
MI57E – Explotación de Minas

Carguío y Transporte Clase 2

4. Proceso de selección de equipos: caso general

Los pasos básicos de selección de equipos de carguío y transporte son los siguientes:

1. Determinar la producción requerida.

Los requerimientos de producción totales pueden verse afectados por una serie de factores externos al proyecto. Estos pueden incluir proyecciones de ventas, contratos, cantidad de reservas disponibles y otras operaciones de la compañía. En base a estos antecedentes se debe definir la cantidad total de mineral a producir. Requerimientos de producción se establecen, generalmente, para periodos de un año.

La producción total anual debe entonces convertirse en tasas de producción diaria u horaria para cada operación. La tasa de producción de ciertas operaciones unitarias se verá afectada por variables como el porcentaje de recuperación, ley del mineral y razón de sobrecarga. Por ejemplo, en la medida que la razón de sobrecarga aumenta en una mina de carbón, la remoción de la sobrecarga debe aumentar proporcionalmente de manera de asegurar una producción constante de mineral. Por lo tanto, las tasas de producción de carguío y transporte deben considerar el mineral de interés, así como el estéril que es necesario remover para acceder a dicho mineral.

2. Determinar alcance o recorridos de transporte.

Equipos de base fija cargan en un punto y luego rotan en torno a su centro para descargar en otro punto. La máxima distancia horizontal sobre la cual un equipo puede cargar o botar el material se define como su alcance. La geometría del depósito a excavar es el factor primario para determinar el alcance requerido por el equipo.

Los recorridos de transporte se refieren a las distancias y pendientes que deben recorrer equipos móviles. Tanto para las unidades de transporte como para aquellas que combinan el carguío con el transporte, hay cierta distancia que debe ser recorrida para llegar al punto de descarga. Sin embargo, esta distancia no es necesariamente una línea recta. En el caso de una mina subterránea, la configuración espacial de las excavaciones determinará la distancia total a recorrer, aunque esto también puede verse afectado por factores tales como la ventilación y la disponibilidad de energía eléctrica, mientras que en una

mina a cielo abierto, la principal consideración es la topografía. Los límites de la propiedad y el derecho a vía legal pueden también afectar estas distancias.

3. **Calcular tiempo de ciclo.**

El tiempo de ciclo para una operación unitaria puede dividirse en dos componentes principales. La primera componente la constituyen todas aquellas operaciones que tienen una duración relativamente constante de una aplicación a la próxima: virar, cambiar de posición, descargar y cargar. Valores estimados del tiempo necesario para realizar cada una de estas funciones pueden obtenerse generalmente de la documentación del fabricante del equipo. La componente variable del ciclo, está asociada con el tiempo de viaje para equipos móviles y con el tiempo de giro en el caso de equipos de base fija.

4. **Calcular capacidad.**

La relación general entre tasa de producción, duración del ciclo y capacidad es bastante simple y puede establecerse como:

$$\text{tasa de producción} = \text{capacidad} \times (\text{no. de ciclos} / \text{unidad de tiempo})$$

Cuando se han considerado todos los factores de eficiencia:

$$\text{productividad} = \text{tasa de producción} \times \text{factores de eficiencia}$$

El cálculo de la capacidad requerida es bastante directo cuando los requerimientos de producción han sido establecidos y se han estimado los tiempos de ciclo y los factores de eficiencia. Es importante recordar que los equipos están diseñados para manejar un cierto peso, por lo que en los cálculos finales se debe considerar la densidad del material, así como su esponjamiento, para asegurarse de que tiene la capacidad de manejar el material requerido.

5. **Iterar para mejorar la productividad.**

El tipo de maquinaria considerado en el punto 3 puede no ser el adecuado y tras el cálculo de la capacidad requerida, puede ser necesario utilizar un tipo de maquinaria diferente. Al seleccionar un tipo diferente de equipos, los tiempos de ciclo deben ser re-estimados así como las capacidades y factores de eficiencia. El cálculo de la capacidad debe ser refinada nuevamente para determinar si el equipamiento propuesto puede satisfacerla. Varias iteraciones pueden ser necesarias antes de encontrar una solución satisfactoria. Sin embargo, puede haber más de una solución al problema de carguío y transporte. Sabiendo que

la tasa de producción es directamente proporcional a la capacidad e inversamente proporcional al tiempo de ciclo de la maquinaria seleccionada, el ingeniero puede hacer varias iteraciones de manera de definir un número de flotas de carguío y transporte para hacer comparaciones de costos.

6. Calcular el tamaño de la flota de equipos.

Hasta ahora, la discusión se ha centrado principalmente en la selección de un equipo específico de carga-transporte o en un equipo de carga asociado a otro de transporte, aunque en la realidad, se dispone de una flota de equipos que deben realizar esta labor (ya sea porque una unidad de carguío y una de transporte pueden no satisfacer los requerimientos de producción, o bien, porque no se quiere tener toda la producción dependiente de un solo equipo). La posible economía de escala que se realiza al tener un solo equipo de gran tamaño debe sopesarse respecto a la incertidumbre asociada a la disponibilidad de este equipo. Mientras una flota de equipos puede seguir trabajando si alguno de sus componentes no estuviera disponible por razones mecánicas, la producción debe esperar si el único equipo de carguío o transporte sufre algún imprevisto y debe detener su operación para solucionar un problema mecánico. Existen varios algoritmos que permiten calcular la disponibilidad de equipos en una flota. Así, el número total de equipos necesarios para satisfacer una producción dada, puede calcularse en base a la disponibilidad.

7. Iterar para reducir costos de capital y de operación.

La fase técnica del proceso de selección identificará cierto número de sistemas alternativos de carguío y transporte. Una comparación de costos debe realizarse, que considere el costo de capital, costo de operación y la vida de los equipos en años. Adicionalmente al análisis económico tradicional de ingeniería, se pueden realizar simulaciones de los distintos sistemas de carguío y transporte, lo que permiten verificar algunas de las hipótesis que se asumieron para su selección. Además, estos sistemas permiten a menudo identificar alternativas a las definidas por medio del sistema de selección determinista planteado anteriormente.

