales de circulación del agua en estos casos suelen ser más elevadas, de 2 a 3 m/s. Admitimos como velocidad la de 2,5 m/s. La ecuación (3) será para la impulsión:

$$\log \frac{P_0}{P_1} = - \frac{R}{7,36 P_0} \quad [6]$$

Por la frecuencia de empleo de las tuberías de amianto-cemento y al estar tipificadas por las presiones de servicio, vamos a valorar (5) y (6) para cada una de dichas presiones. Las expresiones que toman (5) y (6) para cada caso quedan recogidas en el cuadro 2.

CUADRO 2

$$R = - K \log \frac{P_0}{P_1}$$

| Tipo de Tubería | Presión de Servicio (mca) | Valores de K           |                              |
|-----------------|---------------------------|------------------------|------------------------------|
|                 |                           | Sifones<br>(v = 1 m/s) | Impulsiones<br>(v = 2,5 m/s) |
| A               | 25                        | 1150                   | 184                          |
| B               | 50                        | 2300                   | 368                          |
| C               | 75                        | 3450                   | 552                          |
| D               | 100                       | 4600                   | 736                          |
| E               | 125                       | 5750                   | 920                          |
| F               | 150                       | 6900                   | 1104                         |

De acuerdo con el coeficiente de seguridad real ( $P_1/P_0$ ) conoceremos R y fijada la longitud de la bolsa de aire, sobre la que después nos extenderemos más detalladamente, obtendremos la longitud de la columna que producirá la rotura.

## 6. ANALISIS DE LAS LONGITUDES DE LA COLUMNA DE AGUA Y DE LA BOLSA DE AIRE

Hemos definido antes R como la relación existente entre las longitudes de agua y de aire.

El valor de  $L_a$ , longitud de la masa de aire que obstruye bruscamente la libre circulación del agua, puede variar enormemente, desde algunos centímetros hasta algunos metros. El comportamiento de la tubería va a variar sustancialmente de un caso a otro.

Los cálculos de las tuberías a presión interior se realizan con la fórmula de los tubos. Por lo tanto las presiones de servicio vienen fijadas por los resultados de dicha fórmula. Conociendo la tensión de rotura del material empleado se obtiene el coeficiente de seguridad. La tensión de rotura se determina con los ensayos normalizados a presión interior, que quedan definidos en el «Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para tuberías de Abastecimiento de Agua». En efecto, en el apartado «3.5. Prueba a presión hidráulica interior», fija como longitud mínima para la realización de esta prueba la de 0,5 m. Este hecho nos lleva a considerar el valor de 0,5 m como la longitud mínima de la burbuja de aire. Las longitudes teóricas que originan la ruina de la conducción se obtendrán en el apartado siguiente, de acuerdo con los coeficientes de seguridad fijados por la norma UNE 88-211. Tuberías de amianto-cemento.

Sin embargo el comportamiento del tubo, desde el punto de vista estructural, se aleja bastante teóricamente del que se contempla en la fórmula de los tubos, en el caso de una bolsa de aire a presión  $P_1$ , apresada por el agua a presión  $P_0$ . En efecto, la condición previa para la aplicación de la citada fórmula es que los bordes estén libres, es decir no exista ninguna coacción en las extremidades del tramo de tubería considerado. Y así se realiza en las pruebas a presión interior. Pero si se considera la longitud de tubo  $L_a$  sometida a  $P_1$  por la acción del aire, sus bordes están completamente coaccionados por el resto de la conducción y, por tanto, no es válido, en principio, cuanto pueda deducirse de la fórmula de los tubos y de los ensayos a presión interior con la actual normativa. Ciertamente que la situación de sollicitaciones a que nos estamos refiriendo es un tanto anormal, y ello puede justificar su no consideración, pero no menos cierto es que surge como causa de frecuentes roturas y por tanto debe prestársele, al menos, la atención necesaria para que dichas roturas no sucedan. Es-

tas consideraciones son las que nos llevan a estudiar el tubo teóricamente con una mayor aproximación a su situación real.

### 7. LONGITUDES DE ROTURA EN TUBOS DE AMIANTO-CEMENTO

Según se acaba de indicar vamos a considerar como  $L_g$  mínimo la de 0,5 m. Con esta condición la ecuación (3) se transforma en:

$$\log \frac{P_o}{P_1} = - \frac{v^2}{23} \frac{L_g}{P_o} \quad [7]$$

y si en (7) damos a  $v$  los valores ya señalados anteriormente para sifones e impulsiones obtendremos:

Sifones 
$$L_g = - 23 \cdot P_o \cdot \log \frac{P_o}{P_1} \quad [8]$$

Impulsiones 
$$L_g = - 3,68 P_o \cdot \log \frac{P_o}{P_1} \quad [9]$$

Ciñéndonos a las tuberías de amianto cemento, los coeficientes de seguridad fijados en la UNE 88-211 en función del diámetro de la conducción son:

| Diámetro (mm) | Coefficiente |
|---------------|--------------|
| 125 - 200     | 3,5          |
| 250 - 500     | 3            |
| 600 - 1200    | 2,5          |

Para estos coeficientes de seguridad se ha operado en (8) y (9) obteniéndose las longitudes de columna de agua que originarán la rotura del tubo. Dichos valores se recogen en el cuadro 3. Lo reducido de los valores obtenidos, principalmente en impulsiones, puede explicar

perfectamente numerosas roturas que acaecen en el período de llenado.

