
ANEXO I

CÁLCULO DE RENDIMIENTO DE LAS TAREAS

1 INTRODUCCIÓN

El rendimiento de una tarea es la inversa de la cantidad de horas necesarias para la ejecución de una unidad y se encuentra expresado en: unidad de medida de la tarea sobre hora (por ejemplo m³/h).

Este concepto es aplicable no solo a los costes de equipos sino también a los materiales y mano de obra.

En este Anexo se explicita el mecanismo de cálculo con que fueron estimados todos los rendimientos utilizados para evaluar los costos unitarios.

2 PASOS DE CÁLCULO

Sucintamente, los pasos necesarios para el cálculo son:

1. Determinación de las condiciones de operación.
2. Determinación de los equipos intervinientes en la tarea.
3. Evaluación del rendimiento del conjunto.
4. Determinación del número de equipos intervinientes en la tarea.

A continuación se explica cada uno de ellos.

2.1 CONDICIONES DE OPERACIÓN

Las condiciones de operación estarán determinadas por las condiciones geológicas, climáticas y características propias del frente de obra donde se deba realizar la tarea.

A los efectos de este manual de costos se han considerado básicamente condiciones normales y severas. Estas últimas significan condiciones de operación más exigidas, que se presentaría, por ejemplo, en una excavación en roca muy dura o el caso inverso, un túnel en roca blanda con existencia de diaclasas.

No se tuvo en cuenta para este cálculo el factor de apunamiento de los equipos por tratarse de un fenómeno que involucra a todas las tareas por igual. En cambio, este efecto se considera en el conjunto de la obra.

De acuerdo a las condiciones de operación se definirán los siguientes parámetros:

Csb [$\text{m}^3/\text{m}^3\text{b}$] = Coeficiente de conversión de suelo a banco.	1,00	Csb = 1,00 Para suelo saturados
	1,12	Csb = 1,12 Para suelo
	1,60	Csb = 1,60 Para roca
Tc [min] = Tiempo de carga de pala	1,00	Tc = 1,0 Para suelo.
	1,20	Tc = 1,2 Para roca.
Pe [ml/m^3] = Perforación específica	0,35	Pe = 0,35 Banqueos hasta 6 metros
	0,17	Pe = 0,17 Banqueos de 6 a 12 metros
Va [ml/h] = Velocidad de avance	15,00	Va = 15 Para condiciones severas
	22,50	Va = 22,5 Para condiciones medias
	30,00	Va = 30 Para condiciones normales
Ri [m^3/h] = Rendimiento instantáneo de la tunelera	45,00	Ri = 45 Para suelo
	30,00	Ri = 30 Para roca - condiciones normales
	18,00	Ri = 18 Para roca - condiciones medias
	5,00	Ri = 5 Para roca - condiciones severas
Coeficiente de utilización	0,45	Cu = 0,45 Para roca - condiciones normales
	0,35	Cu = 0,35 Para roca - condiciones medias
	0,25	Cu = 0,25 Para roca - condiciones severas

El tiempo del ciclo de la máquina T_c o tiempo de carga depende de otros factores además del tipo de suelo, entre ellos, la habilidad y fatiga del operador, las condiciones de maniobra en el sitio, la fatiga del operador, la antigüedad de la máquina, etc. Los valores estándar que se utilizan en el costeo pueden variar aproximadamente entre 0,5 y 1 minutos. En este caso se ha adoptado un valor de cierta manera conservador.

Por otro lado también existe el coeficiente de eficiencia C_e al que, como se observa más adelante, se le ha asignado un valor constante igual a 0,83 para todo el equipamiento de uso estándar, lo cual podría considerarse optimista. Este valor expresa la relación entre la cantidad real de horas trabajadas y el tiempo total previsto. Este coeficiente depende de la antigüedad del equipo, la

constancia del operador y la logística de la empresa, (mantenimiento, servicio, combustible, transporte del personal, etc.).

En todas las expresiones de rendimiento estos parámetros intervienen conjuntamente en el numerador y el denominador, por lo que su relación es lo que tiene real incidencia (o sea T_c/C_e).

