

## 4. ANÁLISIS DE LA BASE DE DATOS

En el apartado 3 del presente estudio “*Recopilación de casos y generación de una base de datos*” ya se describen el planteamiento y creación de la base de datos. En este apartado no obstante, el objetivo se centra en el estudio de la misma, comenzando por analizar la composición y dispersión de los datos para después analizarlos con la finalidad de encontrar relaciones y tendencias que serían utilizadas en el planteamiento del modelo.

Se trata pues de saber, de los muchos parámetros implicados en la determinación tanto del coste como del plazo de ejecución de un túnel mecanizado cuales tienen un mayor impacto e el desarrollo de la obra, cual es su comportamiento al variar sus valores, y cuales en definitiva, tienen significación suficiente como para sustentar el modelo que se desea crear.

Merece la pena destacar que la base de datos no es sino una herramienta dinámica que ayuda en el desarrollo del modelo pero que éste, como se verá más adelante, resulta sólido en sí mismo. Sí es cierto no obstante que cuanto mayor sea el volumen que componga la base de datos mayor será la precisión del resultado final y por tanto sería aconsejable que a medida de que se dispongan de más datos se añadan a los actualmente disponibles.

### 4.1. ANÁLISIS DE DATOS GENERALES

El objetivo del presente apartado es estudiar el volumen y dispersión de los datos disponibles en la base de datos creada. En el Anejo 3 “Estudio de la base de datos” se presentan un importante volumen de gráficos que muestran la distribución del conjunto de parámetros considerados, también de forma correlacionada. Se describen a continuación algunos de los casos más destacables.

#### 4.1.1. Tipo de Tuneladora – Diámetro

Tratamos aquí dos de los parámetros fundamentales en la definición de un túnel mecanizado. De cara a evitar una dispersión excesiva de los valores del diámetro, se han agrupado los datos disponibles tal como se muestra en un nuevo gráfico a continuación. Esta es una de las ventajas de trabajar con una base de datos ACCESS.

Antes de entrar a valorar estos parámetros destacar que, según la opinión de expertos consultados<sup>2</sup>, es de esperar un cambio de tendencia en el rendimiento de tuneladoras con diámetros superiores a 6 ó 7 metros. Según afirman, es un diámetro a partir del cual se acentúan los problemas propios de una obra subterránea del tipo que nos ocupa. Esta afirmación será también objeto de un estudio posterior.

Nuevamente encontramos una distribución aceptable de datos. Se dispone de 34 fichas de obras ejecutadas mediante una EPB mientras que son 60 las obras que utilizaron una TBM. Dentro de cada una de estas categorías observamos a su vez una suficiente variedad de datos relacionados con el diámetro siendo, como es de esperar, de mayor

---

<sup>2</sup> Carles López Carreras, Doctor Ingeniero Geólogo. Antoni Gil Tubella, Ingeniero de Caminos Canales y Puertos.

volumen para los diámetros comprendidos entre 3 y 6 metros y menor para los de mayor diámetro, de 12 a 15, por ser éstas obras singulares.

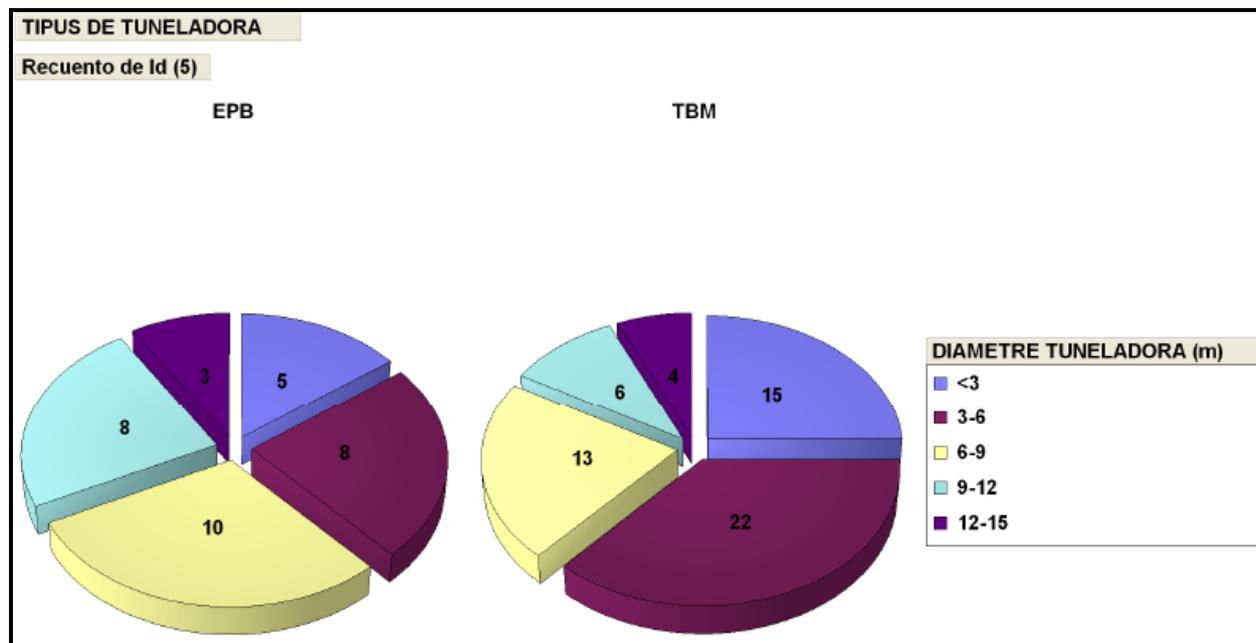


Fig. 6. Distribución conjunta: Tipo de Tuneladora – Diámetro

#### 4.1.2. Escudo – Material a excavar

En este apartado se consideran conjuntamente otros dos parámetros de gran relevancia en la ejecución de túneles mediante tuneladora. No es sino una obviedad resaltar la relevancia que tiene la geología en una obra subterránea.

Debido a la complejidad de determinar con precisión los materiales que se encontraran en la traza del túnel y considerando a su vez, tal y como se ha expuesto anteriormente, que la finalidad de esta tesina es crear una herramienta sencilla y de rápida aplicación que ayude en la toma de decisiones en el diseño de túneles, para el correcto desarrollo del modelo se ha considerado necesario simplificar la entrada de datos. Es por ello que se ha decidido implementar aquí una clasificación del terreno muy superficial que, no obstante, ya ha sido utilizada en este tipo de estudios anteriormente. Como puede verse en el gráfico siguiente, los materiales han sido clasificados según 3 categorías: Suelo, Mixto y Roca.

En lo referente al tipo de escudo se nos presentan tres alternativas en el proceso de ejecución de un túnel con tuneladora. Éstas son emplear un escudo simple, un doble escudo y finalmente una tuneladora sin escudo en caso de que el terreno tenga una estabilidad suficiente como para permitir dicha alternativa. De todas estas alternativas, mencionar que sólo el doble escudo carece de un volumen de datos lo suficientemente sólido para considerar los resultados obtenidos como plenamente válidos y es por ello que se puede dar alguna distorsión en los resultados. Se considerará no obstante que el tratamiento de datos es posible (aunque se tendrá en cuenta este hecho) para el desarrollo del modelo y sería en el futuro necesario completar la base de datos para dar una mayor solidez al conjunto y disminuir así la incertidumbre de los resultados obtenidos.