5. Determinación de la producción requerida

Existen varias fórmulas empíricas para determinar el ritmo óptimo de producción anual (en ton/año) o bien la vida óptima de la mina (en años) de una explotación, tanto a cielo abierto, como subterránea.

La primera fórmula empírica denominada Regla de Taylor (1976) propone una vida óptima de explotación calculada como:

$$\text{VOE (años)} = 6.5 \times (\text{Reservas (millones de ton)})^{0.25} \times (1 \pm 0.2)$$

Equivalentemente, se puede calcular el ritmo óptimo de producción como:

$$\text{ROP (ton/año)} = 0.15 \times (\text{Reservas (millones de ton)})^{0.75} \times (1 \pm 0.2)$$

Por ejemplo, para un depósito con reservas de 100 millones de toneladas, la VOE sería entre 16.44 y 24.66 años, dependiendo del factor que fluctúa entre 0.8 y 1.2. Utilizando la fórmula para el ROP, calculamos una producción anual entre 3.79 y 5.69 millones de ton/año. Alternativamente, se pueden calcular las producciones dividiendo las reservas totales por el número de años, lo que da una producción anual entre 4.05 y 6.08 millones de toneladas, bastante bien aproximado por la fórmula de ROP antes mencionada.

Otros autores han propuesto fórmulas diferentes para minas a cielo abierto y para minas subterráneas. Por ejemplo, Mackenzie (1982) propone los siguientes ritmos óptimos de explotación:

Minería Subterránea: (hasta 6 millones de ton/año)

$$\text{ROP (ton/año)} = 4.22 \times (\text{Reservas (millones de ton)})^{0.756}$$

Minería a Rajo Abierto: (hasta 60 millones de ton/año)

$$\text{ROP (ton/año)} = 5.63 \times (\text{Reservas (millones de ton)})^{0.756}$$

Otras fórmulas han sido entregadas en base a antecedentes recopilados en una gran cantidad de proyectos mineros, entregando las siguientes Vidas Óptimas de Explotación para distintos metales:

Cobre: $\text{VOE (años)} = 5.35 \times (\text{Reservas (millones de ton)})^{0.273}$

Oro: $\text{VOE (años)} = 5.08 \times (\text{Reservas (millones de ton)})^{0.31}$

Plomo–Zinc: $\text{VOE (años)} = 7.61 \times (\text{Reservas (millones de ton)})^{0.276}$

Una aproximación alternativa propuesta por López Jimeno (1988) considera también la ley media equivalente del depósito:

$\text{VOE (años)} = 4.77 \times \text{Ley equivalente (\%Cu)}^{0.1} \times (\text{Reservas (millones de ton)})^{0.3}$

Estas fórmulas pueden usarse, pero debe tenerse en consideración que los ritmos de producción cambiarán en función de la ley media, sobrecarga a remover, recuperaciones metalúrgicas y leyes de concentrados, además de otras consideraciones técnicas del depósito, inversiones requeridas y factores sociopolíticos externos.

6. Determinación de alcances o recorridos de transporte

Los recorridos de transporte cambian en la medida que se desarrolla la explotación. En la práctica, se diseñan y calculan perfiles de transporte, donde se indican las distancias, pendientes y condiciones de operación de los recorridos de transporte. Los tiempos estimados de transporte para dichos perfiles se calculan en base a consideraciones técnicas del equipo de transporte, o bien en base a mediciones empíricas (hechas en terreno).

El conocimiento de los perfiles de transporte permitirá, como se verá en las secciones siguientes, el cálculo de la productividad y de los ciclos de carguío y transporte, y su optimización.

7. Clasificación de equipos

Los equipos se clasifican según la función que pueden satisfacer. Es así como se distingue entre equipos de carguío, equipos de transporte y equipos mixtos.

Los primeros realizan principalmente la labor de carga del material desde la frente de trabajo hacia un equipo de transporte que llevará el material a un determinado destino (planta, botadero, stock). Alternativamente, estos equipos de carguío pueden depositar directamente el material removido en un punto definido. Este es el caso de las dragadoras en minería de carbón, donde el equipo remueve la sobrecarga y la utiliza para construir la superficie sobre la cual se emplazará en un futuro cercano. Los equipos de carguío pueden separarse a su vez en unidades discretas de carguío, como es el caso de palas y cargadores, o bien, como equipos de carguío de flujo continuo, como es el caso de excavadores de balde que realizan una operación continua de extracción de material. Otra forma de diferenciar los equipos de carguío considera si éstos se desplazan o no, por lo que se distingue entre equipos sin acarreo (en general su base no se desplaza en cada operación de carguío) y equipos con acarreo mínimo (pueden desplazarse cortas distancias).

Los equipos de transporte tienen por principal función desplazar el material extraído por el equipo de carguío hacia un punto de destino definido por el plan minero. Pueden tener un camino fijo como es el caso de trenes que requieren el tendido de líneas férreas, o bien pueden desplazarse libremente por cualquier camino, como es el caso de los camiones. Además, se pueden dividir en unidades discretas, como es el caso de camiones y trenes, o equipos de transporte de flujo continuo. En esta última categoría califican las correas transportadoras, las que pueden trasladar material de granulometría bastante gruesa dentro de la mina.

Finalmente, se pueden definir los equipos mixtos, que pueden realizar en una sola operación el carguío y transporte del material. El equipo de mayor interés en esta categoría corresponde al LHD, que es una pala de bajo perfil para minería subterránea, que tiene autonomía para realizar eficientemente traslados de hasta 300 metros de material.

