

La estimación de los costes fijos ($C_{n,f}$) es simplemente su suma. Se detallan en el apartado correspondiente las partidas y valores que lo definen:

$$\bullet C_{n,f} = \sum z_f \quad [5.5.7]$$

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:

$$\bullet C_{n,m} = \sum z_m \quad [5.5.8]$$

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

$$\bullet C_{n,i} = C_{n,ti} + C_{n,q} + C_{n,f} + C_{n,m} \quad [5.5.9]$$

A partir de este momento es donde entra en juego la simulación de Monte Carlo. Daremos valores aleatorios a la distribución normal del tiempo (se realizan 2000 iteraciones N), 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:

$$\bullet \bar{X} = \frac{1}{N} \sum_i^N x_i \quad [5.4.10]$$

$$\bullet s^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{(x_i - \bar{x})^2}{N-1} \quad [5.4.11]$$

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

$$\bullet C \sim N (m_c, \sigma_c) \quad [5.4.12]$$

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, de forma que no sólo podemos 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.

6. ESTUDIO GENERAL DE COSTES

6.1. INTRODUCCIÓN

En este apartado se describe tanto el proceso de documentación llevada a cabo para cuantificar cada uno de los costes como el tratamiento que se les dará. Estos, al ser definidos como variables triangulares, requerirán tres valores: mínimo, esperado y máximo. Se empieza no obstante por presentar un árbol que desglosa los costes considerados en las 4 categorías ya expuestas en puntos anteriores y en sus partidas.

6.2. ÁRBOL DE COSTES

1. Dependientes del tiempo:

- Oficinas / Instalaciones.
- Personal.
- Seguro.
- Costes energéticos → Agua, luz...
- Penalización por retrasos.

2. Independientes del tiempo (materiales: función Longitud y Diámetro principalmente):

- 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, ...

3. Fijos:

- Transporte y montaje maquinaria.
- Mejoras organización.
- Implantación Obra y Retirada → Oficinas. Talleres. Acopios. Planta Dovelas.

4. Maquinaria:

- Tuneladora.
- Maquinaria Auxiliar → Back up

6.3. DATOS PARA EL MODELO

Antes de entrar en detalles o definiciones de costes merece la pena realizar un comentario referente al estudio de costes. Por todos es sabido lo difícil que resulta valorar el coste de cualquier producto, más aún en el sector de la construcción, donde no interesa a nadie decir lo que realmente valen las cosas, pues en esta opacidad se esconde gran parte de la estrategia para aumentar beneficios por parte de las constructoras. Tampoco las casas fabricantes de tuneladoras son muy receptivas a dar datos al respecto. A ello hay que sumarle que en obras que requieren un volumen de material tan enorme seguro se producirán importantes descuentos por parte de los distribuidores para garantizarse unas ventas más que importantes y con un factor de valor añadido, éstas serán continuas en un plazo de tiempo importante.

Ha sido necesario pues un largo proceso de documentación al respecto que se desglosa en los apartados siguientes. De forma global decir que la solución a dichos problemas será buscar el coste que paga la administración, buscando pues costes oficiales y presentando el coste resultado final del modelo en forma de P.E.M. (Presupuesto de Ejecución Material). Si esta herramienta fuese a ser utilizada por otro agente del sector, como una constructora, ésta podría introducir sus costes unitarios al modelo para saber qué es lo que realmente le va a costar la obra.

6.3.1. Costes dependientes del tiempo

6.3.1.1. Oficinas e Instalaciones

Para la definición del coste mensual correspondiente al alquiler de oficinas e instalaciones de personal y maquinaria (incluyendo los equipamientos de oficina necesarios) se ha tomado como referencia los expuestos en una tesis doctoral de origen sueco (Therese Isaksson, 2002), en la que se delimita el coste de esta partida y que, tras la consulta a expertos³ en la materia, asienten en que dicho coste es también válido para obras en nuestro territorio. Resulta pues, que para esta partida tenemos los siguientes costes:

- Coste máximo: 300.000 €/mes
- Coste mínimo: 120.000 €/mes
- Coste esperado: 250.000 €/mes

6.3.1.2. Personal

Tomando como referencia el mismo documento expuesto en la partida anterior, y tras nuevamente la confirmación de su validez por expertos en obras subterráneas, resulta, considerando 23 jornadas de trabajo mensual, con dos turnos de trabajo diarios de 10 horas cada uno para todo el personal necesario, desde la dirección hasta los empleados a pie de obra pasando por los pilotos de la tuneladora, que los costes asociados al personal quedan definidos por los siguientes valores:

- Coste máximo: 580.000 €/mes
- Coste mínimo: 390.000 €/mes
- Coste esperado: 520.000 €/mes

6.3.1.3. Seguro

Una obra con unos riesgos asociados tan considerables, tanto para los propios trabajadores así como para terceras personas, como se ha demostrado desgraciadamente en múltiples ocasiones, requiere, y así se exige por la administración la contratación de un seguro que cubra posibles daños. Este coste está evidentemente relacionado directamente con el plazo de ejecución, puesto que existirá riesgo mientras haya actividad. El origen de los costes que se presentan en esta

³ Carles López Carreras, Doctor Ingeniero Geólogo. Josep Cornelles Taus, Geólogo.

partida es la documentación disponible en Internet⁴ facilitada por la comunidad de Madrid respecto a las obras de ampliación del metro llevado a cabo en dicha comunidad. Entre muchos otros datos de gran interés y que han sido empleados en esta Tesina se incluyen distintos costes de seguro totales por tramo de obra, que mediante el conocimiento del plazo de ejecución permiten extraer los distintos valores que se muestran a continuación en las unidades con las que aquí se trabaja.

- Coste máximo: 50.084 €/mes
- Coste mínimo: 15.025 €/mes
- Coste esperado: 25.042 €/mes

6.3.1.4. Consumos

La partida de costes relativa a los consumos está ligada directamente con la potencia instalada en la tuneladora como ya se ha comprobado. Es por ello que los costes deberán ser multiplicados por este factor presentándose aquí por tanto en unidades diferentes al resto de los correspondientes a esta categoría. Los consumos incluyen tanto los energéticos como el agua necesaria para el funcionamiento de la tuneladora y se han tomado los costes unitarios del Ministerio de Industria para actividades industriales. Éstos, concuerdan con los que se presentan en la tesis doctoral referenciada ya en el punto 6.3.1.1. definidas ya anteriormente jornadas de 20 horas, quedando 4 para el mantenimiento, así como 23 días laborables mensuales resultan los siguientes costes finales:

- Coste máximo: 48 €/mes·kW
- Coste mínimo: 24 €/mes·kW
- Coste esperado: 33 €/mes·kW

6.3.1.5. Penalización por retraso

Se trata aquí un caso extraordinario pues no se concreta coste alguno por penalización. De hecho esta partida puede no existir y será decisión de la administración su idoneidad en cada caso además de la definición de los parámetros que lo componen. Éstos son, el tiempo estimado de ejecución, el margen si lo hubiese, a partir del tiempo de referencia sin que se produzca penalización alguna y, por último, el coste por cada mes en que se sobrepase dicho margen.

6.3.2. Costes independientes del tiempo

6.3.2.1. Sostenimiento

Sin duda, tratamos aquí una de las partidas más importantes para la tipología de obra objeto de la tesina. Puesto que la ubicación de la obra es variable y no siempre se tiene acceso a una planta destinada a la fabricación de dovelas que resulte económica se ha introducido aquí un coste para el caso de disponer de ella así como otro para el caso

⁴ www.madrid.org/metro/tecnologia/tuneladoras.htm

contrario. Para la definición de los costes se ha dividido a su vez cada uno de los casos en dos o tres partidas, según el caso para una mejor definición del coste final.

Primeramente, si se trata del caso en que se disponga de una fábrica de dovelas a una distancia que permita una explotación rentable, componemos en coste del sostenimiento en base a dos partidas que se presentan a continuación junto con sus valores extraídos de las bases de datos del ITEC, y por tanto oficiales:

- Coste por metro cúbico de prefabricado de hormigón armado con fibras, incluido juntas, apuntalamientos, elementos auxiliares y tornillería. → 600 €/m³
- Coste de colocación y transporte por metro cúbico. → 100 €/m³

En segundo lugar, si nos encontramos ante la necesidad de implantar una fábrica propia dovelas se considerarán, además de las partidas anteriores, otra adicional de notable volumen para tal fin. Aunque el coste de colocación y transporte no sufra modificaciones, si cambiará el coste de fabricación ya que el cargo por beneficio industrial y costes generales para el proveedor ya no será justificable. Si tenemos en cuenta que actualmente se carga un 19% como beneficio industrial y costes generales sobre el teórico coste material, pero que dicho coste material ya tiene de por sí un margen lo bastante amplio para aumentar beneficios que ronda el 20%, se ha decidido reducir la partida de coste material en este caso un 40% en total. En cuanto al valor que se da a la implantación de una fábrica de dovelas se toma como referencia nuevamente la facilitada por la comunidad de Madrid respecto a las obras de ampliación del metro. Quedan en definitiva los siguientes costes por partidas:

- Coste por metro cúbico de prefabricado de hormigón armado con fibras, incluido juntas, apuntalamientos, elementos auxiliares y tornillería. → 600 €/m³
- Coste de colocación y transporte por metro cúbico. → 100 €/m³
- Coste de la planta de prefabricados → 3.623.188 €

Por último mencionar que el coste de la planta será repercutido en el modelo presentado en el volumen final estimado de sostenimiento, pensando en amortizar la inversión necesaria en la misma obra por la que ha sido creada, a pesar de que una vez finalizada suele seguir activa variando su producción hacia otros elementos estructurales. Con todo lo expuesto, aplicando datos reales al modelo, puede darse el caso de que, a pesar de disponer del servicio de una planta ajena, resulte más económico la implantación de una propia.

6.3.2.2. Tratamientos

Como base de los costes destinados a tratamientos del terreno para mejorar su estabilidad o excavabilidad se ha tomado como referencia los datos aportados en la Tesis Doctoral ya referenciada anteriormente. Se deduce en ella, que esta partida se comporta de forma linealmente creciente con el diámetro y que presenta los siguientes valores por metro cúbico de excavación. Nótese que las unidades del denominador hacen constar la necesidad de multiplicar por el diámetro según los datos que se aporten al modelo:

- Coste máximo: 38,64 €/m³·m

- Coste mínimo: 34,64 €/m³·m
- Coste esperado: 36,64 €/m³·m

6.3.2.3. Instalaciones auxiliares

Los costes de esta partida están compuestos por los conductos de ventilación además de los cables de alta tensión necesarios para la alimentación de la tuneladora así como la fibra óptica empleada como medio de transmisión de las comunicaciones desde el frente. El origen de los importes aquí presentados está, como en casos anteriores, en la base de datos del ITEC, siendo por tanto oficiales. Las unidades con las que trabajamos en este caso es distinta al resto de partidas de esta categoría y tratándose de euros por metro lineal, presentando los siguientes valores.

- Coste máximo: 290 €/ml
- Coste mínimo: 245 €/ml
- Coste esperado: 265 €/ml

6.3.2.4. Vertedero Tierras

Esta partida está destinada a los costes correspondientes al transporte de tierras desde el frente al vertedero incluido el canon correspondiente por su uso. Al igual que ocurría en el caso del sostenimiento, aquí también es necesario alcanzar el valor buscado a través de un estudio en detalle de distintos aspectos. Desglosamos el coste final, presentado en euros por metro cúbico de excavación, en el coste de la cinta transportadora, evidentemente función de la longitud, el importe del uso de dicha cinta y finalmente el que comporta el transporte desde la boca al vertedero incluido el canon asociado a su uso. La fuente de documentación empleada para la valoración económica de estos conceptos es doble. Por un lado el coste de la cinta transportadora ha sido extraído del ya referenciado documento digital publicado por la comunidad de Madrid mientras que el resto se basan en datos del ITEC. El resultado se muestra a continuación:

- Coste cinta transportadora: 150 €/ml
- Coste uso de cinta: 2 €/m³
- Coste vertedero: 6,21€/m³

Se considerará una amortización total de la cinta en el transcurso de la obra para la que está destinada.

6.3.2.5. Mantenimiento

Para las siguientes dos partidas ha sido necesaria la colaboración de técnicos en casas de tuneladoras. Fue enviado un correo electrónico con petición de información⁵ a diferentes casas fabricantes de tuneladoras. Éstas fueron Robbins, Lovat, Wirth y finalmente la casa Herrenknecht. De ellas se recibió contestación de las dos primeras.

⁵ Véase Anejo 4

De la casa Robbins, la información aportada relativa al apartado que nos ocupa, afirma que el coste de mantenimiento en recambios incluyendo picas y discos cortadores asciende a un valor comprendido en el intervalo de 10 a 20 USD/m³. Gracias a la aportación de la casa Lovat, afirmando que el coste en mantenimiento considerando recambios, pero no picas o discos cortadores, está comprendido entre 3 y 4 USD/m³, podemos con una fácil resta extraer los valores que necesitamos para el modelo. Tras la consulta a expertos, validando el orden de magnitud de estos datos, se optó por ajustarlos a los presentados a continuación teniendo en cuenta que el efecto del cambio de moneda queda diluido por los que conlleva el transporte de dichas piezas. Quedan reflejados a continuación los datos finales:

- Coste máximo: 4,10 €/m³
- Coste mínimo: 2,60 €/m³
- Coste esperado: 3,00 €/m³

6.3.2.6. Consumo Picas/Discos

En el apartado anterior ya queda explicado el proceso de documentación que lleva a la acotación de los datos para la partida destinada a estos elementos de la cabeza de corte que sufren un continuo desgaste y representan por tanto un valor destacable en el conjunto de la obra.

