

Microtúneles

Jesús Díez de Ulzurrun Mosquera, Director del Saneamiento; Canal de Isabel II

La tecnología para instalar todo tipo de infraestructuras bajo el suelo ha mejorado espectacularmente en las últimas décadas en base a los sistemas “sin zanja”.

Cada vez las obras de canalizaciones a cielo abierto son más incompatibles con el elevado tráfico, tanto peatonal como de vehículos, por su incidencia sobre el bienestar de los ciudadanos. Con este sistema se pueden salvar también grandes barreras físicas y obstáculos que de otro modo se harían insalvables.

Lo que entendemos por “microtúnel” es un concepto constructivo que contiene una serie de características básicas a las que se unen la alta precisión, seguridad, economía y rapidez.

Características fundamentales de esta técnica:

- Construcción “sin zanja”, es decir, enterrada.
- Colocación de tuberías mediante hinca o empuje y otros sistemas alternativos.
- Control remoto de la ejecución, es decir, normalmente sin intervención humana en el interior del microtúnel sino pilotado desde el exterior. Las intervenciones en el interior son ocasionales (averías, mantenimiento, etc.).
- Aparte de los pozos de ataque y finalización ninguna otra afección superficial al tráfico, vibraciones, ruidos, medioambiente, etc.
- Minimización del volumen de material excavado con menor afección en cuanto a asentamientos.
- El nivel freático no es un obstáculo. No son necesarios abatimientos del mismo que puedan provocar asentamientos inducidos en superficie.

Existe cierta indefinición para situar el rango de diámetros de los “microtúneles” pero es una discusión improductiva ya que la tecnología no deja de avanzar y proponer mayores distancias y mayores diámetros sin necesidad de tripular los equipos de perforación. Actualmente podríamos situar en los casi cuatro metros el diámetro superior de este concepto constructivo. Para las microtuneladoras de

escudo cerrado de las que hablaremos posteriormente, se están alcanzando distancias de más de 1000 m en un sólo tramo (sin pozos intermedios).

Las utilidades del microtúnel son numerosas y abarcan soluciones para cableados eléctricos o de telecomunicaciones, redes de gas, de calefacción, aguas negras y de lluvia, transporte neumático de residuos u otros productos, captaciones y emisarios submarinos, redes de saneamiento y minería. A su vez podemos estar hablando de obras nuevas, ampliación de tramos, o incluso renovación total o parcial de líneas existentes.

Técnicas de ejecución

Se pueden enumerar las distintas técnicas que serán aplicables según las características del terreno, de la obra y del entorno:

- Hinca con camisa de chapa o perforación horizontal mediante “sin fin”.
- Raise-Boring
- Perforación horizontal dirigida (PHD)
- Hinca mediante empuje hidráulico con escudo.
- Hinca mediante escudo cerrado (microtuneladora).

Hinca con camisa de chapa o perforación horizontal mediante “sin fin”

Este método es técnicamente el más rudimentario, aunque también el más intuitivo. Consiste en empujar una camisa de chapa dentro del terreno mediante un sistema de avance, que puede ser bien neumático o bien hidráulico. No obstante, para optimizar la energía empleada, se pueden emplear lodos que lubrican el perímetro de contacto, minimizando el rozamiento. En este tipo de hinca no existe una cabeza de corte propiamente dicha, sino que se protege el avance con una pieza



especial denominada “cabeza excavadora” que protege al tubo.

Según la experiencia, existe una limitación en la longitud de esta técnica que ronda los 80-100 m. y un diámetro inferior a 1500 mm lo que la hace ideal por su menor coste para salvar obstáculos tales como autopistas, carreteras, vías de FFCC., campos de aviación, canales, canalizaciones entre edificios, etc...

Su coste directo rondaría entre los 400 €/m para 500 mm y los 1800 €/m para 1500 mm en terrenos de fácil excavabilidad. En caso de existir bolos estos precios pueden verse incrementados en un 20% y hasta un 80% si es roca. Los rendimientos medios esperados son de unos seis metros/día.