8. Cálculos de producción de carguío y transporte

Algunos conceptos de desglose de tiempo importantes para calcular las productividades de los equipos en cada una de las operaciones unitarias son:

- Tiempo nominal: corresponde al tiempo total considerado en el periodo de producción. Por ejemplo, el tiempo nominal en un turno es la duración del mismo (8 o 12 horas).
- Tiempo disponible: corresponde a la fracción del tiempo nominal en que el equipo está disponible para ser operado, es decir, se debe descontar al tiempo nominal todos aquellos tiempos en que el equipo esté sujeto a mantenimiento y reparaciones.

$$T_{\text{disponible}} = T_{\text{nominal}} - T_{\text{mant\&rep}}$$

- Tiempo operativo: corresponde al tiempo en que el equipo está entregado a su operador y en condiciones de realizar la labor programada. Este tiempo se divide en:
 - Tiempo efectivo: corresponde al tiempo en que el equipo está desarrollando sin inconvenientes la labor programada.
 - Tiempo de pérdidas operacionales: corresponde al tiempo en que el equipo, estando operativo, realiza otras labores, tales como traslados, esperas de equipo complementario, etc.
- Tiempo de reserva: corresponde al tiempo en que el equipo, estando en condiciones de realizar la labor productiva, no es utilizado, ya sea porque no hay un operador disponible, o bien, simplemente porque no se ha considerado su operación en los programas de producción para el período actual.

$$T_{\text{disponible}} = T_{\text{operativo}} + T_{\text{reserva}} = T_{\text{efectivo}} + T_{\text{pérdidas}} + T_{\text{reserva}}$$

La clasificación de equipos de carguío se presenta en la Tabla 1.

	Sin acarreo	Acarreo mínimo
Unidad Discreta	<ul style="list-style-type: none"> • Pala eléctrica • Retroexcavadora • Pala hidráulica • Pala neumática 	<ul style="list-style-type: none"> • Cargador frontal • LHD
Flujo Continuo	<ul style="list-style-type: none"> • Excavador de baldes • Dragadora 	

Tabla 1: Principales equipos de carguío y su clasificación.

8.1 Equipos de carguío

Tal como se señaló antes, estos equipos se clasifican según si consideran o no acarreo del material.

8.1.1 Descripción de equipos de carguío sin acarreo

Entre los equipos de este tipo están: palas mineras, retroexcavadoras, excavadoras hidráulicas y pequeñas palas neumáticas.

Palas (eléctricas o de cables)

Se utilizan principalmente en mediana y gran minería a cielo abierto. Tienen un bajo costo por unidad de producción y pueden manejar grandes volúmenes. Cada modelo puede combinarse con varios modelos de camiones, lo que les otorga cierta flexibilidad. Son equipos caros y críticos en la producción que requieren de mantenimiento preventivo para evitar interrupciones en la producción. Tienen poca movilidad para trabajar en varias frentes al mismo tiempo. Para una misma producción, la energía eléctrica que consumen estos equipos resulta más económica que el consumo de combustible de una pala hidráulica. Sin embargo, el costo de inversión requerido es considerablemente mayor en el caso de una pala eléctrica.

Algunos modelos de palas P&H y los pesos máximos que pueden manejar se presentan en la Figura 1

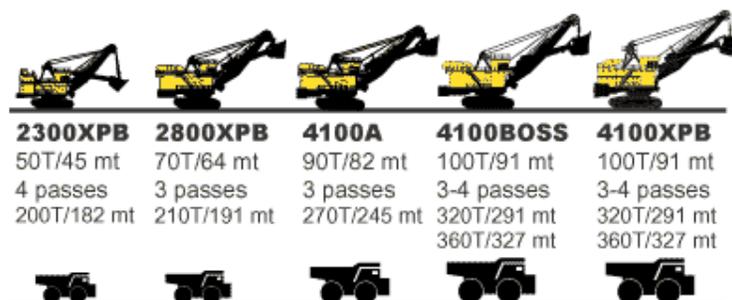


Figura 1: Modelos y capacidades de palas eléctricas. Se incluye además, el número de pases necesarios para cargar ciertos modelos de camiones.

Adicionalmente, se entregan los rangos de capacidades (en volumen) de los baldes disponibles para cada modelo, en la Figura 2.

El diseño de estas palas requiere alta estabilidad y seguridad para el operador, el cual se ubica en frente de la pala, con una amplia visión de la frente de trabajo, pero a una distancia que permite que no exista el riesgo de ser alcanzado por desprendimientos de la frente de trabajo.

MODEL	Nominal payload capacity* (tons / tonnes)	Dipper capacity range (yd3 / m3)
1900	21 / 19.1	10-25 / 7.6-19.1
2100	25 / 22.7	14-28 / 10.7-21.4
2300XPB	50 / 45.4	26-48 / 19.9-36.7
2800XPB	65 / 59.0	33-70 / 25.2-53.5
4100A E-Plus	90 / 82	40-80 / 30.6-61.2
4100A/LR**	65 / 59.0	33-70 / 25.2-53.5
4100BOSS***	100 / 90.7	40-80 / 30.6-61.2
4100XPB	100 / 90.7	47-100 / 35.9-76.5

* To optimize the payload based on haul truck matching and application-specific requirements, contact your nearest P&H MinePro Services representative.
 ** Long Range model
 *** Oil sands model

Figura 2: Capacidades y rango de volúmenes de los baldes disponibles para distintos modelos de palas eléctricas.

La Figura 3 muestra una pala de cable cargando un camión.



Figura 3: Pala de cable cargando camión.

Bucyrus también ofrece palas de cable. Las capacidades de estos equipos pueden verse en la Tabla 2.

Modelo o serie	Capacidad nominal ton (tc)	Capacidades de balde m ³ (yd ³)	Peso en operación kg (lbs)	Largo de brazo m (ft)
795	122.5 (135)	Depende del material a mover		
595	91 (100)	24.5 a 64.3 (32 a 84)		
495 Series	100 (110) hasta 109 (120)	30.6 a 61.2 (40 a 80)		
395 Series		26.7 a 53.5 (35 a 70)	1.040.000 (2.288.000)	19.5 (64)
295 Series		18.48 a 39.27 (24 a 51)	724.100 (1.593.000)	18.0 (59)
195		9.2 a 23.9 (12 a 31)	386.800 (851.000)	14 (46)
182		5.7 a 17.6 (8 a 23)	330.448 (728.500)	12.24 (40 2)

Tabla 2: Modelos, capacidades y largos de brazo de palas de cable Bucyrus.

Retroexcavadoras



Figura 4: Retroexcavadora cargando camión.

