



**Título:** Recomendaciones de diseño para redes y acometidas de alcantarillado para ser construidas con TECNOLOGÍAS SIN ZANJA – Experiencias del Contrato Centro Parrilla Grupo 4 ejecutado por Ingeniería y Contratos SAS para Empresas Públicas de Medellín.

**Autor:** Carlos Eduardo Duque Escobar

## 1. Resumen

El Proyecto Centro Parrilla consiste en la renovación de más de 35 km de alcantarillado y 41 km de tuberías de abastecimiento de agua en el centro de la ciudad de Medellín (Colombia), realizado por Empresas Públicas de Medellín. Debido a las condiciones locales (alta circulación vehicular y peatonal, presencia masiva de comercio formal e informal e infraestructura enteramente subterránea preexistente con información parcial), una combinación de zanja abierta y métodos sin zanja como tubería curada en sitio (CIPP), fracturación de tuberías (pipe bursting), microtunelación, tubería doblada y formada (close fit lining), y perforación horizontal dirigida (PHD), fue elegida por los diseñadores.

Este trabajo proporciona retroalimentación para los diseñadores con base en la experiencia de campo de contratistas de este proyecto, quienes debieron conformar un equipo de profesionales para la revisión de diseños con el fin de garantizar la fluidez de los trabajos y la mejor utilización de los equipos requeridos para estas tecnologías

## 2. ÍNDICE

### 1. Resumen

### 2. ÍNDICE

### 3. INTRODUCCIÓN

### 4. DESARROLLO - Tecnologías Sin Zanja aplicadas en el proyecto y experiencias de diseño

#### 4.1. *Construcción de redes de alcantarillado con tecnología de Micro tunelación con Pipe Jacking.*

- 4.1.1. Aspectos geotécnicos fundamentales para un buen diseño.
- 4.1.2. El diseño de áreas requeridas para ubicación de equipos.
- 4.1.3. Investigación de redes que podrían interferir con el microtunel.
- 4.1.4. Desviaciones de la tubería

#### 4.2. *Construcción de redes de acueducto con tecnología de Perforación Horizontal Dirigida*

#### 4.3. *Rehabilitación de tuberías de alcantarillado con tecnología Tubería Curada en sitio con rayos ultra violeta (CIPP-UV)*

- 4.3.1. Ajustar la calificación del grado de deterioro de la tubería a partir de la televisación con CCTV.
- 4.3.2. Cálculo del espesor equivalente para rehabilitación con tecnología CIPP – UV
- 4.3.3. Lavados y televisualizaciones

#### 4.4. *Tecnología de curado con calor para acometidas (CIPP-Calor)*

### 3. INTRODUCCIÓN

El 27 de mayo de 2014 Ingeniería y Contratos SAS presentó a Empresas Públicas de Medellín ESP propuesta para la “Modernización y reposición de las redes de acueducto y alcantarillado en el sector denominado Centro Parrilla y Circuito Orfelinato y obras complementarias en redes de energía, telecomunicaciones y reconstrucción de andenes – Grupo 4 que Comprendió la construcción, modernización, reposición y referenciación de las redes de acueducto y alcantarillado entre las Calles 44 y 51 y entre Carreras 46 y 62. Para redes de alcantarillado los proyectos denominados Guayaquil, Guanteros, Coberturas Calles 51 y 49.

Para la ejecución del contrato, si bien existían diseños de detalle, el contratista tenía la responsabilidad de complementar la investigación de campo tendiente a verificar la localización exacta de las redes existentes para prevenir posibles daños al construir las redes nuevas, así como verificar los informes de televisación de redes y revisión de los diámetros de las redes existentes a ser rehabilitadas.

Las principales tecnologías SIN ZANJA que estaban previstas dentro del alcance del proyecto, fueron:

#### 3.1 Construcción de redes de alcantarillado con tecnología de Micro tunelación con Pipe Jacking.

El contrato tenía prevista la ejecución de cerca de 3.300 ml de micro túnel en unos 53 tramos con diámetros de 400mm hasta 900 mm. Para la ejecución del trabajo se requería contar con una tuneladora para Pipe Jacking tipo slurry y su equipo complementario como son: el contenedor de operación, estación de empuje, generador de 400 KVA, equipo de pozo, bombas de lodos y de achique de agua del pozo, caudalímetro, tuberías de slurry, mangueras hidráulicas y cables eléctricos para introducir por dentro de la tubería con sus respectivos contenedores de almacenamiento, planta de separación de arenas y gravas, volco para almacenamiento de arenas y gravas de excavación, carro tanque para retiro de lodos de perforación colmatados con arena fina, limo y arcilla, contenedor con equipos para almacenar materia bentonita, producirla, almacenarla en húmedo e inyectarla en el micro túnel, grúa telescópica, montacargas, equipo de soldadura y tubería Jacking Pipe, Para la inyección de lechada de cemento se requirió de una unidad de mezclado e inyección de lechada de cemento.. Como equipo de apoyo de diseño se requería de geo radar, bastón de localización, equipo de topografía y sistema laser.

#### 3.2 Construcción de redes de acueducto con tecnología de Perforación Horizontal Dirigida.

En el contrato se estipulaba la construcción de cerca de 950 m de PHD en diámetros de 150mm y 300 mm. Para esto se requería de un equipo de PHD, equipado con la respectiva tubería de perforación, las brocas de PHD con el sistema de sonda y localizador electromagnético de precisión. Además de esto se requerían los reamer, barriles y equipo de termo fusión.

#### 3.3 Rehabilitación de tuberías de alcantarillado con tecnología Tubería Curada en sitio (CIPP-UV)

Se tenía previsto la rehabilitación de cerca de 3.500m de tubería de alcantarillado en diámetros de 250mm hasta 900mm.

Como actividad complementaria se requería el lavado de la tubería con equipos de Succión, presión, televisación de la misma para verificar la calificación del estado de la misma, establecer obstáculos a retirar y otros daños de la tubería, así como la ubicación exacta de las acometidas para su posterior reapertura para lo cual era necesario contar con camiones de succión presión, de taponamiento de las tuberías, de bombeo, equipos de CCTV y Robots de fresado.

#### 3.4 Rehabilitación de acometidas de alcantarillado con tecnología Tubería Curada en sitio con calor (CIPP-Calor)

Se tiene previsto la rehabilitación de cerca de 1.200m de acometidas de alcantarillado en diámetros de 150mm y 200mm.

Era responsabilidad del contratista tener disponibles los equipos para la ejecución de la obra y de manera especial aquellos necesarios para la ejecución de las tecnologías Sin Zanja. En este orden de ideas, y teniendo en cuenta que desde entre los meses de septiembre y octubre de 2014 se nos aceptó la propuesta para la ejecución del grupo 4, formalizamos la compra de los equipos para lo que habíamos iniciado el proceso de investigación desde hacía ya tres meses. En este orden de ideas fue necesario emprender una estrategia de inserción en las nuevas tecnologías para lo cual viajamos a diferentes partes del mundo para visitar proveedores, observar los equipos de tecnología sin zanja ejecutando los trabajos en condiciones reales, en especial aquellos que ofrecían las mayores dificultades. La

selección de la mejor tecnología para cada caso fue uno de los hitos más importantes para asegurar el éxito en la prestación del servicio que nos estaba siendo encomendado por Empresas Públicas de Medellín.

#### **4. DESARROLLO - Tecnologías Sin Zanja aplicadas en el proyecto y experiencias de diseño**

Debido a la magnitud del proyecto, a la obligación contractual de hacer las investigaciones de campo necesarias para evitar daños a las redes y estructuras subterráneas existentes, al requerimiento de pliegos o de las buenas prácticas profesionales de verificar la funcionalidad posibles afectaciones a los usuarios En cada una de las Tecnologías Sin Zanja aplicadas en el proyecto se tuvieron experiencias de diseño que vale la pena resaltar para ser tenidas en cuenta en otros proyectos que pueden ser ejecutados con este tipo de tecnologías.

Las temáticas más importantes son:

- Menor afectación socio ambiental
- Menor tiempo de construcción.
- Menor afectación al tráfico peatonal y vehicular.
- Eliminación de obstáculos insalvables con otras tecnologías.
- Menores riesgos para el personal y estructuras aledañas que los que se presentarían en excavaciones profundas.
- Menores costos de construcción o rehabilitación que los que se presentarían en muchos casos, especialmente cuando se trata de redes profundas.