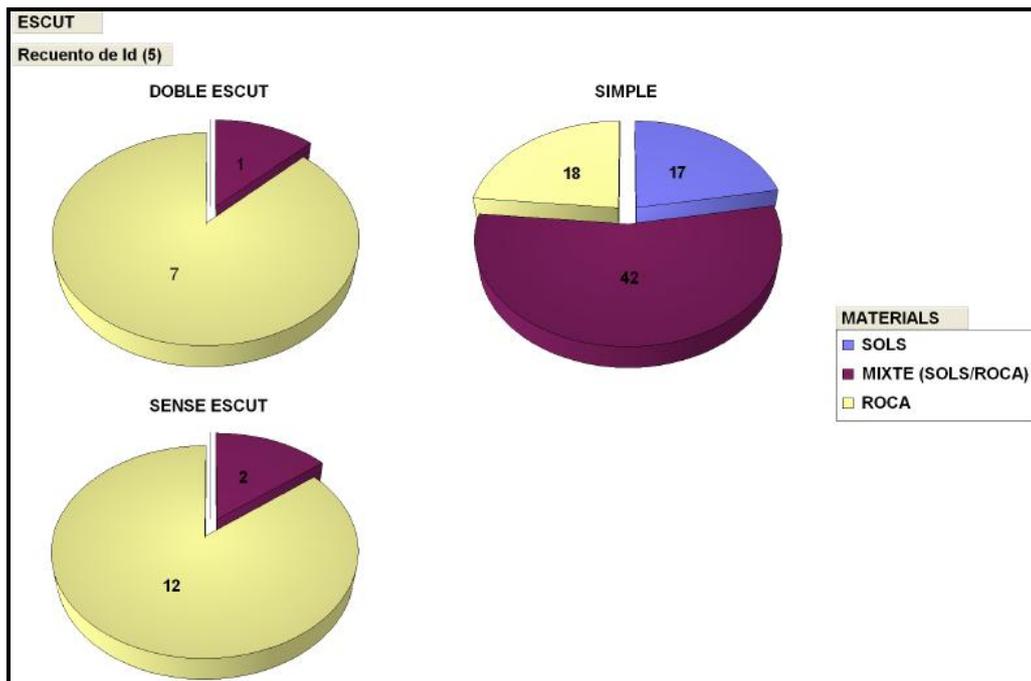


Fig. 7. Distribución conjunta: Escudo – Material a excavar

### 4.1.3. Tipología de túnel

Según su tipología, se han estudiado 6 posibilidades diferentes, estas son: carretera, metro, ferrocarril, gas, cable e hidráulico. Se presenta en el gráfico siguiente la proporción de los mismos en el conjunto de fichas generadas, que como puede observarse, tiene en los túneles hidráulicos la de mayor volumen. Estos suelen ser de pequeño diámetro y deberá tenerse en cuenta más adelante. Del gráfico puede extraerse asimismo que las tipologías de carretera, metro y ferrocarril, aquellas de mayor diámetro e interés en la ingeniería civil, disponen de un volumen suficiente tanto en conjunto como considerándolos individualmente, especialmente en el caso de ferrocarril. Podemos concluir pues que en este campo la distribución es adecuada, englobando de manera proporcional túneles de tipología distinta.

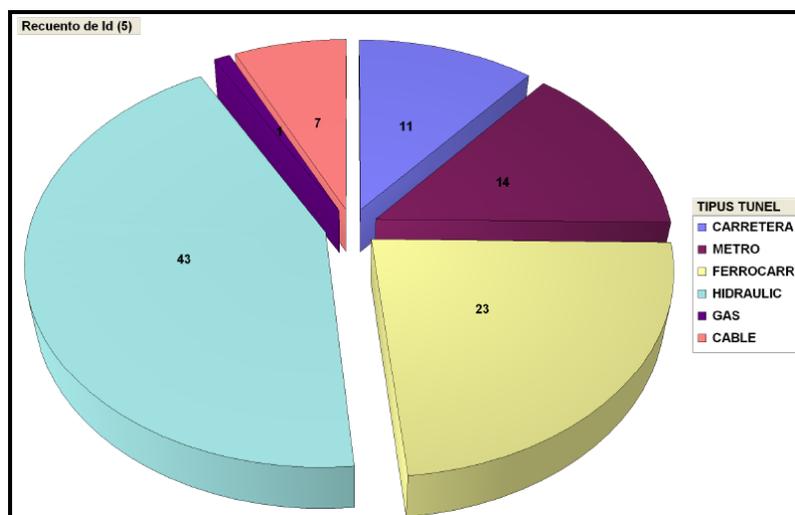


Fig. 8. Distribución de las tipologías de túnel.

#### 4.1.4. Otras Consideraciones

Del resto de parámetros destacar que de las 3 categorías en que se ha dividido, el volumen final es muy importante en todos aquellos incluidos en “*Datos Generales*”, incluyendo tanto la longitud (99 fichas) como el grueso de dovelas (37).

De la categoría “*Datos de Tuneladora*” tenemos menor información siendo el diámetro el más destacado en cuanto a cantidad, como ya se ha explicado, pero además se dispone de suficiente información de otros tal como el peso de la tuneladora (16) o la potencia (25). Serán obviamente éstos los datos que se emplearan en el estudio, sin renunciar al resto si en el futuro se disponen de ellos.

Por último en cuanto a los “*Datos de Ejecución*” disponemos de suficientes datos para poder utilizar aquellos relacionados con el rendimiento de la tuneladora. En particular destacar los 60 casos en que tenemos el rendimiento medio mensual, fundamental para el cálculo del plazo de ejecución, las 43 fichas que disponen del parámetro de avance máximo diario o los 22 avances máximos mensuales.

## 4.2. 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.

A pesar de todo se han intentado extraer unos gráficos que servirán para buscar tendencias o comportamientos genéricos con lo que comparar luego el modelo obtenido y poder dar así más solidez a los resultados.

### 4.2.1. 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. Como puede extraerse de la figura siguiente 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 seguro se debe a varios factores interrelacionados.

Primeramente en una zona urbana se ha de evitar el daño en las estructuras de superficie ubicadas en la zona de la cubeta de asentamientos y por ello se generan unos costes de auscultación muy superiores a los propios de un túnel no urbano, no sólo por la necesidad de una campaña geotécnica más exhaustiva, sino también a un seguimiento de los posibles movimientos de superficie hecho que requiere una inversión importante, más aún considerando que estos costes asociados son mayores en una zona urbana.

Por otro lado, el mismo argumento expuesto anteriormente nos lleva a considerar la importancia de los costes asociados a los tratamientos del terreno, mucho mayores en zona urbana, precisamente en busca de un mayor control de los asentamientos en superficie.

Un tercer motivo, basado nuevamente en los mismos argumentos, es que se baja el rendimiento de la tuneladora para controlar mejor las vibraciones generadas así como para disponer de mayor tiempo de reacción en caso de encontrar algún elemento inesperado ya sea geológico o de cimentación de algún edificio.

Por último, y considerando otros aspectos no menos importantes, 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.

Estas últimas afirmaciones nos conducen inevitablemente a un aumento de aquellos costes relacionados con el tiempo de ejecución de la obra como son el del personal o el de las instalaciones. Más adelante, en el apartado 5 “*Estudio General de Costes*” se detallan dichos costes de forma más exhaustiva.

