

Predicción del coste de la obra civil de un túnel ejecutado por métodos convencionales

Marcos Sancho Moreno. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Master en Túneles y Obras Subterráneas. Subterra Ingeniería, S.L.

Cuando se realiza un estudio previo, un estudio de planeamiento o un estudio informativo, una de las tareas principales es acotar con precisión el coste de las diferentes alternativas de trazado para posteriormente llevar a cabo un proceso de selección que finalice en la solución que mejor cumple los diferentes condicionantes impuestos, entre los cuales están los económicos. El objetivo de este artículo es la predicción del coste de la obra civil de un túnel ejecutado por métodos convencionales, en concreto mediante perforación y voladura.

I. Introducción

El objetivo de este artículo es la predicción del coste de la obra civil de un túnel ejecutado por métodos convencionales, en concreto mediante perforación y voladura. Actualmente, la gran mayoría de los túneles en roca se excavan mediante el empleo de explosivos, si bien es cierto, la fabricación de grandes tuneladoras (TBM) para roca tipo topo, escudo o doble escudo ha mermado ligeramente el campo de los explosivos en los túneles. Los resultados presentados en este artículo han sido extraídos de la Tesina elaborada y dirigida por los autores en la V edición del Master en Túneles y Obras Subterráneas, organizado por el Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, la Fundación Agustín de Betancourt y la Asociación Española de Túneles y Obras Subterráneas (AETOS).

Este trabajo se ha centrado exclusivamente en la estimación de costes de la obra civil de los tubos, sin considerar otras partidas como los

emboquilles, galerías de conexión e instalaciones. Esto es debido a que el único elemento diferenciador en coste entre este método constructivo y otros, como puede ser la excavación con máquina TBM, es la obra civil de los tubos, puesto que ambos métodos constructivos llevarán asociados los mismos emboquilles y el mismo volumen de equipamientos e instalaciones asociado al uso del túnel.

Los resultados se presentan según dos criterios diferentes. En el primer criterio se proponen unas fórmulas analíticas para la estimación del coste total de la obra civil por metro de túnel y del coste descompuesto en diferentes naturalezas (excavación, sostenimiento, impermeabilización y revestimiento). En el segundo criterio se propone una fórmula para el cálculo del coste total de la obra civil por metro cúbico, o alternativamente un ábaco de cálculo. Los datos de entrada en el caso de las fórmulas son el

índice RMR (Rock Mass Rating) de Bieniawski de 1989 y la sección de excavación. En el caso del ábaco es suficiente entrar con el índice RMR puesto que el ajuste ya considera implícitamente la sección transversal. Las fórmulas se han obtenido mediante la técnica de regresión múltiple y el ábaco mediante una regresión no lineal, obteniendo en todos los casos unos coeficientes de correlación cercanos a 0,90, por lo que se pueden considerar como muy buenos los ajustes realizados.

El método de perforación y voladura está caracterizado por un conjunto de operaciones que se repiten de una manera cíclica: perforación de los barrenos, carga del explosivo, voladura, ventilación, saneo, desescombro y colocación del sostenimiento. El método es muy adaptable y flexible con respecto a la forma y tamaño de la sección transversal, completa o partida, y permite la instalación de diferentes tipos de sostenimiento temporal. Los mecanismos fundamentales de rotura de la roca son la trituración, la fracturación por agrietamiento radial, la rotura por reflexión y la rotura por flexión. La excavación de túneles con voladuras se caracteriza por no existir inicialmente ninguna cara libre de salida, a excepción del propio frente de avance, lo que implica que las cargas trabajen en las condiciones más desfavorables. Esto se traduce en la necesidad de disponer de un mayor número de barrenos, generalmente de pequeño diámetro, y en un consumo específico de explosivo mucho más elevado que en otro tipo de voladuras. En la figura 1.1 se dibujan las diferentes zonas de la voladura de un túnel.

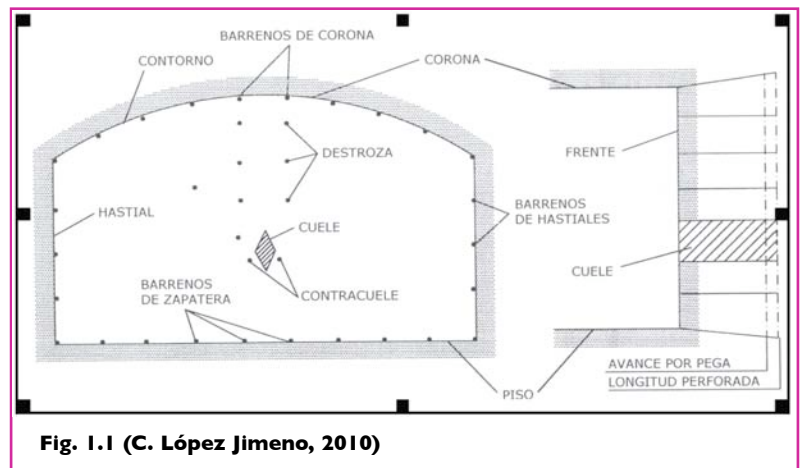


Fig. 1.1 (C. López Jimeno, 2010)