### 8. APROXIMACION TEORICA AL COMPORTAMIENTO REAL DEL TUBO

Como se acaba de señalar los resultados anteriores responden a la aceptación de la fórmula de los tubos y luego de una burbuja de aire de 50 cm de longitud. La única razón expuesta para este valor de  $L_g$  ha sido su inclusión, en el Pliego ya citado, como dimensión mínima del tubo en las pruebas a presión interior. Vamos a tratar de obtener ahora un comportamiento teórico del tubo más aproximado a la situación real de sollicitaciones.

El tubo sometido a presión interior es un ejemplo perfecto de cilindro de directriz circular, generatrices normales a la misma y cargas exteriores con simetría de revolución. Por lo tanto planteamientos teóricos para tales tipos de estructuras les son de aplicación.

Al ser el tubo de espesor constante la ecuación diferencial que define los corrimientos radiales es:

$$\frac{d^4 w}{dx^4} + \frac{12(1-\nu^2)}{a^2 \delta^2} W = \frac{12(1-\nu^2)}{E \delta^3} P \quad [10]$$

cuya solución general adopta la forma:

$$w = w_p + e^{\alpha x} (K_1 \cos \alpha x + K_2 \sen \alpha x) + e^{-\alpha x} (K_3 \cos \alpha x + K_4 \sen \alpha x)$$

siendo, en las expresiones anteriores:

$w$  : corrimiento radial.

$\delta$  : espesor del tubo.

$a$  : radio del tubo.

**CUADRO 3**

| Diámetro<br>$\emptyset$        | Longitud mínima de rotura (m), según tipo y diámetro de tubería |     |     |      |      |      |                              |     |     |     |     |     |
|--------------------------------|-----------------------------------------------------------------|-----|-----|------|------|------|------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|
|                                | Sifones ( $v = 1$ m/s)                                          |     |     |      |      |      | Impulsiones ( $v = 2,5$ m/s) |     |     |     |     |     |
|                                | A                                                               | B   | C   | D    | E    | F    | A                            | B   | C   | D   | E   | F   |
| $125 \leq \emptyset \leq 200$  | 313                                                             | 626 | 939 | 1252 | 1565 | 1878 | 50                           | 100 | 150 | 200 | 250 | 300 |
| $250 \leq \emptyset \leq 500$  | 274                                                             | 548 | 822 | 1096 | 1370 | 1644 | 44                           | 88  | 132 | 176 | 220 | 264 |
| $600 \leq \emptyset \leq 1200$ | 229                                                             | 458 | 687 | 916  | 1145 | 1374 | 37                           | 74  | 111 | 148 | 185 | 222 |

- $\alpha$  : constante del tubo.  
 $x$  : coordenada lineal con origen en un borde.  
 $P$  : fuerza exterior sobre el tubo por unidad de superficie.  
 $E$  : módulo de elasticidad.  
 $\nu$  : coeficiente de Poisson.  
 $w_p$  : solución particular de [10].  
 $K_1, K_2, K_3, K_4$  : constantes a determinar.

$$\alpha = \frac{\sqrt[4]{3(1-\nu^2)}}{\sqrt{a\delta}}$$

El esfuerzo axil circunferencial por unidad de longitud de tubo viene entonces definido por:

$$N_\varphi = \frac{E\delta}{\alpha} [w_p + e^{\alpha x} (K_1 \cos \alpha x + K_2 \sin \alpha x) + e^{-\alpha x} (K_3 \cos \alpha x + K_4 \sin \alpha x)] \quad [11]$$

Por tanto la cuestión queda ahora reducida a fijar las condiciones en que se encuentran los

bordes del tramo de tubo en estudio. Estas condiciones nos permitirán obtener el valor de las cuatro constantes más arriba mencionadas  $K_1, K_2, K_3$  y  $K_4$ . Al ser  $P$  la presión interior la conocemos y  $w_p$  es una solución particular de (10) de inmediata determinación en nuestro caso. La única variable, pues, que hemos de fijar y que va a condicionar los resultados es el estado de los bordes del tubo en el tramo considerado.

El supuesto de bordes libres nos conduce a la fórmula de los tubos, como debía de ser, es decir:

$$W = \frac{a^2}{E\delta} P \quad N_\varphi = P \cdot a$$

Por el contrario la hipótesis de bordes empotrados nos parece demasiado alejada de la realidad, ya que además de coaccionar totalmente los desplazamientos radiales, coacciona con igual grado los giros de los bordes. Cierto que habrá una coacción al giro y por tanto un determinado momento, pero no es menos cierto