Se utilizan principalmente en canteras y en algunos casos en pequeña y mediana minería no metálica. Permiten el manejo de producciones pequeñas.

Pueden estar montadas sobre neumáticos u orugas.

Las capacidades de los baldes alcanzan 4 yd³, con motores de hasta 400 HP.

A continuación (Tabla 3 y Tabla 4) se muestran detalles técnicos de palas Liebherr y Caterpillar.

Technical datas wheel excavators

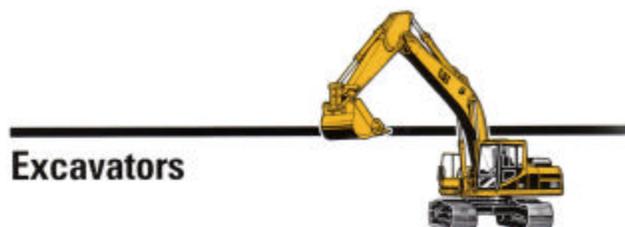
		A 900 B Litronic	A 904 Litronic	A 914 Litronic	A 924 Litronic
Engine output	kW/HP	82/112	99/135	112/152	112/152
Operating weight	t	14.7 - 16.9	16.7 - 19.6	18.6 - 21.7	19.3 - 23.0
	lb	32,400 - 37,000	36,800 - 43,200	41,000 - 48,850	42,500 - 50,700
Backhoe capacity	m ³	0.14 - 0.85	0.15 - 1.05	0.30 - 1.40	0.30 - 1.40
	cuyd	0.18 - 1.10	0.20 - 1.40	0.40 - 1.85	0.40 - 1.85
Clamshell capacity	m ³	0.17 - 1.80	0.17 - 1.80	0.17 - 1.80	0.17 - 2.00
	cuyd	0.22 - 2.35	0.22 - 2.35	0.22 - 2.35	0.22 - 2.60

Technical datas crawler excavators

		R 900 B Litronic	R 904 Litronic	R 914 Litronic	R 924
Engine output	kW/HP	82/112	85/115	99/135	112/152
Operating weight	t	17.6 - 19.4	19.2 - 21.7	21.0 - 24.6	24.8 - 26.0
	lb	38,800 - 42,800	42,350 - 47,850	46,300 - 54,250	54,700 - 57,300
Backhoe capacity	m ³	0.14 - 0.85	0.15 - 1.05	0.30 - 1.40	0.30 - 2.00
	cuyd	0.18 - 1.10	0.20 - 1.40	0.40 - 1.85	0.40 - 2.60
Clamshell capacity	m ³	0.17 - 1.80	0.17 - 1.80	0.17 - 1.80	0.17 - 2.00
	cuyd	0.22 - 2.35	0.22 - 2.35	0.22 - 2.35	0.22 - 2.60

		R 934 Litronic	R 944 Litronic	R 954 B Litronic
Engine output	kW/HP	137/186	164/223	210/286
Operating weight	t	27.6 - 31.4	33.9 - 37.8	45.7 - 51.4
	lb	60,850 - 69,250	74,750 - 83,350	100,750 - 113,300
Backhoe capacity	m ³	0.24 - 2.20	0.60 - 2.60	1.30 - 3.90
	cuyd	0.30 - 2.90	0.80 - 3.40	1.70 - 5.10
Clamshell capacity	m ³	0.45 - 2.00	0.45 - 2.20	0.85 - 2.80
	cuyd	0.60 - 2.60	0.60 - 2.90	1.10 - 3.70

Tabla 3: Capacidades y potencia de palas retroexcavadoras Liebherr.



Model	Flywheel kW/HP	Operating Weight kg/lb	Max Reach/Depth m (ft.-in.)
307	40/54	7 350/16,200	6.4/4.6 (22'1"/15'3")
311	59/79	11 390/25,100	8.1/5.6 (26'7"/18'4")
312	63/84	12 340/27,200	8.6/6.1 (28'4"/19'10")
315	74/99	15 560/34,300	9.1/6.5 (30'0"/21'6")
315L	74/99	15 970/35,200	9.1/6.5 (30'0"/21'6")
320	95/128	19 120/42,150	9.7/6.6 (32'1"/21'9")
320L	95/128	21 300/46,960	9.7/6.6 (32'1"/21'9")
322L	114/153	10 860/23,950	10/6.7 (32'10"/22'0")
325L	125/168	28 120/62,000	10.6/7.2 (34'11"/23'8")
330L	166/222	32 700/75,000	12.4/8.9 (38'1"/26'7")
350L	213/286	50 800/112,000	13.5/9.6 (44'3"/31'6")
375	319/428	81 650/180,000	16/10.9 (52'7"/35'10")
375L	319/428	84 820/187,000	16/10.9 (52'7"/35'10")

Tabla 4: Potencias y alcances de palas retroexcavadoras Caterpillar.

Pala hidráulica



Figura 5: dos palas hidráulicas en operación.

Estas palas presentan una mejor movilidad que las palas de cable, aunque no están diseñadas para cambiar de posición de manera frecuente. Con una menor inversión y un costo operacional levemente más alto que en el caso de las palas eléctricas, las palas hidráulicas poseen un rango de capacidades de balde menores (hasta 30 yd³). La cuchara de la pala puede estar instalada de manera frontal o inversa (como una retroexcavadora). El alcance del brazo de la pala durante su operación se muestra en la Figura 6. Además se especifican algunos otros modelos de palas Demag en la Tabla 5.