túnel de carretera convencional (doble sentido de circulación) de 500 m de longitud y ventilación natural, túnel de autopista (un sentido de circulación) de 3 km de longitud y ventilación semitransversal y túnel urbano de doble sentido de circulación de 1,5 km de longitud y ventilación transversal. No están considerados los costes de ejecución de los emboquilles, que dependerán de varios factores como la geometría de la ladera, medidas de estabilización de los taludes, etc., pudiendo dar lugar a unos incrementos de coste de hasta el 30% respecto al coste total.

En la figura 2.2 se muestra la descomposición del coste de obra civil (teniendo en cuenta el tipo de terreno) en tres naturalezas: excavación, sostenimiento y revestimiento. Se puede apreciar como a medida que disminuye la calidad del terreno disminuye el coste de excavación y aumenta el coste del sostenimiento. En ciertos casos especiales, que no son contemplados directamente en esta

2. Estimación de costes.

Estado del arte.

Una de las más conocidas publicaciones sobre costes de túneles es la que hizo Bernard Constantin en 1982 en la revista "Revue Générale des Routes et des Aérodrômes" y titulada "Coûts constatés sur les tunnels routiers récemment construits en France. Utilisation Dans les projets futurs". El autor establece dos familias de coste: los costes vinculados a la obra civil (excavación, sostenimiento, revestimiento, etc.) y los costes de las instalaciones (ventilación, iluminación, etc.). En la figura 2.1 aparece una estimación de los porcentajes de dichos costes respecto al coste total del túnel, en tres casos particulares:

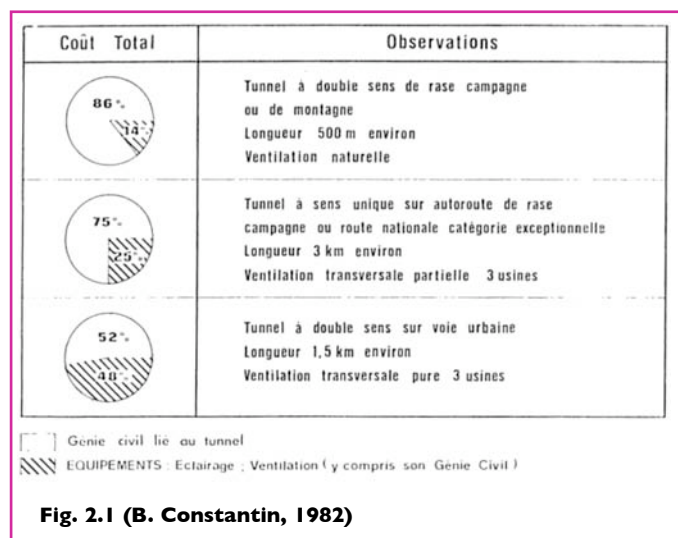


Fig. 2.1 (B. Constantin, 1982)

Caractéristiques des section		Répartition des coûts	Rapport du Prix
Terrain	Rocher peu fracturé		1
Soutènement	quelques ancrages grillage de protection		
Revêtement	30cm		
Terrain	Fracturé de bonne tenue		1,15
Soutènement	boulons scellés béton projeté treillis soudé		
Revêtement	30cm		
Terrain	Fracturé tenue médiocre		1,55
Soutènement	boulons scellés cintres type TH béton projeté treillis soudé		
Revêtement	40cm		
Terrain	Mauvaise tenue		2 à 2,5
Soutènement	cintres lourds à oreilles plaques de blindage béton de blocage		
Revêtement	40cm		

Creusement Soutènement Revêtement

Fig. 2.2. (B. Constantin, 1982)

publicación, como paraguas de micropilotes en avance, tratamientos del terreno en zonas de falla, inyecciones de compensación en obras urbanas, etc., el autor comenta que pueden llegar a representar hasta un 50% del coste de la obra civil del túnel.

