

# DE LA REDUCCION DEL COEFICIENTE DE IGNORANCIA EN EL COMPORTAMIENTO DE LAS TUBERIAS EN OBRA

Forma de aumentar la seguridad en las instalaciones de tuberías de amianto-cemento para conducción de agua a presión

Por EMILIO HERRANZ GARCIA  
M.ª CARMEN DE ANDRES CONDE  
Ingenieros de Caminos

## INTRODUCCION

Cuando la elección de la tubería para un Proyecto se hace exclusivamente en función de las Presiones máximas de trabajo que habrá de soportar, el Pliego M.O.P. introduce para las Tuberías Uralita el coeficiente de "seguridad" 4 respecto a rotura en máquina de ensayo, y las Normas UNE, ISO, coeficientes de "seguridad" menores.

Si la elección de la Tubería Uralita se hace después de considerar los efectos combinados de las cargas de presión y de aplastamiento de las tierras de relleno y del tráfico, la verdadera seguridad habrá aumentado, por conocida, y el coeficiente de seguridad no englobará más que la obligada inseguridad de la distribución de los elementos dentro de los lotes aceptados (pequeña gracias a la prueba de presión normalizada), y la necesidad de que las cargas de trabajo permanente no coincidan con las de rotura del ensayo. En definitiva, el coeficiente de seguridad será parecido a los que se utilizan en las obras de edificación, cuando se tienen en cuenta todas las cargas.

El coeficiente de seguridad establecido entre la Presión Máxima de trabajo y la Presión Nominal, es realmente el que cubre la debida separación entre esfuerzos permanentes y esfuerzos a corto plazo, y ello para todos los elementos del lote. Puede fijarse un valor 2 de acuerdo con todas las Normas actuales.

El coeficiente de seguridad entre la Presión Nominal y la Presión de Rotura, no tiene interés más que para el fabricante, y será menor cuanto menos riesgo corra de que se le rompan todos los elementos al hacer la prueba de Presión Nominal, es decir, cuanto mejor sea su Producto. Al usuario este coeficiente de seguridad no le indica mayor o menor riesgo.

En el Estudio que se presenta, se utilizan las Teorías de Marston, Wetzorke y Boussinesq para el cálculo de la carga de tierras y tráfico, que han sido adaptadas experimentalmente a las Tuberías Uralita. Los tubos Uralita pertenecen a la clasificación de semi-rígidos dada por Marston, es decir, sus deformaciones elásticas entran en el campo de  $0,1\% \leq \frac{\Delta D}{D} \leq 3\%$ .

De hecho, los tubos Uralita de diámetros entre 500 y 1.200 mm. tienen deformaciones elásticas tales que

$$\frac{\Delta D}{D} \sim 1,45\%$$

Para el cálculo de las cargas combinadas se siguen los trabajos de W. J. Schlick, que han sido también experimentalmente adaptados a las Tuberías Uralita, a la vez que se ha desarrollado la teoría aparecida en la Norma DIN-19.800 de 1973, y en la Norma Internacional ISO-2.785 del año 1.975, completándola con la elaboración de los coeficientes de seguridad ante las cargas combinadas, es decir, los reales en la explotación.

## CASO DE ESTUDIO

El método de análisis se presenta aplicado a un Proyecto real.

Las tuberías que intervienen en este Proyecto son:

- Conducción de Toma hasta Depósito Regulador y Chi-menea de equilibrio . . . . . 6.775 m.  $\phi$  1.000 mm.
- Suministro desde Depósito Regulador hasta el Anillo de Distribución . . . . . 3.443 m. 2  $\phi$  900 mm.
- Anillo de Distribución . . . . . 9.922 m.  $\phi$  800 mm.

