

Parámetros relevantes en la evaluación económica de túneles con tuneladora

Ignacio Sáenz de Santa María Gatón; Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.
Carlos López Carreras; Doctor Ingeniero Geólogo.

Como continuación del artículo publicado en el nº 11 Septiembre-Octubre de la revista Obras Urbanas con título “Modelo para la evaluación económica de túneles con tuneladora.” se presenta ahora un documento donde se profundiza más en los aspectos relativos al estudio de la base de datos generada para el desarrollo del modelo.

En el nº 11 Septiembre-Octubre de la revista Obras Urbanas se presentaba una herramienta sencilla y de rápida aplicación para la valoración tanto del coste como del plazo de ejecución de túneles mecanizados.

Para el desarrollo de dicha herramienta se generó una base de datos sustentada 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.

Destacar que dicha base de datos permite hacer cruces y/o consultas de las diferentes variables, así como análisis comparativos de las principales características ya sean generales, de la tuneladora o de la ejecución de la obra. De esta forma podemos conocer que parámetros 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 el presente artículo se profundiza en el estudio de dichas variables.

Análisis de la Base de Datos

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

Los parámetros que se presentan aquí, de los muchos que se introducen en la base de datos, son aquellos que se han mostrado necesarios para la definición del modelo.

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 excavación y sostenimiento, que es el que nos interesa, y así 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. Encontramos, eso sí, tendencias genéricas que se describen brevemente a continuación.

Relación Coste – Tipo de Zona

Vemos en este apartado la influencia de la zona en que se ejecuta una obra en el coste de la misma. Se concluye del estudio de la base de datos que el coste de un túnel en zona urbana es aproximadamente 3 veces superior al que se daría si la obra fuese no urbana.

Esta diferencia tan significativa se debe a varios factores interrelacionados. Primeramente destacar que el rendimiento de la tuneladora baja para controlar mejor las vibraciones. Por otro aumentan los costes asociados a los tratamientos del terreno, mucho mayores en zona urbana.

Además deberíamos añadir otros costes inherentes a un túnel en zona urbana como son los pozos de ataque o la ejecución de estaciones, que además de frenar el avance de una tuneladora, elevan el coste de la obra de forma considerable.

Relación Coste – Diámetro

De la relación del diámetro con el coste se puede extraer que, no sólo se incrementa éste notablemente con el diámetro, sino que lo hace siguiendo una relación exponencial. Se comprueba en el estudio de parámetros que este tipo de relación se repite continuamente.

Relación Coste – Longitud Total

En este apartado observamos, una vez más, un buen ajuste a una relación exponencial.

El hecho de que sea más costosa la excavación a medida que aumentamos la longitud se debe a dos factores básicamente. Por un lado, el proceso de transporte de material y escombros entre el frente de excavación y la boca del túnel resulta, como es lógico, más dificultoso a medida que vamos avanzando. Además, un túnel de mayor longitud requerirá mayor tiempo de excavación y ello comportará inevitablemente un mayor riesgo de que se produzcan acontecimientos negativos extraordinarios ya sea por motivos geológicos o mecánicos.

Relación Coste – Material

En lo referente al tipo de material a excavar, se aprecia en el gráfico obtenido lo esperado según la lógica de las obras subterráneas. Esto es, el coste de excavación se incrementa según la estabilidad del frente, siendo obviamente mayor para excavación en suelo y menor para roca. Merece especial atención que la diferencia de costes sea sensiblemente mayor en terrenos de tipo suelo.