El coste total de la obra civil lo obtiene como la suma de los costes de excavación, sostenimiento, impermeabilización, revestimiento y el resto de obra civil (aceras, drenaje, etc.), obtenidos como el producto de las mediciones correspondientes por los precios unitarios. Este coste viene expresado en F/m³ (francos franceses de 1982 por m³). El resultado es un ábaco donde aparecen varias curvas en función de la categoría del terreno (valorado en función de las necesidades de

SOUTÈNEMENT TRADITIONNEL			
Classe	Phases d'exécution	Soutènement	Epaisseur de béton en clé
1	Pleine section	Aucun soutènement	0 ou 30cm
2	Pleine ou Demi-section	Boulonnage et plaques de blindage éventuelles	30 à 40cm
3			
4	Demi-section ou Section divisée	Cintres type HEB	60cm
5		Blindage partiel	60cm
6		Blindage partiel	60cm
7	Section divisée	- Enfilage à l'avancement - Blindage du front si nécessaire	80cm

Fig. 2.3 (B. Constantin, 1982)

NOUVELLE MÉTHODE AUTRICHIENNE			
Classe	Phases d'exécution	Soutènement	Epaisseur de béton en clé
A	Pleine ou Demi-section	Boulonnage en voûte	30cm
B		Béton projeté en voûte	
C	Demi-section	Boulonnage intense	30cm
D		Béton projeté sur toute la section	
		Cintres type TH en D	30cm

- 1 boulon pour 7m² environ
 - 5 cm de béton projeté
 - 1 boulon pour 4,5m² environ
 - 10cm de béton projeté
 - 1 boulon pour 3,5m² environ
 - 10cm de béton projeté
 - 1 boulon pour 2m² environ
 - 10cm de béton projeté
 - 1 cintre par ml

Fig. 2.4 (B. Constantin, 1982)

sostenimiento), relacionando cada una de ellas la sección total de excavación con el coste de la obra civil por m³ de excavación. En la figura 2.3 se muestra la tabla de clasificación del terreno en 7 clases, basándose en un criterio de sostenimiento tradicional a base de bulones y bóveda de hormigón en masa. En la figura 2.4 se muestra la tabla de clasificación del terreno en 4 clases, basándose en los criterios de sostenimiento del Nuevo Método Austríaco. Finalmente, en la figura 2.5 se muestra el ábaco resultante de este estudio.

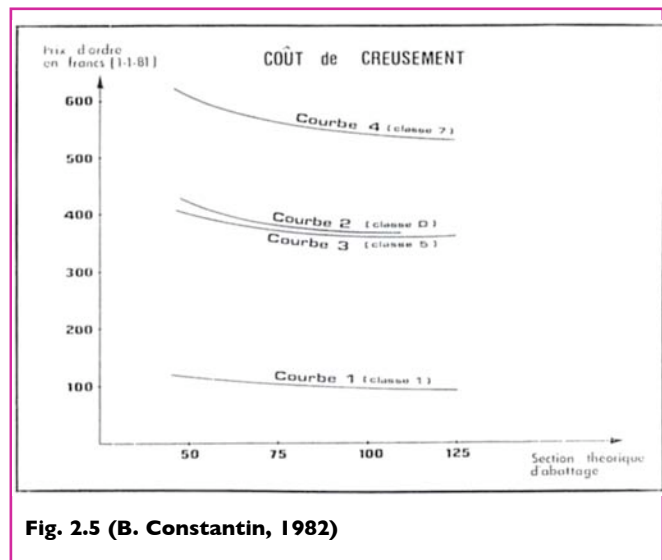


Fig. 2.5 (B. Constantin, 1982)

ADIF, en su Base de Precios Tipo para los Proyectos de Plataforma del año 2008 (BPGP-2008), incluye una lista de macroprecios para diferentes capítulos de obra civil, entre ellos el de túneles. En esta lista aparecen los precios de ejecución de túneles por metro lineal en función del índice RMR y de la sección de

excavación. (Figura 2.6). Estos macroprecios son de interés en el caso de estudios previos, estudios de planeamiento o estudios informativos, ya que de una manera directa podemos calcular el coste de proyecto de un túnel. Esta lista contiene únicamente 4 secciones transversales, entre 80 y 115 m², intervalo coincidente con las secciones de túneles de carretera o de autovía.

3. Fórmulas analíticas y ábacos de estimación de costes

El objetivo de este artículo es la obtención del coste total de la obra civil, ya sea por metro de túnel o por metro cúbico de excavación, en función del resto de variables fundamentales, como el RMR, la sección de excavación y la longitud del túnel. Como se verá a continuación, el coste se puede obtener directamente mediante fórmulas analíticas, o bien mediante el empleo de ábacos. Los resultados obtenidos se agrupan en dos grandes grupos o criterios, en función de si el coste se expresa por metro de túnel excavado o por metro cúbico de excavación:

- **CRITERIO I:** Coste Total de la Obra Civil por metro de túnel. (Cálculo del coste total y del coste descompuesto por naturalezas mediante fórmulas analíticas).
- **CRITERIO II:** Coste Total de la Obra Civil por metro cúbico. (Cálculo del Coste mediante ábacos y fórmulas analíticas).

