**III CONVENCIÓN CIENTÍFICA DE LA UCLV**

**Santa Clara, noviembre del 2021**

**TALLER INTERNACIONAL DE CONSTRUCCIONES**

**PONENCIA**

**TÍTULO: Determinación analítica de la productividad de los Buldóceres al excavar y**

**acarrear en obras viales.**

**TITLE**: **Analytical determination of the productivity of Bulldozers when excavating**

**and hauling in road works**

**AUTORES:**

**Pedro Andrés Orta Amaro**. Doctor en Ciencias Técnicas., Ingeniero Civil, Profesor Consultante, Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Construcciones, Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas (UCLV).

**Yosvany Díaz Cárdenas**. Doctor en Ciencias Técnicas., Ingeniero Civil, Profesor Auxiliar, Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Construcciones, Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas (UCLV).

**RESUMEN:**

En el mundo y en Cuba usualmente se determina la productividad de los buldóceres, empleando manuales, que no consideran todos los factores incidentes y, por consiguiente, se originan errores en su determinación y en el cálculo de los costos realmente incurridos, todo lo cual incide en la ineficacia económica productiva de estas importantes y tan empleadas máquinas excavadoras. Esta ponencia tiene como objetivo esencial, proponer un procedimiento analítico para calcular la productividad real de estos equipos, considerando todos los factores incidentes al acometer diferentes trabajos de excavación, brindando además recomendaciones para reducir los costos unitarios reales y un mejor aprovechamiento de su capacidad potencial. El procedimiento considera las buenas prácticas nacionales e internacionales, los avances y resultados de investigaciones aplicadas a las tecnologías de movimiento de tierra y en particular a estas máquinas, con un enfoque integrador de diferentes materias y disciplinas, que asegura la veracidad, fundamentación científica y exactitud de este importante indicador de eficacia, evitando distorsiones en las magnitudes de la productividad alcanzada, errores en la programación de los trabajos ejecutados con estas máquinas excavadoras, pagos indebidos a los operadores, errores en la determinación de los costos unitarios directos reales, lo que afecta la eficacia económica de las empresas constructoras de obras de ingeniería como las viales, así como en la minería superficial, en la agricultura y otras ramas de la producción, asunto de vital importancia para lograr una mayor eficacia en los labores de movimiento de tierras necesarias, para la construcción de las obras civiles cubanas

**Palabras Claves:** Excavaciones; Buldóceres; Productividad; Costos; Eficacia

**Abstract:**

In the world and in Cuba, the productivity of bulldozers is usually determined, using manuals, which do not consider all the incident factors and, consequently, errors are originated in their determination and in the calculation of the costs actually incurred, all of which affects in the productive economic inefficiency of these important and widely used excavating machines. The main objective of this presentation is to propose an analytical procedure to calculate the real productivity of this equipment, considering all the incident factors when undertaking different excavation works, also providing recommendations to reduce the real unit costs and a better use of their potential capacity. The procedure considers good national and international practices, the advances and results of research applied to earth-moving technologies and in particular to these machines, with an integrating approach to different subjects and disciplines, which ensures truthfulness, scientific foundation and accuracy. of this important indicator of effectiveness, avoiding distortions in the magnitudes of the productivity achieved, errors in the programming of the works carried out with these excavating machines, undue payments to the operators, errors in the determination of the real direct unit costs, which affects the economic efficiency of the construction companies of engineering works such as roads, as well as in surface mining, in agriculture and other branches of production, a matter of vital importance to achieve greater efficiency in the necessary earthworks, for the construction of cuban civil works