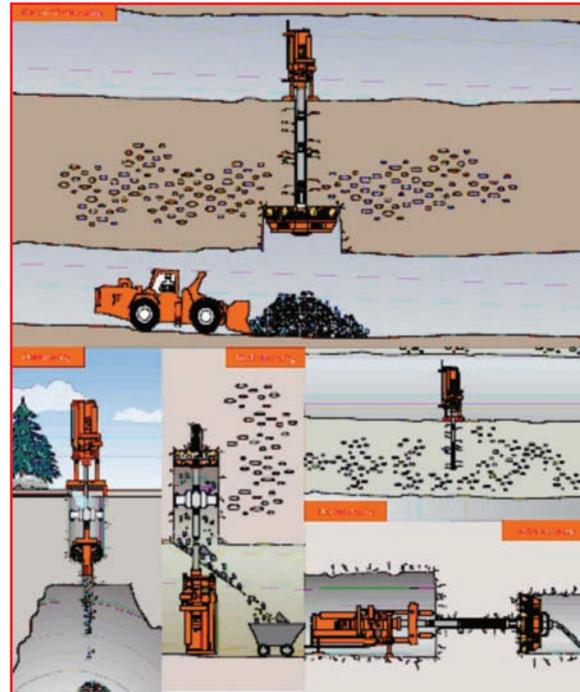
Raise-Boring

Este método de hinca proviene de la minería, y es muy utilizado para la ejecución de chimeneas de acceso a las galerías subterráneas. Este sistema se realiza en dos fases: la primera consiste en la excavación de un “taladro piloto” según el eje de la traza de proyecto. A continuación, se ejecuta la excavación en sentido contrario, tirando de la “cabeza escariadora” mediante el mismo sistema de varillaje introducido por el taladro piloto. El elemento de corte avanza dejando tras de sí un cilindro hueco perfectamente circular del

diámetro deseado. Este sistema no deja colocada tubería en la zona perforada.

En el siguiente esquema vemos las diferentes variantes del “raise boring”.

Este sistema tiene su aplicación más típica en la minería con rocas de dureza media y alta no demasiado alteradas (calizas, esquistos, gneis, granitos,..) y un rango de aplicación hasta los ocho metros de diámetro y los 1500 m de profundidad. Puede ejecutarse con casi cualquier inclinación entre los 0° y los 90° manteniendo casi siempre porcentajes de desviación por debajo del 1% y con máximos del 2,5% en función del tipo de roca.



Sus rendimientos medios están en los 12 a 20 m/turno para el taladro piloto “estándar”, entre tres y ocho metros/turno si dicho taladro piloto es dirigido y entre tres a cinco metros/turno para el escariado final.

Su coste directo estaría por los 400 €/m para un taladro piloto, 800 €/m si es dirigido y unos 1000 €/m para un escariado medio de 3000 mm (uno de los más usuales)

Perforación Horizontal Dirigida (PHD)

Es una técnica en constante avance que permite la instalación de tuberías (polietileno, acero o fundición) con el control absoluto de la trayectoria de la perforación y con la posibilidad de realizar trazados curvos. La “perforación horizontal dirigida” (PHD) se usa en general en redes urbanas de pequeño diámetro, de 100 mm a 500 mm y en redes de tuberías de hasta 1800 mm. La técnica se deriva directamente de la perforación tradicional añadiéndole la capacidad de localizar en todo momento la cabeza de perforación en sus 3 coordenadas espaciales y

por tanto ser capaces de guiarla. La mayoría de sus usos se relacionan con pequeñas profundidades (algunos metros) pero en algunos casos, con el equipo apropiado puede usarse a grandes profundidades.

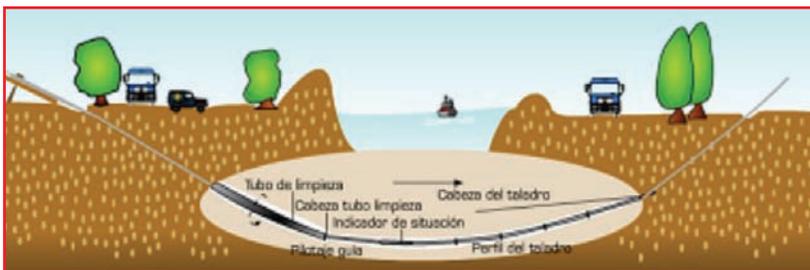
Con esta técnica es posible la instalación de tuberías en longitudes de hasta los 2000 m y diámetros de 1800 mm en función de una simple regla, la fuerza de tiro del equipo tiene un límite de diámetro y longitud. Véase la tabla de ejemplo en máquinas consideradas pequeñas. (Cuadro 1).

Cuadro 1

Fuerza de tiro (kN)	Máximo diámetro (mm)	Máxima longitud (m)
30	200	100
70	300	150
120	400	200
150	500	250
200	700	400
400	1.000	600

Hoy en día están en uso equipos de 250 T de tiro e incluso alguna de 500 T.

La perforación comienza en una pequeña cata, quedando la máquina siempre en superficie en todo momento. Se van introduciendo las varillas del taladro piloto a medida que avanza la perforación controlando desde la máquina tanto el empuje como el giro de las mismas.



Los ángulos de ataque y salida están relacionados con el diámetro de la tubería a instalar (se encuentran entre el 10% y el 30% de dicho diámetro) y el radio de curvatura que permite del material del que están hechas.

La perforación sigue la trayectoria prefijada por los técnicos y es posible su guiado porque la cabeza direccional está dotada de un transmisor que, mediante un receptor situado en la superficie, permite conocer su posición exacta en todo momento a través de la pantalla de un ordenador.

Una vez hecha la perforación piloto se sustituye el cabezal de perforación por sucesivos conos escariadores que aumentan el diámetro hasta la medida deseada.



Finalmente, alcanzado el diámetro requerido en el microtúnel, se engancha la tubería definitiva al varillaje y se arrastra hacia la perforadora.