3.1. CRITERIO I. Coste Total de la Obra Civil por metro de túnel.

Datos de entrada: Sección total de excavación (S) en m², índice RMR de Bieniawski de 1989.

Datos de salida: Coste en €/m.

- **Coste Total:**
 $C = 83,930 \times S - 148,189 \times RMR + 9578,304;$
 $r^2 = 0,878.$
- **Coste Excavación:**
 $C = 41,623 \times S - 63,325 \times RMR + 3759,368$
- **Coste Sostenimiento:**
 $C = 20,234 \times S - 81,468 \times RMR + 4571,080$
- **Coste Impermeabilización:**
 $C = 5,541 \times S + 96,801$

MACROPRECIOS PROYECTOS BÁSICOS ACTUALIZACIÓN 2008		
Capítulo 4.	TUNELES	Precio 2008
m Ejecución de túnel con sostenimiento para terreno con RMR>60, incluso excavación. Espesor de revestimiento de 30 cm. Impermeabilización con lámina y geotextil. Sección sin contrabóveda.		
	Sección libre de 80 m ²	7,450.00
	Sección libre de 100 m ²	9,750.00
	Sección libre de 105 m ²	10,500.00
	Sección libre de 115m ²	10,550.00
m Ejecución de túnel con sostenimiento para terreno con 40<RMR<60, incluso excavación. Espesor de revestimiento de 30 cm. Impermeabilización con lámina y geotextil. Sección sin contrabóveda.		
	Sección libre de 80 m ²	8,425.00
	Sección libre de 100 m ²	11,100.00
	Sección libre de 105 m ²	11,500.00
	Sección libre de 115m ²	12,000.00
m Ejecución de túnel con sostenimiento para terreno con 20<RMR<40, incluso excavación. Espesor de revestimiento de 30 cm. Impermeabilización con lámina y geotextil. Sección sin contrabóveda.		
	Sección libre de 80 m ²	10,700.00
	Sección libre de 100 m ²	13,950.00
	Sección libre de 105 m ²	14,500.00
	Sección libre de 115m ²	15,200.00
m Ejecución de túnel con sostenimiento para terreno con RMR<20, incluso excavación. Espesor de revestimiento de 30 cm. Impermeabilización con lámina y geotextil. Sección sin contrabóveda.		
	Sección libre de 80 m ²	13,700.00
	Sección libre de 100 m ²	16,900.00
	Sección libre de 105 m ²	17,300.00
	Sección libre de 115m ²	18,400.00
m Ejecución de túnel en zona de emboquilles (15 metros iniciales de túnel), incluso excavación. Espesor de revestimiento de 30 cm. Impermeabilización con lámina y geotextil. Sección sin contrabóveda.		
	Sección libre de 80 m ²	18,150.00
	Sección libre de 100 m ²	20,250.00
	Sección libre de 105 m ²	21,300.00
	Sección libre de 115m ²	22,400.00
m Ejecución de falso túnel, incluido relleno de tierras en cualquier tipo de sección		6,050.00
ud Tratamiento del talud frontal de boquillas		103,500.00

Fig. 2.6 (ADIF, 2008)

- **Coste Revestimiento:**
 $C = 10,960 \times S + 792,960$

A continuación se presenta para el caso del coste total, la justificación estadística del ajuste realizado (figura 3.1.1). Se ha procedido de igual manera para el resto de costes, pero por razones de espacio no se ha incluido.

3.2. CRITERIO II. Coste Total de la Obra Civil por metro cúbico.

En este segundo criterio se presentan ábacos y fórmulas de cálculo del coste total de la obra civil de un túnel por metro cúbico de excavación en función de la sección de excavación y del índice geomecánico RMR, complementando de esta manera al criterio anterior. Para la elaboración de los ábacos se parte en primer lugar del coste total por metro

