

Modelo para la evaluación económica de túneles con tuneladora

Ignacio Sáenz de Santa María Gatón, Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos; y,
Carles López Carreras, Doctor Ingeniero Geólogo, Director General de Euro Geotécnica, S.A.

Se presenta en este artículo una primera aproximación a una herramienta que permite la valoración tanto el tiempo como del coste de ejecución de túneles mediante el uso de tuneladoras.

Introducción

Se está produciendo en los últimos años un significativo aumento de la ejecución de túneles a nivel mundial, que si bien tiene como consecuencia una mejora considerable en el aspecto tecnológico, construyéndose túneles cada vez más complejos y desarrollando maquinaria más avanzada y segura, no se tiene reflejo de este éxito en la estimación del coste y plazo de ejecución de los proyectos asociados. Son comunes los retrasos en la ejecución así como excederse en gran medida en el presupuesto previsto.

Se presenta a su vez otro problema como es la elección del método de excavación. La capacidad de seleccionar el método más apropiado presenta grandes dificultades tanto al cliente como al ingeniero pero resulta un aspecto crítico del que dependerá el éxito o fracaso del proyecto. Dicha elección implica elegir entre los métodos convencionales o los mecanizados. En este último tipo de túneles, los mecanizados, se centra este estudio ya que en los métodos convencionales la incertidumbre es mucho menor al ser un método de construcción bien conocido por su vasta aplicación.

Una vez expuesta la problemática, se muestra la necesidad de una herramienta que permita, en las fases del planeamiento, en las

que se disponen de pocos datos, delimitar con el menor error posible, los dos parámetros que definirán sin duda la obra, el coste y el plazo de ejecución. Llegados a este punto cabe destacar que para este estudio se considerará en la estimación la excavación y el sostenimiento del túnel, no los emboquilles ni las instalaciones, que serán objeto de modelos independientes. En caso de alcanzarse este objetivo la toma de decisiones sería mucho más sencilla y se dispondría de una herramienta útil y objetiva para tal fin.

Otro aspecto a considerar es que si bien es práctica habitual presentar valoraciones de tiempo y coste de una manera determinista, es decir, fijando un valor, para poder manejar la variación en parámetros involucrados en el coste y tiempo de ejecución, se plantea un modelo basado en variables estocásticas, de forma que el coste total se pueda expresar como una curva de distribución normal, y poder así determinar tanto el coste como el plazo de ejecución en forma de intervalos que contemplarán la incertidumbre en los datos de entrada.

Del empleo de distribuciones normales se deriva además el cálculo de cotas inferior y superior asociadas a probabilidades, hecho que permitirá no sólo acotar los resultados, sino además asociarles una probabilidad con

lo que en el momento de toma de decisiones se sepa exactamente qué riesgo se está tomando.

Todos estos elementos han motivado un estudio que ha llevado a la generación de una herramienta de predicción sencilla y de rápida aplicación. Para ello se ha desarrollado un modelo que acota tanto el tiempo como el coste de construcción. Dicha herramienta se sustenta en datos de obras ya ejecutadas, la mayoría de ellas de los últimos 5 a 10 años, que suman un total de 848 km. de túnel.

Base de datos

La generación de una base de datos se plantea como necesaria para determinar, de los muchos parámetros implicados en la estimación del coste y plazo, cuáles tienen una mayor repercusión, cuál es su comportamiento al variar sus valores, y cuáles, en definitiva, tienen significación suficiente como para sustentar un modelo de cálculo.

En las primeras fases del estudio se optó por comprobar el volumen y dispersión de los datos disponibles en la base de datos creada. Una vez comprobado que las poblaciones de datos son suficientes para poder validar las posibles conclusiones, se opta por dividir el estudio en tres bloques:

- Análisis de Coste -Variables
- Análisis de Rendimiento -Variables
- Análisis de Parámetros de la tuneladora en función del diámetro.

Análisis de Costes

En lo referente al análisis de costes, es bastante complicado asociar un coste según una tipología y longitud de túnel, ello se debe a que influyen diferentes factores como la localización y año de ejecución, el tipo de obra, el nivel de instalaciones, los rendimientos esperados, la instrumentación y control, etc...

Destacar a su vez que de los datos de coste obtenidos no siempre se puede diferenciar entre el coste de la obra en su conjunto del de la excavación y sostenimiento, que es el que nos interesa, y así pues resulta que, según su tipología o ubicación, se incluyen los costes asociados a, por ejemplo, estaciones de metro o la auscultación de la superficie para el control de

los asientos distorsionando la realidad que pretendemos buscar.