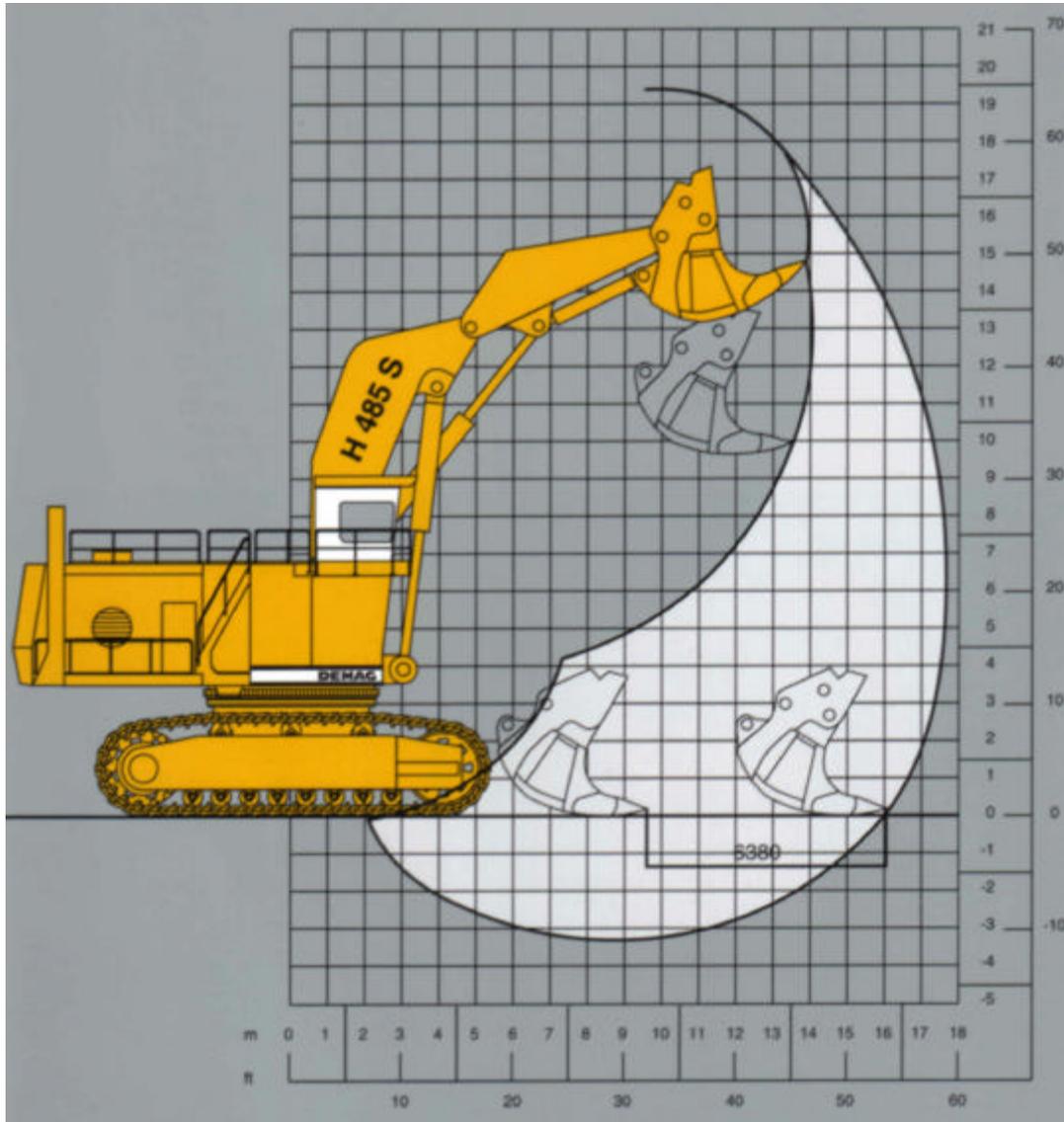


Figura 6: Alcance de brazo en operación de pala hidráulica.

Modelo	Capacidad m ³ /yd ³	Ancho	Peso ton/lbs	Densidad de material ton/m ³ / lbs/yd ³
H 485 S	33 / 44	5.5 m / 18'	50 / 110000	1.8 / 3050
H 285 S	19 / 25	4.5 m / 14' 9"	30 / 66000	1.8 / 3050
H 185 S	14 / 18.5	4.1 m / 13' 5"	19.1 / 42100	1.8 / 3050
H 135 S	10.4 / 13.6	3.6 m / 11' 2"	12.71 / 28025	1.8 / 3050

Tabla 5: Modelos y especificaciones de palas Demag.

Como se mencionaba anteriormente, estos equipos también pueden trabajar como una retroexcavadora (Figura 7). El balde, con un diseño diferente, se monta en el brazo. Se produce un leve cambio en las capacidades de carga.

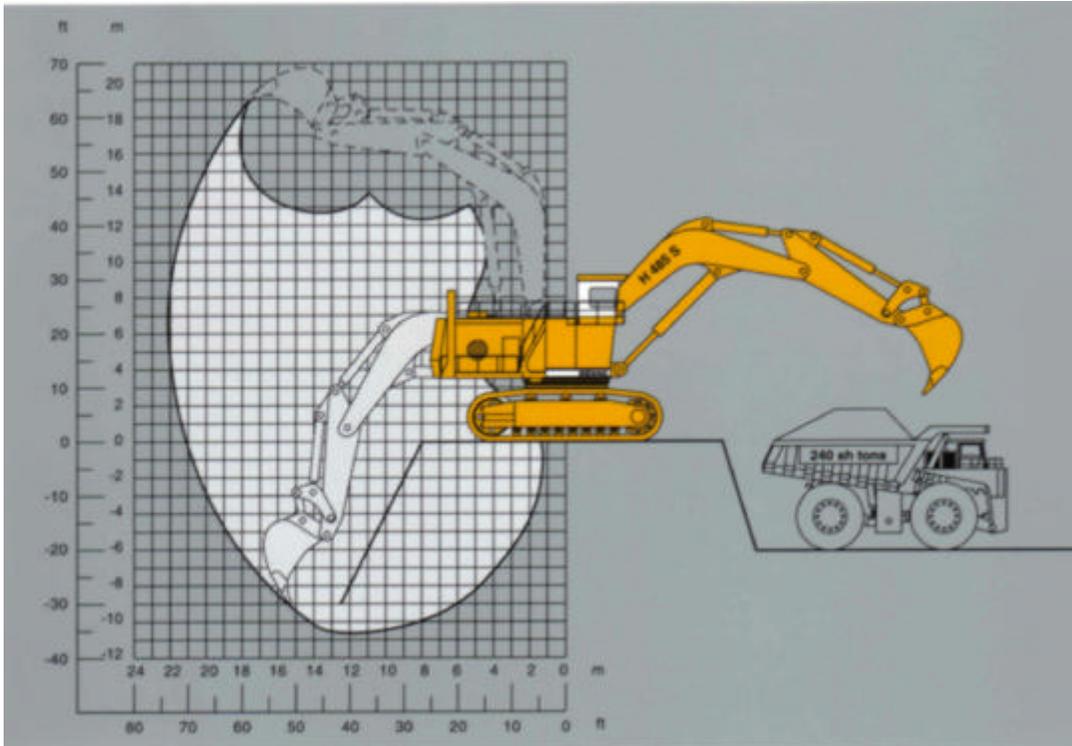


Figura 7: Operación de pala hidráulica como retroexcavadora.

