

EL ÍNDICE DE EXCAVABILIDAD DEL MACIZO ROCOSO (RME):



**NUEVA METODOLOGÍA PARA ESCOGER EL MÉTODO
ÓPTIMO DE CONSTRUCCIÓN DE TÚNELES.**

**Por: ING. PEDRO SAMANE TUNI
Octubre - 2009**

Autores del artículo


- Z. T. Bieniawski von Prein¹, B. Celada Tamames², J. M. Galera Fernández³ y M. Álvarez Hernández^{4, 1, 2} Prof., Univ. Politécnica de Madrid, Escuela de Ingenieros de Minas, Ríos Rosas 21, 28003 Madrid, España^{3, 4} Geocontrol, S.A., Cristóbal Bordiú 19-21, 5^a, 28003 Madrid, España, Z. T. Bieniawski en 2008 publica versión final. Z. T.; Celada, B.; Galera, J.M. and Tardáguila, I. Prediction of cutler wear using RME. TA Int. Congress. Budapest May 2009 y el suscrito hace extensivo el presente artículo.

RESUMEN

- Los autores consideran eficaz para predecir la excavabilidad mediante tuneladoras para roca (TBM); proporcionando una cuantificación del rendimiento de las tuneladoras y constituyendo una nueva herramienta para escoger el método constructivo de un túnel empleando TBMs.
- El RME se basa en cinco parámetros específicamente relacionados con el comportamiento del macizo rocoso y las características de las TBMs.
- El RME ha sido comprobado con datos procedentes de 22,9 km de túneles construidos con TBM.
- Se han establecido varias correlaciones entre el RME y algunos parámetros significativos del rendimiento de las TBMs, como la Velocidad Media de Avance (Average Rate of Advance“ARA”).

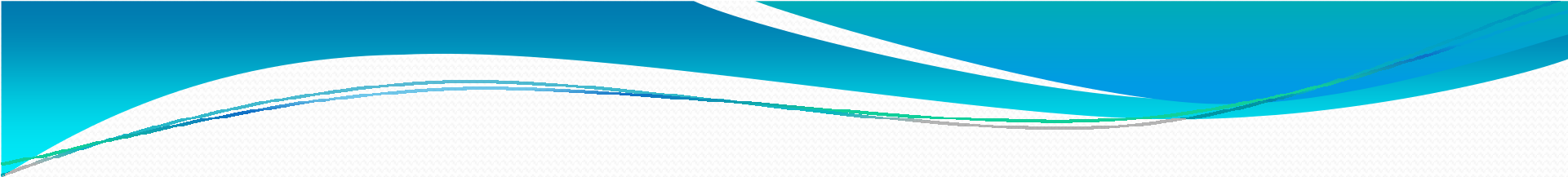
1. INTRODUCCION

- El presente artículo, que fue presentado el 26 de abril de 2006 en el Congreso de la ITA celebrado en Seúl. Z. T. Bieniawski , 2008 publica versión final .
- En los últimos años se comprueba que la utilización de las modernas tuneladoras para roca (TBMs) proporciona espectaculares rendimientos y logros; pero también supone complejos desafíos y problemas para los diseñadores y constructores que deben hacer grandes esfuerzos para esclarecer la interacción entre las características del macizo rocoso y el rendimiento de las TBMs.

- 
- Hoy en día esta situación ha cambiado; pues las TBMs han aumentado en potencia, tamaño, y modelos: Abiertas, escudadas y dobles-escudos, extendiéndose su campo de aplicación; de tal forma que su uso condiciona fuertemente el proyecto del túnel.
 - La selección de una tuneladora para construir un túnel puede suponer un gran progreso debido a la mejora en la seguridad en el trabajo y excelentes rendimientos que se pueden conseguir.
 - Es también fuente de profundas decepciones cuando las características de la tuneladora no están bien adaptadas a las condiciones del terreno y la tuneladora queda atrapada durante meses y, a veces, debe ser rescatada empleando métodos clásicos

Clasificación de macizos rocosos

- El concepto de “carga de roca” presentado por Terzaghi en 1946
- “tiempo de autoestabilidad” introducido por Lauffer en 1958
- índice RQD de Deere en 1964
- Fueron intentos de ayudar a seleccionar los sostenimientos que debían aplicarse, cuando se construían túneles por el método clásico de perforación y voladura.
- En aquellos años la selección de los equipos necesarios para la excavación de un túnel se dejó a la discreción de los Constructores, con una incidencia mínima de los Proyectistas.
- La clasificación de macizos rocosos (Wickham et al., 1972; Bieniawski, 1973, y Barton, 1974) estaban fundamentalmente dirigidos hacia los túneles construidos mediante perforación y voladura

- 
- Sin embargo; todavía existe una clara dificultad: cómo evaluar eficazmente la interacción entre las características del terreno, cuantificadas por las clasificaciones geomecánicas del RMR o Q, y el diseño y rendimiento de una TBM.
 - Ciertamente, se han hecho algunos intentos para resolver esta dificultad; pero la definición de las características de las TBMs sigue siendo un tema reservado a los fabricantes de las tuneladoras y a los constructores de los túneles; los cuales se basan, fundamentalmente, en experiencias previas.

2. ESTADO DEL ARTE SOBRE LA EXCAVABILIDAD DE TÚNELES

- La excavabilidad, se define como la facilidad que presenta un terreno para ser excavado.
- Estudiada hace dos décadas por Kirsten (1982).
- La excavabilidad y los modelos para predecir el rendimiento de las tuneladoras han sido estudiados por Barton (2000), Alber (2000), Bieniawski (2004), Blindheim (2005) y otros.
- Existen cinco índices relevantes: RQD_{TBM} (Deere), N (Kirsten), RMR_{TBM} (Bieniawski), RMi_{TBM} (Palmstrom) y Q_{TBM} (Barton). El más renombrado de ellos es el Q_{TBM} , se presenta como el más útil de los cinco índices examinados.

- Barton (2000), presenta el índice Q_{TBM} :

$$Q_{TBM} = RQD/J_n \times J_r/J_a \times J_w/SRF \times \sigma_{mass}/F \times 20/CLI \times q/20$$


Donde:

σ_{mass} = Resistencia del macizo rocoso

CLI = Índice de duración de los cortadores.