Las experiencias en cada una de las tecnologías se detallan a continuación:

##### **4.1. Construcción de redes de alcantarillado con tecnología de Micro tunelación con Pipe Jacking.**

###### **4.1.1. Aspectos geotécnicos fundamentales para un buen diseño.**

El primer reto era la selección del equipo a ser utilizado para la ejecución del trabajo dado que por ser la nuestra una empresa con un área técnica con fortalezas en el área de Geotecnia y en el área de equipo y maquinaria por disponer de más de 120 máquinas amarillas de construcción y de transporte para ejecución de nuestras propias obras, fue nuestra decisión adquirir nuestros propios equipos de Tecnología Sin Zanja.

En ese orden de ideas nos basamos en artículos técnicos como este:

Según Steven Hunt y Don Del Nero (Hunt & Del Nero, 2012):

###### **“Microtunneling in Gravel, Cobbles and Boulders”**

*TRADUCCIÓN...*

*“Quizás la condición de terreno más difícil para microtunelación es un frente de tunelación lleno de grava húmeda, sin cohesión, de alta permeabilidad con bolos y cantos rodados (GCB). Esta condición del terreno aumenta el riesgo de impactos potenciales tales como: una cámara de excavación atascada (ver Figura 1); alto par o torque de taladrado de la micro tuneladora (MTBM); excesiva sobrecarga que resulta en la pérdida de techo en la sección del microtunel generando potenciales daños por asentamiento del terreno y sumideros; reducciones significativas de las tasas de avance de la MTBM; daño excesivo generado por abrasión generado a los cortadores, a la cabeza de corte, a las barras de trituración de roca, a los puertos de la entrada, y al sistema de inyección de lechada; y daños por vibración de impacto a los engranajes y cojinetes de la MTBM. El riesgo de estos impactos potenciales puede hacer que la microtunelación no sea aconsejable, pero al menos requiere el uso de medidas especiales para ayudar a que ésta sea más manejable.”*

Conscientes de la importancia de la investigación geotécnica realizamos entre los meses de septiembre y octubre de 2014, 4 meses antes de la fecha de iniciación del contrato, iniciamos una investigación mediante nichos excavados hasta la profundidad de interés y pudimos concluir que cerca del 50% de los tramos a ser ejecutados con microtunelación Pipe Jacking serían excavados en terrenos con alta presencia de cantos y

bolos, además de gravas, arenas, limos y arcillas en diferentes combinaciones. Este fue un insumo fundamental en la selección de una tuneladora de alto torque e hizo parte de los términos de negociación con el fabricante que posteriormente resultaron ser determinantes para reclamar las garantías del caso puesto que el nivel de exigencia del equipo fue el máximo. Para la investigación utilizamos sistemas de entibado mecanizado para un rápido avance en profundidad y máxima protección de nuestra gente. En la Figura 1 se observa el proceso de investigación y la interacción de la tuneladora con el terreno previsto.

El nivel de detalle de las investigaciones preliminares a la perforación de cada tramo de microtúnel, excavando previamente nichos de exploración cada 25 a 35m, nos permitía establecer cuantos bolos y cantos nos encontraríamos por cada metro de microtúnelación y un orden de idea sobre la resistencia de las rocas más duras con valores inferiores a los 100 MPA.



Figura 1- Investigación geotécnica para determinación de presencia de cantos y bolos

Pudimos concluir que la información geológica y geotécnica para proyectos a ser construidos con cualquier tecnología de construcción de tuberías con tecnologías como micro túnel o perforación horizontal dirigida debe ser obtenida mediante la excavación de nichos que alcancen la profundidad de interés con el objeto de extraer, medir, observar, contar y clasificar granulométricamente las muestras de suelo extraídas.

Existen varias clasificaciones internacionales de carácter geotécnico para los tamaños de los granos o partículas del suelo.

La mayor afectación al avance de estos equipos efectivamente tiene que ver con los cantos (0,065m a 0,20m) y bolos (0,20m a 3,0m), que para nuestro caso tenían tamaños de hasta 0,8m. No solo el tamaño es importante, también es fundamental conocer la dureza de los cantos y bolos de roca puesto que resistencias a la compresión mayores a 120 MPA producen grandes daños a las herramientas de corte de las tuneladoras y de las brocas o barrenos de PHD. También se deben hacer ensayos de la resistencia al desgaste que ofrecen gravas, cantos y bolos para calcular la velocidad de desgaste de la herramienta. La investigación geotécnica se debe complementar con los ensayos normales de suelos y sin embargo, las mayores afectaciones al rendimiento de los equipos y por ende al costo de los mismos, tienen que ver con los cantos y bolos que si pretenden ser investigados con equipos de perforación por roto percusión, destruyen la muestra y no permiten conocer su tamaño real, dureza y cantidad por metro de microtúnel.