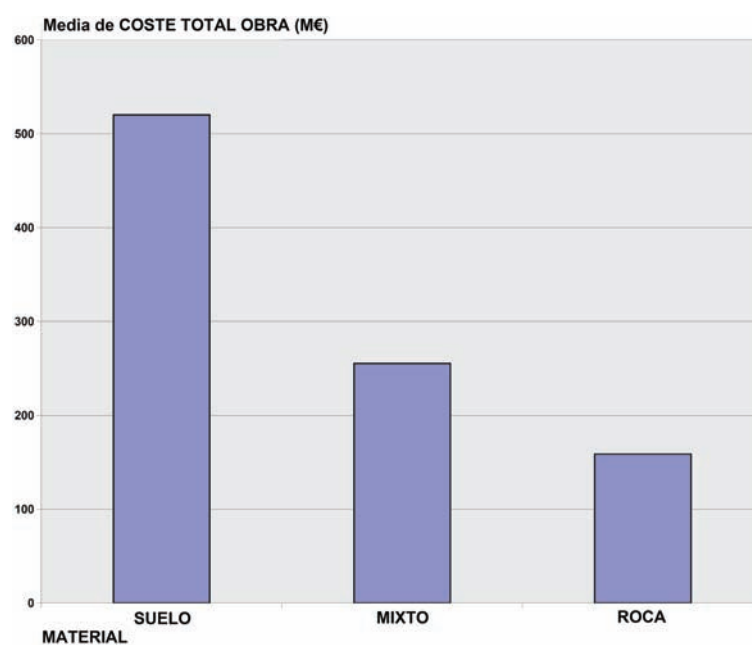


Fig. 1. Relación Coste – Material.

GROSOR DOVELA- DIÁMETRO

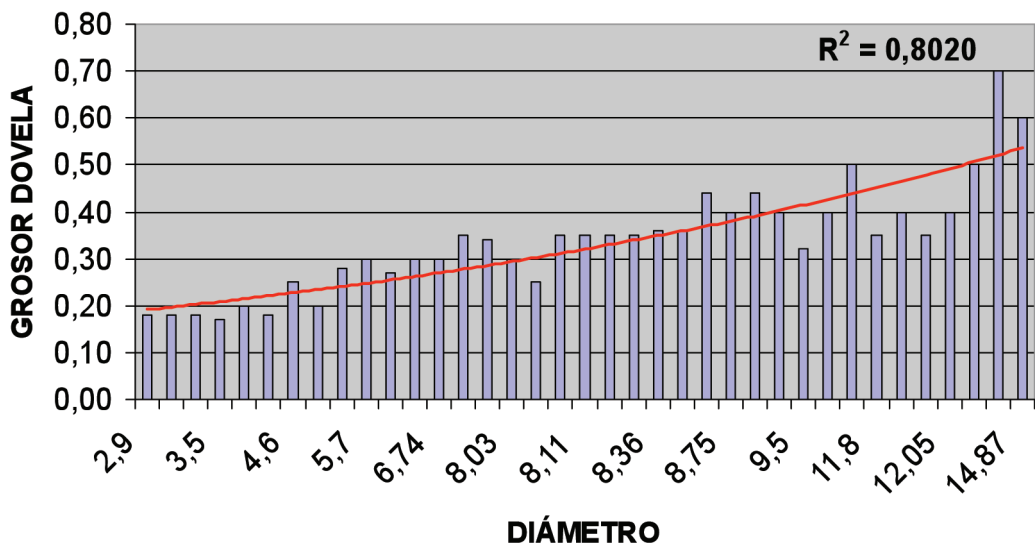


Fig. 2. Relación Grosor de Dovela - Diámetro

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, la potencia total necesaria para el funcionamiento de la misma, el peso de la maquinaria y el grosor de las dovelas.

Relación Grueso Dovela - Diámetro

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 consideró que la cobertura sería un 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. Se

muestra en la figura adjunta la relación, de nuevo exponencial entre el diámetro y el grosor de las dovelas.

Relación Potencia - Diámetro

Para el empleo de una maquinaria como la que aquí tratamos es necesaria una gran cantidad de energía. Resulta pues primordial conocer la potencia total instalada para el cálculo del coste energético de la obra una vez tengamos definida también la duración de la misma.