Podría haberse adoptado, como algunos recomiendan, un valor menor para T_c (más optimista) y un valor menor para C_e (más pesimista) pero si la relación se mantiene, su efecto será neutro.

2.2 DETERMINACIÓN DE EQUIPOS

En este punto el consultor adopta, de acuerdo a su experiencia y los estándares de obra, el o los equipos a utilizar para la realización de cada tarea.

A partir de esta elección y de las condiciones listadas anteriormente, se determinan los rendimientos unitarios para cada equipo en cada condición de operación.

En muchos casos, los rendimientos de los equipos para condiciones normales de operación son datos del fabricante.

Debido a que el cálculo no es homogéneo, se tratan la totalidad de los equipos agrupados como sigue. Se debe tener en cuenta que al realizar las correspondientes operaciones se deberán adicionar las constantes de pasaje entre unidades.

2.2.1 Rendimiento de cargadoras, dragalinas y retroexcavadoras

$$R_p = \frac{C_e \cdot V_p}{T_c \cdot C_{sb}}$$

Donde:

$V_p [m^3]$ = Capacidad de la pala (cuchara)

C_e = Coeficiente de eficiencia = 50min/60min = 0,83

T_c [min] = Tiempo de carga de pala

C_{sb} [m^3s/m^3b] = Coeficiente de conversión de suelo a banco

Equipo	V_p	Rendimiento (m^3/h)	
	m^3	Suelo	Roca
Cargador frontal CAT 962 G	3.3	147	86
Cargador frontal CAT 980 H	5.0	223	130
Grúa con dragalina	2.3	115	96
Retroexcavadora CAT 345 CL (1 a 3 m^3)	2.0	89	52
Grúa con almeja	1.0	45	26

2.2.2 Rendimiento de los camiones

2.2.2.1 Camiones cargados con equipos con cuchara

El rendimiento de los camiones, a diferencia de las cargadoras, depende de la capacidad de la cuchara que se emplee para cargarlos

$$T_{ca} = T_c \frac{V_c}{V_p} + \frac{D_t}{v_1} + \frac{D_t}{V_2} + T_p$$

$$R_{ca} = \frac{C_e \cdot V_c}{T_{ca} \cdot C_{sb}}$$

Donde:

V_p [m^3] = Capacidad de la pala (cuchara).

V_c [m^3] = Capacidad del camión.

D_t [km] = Distancia de transporte = 1,5

v_1 [km/h] = Velocidad del camión cargado = 30

v_2 [km/h] = Velocidad del camión vacío = 50

C_e = Coeficiente de eficiencia = 50min/60min = 0,83

T_p [min] = Tiempo de descarga, maniobras, pérdida = 4,2

C_{sb} [m^3s/m^3b] = Coeficiente de conversión de suelo a banco.

Equipo de carga	Rendimiento (m ³ /h)					
	Camión fuera de ruta CAT 769 D		Camión volcador F 1400 (10 toneladas)		Camión 20ton Eurotracker 380 E37+caja roquera	
	Suelo	Roca	Suelo	Roca	Suelo	Roca
Cargador frontal CAT 962 G	66	41	25	18	43	28
Cargador frontal CAT 980 H	75	49	28	18	47	33
Grúa con dragalina	55	35	23	16	40	24
Retroexcavadora CAT 345 CL (1 a 3 m ³)	50	32	23	15	37	23
Grúa con almeja	32	20	19	11	25	16

Equipo de carga	Cantidad de camiones					
	Camión fuera de ruta CAT 769 D		Camión volcador F 1400 (10 toneladas)		Camión 20ton Eurotracker 380 E37+caja roquera	
	Suelo	Roca	Suelo	Roca	Suelo	Roca
Cargador frontal CAT 962 G	3	3	6	5	4	4
Cargador frontal CAT 980 H	3	3	8	8	5	4
Grúa con dragalina	3	3	5	6	3	4
Retroexcavadora CAT 345 CL (1 a 3 m ³)	2	2	4	4	3	3
Grúa con almeja	2	2	3	3	2	2

2.2.2.2 Camiones cargados desde silo

Se supone que la carga es instantánea, sólo se consideran la descarga y el transporte.

$$T_{ca} = \frac{D_t}{v_1} + \frac{D_t}{v_2} + T_p$$

$$R_{ca} = \frac{C_e \cdot V_c}{T_{ca} \cdot C_{sb}}$$

Donde:

V_c [m³] = Capacidad del camión.