En cuanto a rendimientos son habituales, por ejemplo, los 100 ml/día de media para un DN 200 mm, con puntas de hasta 300 m/día e incluso 500 m/día si el equipo dispone de una potencia de tiro grande (p.j. 250 Tn) y capacidad hidráulica de desescombro del suelo que se excava (se considera que se evacua un volumen de lodo de 3 veces el suelo excavado). Si el sistema es incapaz de hacer fluir estos volúmenes a la velocidad de tiro el túnel colapsará.

Los costes se mantienen relativamente bajos para los ritmos de trabajo que se consiguen hasta llegar a situaciones especiales como un emisario submarino de unos 500 m de longitud con perforación a 600 mm para tubo DN 400 mm ejecutado con máquina de 250 T de tiro puede alcanzar los 3000 €/ml.

En el siguiente cuadro se muestra una fórmula comparativa entre distintas técnicas para el coste unitario en diámetros desde 60 a 1260 mm. Estas curvas son el resultado de la extrapolación de resultados publicados por algunas Asociaciones Estatales de tecnología sin zanja en USA. La perforación horizontal dirigida se expresa con las siglas HDD (cuadro 2).

$$\text{UNIT COST} = KD^M + C$$

Where D = Diameter in inches and K, M and C are curve fit constants

	K	M	C	D MIN	D MAX	6	12	24	36	48
OPEN CUT	0.6	1.5	76	4	96	85	101	147	207	278
CIPP	0.77	1.5	25.9	6	108	37	58	116	193	282
SLIPLINE	0.71	1.5	40.1	6	120	51	70	124	194	278
HDD	0.31	2	32.9	2	42	44	78	211	435	
FOLD AND FORM	0.48	1.5	39.6	6	16	47	60			
DEFORM REFORM	0.38	1.5	20.4	8	12	36				
SPIRAL WIND	0.34	1.5	57	14	18					
BURST HYDRAULIC						26	82	171		
BURST PNEUMATIC	2.63	1.25	30.3	6	24	55	89	170		
BURST STATIC	0.67	1.25	79.52	6	20	85	93	114		
SPRAYED	5.16	0.75	13.6	8	20000	48	57	80	99	117

Cuadro 2

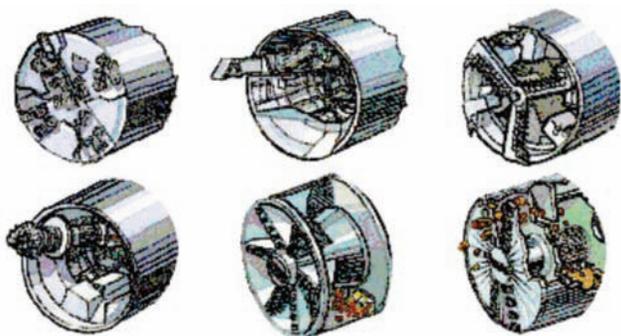
Hinca mediante empuje hidráulico con escudo

Tal vez sea éste el método de microtúnel con hinca de tubo más conocido. Con un sistema similar al de las tuneladoras convencionales, consiste en una cabeza de avance (escudo) que genera un frente de excavación, mientras expulsa el material que va rompiendo. Por detrás de esta cabeza avanzan los tubos gracias a unos gatos hidráulicos que empujan sobre el último de ellos.

Existen escudos de dos tipos diferentes:

- Escudo abierto
- Escudo cerrado

La diferencia principal entre estos dos es que el escudo cerrado utiliza como cabeza de corte un disco rozador del mismo diámetro que la hinca, mientras el escudo abierto se limita a un escudo más pequeño que actúa, eso sí, sobre toda la sección de corte. El escudo abierto puede disponer distintas herramientas de ataque: cazo, rozadora, etc.



Con el escudo cerrado se puede utilizar un sistema de inyección de lodos bentoníticos que crea un espacio presurizado entre la cabeza y el terreno mejorando notablemente las

prestaciones del sistema. De esta manera se consigue la perforación de arcillas con gran cantidad de agua o de terrenos cuyo nivel freático se encuentra por encima de la rasante de la tubería. El escudo abierto, por el contrario, deja comunicado el interior de la tubería con el frente de excavación, lo que limita de manera importante su utilización a casos concretos, aunque se recomienda su uso siempre que se pueda (sin presencia de nivel freático) debido al gran abaratamiento en coste. La gran innovación de este método con respecto a otros es la posibilidad que presenta de poder realizar giros y corregir desviaciones a medida que se avanza. Esto se consigue independizando el trabajo de cada uno de los cuatro gatos que empujan, lo que permite, jugando con las presiones de unos y otros, girar tanto en planta como en alzado. El mayor problema que presentan las hincas es que ante un imprevisto no se puede retroceder, ya que se coloca la tubería a medida que se avanza, con la consiguiente reducción de diámetro, por lo que si en algún momento se estropeará el sistema o fuera imposible continuar avanzando, sería necesario ejecutar un pozo para la extracción de la cabeza de corte.

A continuación se describe con más detalle la hinca mediante escudo cerrado ya que se trata de la técnica más importante empleada en el 90% de los casos.