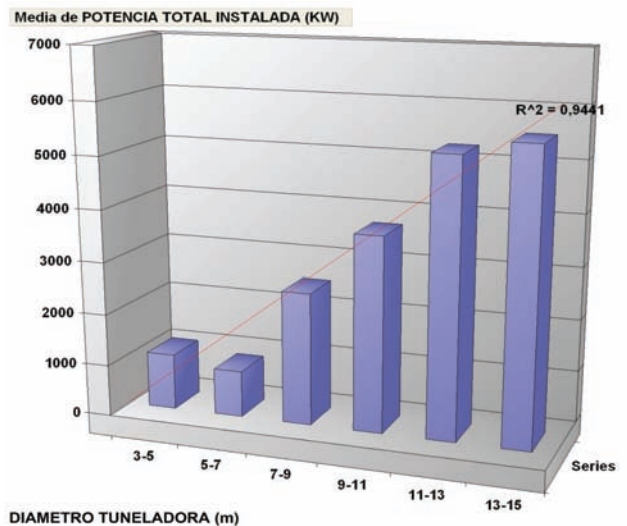


Fig. 3. Relación Potencia Instalada - Diámetro

Se presenta a continuación un gráfico en que se aprecia el gran ajuste a una ley lineal según el diámetro. La desviación sobre la media de este parámetro sigue, en cambio, un comportamiento exponencial.

Relación Potencia – Diámetro

Con vistas al cálculo del coste del transporte de la maquinaria desde la fábrica a su emplazamiento en obra será necesario conocer su peso para aplicarle luego un coste en [€ / Tn · Km]. Según los datos disponibles se ha encontrado de nuevo un buen ajuste lineal según el diámetro ($R^2=0.8443$).

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 o aquél perdido en fallos del proceso o averías.

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]
- Material a excavar → Suelo / Mixto / Roca
- Presencia de Agua → Si / No
- Tipo de Tuneladora → TBM / EPB
- Tipo de Escudo → Simple / Doble / Sin Escudo

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

Relación Rendimiento – Tipo de Zona

Tal como apuntaban los resultados de este mismo análisis, teniendo en cuenta el coste en vez del rendimiento, para un mismo tipo de material, existe una mejora del orden del 60% en los rendimientos generales para los casos no urbanos (con medias de 472,6 m/mes) respecto a los de zona urbana (con una media de 292,1 m/mes).

Relación Rendimiento – Diámetro

Como hemos comentado anteriormente uno de los efectos más importantes en relación con los rendimientos es el diámetro de excavación. Se puede afirmar que el comportamiento del rendimiento medio mensual es lineal mientras que su desviación estándar sigue una ley exponencial.

Si realizamos este mismo estudio añadiendo variables encontramos otras interesantes conclusiones. Si por ejemplo incluimos en la gráfica la variable Tipo de Tuneladora se observa que los rendimientos en diámetros pequeños (< 3 metros) y grandes (11 a 15 metros) se igualan mientras que presenta grandes diferencias para diámetros intermedios. Ello puede deberse a que para los diámetros pequeños el terreno, presenta menores problemas de sostenimiento mientras que en el caso de grandes tuneladoras, pasa justo lo contrario, añadiendo riesgos tanto geotécnicos como mecánicos a la excavación.

En otro caso destacable, relacionado con el punto anterior, añadiendo la variable Tipo de Zona junto con el Diámetro, se observa como la pendiente de la recta que define el rendimiento, tiene una mayor pendiente en zona no urbana, mientras que para zona urbana los incrementos son más suaves.

En otro análisis cruzado si añadimos la variable Presencia de Agua, vemos que si existe agua se sigue cumpliendo una pauta lineal de descenso con el diámetro nuevamente con una fuerte pendiente.

De los dos resultados anteriores podemos concluir el gran efecto de dichas variables en el rendimiento.

Se muestra aquí un gráfico para tratar el caso de análisis múltiple Rendimiento - Diámetro -

MEDIA DE RENDIMIENTOS MEDIOS DE AVANCE (m/mes)

