

## **Deflección de Tuberías de Drenaje en las Pilas de Lixiviación Altas<sup>1</sup>**

por Mark E. Smith<sup>2</sup>

Tuberías de drenaje forman una parte íntegra en la mayoría de los sistemas de revestimiento de plataformas de lixiviación. Para lograr un funcionamiento apropiado de dichos sistemas, las tuberías deben mantener su integridad durante la vida útil de la plataforma, es decir, hasta llegar a una altura de más de 100 m. Su funcionamiento (de tuberías) en la profundidad depende tanto de la deformación de los suelos adyacentes, como de las propiedades de las mismas tuberías. Los dos métodos más comunes para calcular la deflección de tuberías incluyen la ecuación de Spangler y la solución de Burns-Richard, ambos basados tanto en las propiedades del suelo como en las propiedades de las tuberías en sus algoritmos previsibles. Sin embargo, ambos modelos así como las derivaciones de mismos se desarrollaron para las aplicaciones clásicas de ingeniería civil: las máximas profundidades de entierro de 5 a 20 metros bajo unas estructuras rígidas, tales como pavimentos o edificios. De tal modo, estos modelos se han calibrado según el comportamiento del campo conocido bajo estas condiciones, y típicamente con unas desviaciones máximas verticales aceptables de 5 a 7.5 por ciento del diámetro de la tubería. Desafortunadamente, todavía no se cuenta con los datos suficientes de funcionamiento en la profundidad.

Por ejemplo, aplicando la solución de Burns-Richard, una tubería corrugada de (doble) polietileno (de 150 mm de diámetro nominal) llega a las máximas condiciones aceptables a una profundidad aproximadamente de 24 m, correspondiendo a la desviación vertical de 7.5%. Sin embargo, tales valores presentan un límite pequeño para el diseño de una plataforma de lixiviación, donde la mayoría de los proyectos nuevos considera últimas alturas de 75 a 100 m. A continuación, los diseños nuevos que consideran una altura de 145 m y más requieren estándares nuevos. Las tuberías de polietileno modernas son obviamente más flexibles y tolerantes a la tensión en comparación con sus predecesores rígidos. Por lo tanto, unos mayores límites de desviación serían apropiados. Sin embargo,

---

<sup>1</sup> The Latin America Mining Record, Nov-Dec, 2003.

<sup>2</sup> Vice-Presidente de Vector Engineering, Inc., Operaciones en Sudamérica, Lima, Perú. smith@vectoreng.com.

existe un factor límite, que es un colapso total de la tubería que resulta en lo siguiente: (1) una reducción significativa del área de flujo disponible; (2) pérdida de capacidad estructural y separación posible de las juntas. Normalmente, la tubería sufre un hundimiento por el centro, y toma la forma de unos lazos (ver Figura 2b). De tal modo, se puede colocar la carga que causa tal deformación como la última aplicando un factor de seguridad para determinar el valor aceptable de la carga. Desafortunadamente, muy pocos datos son disponibles para la deflexión en condiciones de profundidad; además, se necesita verificación y calibración de modelamiento numérico en caso que los modelos actuales se extiendan más allá de sus límites históricos.

### Ensayos de Deflexión de Laboratorio

Actualmente, los ensayos de deflexión de alta carga han sido realizados por el laboratorio del autor con las cargas hasta 2 000 kPa (las condiciones simuladas aproximadamente de 100 a 120 m de profundidad de la pila) aproximadamente con 30 combinaciones de tuberías y suelo. Los ensayos se realizaron en una caja de 750 mm (de ancho) por 600 mm (de profundidad) por 500 mm (de altura). Se han realizado los ensayos con unas tuberías corrugadas de doble PE con las paredes interiores lisas de diámetro nominal de 100 mm, 150 mm y 180 mm, que representan las características más comunes de las tuberías de drenaje empleadas en las pilas de lixiviación.

**Tabla 1: Deflecciones de Laboratorio v, Calculados – Tubo de doble PE de 160mm**

Altura de Pila M	Deflexión Vertical, %		
	Laboratorio 23°C, plazo corto	Burns-Richard 23°C, plazo corto	Burns-Richard 50°C, plazo largo
20	4.3	5.0	8.0
40	7.2	8.6	13.3
60	11.6	11.6	17.6
80	13.8	14.3	21.5
100	15.2	16.8	24.9
120	19.2	19.2	28.1
140	ND	21.4	31.0

---

Nota: Grava compactada hasta 88% del Proctor estándar. El módulo de suelo calibrado a 120 m.