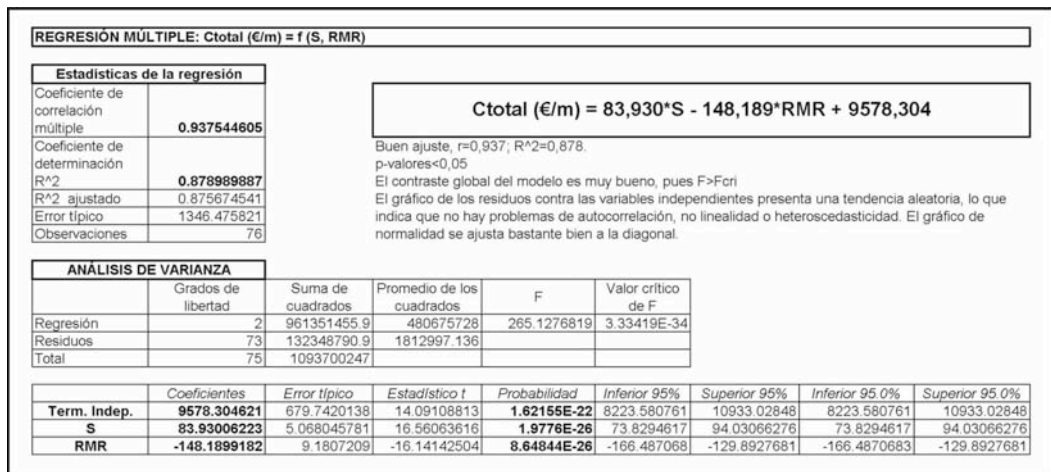


Figura 3.1.1 Justificación estadística del ajuste.

de túnel, el cual se divide por la sección de excavación para obtener el coste total por metro cúbico. De esta forma se puede obtener de una forma muy precisa (al considerar implícitamente la sección transversal) una curva

de ajuste que vincule el coste total por metro cúbico con el índice geomecánico RMR (figura 3.2.1). La curva superior se corresponde con el caso de terrenos expansivos, y se recomienda considerarla con reservas, al disponerse de

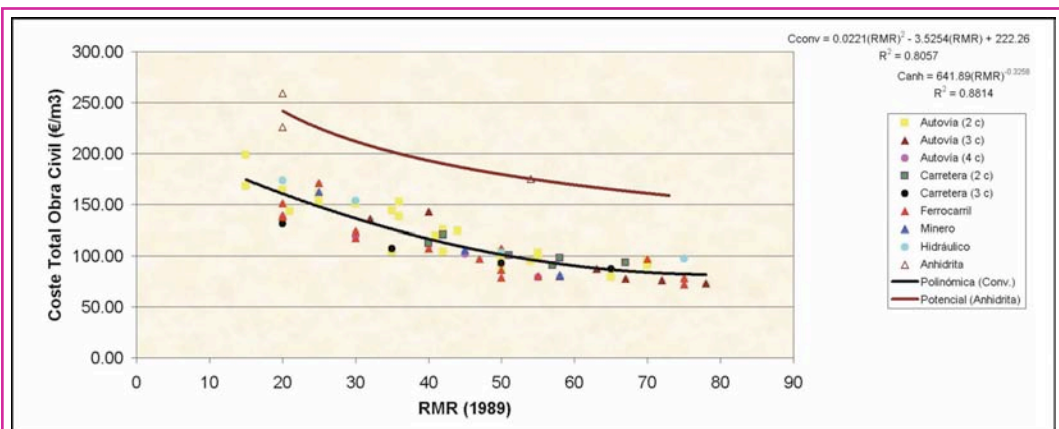


Figura 3.2.1 Ábaco de cálculo del coste total (€/m³).

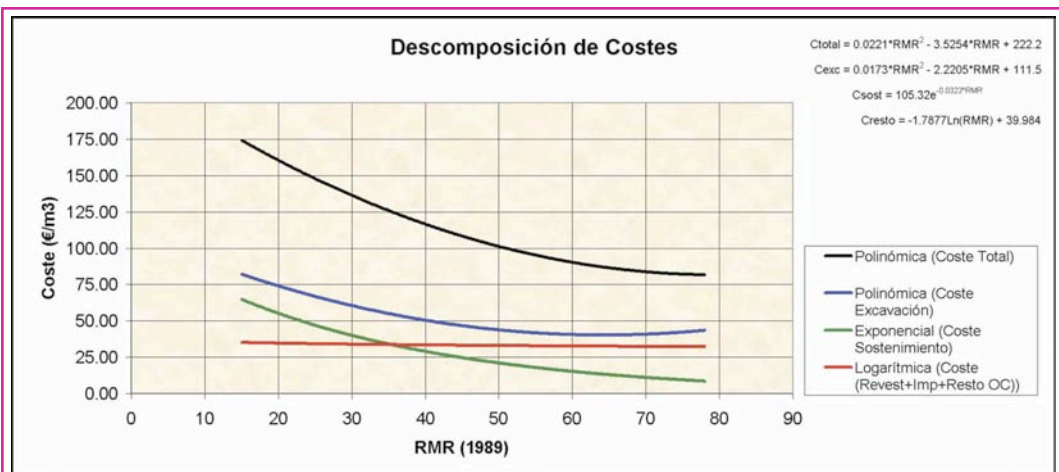


Figura 3.2.2 Ábacos de cálculo del coste total y de los costes descompuestos (€/m³).

pocos datos para su ajuste. La figura 3.2.2 representa el coste total y los costes descompuestos por naturalezas en (€/m³).