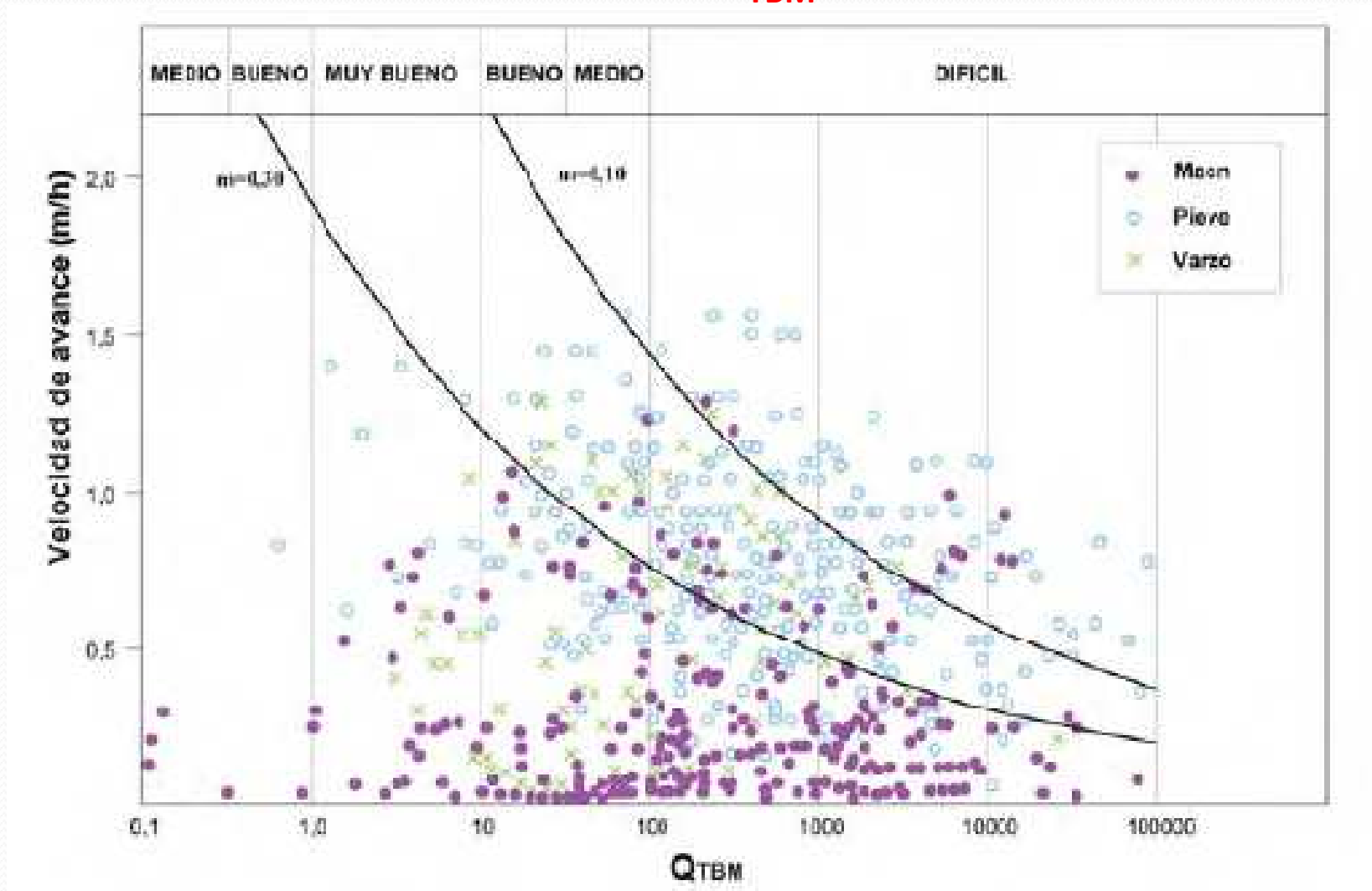
F = Fuerza media aplicada por cortador

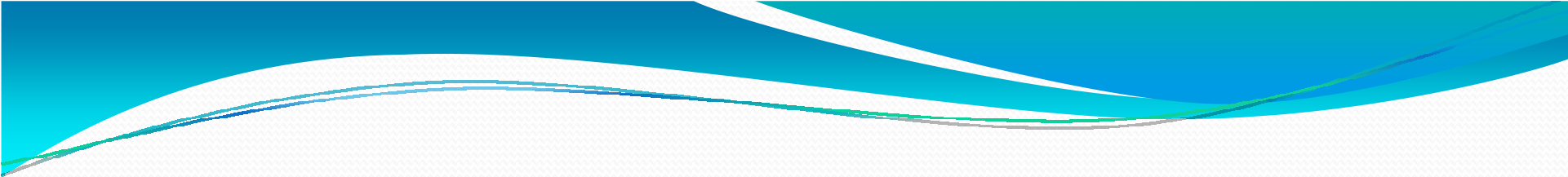
q = Contenido en cuarzo (%) del terreno.

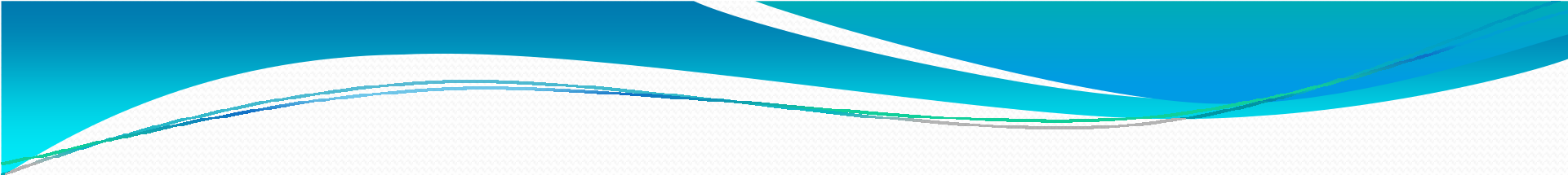
- 
- Muy difundido y Criticado severamente por Blindheim (2005)
 - Debido a que la definición de la resistencia del macizo rocoso (σ_{MASS}), se basa en la “inversión de σ_c para determinar la resistencia del macizo rocoso corrigiéndola según su densidad”, hace su aplicación inviable.
 - sobre el Q_{TBM} después de leer un importante estudio realizado en Noruega por A. Palmstrom y E. Broch titulado “Uso y mal uso de los sistemas de clasificación de los macizos rocosos con referencia especial al sistema Q”. Este artículo está actualmente en prensa y a sido publicado en 2006 en la revista Tunnelling and Underground Space Technology.
 - De este trabajo literalmente: “Se concluye que el índice Q_{TBM} es complejo e incluso confuso y no es recomendable su uso”.


- Para justificar esta conclusión Palmstrom y Broch han escrito lo siguiente:
- *“Sapigni et al. (2004) en su artículo “TBM performance estimation using rock mass classification” han analizado la utilidad del índice Q_{TBM} en tres túneles, con una longitud acumulada de 14 km, excavados en rocas metamórficas en el Norte de Italia; en los cuales se determinaron cuidadosamente los índices RMR, Q y Q_{TBM} .*
- *Basándose en análisis estadísticos Sapigni et al. encontraron una correlación razonable entre los valores del RMR y la velocidad de penetración neta; pero concluyen que la dispersión de los resultados era demasiado importante para que este índice pueda utilizarse para predecir los rendimientos de las tuneladoras.*
- *el índice Q_{TBM} tiene una sensibilidad muy baja frente a la velocidad neta de penetración y el coeficiente de correlación*

Figura A. Velocidad de avance para tres túneles construidos con tuneladora en función de Q_{TBM} (Sapigni et al., 2002).



- 
- Como conclusión, Palmstrom y Broch afirman: “El índice Q_{TBM} se planteó como una herramienta para estimar el índice de penetración “PR” de las TBMs y, junto con el parámetro “m”, relacionado con los rendimientos de la tuneladora, se supone que se puede obtener una estimación de la velocidad de avance (AR).
 - Después de la contundente recomendación de Palmstrom y Broch y de la aplastante evidencia de los datos aportados, se ha concluido que la modificación de los sistemas de clasificación geomecánicas existentes, RMR o Q, no es una vía recomendable para predecir el rendimiento de las tuneladoras.