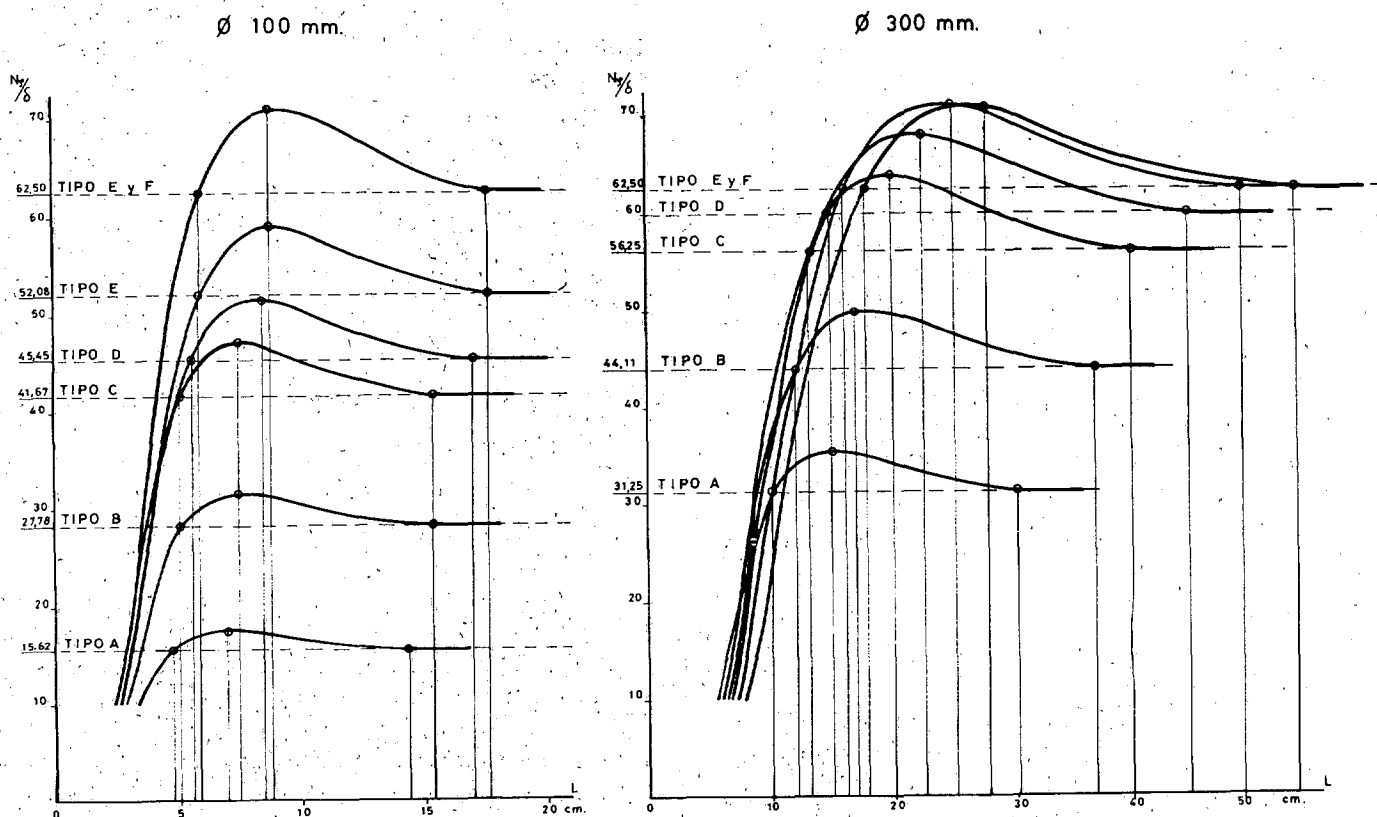


Fig. 2

COMPORTAMIENTO DE LA CONDUCCION PARA LONGITUDES INFERIORES A LA DE APLICACION DE LA FORMULA DE LOS TUBOS.  
TUBOS DE AMIANTO-CEMENTO