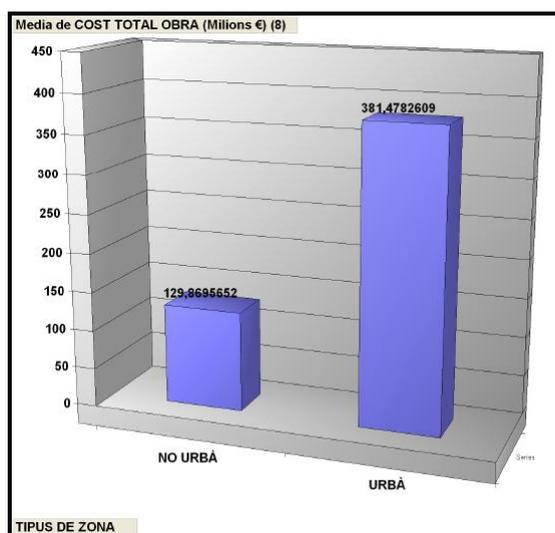


Fig. 9. Relación Coste – Tipo de Zona

#### 4.2.2. Relación Coste – Diámetro

De la relación del diámetro con el coste se puede extraer la conclusión de que, no sólo se incrementa éste notablemente con el diámetro sino que lo hace aproximadamente siguiendo una relación exponencial. Como se verá más adelante en la tesina, este tipo de relación se repite constantemente, lo cual hace pensar que no puede ser fruto de la casualidad.

Como se puede observar en la siguiente figura se produce un comportamiento extraño en el coste, bajando ligeramente al pasar de diámetros de 3 a 6 metros a los de 6 a 9. Esto puede deberse a que, como se ha apuntado anteriormente, aquí se engloban diferentes tipologías de túnel, tuneladoras y demás factores como en que el coste se pueden incluir estaciones de metro, etc... que según la distribución de los datos que tenemos puede distorsionar en parte los resultados como así parece suceder.

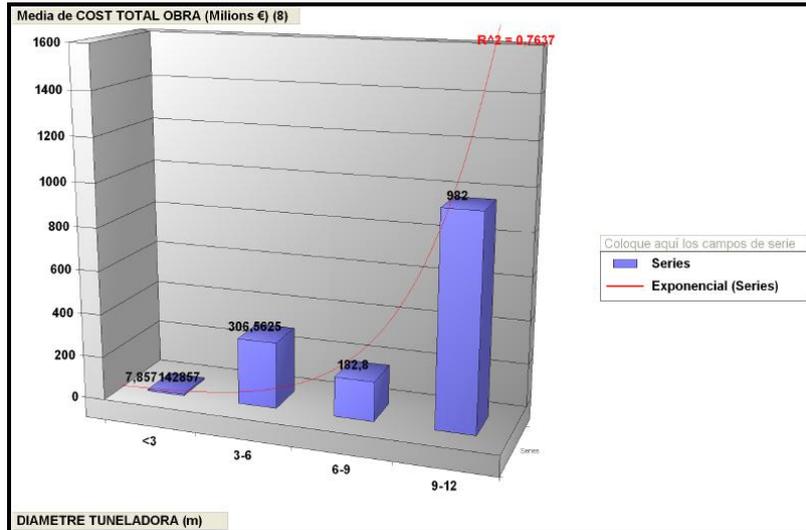


Fig. 10. Relación Coste – Diámetro

### 4.2.3. Relación Coste – Longitud Total

Agrupando los datos disponibles de longitud total, de la forma en que se ve a continuación, para evitar una dispersión excesiva, puede observarse un buen ajuste una vez más a una relación exponencial.

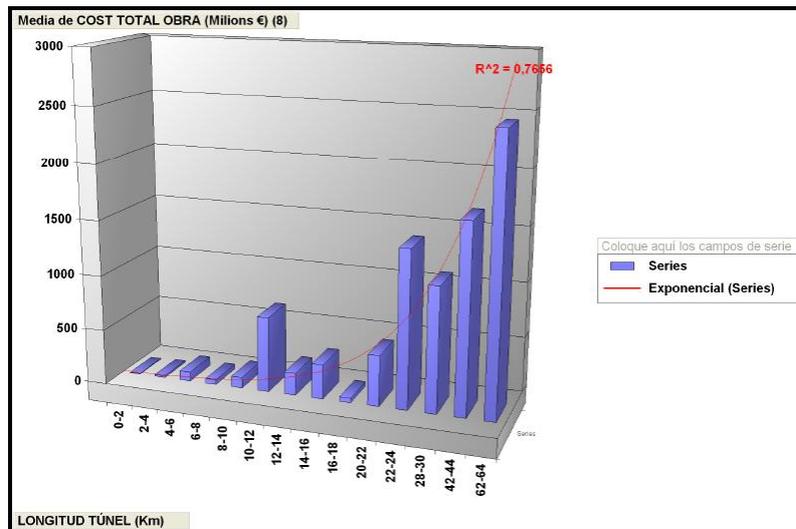


Fig. 11. Relación Coste – Longitud Total

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 escombros desde el frente de excavación a 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.

Merece la pena resaltar que en un entorno tan extremo y desconocido, a pesar de lo extensa que sea la campaña de reconocimiento previo, y en el que la maquinaria trabaja tan al límite es inevitable que ocurran sucesos inesperados. Una simple falla

puede atrapar la máquina y parar la obra durante meses, o puede que la tuneladora no esté preparada para un entorno geológico no previsto en la traza, hechos en sí mismos que pueden llegar a llevar la obra a la quiebra. No resulta extraño pues, que a mayor longitud, mayor sea la probabilidad de un suceso con impacto económico negativo, pasando de un incremento previsiblemente lineal en coste con la longitud, a uno exponencial.

#### 4.2.4. 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 suelo, siendo obviamente mayor para excavación en suelo y menor para roca. El impacto sobre el coste de este parámetro debe entenderse desde 3 puntos de vista. Primeramente, el coste de la tuneladora, que se incrementa al ser necesario una EPB para terrenos menos competentes por ser ésta una máquina con mecanismos más complejos. En segundo lugar, se debe considerar el impacto en el grueso y calidad del sostenimiento para soportar los empujes en terrenos de peor calidad, siendo esta una partida de la obra, que como podrá comprobarse más adelante una vez se establezca el modelo, de las de mayor impacto en el coste final esperado. Por último, resaltar que la producción se reduce a medida que el terreno presenta menor estabilidad, por lo que nuevamente nos encontramos ante un incremento del gasto asociado a las partidas dependientes del tiempo

Se puede comprobar a continuación como pasando de una excavación en suelo a terreno mixto representa aproximadamente la mitad del coste, mientras que el mismo salto en caso de pasar de mixto a roca, supone un factor de reducción aproximado del 60% adicional.

A pesar de todo lo expuesto, no debemos olvidar de todas formas, la posible distorsión que puede provocar en estos resultados el hecho que los terrenos catalogados como suelo o mixtos estén asociados comúnmente a obras de metro que presentan un mayor coste ya que a menudo se incluyen gastos asociados a esta tipología de obra que no son para nada despreciables.