Rangos de utilización

Los microtúneles con microtuneladora (MTBM's) sin intervención humana en el interior de la máquina se usan en redes de infraestructuras con un rango de diámetros de 500 mm a 4.000 mm y unas longitudes desde unos pocos metros a, según los últimos logros, más de 2.500 m.

Una vez alcanzado un cierto grado de concentración de partículas, y sobre todo cuando aumenta la resistencia a compresión simple del terreno, es aconsejable utilizar la técnica de microtunnelización con escudo cerrado. Esta tecnología también es de aplicación en el caso de suelo no compacto con presencia de nivel freático.



El tubo de hinca

Aunque excepcionalmente puede ser de otro material normalmente se usa el hormigón armado (fotografía 8), que puede ser fabricado por:

- Compresión radial: 800 mm hasta 1.400 mm.
- Vibrocompresión de alta frecuencia: 1.500 mm hasta 3.000 mm.

El diseño de la tubería de hinca está caracterizado y condicionado por cuatro aspectos fundamentales:

1. Fuerte armado longitudinal, necesario para soportar las fuertes compresiones que se producen en las partes superiores de los tubos (fuerzas empuje).
2. Limitación de la longitud útil a 3 metros como máximo para evitar el pandeo.
3. El tipo de unión entre tubos se hace intercalando aros de madera conglomerada entre las testas de los tubos. Además cada tubo lleva un zuncho metálico galvanizado (Virola) en uno de sus extremos de forma que para conseguir la estanqueidad de la conducción se colocará una junta elástica en el extremo de hormigón (macho) del tubo para que en la unión de los tubos haga tope contra la virola.

4. Los tubos de hinca llevan instalados unos taladros metálicos en las paredes del tubo para facilitar su desplazamiento mediante la inyección de lodos bentoníticos de lubricación.

Funcionamiento del sistema

Los equipos anexos a la microtunneladora (contenedor de pilotaje, unidad de tratamiento de lodos, acopio de tubería, bombas de circulación, grupo electrógeno, contenedor taller...) son instalados junto al pozo de ataque.



Desde el pozo de ataque se suministrará la presión necesaria a la cabeza de corte para que pueda progresar. Para ello se utilizarán una serie de gatos hidráulicos apoyados en el muro de reacción a través de la placa de empuje.

La tendencia actual es la de utilizar bastidores más cortos, permitiendo así reducir el tamaño de los pozos de ataque, en los que los cilindros de empuje se sitúan paralelamente a los tubos, ahorrando así el espacio ocupado por estos últimos.

Para resistir el peso del bastidor, la cabeza y los tubos, se ha de realizar una losa de hormigón en el fondo del pozo lo suficientemente resistente. Dentro de los elementos que componen el pozo de ataque es importante la instalación de la junta de estanqueidad que la encargada de evitar la entrada al pozo del agua y los lodos de perforación.

Empuje.

El avance de los tubos se realiza mediante la estación principal que está formada por el bastidor de empuje, el cual se apoya por un lado en el muro de reacción y por otro en el anillo

Por otro lado la cabeza de corte de la máquina está equipada con:

- a) Rueda de corte cuyas herramientas sean capaces de romper el terreno bajo la acción combinada de la rotación y empuje
- b) Cono de machaqueo localizado tras la rueda y diseñado para reducir el tamaño de las partículas más grandes del terreno y permitir su desescombro.

En la siguiente tabla se resumen los condicionantes y la mejor elección para los elementos de corte y el índice de apertura de la rueda (Cuadro 5).

Elección de la técnica de excavación

Las microtuneladoras EPB son las ideales para trabajar en terrenos homogéneos y blandos, con condiciones geológicas estables. El material se extrae del frente mediante un

tornillo sinfín. Una vez evacuado del tornillo sinfín se extrae al exterior gracias a una potente bomba. El modo EPB garantiza la estabilidad del frente de excavación ejerciendo una presión contra el mismo sirviéndose del propio terreno excavado y alojado en la cámara de excavación, inmediatamente detrás de la rueda de corte. Este terreno excavado puede ser tratado mediante espumas para que pueda ejercer la presión necesaria.

La técnica "Slurry" (lodos) se refiere a la evacuación del material excavado mediante transporte hidráulico, transformándolo en un lodo inyectándolo con agua (pura o con bentonita) a través de la cabeza cortante en el frente. El sistema está formado por un equipo de conducciones y bombeo de descarga a velocidad variable, con unas válvulas de presión de control, así como un bypass para evitar el retorno del fluido y aislar el flujo de lodos cuando se colocan nuevas tuberías