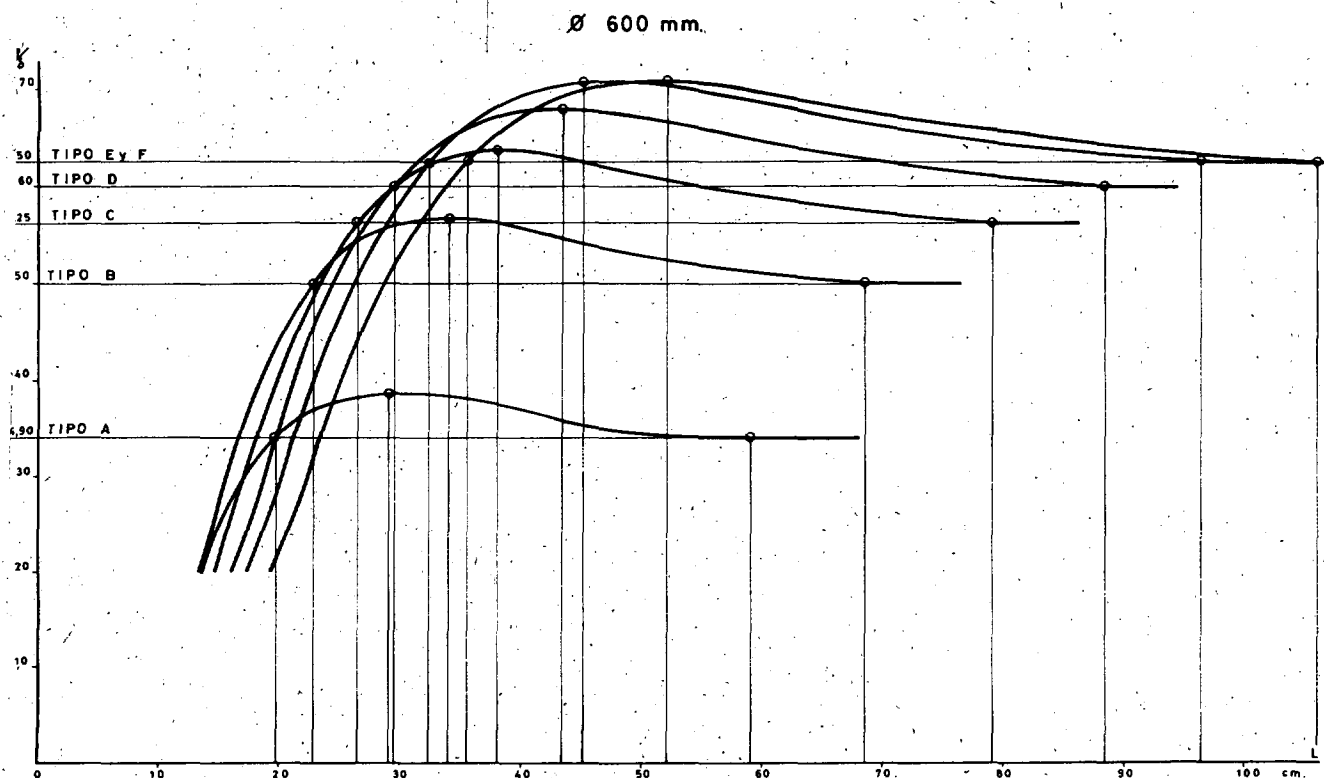


Fig. 3

COMPORTAMIENTO DE LA CONDUCCION PARA LONGITUDES INFERIORES A LA DE APLICACION DE LA FORMULA DE LOS TUBOS  
TUBOS DE AMIANTO-CEMENTO

que el giro del borde puede producirse, y se producirá. Nos queda como última posibilidad articular los bordes. El corrimiento radial queda totalmente impedido (como en el caso anterior de empotramiento, que no coincide exactamente con la realidad), pero el giro queda libre. Aunque tampoco responde con exactitud al caso real estimamos que puede aceptarse como una buena primera aproximación.

El planteamiento teórico correcto es sencillo, pero la gran laboriosidad que implica el obtener las acciones entre ambos tramos de tubo (con agua y con aire) para igualdad de deformaciones, y el posterior estudio del tramo con aire sometido a la presión interior y las acciones calculadas, es razón para contentarse con esta primera aproximación que, como luego se verá, es ya suficientemente laboriosa.

Con objeto de no alargar inútilmente este escrito se recogerán de forma exclusiva los fines propuestos y los resultados obtenidos, eliminando todos los procesos intermedios de cálculo. Se ha preparado un pequeño programa para la obtención de las  $K_1$  que nos ha permitido ana-

lizar una gran variedad de casos y dibujar los gráficos correspondientes. Los puntos analizados han sido:

- 8.1 Variación del axil circunferencial con  $L_a$ .
- 8.2 Influencia de los flectores y cortantes.
- 8.3 Coeficientes de seguridad definitivos.

A continuación se exponen los puntos señalados con indicación expresa de los resultados.

### 8.1 Variación del axil circunferencial con $L_a$

Considerado el tramo de tubo de longitud  $L_a$  con las condiciones de borde ya expuestas se ha analizado la variación del  $N_{\varphi}$  máximo en función de  $L_a$ . Debía haber una longitud a partir de la cual la articulación supuesta en los bordes no influyera en el  $N_{\varphi, \text{máx.}}$ , y por tanto este esfuerzo fuera el mismo que en la situación de bordes libres, o lo que es igual que el obtenido con la fórmula de los tubos. Para longitudes  $L_a$  iguales o mayores a ese valor será válido cuanto se ha obtenido en los apartados anteriores.

$\varnothing$  1200 mm.