---

Colocando una cama de grava real o simulada, el grado de compactación se varía de 78% a 88% del Proctor estándar, representando un rango típico para las instalaciones observadas en el campo. Los resultados de los ensayos han mostrado unas deformaciones verticales en el rango de 6% a 54% del diámetro de la tubería inicial, con una correlación fuerte existente entre el grado de compactación inicial y la deformación vertical. Obviamente, la compactación de grava alrededor de la tubería aumenta el riesgo de daños a la geomembrana, sin mencionar los costos de la construcción. Sin embargo, para el caso de pilas altas, los datos de laboratorio y el modelamiento convencional indican que éste es un paso esencial para asegurar la durabilidad (el rendimiento) de las tuberías de drenaje.

Figura 1 presenta una muestra de estos datos. Hasta una deformación vertical aproximadamente de 30% (+/- 5% dependiendo del peso y el diseño estructural de la tubería), la tubería sufre un hundimiento de la grava adyacente, pero no demuestra algún cambio (lazo) notable. A continuación, sobre este nivel, la tubería empezaría a exhibir deformación tomando una forma binocular (ver Figura 2b). Obviamente, con el aumento de la carga por encima de 2 000 kPa, la durabilidad de tubería correrá un mayor riesgo. Los resultados de deflección de laboratorio se han comparado con la solución de Burns-Richard. Aplicando un valor calibrado para el módulo de suelo (notablemente, el parámetro más difícil de definir), la solución de Burns-Richard aparenta ser confiable con las cargas mayores (ver Tabla 1). En todo caso, es aplicable para las cargas a corto plazo y las temperaturas ambientales normales.

**Tabla 2: Módulo de Elasticidad de Polietileno**

Temperatura °C	Módulo de Elasticidad, mPa	
	Plazo Corto	Plazo Largo
23	990	240
30	860	200
45	640	120
50	510	110

**Deformación Longitudinal y Temperaturas Altas**

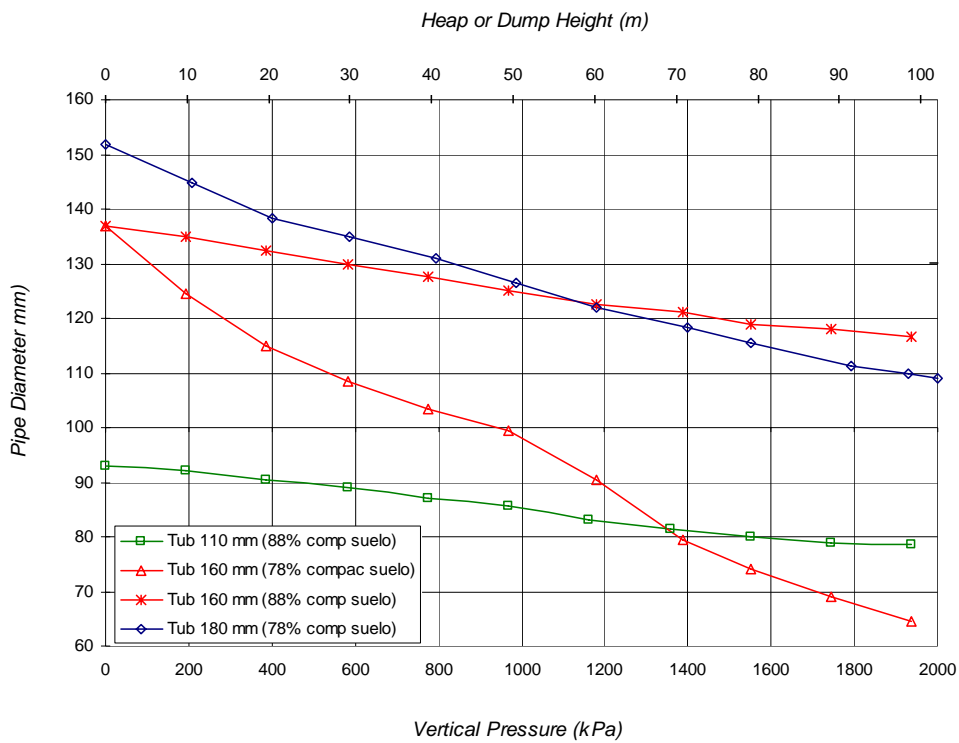
Asumiendo que la solución de Burns-Richard es confiable para los casos de extrema profundidad (como muestran los datos de laboratorio), se puede estimar el efecto de carga a plazo largo y temperaturas altas a base del mismo modelo. El módulo de elasticidad determina la resistencia de tubería, y este módulo depende tanto del tiempo, como de la temperatura. De este modo, se puede lograr una reducción del módulo de 50% aumentando la temperatura de 23°C a 50°C. Ultimos modelos de las pilas de sulfuro de cobre sugieren que las temperaturas cerca del sistema de drenaje llegan de 40 a 50°C. Los efectos de deformación longitudinal de largo plazo, sin tener en cuenta la temperatura, pueden reducir el módulo por un factor de cuatro o cinco. Tabla 1 resume las soluciones de Burns-Richard tanto para las condiciones normales, como para éstas de temperaturas elevadas a largo plazo. Tabla 2 resume los valores típicos del módulo de polietileno. Dichos resultados asumen que las propiedades del suelo no cambian a través del tiempo o los cambios de temperatura; una suposición que puede ser poco conservativa.