**Key Words:** Excavations; Bulldozers; Productivity; Costs; Effectiveness

**INTRODUCCIÓN:**

Los trabajos de movimiento de tierra son muy usuales en las construcciones civiles (explanaciones de caminos, carreteras, autopistas; sistema de canales; cortinas de presas de tierra, explanadas o plataformas para diversos fines y otras obras de tierra similares), moviéndose anualmente millones de metros cúbicos con alto grado de mecanización. Se ha determinado que el costo de estos trabajos depende en gran medida, del empleo racional de las máquinas disponibles, pues el costo del empleo de los equipos en las obras viales puede alcanzar el 40 % y en la construcción de presas de tierra oscilar entre el 45 y el 75 % (Yepes, 2014). Una deficiente explotación de las maquinarias de movimiento de tierras encarece estos trabajos, disminuye la vida útil de las maquinarias disponibles y puede originar incluso accidentes con desenlaces fatales. Una de las labores más usuales que se ejecutan estas máquinas excavadoras de gran potencia y dimensiones son las excavaciones, las que usualmente se realizan con buldóceres que ejecutan un ciclo de trabajo excavando y acarreando en línea recta. Los buldóceres poseen altos precios en el mercado internacional y un período de vida útil económica que oscila generalmente entre 5 y 7 años, en dependencia de las condiciones de trabajo (Ballester y Capote, 1998), por tales razones se hace necesario que estas topadoras frontales alcancen altas productividades en los primeros años de explotación y mínimos costos unitarios directos al realizar las excavaciones y otras labores, para así con mayor eficiencia recuperar lo antes posible la inversión efectuada en los mismos. Ahora bien, ¿cómo determinar de manera confiable la productividad de estos equipos, considerando los múltiples factores incidentes? Usualmente se emplean manuales para su determinación, el más famoso el Manual de la Caterpillar; en Cuba el Manual de Rendimiento de las Maquinarias de Construcción del MICONS, pero esa práctica atenta contra la exactitud del cálculo de este importante indicador de eficacia, origina imprecisiones en el cálculo de los costos unitarios directos reales de las actividades ejecutadas con estas máquinas excavadoras, en la estimación correcta de la duración de los trabajos, en el posible sobre pago a los operadores por la labor realizada, todo lo cual afecta la eficacia económica de las empresas constructoras que disponen y explotan estos equipos. Desde finales del pasado siglo, diversos autores han abordado este asunto planteando diferentes expresiones para determinar el rendimiento: (Nichols, 1968); (Abrosimov et al, 1973); (Perifoy, 1979); (Gabay y Zemp, 1979); (Day, 1985); (Fernández y Denchev, 1986); (Titkin, 1997); (Ballester y Capote, 1998), autores de Cuba, Rusia, EUA, Francia, España, pero solamente en el libro “Maquinaria de Obra” del Ing. Francisco Fernández y del Dr. Mijail Denchev, publicado en el año 1986 en Cuba, se ha planteado una serie de expresiones para determinar la productividad o capacidad de producción de estas máquinas y también para calcular las fuerzas resistentes que surgen durante el proceso de excavación y acarreo, las que evidentemente inciden en este indicador, pero que necesitan de precisiones para obtener satisfactorios resultados. Más recientemente otros autores han tratado y desarrollado este tema: (Cherné, 2010); (Zapata, 2013); (Yepes, 2014); (Fernández, 2015); (Orta, 2017); únicamente el Dr. Pedro A. Orta, en su libro: “Maquinarias de Movimiento de Tierras” ha desarrollado la determinación analítica de la productividad de estos equipos y una serie de expresiones que permiten determinar las fuerzas resistentes que surgen durante la excavación y el acarreo del suelo por los buldóceres, con aceptable precisión, pero aún requieren de perfeccionamiento y actualización.

Ante tal situación, se propone un procedimiento analítico integral y perfeccionado para calcular la productividad de los buldóceres, considerando los múltiples factores incidentes, que permite obtener magnitudes confiables de este indicador, el cual incluye la determinación de las resistencias que hay que vencer durante la excavación y el acarreo o transporte del suelo, planteando además de brindar una serie de recomendaciones para elevar la eficacia de la gestión de explotación de estas importantes máquinas excavadoras.

**DESARROLLO:**

La productividad de los buldóceres depende de múltiples factores inherentes a las características y parámetros de estas máquinas, de los operadores que las explotan, de las propiedades del terreno donde laboran, de las condiciones en las que se desarrolla el trabajo, siendo necesario hacer un enfoque integral, que hace necesario el empleo de conocimientos de Mecánica de Suelos, de Física (Dinámica) aplicada a estos equipos, de la tecnología de movimiento de tierras y de aspectos mecánicos de estas máquinas, para considerar todos los factores que inciden en la determinación de la productividad o rendimiento real de estas máquinas, en especial de las fuerzas que se oponen y surgen en las fases de excavación y acarreo, tratando de obtener su máximo valor con aceptable y necesaria precisión.