- 
- Alber (1996, 2000), concentrándose en los problemas contractuales que puede presentar el uso de las TBMs, ha intentado establecer una estimación probabilística de la influencia que tienen los rendimientos sobre el coste de la construcción.
 - El RMR fue utilizado por Grandori et al. (1995) para diferenciar rangos del terreno en los que el rendimiento de las tuneladoras era significativamente diferente, en función del tipo de tuneladora: abierta (TBM) o Doble- Escudo (DE).
 - Bieniawski (2004) hizo una revisión del concepto de excavabilidad del macizo rocoso basándose en el RMR ajustado para TBMs.

- 
- Por ello; es muy dudoso que una sola fórmula pueda incluir todos los parámetros que tienen una influencia significativa para definir la calidad del terreno y los rendimientos de las TBMs.
 - Expertos (Grandori y Mendaña, 2005), opinan que los índices RMR y Q son más eficaces cuando se usan, para los que fueron creados.
 - El ajustar estos sistemas para poderlos emplear en la definición de algunos parámetros de las TBMs puede ser contraproducente y sólo puede crear confusión.
 - Mas aún, mientras la abrasividad es un importante factor para estimar el desgaste de los cortadores y el rendimiento de las TBMs, este parámetro no es decisivo para escoger entre una TBM abierta y un Doble-Escudo.
 - Consecuentemente con todo lo anterior, se considera que un indicador específico, no basado en índices como el RMR o Q, es más útil para evaluar la interacción entre el terreno y la tuneladora y por ello en este artículo se presenta un nuevo índice que se considera adecuado para conseguir estos objetivos.

3. CONCEPTO DEL ÍNDICE EXCAVABILIDAD DEL MACIZO ROCOSO (RME)

- Los autores de este artículo, como proyectistas y consultores en la construcción de túneles, consideran que era necesario disponer de una ayuda objetiva que facilitara la toma de decisiones en la elección entre la construcción de un túnel con tuneladora o mediante perforación y voladura; pues, en base a la experiencia e información disponibles, consideran que actualmente no hay una alternativa real que pueda utilizarse para este propósito.
- Este artículo está todavía en fase de evolución para introducir en él un ajuste fino, los autores han decidido compartir con los lectores los resultados de los trabajos realizados, que consideran una buena solución al problema y, a la vez, quieren tener la oportunidad de recibir una crítica constructiva por parte de aquellos que se han visto implicados en desafíos similares.

3.1. BASE DE DATOS

- La longitud acumulada de túnel que suponen los 387 tramos estudiados es de 22,9 km; que han sido, fundamentalmente, excavados con tuneladoras tipo Doble-Escudo, trabajando en dos modos: como Doble-Escudo y como un Escudo simple.

Túnel	Modo de excavación	Regiones estructurales (Nº)	Longitud acumulada (m)
Guadarrama 3	Escudo Simple	37	958,4
	Doble-Escudo	136	7.726,9
Guadarrama 4	Escudo Simple	61	849,4
	Doble-Escudo	115	8.869,4
Abdalajis Oeste	Escudo Simple	14	755
	Doble-Escudo	19	2.378
Línea 9	Escudo Simple	5	1.421
Total		387	22.958,1

Datos geométricos:

- Diámetro de excavación.
- Longitud del tramo.

Datos del terreno:

- Índices RMR, DRI,
- Características de la matriz rocosa.
- Orientación de las juntas existentes.
- Presencia de agua .
- *Fenómeno de estallido de roca.*

Datos de la tuneladora:

- Velocidad de avance, coeficiente de utilización de la tuneladora.
- Índice de penetración.
- Velocidad de rotación de la cabeza de corte.
- Par aplicado en la cabeza de corte.
- Empuje sobre los cortadores.
- energía específica de excavación.

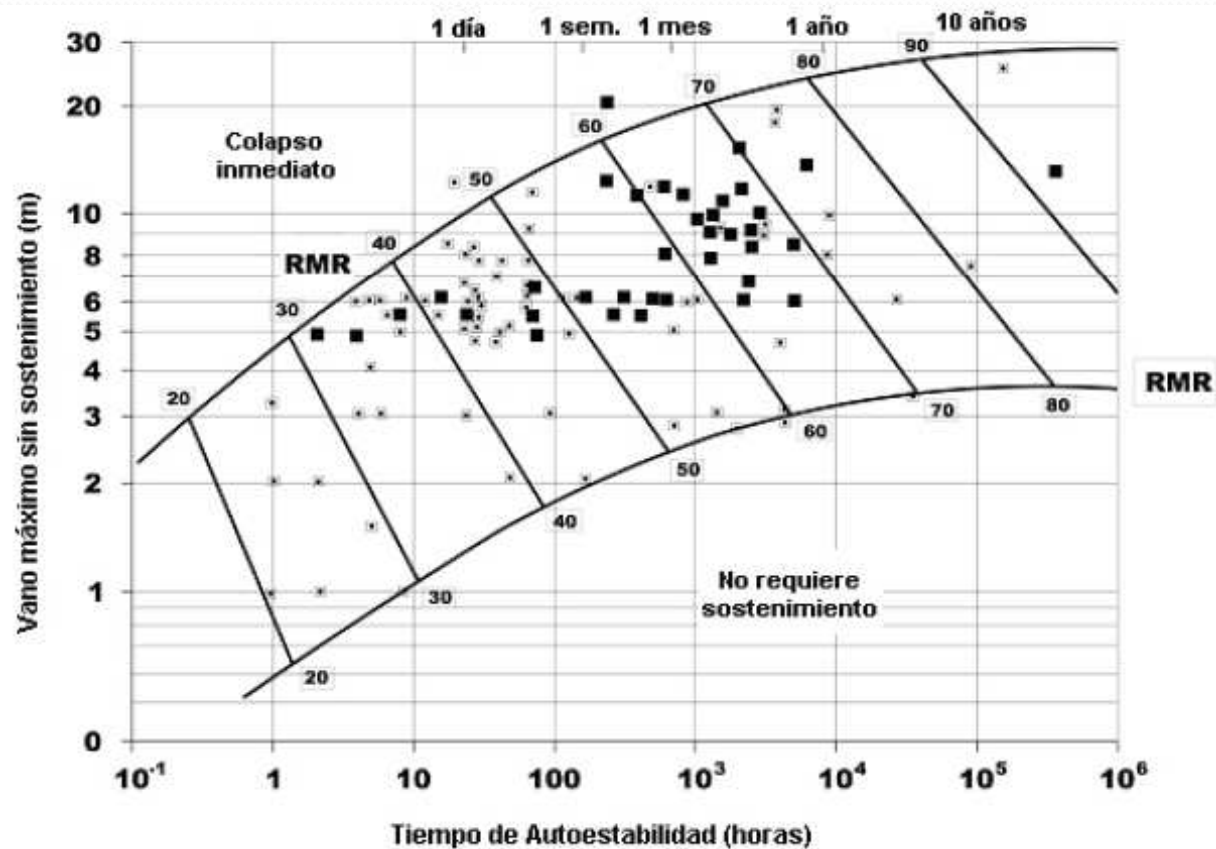
3.2. SELECCIÓN DE LOS PARÁMETROS QUE INTEGRAN EL RME

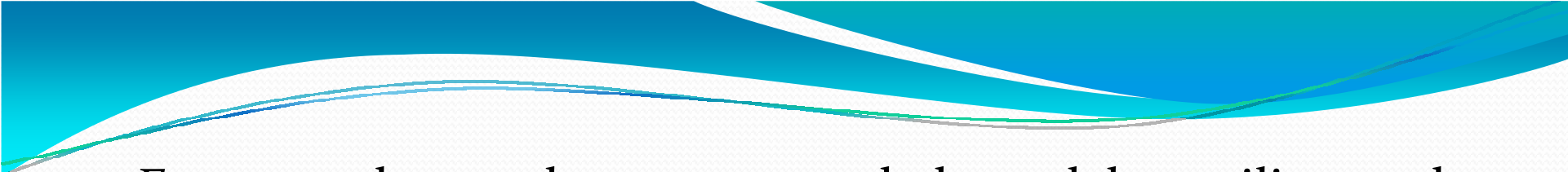
- El índice RME se define evaluando cinco parámetros con las calificaciones que se muestran en la **Tabla**