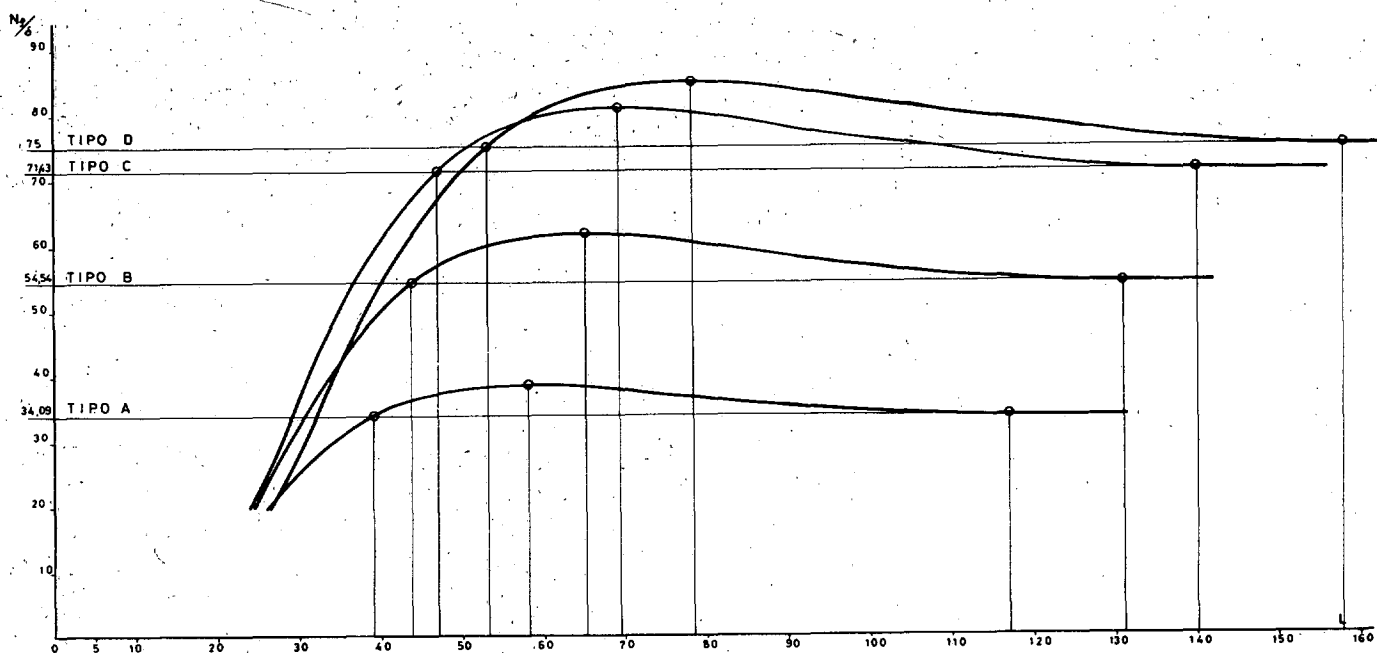


Fig. 4

COMPORTAMIENTO DE LA CONDUCCION PARA LONGITUDES INFERIORES A LA DE APLICACION DE LA FORMULA DE LOS TUBOS  
TUBOS DE AMIANTO-CEMENTO

Por el contrario, para longitudes menores el nuevo axil fijará el estado tensional más aproximado a la realidad. En las figuras 2, 3 y 4 se han dibujado las leyes de variación de  $\frac{1}{\delta} N_{v, \max}$

en función de  $L_a$ . Como era de prever la longitud en que el tubo comienza a comportarse como señala la fórmula de los tubos es función de la presión de trabajo y del diámetro. Los cálculos efectuados se refieren a tubos de amianto-cemento con diámetros de 100, 300, 600 y 1.200 mm, para los diferentes timbrajes en que se presentan. Se podría expresar aproximadamente la longitud a partir de la cual es de total aplicación la fórmula de los tubos, como una función del diámetro y la presión de servicio, que podría tomar una forma:

$$L_M \approx \varnothing (1 + KP) \text{ en donde } K = 0,045 \quad [12]$$

$\varnothing$  : diámetro en cms.

P : presión de servicio en m.c.a.

L : en cms.

Los resultados de los ensayos a presión interior serán representativos, para el fenómeno

que nos ocupa, para  $L_a \geq L_M$ , pero no para valores inferiores. Los 50 cm. ya citados varias veces del Pliego superan los  $L_M$  hasta diámetro de 300 mm, pero a partir de aquí las longitudes mínimas son claramente superiores, llegando a los 200 cms para diámetros de 1.200 mm. Por consiguiente si la burbuja queda con longitud inferior a la  $L_M$  dada por (12), valores de las figuras 2, 3 y 4 para ser más exactos, los  $N_v$  que aparezcan superarán a las dadas por la fórmula de los tubos. El coeficiente de seguridad real quedará disminuido, independientemente de la mayor o menor cuantía con que se produzca esta disminución.

Como puede verse en las mismas figuras si la longitud de la burbuja sigue disminuyendo alcanza otro valor para el que vuelve a encontrarse la situación definida en la fórmula de los tubos; a partir de este momento son totalmente dominantes las condiciones de borde. Los resultados aquí carecen ya de interés, pues el supuesto teórico comienza a tener discrepancias mayores con la situación real.

## 8.2 Influencia de los flectores y cortantes

En la situación de bordes libres, y consiguiente aplicación de la fórmula de los tubos, el único esfuerzo a considerar es el axil circunferencial, ya que no aparecen ni flectores ni cortantes. El hecho de que el tramo de tubo con la burbuja de aire tenga sus bordes condicionados implica, aparte de la variación del axil ya estudiada, la aparición de los dos nuevos esfuerzos, flexor y cortante, con las consiguientes tensiones. En la figura 5 se han representando los tres esfuerzos que actuarán ahora sobre la pared del tubo.

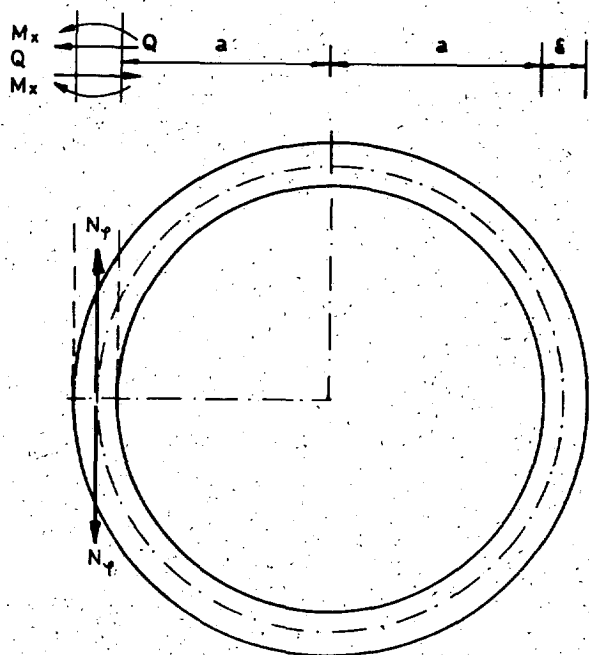


Figura 5. — Esfuerzos que aparecen en el tramo de tubo conteniendo la bolsa de aire.

A fin de poder considerar la repercusión que las nuevas tensiones puedan tener sobre el comportamiento del tubo, se han obtenido los valores  $M_x$  y  $Q_x$  precisamente para la sección de máximo axil del tramo de tubo con  $L_a$  que proporcionaba  $\frac{1}{\delta} N_j$ , máximo.