TIPO DE TERRENO	PARAMETROS DETERMINANTES	COMPACIDAD DE LA MATRIZ	FUNCIONALIDAD PRETENDIDA	ELECCION DE LOS ELEMENTOS
ROCA A SECCION COMPLETA	$R_{cs} < 200 \text{MPa}$	no aplica	Corte de la roca para reducir a elementos de pequeña dimensión	Discos cortadores Aperturas de la cabeza de dimensiones compatibles con el circuito de desescombro
SUELOS GRANULARES: BLOQUES CONTENIDOS EN UNA MATRIZ	Dimensión de los bloques $< D/3$	no aplica	Permitir a los bloques penetrar en la cabeza Reducir los bloques a dimensiones menores del diámetro del sistema de desescombro	Cabeza abierta Machacadora
	Dimensión de los bloques $> D/3$ y $R_{cs} < 10 \text{MPa}$	ligera	Corte relativamente fácil de los bloques Evitar demasiado empuje	Rascadores (+ discos cortadores) Cabeza muy abierta Machacadora standard
		compacta	Corte relativamente fácil de los bloques	Rascadores (+ cortadores rotatorios) Cabeza abierta Machacadora standard
	Dimensión de los bloques $> D/3$ y $R_{cs} > 10 \text{MPa}$	ligera	Corte muy fácil de los bloques Evitar demasiado empuje	Discos cortadores y rascadores Cabeza abierta Machacadora potente
		compacta	Corte de los bloques difícil	Discos cortadores y picas Cabeza abierta Machacadora potente
	SUELOS COHESIVOS	$IP < 30$	-	-
$IP > 30$		-	Rascadores	Boquillas de inyección a presión en cabeza Cabeza muy abierta

Cuadro 5

En esta técnica se colocan indicadores volumétricos (tanto en la tubería de alimentación como en la de retorno) y sensores de presión integrados en el cabezal perforador para permitir un control exacto de los respectivos estados de operación. De esta forma, además de garantizar la extracción del material perforado, se estabiliza el frente de excavación en el caso de perforación de suelos. Todo el sistema de extracción de lodos se controla desde el puesto central de mando.

Cabina de control y energía

Desde este punto se gestionan todas las órdenes del sistema, es decir: bombeo, gatos de empuje, cabeza de corte, etc. El sistema detecta todos los parámetros de avance, tales como la desviación vertical y horizontal, la posición de los cilindros de dirección, giro del cabezal, inclinación, avance de la perforación, la fuerza de empuje, etc., le proporcionan al operador una información detallada del estado de la perforación.



En este contenedor (en otra sección del mismo) se alojan además los cuadros eléctricos y de automatismo, así como el de control y la cabeza guía de la grúa.

Guiado

El sistema de guiado por láser permite definir con gran precisión la trayectoria y ubicación de la cabeza cortadora. Para tramos rectos consta de un emisor de rayo láser instalado en el pozo de ataque y una tarjeta de guiado emplazada en el cabezal perforador. Todos los parámetros de guiado se transmiten hasta la central de mando, que controla la correcta ejecución.

En caso de trayectorias curvas se pueden utilizar diversos métodos, pero el más preciso y operativo es el giroscopio. Este dispositivo se coloca en la cabeza perforadora.

Planta de tratamiento del material extraído

El material de desecho junto con la suspensión se extrae mediante bombas centrífugas a la superficie, donde los lodos bentoníticos se aislarán del escombros mediante una planta separadora constituida de tamices vibrantes con una capacidad de hasta 400 m³/h. El lodo saneado es a continuación reinyectado dentro del circuito de alimentación. Los escombros centrifugados son recogidos dentro de contenedores que son regularmente evacuados.



Lubricación

El deslizamiento de los tubos, puede verse facilitado por la inyección de un fluido lubricante (bentonita) para reducir el rozamiento. De esta manera pueden aumentarse el número de tramos hincados para un cierto empuje.

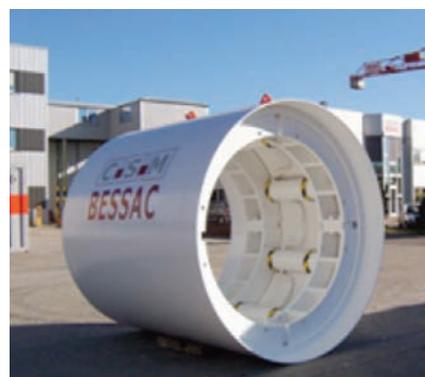
Otra función del lubricante es la de rellenar el espacio existente entre el terreno y los tubos de hinca. De esta manera se evita que este espacio se rellene con finos, lo que elevaría la fricción.

Esta operación se realiza mediante un equipo de bombeo. Los tubos vienen preparados con unos orificios pasantes por los que se inyecta el lubricante.

Estaciones intermedias

En hincas largas (>100 m) y terrenos duros, las fuerzas de fricción que el terreno ejerce sobre los tubos pueden hacer que la presión aplicada desde la estación principal supere a la presión admisible de los tubos.

En estos casos es necesario el uso de estaciones de empuje intermedias, que van colocadas entre tramos de tubos y están constituidas por una envolvente exterior de acero y unos gatos hidráulicos colocados en la periferia del tubo. Mediante la expansión de estos gatos hidráulicos se realiza el empuje de las cabezas y de los tubos anteriores repartiendo el esfuerzo de empuje necesario para la hinca y



consiguiendo, de esta forma, mayores longitudes de hinca.

El manejo de estos gatos se realiza desde la cabina de control, al igual que los del bastidor principal, siendo una bomba hidráulica situada en la cabina la que proporciona las fuerzas de empuje.