Es por ello que se descarta utilizar las posibles relaciones entre las diferentes variables y el coste.

Análisis de Rendimientos

De cara a definir un plazo de ejecución, resulta básico estudiar el comportamiento del rendimiento de la tuneladora en función de diferentes parámetros. Dentro de los datos disponibles (avance máximo diario, avance máximo mensual y avance medio mensual) se ha estimado oportuno centrarse en el avance medio mensual de cara a obtener resultados más realistas y que incluyan asimismo, de forma indirecta, el efecto de distintos factores de riesgo propios de este tipo de obras y que tienen un efecto negativo en el rendimiento. Se incluirá, por tanto, el tiempo destinado a la ejecución del sostenimiento además de paradas de la máquina para limpieza y mantenimiento, el tiempo empleado en paradas para comprobar la geología del frente en caso de encontrar algún elemento geológico no esperado o aquél perdido en fallos del proceso o averías.

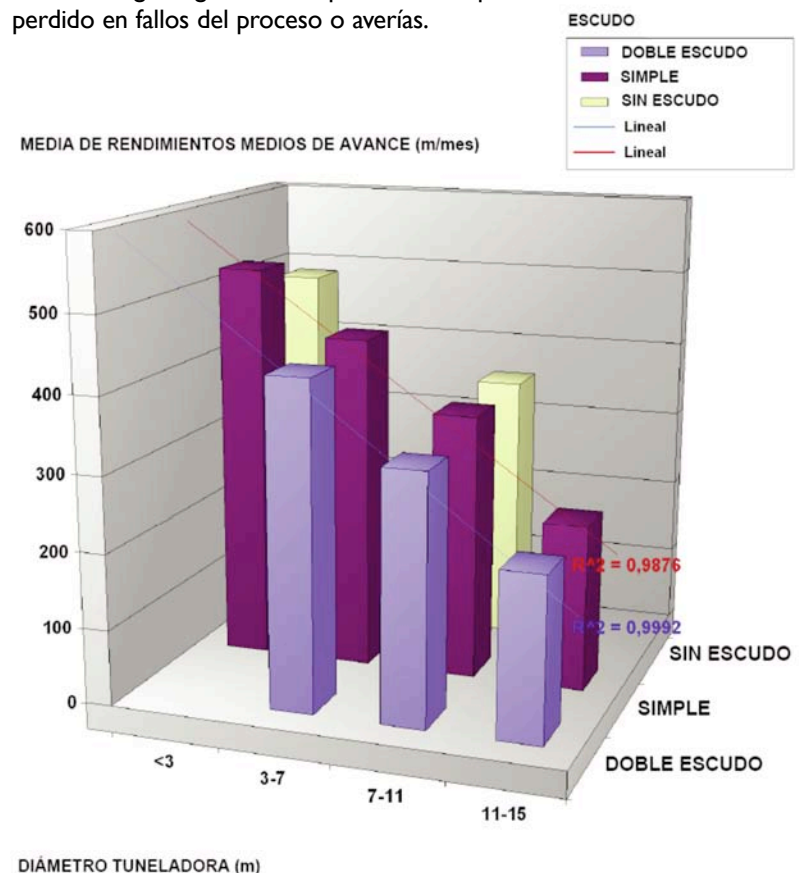


Figura 1: Relación Rendimiento - Diámetro / Escudo

Se realizaron análisis no sólo variable a variable, sino además combinando distintos parámetros como en la figura adjunta. Finalmente obtenemos ecuaciones que definen el rendimiento así como la desviación estándar del mismo. De esta forma que no sólo tenemos definido el rendimiento, sino que además acotamos el posible error cometido.

La relación de los parámetros necesarios para una correcta estimación del rendimiento medio mensual, junto con los posibles inputs del modelo se muestran a continuación:

- Ubicación de la obra o tipo de zona → urbana / no urbana
- Diámetro → [m]
- Longitud → [m]
- Material a excavar → Suelo / Mixto / Roca
- Presencia de Agua → Si / No
- Tipo de Tuneladora → TBM / EPB
- Tipo de Escudo → simple / doble / sin escudo

Vemos como los parámetros necesarios son ante todo sencillos de obtener, ideal para fases de estudio de proyectos, con los que podemos encontrar un rendimiento medio así como la desviación de forma que acotamos el posible error en la estimación. Destacar nuevamente que los resultados están basados en datos de obras que suman 848 km. Éstos se actualizan de forma periódica con nuevos datos de forma que se produce una mejora paulatina de las estimaciones gracias a que refleja los resultados de los avances que se van produciendo en los procesos de construcción.