### 1. Hipótesis de cargas

Las hipótesis de cargas que se establecen para el cálculo mecánico son:

- Unas presiones internas máximas de trabajo,  $P_1$ , obtenidas de los cálculos hidráulicos del Proyecto, y
- Unas alturas máximas (y mínimas si hay tráfico) de tierras de relleno sobre la generatriz superior de los tubos, H, obtenidas de los perfiles longitudinales del Proyecto, que para cada diámetro, determinan en cada uno de los sucesivos tramos definidos por los escalones de presión y de altura del relleno considerados, las condiciones más desfavorables para la comprobación de la tubería que se propone emplear.

#### NOTA:

La altura sobre el tubo se obtiene así:

Cota roja — (Diámetro exterior + 20 cm. de cama granular bajo el tubo).

## DE LA REDUCCION DEL COEFICIENTE DE IGNORANCIA EN EL COMPORTAMIENTO DE LAS TUBERIAS EN OBRA

Las características de las tierras de relleno se establecen en:

- Peso específico  $\gamma = 2.000 \text{ Kg/m}^3$
- Angulo de rozamiento  $\rho = 18^\circ$

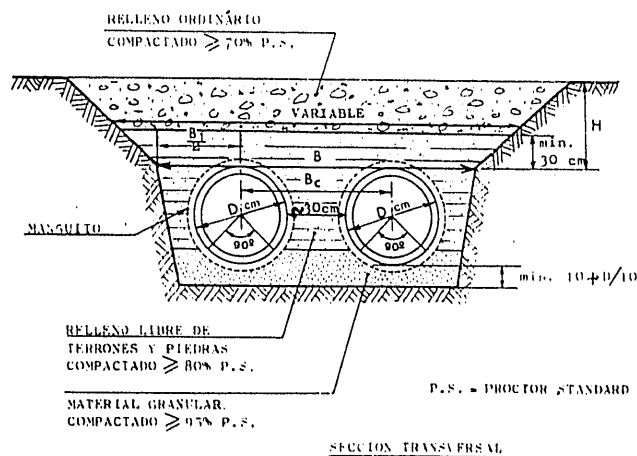
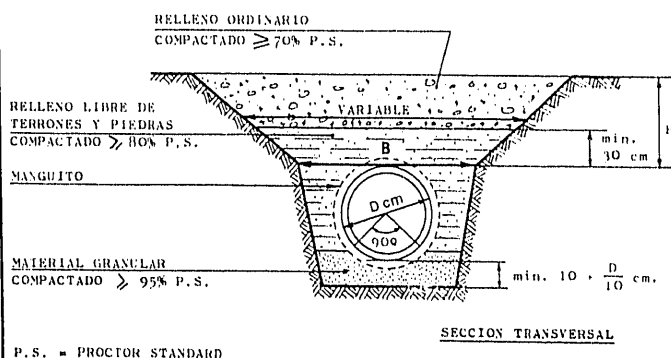
que son muy desfavorables, pues corresponden a terrenos de arcilla.

Unas anchuras de zanja a la altura de la generatriz superior del tubo B, (ver figuras 1 y 2) de:

- B = 1,6 m. para  $\phi 1.000 \text{ mm}$ .
- B = 2,8 m. para 2  $\phi 900 \text{ mm}$ . ; B = 1,30 m.
- B = 1,4 m. para  $\phi 800 \text{ mm}$ .

- Unas condiciones de apoyo de la tubería en la zanja según Figuras 1 y 2 que corresponde a uno de los tipos de la Norma ISO-2785 y que proporciona un valor del Factor de carga por apoyo de  $K = 1,9$

Unas condiciones de apoyo de la tubería en la zanja según Figuras 1 y 2 que corresponde a uno de los tipos de la Norma ISO-2785 y que proporciona un valor del Factor de carga por apoyo de  $K = 1,9$



### 2. Características de las tuberías que se proponen

Las características que definen las tuberías se encuentran reunidas en el siguiente cuadro:

$\phi$ Nominal mm	Diámetro exterior D (m)	Presión interna mínima de rotura en máquina (Kg/cm <sup>2</sup> )	Carga mínima de rotura por aplastamiento en máquina (Kg/m)	Clase de la tubería $P_i / P_n$ (Kg/cm <sup>2</sup> )
800	0,885	22,5	9.600	9/18
900	0,964	14,3	5.400	5,5/11
900	0,995	22,5	10.800	9/18
900	1,021	30	17.000	12/24
1.000	1,072	14,4	6.000	5,5/11
1.000	1,106	22,5	12.000	9/18
1.000	1,134	30	19.000	12/24

Las tuberías tienen un espesor tal que se cumplen las condiciones de:

- Presión Hidráulica interior:  $\sigma_p \geq 200 \text{ Kg/cm}^2$

en la fórmula 
$$\sigma_p = \frac{\Psi d}{2e}$$

donde:

$\Psi$  = presión mínima de rotura en máquina (Kg/cm<sup>2</sup>)

d = diámetro interior del tubo en cm.

e = espesor del tubo en cm.

$$\phi 800 (9/18) \dots \sigma_p = \frac{22,5 \times 80}{2 \times 3,95} = 227 \text{ Kg/cm}^2$$

$$\phi 900 (5,5/11) \dots \sigma_p = \frac{14,3 \times 90}{2 \times 2,95} = 218 \text{ Kg/cm}^2$$

$$\phi 900 (9/18) \dots \sigma_p = \frac{22,5 \times 90}{2 \times 4,45} = 227 \text{ Kg/cm}^2$$

$$\phi 900 (12/14) \dots \sigma_p = \frac{30 \times 90}{2 \times 5,75} = 234 \text{ Kg/cm}^2$$

$$\phi 1.000 (5,5/11) \dots \sigma_p = \frac{14,4 \times 100}{2 \times 3,3} = 218 \text{ Kg/cm}^2$$

$$\phi 1.000 (9/18) \dots \sigma_p = \frac{22,5 \times 100}{2 \times 5} = 225 \text{ Kg/cm}^2$$

$$\phi 1.000 (12/24) \dots \sigma_p = \frac{30 \times 100}{2 \times 6,4} = 234 \text{ Kg/cm}^2$$

- Flexión transversal (Aplastamiento):  
 $\sigma_a \geq 450 \text{ Kg/cm}^2$

## DE LA REDUCCION DEL COEFICIENTE DE IGNORANCIA EN EL COMPORTAMIENTO DE LAS TUBERIAS EN OBRA

en la fórmula  $\sigma_a = \frac{3 \omega (d+e)}{\pi b e^2}$

donde:

$\omega$  = carga mínima de rotura por aplastamiento en máquina (Kg/m)

$b$  = longitud del tubo probeta;  $b = 100 \text{ cm.} = 1 \text{ m.}$

$$\phi 800 (9/18) \dots = \frac{3 \cdot 9.600 \times 83,95}{\pi \cdot 100 \times 3,95^2} = 493 \text{ Kg/cm}^2$$

$$\phi 900 (5,5/11) \dots = \frac{3 \cdot 5.400 \times 92,95}{\pi \cdot 100 \times 2,95^2} = 550 \text{ Kg/cm}^2$$

$$\phi 900 (9/18) \dots = \frac{3 \cdot 10.800 \times 94,45}{\pi \cdot 100 \times 4,45^2} = 491 \text{ Kg/cm}^2$$

$$\phi 900 (12/24) \dots = \frac{3 \cdot 17.000 \times 95,75}{\pi \cdot 100 \times 5,75^2} = 470 \text{ Kg/cm}^2$$

$$\phi 1.000 (5,5/11) \dots = \frac{3 \cdot 6.000 \times 103,3}{\pi \cdot 100 \times 3,3^2} = 543 \text{ Kg/cm}^2$$

$$\phi 1.000 (9/18) \dots = \frac{3 \cdot 12.000 \times 105,6}{\pi \cdot 100 \times 5^2} = 481 \text{ Kg/cm}^2$$

$$\phi 1.000 (12/24) \dots = \frac{3 \cdot 19.000 \times 106,4}{\pi \cdot 100 \times 6,4^2} = 471 \text{ Kg/cm}^2$$