Una vez terminada la hinca se retiran los cilindros de las estaciones intermedias y se cierran con ayuda del bastidor principal, quedando los tubos a tope, como el resto.

Recuperación de la microtuneladora

Una vez alcanzado el extremo del tramo, la microtuneladora penetra en el pozo de salida y la máquina es separada para ser elevada a la superficie.



Rendimientos

Para caracterizar el índice de penetración o avance de una MTBM hay que observar dos criterios diferentes: la duración teórica de hinca de un solo tubo que estaría determinada solamente por la naturaleza del terreno y la técnica de excavación y el criterio más real que supone la instalación de la línea completa de la tubería que adicionalmente incluye el tiempo requerido para colocar los tubos en la estación hidráulica de empuje, la realización de las conexiones eléctricas, del circuito de lodos, sistemas hidráulicos, etc. para dar continuidad al conjunto. Estas actuaciones que no dependen del tipo de terreno consumen una media de 40 a 45 min.

Para el primer criterio varios estudios apuntan a los siguientes datos:

Una de las más importantes conclusiones es que la duración de la hinca de tubería en arcillas, arenas y gravas es mucho mayor que en arenas finas. El índice de penetración está directamente relacionado con la capacidad de demolición de elementos grandes de suelo y la capacidad de su desescombro. Por ello la velocidad de penetración debe además acomodarse a un ritmo que evite la creación de sobre-excavación en la cabeza. De igual forma, los problemas de atascos a causa de las arcillas en el sistema excavación-desescombro limitan también la velocidad de avance.

En suelos granulares finos las velocidades de penetración son extremadamente uniformes, así, para dos metros de tubo la media se mantiene sobre los 15 min.

En suelos granulares gruesos la velocidad de penetración baja claramente hasta los 35 min para los mismos dos metros de tubo. En este caso el valor presenta más dispersión dependiendo de la naturaleza del suelo y otros factores, pudiendo llegar a los 45 min.

Este descenso se explica por la necesidad, en función de la resistencia del terreno, de respetar los límites de los esfuerzos que es posible aplicar en los sistemas de excavación. El par de torsión en la cabeza se incrementa con la resistencia del terreno y los elementos de mayor tamaño necesitan ser machacados antes de penetrar en el sistema de desescombro, por ello el operador de la máquina debe reducir la velocidad de avance si pretende respetar los valores fijados por el fabricante de la misma.

En suelos cohesivos se presenta una gran heterogeneidad de resultados, entre los 70 min de media y los extremos 45 y 100 min que se dan en algunas ocasiones.

Las arcillas mezcladas con agua se vuelven más pegajosas y los sistemas de la cabeza pueden verse atascados. En este caso además es importante adaptar las velocidades de hinca para evitar sobre-excavaciones, no superando dicha velocidad la de capacidad de evacuación de escombro, obviamente, pues el contenido de arcilla es un factor fundamental en la disparidad de datos y si la máquina no está equipada con elementos tipo jet de alta presión o no se crea un lodo de calidad para la evacuación bajará el rendimiento a causa de los bloqueos. En otras ocasiones las arcillas se encuentran mezcladas

con otros terrenos que por ser más duros o presentar grandes bloques imponen determinados elementos de corte o aperturas en rueda de corte que luego afectarán a la forma de excavar y evacuar las arcillas.

Duración total de la instalación de la tubería según tipo de terreno (cuadro 6):

Es decir, hablamos de penetración pura de la máquina 3 a 6 m/h y hasta 9m/h de punta. A continuación mostramos los rendimientos de varias obras recientes (cuadro 7):

Costes del sistema

Es extremadamente complicado asociar costes a tipologías, diámetros, terrenos, etc. ya que existen dispersiones de hasta el 100% en obras con condiciones semejantes. Por ello intentaremos hablar exclusivamente de tendencias u órdenes de magnitud.

El coste de un proyecto cualquiera está conformado por el sumatorio de tres tipos de coste: el coste directo, el coste inducido y el coste social.

El coste directo es el necesario para acometer estrictamente la estructura a partir de criterios estrictamente técnicos como son para el caso de una obra con MTBM:

- Longitud y diámetro de la conducción. Presencia de curvas en el trazado.
- Número de pozos y de tramos
- Tipo de terreno: suelo o roca, presencia de arcillas, presencia de agua, abrasividad, etc.
- Modelo y capacidades de la microtuneladora y la estación de empuje. Tasa de amortización de los equipos.