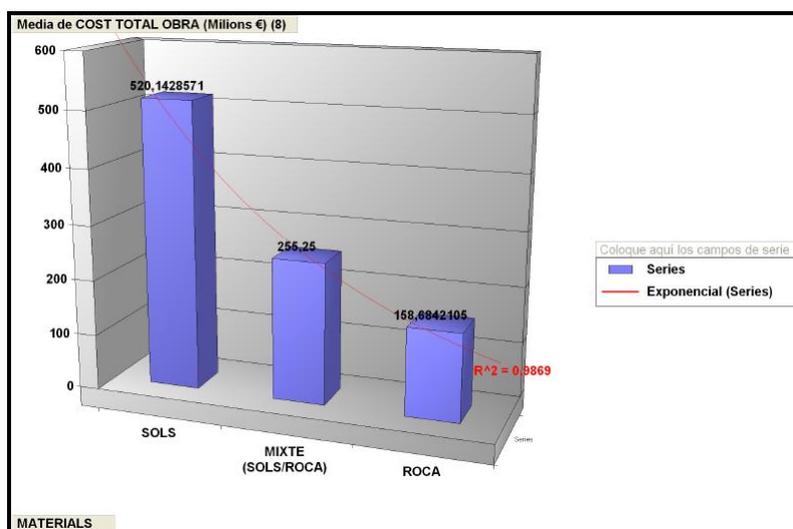


Fig. 12. Relación Coste – Material

#### 4.2.5. Relación Coste – Tipo de Tuneladora

Íntimamente relacionado con lo expuesto en el apartado anterior, presentamos el resultado de la gráfica definitoria de este parámetro. Podemos ver como el tipo de tuneladora puede representar, en el caso de ser necesaria una EPB, un salto en el coste de 6 veces a si en la obra se requiriese una TBM. Los motivos expuestos en relación al tipo de material son plenamente válidos para explicar esta diferencia tan significativa.

No es que la EPB sea 6 veces más cara, sino que la necesidad de emplearla esta íntimamente relacionada con las condiciones de contorno. Aquí pues se constata un hecho que será más conveniente analizar desde, tanto el punto de vista del rendimiento, como del precio de la máquina, además de considerar a qué casos suelen estar relacionados estas tuneladoras para entender el alcance de este factor determinante en la ejecución de un túnel.

Las obras ejecutadas con EPB son generalmente más cortas y emplazadas en zona urbana mientras que las que emplean TBM por el contrario son de mayor longitud pero en zona no urbana lo que lleva a una mayor amortización de maquinaria además de conseguir mayores rendimientos. Si además añadimos el efecto negativo en coste y rendimiento que generan las estaciones y pozos generalmente presentes en una zona urbana llegamos a una posible justificación de los resultados que se presentan a continuación.

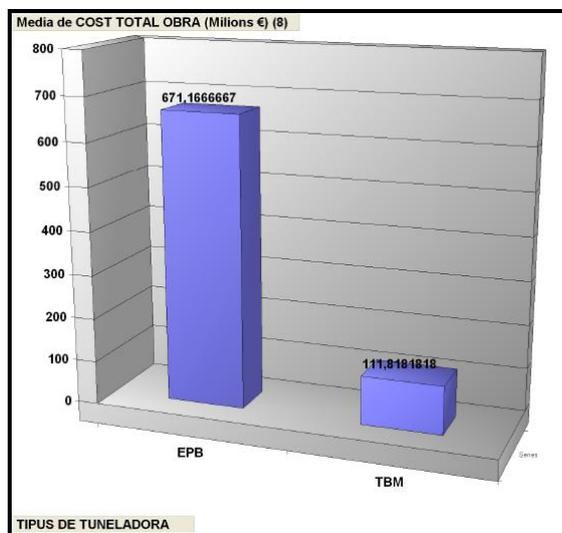


Fig. 13. Relación Coste – Tipo de Tuneladora

#### 4.2.6. Relación Coste – Tipo de Túnel

Se presenta a continuación un gráfico que resulta interesante por las muchas implicaciones que conlleva. A priori puede ser éste un factor de poca utilidad práctica en la definición del modelo que se pretende desarrollar pero por el contrario es muy esclarecedor, más aún, para reafirmar algunas observaciones expuestas en apartados anteriores en relación a una posible influencia en los costes por partidas implícitas en cada tipología como son estaciones de metro, instalaciones, costes asociados a riesgos por afectación de edificaciones en superficie, etc.

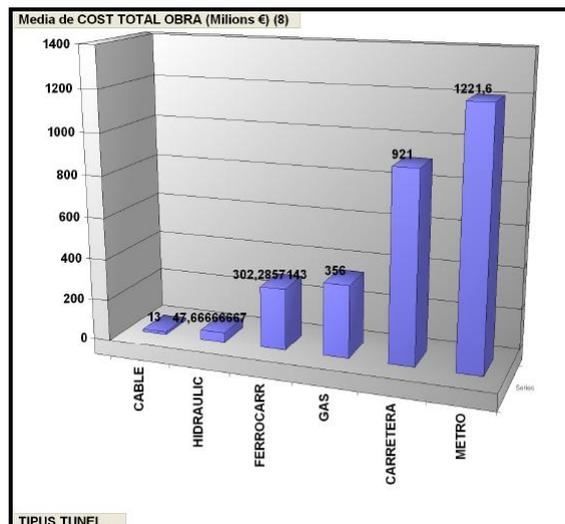


Fig. 14. Relación Coste – Tipo de Túnel

Como es previsible, un túnel de metro, por estar situado en zona urbana inevitablemente, además de las consideraciones ya expuestas, resulta la tipología más cara. En el segundo caso de mayor coste encontramos los túneles de carretera que pueden deber esta posición a las instalaciones de seguridad, iluminación e incluso a las galerías de evacuación asociadas en muchos casos para evacuación de personas en caso de accidente. Destacar a su vez que los diámetros necesarios para estas dos tipologías son mayores a los asociados para el resto de casos, especialmente en el caso de los túneles de carreteras, a excepción de los túneles de ferrocarril, siendo este otro motivo que explica su elevado coste asociado.

De los túneles de gas y ferrocarril, de coste similar, comentar que si bien son de diámetros muy distintos, hecho que parece contradecir los datos resultantes, considerando los costes asociados a la seguridad de los conductos de gas, así como su longitud en comparación con los túneles de ferrocarril, que tampoco requieren ni galería de evacuación ni un alto nivel de instalaciones de seguridad como los de carreteras, se entiende que se puedan igualar los costes finales.

Por último, vemos otro escalón de costes en que se encuentran los túneles de cable e hidráulico de poco diámetro y complejidad motivos suficientes para justificar su escaso coste en relación con el resto.

### 4.3. 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 desperdiciado por fallos en el

proceso. Conseguiremos así introducir el concepto de producción, definido en detalle más adelante, y que incluirá, por la propia naturaleza de los datos en que se sustenta el modelo, todos los elementos que puedan ocasionar influencias en el rendimiento a excepción de aquellos accidentes realmente graves y que no son contemplados en esta tesina ya que requerirían un complejo y profundo estudio de análisis de riesgos.

Como se ha podido comprobar anteriormente en el análisis de los datos disponibles este estudio que se presenta a continuación estará sustentado por una sólida base de datos. Además, éstos tendrán una menor influencia de factores distorsionadores comparado a como sucede con el coste.

En cuanto al método de análisis, se estudiarán individualmente distintos parámetros tanto en su valor numérico como en su tendencia. Se pueden ver en el Anejo 3 “Estudio de la base de datos” un importante volumen de gráficos, aquí no obstante se presentan simplemente aquellos que a la vista de los resultados pueden resultar interesantes en el posterior planteamiento del modelo. En el último punto de este apartado se puede ver un gráfico que incluye todos aquellos parámetros que se muestran más directamente relacionados con el rendimiento. Esta será la base para el cálculo de los rendimientos del modelo.

Finalmente, aunque aquí no se haga referencia, podrá observarse en el anejo 3, que no sólo se ha estudiado el rendimiento sino también las desviaciones que se dan en la base de datos y que será también un factor clave en el desarrollo de la solución final al problema que motiva esta tesina.