Los valores de los momentos y cortantes se han obtenido a partir de:

$$M_x = K \left[ \frac{d^2 w_p}{dx^2} + 2 \alpha^2 e^{\alpha x} (K_2 \cos \alpha x - K_1 \sin \alpha x) - \right.$$

$$\left. - 2 \alpha^2 e^{-\alpha x} (K_4 \cos \alpha x - K_3 \sin \alpha x) \right]$$

$$Q_x = -K \left[ \frac{dw_p}{dx} + \right.$$

$$\left. + 2 \alpha^3 e^{\alpha x} [(K_2 - K_1) \cos \alpha x - \right.$$

$$\left. - (K_1 + K_2) \sin \alpha x] + 2 \alpha^3 e^{-\alpha x} \right.$$

$$\left. [(K_3 + K_4) \cos \alpha x - (K_3 - K_4) \sin \alpha x] \right]$$

haciéndose en todos los casos  $x = L/2$  para  $N_p$  máximo, deducidos estos valores de  $L$  a partir de las figuras 2, 3 y 4. En el cuadro 4 se ha confeccionado un resumen de cuanto se está señalando, y en él figuran tanto los valores de  $M_x$  como los de las tensiones producidas. Debe observarse que el flexor y cortante recogido no son los máximos producidos, por lo que existirán otras secciones con valores más altos. Si embargo, al ser el axil circunferencial el esfuerzo que produce la mayor tensión, y por tanto el que va a condicionar fundamentalmente el comportamiento del tubo, el momento y cortante que nos interesan son precisamente los que aparecen en dicha sección. Los valores calculados para las tensiones de flexión no son excesivamente grandes, pero significan una nueva disminución del coeficiente de seguridad que presentará el tubo cuando se enfrente al fenómeno que estamos estudiando. Al estudiarse siempre la sección central del tramo, en la que hay máximo  $N_j$ , el valor de  $Q_x$  se anula por lo que no aparece en los cuadros.

## 8.3 Coeficientes de seguridad definitivos

Como hemos señalado el estudio de los tubos a presión interior se realiza con la fórmula de los tubos, por tanto si la tensión de rotura deducida de los ensayos es  $\sigma_R$  y la de trabajo, calculada es  $\sigma_T$ , el coeficiente de seguridad que tendremos en este supuesto será la relación entre ambas tensiones.