Análisis de Parámetros de la tuneladora en función del diámetro

Partiendo del diámetro de la máquina como dato básico, pues es una exigencia del proyecto condicionada por la función que se dará al túnel, se pueden determinar de forma aproximada, como se ha podido comprobar, la potencia total necesaria para el funcionamiento de la misma, el peso y el grosor de las dovelas.

Particularizando en el grosor de las dovelas, se buscaron distintas relaciones para poder calcular el grosor y así obtener tanto el diámetro interno útil del túnel como también la medición del volumen total de sostenimiento estimado y su desviación, dado que repercutirá también en el coste de excavación.

En un primer momento se supuso que la cobertura sería el factor determinante junto con la presencia de agua, diámetro y el tipo de terreno pero al realizar el estudio de estos parámetros, tanto de forma conjunta como individual, resultó que el diámetro de la tuneladora repercute directamente en el grosor de dovela, siendo suficiente para acotar de forma considerable la estimación. Ello es debido a que el empuje que deberá soportar el sostenimiento por los cilindros hidráulicos que empujan la cabeza de corte es muy superior a la sollicitación por el empuje del terreno.

Gracias a estas relaciones podremos valorar el coste de consumo, el del transporte de la maquinaria así como el sostenimiento del túnel.

Modelo de estimación Coste-Plazo

Para el desarrollo de la aplicación se ha optado por una metodología basada en la simulación de Monte Carlo. Éstas abarcan una colección de técnicas que permiten obtener soluciones de problemas matemáticos o físicos por medio de pruebas aleatorias repetidas. En la práctica, las pruebas aleatorias se sustituyen por resultados de ciertos cálculos realizados con números aleatorios.

Particularizando, la simulación de Monte Carlo ya ha sido utilizada anteriormente en estudios de obras subterráneas. El motivo radica en que, gracias a ella se pueden manejar gran número de variables desconocidas en expresiones que contienen sumas de productos como es el caso que nos ocupa y manejar la incertidumbre inherente en este campo de conocimiento.

Un valor aleatorio resultante de cada distribución asociada a cada variable es tomado y la función de cálculo global es calculada dando un resultado final. Se repite el proceso con un número suficientemente grande de iteraciones obteniendo una distribución de resultados finales que podemos asociar a una distribución normal. A medida que se incrementa el número de iteraciones se mejora la representación de la distribución resultante, en especial en las colas de la distribución, donde las probabilidades son más pequeñas. A continuación se muestra una gráfica de salida típica de una simulación