Resistencia a Compresión uniaxial de la roca intacta [0 – 15 puntos]										
σ_{ci} (MPa)	< 5		5-30		30-90		90-180		> 180	
Puntuación	0 (*1)		10		15		5		0	
Perforabilidad [0 – 15 puntos]										
DRI	> 80		80-65		65-50		50-40		< 40	
Puntuación	15		10		7		3		0	
Discontinuidades en el frente de excavación [0 – 40 puntos]										
Homogeneidad			No. de juntas por metro					Orientación con respecto al eje del túnel		
Homogéneo		Mixto	0-4	4-8	8-15	15-30	>30	Perpendicular	Oblicua	Paralela
Puntuación	10	0	5	10	20	15	0	10	5	0
Tiempo de autoestabilidad [0 – 25 puntos]										
horas	< 5		5-24		24-96		96-192		> 192	
Puntuación	0		2		10		15		25	
Afluencia de agua [0 – 5 puntos]										
litros/seg.	> 100		70-100		30-70		10-30		< 10	
Puntuación	0		1		2		4 (**0)		5	

* Para doble-escudo y escudo simple. ** Para rocas arcillosas.

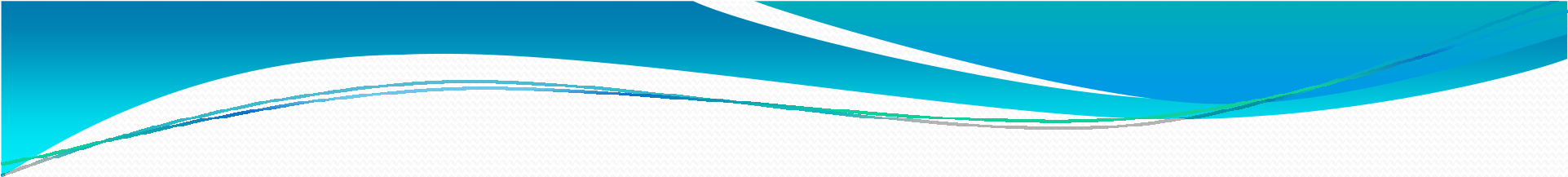
- Cuatro parámetros que integran RME se podrán conocer como resultado de las campañas de reconocimiento habituales.
- tiempo de autoestabilidad, puede estimarse a partir del conocido gráfico, Bieniawski (1979).



- 
- En caso de emplear una tuneladora debe utilizarse la correlación de Alber (1996) definida por la expresión:

$$\text{RMRTBM} = 0.8 \times \text{RMRD\&B} + 20$$

Sin embargo en este trabajo el tiempo de autoestabilidad de cada tramo estudiado se ha confirmado mediante cálculos Tenso - deformacionales en tres dimensiones.



Como resultado de este análisis se encontró , los parámetros que tenían mayor influencia sobre la velocidad media de avance (ARA) de las tuneladoras, expresada en m/día, son:

- Perforabilidad
- Espaciado de las discontinuidades.
- Tiempo de autoestabilidad.

Dos parámetros más influyentes, estadísticamente, sobre el ARA para definir el comportamiento del terreno:

- Resistencia a compresión uniaxial de la roca intacta
- Caudal de agua infiltrada en la excavación.
- *Fenómeno de estallido del macizo rocoso.*

Ya que, en muchos casos, estos parámetros tienen una gran influencia en el rendimiento de las tuneladoras.

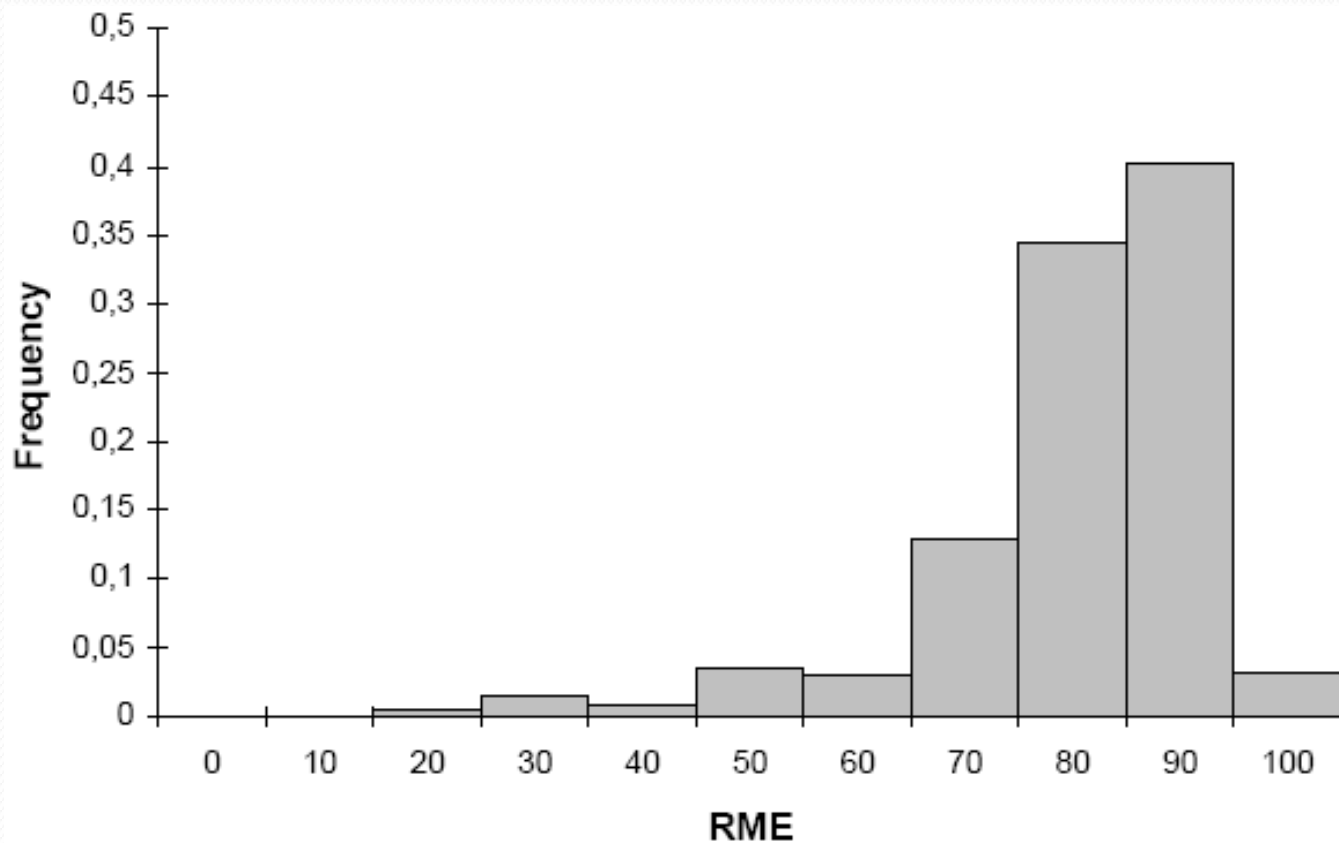
Excepciones importantes en la aplicación del RME