### 3. Cálculo de las Cargas de Aplastamiento

Para el cálculo de la carga vertical del terreno concentrada sobre la generatriz superior del tubo, se utilizan las fórmulas de Marston-Wetzkork para Tubería Uralita, siendo:

$W_1$  = Carga vertical del terreno concentrada sobre generatriz superior del tubo, en Kg/m.

$B$  = Anchura de la zanja a la altura de la generatriz superior del tubo, en m.

$B_1$  = Doble de la distancia del eje del tubo a la pared, en el caso de dos tuberías en la zanja.

$B_2$  = Distancia entre ejes de los tubos, en el caso de dos tuberías en la zanja.

$H$  = Altura del relleno sobre la generatriz superior del tubo, en m.

$\rho$  = Angulo de rozamiento del relleno.

$\gamma$  = Peso específico del relleno, en Kg/m<sup>3</sup>.

$D$  = Diámetro exterior del tubo, en m.

$m$  = Factor de corrección por la ayuda de los esfuerzos horizontales de las tierras que circundan al tubo cargadas por el prisma de tierras que hay sobre el mismo y puestos en juego por la semi-rigidez de los tubos Uralita.

$K$  = Factor de carga con apoyo de 90° sobre material granular.

$P_c$  = Carga vertical del tráfico concentrada sobre la generatriz superior del tubo, en Kg/m.

$P_v$  = Presión vertical del tráfico función de la carga total y la altura  $H$  de recubrimiento, en Kg/m<sup>2</sup>.

$W_1$  = Suma de las cargas verticales del terreno y del tráfico concentrada sobre la generatriz superior del tubo en Kg/m.

Si no hay tráfico  $W_1 = W_1$ .

### UNA TUBERIA EN ZANJA:

#### Carga de Tierras

$$\frac{H}{B} \tan^2 \rho$$

$$W_1 = \frac{1 - e}{\tan^2 \rho} \times \gamma \times D \times (D+1)$$

para zanja en que se cumpla que:  $B \geq 2D$ ;  $H \geq 1,5B$

ó

$$2D \leq B \leq 3D; H \geq 3,5B$$

Y si no se cumplen estas desigualdades:

$$\frac{H}{D} \tan^2 \rho$$

$$W_1 = \frac{e - 1}{\tan^2 \rho} \times m \times \gamma \times D^2$$

con:

$m = 1$	para	$H \geq 1$ metro
$m = 0,83$	para	$1 \cdot H \geq 2$ metros
$m = 0,73$	para	$H \geq 2$ metros

#### Tráfico

Para el cálculo de la carga vertical del tráfico se ha usado la teoría de Boussinesq con el ábaco correspondiente (que se adjunta) y teniendo en cuenta que para los tubos Uralita.

$$P_c = m \times \left(1 + \frac{0,3}{H}\right) \times D \times P_v$$

## DE LA REDUCCION DEL COEFICIENTE DE IGNORANCIA EN EL COMPORTAMIENTO DE LAS TUBERIAS EN OBRA

con

$m = 1$  para zanja en que:  $B \leq 2 D$  y  $H \geq 1,5 B$  ó  
 $2 D \leq B \leq 3 D$  y  $H \geq 3,5 B$

$m = 0,83$  para zanja en que no se cumpla lo anterior.