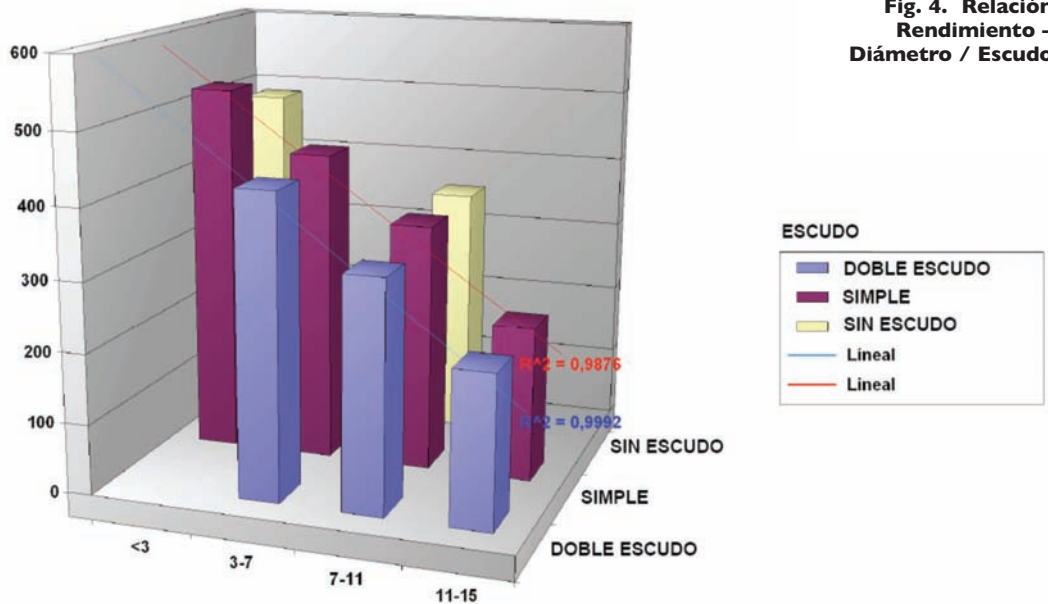


Fig. 4. Relación Rendimiento – Diámetro / Escudo

DIÁMETRO TUNELADORA (m)

Tipo de Escudo. Resulta interesante ver como independientemente del tipo de escudo, se mantiene la relación lineal que rige su comportamiento. El hecho de que no varíe prácticamente el rendimiento medio al emplear uno u otro escudo no significa que no afecte, sino que justamente será necesario escoger el escudo apropiado para garantizar el rendimiento de la tuneladora en cuestión para el terreno dado.

Relación Rendimiento – Material

Vemos aquí una correspondencia clara entre el resultado de la relación entre rendimiento

medio mensual y el material a excavar con el que se daba en el mismo estudio para el coste. No obstante, y como es obvio, esta clara correspondencia es inversa, es decir, si antes el coste bajaba al mejorar la estabilidad del terreno, en este caso el rendimiento sube al mejorar la competencia del terreno.

El salto es más significativo si se trata de una excavación en roca, pasando de una mejora del rendimiento de suelo a mixto del 16%, a un 61% si el cambio de terreno es de mixto a roca.

Medía de RENDIMIENTO MEDIO MENSUAL (m)

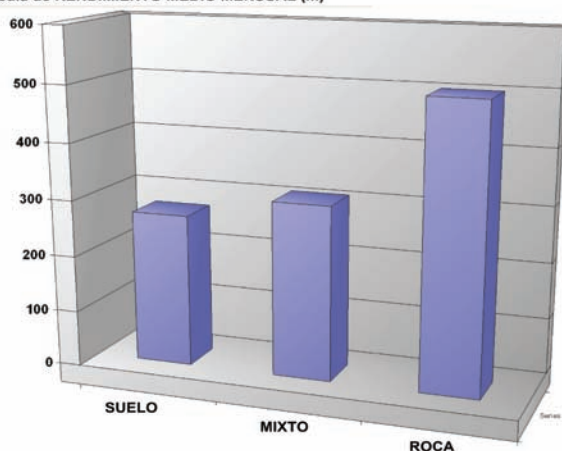


Fig. 5. Relación Rendimiento – Material

Relación Rendimiento – Presencia de Agua

El agua, como es de esperar, repercute negativamente en el rendimiento. Del estudio se extrae como se produce una disminución significativa del mismo en presencia de agua. Concretamente, esta disminución supone un descenso del 70% en el rendimiento. Debemos decir que este brusco descenso es consecuencia, entre otros factores, de una incorrecta elección de la máquina y reflejo de obras en los que este hecho produjo descensos de rendimiento importantes.

Se extrae del estudio conjunto de material y presencia de agua que se mantiene la tendencia inicial. Diferenciando por materiales los descensos son de un 43% si se trata de terreno

MATERIAL

mixto, mientras que si es roca el descenso de rendimiento medio es del 35%. Esta diferencia parece estar relacionada con que el efecto del agua en la estabilidad de un túnel en roca es menor que la que podemos tener en un túnel en terreno mixto o suelo.