1. Sea cual sea el valor del RME asignado a un tramo, si alguno de los cinco parámetros de clasificación se califica con 0 se admite que el valor del ARA en ese tramo será inferior a 2 m/día.
2. Tener en cuenta es que si σ_{ci} es menor de 5 MPa en el caso de que se trate de una tuneladora escudada, que no utiliza grippers, este parámetro debe ser 1 en vez de 0; ya que las tuneladoras sin grippers tienen menos problemas para anclarse en los terrenos débiles.
3. Presencia de agua en los terrenos arcillosos o limolíticos, que se degradan muy rápidamente ante caudales moderados de agua.
4. *Pero sin embargo; se debe considerarse el fenómeno de estallido del macizo.*

En esencia hay que tener presente que cuanto mayor es el valor del RME más apropiada resulta la construcción de un túnel con tuneladora.

3.3. VALIDACIÓN DEL RME CON CASOS PRÁCTICOS

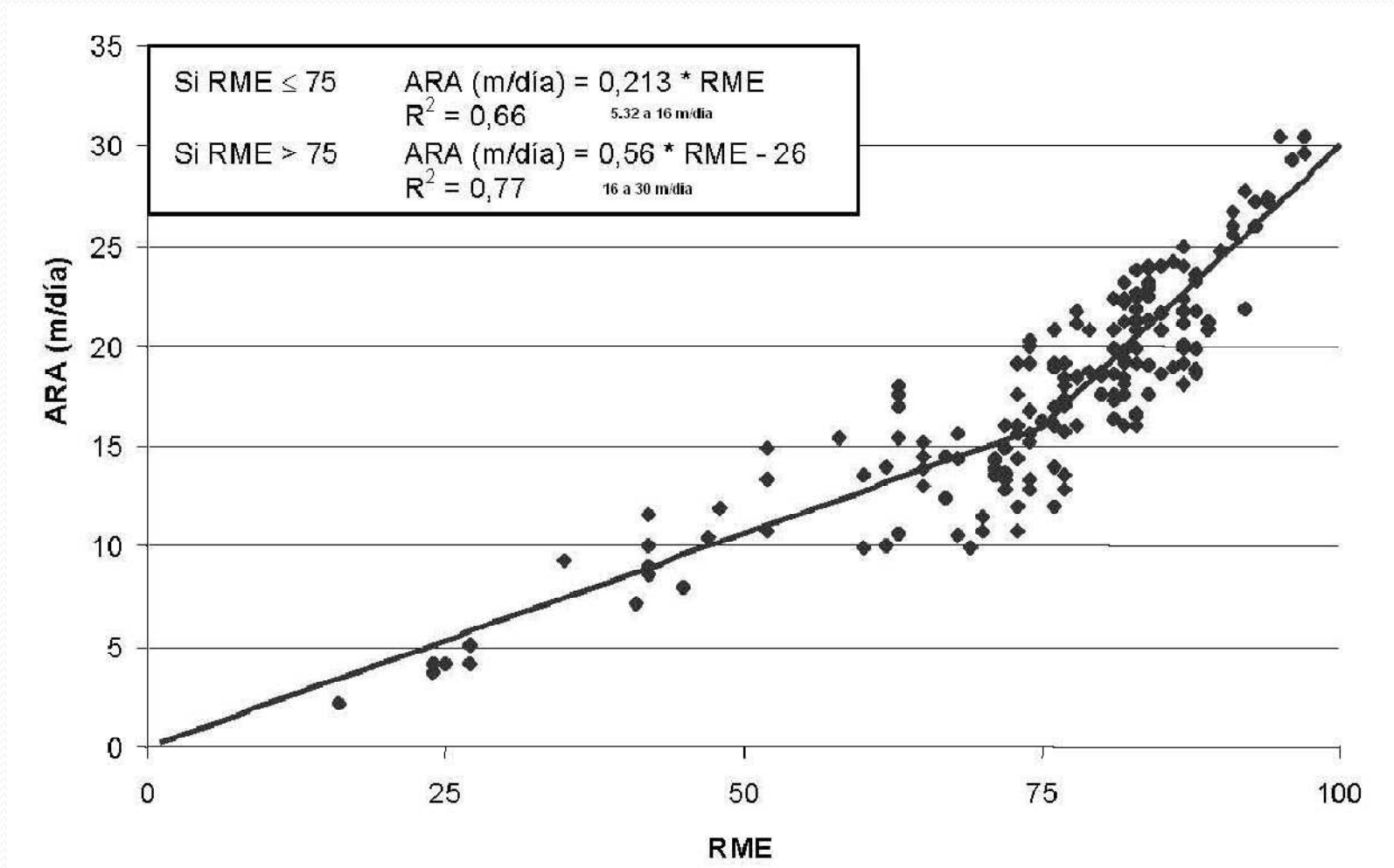
- En la **Figura 1**, se muestra la distribución de los valores del RME de los tramos con los que se ha trabajado, donde se aprecia que la mayor parte de los valores se concentran en el intervalo de 60 a 90 puntos.



4. CORRELACIÓN ENTRE ARA Y RME

- La velocidad media de avance (ARA), expresada en m/día es el parámetro más significativo para comparar los rendimientos de varios métodos constructivos en el proyecto de un túnel determinado.
- De hecho, durante la construcción de un túnel, el ARA puede ser fácilmente determinada.
- Una de las aplicaciones más importantes del RME es predecir, con una precisión razonable, el valor del ARA esperado para un tramo de túnel de características homogéneas.