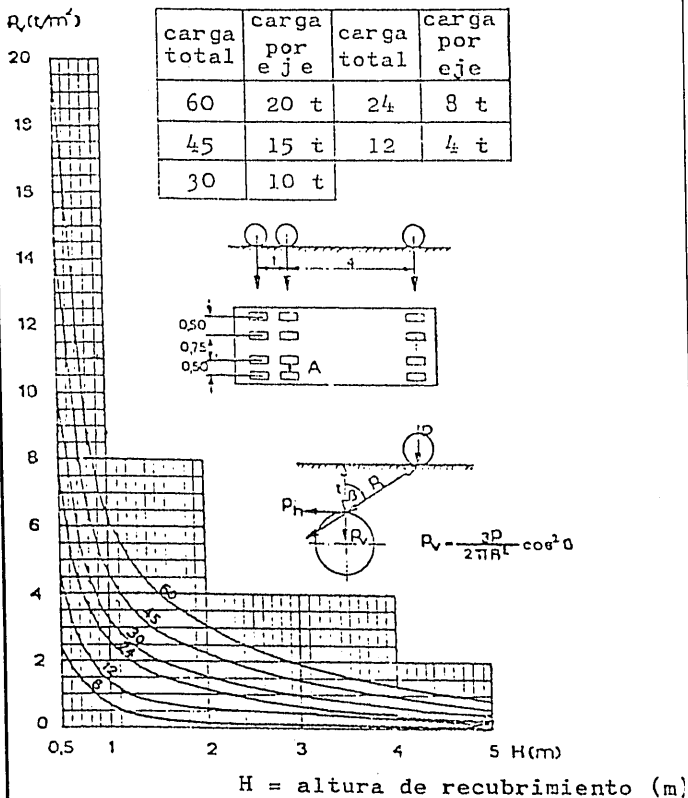
Por las necesidades del Proyecto el tráfico es de 24 T para la tubería  $\phi 800$ .

La tubería  $\phi 1.000$  no lleva tráfico.

### TRAFICO

Presión vertical  $p_v$  (t/m<sup>2</sup>) en función de la carga total y de la altura H de recubrimiento.

$$P_c = m \cdot \left(1 + \frac{0,3}{H}\right) \cdot D \cdot p_v$$



La carga total sobre cada tubo es:

$$W_1 = W_i + P_c$$

### DOS TUBERIAS EN LA ZANJA:

#### Carga de Tierras

En el caso de dos tuberías en la zanja, la carga vertical del terreno sobre cada tubo se calcula así:

- Para las zonas junto a las paredes,

$$W'_i = \frac{1}{2} \times \frac{1 - e^{-\frac{H}{B_1} \operatorname{tg} \rho}}{\operatorname{tg} \rho} \times \bar{\gamma} \times D \times (D+1)$$

cuando se cumpla que:

$$B_1 \leq 2 D ; H \geq 1,5 B_1$$

ó

$$2 D \leq B_1 \leq 3 D ; H \geq 3,5 B_1$$

Y si no se cumplen estas desigualdades:

$$W'_i = \frac{1}{2} \frac{e^{-\frac{H}{D} \operatorname{tg} \rho} - 1}{\operatorname{tg} \rho} \times m \times \bar{\gamma} \times D^2$$

con:

$m = 1$  para  $H < 1$  metros  
 $m = 0,83$  para  $1 \leq H < 2$  metros  
 $m = 0,73$  para  $H \geq 2$  metros

- Para la zona entre ejes de tubos:

$$W''_i = \frac{1}{2} \times m \times \bar{\gamma} \times H \times B_c$$

con:

$m =$  mismos valores que los escritos anteriormente cuando no se cumplen las desigualdades.

$m = 1$  cuando las desigualdades se cumplen.

- La carga de tierras que corresponden a cada tubo es, finalmente:

$$W_i = W'_i + W''_i$$

### Tráfico

Para el cálculo de la carga de tráfico se aplica la fórmula de tráfico anterior.

Por las necesidades del Proyecto el tráfico es de 45 T para las 2 tuberías  $\phi 900$ .