#### 4.1.2. El diseño de áreas requeridas para ubicación de equipos.

El segundo elemento fundamental en la construcción de microtúneles, valido también para PHD tiene que ver con la investigación de redes y la definición de los sitios donde se construirán los pozos de ataque y de extracción de la tuneladora. En ninguno de los diseños que hemos recibido para cotizar la construcción de redes con microtunelación pipe Jacking han sido consideradas correctamente las áreas requeridas para la instalación del equivalente a 8 contenedores de 20 pies más las áreas necesarias para almacenamiento de hasta 30 tubos de 2,0m de longitud por 0,8m de diámetro para microtúneles de  $D=600\text{mm}$ , esto sin contar las áreas para ubicar una grúa, parquear diariamente una tractomula con carrotanque que debe evacuar los lodos de perforación a ser retirados y un grupo de excavadora y volqueta dobletrque para estar evacuando el volco donde se desechan los granulares resultantes de la microtunelación.

Como se observa en el grupo de imágenes de la Figura 2, se requiere de un área de 60m x 5m para la disposición de los equipos que se requieren para la construcción de alcantarillados de 600 mm de diámetro con esta tecnología. Para diámetros mayores, estos requerimientos también aumentan.



Figura 2 – Imágenes de montajes típicos de equipos de microtunelación.

Se requiere de 10 a 15 días para su terminación de un tramo típico de microtunel y si se lanza para ambos lados este se duplica y el diseñador debe tener en cuenta que en lo posible se debe interferir la entrada a un parqueadero y se debe habilitar la entrada a locales comerciales de alto flujo de carga especialmente.

#### 4.1.3. Investigación de redes que podrían interferir con el microtunel.

En cualquier ciudad de Latinoamérica y muy posiblemente, del mundo existe un alto grado de incertidumbre sobre la ubicación de redes y estructuras enterradas que pueden verse afectadas gravemente con la construcción de microtúneles y más aún, poner en riesgo el equipo y la vida de los operarios. Para una correcta investigación de redes son fundamentales tres estrategias que en conjunto garantizan una exitosa investigación:

- Equipos de localización como el georadar y el batón de localización electromagnético

- Un profesional experto conocedor de las redes de servicios públicos locales complementado con la consecución de los planos de ubicación de redes y acometidas subterráneas de acueducto, alcantarillado, energía, telecomunicaciones, gas y otras estructuras como fundaciones de infraestructura de transporte y edificaciones.
- Excavación de nichos complementarios de investigación de redes.

El uso integrado de estas tres herramientas es fundamental y cualquiera que se descuide afectará gravemente el resultado.

Con base en lo anterior se hace un levantamiento topográfico de detalle y con base en esto lo más recomendable es generar planos de diseño en 3D para visualizar de manera ágil y certera las posibles interferencias.

#### **4.1.4. Desviaciones de la tubería**

En tecnologías como microtúnel, PHD y Pipe Bursting se presentan desviaciones en el alineamiento de la tubería relacionados frecuentemente con la presencia de bolos, cantos, gravas, suelos muy blandos o inestables además de otras redes y estructuras. Durante el hincado de la tubería durante el proceso de microtunelación se empuja una línea de tubos que a la vez empuja la tuneladora para su avance con fuerzas que frecuentemente superan las 100 toneladas para el caso de tubos de  $D=600\text{mm}$ . Teniendo en cuenta que la corona de corte de la tuneladora tiene un diámetro que supera en unos 5 cm los tubos de hincado, durante el proceso de tunelación estos se desacomodan por ser un conjunto simplemente articulado quedando estos en una posición final que casi nunca es igual a la que se tiene durante el proceso de hincado. El resultado final es que en muchas ocasiones la tubería queda con desviaciones mayores a  $\pm 2,5\text{cm}$

Es muy importante contar con herramientas que permitan determinar el orden de magnitud de las desviaciones, evaluar estas y determinar la funcionalidad de la tubería. Por esta razón el diseñador debe considerar desde el diseño inicial que el  $Q/Q_0$  sea inferior a 0,7 para que con esta holgura se minimice el riesgo de presurización de la tubería por posibles desviaciones durante el proceso de construcción.