D_t [km] = Distancia de transporte = 1,5

v_1 [km/h] = Velocidad del camión cargado = 30

v_2 [km/h] = Velocidad del camión vacío = 50

C_e = Coeficiente de eficiencia = 50min/60min = 0,83

T_p [min] = Tiempo de descarga, maniobras, pérdida = 4,2

C_{sb} [$m^3/s/m^3b$] = Coeficiente de conversión de suelo a banco

2.2.3 Rendimiento de Perforadoras

2.2.3.1 Para perforaciones continuas

El rendimiento de la perforación en roca varía según el tipo de roca considerada, el espacio disponible para la operación del equipo, la logística de la empresa en cuanto a suministro de insumos (repuestos, combustible, recambio de personal, profundidad por posición), etc..

Lógicamente, también influyen la potencia, el tipo del equipo disponible y su estado de operación.

Incluso dentro de un mismo tipo de roca, el rendimiento es distinto según el número y posición de los planos de rotura existentes. Este valor generalmente oscila entre 0,5 y 5 m/h. Para el presente manual, considerando la experiencia disponible se ha adoptado un único valor igual a 2,5 ml/h. El rendimiento real sólo será conocido luego de pruebas específicas con el equipo en el lugar de operación.

2.2.3.2 Para colocación de dinamita

2.2.3.2.1 Excavación a cielo abierto

El rendimiento del proceso de producción de roca a partir del yacimiento en banco, en volumen por unidad de tiempo depende, para un diseño de ubicación, profundidad y diámetro de las perforaciones, de la velocidad de avance y de la perforación específica, o sea longitud de perforación por unidad de volumen de roca excavada en banco, es decir:

$$Rr = \frac{Va}{Pe}$$

Donde:

P_e [ml/m³] = Perforación específica

V_a [ml/h] = Velocidad de avance

Tanto V_a como P_e dependen del estado de la roca; de la máquina perforadora y del diámetro de perforación. De acuerdo a la práctica habitual y a la experiencia del consultor los valores adoptados para el rendimiento son los siguientes:

Equipo	Rendimiento (m ³ /h)			
	Bancos hasta 6 m		Bancos de 6 a 12 m	
	Normal	Severa	Normal	Severa
Perforadora TamRock	86	43	176	88

2.2.3.2.2 Excavación en túnel

Uno de los aspectos a considerar en las excavaciones subterráneas en roca se refiere a las dimensiones de la sección donde se realizan las operaciones de extracción mediante la rotura del macizo rocoso y el movimiento de los equipos utilizados.

Los gráficos de las figuras, obtenidos de la experiencia en la excavación de un gran número de túneles, muestran aproximadamente el numero de perforaciones y el consumo de explosivos, para rocas de diferente calidad, en función de la sección de excavación. En los mismos se observa que para secciones mayores que 30 m², tanto el número específico de perforaciones como el consumo específico tienden a hacerse independientes del tamaño de la sección.