Pala neumática

Las palas autocargadoras son pequeños equipos montados sobre llantas metálicas o neumáticas que permiten el carguío de material en vagones de tren que se ubican inmediatamente tras la pala. La pala recoge el material de la frente de trabajo y lo vuelca hacia atrás del mismo, tras pasarlo por sobre el equipo. Estos equipos suelen ser alimentados por energía neumática y han ido cayendo en la obsolescencia. El sistema de transporte que naturalmente está asociado a este equipo de carguío es el tren.

8.1.2 Cálculo de productividad de equipos de carguío sin acarreo

La productividad de equipos de este tipo se calcula de la siguiente forma:

- (1) Capacidad colmada del balde (m^3)
- (2) Factor de carga (fracción)

(3) Capacidad promedio del balde (m^3)

$$(3) (m^3) = (1) (m^3) \times (2) (\text{fracción})$$

- (4) Factor de eficiencia (fracción)
 (5) Tiempo de ciclo (min)

(6) Productividad nominal (m³/hr)

$$(6) \text{ (m}^3\text{/hr)} = (3) \text{ (m}^3\text{)} \times 60 \text{ (min/hr)} / (5) \text{ (min)}$$

(7) Productividad real (m³/hr)

$$(7) \text{ (m}^3\text{/hr)} = (6) \text{ (m}^3\text{/hr)} \times (4) \text{ (fracción)}$$

Algunos factores de carga (FC) para distintos tipos de material se presentan a continuación:

Material	Rango de factor de carga (en porcentaje de capacidad colmada de balde) %
Tierra húmeda o arcillas arenosas	100 – 100
Arena y grava	95 – 110
Arcilla dura	80 – 90
Roca – buena fragmentación	60 – 75
Roca – mala fragmentación	40 – 50

Tabla 6: Factores de carga según tipo de material.

Estimación del tiempo de ciclo. El tiempo de ciclo de una excavadora tiene cuatro segmentos:

1. Carga de balde
2. Giro cargado
3. Descarga de balde
4. Giro descargado

El tiempo de cada segmento de la operación dependerá de las condiciones de trabajo, localización del camión o equipo de transporte, profundidad de la excavación, existencia de obstáculos, tamaño de la excavadora, etc. Típicamente el tiempo total del ciclo fluctúa entre los 20 y 30 segundos, pudiendo llegar a 10 a 15 segundos en casos de extrema eficiencia y a cerca de 50 segundos en casos muy complicados.

Ejemplo. Seleccione el tamaño de balde para un flota de palas en una operación minera de hierro, dados los siguientes antecedentes acerca de la operación. Se trabaja en toneladas cortas (1 ton = 2000 lb)

(1) Número de equipos:	3
(2) Capacidad diaria requerida por equipo:	32700 ton/día
(3) Tiempo diario estimado de operación:	17.02 hr
(4) Excavabilidad del material:	muy difícil
(5) Tiempo estimado de ciclo:	37 seg
(6) Densidad in situ del material:	6000 lb/yd ³
(7) Factor de esponjamiento:	0.60
(8) Factor de llenado de balde:	0.80

$$\begin{aligned}
 (9) \text{ Ciclos requeridos por día} \\
 &= (3) \text{ (hr)} \times 3600 \text{ (seg/hr)} / (5) \text{ (seg)} \\
 &= 17.02 \times 3600 / 37 \\
 &= 1656 \text{ ciclos/día}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 (10) \text{ Tonelaje por ciclo} \\
 &= (2) \text{ (ton/día)} / (9) \text{ (ciclos/día)} \\
 &= 32700 / 1656 \\
 &= 19.8 \text{ ton} \\
 &= 39600 \text{ lb}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 (11) \text{ Tamaño del balde} \\
 &= (10) \text{ (lb)} / [(6) \text{ (lb/yd}^3\text{)} \times (7) \times (8)] \\
 &= 39600 / [6000 \times 0.6 \times 0.8] \\
 &= 13.8 \text{ yd}^3 \\
 &\sim 14 \text{ yd}^3
 \end{aligned}$$

8.1.3 Descripción de equipos de carguío con acarreo mínimo

Este tipo de equipos incluye cargadores frontales y LHD.



Figura 8: Cargador frontal descargando en camión de gran tonelaje.

Cargador frontal



Figura 9: Cargador frontal descargando en camión de gran tonelaje.

Los cargadores frontales ofrecen una alternativa al uso de palas eléctricas o hidráulicas. Presentan grandes ventajas, tales como su movilidad y la posibilidad de manejar grandes volúmenes de material (los más grandes superan las 40 yd³). Estos equipos deben maniobrar para descargar en el camión y para acceder a la frente de trabajo, a diferencia de las palas con base fija, que rotan en torno a la misma. Los cargadores permiten mayor flexibilidad en la producción pues pueden desplazarse con relativa facilidad y rapidez de una frente de trabajo a otra. Óptimamente, sin embargo, el acarreo debe ser mínimo. Se utilizan en mediana y gran minería, tanto para minerales industriales como metálicos.