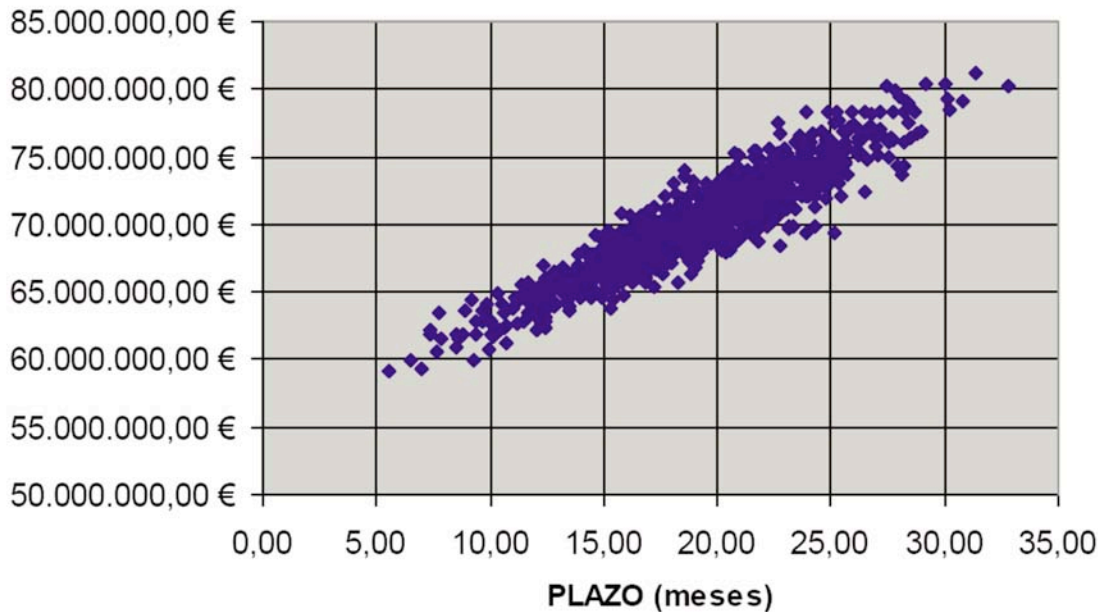


Figura 2: Gráfico salida dispersión Coste-Plazo

de Monte Carlo, antes de ordenarlos para pasarlo a una distribución normal, en que se puede ver que cada iteración da como resultado un punto que define plazo y coste.

Para definir las variables que componen la simulación, se utilizarán distribuciones triangulares cuyos datos de entrada serán tres: Mínimo esperado (a), probable (b) y máximo esperado (c).

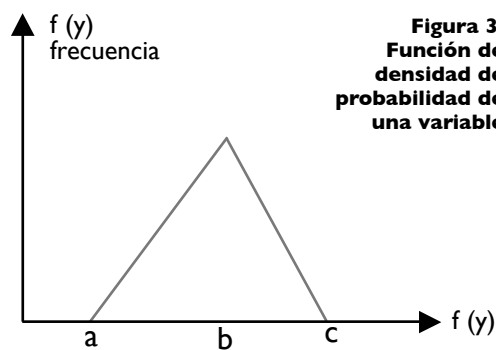


Figura 3:
Función de
densidad de
probabilidad de
una variable

A partir de este tipo de distribuciones se solventa también el problema de definir costes o producciones de variables difíciles de fijar pero a los que sí es más fácil acotar. Una vez tenemos fijados los valores mínimo esperado, probable y máximo esperado, se puede conseguir la media y la desviación estándar de cada valor.

El primer paso será, evidentemente, conocer las condiciones de contorno del problema, para ello deberemos introducir los datos necesarios a lo largo de la traza del túnel, que será tramificada de forma que se divide la traza del túnel en zonas con características homogéneas. A su vez, cada zona será dividida en tantas subdivisiones como se requiera según la incertidumbre, asignando una probabilidad a cada conjunto de datos posibles.

Requeriremos, a partir de este punto, establecer qué tratamiento se le da a los costes necesarios para el desarrollo del modelo. Para poder facilitar los cálculos, se opta por separar las partidas de costes en 4 tipos, éstas son:

- Costes dependientes del tiempo ($C_{n,t}$)
 - Oficinas / Instalaciones.
 - Personal.
 - Seguro.
 - Costes energéticos → Agua, luz...
 - Penalización por retrasos.
- Costes independiente del tiempo ($C_{n,q}$)
 - Sostenimientos.
 - Inyección Gap.
 - Tratamientos Terreno → espumas, bentonita, inyecciones...
 - Cables Alta Tensión y Fibra Óptica.
 - Coste vertedero Tierras.
 - Mantenimiento Maquinaria (revisiones

periódicas de motores, cambio piezas, circuitos hidráulicos, limpieza...)

- Consumos maquinaria → Picas/Discos cortadores...

- Costes fijos ($C_{n,f}$)
 - Transporte y montaje maquinaria.
 - Mejoras organización.
 - Implantación Obra y Retirada → Oficinas. Talleres. Acopios. Planta Dovelas.

- Costes maquinaria ($C_{n,m}$)
 - Tuneladora.
 - Maquinaria Auxiliar → Back up

Gracias a las ecuaciones de rendimiento obtenidas anteriormente podemos ahora determinar la producción de cada subdivisión de zona. Se encontrará la esperanza de la producción en cada zona de la tramificación mediante la siguiente expresión.