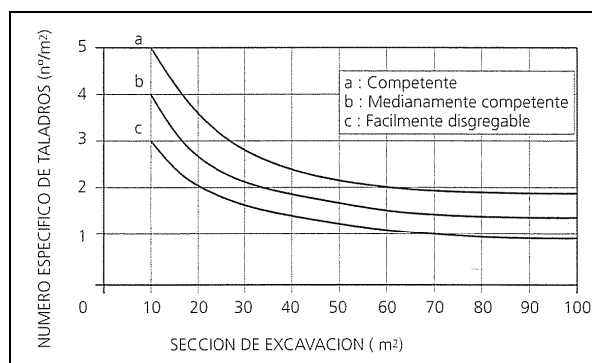
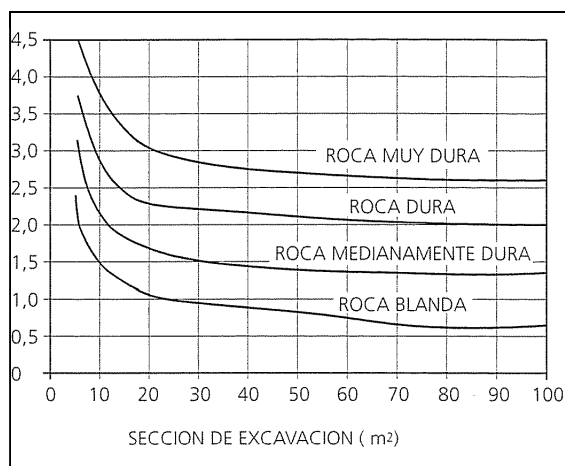
Por el contrario para secciones menores que 30 m² ambos parámetros tienden a aumentar con la disminución del tamaño de la misma. Dado que además existe un límite inferior de sección para la operación de los equipos utilizados (aproximadamente 10 m²) en el costeo se adoptó el criterio de utilizar, en este

MANUAL DE PROCEDIMIENTOS PARA LA DETERMINACIÓN DE LOS COSTOS DE CONSTRUCCIÓN DE APROVECHAMIENTOS HIDROELÉCTRICOS.

rango, una sección promedio que fuera representativa de todas las secciones comprendidas entre 30 m² y 10 m².

Secciones más pequeñas aún requerirían el uso de equipos más apropiados, que aún cuando pudieran aumentar el costo unitario, aportarían un volumen de excavación mucho menor y solo producirían una variación de segundo orden en el presupuesto total de la obra.

Consumo específico de explosivo (kg/m³)



El rendimiento de los equipos utilizados en este caso resultan:

Equipo	Rendimiento (m ³ /h)			
	Hasta 30 m ² de sección		Más de 30 m ² de sección	
	Normal	Severa	Normal	Severa
Rocket Boomer 104 127 8	5,2	10,5	4,85	9,7

2.2.4 Rendimiento de las compactadores

$$R_c = \frac{esp \cdot ac \cdot vc}{np}$$

Donde:

esp = Espesor compactado

ac = Ancho del compactador

vc = Velocidad del compactador

np = Número de pasadas

	Espesor (m)	Núm. Pas.	Rend. (m ³ /h)
Compactador CAT 815 F	0,6	10	384
	0,3	10	192

2.2.5 Rendimiento en colocaciones superficiales

2.2.5.1 Elementos donde la mano de obra determina el rendimiento

Casos: Geotextiles, Gramilla

$$R_s = \frac{U_{col}}{T_{col}}$$

Donde:

Ucol = Unidad de colocación

Tcol = Tiempo de colocación

Elemento	U _{col} m ²	T _{col} Min	Rend. m ² /h
Geotextil	150	20	450
Gramilla	1000	12	5000

2.2.5.2 Elementos donde los equipos determinan el rendimiento

Casos: Gaviones, Bloques premoldeados.

$$U_{cam} = \frac{C_{cam}}{V_{elem} \cdot \delta_{elem}}$$

$$T_{cam} = T_{un} \cdot U_{cam} + \frac{Dt}{V_1} + \frac{Dt}{V_2} + T_p$$

$$Rs = \frac{S_{elem} \cdot U_{cam}}{T_{cam}}$$

Donde:

U_{cam} = Unidades por camión

C_{cam} [kg]= Carga del camión

V_{elem} [m³]= Volumen del elemento

δ_{elem} [kg/m³] = Peso específico del elemento

S_{elem} [m²]= Superficie del elemento

T_{cam} [min] = Tiempo del ciclo del camión

Dt [km] = Distancia de transporte = 1,5

v_1 [km/h] = Velocidad del camión cargado = 30

v_2 [km/h] = Velocidad del camión vacío = 50

T_p [min] = Tiempo de descarga, maniobras, pérdida = 4,2

Elemento	S_{elem} m ²	V_{elem} m ³	δ_{elem} kg/m ³	C_{cam} kg	U_{cam} un	T_{un} min	T_{ca} min	Rs m ² /h
Gaviones	2	1	1600	10000	6	1,5	18	40
Bloques premoldeados	1	0,08	2400	10000	52	1	61	51