La carga total sobre cada tubo es:

$$W_1 = W_i + P_c$$

4. Comprobación de las Tuberías que se emplean. Cálculo de los Coeficientes de Seguridad Reales (En la Explotación)

#### Metodología:

Para comprobar la resistencia de las tuberías que se emplean, a la combinación de las cargas de presión interna máxima de trabajo, con las cargas exteriores máximas de aplastamiento, a que van a estar sometidas durante la explotación, se utiliza la relación de W. J. Schlick para los tubos Uralita.

## DE LA REDUCCION DEL COEFICIENTE DE IGNORANCIA EN EL COMPORTAMIENTO DE LAS TUBERIAS EN OBRA

La relación de Schlick se puede escribir de dos formas:

$$W = \frac{\omega \times K}{\nu_2} \sqrt{1 - \frac{P_1}{\Psi}} \quad (1)$$

$$P = \frac{\Psi}{\nu_1} \left[ 1 - \left( \frac{W_1}{\omega \times K} \right)^2 \right] \quad (2)$$

siendo:

$\nu_1$  = Coeficiente de seguridad a presión interna Rotura/Trabajo, en la explotación.

$\nu_2$  = Coeficiente de seguridad al aplastamiento Rotura/Trabajo, en la explotación.

$\omega$  = Mínima carga de rotura que resiste la tubería por aplastamiento, obtenida en máquina de ensayo, en Kg/m.

$\Psi$  = Mínima presión de rotura que resiste la tubería por presión interna, obtenida en máquina de ensayo, en Kg/cm<sup>2</sup>.

$K$  = Factor de carga que tiene en cuenta el tipo de apoyo, y permite el paso de los valores de aplastamiento en máquina ( $\omega$ ), a los valores de aplastamiento en zanja ( $W$ ), de manera que puedan compararse entre sí.

En la forma (1), además:

$P_1$  = Presión interna máxima de trabajo en la explotación, en Kg/cm<sup>2</sup>. Tiene que ser  $P_1 < \Psi$ .

$W$  = Valor de la Carga de Aplastamiento en la explotación, en Kg/m. que, cuando actúa simultáneamente con la presión interna  $P_1$ ,

Provoca la rotura en la explotación si  $\nu_2 \leq 1$   
ó

Es la Carga Máxima de Aplastamiento Admisible en la explotación, si  $\nu_2$  = coeficiente de seguridad admisible.

En la forma (2), además:

$W_1$  = Carga de aplastamiento máxima de trabajo en la explotación, en Kg/m. Tiene que ser  $W_1 < \omega$

$P$  = Valor de la presión interna en la explotación, en Kg/cm<sup>2</sup> que, cuando actúa simultáneamente la carga de aplastamiento  $W_1$ ,

Provoca la rotura en la explotación si  $\nu_1 = 1$   
ó

Es la presión Máxima Admisible en la explotación si  $\nu_1$  = coeficiente de seguridad admisible.

Los valores  $P_1 < \Psi$  y  $W_1 < \omega$ , máximos de trabajo calculados en cada tramo de la instalación, son valores admisibles  $P$  y  $W$  cuando, considerados como tales, dan lugar a coeficientes de seguridad  $\nu_1$  y  $\nu_2$  iguales o mayores a unos valores mínimos que se consideren aceptables.

Por tanto escribirse que:

$$P_1 = P = \frac{\Psi}{\nu_p}$$

$$W_1 = W = \frac{\omega \times K}{\nu_a}$$

siendo:

$\nu_p$  = Coeficiente de seguridad a presión interna Rotura/Trabajo, en máquina de ensayo.

$\nu_a$  = Coeficiente de seguridad al aplastamiento Rotura/Trabajo, en máquina de ensayo.