#### 4.3.1. Relación Rendimiento – Tipo de Zona

Tal como se predecía según los resultados de este mismo análisis, teniendo en cuenta el coste en vez del rendimiento, se puede observar en el gráfico adjunto que, dentro de 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). Este factor, uno de los principales en el impacto sobre el rendimiento, viene condicionado por el control y la limitación de asentamientos máximos en zona urbana, así como a la necesidad de ejecución de obras auxiliares tal como estaciones, que frenaran la máquina a su paso por éstas.

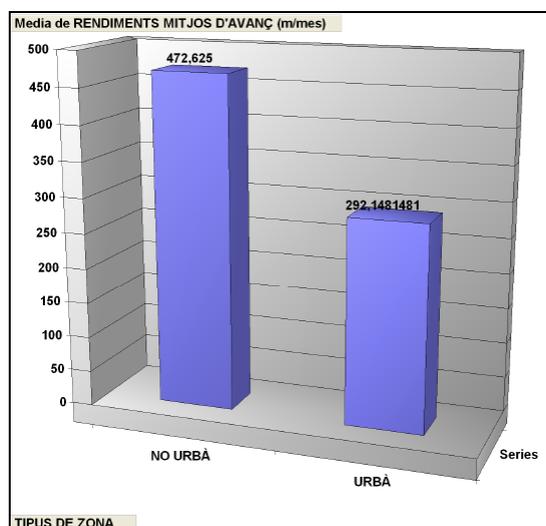


Fig. 15. Relación Rendimiento – Tipo de Zona

En cuanto a las desviaciones estándar también puede comprobarse que es 1,7 veces superior para el caso no urbano respecto al urbano, un valor prácticamente exacto al anterior considerando las medias de rendimientos mensuales. Será este pues un parámetro a tener en cuenta en el momento de analizar los rendimientos de cálculo del modelo cuando se haga de forma conjunta.

#### 4.3.2. Relación Rendimiento – Diámetro

Como hemos comentado anteriormente uno de los efectos más importantes en relación con los rendimientos es el diámetro de excavación. Prácticamente se puede afirmar que el comportamiento es lineal ( $R^2=0.9794$ ), si nuevamente agrupamos los términos.

Si realizamos este mismo estudio añadiendo variables (las gráficas se encuentran en el anejo 3) 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 iguala mientras que presenta grandes diferencias para diámetros intermedios. Ello puede deberse a que para los diámetros pequeños el terreno, por malo que sea, 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, pues añadimos la variable *Tipo de Zona* junto con el *Diámetro*, vemos que la pendiente de la recta que define, tal como hemos visto, el rendimiento con el diámetro, tiene una mayor pendiente en zona no urbana, mientras que para zona urbana los incrementos son muy 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 con además una fuerte pendiente. Por el contrario, si estamos en casos sin agua no parece encontrarse ningún tipo de patrón, observándose un comportamiento muy uniforme, quizá por la falta de casos en que no hay presencia de agua.

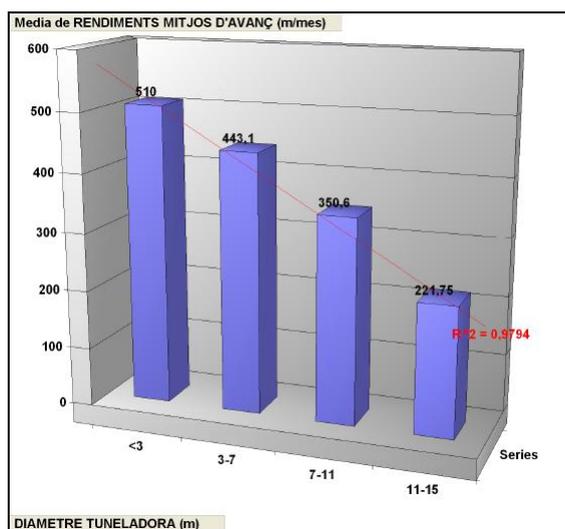


Fig. 16. Relación Rendimiento – Diámetro

Se muestra aquí un segundo gráfico para tratar el caso de análisis múltiple *Rendimiento – Diámetro - Tipo de Escudo*. Resulta interesante ver como independientemente del tipo de escudo, se mantiene el resultado anterior, tanto en

valores como, consecuentemente en 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.

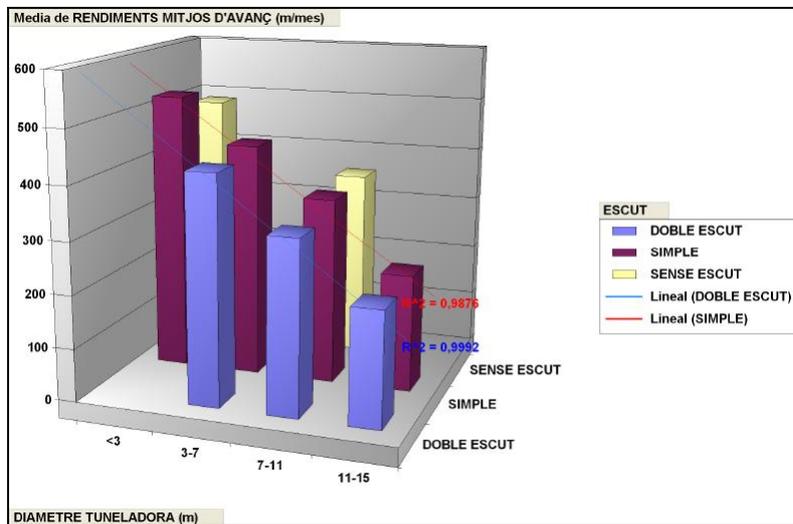


Fig. 17. Relación Rendimiento – Diámetro / Escudo

Para finalizar hacer nuevamente referencia al anejo 3 para ver otros muchos casos estudiados además del análisis de las desviaciones estándar, de las que se puede resumir que decrecen con el diámetro de forma exponencial ( $R^2=0,8642$ ).

#### 4.3.3. Relación Rendimiento – Tipo de Túnel

En este caso la influencia del tipo de túnel puede considerarse una muestra de cómo el conjunto de factores asociados a cada tipo de construcción afectan directamente en el rendimiento medio.

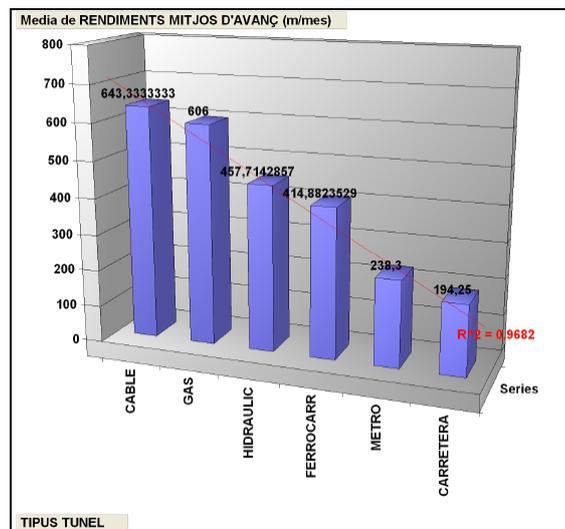


Fig. 18. Relación Rendimiento – Tipo de Túnel

Según la afirmación anterior podemos pensar que el gráfico que se muestra a continuación, si bien carece de interés de cara a la modelización, si puede ser útil como patrón, como referencia de lo que esperamos del modelo. Recordemos, que a diferencia de la misma comparativa dada en el estudio de costes, aquí no existen tantos factores que puedan alterar el resultado y de hecho se puede comprobar cuan diferente el resultado es en comparación.