- Coste máximo: 16,50 €/m³
- Coste mínimo: 13,00 €/m³
- Coste esperado: 14,90 €/m³

6.3.2.7. Inyección del Gap

Esta última partida de los costes incluidos en la categoría de *independientes del tiempo*, no reviste mayor complejidad al estar basada de nuevo en la base de datos del ITEC considerando que el material a emplear para la inyección es el mortero. Por lo tanto y en base a lo expuesto tendremos:

- Coste máximo: 85 €/m³
- Coste mínimo: 70 €/m³
- Coste esperado: 80 €/m³

6.3.3. Costes fijos

6.3.3.1. Transporte Maquinaria

La primera de las partidas de costes fijos, la correspondiente al coste del transporte de la tuneladora desde su fábrica o antiguo emplazamiento hasta ubicación en la obra de estudio, está sustentada en la documentación aportada por la comunidad de Madrid ya empleada para apartados anteriores. Tras comprobar varios casos y dividir los resultados entre su peso y distancia recorrida se extraen los resultados que se presentan a continuación.

- Coste máximo: 0,65 €/km·Tn
- Coste mínimo: 0,42 €/km·Tn
- Coste esperado: 0,50 €/km·Tn

6.3.3.2. Montaje Maquinaria

Gracias a la aportación de los técnicos de las casas fabricantes de tuneladoras Lovat y Robbins, podemos definir el coste del montaje de la tuneladora en la obra. Según se desprende de lo expuesto por los fabricantes, nos encontramos nuevamente ante una relación aproximadamente lineal entre coste y diámetro. La ecuación que rige este comportamiento es la siguiente:

- Coste [€] = $154.167 \cdot \varnothing - 312.500$ [6.3.3.2.1.]

Puede comprobarse que para diámetros muy pequeños, de 1 y 2 metros el resultado resulta negativo. Esta deficiencia se supera aplicando el mínimo marcado por los informadores, de 150.000 € para estos casos, ajustándose el resto de casos correctamente a los datos aportados.

6.3.3.3. Mejoras

Como mejoras se entiende aquellas actuaciones de auscultación, tanto previa a la ejecución del túnel como la que se realiza una vez se ha iniciado la excavación, incluyendo la de superficie para el control de asentamientos. Según se afirma en el artículo "*Planning and site investigation in tunnelling*" (Harvey W. Parker, 2004) una inversión de 1 euro en auscultación o investigación geotécnica puede repercutir en un ahorro posterior del orden de 10 a 15 veces lo aportado. Este hecho debería dejar claro tanto a constructores como a la administración la importancia de cuidar promover estos estudios.

Existe no obstante un límite a partir del cual, aumentando la aportación económica, no se da un aumento de los beneficios posteriores. A esta conclusión llega no sólo este artículo sino también la Tesis "*Decisión aids for tunnel exploration*" (Jad S. Karma, 2005), afirmando además en el primero de los documentos que el óptimo es del 3% del presupuesto de excavación y sostenimiento mientras que en el segundo el óptimo queda fijado en el 3,5 %. Por tanto, a la vista de estas consideraciones, tomaremos el máximo de estos dos resultados, el 3,5 %.

6.3.3.4. Implantación y Retirada

Tomando como válidas las afirmaciones de la tesis doctoral de origen sueco, se puede acotar el coste referente a la implantación y retirada, que se afirma prácticamente independiente del tipo de obra. Como la diferencia no es lo bastante significativa como para entrar a estudiar de que parámetros depende esta partida así como de que forma varía al modificarlos, tomaremos independientemente de los datos de cada obra, los siguientes valores que ya tendrán en cuenta la posible variación e incertidumbre que se pueda dar en cada caso:

- Coste máximo: 3.663.000 €

- Coste mínimo: 2.959.000 €
- Coste esperado: 3.300.000 €

6.3.4. Costes de maquinaria

6.3.4.1. Tuneladora

Ha sido necesario un profundo análisis de varias fuentes para la definición final del coste de un elemento central para la tipología de obra que se estudia en esta tesina. Se han tomado dos fuentes documentales, por un lado la valiosísima información facilitada por los técnicos de las casas fabricantes además de los casos particulares que se encuentran bien detallados en el informe de la comunidad de Madrid. Por otro, los datos de una página web⁶ cuya finalidad es la de facilitar la compra-venta de tuneladoras de segunda mano.