2.2.6 Rendimiento preestablecido

Equipo	Rend.	Fuente
Bomba inyectora (m ³ /h) =	15	Fabricante
Gunitadora (m ² /h) =	22	Consultor
Martinete (m ² /h) =	2,4	Consultor
Planta clasificadora de áridos (m ³ /h) =	150	Fabricante
Planta de trituración y clasific. de áridos (m ³ /h) =	80	Fabricante
Grúa torre de 150 tn (m ² /h) =	9	Consultor
Bomba de hormigón (m ³ /h) =	30	Fabricante
Topadora CAT D8 (m ³ /h) =	250	Consultor
Jaula Alimak (m ³ /h) =	6,1	Consultor
Planta hormigonera (m ³ /h) =	150	Fabricante

2.3 DETERMINACIÓN DEL RENDIMIENTO DEL CONJUNTO

La determinación de rendimiento del conjunto se realizó de acuerdo a los siguientes criterios:

2.3.1 Criterio 1: De máximo rendimiento

Se adoptó como rendimiento del conjunto, al rendimiento del equipo con mejor performance.

La cantidad necesaria de unidades, para cada uno de los equipos que componen el conjunto, se determinó de manera tal de alcanzar el rendimiento conjunto. Es decir,

$$N^o_{Eqi} = \frac{R_{conj}}{R_{Eqi}}$$

2.3.2 Criterio 2: De optimización de Equipo

Se adoptó como rendimiento del conjunto, al rendimiento de un equipo en particular que se quería optimizar. Esto se daría por ejemplo para el caso de la tunelera en donde, por razones de costo, solo se emplearía una unidad.

La cantidad necesaria de unidades, para cada uno de los equipos que componen el conjunto, se determinó de manera tal de garantizar el rendimiento de equipo a optimizar. Es decir,

$$R_{Eqi} \geq R_{Eq \text{ a optimizar}}$$

2.4 CANTIDAD DE EQUIPOS

De acuerdo al criterio escogido, se determinaron las unidades de cada equipo necesario para garantizar el rendimiento del conjunto.

3 MÁQUINAS TUNELERAS

3.1 ANÁLISIS TEÓRICO

El diseño y el rendimiento de una tunelera tipo TBM depende fundamentalmente de la fuerza normal que se ejerce sobre cada cuchilla de corte.

Diversos investigadores han desarrollado ecuaciones con relación a la penetración por revolución en función de las características del suelo o roca, expresada como tensión de compresión (UCS o tensión de Brazil), σ_B en MPa o KPa. Esa relación se expresa como:

$$P_{Rev} = F_n / R_f \quad \text{donde:}$$

F_n = fuerza normal sobre cada cuchilla.

R_f = Índice de penetración = f (UCS o σ_B).

Además debe existir una componente tangencial capaz de mantener la cuchilla en movimiento.

Las condiciones de operación de una tunelera no son uniformes. No obstante se han desarrollado métodos empíricos para establecer valores promedio de esta fuerza en función de la penetración, para separaciones estándar de las cuchillas o discos. En este contexto se ha establecido experimentalmente un empuje crítico a partir del cual se produce la trituración del suelo o roca. Este valor crítico está directamente relacionado con la dureza de la roca y se incrementa con la separación de las cuchillas o discos y su espesor.

En la práctica el espaciamiento promedio recomendado de las cuchillas es entre 60 y 90 mm. La relación entre la fuerza normal y la fuerza tangencial se expresa como:

$$F_t = C_c F_n$$

Donde:

C_c = Coeficiente de corte

El coeficiente de corte no es constante.

Conocida la fuerza tangencial, el radio ponderado y el número de revoluciones de la cabeza de la tunelera se puede determinar la potencia necesaria de la máquina o sea:

$$P = N \cdot F_r \cdot R_p \cdot 2 \cdot \Pi \cdot n \quad (1)$$

Donde:

P = Potencia

N = Número de cuchillas o discos

R_p = Radio ponderado

n = Número de revoluciones por unidad de tiempo.