El rendimiento en túneles de carretera tan bajo, incluso por debajo de los rendimientos de metro que podrían suponerse los más lentos en cuanto a su producción puede estar sustentado en el hecho de que los casos que se incluyen en las fichas son de gran diámetro, con un mínimo de 11 metros y con media de 11,81 metros en una muestra de 8 elementos repartidos de forma uniforme tanto en zona urbana como no urbana. Se trata pues de obras singulares de gran dificultad técnica.

En cuanto a los túneles de metro, todos ellos en zona urbana y con una muestra que consta de 14 elementos, el diámetro medio es de 7,14 metros y por tanto en esta diferencia puede radicar el hecho de la pequeña diferencia en rendimiento entre ambos casos.

La población de datos disponible para túneles de ferrocarril es de 22 elementos de los cuales 12 están en zona no urbana y 10 en zona urbana con un promedio de 8,22 metros diámetro. Debemos entender pues que, aunque se eleve la media de rendimiento en un 31 % debido al efecto de la zona en la que se ejecuta la obra, han de existir otros factores tal como el tipo de terreno o la presencia de agua que expliquen este comportamiento, ya que al tener una media de diámetro mayor que la dada para túneles de metro aun así el rendimiento es mayor.

Los túneles hidráulicos, de gas y cable resultan en un diámetro medio de 2,77 en una muestra de 49 obras y en ello, sumado a su simplicidad de ejecución, se puede entender su elevado rendimiento.

#### **4.3.4. Relación Rendimiento – Material**

A diferencia del punto anterior aquí sí existe 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.

Volvemos a hacer referencia al hecho de que generalmente las fichas de obras excavadas en material tipo suelo o mixto disponibles se emplazan en un entorno urbano, y por tanto están condicionadas en su rendimiento por los motivos ya expuestos.

Nuevamente parece haber relaciones entre los parámetros estudiados que parecen justificar su elección como base para el planteamiento del modelo, pues las tendencias y las justificaciones posibles convergen en cada uno de los análisis.

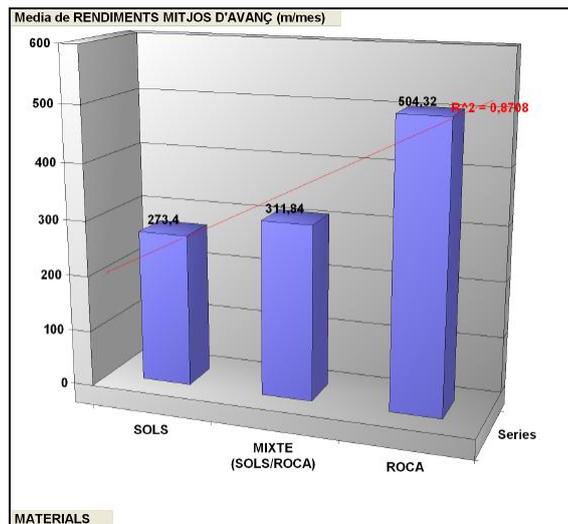


Fig. 19. Relación Rendimiento – Material

### 4.3.5. Relación Rendimiento – Agua

El agua, uno de los principales problemas que se pueden, y de hecho prácticamente siempre se acaban dando en obra civil, más aún en una obra subterránea, repercute, como es de esperar, negativamente en el rendimiento.

Vemos en la siguiente figura que se produce una disminución significativa del rendimiento en el momento en que entra en juego el agua. Concretamente esta disminución supone un descenso del 70% en el rendimiento.

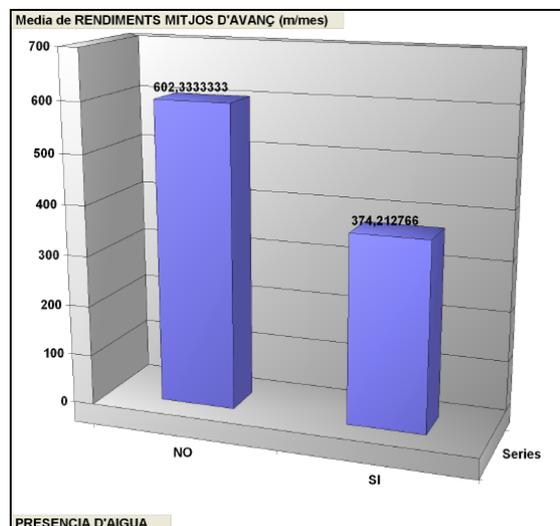


Fig. 20. Relación Rendimiento – Agua

Si buscamos el efecto que producen en el rendimiento conjuntamente el material y la presencia de agua vemos que se mantiene la tendencia inicial ya expuesta pero, como es de esperar el efecto del agua reduce el rendimiento en orden de magnitud similar tanto si se trata de terreno mixto o roca (no hay fichas con terreno tipo suelo y sin presencia de agua). Estos descensos son de un 43% si se trata de terreno mixto mientras que si es roca el descenso de rendimiento medio es del 35%. Esta ligera

diferencia puede 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.

#### 4.3.6. Relación Rendimiento – Tipo de Tuneladora

Se produce, como puede verse en el gráfico mostrado a continuación, una disminución del 50% si la tuneladora a utilizar, condicionado por el terreno a excavar, es un EPB en lugar de una TBM. Ello se debe, como es lógico, al terreno y a los condicionantes externos que pueda haber más que a la tuneladora en sí.

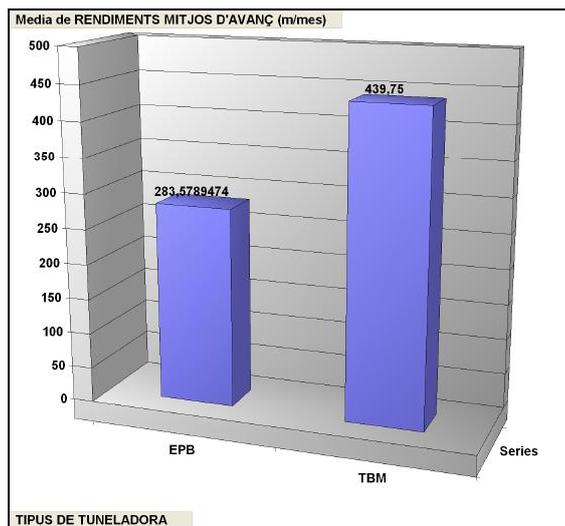


Fig. 21. Relación Rendimiento – Tipo de Tuneladora

Dando un paso más en este análisis podemos estudiar el efecto en el rendimiento de un conjunto de parámetros íntimamente relacionados con el tipo de tuneladora como son la *Presencia de Agua* y el *Escudo*. En este caso destaca que mientras en una TBM simple la presencia de agua no afecta apenas el rendimiento, si nos fijamos en el caso de una TBM sin escudo, la presencia de agua representa un descenso del 317% en el rendimiento medio mensual lo que representa un descenso más que considerable.

Nuevamente recordar que pueden consultarse más gráficas en el anejo 3 como a la que aquí se hace referencia.

#### 4.3.7. Relación de los Parámetros Básicos de Rendimiento

Finalmente, se presenta a continuación, un análisis conjunto de los parámetros estudiados anteriormente y que se consideran los más determinantes en la estimación del rendimiento medio mensual.

