

# Notas técnicas

Nota técnica 2.130

Asunto: Rendimiento

estructural de  
tubos corrugados  
de polietileno usando la solución de  
Burns y Richard

Por: James B. Goddard, Norman E. Kampbell  
y David P. Kozman



---

## INTRODUCCIÓN

En 1964, Jerome Burns y Ralph Richard presentaron un artículo revolucionario sobre la "Atenuación de esfuerzos para cilindros enterrados" que proporcionó un mejor entendimiento de los esfuerzos alrededor de un tubo enterrado. Este análisis se aplica a estructuras enterradas a gran profundidad en que la estructura está hecha de un material elástico y se supone que el suelo es un medio elástico. La rigidez circunferencial del tubo, la rigidez de flexión del tubo y la transferencia de carga entre el suelo y el tubo influyen en las cargas, tanto en magnitud y dirección (cargas de tracción o compresión). La solución se aplica a cualquier tubo enterrado en un medio linealmente elástico.

Los parámetros del medio elástico son el módulo de elasticidad ( $E'$ ), la razón de Poisson del suelo ( $\mu$ ), el módulo forzado ( $M'$ ) y la razón de esfuerzos laterales ( $K$ ). Estos parámetros están relacionados por las ecuaciones siguientes:

Hay dos constantes adicionales relacionados con la razón de fatiga lateral:

= razón de esfuerzos laterales simétricos

y

= razón de esfuerzos laterales antisimétricos

Los parámetros de los tubos son el radio medio del tubo, la rigidez circunferencial y la rigidez del tubo (rigidez de flexión). La rigidez circunferencial (o rigidez de compresión de los anillos) viene dada por la ecuación:

siendo:

$E_{RC}$  = el módulo de compresión del material del tubo  
(lb/pulg<sup>2</sup>)

A = el área unitaria de la pared del tubo (pulg<sup>4</sup>/pulg)

R = el radio medio (pulg)

La rigidez del tubo (o rigidez de flexión de los anillos) viene dada por la ecuación:

siendo:

$E_f$  = el módulo de flexión (lb/pulg<sup>2</sup>)

$I$  = el momento de inercia de la pared del tubo (pulg<sup>4</sup>/pulg)

$R$  = el radio medio (pulg)

Los parámetros de interacción de la estructura del suelo se definen como la razón de flexibilidad de anillos, UF, siendo:

y la razón de flexibilidad, VF, siendo:

UF es una medida de la flexibilidad relativa del tubo y el suelo bajo cargas de interacción uniformes. VF es una medida de la flexibilidad relativa del tubo y el suelo bajo diversas cargas de interacción radiales y tangenciales.

#### **ENTRADAS DE ARCHIVO**

El archivo adjunto, Burns and Richard Solution.xls, requiere la introducción de las propiedades y dimensiones de los tubos y el suelo.

Las entradas del tubo son:

diámetro exterior (D) en pulgadas

espesor (t) en pulgadas - es el espesor total de la pared

área unitaria de la pared (A) en pulg<sup>2</sup>/pulg

momento de inercia (I) en pulg<sup>4</sup>/pulg

módulo de flexión (E') en lb/pulg<sup>2</sup> - para la resina;

típicamente 110.000 lb/pulg<sup>2</sup> para HDPE

módulo de compresión (E<sub>rc</sub>) - para HDPE; típicamente > 110.000

lb/pulg<sup>2</sup>

distancia del diámetro interior al eje neutral (c) en

pulgadas

Las entradas del suelo son:

**módulo de elasticidad del suelo en lb/pulg<sup>2</sup>:** se basa típicamente en los valores E'<sub>s</sub> del programa CANDE y trabajo de Duncan y Hartley. Los valores del módulo del suelo se indican en la Tabla 1 del programa CANDE.

**razón de Poisson, (μ):** varía típicamente de 0,30 a 0,35 para suelo granular en buenas condiciones, de 0,30 a 0,40 para suelos mixtos, de 0,35 a 0,40 para suelos cohesivos. Para agregados nivelados densos muy compactados, la razón de Poisson puede ser hasta 0,2, pero éstos deben ser casos especiales. CLSM o CDF puede proporcionar valores hasta 0,15.

**peso unitario del suelo (densidad):** varía de 100 a 150 lb/pie<sup>3</sup>, dependiendo del tipo de suelo y los esfuerzos de compactación (los casos especiales, tales como los vertederos pueden variar ampliamente, hasta 40 lb/pie<sup>3</sup>) altura de la cubierta en pies por encima de la parte superior del tubo para la instalación.