Si N se expresa en función de la separación de los discos (S) y F_r en función de F_n se obtiene:

$$P = \frac{D}{S} \cdot C_c \cdot F_n \cdot R_p \cdot 2 \cdot \Pi \cdot n \quad (2)$$

Y la penetración por unidad de tiempo:

$$p = \frac{F_n}{R_f} \cdot n \quad (3)$$

El rendimiento, expresado en unidad de volumen por unidad de tiempo resulta (si la sección es circular):

$$R = \frac{F_n}{R_f} \cdot n \cdot \frac{\Pi D^2}{4} \quad (4)$$

Si el diámetro aumenta y la fuerza normal total se mantiene constante, como aumenta el número de cuchillas, F_n disminuye, de modo que hay efectos contrapuestos en relación al rendimiento.

Por otro lado si el diámetro disminuye y se mantiene la fuerza normal total, F_n aumenta por lo que nuevamente hay efectos contrapuestos en el rendimiento resultante.

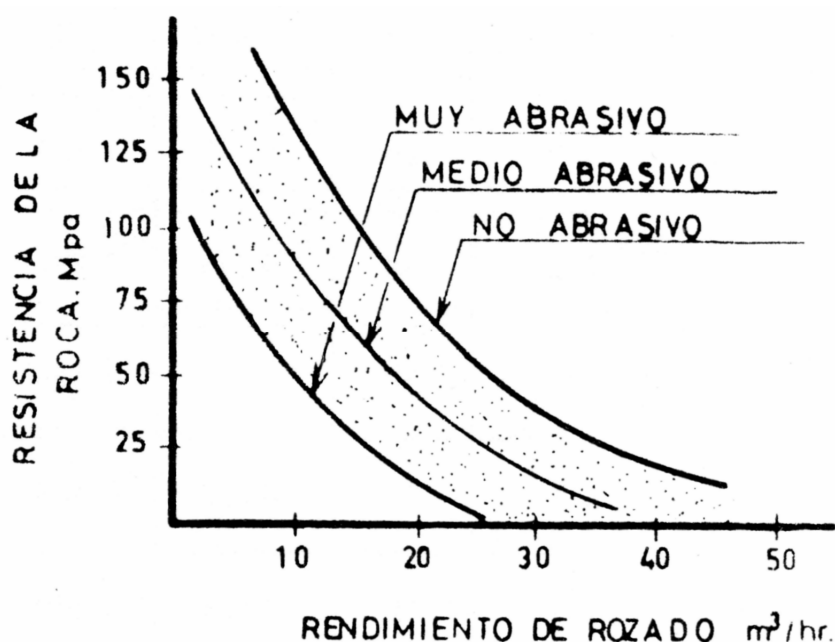
Las expresiones (1) a (4) permiten obtener las siguientes conclusiones:

- La penetración por unidad de tiempo o avance de la tunelera depende fundamentalmente de la fuerza normal.
- La fuerza normal en cada cuchilla o disco debe superar el valor crítico para que el proceso tenga efecto.
- Cuando se aumenta el diámetro, como la separación de los discos es aproximadamente constante, debe aumentarse la potencia de la máquina y el empuje total para lograr la misma penetración.

3.2 DATOS DISPONIBLES

Existen básicamente dos modelos numéricos que utilizan los fabricantes para definir las características (potencia, torque y empuje) de las máquinas, en función del tipo de roca: el CSM, desarrollado en Colorado School of Mine, y el NTH en el Norwegian Institute of Technology. Ambos son modelos propietarios y no están disponibles para el uso público.

El rendimiento instantáneo para una potencia dada, puede ser ponderado por las curvas que se reproducen a continuación, debidas a H. Hendewith, aunque esa es una visión algo simplificada del problema.



También el rendimiento instantáneo o penetración neta, es provisto por algunos fabricantes haciendo variar la potencia de la máquina en KW y la resistencia a la compresión simple de la roca. Esta forma queda expresada, por ejemplo, por la tabla provista por el fabricante WESTFALIA, que se transcribe a continuación. La misma supone que la dureza o abrasividad es constante, como también lo es la resistencia a la tracción de la roca.