Wheel Loaders			
Model	Flywheel HP	Operating Weight lb	Bucket Range yd ³
910F	80	15,452	1.3-1.7
924F	105	20,081	1.8-2.25
928F	120	24,574	2.4-2.8
930T	105	21,336	2.25
938F	140	28,731	2.75-3.25
950F Series II	170	36,521	3.25-4.0
960F	200	38,936	4.0-4.5
966F Series II	220	46,096	4.25-5.0
970F	250	51,268	5.0-6.0
980F Series II	275	61,046	5.0-7.0
988F	400	97,727	7.8-9.0
990	610	161,994	11.0-11.2
992D	690	196,557	12.5-14.0
994	1,250	390,300	13.0-40.0

Tabla 7: Modelos y especificaciones de cargadores frontales Caterpillar.

Modelo	Capacidad de Balde m ³	Peso de Operación kg	Potencia Motor kW (HP)
Liebherr L544	2.8	15000	121 (165)
Liebherr L554	3.3	17220	137 (186)
Liebherr L564	4.0	22480	183 (249)
Liebherr L574	4.5	24220	195 (265)

Tabla 8: Modelos y especificaciones de cargadores frontales Liebherr.

LHD

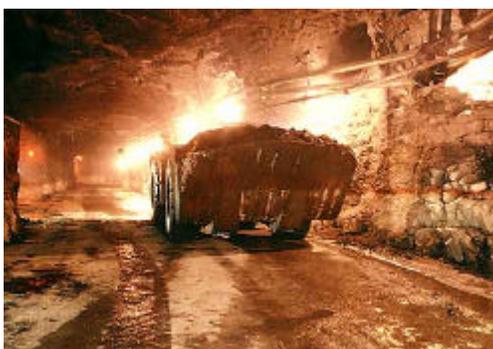


Figura 10: LHD transportando mineral en mina subterránea

Los LHD (load-haul-dump) corresponden a palas de bajo perfil que pueden clasificarse tanto como equipos de carguío con acarreo mínimo o como equipo combinado de carguío y transporte. Estos equipos poseen una alta eficiencia para distancias de acarreo de no más de 300 m. Tienen la particularidad de poseer un balde (o cuchara, de ahí que también se denominen *scoops*) de gran tamaño, el cual puede ser elevado para cargar un equipo de transporte, tal como un camión de bajo perfil o un camión

convencional. Poseen una gran versatilidad y por ende son equipos de alta productividad a un bajo costo operacional. El balde puede tener desde 1.0 a 13.0 yd³.

Modelo	Motor	Capacidad kg/lbs	Ancho del Balde mm/pulg
Wagner HST-05	Diesel	700 / 1500	1016 / 40
Wagner HST-1A	Diesel	1360 / 3000	1219 / 48
Wagner ST-1.5	Diesel	2040 / 4500	1270 / 50
Wagner ST-2	Diesel	3000 / 6600	1473 / 58
Wagner ST-2D	Diesel	3630 / 8000	1651 / 65
Wagner ST-3.5	Diesel	6000 / 13200	1956 / 77
Wagner ST-6C	Diesel	9530 / 21000	2438 / 96
Wagner ST-7.5Z	Diesel	12250 / 27000	2566 / 101
Wagner ST-8B	Diesel	13640 / 30000	2794 / 110
Wagner ST-15Z	Diesel	20410 / 45000	---
Wagner EHST-05	Eléctrico	700 / 1500	1016 / 40
Wagner EST-1A	Eléctrico	1360 / 3000	1219 / 48
Wagner ST-2D	Eléctrico	3630 / 8000	1651 / 65
Wagner ST-3.5	Eléctrico	6000 / 13200	1956 / 77
Wagner ST-6C	Eléctrico	9530 / 21000	2438 / 96
Wagner ST-8B	Eléctrico	13640 / 30000	2794 / 110

Tabla 9: Modelos y especificaciones de LHD Wagner.

La Figura 11 muestra algunos modelos de cargadores LHD, lo que se complementan con la información en la Tabla 9.