La primera conclusión que se extrae de la gráfica siguiente, es la serie de casos que podremos considerar en el estudio a partir de los datos disponibles. La relación de los mismos se muestra de forma ramificada.

Otra consecuencia que se puede extraer es que existen, aunque muy pocos, algunos resultados que se escapan de la tendencia general, tal como puede apreciarse en el caso de obra en terreno urbano en terreno mixto sin presencia de agua en la que se

emplea una tuneladora TBM simple de diámetro menor que 3. Será este dato considerado como singular y apartado del estudio.

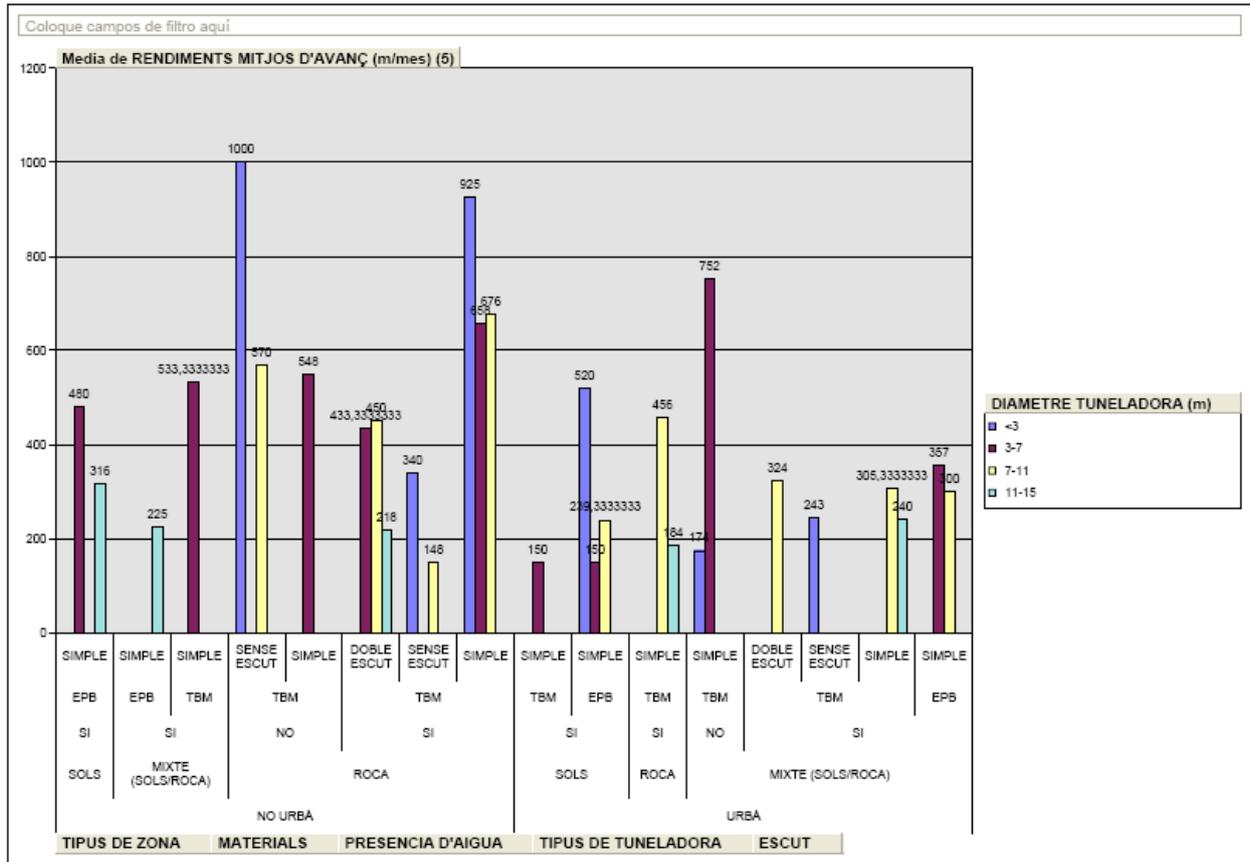


Fig. 22. Relación Parámetros Básicos Rendimiento

Utilizando la base de datos y estudiando caso por caso se buscan las ecuaciones, lineales, que nos marcarán el comportamiento del rendimiento para cada caso en función del diámetro.

En los casos en que no dispone de datos suficientes, un mínimo de dos, debemos realizar algunas hipótesis de cara a completar de forma satisfactoria el estudio. La principal de ellas es la de que es posible utilizar los datos disponibles relativos a los avances máximos mensuales y diarios, para encontrar la pendiente que regirá la ecuación lineal del caso. Basta un punto y una pendiente para definir una ecuación lineal. La experiencia previa adquirida en el estudio gráfico de parámetros, realizada gracias a la base de datos consultable en el anejo 3, nos muestra que las pendientes de las rectas son prácticamente las mismas indistintamente del tipo de rendimiento considerado, ya sea diario, máximo mensual o medio mensual.

En el caso extremo de no lograr el objetivo en base a la primera hipótesis aplicaremos pendientes iguales para el caso de estudio a las dadas por las ecuaciones que rigen el comportamiento de aquellos casos en que se den condicionantes semejantes, esta suposición se realiza nuevamente basándonos en el estudio de gráficas extraídas de la base de datos.

El resultado final del estudio de rendimientos, en forma de ecuaciones lineales función del diámetro, se presentan en la tabla siguiente y serán la base del modelo para la estimación del tiempo de ejecución del túnel:

ZONA	TERRENO	AGUA	TUNELADORA	ESCUDO	ECUACIÓN: Rendimiento ( $\phi$ )
No Urbano	Suelo	Si	EPB	Simple	$592,75 - 20,50 \cdot \phi$
No Urbano	Mixto	Si	EPB	Simple	$498,38 - 20,25 \cdot \phi$
No Urbano	Mixto	Si	TBM	Simple	$691,91 - 28,83 \cdot \phi$
No Urbano	Roca	No	TBM	Sin	$1080,6 - 53,75 \cdot \phi$
No Urbano	Roca	No	TBM	Simple	$751,50 - 37,00 \cdot \phi$
No Urbano	Roca	Si	TBM	Doble	$609,50 - 29,00 \cdot \phi$
No Urbano	Roca	Si	TBM	Sin	$376,00 - 24,00 \cdot \phi$
No Urbano	Roca	Si	TBM	Simple	$971,69 - 31,13 \cdot \phi$
Urbano	Suelo	Si	TBM	Simple	$198,13 - 8,75 \cdot \phi$
Urbano	Suelo	Si	EPB	Simple	$572,63 - 35,08 \cdot \phi$
Urbano	Roca	Si	TBM	Simple	$1102 - 68,00 \cdot \phi$
Urbano	Mixto	No	TBM	Simple	$829,63 - 51,75 \cdot \phi$
Urbano	Mixto	Si	TBM	Doble	$440,38 - 12,25 \cdot \phi$
Urbano	Mixto	Si	TBM	Sin	$259,13 - 10,75 \cdot \phi$
Urbano	Mixto	Si	TBM	Simple	$460,49 - 16,33 \cdot \phi$
Urbano	Mixto	Si	EPB	Simple	$435,38 - 14,25 \cdot \phi$

Tabla 2.- Rendimientos según parámetros considerados

Destacar asimismo que se ha realizado el mismo estudio para encontrar el rendimiento máximo y mínimo, sorprendentemente, la ecuación resultante no varía apenas sea cual sea el caso que tratemos. Tal como se apuntaba en apartados anteriores la ecuación que lo rige, que se presenta a continuación, es exponencial y nuevamente función del diámetro:

$$\bullet \quad \sigma(\phi) = 183,2 \cdot e^{-0,103 \cdot \phi} \quad [4.3.7.1]$$

Tenemos por lo tanto definidas unas ecuaciones tal que, dados unos parámetros sencillos de definir a priori, darán como resultado el rendimiento medio mensual y su desviación estándar y en consecuencia se podrá tratar el rendimiento como distribución normal. 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.