En la figura 3.2.3 se representa la misma curva de ajuste de la figura 3.2.1 pero aportando dos aspectos nuevos: límites de confianza para las medias (curvas internas simétricas respecto de la línea de ajuste que encierran la región de confianza para la línea de ajuste) y límites de predicción (líneas curvas externas de puntos simétricas respecto de la línea de ajuste que encierran la región de confianza para las predicciones), todo ello para un nivel de confianza del 95%.

Una segunda opción para el cálculo del coste total por metro cúbico es la obtención de una fórmula analítica mediante regresión múltiple que relacione el coste total por metro cúbico con la sección transversal y con el índice RMR. Por razones de espacio no se incluye, pero conviene señalar que la variable longitud de túnel (L), se puede despreciar de las fórmulas analíticas, dependiendo éstas únicamente de las variables sección (S) y RMR.

Datos de entrada: Sección total de excavación (S) en m², índice RMR de Bieniawski de 1989.

Datos de salida: Coste en €/m³.

- Coste Total:
 $C = 0,239 \times S - 1,499 \times RMR + 206,620;$
 $r^2 = 0,818.$

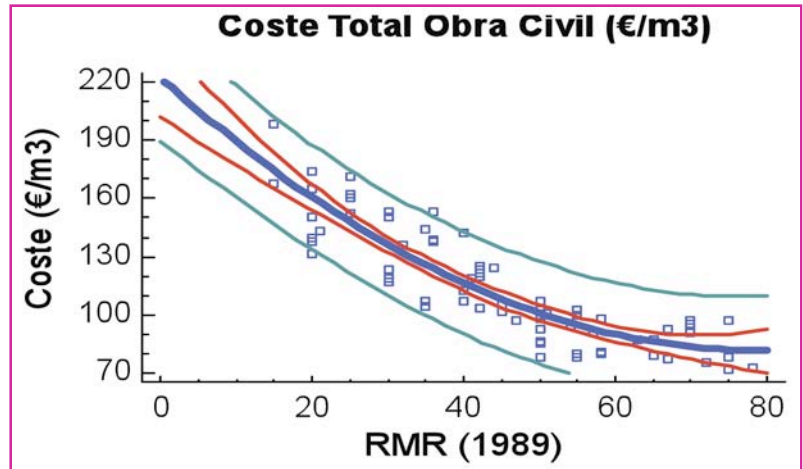


Figura 3.2.3 Región de confianza para las predicciones con un nivel de confianza del 95%.

4. Comparativa con la bibliografía existente

En este apartado se comparan los resultados presentados en este artículo con los comentados en el capítulo número 2 "Estimación de costes. Estado del Arte". En la figura 4.1 se comparan los porcentajes estimados por B. Constantin para los costes de excavación, sostenimiento y revestimiento, respecto al coste total de la obra civil. Los porcentajes estimados por Constantin se ajustan muy bien a los resultados presentados: en el primer caso estaríamos en torno a un RMR de 20, en el segundo en torno a 45, en el tercero 60 y en el último se estaría próximo a 80.

En la figura 4.2 se comparan las cifras calculadas por B. Constantin para el coste total

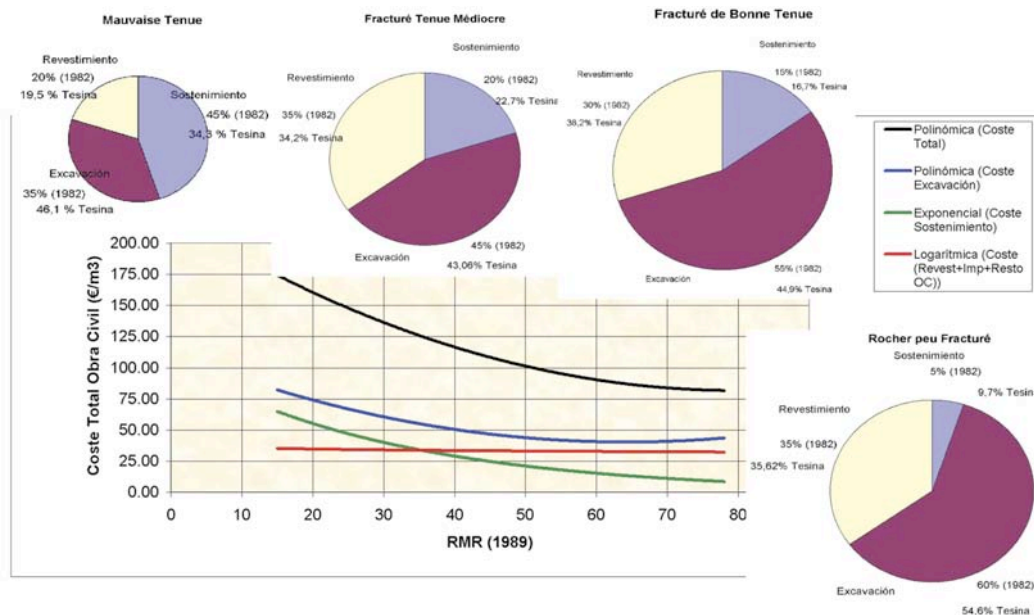


Figura 4.1. Distribución porcentual de los costes descompuestos respecto al coste total de la obra civil. Constantin (1982) – Romana y Sancho (2010).