## **4.2. Construcción de redes de acueducto con tecnología de Perforación Horizontal Dirigida**

El método de Perforación Horizontal Dirigida (P.H.D) es un sistema constructivo sin zanja con el cual se puede realizar la instalación de tuberías, ductos o cables en distancias de hasta 1km (con equipos de gran tamaño y capacidad), lo cual permite sortear obstáculos naturales o construidos por el ser humano, minimizar el impacto socio-ambiental de las obras y acelerar los procesos de construcción, especialmente en zonas con densidad poblacional alta, tráfico alto, grandes profundidades, condiciones de acceso difíciles y movilidad limitada por la disponibilidad de espacio para realizar un manejo seguro y adecuado.

El proceso se inicia con una perforación piloto que se realiza con una broca o barreno usando barras roscadas desde un punto A donde se encuentra la máquina de PHD hasta un punto B donde se encuentra la tubería de polietileno a ser instalada después de que la perforación es ampliada con escarificadores de diferentes diámetros; posteriormente se ensancha la perforación halando escarificadores cada vez más grandes desde el punto B hasta el punto A hasta superar el diámetro externo de la tubería a ser instalada en por lo menos 4". Las recomendaciones de diseño para construcción de redes nuevas de acueducto o de alcantarillado con esta tecnología son las mismas referidas en el título 4.1, con alguna diferencia en cuanto al numeral 4.1.3 puesto que el equipo se reduce a la máquina de PHD, algunos tanques de agua y bentonita y la herramienta de PHD que si bien es pesada, no ocupa mayor espacio.

Otra recomendación de diseño a tener en cuenta se refiere a las perforaciones de ataque y de inserción de tubería que suelen ser de longitudes de unos 10m para tuberías diseñadas para ser instaladas a 1,50m de profundidad.

La instalación de tubería con este tipo de tecnología no es posible en terrenos con bolos, cantos y gravas no es posible a no ser que se cuente con un equipo de gran capacidad y de la herramienta adecuada. Sin embargo en este tipo de terreno se presentan grandes desviaciones.



Figura 3 –Instalación de tubería con PHD

#### 4.3. Rehabilitación de tuberías de alcantarillado con tecnología Tubería Curada en sitio con rayos ultra violeta (CIPP-UV)

Para la ejecución de los trabajos de rehabilitación de tuberías con CIPP se adquirieron equipos de CIPP UV por cuanto es la tecnología de última generación que existe en el mercado.

Las ventajas de esta tecnología son:

- La manga es de fibra de vidrio y es producida e impregnada en una fábrica Alemana con altos estándares de calidad. La duración de la felpa antes de ser utilizada de 6 meses con garantía de fábrica pero se puede utilizar durante más de 12 meses si no es expuesta a largos períodos en condiciones de temperaturas mayores a 30 grados.
- La manga se fabrica con un plástico protector externo de alta resistencia mecánica y con barrera de protección a la luz con rayos ultra violeta. Tiene también un protector plástico interno transparente que se retira una vez se realice el curado.
- Se producen con resinas cuyo curado se activa con la aplicación de luz de determinada longitud de onda para desencadenar la reacción química (rayos Ultra Violeta) que son aplicados de manera controlada por sistemas computarizados.
- Para el curado se utiliza un tren de luces dotado de cámara de CCTV que permite revisar en tiempo real el proceso de inflado de la manga pudiendo corregir arrugas o suspender el proceso de curado en caso de algún error de medida del diámetro de la tubería.
- El tren de luces está dotado con varios sensores de temperatura, un sensor de presión, sensores de funcionamiento de cada una de las lámparas, sistema de control continuo de velocidad y medida de longitud avance que permiten un registro centímetro a centímetro de los parámetros de curado y video completo del proceso de curado.
- El producto resultante es una tubería de alto módulo de elasticidad lo que resulta en una tubería con un espesor menor al de una tubería CIPP curada con calor. Esta tubería de fibra de vidrio tiene características estructurales que permiten rehabilitar tuberías totalmente deterioradas con altas cargas del terreno, sobrecargas de tráfico y altas presiones hidrostáticas.
- El tiempo de curado es muy inferior al requerido para otras tecnologías de CIPP.
- La retracción durante el curado es inferior al 0,5% cuando la retracción para tecnologías de curado con vapor es superior al 3%. Esto se traduce en una manga más ajustada a la tubería huésped.
- La manga se introduce por la tubería existente y se hace sobre una lámina de polietileno de 0,5mm de espesor para evitar daños.