Figura 3. Los análisis estadísticos realizados han proporcionado correlaciones



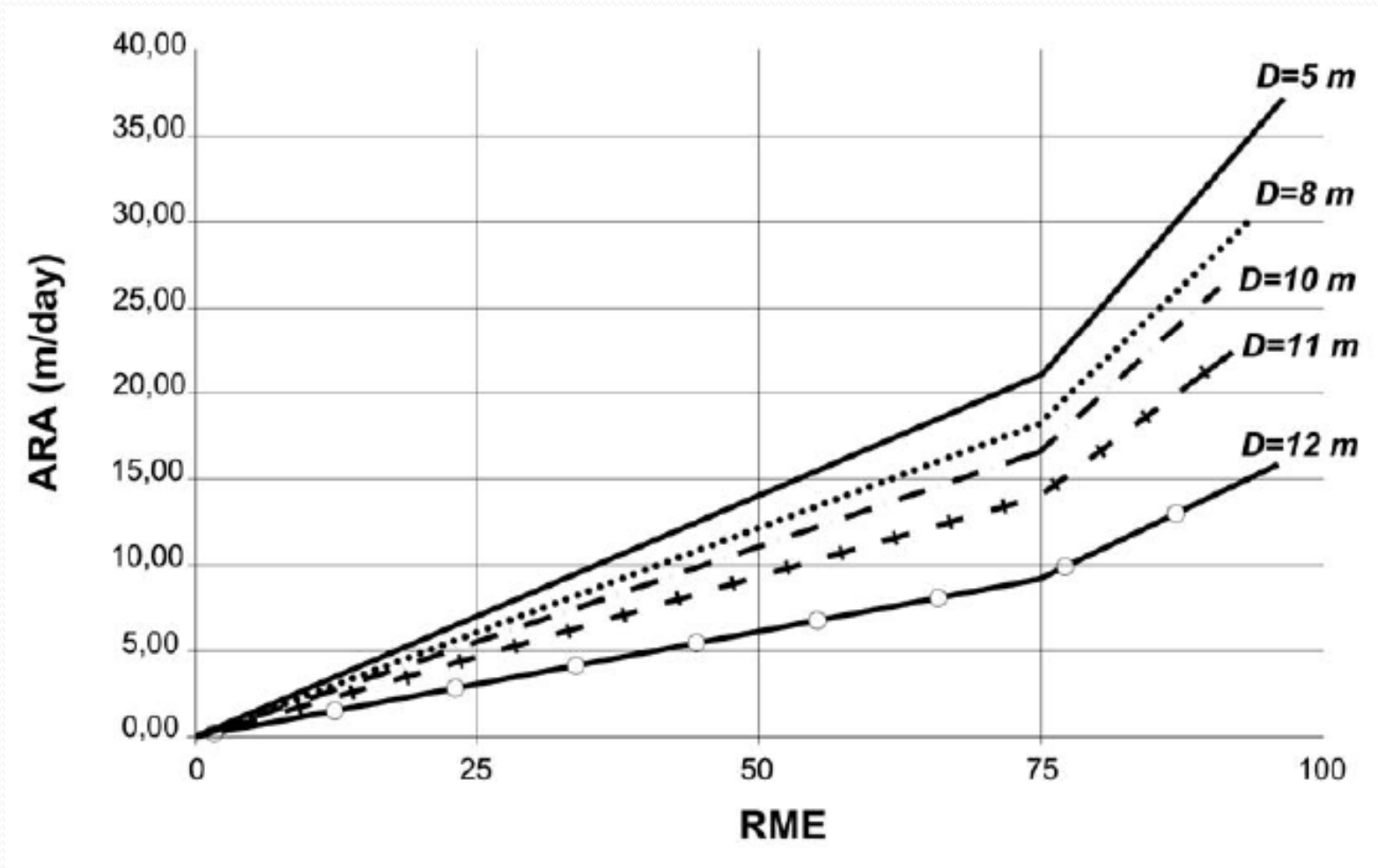
Basado en los resultados estadísticos, se pueden establecer los siguientes criterios en cuanto a la utilización de los dobles-escudo

- **RME >75** Corresponde a terrenos en los que se obtendrán avances superiores a 16 m/día, en los que el empleo de doble-escudo es muy recomendable,
- **50 < RME < 75** Las velocidades de avance que se obtendrán en estos terrenos estará comprendida entre 10 y 16 m/día; por lo que el uso de doblescudo en estos terrenos es bastante recomendable,
- **25 < RME < 50** Las velocidades de avance en estos terrenos estarán comprendidas entre 5 y 10 m/día; por lo que el caso de doble-escudo en estos terrenos no es muy recomendable.
- **RME < 25** Las velocidades de avance en estos terrenos serán inferiores a 5 m/día y en ellos se considera desaconsejable el uso de doble escudo.

- Los criterios anteriores se han establecido con datos de túneles cuyo diámetro de excavación es del orden de 10 m; para poder evaluar la velocidad de avance cuando se construyen túneles con otro diámetro se propone utilizar un coeficiente corrector, K_D , definido por la expresión:
- $K_D = - 0.007D^3 + 0.1637D^2 - 1.2859D + 4.5158$
- Algunos valores característicos de K_D son los siguientes:

Diámetro del túnel (m)	12	11	10	8	5
K_p	0.5	0.8	1.00	1.1	1.3

Figura 4. Correlación entre ARA (m/día) y RME para distintos diámetros de excavación.



5. CORRELACIONES DEL RME CON ALGUNOS PARÁMETROS SIGNIFICATIVOS

- 5.1. ENERGÍA ESPECÍFICA DE EXCAVACIÓN (Gas, petróleo)

$$E_s = F/A + 2\pi NT/A*ARA$$

Donde:

- E_s = Energía específica de excavación (kJ/m³).
- F = Empuje aplicado a la cabeza de corte (kN).
- A = Sección excavada (m²).
- N = Velocidad de rotación de la cabeza de corte (rps).
- T = Par aplicado en la cabeza de corte (kN·m).
- ARA = Velocidad media de avance (m/s).

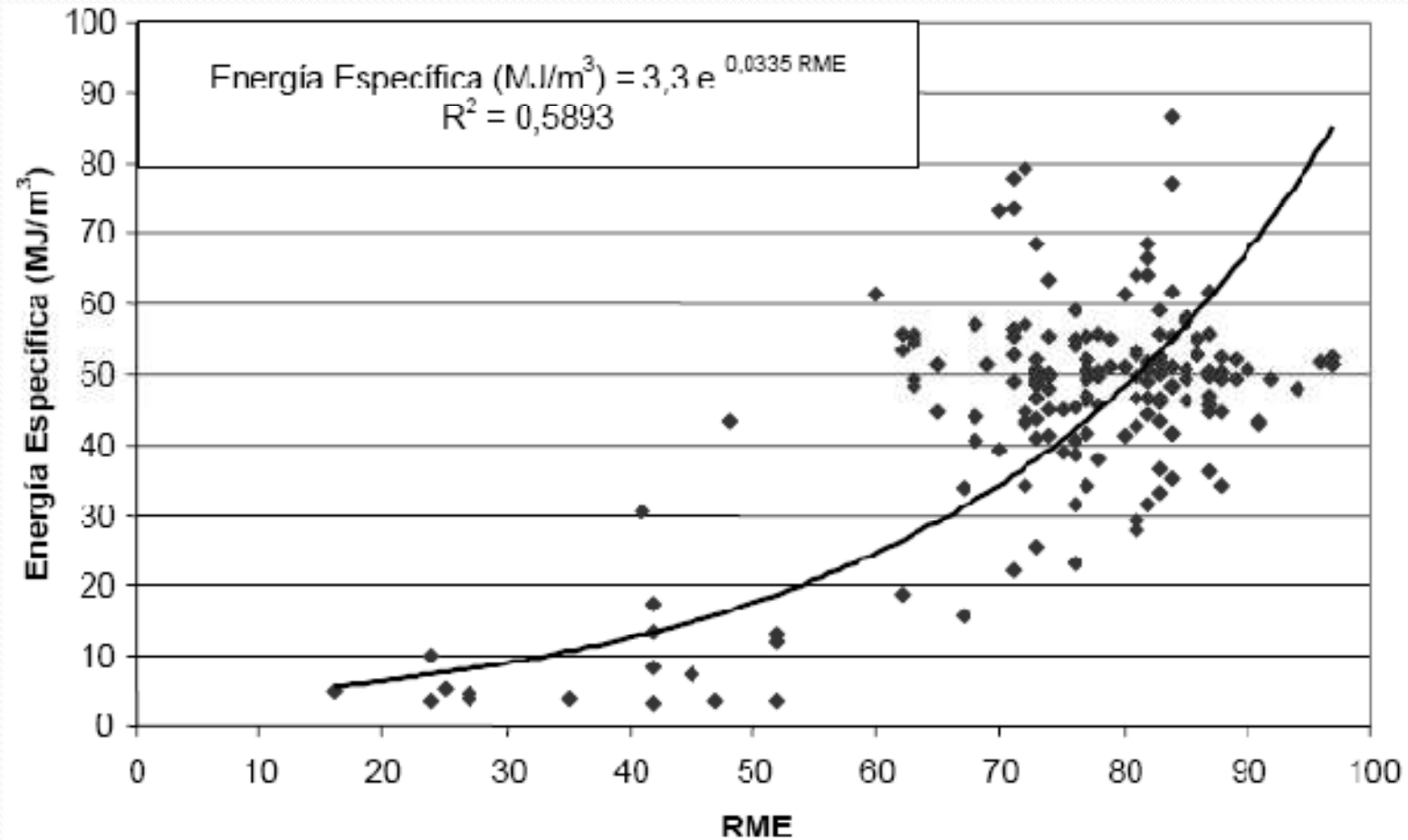
La ecuación tiene dos términos:

1ro. representa la energía específica consumida en la cabeza de corte debida al empuje sobre los cortadores.

2do. corresponde a la energía consumida en la cabeza de corte para hacerla girar.

Figura 5. Correlación entre el RME y la Energía Específica.

Coefficiente de correlación $r = 0,76$.



5.2. VELOCIDAD DE PENETRACIÓN (PR)

Figura 6. Correlación entre el RME y la Penetración Neta

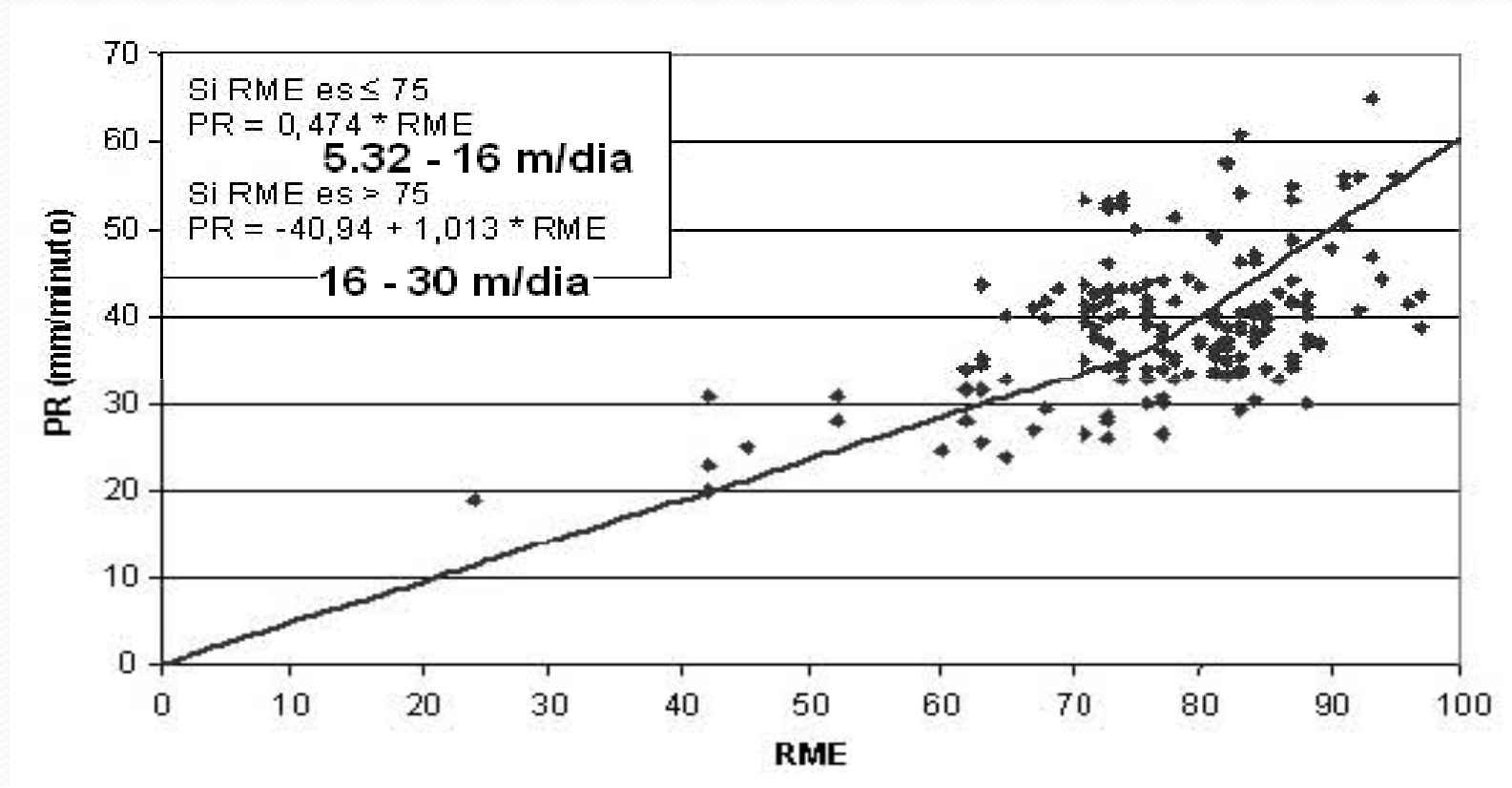


Figura7 Correlación RME y el par de giro (T) aplicado en la cabeza de corte
Coeficientes de correlación (r) = 0,71