Sustituyendo en las relaciones (1) y (2) se obtiene:

$$\frac{\omega \times K}{\nu_a} = \frac{\omega \times K}{\nu_2} \sqrt{1 - \frac{\Psi}{\nu_p \times \Psi}}$$

$$\frac{\Psi}{\nu_p} = \frac{\Psi}{\nu_1} \left[ 1 - \left( \frac{\omega \times K}{\nu_a \times \omega \times K} \right)^2 \right]$$

y por tanto:

$$\nu_2 = \nu_a \sqrt{1 - \frac{1}{\nu_p}} \quad (3)$$

$$\nu_1 = \nu_p \left[ 1 - \left( \frac{1}{\nu_a} \right)^2 \right] \quad (4)$$

**Corolario:**

Se concluye que, si bien hay que fijar unos coeficientes de seguridad mínimos  $\nu_p$  y  $\nu_a$  para tener en cuenta los posibles fallos en la supuesta distribución estadística de la población objeto de ensayo en máquina, y porque siendo  $P_1 < \Psi$  y  $W_1 < \omega$ , tienen que ser  $\nu_p > 1$  y  $\nu_a > 1$ ,

sin embargo,

**Los coeficientes de seguridad realmente decisivos son los  $\nu_1$  y  $\nu_2$** , iguales en importancia, que nos dan la verdadera seguridad de la instalación en su explotación, y que no pueden ser sustituidos por el coeficiente de seguridad  $\nu_p$  Rotura/Trabajo a **presión interna en máquina**, como se hace habitualmente.

“Por grande que se tome el valor de  $\nu_p$  sin considerar las relaciones anteriores (como suele hacerse), se tiene que, si en la realidad de la zanja fuese en algún tramo  $\nu_a = \frac{\omega \times K}{W_1} \leq 1$

se obtendría inmediatamente de la relación (4) que el valor del coeficiente de seguridad  $\nu_1$  Rotura/Trabajo a presión interna en la explotación de la obra, sería  $\nu_1 \leq 0$ , es decir, en esos tramos, cualquier presión en la tubería instalada, por pequeña que fuese, la rompería, sin contar con que, siendo también en este caso  $\nu_2 < 1$ , se rompería por aplastamiento antes de entrar en carga.

## DE LA REDUCCION DEL COEFICIENTE DE IGNORANCIA EN EL COMPORTAMIENTO DE LAS TUBERIAS EN OBRA

Y como comparación de procedimiento:

$$\begin{array}{l} v_p = 4 \\ v_a = 1,13 \end{array} > \begin{array}{l} v_1 = 0,90 \\ v_2 = 0,98 \end{array} \quad \text{se rompe}$$

$$\begin{array}{l} v_p = 5 \\ v_a = 1,29 \end{array} > \begin{array}{l} v_1 = 2 \\ v_2 = 1,15 \end{array} \quad \text{insuficiente}$$

$$\begin{array}{l} v_p = 2,5 \\ v_a = 2,6 \end{array} > \begin{array}{l} v_1 = 2,13 \\ v_2 = 2 \end{array} \quad \text{suficiente}$$

Queda bien aclarada pues la indiscutible superioridad del procedimiento que nos permite la obtención de los coeficientes de seguridad  $v_1$  y  $v_2$  de explotación".

### BIBLIOGRAFIA

DIN 19.800:

Tubos de Amianto-Cemento con presión interna (1973).

ISO 2785:

Elección de tubos de Amianto-Cemento sometidos a cargas exteriores con y sin presión interna. Suiza (1975).

KURT HUNERBERG:

Tubos de Amianto-Cemento.

MARSTON, ANSON:

The Theory of External Loads on Closed Conduits.

MICHATZ, J.:

Prueba de la capacidad portante de los tubos de Saneamiento de Amianto-Cemento.

VOELLMY, A.:

Eingebettete Rohre. (Statistische Untersuchung überschütteter). Leitungen mit Berücksichtigung ihrer Elastizität.

Bemessung und Bruchsicherheit von Rohrleitungen, insbesondere von Asbestzementleitungen, S B Z.

WETZORKE, M.:

Über die Bruchsicherheit von Rohrleitungen in parallelwandigen Gräben.