Potencia de la cabeza de corte en KW	Resistencia a la compresión simple de la roca (MPa)					
	120	100	50	30	20	8
	Rendimiento instantáneo de la máquina en m³/hora					
300	23	29	50	72	94	116
200		12	29	48	67	81
110			13	27	34	46
50				12	17	25
40				6	12	20
20					3	12

1 MPa: 10 kg cm²

Esta información también es relativamente incompleta por cuanto no incluye otros parámetros adicionales a la potencia, como se describió en el apartado anterior.

Una descripción más comprensiva de la complejidad del problema se muestra en el gráfico adjunto al final del anexo, extractado del texto “Excavación Mecánica de Túneles” de Cornejo Alvarez L. (Edición Rueda) para una máquina Borettec. TBM.

Los valores mostrados corresponden a condiciones instantáneas de penetración o rendimiento.

Sin embargo, el rendimiento neto depende de otros factores como:

1. A = porcentaje de horas útiles por día = 80 a 100%.
2. Cu = Coeficiente de utilización de las máquinas definido como horas reales/horas efectivas que depende del tipo de suelo.
Para excavaciones en condiciones severas = 0,20
Para excavaciones en condiciones medias = 0,35
Para excavaciones en condiciones normales = 0,45
3. B = Estado de la máquina, en general 0,75 a 1, con lo cual el rendimiento neto sería:

$$R_n = R_i \cdot A \cdot C_U \cdot B$$

3.3 RENDIMIENTOS ADOPTADOS

Para las estimaciones del costo de excavación del presente manual los valores adoptados son los que se indican en los cuadros siguientes.

Para esas estimaciones se adoptó un diámetro de aproximadamente 6 m que conduce, para una máquina de las potencias indicadas, a los siguientes rendimientos instantáneos y netos.

RENDIMIENTO DE LA TUNELERA

Rendimiento instantáneo

Máquina de 720 kw	p	p	D	Area	Ri
Mpa	Pie/hs	m/hs	m	M2	m3/h
30-70 normal	6.00	2.10	6.00	28.26	59.35
70-120 media	5.00	1.75	6.00	28.26	49.46
> 120 severa	3.00	1.05	6.00	28.26	29.67

Potencia equipo TBM	Ri	A	CU	B	Rn	P
	M3/h	-	-	-	m3/h	m/día
100 kw en suelo	45	0,85	0,35	0,85	11,38	9,66
720 kw en roca normal	60	0,85	0,35	0,85	15,17	12,89
720 kw en roca media	49	0,85	0,25	0,85	8,85	7,52
720 kw en roca severa	29	0,85	0,20	0,85	4,19	3,56

3.4 SELECCIÓN DEL MÉTODO DE EXCAVACIÓN

Las máquinas tuneleras generalmente se diseñan para un tipo de roca y un diámetro de túnel, definidos por lo que su utilización se justificará mejor, en términos económicos, para su uso en longitudes extensas.

Las ventajas de estos equipos son:

- Mayores velocidades de avance.
- Reducción de la sobreexcavación de la sección de proyecto a valores casi nulos.
- Menores requerimientos de soporte.
- Mayor seguridad de trabajos.
- Menor perturbación en el subsuelo circundante.
- En túneles sin revestimiento, menores pérdidas de carga del escurrimiento del aire de ventilación o agua.
- La operación del equipo puede efectuarse por control remoto.

Entre las desventajas deben citarse:

- Geometría circular fija.
- Flexibilidad limitada frente a cambios imprevistos de las condiciones geológicas.
- Mayor tiempo de movilización.
- Mayores costos de capital.

Dadas las características enumeradas deberá evaluarse cuidadosamente estos requerimientos antes de seleccionar el método de excavación apropiado.

En general, no será conveniente la selección de excavación con tunelera a menos que se cumplan las siguientes premisas:

- No utilizar explosivos.
- No perturbar el subsuelo.
- Imposibilidad de trabajar a cielo abierto.
- Excesiva heterogeneidad geológica.