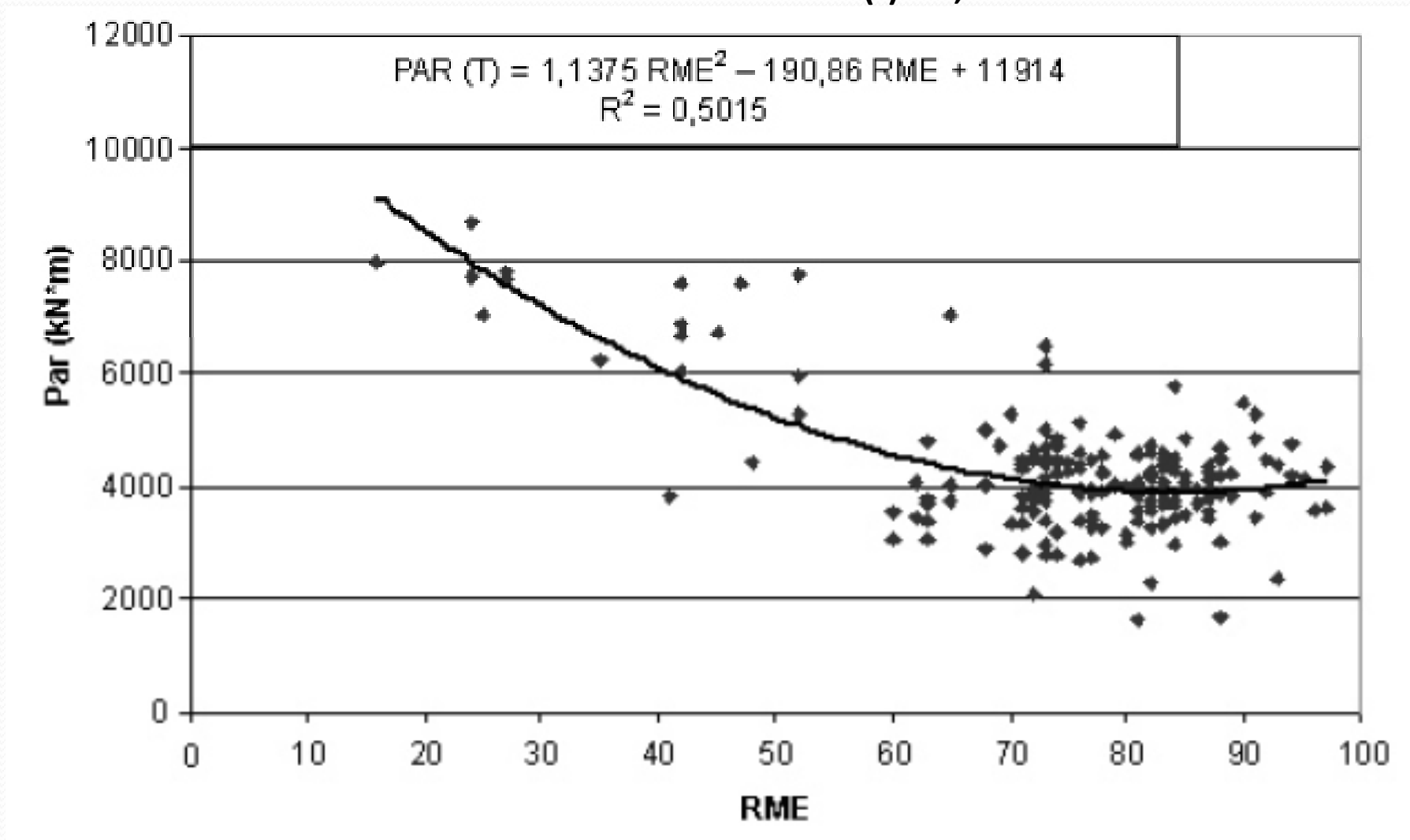
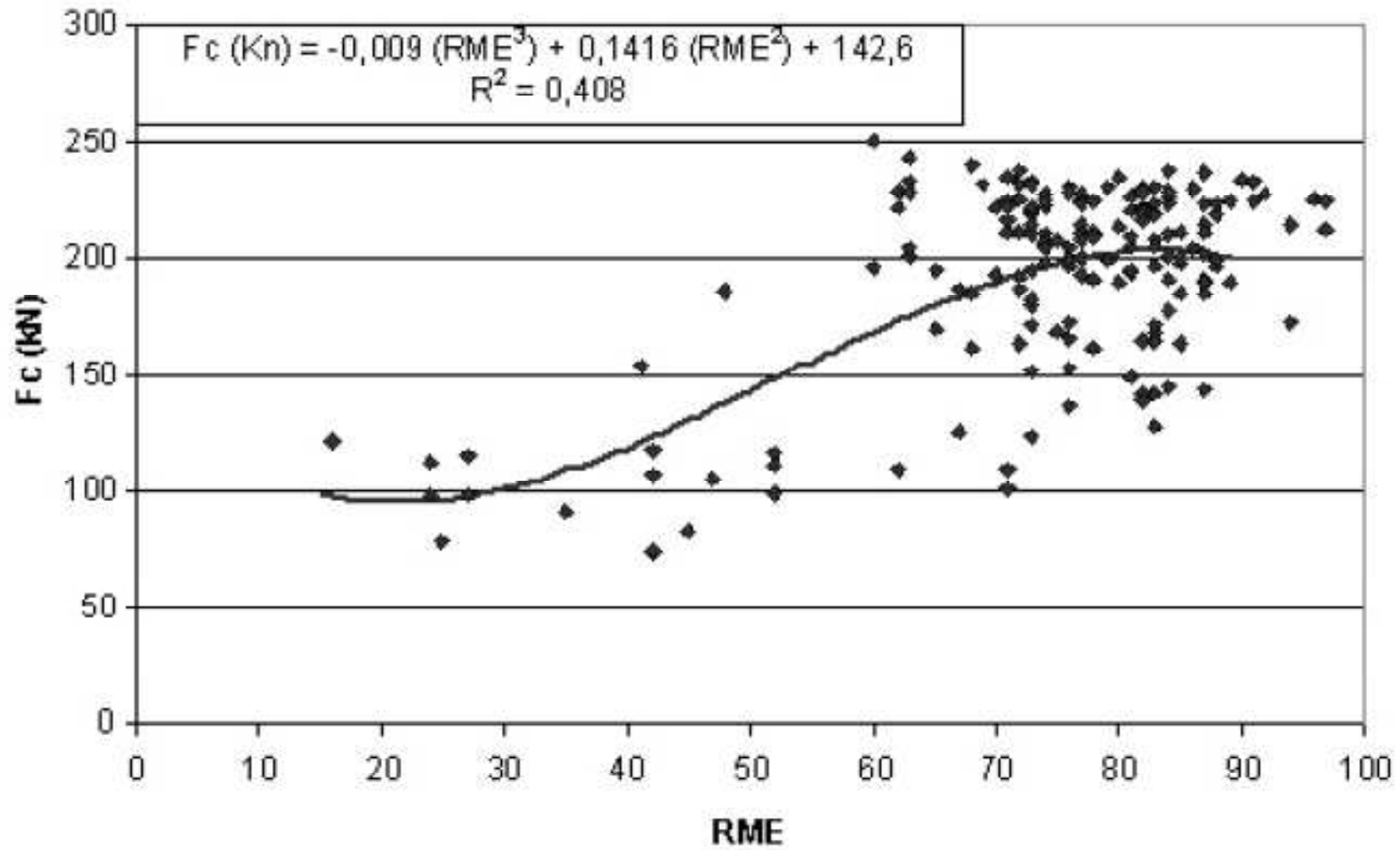


Figura 8 Correlación RME y el empuje por cortador aplicado en la cabeza de corte.

Coefficientes de correlación (r) = 0,64.



6. CONCLUSIONES

- Después de años de estudio y análisis de los datos de 387 tramos de túneles construidos con tuneladoras de roca, del tipo TBMs: Abiertas, Escudadas y doble-escudo, se ha definido que RME es un índice creado específicamente para evaluar la excavabilidad de los terrenos.
- Se ha podido correlacionar el RMR del terreno con el avance medio en un tramo de túnel, en condiciones homogéneas (ARA_T), además permite a los Proyectistas y Constructores estimar el avance de las tuneladoras y decidir el método de construcción más apropiado.
- A partir del RME y del índice de abrasividad cerchar es posible prever el consumo específico de cortadores; expresado como el número de cortadores cambiados por m^3 excavado.

GRACIAS POR SU ASISTENCIA