Relación Rendimiento – Tipo de Tuneladora

En este ámbito se produce, como es de esperar, una disminución del rendimiento si la tuneladora a utilizar es una EPB en vez de una TBM. En concreto el valor es cercano al 50%. Ello se debe, como es lógico, no sólo al terreno y a los condicionantes externos que pueda haber, sino además, a los ciclos de trabajo de cada máquina, superiores en una EPB.

Estudio conjunto de Parámetros Básicos de Rendimiento

Finalmente, se realizó un análisis conjunto de todos los parámetros estudiados anteriormente y que se consideran los más determinantes en la estimación del rendimiento medio mensual. El resultado son ecuaciones lineales para cada combinación de parámetros en función del diámetro. Se repite el proceso para obtener la desviación del rendimiento, y en este caso, la ecuación resultante es exponencial según el diámetro.

Tenemos definidos así los rendimientos medios y su desviación, dados unos parámetros sencillos de definir, y que en cualquier caso, contemplan la incertidumbre al basarse en datos de obras reales y presentarse en forma de distribución normal.

Análisis de resultados

Una vez realizado el análisis de la base de datos, y extraídas las conclusiones, queda validar los resultados obtenidos. Trataremos aquí el análisis de las ecuaciones que definen los rendimientos medios mensuales.

A continuación se muestra una tabla resumen donde se comparan los rendimientos obtenidos en distintas obras (m/mes), con los que resultan del modelo de EUROGEOTECNICA. Introduciendo los datos de cada obra en la simulación obtenemos resultados en forma de rendimientos mínimos, medios y máximos para así poder comprobar

la validez de las ecuaciones extraídas de la base de datos.

Caso	Diámetro	Rendimiento Medio Obra (m/mes)	Modelo (m/mes)		
			Min.	Med.	Max.
Guadarrama Sur HK	9,45	492	266	335	405
Guadarrama Norte HK	9,45	412	266	335	405
Guadarrama Norte Wirth	9,45	506	266	335	405
Guadarrama Sur Wirth	9,45	456	266	335	405
Perthus I	9,96	274	254	321	387
Perthus II	9,96	305	254	321	387
Pajares Lote I	10,95	412	232	292	352
Pajares Lote II	10,95	337	232	292	352
Thalwil I, Zurich	12,24	428	246	299	351
Murgenthal	12,03	362	253	306	360
Les Vignes Norte, Suiza	11,8	231	215	270	325
Les Vignes Sur, Suiza	11,8	181	215	270	325
Mont Russelin	11,74	255	217	272	327
Sachseln	11,77	269	216	271	326
Gorgier N	11,77	250	216	271	326
Gorgier S	11,77	270	216	271	326
Quinling Norte, China	8,8	284	312	386	416
Quinling Sur, China	8,8	290	312	386	416
Lesotho Ash, Sudafrica	5,4	604	413	518	624
Lesotho Caledon	5,4	697	413	518	624
Trasvase Villarejo	5,5	124	139	244	349
Trasvase Talave	5,05	273	145	255	364
Doukkala (NECSO)	7,2	542	361	448	536
Matmata (NECSO)	5,3	543	416	522	629
MEDIA DE RENDIMIENTOS					
		367	264	336	405