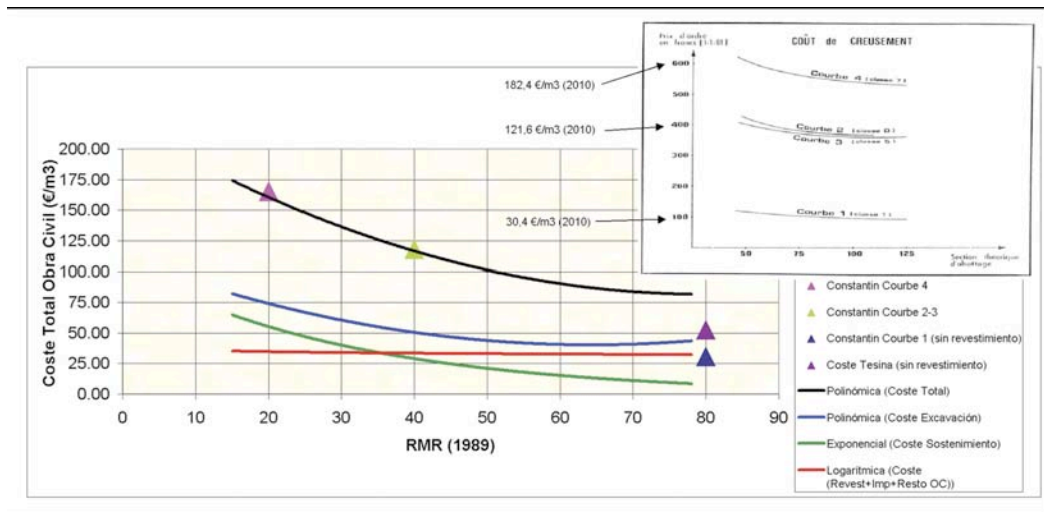


Figura 4.2. Comparación del coste total de la obra civil por m³. Constantin (1982) – Ajuste Romana y Sancho (2010).

de la obra civil por m³ (figura 2.5) con las presentadas en este artículo. Se ha estimado la siguiente equivalencia entre francos franceses de 1982 y euros de 2010: IF (1982) \approx 0,304€ (2010).

Como se puede ver, los costes estimados por Constantin coinciden perfectamente con los obtenidos mediante la curva de ajuste propuesta. Hay que señalar que el punto correspondiente a la “Courbe 1” de Constantin queda aparentemente alejado de la curva de coste total, pero es porque Constantin lo ha calculado sin revestimiento. Si al coste total obtenido con el ábaco propuesto en este artículo para un RMR de 80, se le resta el coste

del revestimiento, se obtiene un punto que queda sensiblemente cerca del dado por Constantin.

ADIF, en su Base de Precios Tipo para los Proyectos de Plataforma del año 2008 (BPGP-2008), incluye una lista de macroprecios para diferentes capítulos de obra civil, entre ellos el de túneles. En esta lista aparecen los precios de ejecución de túneles por metro lineal en función del índice RMR y de la sección de excavación (ver figura 2.6). A continuación se presenta una tabla (figura 4.3) donde se comparan los macroprecios estimados por ADIF con los obtenidos mediante el ajuste propuesto en este artículo:

$$C (\text{€/m}) = 83,930 \times S - 148,189 \times \text{RMR} + 9578,304$$

5. Conclusiones

En base a los resultados propuestos, la predicción del coste de la obra civil de un túnel ejecutado por métodos convencionales (perforación y voladura) se puede hacer según dos criterios:

- Estimación del coste total de la obra civil por metro lineal: mediante fórmulas analíticas para el coste total y los costes descompuestos.
- Estimación del coste total de la obra civil por metro cúbico: mediante una fórmula analítica o bien mediante el empleo de ábacos.