$$\gamma_T = \frac{\sigma_R}{\sigma_T}$$

# COMPORTAMIENTO DE LAS TUBERIAS EN ABASTECIMIENTOS DE AGUA

CUADRO 4

## TUBERIA DE AMIANTO-CEMENTO

| [1]<br>Ø<br>(mm) | [2]<br>TIPO           | [3]<br>N <sub>e</sub> (máximo)<br>δ<br>(kg/cm <sup>2</sup> ) | Valores para la Sección N máximo |                                            |                                                          | [7]<br>$\sigma_T = \frac{P \cdot a}{\delta}$<br>(kg/cm <sup>2</sup> ) | [8]<br>Tens. Comp.<br>$\sqrt{\left(\frac{N_e}{\delta}\right)^2 + \sigma^2}$ | [9]<br>Dism. Coef. Seg.<br>% = 100 (1 - $\frac{(7)}{(8)}$ ) |
|------------------|-----------------------|--------------------------------------------------------------|----------------------------------|--------------------------------------------|----------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|
|                  |                       |                                                              | [4]<br>L<br>(cm)                 | [5]<br>M <sub>x</sub> = L<br>(cmxkg en cm) | [6]<br>$\sigma = 6 M_x / \delta^2$<br>kg/cm <sup>2</sup> |                                                                       |                                                                             |                                                             |
| 100              | A                     | 17,74                                                        | 7,00                             | — 0,4415                                   | — 4,14                                                   | 15,625                                                                | 18,217                                                                      | 14,227                                                      |
|                  | B                     | 31,54                                                        | 7,50                             | — 0,9926                                   | — 7,35                                                   | 27,777                                                                | 32,385                                                                      | 14,229                                                      |
|                  | C                     | 47,30                                                        | 7,50                             | — 1,4247                                   | — 10,55                                                  | 41,666                                                                | 48,462                                                                      | 14,024                                                      |
|                  | D                     | 51,60                                                        | 8,50                             | — 2,0678                                   | — 10,25                                                  | 45,455                                                                | 52,608                                                                      | 13,597                                                      |
|                  | E                     | 59,13                                                        | 8,75                             | — 3,0207                                   | — 12,59                                                  | 52,083                                                                | 60,455                                                                      | 13,849                                                      |
|                  | F                     | 70,96                                                        | 8,75                             | — 3,6249                                   | — 15,10                                                  | 62,500                                                                | 72,549                                                                      | 13,851                                                      |
| 300              | A                     | 35,48                                                        | 15,00                            | — 1,8997                                   | — 7,92                                                   | 31,250                                                                | 36,353                                                                      | 14,038                                                      |
|                  | B                     | 49,99                                                        | 17,00                            | — 6,6053                                   | — 13,71                                                  | 44,118                                                                | 51,836                                                                      | 14,889                                                      |
|                  | C                     | 63,84                                                        | 20,00                            | — 8,1555                                   | — 12,23                                                  | 56,250                                                                | 65,001                                                                      | 13,463                                                      |
|                  | D                     | 68,08                                                        | 22,50                            | — 13,1747                                  | — 12,65                                                  | 60,000                                                                | 69,245                                                                      | 13,351                                                      |
|                  | E                     | 70,87                                                        | 25,00                            | — 18,3535                                  | — 12,24                                                  | 62,500                                                                | 71,919                                                                      | 13,097                                                      |
|                  | F                     | 70,85                                                        | 27,50                            | — 25,8458                                  | — 11,97                                                  | 62,500                                                                | 71,854                                                                      | 13,018                                                      |
| 600              | A                     | 38,67                                                        | 30,00                            | — 5,6495                                   | — 7,00                                                   | 34,091                                                                | 39,298                                                                      | 13,251                                                      |
|                  | B                     | 56,67                                                        | 34,00                            | — 17,8495                                  | — 11,90                                                  | 50,000                                                                | 57,906                                                                      | 13,653                                                      |
|                  | C                     | 63,84                                                        | 38,00                            | — 41,2807                                  | — 15,48                                                  | 56,250                                                                | 65,690                                                                      | 14,371                                                      |
|                  | D                     | 68,12                                                        | 44,00                            | — 58,8265                                  | — 14,12                                                  | 60,000                                                                | 69,568                                                                      | 13,753                                                      |
|                  | E                     | 70,96                                                        | 48,00                            | — 89,9726                                  | — 15,00                                                  | 62,500                                                                | 72,528                                                                      | 13,826                                                      |
|                  | F                     | 70,96                                                        | 52,00                            | — 136,3230                                 | — 15,78                                                  | 62,500                                                                | 72,693                                                                      | 14,022                                                      |
| 1200             | A                     | 38,70                                                        | 58,00                            | — 26,6694                                  | — 8,27                                                   | 34,091                                                                | 39,573                                                                      | 13,854                                                      |
|                  | B                     | 61,93                                                        | 65,00                            | — 65,9435                                  | — 13,08                                                  | 54,545                                                                | 63,296                                                                      | 13,826                                                      |
|                  | C                     | 81,10                                                        | 69,00                            | — 117,6472                                 | — 17,78                                                  | 71,429                                                                | 83,026                                                                      | 13,968                                                      |
|                  | D                     | 85,15                                                        | 78,00                            | — 196,3428                                 | — 18,41                                                  | 75,000                                                                | 87,117                                                                      | 13,909                                                      |
| TUBERIA METALICA |                       |                                                              |                                  |                                            |                                                          |                                                                       |                                                                             |                                                             |
| 300              | 10 kg/cm <sup>2</sup> | 1091,66                                                      | 5,50                             | — 0,942                                    | — 232,25                                                 | 961,538                                                               | 1116,092                                                                    | 13,848                                                      |
| 600              | 10 kg/cm <sup>2</sup> | 1091,66                                                      | 11,00                            | — 3,769                                    | — 232,32                                                 | 961,538                                                               | 1116,107                                                                    | 13,849                                                      |
| 1200             | 10 kg/cm <sup>2</sup> | 1091,66                                                      | 22,00                            | — 15,076                                   | — 232,32                                                 | 961,538                                                               | 1116,107                                                                    | 13,849                                                      |
| 300              | 20 kg/cm <sup>2</sup> | 1091,66                                                      | 7,80                             | — 3,720                                    | — 229,29                                                 | 961,538                                                               | 1115,480                                                                    | 13,801                                                      |
| 600              | 20 kg/cm <sup>2</sup> | 1091,66                                                      | 15,50                            | — 15,333                                   | — 236,26                                                 | 961,538                                                               | 1116,934                                                                    | 13,913                                                      |
| 1200             | 20 kg/cm <sup>2</sup> | 1091,66                                                      | 31,00                            | — 61,330                                   | — 236,26                                                 | 961,538                                                               | 1116,933                                                                    | 13,913                                                      |
| 300              | 40 kg/cm <sup>2</sup> | 1091,66                                                      | 11,00                            | — 3,769                                    | — 232,32                                                 | 961,532                                                               | 1116,107                                                                    | 13,849                                                      |
| 600              | 40 kg/cm <sup>2</sup> | 1091,66                                                      | 22,00                            | — 15,076                                   | — 232,32                                                 | 961,538                                                               | 1116,107                                                                    | 13,849                                                      |
| 1200             | 40 kg/cm <sup>2</sup> | 1091,66                                                      | 45,00                            | — 216,388                                  | — 208,40                                                 | 961,538                                                               | 1111,374                                                                    | 13,482                                                      |