Y otros aspectos secundarios como:

- Sistema de alimentación de energía (red, grupos electrógenos,...)
- Número y disposición de las estaciones intermedias
- Experiencia del personal y eficiencia del mantenimiento que determine el índice de averías

El coste inducido representa la cantidad total de trabajos adicionales en el proyecto, muchas veces previos a la propia ejecución de la infraestructura, por ejemplo, desvío de servicios, cambios en el mobiliario urbano, redistribución

	TIEMPO MEDIO HINCA TUBO DE 2m	TIEMPO TOTAL DEL CICLO INCLUIDO CONEXIONES Y MANTENIMIENTO
ARENAS FINAS	16 min	60 min
ARENAS Y GRAVAS	38 min	90 min
ARCILLAS Y SUELOS COHESIVOS	70 min	120 min

Cuadro 6

TIPO TERRENO	DN	LONGITUD	RDTO MEDIO DIA 24h	RDTO PUNTA
ARENAS FINAS, y algo de ARCILLA, TURBA	DN3800	2535m	25m	58m
ARENAS FINAS	DN2400	1144m	15m	
ARENAS Y GRAVAS	DN2400	66m	18m	24m
ARENAS Y ARCILLAS	DN2400	234m	16m	20m
MARGAS	DN2000	1294m en 6 tramos	16m	21m
ARENISCAS	DN2000		10m	
LUTITAS	DN2000		20m	30m
ARENAS	DN2000	700m en 6 tramos	17m	45m
CALIZAS Y ARCILLAS	DN2000		13m	23m
ARENISCAS, GRAVAS, ARENAS, LIMOS	DN2000		7m	12m
GRAVAS	DN1800	505m	11m	20m
ARENAS ARCILLAS LIMOS	DN1500	50m	10m	
GRAVAS	DN1500	155m	18m	
ARCILLAS PURAS	DN600	1500m en 7 tramos	10m	22m

Cuadro 7

del tráfico rodado, etc. Estos costes no siempre son tenidos en cuenta en la evaluación de la idoneidad de un proyecto con microtúnel.

El coste social es el de los inconvenientes que tiene para la sociedad determinado proyecto, para lo cual se exige una nada fácil cuantificación de los factores molestos en caso de abrir una zanja por ejemplo: interrupción del tráfico o del aparcamiento, degradación medioambiental, ruidos, humos, transportes pesados para las tierras, riesgos de accidentes por caída de la propia entibación, bajada de la actividad comercial en la zona, ...

Para este tipo de coste se trabaja con fórmulas del tipo $CS = \alpha cs \times CD$ donde **CD** es el coste directo y αcs es un coeficiente expresado en porcentaje, procedente de

resultados experimentales, y que puede obtenerse de tablas donde está en función del grado de sensibilidad de la afección y del propio **CD** (cuadro 8).

CD	Ócs (en %)		
	menos sensible	sensible	muy sensible
0<CD<0,15M€	2%	8%	10%
0,15<CD<0,6M€	4%	9%	14%
0,6<CD<1,2M€	6%	11%	17%
1,2<CD<1,8M€	8%	13%	20%
1,8<CD<2,4M€	9%	15%	22%
2,4<CD<3M€	10%	16%	24%

Cuadro 8

Coste Directo de excavación

En primer lugar podemos mencionar ciertos axiomas o tendencias que generalmente se cumplen:

1. El revestimiento, generalmente tubos de hormigón, puede suponer el 30% del precio total. Por ejemplo para DN 1200 mm el precio del tubo Clase V ronda los 400 €/ml y para DN 2000 mm los 900 €/ml
2. Los pozos representan entre un 20% y un 40% del presupuesto total. Cada pozo podemos estimarlo en condiciones normales y un DN 2000 mm en unos 50.000 €.
3. En zona urbana los costes se ven incrementados (coste pozos, control vibraciones, tratamientos del terreno, etc.)
4. El coste se incrementa de forma exponencial con el diámetro (mayor coste de la máquina, mayor gasto energético, etc.)
5. El coste se incrementa de forma exponencial con la longitud (desescombro más costoso, mayor tiempo de excavación total implica más exposición a riesgos geológicos y mecánicos)
6. El coste se incrementa cuanto menor es la estabilidad del frente (excavación en suelos es algo mayor que en terrenos mixtos y este es algo mayor que en rocas) aunque este fenómeno es mucho menor en la técnica del microtúnel que en los métodos tradicionales o las grandes tuneladoras. De hecho los mejores rendimientos se consiguen en arenas

finas y sin embargo una roca abrasiva o la presencia de bolos en una matriz pueden hundir un rendimiento e incrementar el coste unitario muy por encima de lo esperado teóricamente.

En un proyecto, por ejemplo de 1000 m de longitud con tramos de 100 m (11 pozos) para DN 200 mm tendríamos la siguiente distribución de costes:

El 17% lo constituiría el tubo, el 20% lo constituirían los pozos y el 63% correspondería a las operaciones de excavación e hinca.

Se pueden descomponer los porcentajes del último concepto. Así, de las operaciones de excavación e hinca el 55% son costes del equipo y accesorios del mismo (amortización), el 20% son materiales, excepto el tubo, (bentonita, agua,..) y energía, el 13% el personal de obra y el 10% restante en transportes varios (de los tubos, del escombro, de los equipos etc.).

Esto nos da una idea del peso que tiene la parte fija del coste (el equipo y su puesta en obra), razón por la cual los precios de mercado varían tanto en función de la longitud. En un DN 2000 mm, por ejemplo, si la longitud no pasa de 300 m no es extraño ver costes de hasta 5000 €/m que pueden bajar por debajo de los 3000 €/m para longitudes de 1000 m.