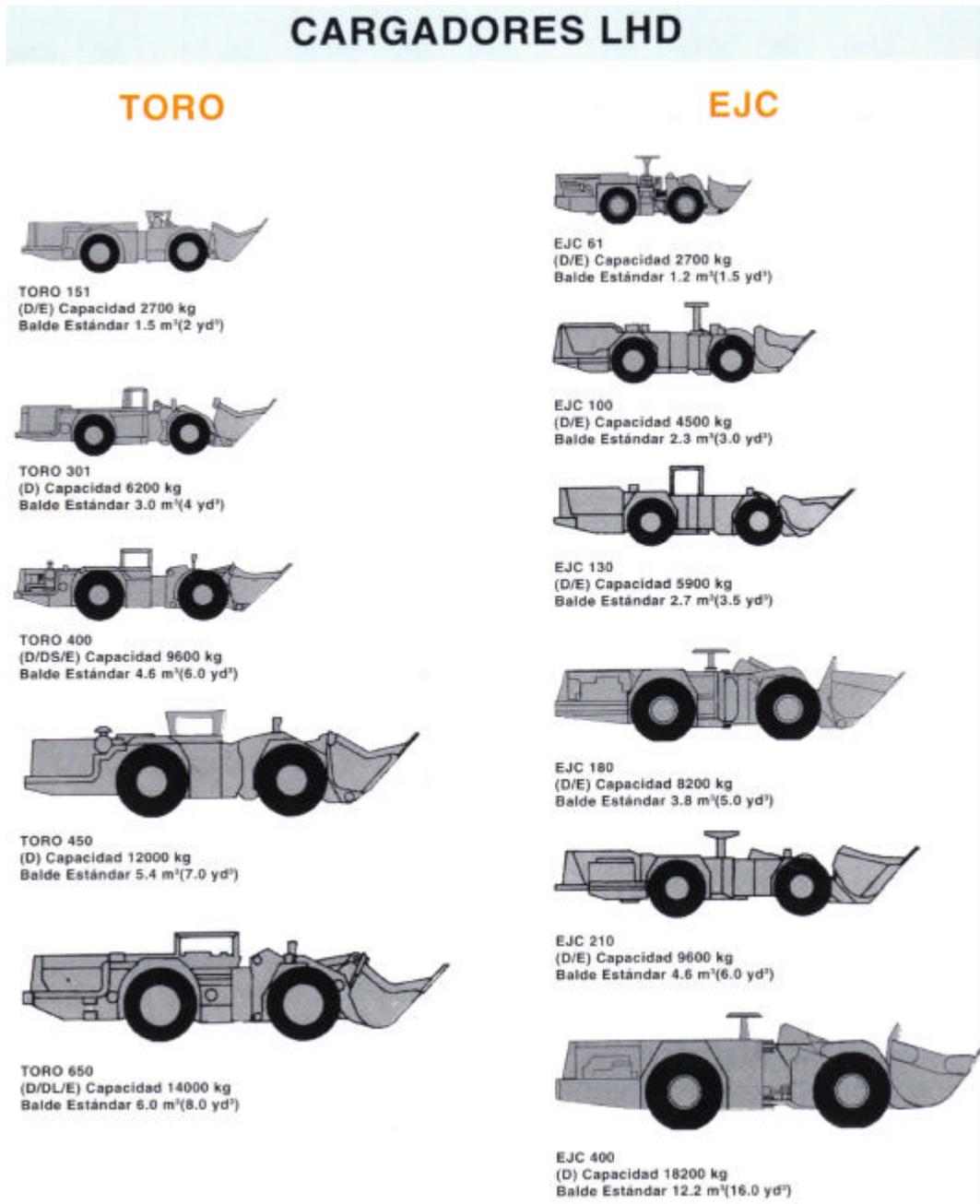


Figura 11: Modelos y especificaciones de LHD Toro y EJC.

8.1.4 Cálculo de productividad de equipos de carguío con acarreo mínimo

La principal diferencia en el cálculo de productividades con el caso de equipos sin acarreo, radica en que el tiempo de ciclo incluye el tiempo de transporte y regreso necesarios.

Para estimar los tiempos de transporte, se puede considerar que para recorrer 60 metros a 12 km/hr el tiempo es de 30 segundos, mientras que si la velocidad se reduce a 6 km/hr, el tiempo aumenta a 60 segundos.

El ciclo puede típicamente dividirse en:

	Tiempo de ciclo (min)
Carga	0.06
Transporte	0.15
Descarga	0.05
Regreso	0.14
Total	0.40

Tabla 10: Tiempos mínimos para cálculo de ciclo de carguío con acarreo mínimo.

Estos tiempos deben considerarse como los mínimos. El tiempo de transporte y regreso considerado en esta tabla incluye sólo el tiempo de maniobra, por lo que debe calcularse y adicionarse el tiempo de acarreo propiamente tal. Éste dependerá de la carga del equipo (generalmente será más alto cuando el equipo vaya cargado), de la pendiente, calidad del camino, trayectoria, etc.

8.1.5 Descripción de equipos de carguío de flujo continuo

Excavador de baldes



Figura 12: Excavador de baldes.

Estos equipos se utilizan principalmente en minería de material blando o remoción de sobrecarga no consolidada. El principal tipo de equipos es el *bucket wheel excavator* (excavador con rueda de baldes) que consiste básicamente en una serie de baldes dispuestos en la periferia de una rueda que gira removiendo de manera continua el material. En Chile no se utilizan,

puesto que la minería metálica trabaja principalmente en roca. Su utilización puede verse en minería del carbón, de arenas bituminosas o en la construcción y remoción de pilas de lixiviación.

Dragadoras



Las dragadoras permiten remover la sobrecarga en minas de carbón y luego ir extrayendo los mantos de carbón de manera selectiva (pueden trabajar en capas de espesor mínimo igual a 3 metros con baja dilución).

En Chile no se utilizan por razones similares al caso de los excavadores de balde.

Figura 13: Dragadora en operación.

8.1.6 Cálculo de productividad de equipos de carguío de flujo continuo

Los principales factores en el dimensionamiento de estos equipos son:

- (1) Capacidad nominal del balde (m^3)
- (2) Número de baldes en la rueda
- (3) Velocidad de corte de la rueda (m/seg)
- (4) Diámetro de la rueda (m)

(5) Número de descargas de baldes por segundo

$$(5) \text{ (baldes/seg)} = (3) \text{ (m/seg)} \times (2) / [\pi \times (4) \text{ (m)}]$$

(6) Capacidad teórica del excavador (m^3/hr)

$$(6) \text{ (m}^3\text{/hr)} = (1) \text{ (m}^3\text{)} \times (5) \text{ (baldes/seg)} \times 3600 \text{ (seg/hr)}$$

El número de baldes descargados depende de la velocidad periférica de la rueda, la que a su vez está limitada por la capacidad de descargar los baldes, la que actúa contra la fuerza centrífuga (si la rueda gira demasiado rápido, la carga de los baldes no caerá por la fuerza centrífuga).

Se puede determinar una velocidad máxima de rotación teórica que permita la descarga, aunque en la práctica, las velocidades fluctúan entre 0.4 y 0.6 veces dicha velocidad teórica, dada por la raíz cuadrada del producto entre la aceleración de gravedad ($g = 9.8 \text{ m/s}^2$) y el radio de la rueda. Además, para mantener el desgaste de los cuchillos o dientes de los baldes a un mínimo, no se exceden velocidades periféricas de 5 m/seg.

La capacidad por hora de estas excavadoras depende del factor de llenado de los baldes y la resistencia al corte del suelo (se determina la productividad nominal en base a tablas que asocian productividades a resistencia al corte de distintos tipos de suelos). La capacidad real horaria de estas excavadoras se puede calcular considerando todos estos factores.

(7) Factor de llenado de baldes (fracción)

(8) Productividad real (m^3/hr)

$$(8) (\text{m}^3/\text{hr}) = (1) (\text{m}^3) \times (7) \times (5) (\text{baldes}/\text{seg}) \times 3600 (\text{seg}/\text{hr})$$

En suelos con alta resistencia al corte se requieren altas velocidades de la rueda, las que van acompañadas de una capacidad de llenado baja de los baldes, dando una productividad real muy por debajo de la capacidad teórica de la excavadora (la relación puede llegar a ser 0.2).