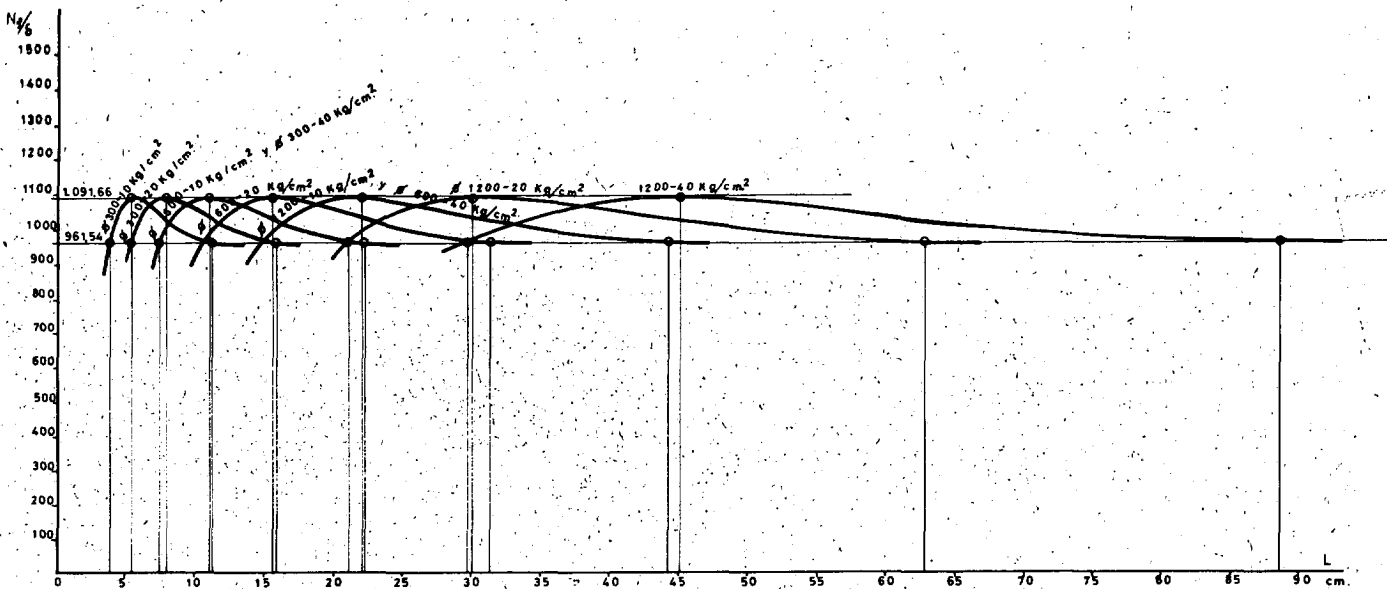


Fig. 6

COMPORTAMIENTO DE LA CONDUCCION PARA LONGITUDES INFERIORES A LA DE APLICACION DE LA FORMULA DE LOS TUBOS.  
TUBOS DE ACERO

A fin de incorporar numéricamente las dos nuevas variables (mayor axil, existencia de flector) surgidas con las condiciones de borde, se ha calculado una tensión de comparación que representará la tensión máxima producida en la pared del tubo, y que representará la aproximación teórica al estado real en el supuesto de sollicitaciones que nos movemos. Si llamamos a dicha tensión  $\sigma_c$ , el coeficiente de seguridad será:

$$\gamma_r = \frac{\sigma_R}{\sigma_c}$$

y por tanto la disminución del coeficiente de seguridad inicialmente considerado será:

$$\gamma_T - \gamma_r = \gamma_T \left( 1 - \frac{\sigma_T}{\sigma_c} \right)$$

y por tanto  $100 \left( 1 - \frac{\sigma_T}{\sigma_c} \right)$  nos indicará el porcentaje de disminución de dicho coeficiente de seguridad.

Todos estos valores quedan recogidos en el cuadro 4 para los casos estudiados.

## 9. EXTENSION A TUBOS DE ACERO

Con el objeto de no dejar reducido el estudio a tubos de amianto-cemento, se han realizado los cálculos anteriores para tuberías de acero de 300, 600 y 1.200 mm con presiones de 10, 20, y 40 kg/cm², y fijando los espesores de forma que el coeficiente de seguridad cuando se aplica la fórmula de los tubos sea de 2,5.

En la figura 6 se han recogido los resultados y en el cuadro 4 las tensiones y minoración consiguiente del coeficiente de seguridad.

## 10. CONCLUSIONES

Como resumen de cuando antecede pueden sacarse algunas conclusiones:

- a) El simple hecho de formación de una bolsa de aire en el interior de un tubo significa una alta peligrosidad adicional.
- b) La peligrosidad adquiere aspectos más graves conforme aumente la velocidad de llenado. No deberían superarse velocidades de 0,1 - 0,2 m/s.
- c) De acuerdo con las características del tubo y dadas las velocidades normales del agua

según el tipo de instalación en servicio existe una cierta longitud a partir de la cual la rotura es teóricamente segura.

Los diferentes aspectos cuantitativos de estos puntos quedan reflejados en los gráficos y cuadros.

d) Una primera aproximación teórica a la situación estructural real del tubo señala una disminución del coeficiente de seguridad de un 14 por 100 aproximadamente, independiente del material y características del tubo.

### 11. AGRADECIMIENTO

Quiero expresar mi agradecimiento al Ingeniero Técnico D. Diego Manuel García Pérez por su colaboración en la preparación del programa y su posterior aplicación en los dibujos de los gráficos 2, 3, 4 y 6.

### BIBLIOGRAFIA

MENDILUCE ROSICH, E. *Peligrosidad del aire en el interior de las tuberías*. Revista de Obras Públicas. Marzo 1984. Págs. 177-184.

POZO FRUTOS, F. *Depósitos cilíndricos circulares*. Publicación 195 del Laboratorio Central de Ensayo de Materiales de Construcción.

José Luis Sánchez López



Obtiene el título de ingeniero de Caminos en 1966 y el de doctor ingeniero en 1973, ambos en la Escuela de Madrid. Tran un año en la Jefatura Regional de Carreteras, en Valencia, pasa a AUXIESA, proyectando la obra civil de la central térmica San Juan de Dios III, IV y V, ampliación de la fábrica de celulosas de San Juan del Puerto, toma submarina para la refrigeración de la central nuclear de Vandellós (con SOCIA), etcétera. Desde 1971 pasa a la Mancomunidad de los Canales de Taibilla, en Cartagena, desempeñando los puestos de ingeniero de Proyectos, jefe de Explotación y, en la actualidad, del Gabinete Técnico. Ha proyectado numerosos abastecimientos de los municipios mancomunados. En 1977 ingresa por oposición en el Cuerpo de Ingenieros de Caminos del MOPU. Es profesor titular de la Escuela Universitaria Politécnica de Cartagena.