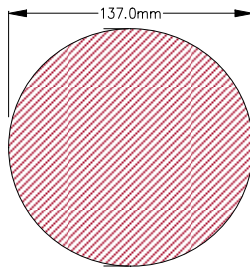
Aplicando un valor típico de 25% a 30% para la deflexión de lazos y las predicciones de Burns-Richard, es obvio, que las tuberías consideradas como seguras para los casos de instalaciones a corto plazo y temperaturas bajas (deflexión de  $\approx 21\%$  a 140 m de profundidad) pueden perder el factor de seguridad bajo las temperaturas actuales y las cargas a plazo largo (deflexión de  $\approx 31\%$ ).

**Foto 1: Equipo de Ensayos de Deflección de Tuberías**

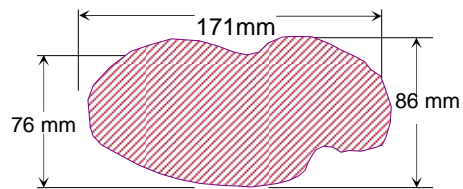


**Figura 1: Curvas Típicas de Carga-Deflección para Tubería de Doble PE**



**Figura 2: Sección Transversal de Tuberías después del Ensayo (Carga de 2 000 kPa)**

(a) Con 88% de compactación del proctor en la base (cadera), 15% de deflexión vertical



(b) Con 78% de compactación del proctor en la base (cadera), 54% de deflexión vertical

### Resumen

Para el proceso de lixiviación en pilas se requiere un sistema de drenaje de la solución rica confiable, tanto para la recuperación de metal óptima, como para el control de estabilidad y filtraciones. La tecnología moderna levantó la altura típica de las pilas hasta 100 metros, y la tendencia es para ir aún más profundo. Los diseños que actualmente se encuentran en desarrollo concideran las pilas de más de 145 metros de profundidad, pasando de lejos los límites conocidos de funcionamiento de tuberías. Los métodos estándares ya no son aplicables para el diseño de tuberías enterradas, sin embargo, todavía no se desarrolló ningún método nuevo.

**Foto 2: Tuberías después de la Carga de 2 000 kPa**

El autor del presente artículo propone un nuevo estándar a base de la deflección de lazos de las tuberías. Sin embargo, para que dicho método sea confiable, se deben saber bien las propiedades del suelo y se requiere la calibración del modelo numérico seleccionado según los datos actuales de laboratorio. Actualmente, se encuentran en desarrollo los ensayos de laboratorio para medir la deflección de tuberías bajo las condiciones de temperaturas altas y cargas mayores. Con la calibración y base de datos creciente, este modelo puede ser empleado para la evaluación de tales cambios, como son las deformaciones longitudinales; temperaturas altas; variaciones del diámetro de tuberías; profundidades diferentes de la pila; materiales de revestimiento (cama) de tubería; y las condiciones (el grado) de compactación.