#### **SALIDAS**

Después de introducir toda esta información en la hoja de cálculo, se obtienen resultados desde a línea de arranque horizontal (0°) a la parte superior (90°) a la línea de arranque horizontal (180°). La presión del suelo radial ( $P_r$ ), flexión radial ( $w$ ) (duplicada para proporcionar la flexión total), flexión tangencial ( $v$ ), empuje circunferencial de la pared ( $N$ ) y momento de flexión de la pared ( $M$ ) se calculan usando el análisis de Burns y Richard (vea la Figura 1). A partir de estos resultados se pueden generar los esfuerzos de compresión de anillos, esfuerzos de flexión interiores de las paredes, esfuerzos de flexión exteriores de las las paredes, esfuerzos totales (pared interior y exterior; vea la Figura 2), deformación de la pared por compresión, acortamiento de anillos, flexión vertical total, flexión horizontal total y acortamiento circunferencial.

**Figura 1:** Diagrama del perfil del tubo.

PARED EXTERIOR  
NO DISPONIBLE  
PARED INTERIOR

ESFUERZOS DE COMPRESIÓN DE ANILLOS  
+ ESFUERZOS DE FLEXIÓN  
= ESFUERZOS TOTALES

**Figura 2:** Distribución de esfuerzos en el perfil del tubo

Se pueden aprender muchas cosas de los gráficos de flexión de tubos en función de la rigidez de los tubos; momento en función del tubo; empuje en función de la rigidez del tubo; tensión en función de la rigidez del tubo; y compresión en función de la rigidez del tubo. A medida que aumenta la rigidez del tubo también lo hace el momento, tensión de empuje y compresión en la pared del tubo. Todas las cosas permanecen constantes, a medida que aumenta la rigidez del tubo la flexión cambia muy poco; es la rigidez del suelo la que define el rendimiento de flexión. Por lo tanto, puede decirse que un tubo que cumpla mejor con las condiciones es un tubo que estructuralmente es más capaz.

Para el ingeniero de diseño, los límites de flexión vertical determinarán típicamente los límites de diseño. Sin embargo, también se deben comprobar otros parámetros. El acortamiento circunferencial debe limitarse a menos del 2%. Bajo esfuerzos totales, los esfuerzos sobre las paredes interior y exterior deben limitarse a menos de 1.000 lb/pulg<sup>2</sup> de esfuerzos de tracción y 3.000 lb/pulg<sup>2</sup> de esfuerzos de compresión.

## RESUMEN

Esta hoja de cálculo proporciona una herramienta eficaz para el ingeniero de diseño. Los límites de instalación basados en la flexión, pandeo y acortamiento circunferencial pueden ser seleccionados por el diseñador, basándose en su experiencia con las instalaciones de los tubos. Permitirá predecir con más exactitud el rendimiento de los tubos que los métodos tradicionales, particularmente la "Fórmula de Iowa" para tubos termoplásticos.

Los problemas de la fórmula de Iowa:

- son:
1. Se supone que la rigidez total (resistencia a la deformación) del sistema de interacción del suelo con los tubos puede estimarse sumando las rigideces separadas del tubo y del suelo. Es mucho más complicada.
  2. La rigidez del tubo se compone de la rigidez del material (E) y una rigidez geométrica ( $I/R^3$ ). La rigidez del suelo (E') es sólo una rigidez de material.
  3. Se llega empíricamente a la rigidez del suelo (E') haciendo cálculos con las instalaciones existentes. Estos datos proceden de instalaciones con cobertura limitada; normalmente de 25' o menos. Esto hace que las extrapolaciones mucho más allá de los tubos estudiados sean vulnerables a los errores. SE usa típicamente un solo E' para un material de relleno y un nivel de compactación dados sea cual sea la profundidad, que está claramente equivocada.
  4. La carga (W) no es verdaderamente desconocida. Para tubos flexibles se toma a menudo como la carga de Marston;  $W = cIdyBcBd$  siendo  $c_d$  un coeficiente que depende de la profundidad en la zanja, el tipo de suelo de relleno y la naturaleza y extensión del arco del suelo; se lee típicamente de los cuadros preparados.  $B_c$  es el diámetro exterior del tubo y  $B_d$  es el ancho de la zanja.
  5. Para materiales viscoelásticos, como HDPE, el valor del módulo (E) usado típicamente se basa en un espécimen de flexión solamente. No hay consideración del efecto de compresión del aro y acortamiento circunferencial; que afectan el arqueado del suelo y, por lo tanto, la presión del suelo en el tubo.

La solución de Burns y Richard trata de estos asuntos y proporciona un análisis mucho más completo de la respuesta del tubo.

**Tabla 1. Valores predefinidos MATNAM y clases de suelo asociados para el modelo dependiente del material de recubrimiento**

<b>Módulo de Young (lb/pulg<sup>2</sup>) para presiones dematerial de recubrimiento</b>			
Suelo	psi = lb/pulg <sup>2</sup>	Razón de Poisson	Densidad (lb/pie <sup>3</sup> )
Granular			
Bueno	G. BUENO		
Regular	G. REGULAR		
Mixto			
Bueno	M. BUENO		
Regular	M. REGULAR		
Cohesivo			

Bueno        C. BUENO  
Regular      C. REGULAR

85% COMPACTION = COMPACTACIÓN DEL 85%

% de flexión  
Altura de la cubierta (pie)