Tabla I.-Comparación de rendimientos de obras con resultados modelo. Casos TBM

Caso	Diámetro	Rendimiento Medio Obra (m/mes)	Modelo (m/mes)		
			Min.	Med.	Max.
Línea 4 Hortaleza - Madrid	9,38	314	173	244	314
Línea 7 Pitis - Madrid	9,38	307	173	244	314
Línea 7 Valdezarza - Madrid	9,38	269	173	244	314
Línea 8 Feriales - Madrid	6,52	290	250	250	438
Línea 9 Vicálcaro - Madrid	9,38	254	173	244	314
Línea 8 Aeropuerto - Madrid	9,38	366	173	244	314
Línea 10 Pozo-S.Vicente - Madrid	7,4	265	227	313	399
Línea 10 Via 2 - Madrid	7,4	289	227	313	399
Línea 10 Pozo -Telescopio- Madrid	7,4	333	227	313	399
Sifón El Salaam -1. Canal de Suez	6,34	151	254	350	446
Sifón El Salaam -2. Canal de Suez	6,34	219	254	350	446
Sifón El Salaam -3. Canal de Suez	6,34	204	254	350	446
Sifón El Salaam -4. Canal de Suez	6,34	184	254	350	446
Elba 4 tunel, Hamburgo	14,14	90	33	77	120
Caluire S. Bulevar perif. Lyon.	11,02	226	126	186	246
Metro Lisboa. Línea D.	9,84	101	160	227	295
Metro Lille L2 -1	7,72	161	218	302	385
Metro Lille L2 - 2	7,72	173	218	302	385
Caluire N. Bulevar perif. Lyon.	11,02	130	126	186	246
Metro Munich Lot I West 5	7,35	171	228	315	401
METEOR Bastille - Madeleine	8,6	197	209	290	370
FFCC Essen 2	8,33	190	202	280	359
Metro Roma	10,64	110	137	199	261
Saint Clair, Canada-USA	9,53	131	169	238	308
Passante Ferroviario 2, Milán.	8,03	252	210	291	372
FFCC Essen I	8,33	164	202	280	359
Metro Colonia	6,6	180	248	341	435
Colector Sevres Acheres	4,84	412	291	403	515
MEDIA DE RENDIMIENTOS					
		219	200	279	359

Tabla 2.- Comparación de rendimientos de obras con resultados modelo. Casos EPB

Primeramente destacar que los 52 casos aportados corresponden a obras con distintos diámetros y condicionantes por lo que el muestreo parece razonable de cara a una validación del modelo.

Podemos comprobar como, a pesar de que no siempre se obtiene un intervalo que contemple las medias resultantes de obra, la estimación es lo bastante ajustada como para que la media de los rendimientos obtenidos del modelo tenga un error

del 8% en el caso de TBMs y del 28% en el caso de las EPBs. En cualquier caso estamos, en ambos casos, dentro del intervalo estimado. Si contemplamos todos los casos de una forma conjunta el error entre medias es del 6 %. Dicha desviación es suficientemente pequeña dada la incertidumbre habitual en este ámbito, más si cabe, considerando las variables utilizadas para dicha estimación.

Llegados a este punto debemos recordar que los rendimientos del modelo están basados en obras reales, y por tanto, incluyen los efectos de las curvas de aprendizaje además de las paradas por mantenimiento, reparaciones y otras posibles incidencias que se puedan producir en el transcurso de las obras. A medida que se introduzcan más casos en la base de datos, mayor será el ajuste logrado, mostrándose así una herramienta dinámica y útil.

Conclusiones

Para el desarrollo del modelo de estimación de coste y plazo de ejecución de túneles mecanizados se ha creado una base de datos que ha permitido estudiar el comportamiento de distintos parámetros en relación con el coste y el rendimiento para comprobar así su influencia en la ejecución de un túnel.

Este estudio ha permitido definir qué variables son fundamentales, ya sea para el cálculo del rendimiento, o de costes asociados como el de sostenimiento o la potencia y peso de la máquina.

Dado que la estimación del coste total se ha planteado, tal como se trataba en el artículo publicado en el nº11 Septiembre-Octubre de esta misma publicación, dividiendo los costes en dependientes del tiempo, independientes del tiempo, fijos y maquinaria resulta primordial estimar el plazo de ejecución. Se ha comprobado mediante el análisis de casos reales como el modelo permite acotar el plazo de ejecución.

Destacar finalmente la importancia de la elección de la máquina, no sólo para conseguir un correcto control de asientos en el caso zonas urbanas, o evitar problemas en caso de presencia de agua. Una elección en que se consideren todos los condicionantes externos, y no sólo el coste de la máquina, optimizará el rendimiento, especialmente en tuneladoras de gran diámetro. En consecuencia el coste global de la obra se verá no solo reducido, sino además acotado ya que se evitan riesgos que conllevan, a menudo, sobrecostes en la ejecución de un túnel.