En el caso de las fórmulas analíticas obtenidas mediante regresión múltiple y de las curvas de ajuste de los ábacos, los coeficientes

	Sección (m2)	Coste ADIF (€/m)	Coste Tesina (€/m) RMR=60	Coste Tesina (€/m) RMR=65	Coste Tesina (€/m) RMR=70
RMR>60	80	7450	7401.364	6660.419	5919.474
	100	9750	9079.964	8339.019	7598.074
	105	10500	9499.614	8758.669	8017.724
	115	10550	10338.914	9597.969	8857.024

	Sección (m2)	Coste ADIF (€/m)	Coste Tesina (€/m) RMR=40	Coste Tesina (€/m) RMR=50
40<RMR<60	80	8425	10365.144	8883.254
	100	11100	12043.744	10561.854
	105	11500	12463.394	10981.504
	115	12000	13302.694	11820.804

	Sección (m2)	Coste ADIF (€/m)	Coste Tesina (€/m) RMR=20	Coste Tesina (€/m) RMR=30
20<RMR<40	80	10700	13328.924	11847.034
	100	13950	15007.524	13525.634
	105	14500	15427.174	13945.284
	115	15200	16266.474	14784.584

	Sección (m2)	Coste ADIF (€/m)	Coste Tesina (€/m) RMR=10	Coste Tesina (€/m) RMR=15
RMR<20	80	13700	14810.814	14069.869
	100	16900	16489.414	15748.469
	105	17300	16909.064	16168.119
	115	18400	17748.364	17007.419

de correlación son muy altos (cerca de 0,90) por lo que se pueden considerar como muy buenos los ajustes realizados.

En este estudio realizado, se considera como coste de obra civil de un túnel la construcción del tubo o tubos sin tener en cuenta las obras de emboquilles (específicas de cada túnel en particular), las obras de galerías de conexión entre tubos ni las partidas de equipamientos e instalaciones.

Los datos de entrada necesarios para el cálculo del coste son, en el caso de las fórmulas propuestas, la sección transversal y el índice RMR de Bieniawski del año 1989, mientras que en el caso de los ábacos basta con entrar con el índice RMR, puesto que ya consideran implícitamente la sección transversal.

La comparación de los resultados propuestos con las fuentes bibliográficas existentes ha sido satisfactoria. Se obtienen unos resultados prácticamente idénticos a los propuestos por Constantin en 1982. Las fórmulas analíticas propuestas para la predicción del coste total por metro lineal dan unos resultados análogos a los presentados por ADIF en sus macroprecios de la BPGP-2008.

Un aspecto diferenciador de los resultados propuestos respecto a otras aportaciones es la amplitud de tipologías de túneles escogidas, lo que le da mayor consistencia y generalidad a los resultados, pudiéndose aplicar a nivel de estudios previos, estudios de planeamiento o estudios informativos, en los que resulta fundamental el estimar de la manera más rápida y fiable posible el coste de las diferentes partidas de un proyecto, así como comparar dicho coste con el resultante de otras técnicas constructivas como en este caso la excavación con máquinas TBM, y servir por tanto como una herramienta más en el proceso de selección del método constructivo.

Los resultados obtenidos, aplicables directamente a la estimación de los costes de los proyectos de túneles en España, también se podrían extrapolar a otros países con un desarrollo de la técnica constructiva similar a la española, sin más que escalar las leyes obtenidas para adaptarlas a los precios de referencia del país en cuestión.

6. Referencias

- SANCHO MORENO, MARCOS; “Predicción del Coste de la Obra Civil de un Túnel Ejecutado por Métodos Convencionales”. Tesina. Master en Túneles y Obras Subterráneas. Director: Manuel Romana García. AETOS. Año 2010. 208 páginas.
- Varios Autores. “INGEO/TÚNELES. Volúmenes I a 17”. Editor: Carlos López Jimeno. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas. Universidad Politécnica de Madrid.
- LÓPEZ JIMENO, C., LÓPEZ JIMENO, E., GARCÍA BERMÚDEZ, P. “Manual de Perforación y Voladura de Rocas”. Año 2003. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas. Universidad Politécnica de Madrid.
- LÓPEZ JIMENO, C., LÓPEZ JIMENO, E., GARCÍA BERMÚDEZ, P. “Manual de Voladuras en Túneles”. Año 2010. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas. Universidad Politécnica de Madrid.
- CONSTANTIN, B. “Coûts Constatés sur les Tunnels Routiers Récemment Construits en France. Utilisation Dans les Projets Futurs”. Año 1982. Revue générale des routes et des aérodromes. N°588.
- CONSTANTIN, B., PÉRARD, M. “Une Meilleure Connaissance des Coûts, Facteur de Développement des Tunnels Routiers Européens”. Año 1990. Franchissements Souterrains pour L'Europe. Legrand (eds). Balkema, Rotterdam.
- ADIF. “Base de Precios Tipo para los Proyectos de Plataforma”. Año 2008.

7. Agradecimientos

Quiero expresar mi agradecimiento al Prof. Romana por la dirección de mi Tesina dentro del V Master en Túneles y Obras Subterráneas, que ha dado origen a esta publicación. Así mismo agradezco al Prof. Galera la revisión de este manuscrito.

<http://subterra-ing.com>