- La manga no se afecta con aguas de infiltración ni con descargas provenientes de acometidas debido a la protección de la gruesa membrana externa y a que la reacción de la resina no es por temperatura si no por la luz ultravioleta.

Las principales recomendaciones de diseño son:

#### **4.3.1. Ajustar la calificación del grado de deterioro de la tubería a partir de la televisación con CCTV.**

Se deben eliminar las calificaciones desfavorables producidas por daños tales como acometidas penetrantes, pegotes de concreto, raíces, empaques sueltos, por cuanto tales daños deben ser retirados previamente a la rehabilitación de la tubería.

No ajustar esta calificación se traduce en mayor espesor de la manga de manera innecesaria.

#### **4.3.2. Cálculo del espesor equivalente para rehabilitación con tecnología CIPP – UV**

Cuando se ha diseñado la rehabilitación con mangas para curado con calor, el módulo de elasticidad a largo plazo usualmente está entre 900 MPA (felpas con resina poliéster) y 3.000 (felpas con resina epóxica). Teniendo en cuenta que para las mangas UV de fibra de vidrio este módulo está entre 6.000 y 11.000 MPA, se debe reducir el espesor en función de la raíz cúbica de la relación entre dichos módulos.

#### **4.3.3. Lavados y televisaciones**

Para la ejecución de esta tecnología se requieren varias televisaciones y sus correspondientes lavados en caso de presentarse sedimentación o basura en la red.

- La primera de ellas se requiere para el chequeo inicial del tramo previo al pedido de la manga. Esta televisación es necesaria para revisar los daños a ser reparados y medida del diámetro de la tubería en vario sitios.
- La segunda se realiza para revisar las reparaciones previas a la instalación de la manga y en ella se mide la distancia y zona horaria de ubicación de las acometidas para su posterior reapertura.
- La tercera se realiza al momento de haber terminado la rehabilitación y apertura de las acometidas.



Figura 4 – CIPP UV

#### **4.4. Tecnología de curado con calor para acometidas (CIPP-Calor)**

La tecnología de CIPP, en la cual un textil impregnado con resina (denominado manga) es invertido en una tubería existente y reacciona para formar un revestimiento, fue introducida en Inglaterra hacia 1971 (Bueno, 2011). Dependiendo de los materiales empleados, la resina puede curar a temperatura ambiente, puede requerir una fuente



de calor como agua caliente o vapor de agua, o puede requerir la aplicación de luz de determinada longitud de onda para desencadenar la reacción química. El revestimiento así instalado puede prolongar la vida útil de la tubería en 50 años y mejorar las condiciones hidráulicas debido a una menor rugosidad, corrigiendo incluso filtraciones y daños estructurales de la tubería.

Para el caso del proyecto, se ha empleado resina poliéster y el curado se acelera con agua caliente. La manga, impregnada en sitio en un tráiler especial (ver 5, izquierda), se invierte desde la caja de registro, con un solo punto de acceso. El proceso se llevó con equipos livianos (peso < 80kg) y con un mínimo impacto socio-ambiental al evitarse por completo las excavaciones (ver Figura , derecha). Usando esta técnica se están rehabilitando cerca de 1.200m de acometidas domiciliarias de alcantarillado de 150mm de diámetro.



**Figura 5.** Izquierda: tráiler para impregnación y equipos auxiliares del CIPP de acometidas. Derecha: Fotografía tomada durante una rehabilitación de acometida domiciliar de 7m con CIPP.

Experiencias de diseño en la rehabilitación de acometidas con CIPP - Calor:

- Se alcanzaron rendimientos promedio de 4 acometidas por jornada independientemente de su longitud.
- Se minimizan demoliciones que habrían generar ruido y polvo con afectación a los usuarios.
- Se generó un precedente local para considerar esta tecnología en contratos con problemática similar.
- Se pueden rehabilitar acometidas con curvas.

## BIBLIOGRAFIA

Steven Hunt y Don Del Nero (Hunt & Del Nero, 2012)

- Microtunneling in Gravel, Cobbles and Boulders

TRENCHLESS TECHNOLOGY *SPECIAL SUPPLEMENT*

Von Roland Wacker (3R international (46) Heft 1-2/2007)

- Liner stressing: Notes from practice

FACHBERICHTE