Se pueden extrapolar costes de tuneladoras de segunda mano para encontrar los de las nuevas con mismas características gracias a dos de las aportaciones del técnico de Robbins. Primero, y más importante, que la depreciación del coste de una tuneladora nueva después de su primera obra es del orden del 90%, hecho que implica además que se plantee aquí su amortización para la obra de estudio considerando a su vez la afirmación que realizan del elevado coste que supone su readaptación.

En segundo lugar, afirman que el coste de las tuneladoras ha permanecido prácticamente constante durante 15 años, hasta estos últimos 4 años, en los que el aumento de los costes del acero así como de la mano de obra han incrementado los precios.

Ambos fabricantes dicen que se puede aproximar con suficiente precisión el coste en función del diámetro y aportan datos concretos tanto para una EPB con escudo simple como para el de TBM con doble escudo. Pueden contrastarse estos datos en el anejo 4. Para poder definir los otros dos casos que se han tenido en cuenta en el modelo que aquí se presenta, debemos pasar al estudio y análisis de los costes disponibles en la página de compra-venta de tuneladoras aplicando a cada caso el incremento necesario de coste considerando que, tal como se ha expuesto antes, la devaluación que ha sufrido ronda el 10%. Con todo lo expuesto hasta ahora, podemos ya definir un coste medio para los 4 casos de estudio y se presentan a continuación en función del diámetro:

- EPB simple → $C = 1.274.094 \cdot \emptyset$ [€] [6.3.4.1.1]
- TBM sin escudo → $C = 685.000 \cdot \emptyset$ [€] [6.3.4.1.2]
- TBM con escudo → $C = 1.000.000 \cdot \emptyset$ [€] [6.3.4.1.3]
- TBM doble → $C = 1.911.141 \cdot \emptyset$ [€] [6.3.4.1.4]

⁶ www.tbmexchange.com

Una vez llegado a este punto se procede a comparar los resultados con los costes de tuneladoras empleadas en la ampliación del metro de Madrid y se comprueba que se aproximan de forma más que razonable. Para tratar las discrepancias que se dan en estas comparativas buscamos la desviación de la población de datos correspondiente a los casos aportados por los fabricantes además de los de la ampliación del metro de Madrid. Como resultado final de este estudio obtenemos que la desviación apenas varía de un caso a otro y que puede simplificarse, de nuevo dependiente del diámetro, en la siguiente ecuación:

- Desviación estándar → $C = 200.870 \cdot \emptyset$ [6.3.4.1.5]

Des esta forma introducimos la incertidumbre inherente a un coste tan difícil de evaluar y acotamos su valor.

6.3.4.2. Maquinaria Auxiliar

De la partida correspondiente a la maquinaria auxiliar se presenta a continuación un listado de los elementos que lo componen. Su evaluación económica se basa, en datos de la maquinaria empleada para la ampliación del metro de Madrid y se añade al listado para justificar el valor final aportado:

- Backup → 2.590.000 €
- Locomotoras → 2.340.000 €
- Vagonetas → 900.000 €
- Pórtico → 450.000 €
- Silo Mortero → 97.000 €
- Ventilador → 90.000 €
- Bomba Inyectora → 18.000 €

La duda lógica que se plantea ahora es si estos costes serán válidos para cualquier caso. La respuesta es no, pero vemos que la dispersión puede, como en apartados anteriores, ser lo bastante reducida como para manejarla simplemente mediante el empleo de las distribuciones triangulares, que darán, tras ser tratadas, la media y su desviación.

La única excepción a esta afirmación vendrá de aquellos túneles de pequeño diámetro, hasta un orden de magnitud de 3 metros aproximadamente, que no se podrán extrapolar a estos costes resultantes y que por tanto, necesitarán de un nuevo estudio más profundo para su correcto dimensionado.

Basándose en todo lo anterior podemos ya definir los costes de esta partida con los que queda cerrado el capítulo de análisis de costes.

- Coste máximo: 7.370.492 €
- Coste mínimo: 6.707.246 €
- Coste esperado: 6.497.101 €