En cuanto a la solidez de estos resultados, que ya de por sí son coherentes, a medida que se incrementase la información disponible en la base de datos, tanto en número de fichas como en datos disponibles en las mismas, podrían incrementarse los casos de estudio, mejorar los resultados dados acotando posibles errores y por último, y no por ello menos importante, ampliar el conocimiento del comportamiento de otros parámetros de los que aquí, debido al poco volumen disponible, no han podido ser tenidos en cuenta. Añadir una última consideración en relación a la actualización de la base de datos, considerando el fuerte empuje que existe en la actualidad en este sector será inevitable que se produzcan avances significativos tanto en prestaciones de las tuneladoras como en sus rendimientos y por tanto será absolutamente necesario actualizar este estudio anualmente si se pretende que sea esta una herramienta de trabajo.

#### 4.4. ANÁLISIS PARÁMETROS TUNELADORA

De cara al cálculo de algunas partidas en el presupuesto esperado de un túnel puede ser de gran ayuda conocer ciertas características de la tuneladora, o su influencia en la obra.

Partiendo del diámetro de la máquina como dato básico, pues es una exigencia del proyecto para 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 grueso de las dovelas.

##### 4.4.1. Relación Potencia Instalada – 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.

Se presenta a continuación un gráfico en que se aprecia el gran ajuste ( $R^2=0.9998$ ) a una ley lineal según el diámetro. Se podrá extraer pues la ecuación de la media así como de la desviación para su posterior empleo en el modelo.

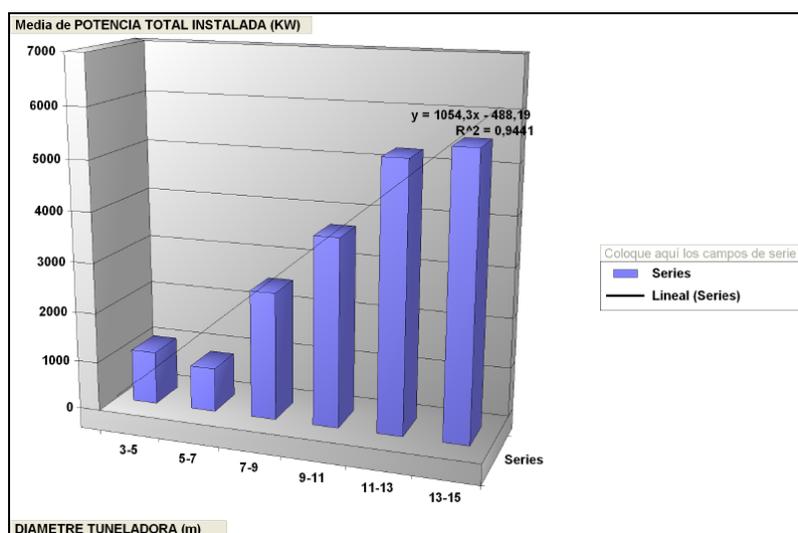


Fig. 23. Relación Potencia Instalada – Diámetro

##### 4.4.2. Relación Peso – 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 ( $R^2=0.8443$ ) incluso sin necesidad de agrupar términos para evitar una dispersión excesiva de datos. Se puede considerar pues que esta relación es correcta. Se estudia también, aunque no se presenta aquí sino en el anejo correspondiente, la desviación de esta misma relación de parámetros para así conocer

los intervalos entre los que puede variar este indicador y se comprueba que también sigue una relación lineal ( $R^2=0.8417$ ) creciente con el diámetro.

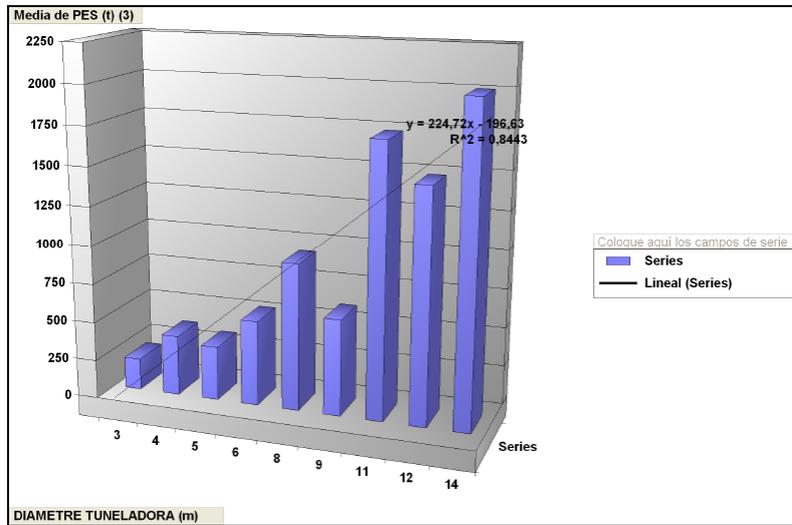


Fig. 24. Relación Peso – Diámetro

#### 4.4.3. Relación Grueso Sostenimiento – Diámetro

Para poder calcular el coste del sostenimiento es imprescindible conocer el grueso de las dovelas. Se buscaron distintas posibles relaciones para poder calcular el grueso de dovelas y así obtener tanto el diámetro interno útil del túnel como también la medición del volumen total de sostenimiento estimado y su desviación. En el estudio se enfocó el problema suponiendo en un inicio 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 es el único que realmente repercute directamente en el grueso de dovela. 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. Vemos que la relación entre parámetros es en este caso exponencial ( $R^2=0.7765$ ).

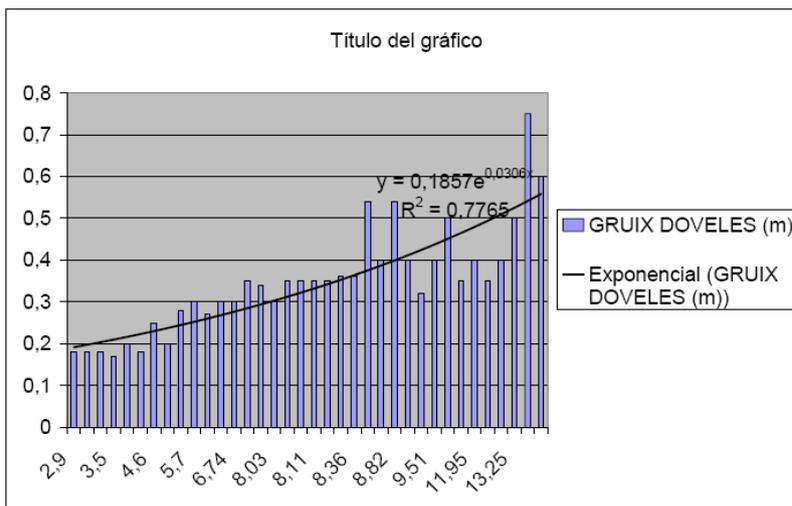


Fig. 25. Relación Grueso Sostenimiento – Diámetro