Conviene llegado a este punto del análisis apuntar algunos otros datos objetivos relativos a los costes de este sistema y en concreto en comparación con alternativas a cielo abierto. Por ejemplo con el sistema de microtúnel se moviliza sólo el 5% de las tierras que en una solución a cielo abierto. En otro orden se estima que la vida de las tuberías instaladas con este sistema es un 50% mayor que las instaladas por métodos tradicionales.

Conclusiones

Existen varias tendencias y conclusiones que podemos enumerar:

1. La presencia de finos reduce sensiblemente el rendimiento debido a la pegajosidad de las arcillas.
2. A menor diámetro se consigue un ligero incremento de rendimiento.
3. A mayor longitud existe una caída lógica pero

no excesivamente significativa del rendimiento.

4. Los rendimientos en obras urbanas son algo menores.
5. El Coef de Utilización = horas reales de trabajo / horas efectivas de trabajo es de media 0,40 (entre 0,20 y 0,46).
6. La presencia de agua reduce el rendimiento.
7. El rendimiento es mejor con sistemas de desescombro hidráulico mediante lodos que con tornillos.
8. Áreas de aplicación para los principales métodos sin zanja.

Como resumen general podemos de alguna forma deducir la idoneidad de los principales métodos en función de las condiciones generales del proyecto e incluir en el análisis a los microtúneles con dovelas:

		HINCA	DOVELAS	PHD
TIPO TERRENO	COHESIVOS	+	+	+
	ARENAS	+	+	+
	GRAVAS	+	+	-
	BLOQUES	-	+	-
	MIXTOS	0	+	0
MATERIAL DE LA TUBERIA	ROCAS	+	+	+
	PEHD	-	-	+
	ACERO	0	0	+
	GRP	-	-	+
DIAMETRO	HORMIGON	+	+	-
	≤ DN1000	0	-	+
	≥ DN1200	+	-	0
	> DN2000	+	+	-
LONGITUD	> DN3500	0	+	-
	≤ 100	+	-	+
	100-500m	+	0	+
	500-1200m	+	+	+
	≥ 1200	0	+	+

- + Particularmente idóneo
- 0 Condicionalmente idóneo
- No idóneo

Por lo anteriormente expuesto, se pone de manifiesto la posibilidad de encontrar diversas soluciones técnicas que optimizarán los recursos, frente a las dificultades que las obras nos presenten.

La evolución continua de estas técnicas y la calidad y seguridad que aportan, prometen un gran desarrollo en el presente y una consolidación de su aplicación en el futuro.

Bibliografía

Microtunneling and horizontal drilling: recommendations
 French National Project "Microtunnels" recommendations
 French Society for Trenchless Technology (FSTT)

Microtunneling with Herrenknecht Micromachines
 Friday, March 28, 2003, Colorado School of Mines
 Dr. Eng E.H. Martin Herrenknecht

CONTINGENCY PLANNING FOR MICROTUNNELING: AN ESSENTIAL ACTIVITY

The North American Society (NASTT) and the International Society for Trenchless Technology (ISTT)
 International No-Dig Show 2009 Toronto, Ontario Canada;
 March 29 – April 3, 2009

Construction costs for microtunnels in Turkey A.B.Akkaya
 World Tunnel Congress 2008 - Underground Facilities for Better Environment and Safety – India

GEOTECHNICAL BASELINE REPORTS – APPLYING THE GUIDELINES TO MICROTUNNELING

Kimberlie Staheli, Ph.D., P.E.1, and Leon Maday2
 The North American Society (NASTT) and the International Society for Trenchless Technology (ISTT)
 International No-Dig Show 2009 Toronto, Ontario Canada;
 March 29 – April 3, 2009

Pipe Jacking Design and Best Installation Practice
 Pipe Jacking Association

PIPEJACKING & MICROTUNNELING

ISTT-ASTT
 "An Introduction to Pipe Jacking and Microtunneling Design"
 www.pipejacking.org.uk, Pipe jacking association, London.

"Important Geotechnical Consideration for Micro-tunneling", S. J. Kelin, G. S. Nagle, and G. L. Raines (1996) No-Dig Engineering Vol.3, No.4.

Europipe World's Largest Pipejack – Herrenknecht

Methods of construction of tunneled Outfalls, advantages and application of different tunnel techniques
 Raphael Sisternans, Technical Sales Engineer, Herrenknecht AG
 Germany - Business Unit Utility Tunnelling

Franchissement du Rhône par fonçage
 Ir. Dominique Delbaere - Dir R&D Deny SA
 Tunnel et Ouvrages Souterrains 210, Dec 2008

Cost and Environmental Impact
 Trenchless Technologies Resources Centre
 Oct 2006 ISTT

World Pipelines Aug 2009
 HDD LONG BORES: A MATCH FOR HDD MACHINES?
 Tara Deering-Hansen, Vermeer Corporation, USA.
 HDD REAPING THE BENEFITS OF TRENCHLESS
 HDD TECHNIQUES
 Lutz zur Linde, Herrenknecht, Germany.
 HDD: MAKING IT POSSIBLE
 Stephen Tait writing on behalf of Mears, USA.