$$Pr_{Zi} = P_1 \cdot Pr_1 + P_2 \cdot Pr_2$$

Donde P_{zi} es la producción de la zona. P_{ri} es la producción en cada una de las subdivisiones de la zona así como P_i la probabilidad que se den las características definidas para cada subdivisión de zona. Llegados a este punto podemos calcular fácilmente el tiempo total esperado de excavación empleando la expresión siguiente:

$$T_{total} = \sum L_i \cdot Pr_{Zi}$$

Para definir el tiempo total de ejecución en la forma de una normal de la que ya tenemos la media T_{total} sólo resta encontrar la desviación conjunta y ésta estará definida mediante la varianza de la suma:

$$\sigma_{T,total} = \sqrt{\sum \sigma_{Ti}^2}$$

Así pues, llegados a este punto, tenemos definido el tiempo como una función normal de forma:

$$T \sim N(m_T, \sigma_T)$$

Pasamos ahora a calcular el coste normal, una vez definido ya el tiempo de ejecución tanto por zonas como el total. Para ello,

seguiremos el criterio de dividir las partidas de costes en las 4 categorías ya descritas. Empezamos por aquellos dependientes del tiempo ($C_{n,t}$). Siendo z_{ij} el coste de cada partida "j" en unidades [€/mes], de nuevo con distribución normal, obtenemos el valor total para un tiempo dado $T_i \in T \sim (m_T, \sigma_T)$ con la expresión:

$$C_{n,ti} = \sum z_{ij} \cdot T_i$$

Como primera aproximación el modelo ofrece un cálculo para la esperanza del tiempo, $E(T) = m_T$.

En el caso de los costes independientes del tiempo ($C_{n,q}$), asociados a los materiales necesarios tanto para la excavación como para el sostenimiento, se calculará el coste por zonas y total de una forma sencilla considerando la longitud L_i de cada zona en base a la expresión:

$$C_{n,q} = \sum z_{qi} \cdot Q_{qi} \cdot L_i$$

Donde Q_{qi} es el material necesario por unidad de longitud y z_{qi} el coste del material nuevamente por unidad de longitud. Recalcar una vez más que estamos trabajando con funciones aproximadas a normales con lo que la suma se hará de acuerdo a esta realidad.

La estimación de los costes fijos ($C_{n,f}$) es simplemente su suma:

$$C_{n,f} = \sum z_f$$

Finalmente, resta simplemente la estimación de los costes de maquinaria totales ($C_{n,m}$) que se calculan como suma del coste de tuneladora y back up:

$$C_{n,m} = \sum z_m$$

El coste normal total, para un tiempo T , será la suma de todos los costes anteriores:

$$C_{n,i} = C_{n,ti} + C_{n,q} + C_{n,f} + C_{n,m}$$

A partir de este momento es donde entra en juego la simulación de Monte Carlo. Daremos valores aleatorios a la distribución normal del tiempo para que a su vez éstos sirvan para dar

valores aleatorios de Coste final tanto de su media como de su desviación estándar. De cada media y desviación extraemos un valor aleatorio de la función normal que genera y es a partir de estos resultados que extraemos la media y su desviación estándar final del coste mediante las conocidas expresiones de estadística básica:

$$\bar{X} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i$$

$$s^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{(x_i - \bar{x})^2}{N-1}$$

Obtenemos así una variable de coste con función normal tal como buscábamos.

$$C \sim N(m_c, \sigma_c)$$

Tenemos pues definido el tiempo y coste tanto global como por zonas y partidas, siempre en forma de función normal, hecho éste que nos permite trabajar con intervalos que contemplarán la incertidumbre en los datos de entrada además de permitir el cálculo de cotas inferior, superior e intervalos asociadas a probabilidades. Se muestra a continuación un gráfico resultante del modelo que muestra de forma gráfica la función de distribución de coste resultante.

El modelo ofrece también gráficos de la distribución del tiempo de ejecución así como herramientas que facilitan el estudio probabilístico de los resultados obtenidos.

Resumen

Una de las características principales del modelo de cálculo es que, a diferencia de otros métodos, éste ofrece como resultado distribuciones de probabilidad que permiten manejar el riesgo inherente a este tipo de obras y cuantificarlo, acotando, por tanto, el posible error en la estimación que se ha mostrado tan común hasta la fecha.

Otro punto a destacar es que el rendimiento medio de avance, utilizado para los cálculos tanto de coste como plazo, se basan en datos de obras reales mayoritariamente de los últimos 5 a 10 años, que suman un total de 848 km. de túnel.

Se muestra en este artículo una primera aproximación a una herramienta que permite calcular el coste y plazo de ejecución de un túnel mecanizado. Gracias a ella, la toma de decisiones en proyectos o estudios es mucho más sencilla y objetiva.

www.eurogeotecnica.com

COSTE NORMAL PARA E(T)