La productividad de los buldóceres depende de múltiples variables:

1. Las relacionadas con los parámetros del equipo:
2. El estado técnico de la máquina
3. La potencia disponible en su motor y el estado de su sistema de transmisión.
4. Las dimensiones y forma de la hoja disponible
5. De la existencia de otros órganos de trabajo y su sistema de mando.
6. Del sistema de rodaje (sobre esteras u orugas; sobre neumáticos o ruedas de goma con dibujos pronunciados y con esteras de goma)
7. Características físico mecánicas del suelo donde se trabaja:
8. Densidad del suelo
9. Dureza al ser excavado.
10. Resistencia a cortante
11. Humedad natural
12. Características del operador y condiciones de trabajo:
13. Experiencia y destreza del operador del buldócer, su calificación.
14. Régimen de trabajo (favorable, medio o normal y severo)
15. Condiciones climáticas imperantes (favorables o complejas: lluvia, polvaredas, bajas temperaturas)
16. Altitud y temperatura ambiental existente en la zona de trabajo.
17. Características de la labor a ejecutar:
18. Dimensiones y forma del objeto a excavar
19. Ciclo de trabajo a desarrollar
20. Pendientes a vencer
21. Distancia de recorrido
22. Grado de peligrosidad.

El procedimiento analítico que se propone, considera todas las variables anteriormente relacionadas, para asegurar el mayor ajuste posible a la realidad y de esa manera obtener una magnitud confiable de la productividad de estas máquinas excavadoras.

Antes de su proposición, para uniformar criterios y por su importancia, se propone adoptar la clasificación de los suelos atendiendo a su dureza al ser excavados, tomando una tabla de la Norma Cubana (NC 052 – 027: 1978. Uso y Operación del Topador Frontal Sobre Esteras), la que se presenta con algunas adecuaciones en la Tabla 1 siguiente:

|  |  |
| --- | --- |
| **TABLA 1: CLASIFICACIÓN DE LOS SUELOS ACORDE CON SU DUREZA** | |
| **CLASIFICACIÓN I**  Suelos sueltos y blandos | Gravas, arenas, limos, arcillas, suelos orgánicos (capa vegetal), no necesitan disgregación previa para ser excavados. |
| **CLASIFICACIÓN II**  Suelos compactos a rocas blandas | Rocas blandas calizo arcillosas, margas, arcillas duras y esquistosas, masas de rocas altamente estratificadas y fragmentadas. Usualmente necesitan una disgregación o ruteo previo mediante escarificadores. |
| **CLASIFICACIÓN III**  Suelos rocosos de dureza media | Rocas calizas de mediana dureza, conglomerados de rocas medianamente estratificadas y alteradas por el intemperismo, minerales blandos. Obligatoriamente requieren de ablandamiento previo mediante escarificación o ruteo, con buldóceres de potencia superior a los 140 HP. |
| **CLASIFICACIÓN IV**  Rocas duras | Rocas calizas duras, cuarcitas, rocas ígneas y metamórficas duras. Requieren de ablandamiento previo mediante voladuras de trituración y el empleo de equipos excavadores de mediana a gran potencia (superiores a los 300 HP) |
| **CLASIFICACIÓN V**  Rocas muy duras | Rocas ígneas, metamórficas duras, calizas muy duras, minerales densos y silíceos. Requieren de ablandamiento previo mediante voladuras de trituración y el uso de equipos excavadores de grandes potencias (superiores a los 400 HP) |

De manera general, los buldóceres alcanzarán la máxima productividad a distancias cortas, en suelos blandos y uniformes (Clasificación I), trabajando a favor de la pendiente (bajando), cuando son nuevos y se encuentran en excelente estado técnico, cuando poseen un operador experto debidamente calificado y se labora en condiciones de trabajo favorables. Por supuesto, las anteriores condiciones no siempre se encuentran o coinciden en la práctica, por lo que para poder considerarlas se propone cumplimentar el siguiente procedimiento:

**Procedimiento analítico para determinar la productividad de los Buldóceres:**

Hay que cumplimentar los siguientes pasos:

1, Determinar la **Potencia Motriz** del equipo (**Pm**) para la velocidad directa (Pmd) y las restantes (Pmi) a partir de la Potencia Nominal **(Pn**) del motor, mediante la expresión:

**Pm = Pn (Nu x Nt x TA),** en HP

2. Calcular las **Fuerzas Motrices (Fmi)** para cada una de las velocidades hacia delante y hacia atrás, por la expresión: **Fmi = 270 Pm/Vi,** en kgf

3. Determinar la **Fuerza de Adherencia** del buldócer **(Fadh),** mediante:

**Fadh = Pmo . f adh, en kgf,** para buldóceres sobre esteras u orugas: Pmo = P del equipo (**t**) y el Fadh, se estima acorde al tipo de sistema de rodaje y el tipo de material donde se trabaja.

4. Calcular las **resistencias a vencer,** para los buldóceres es la suma de la resistencia a la rodadura más la de la pendiente: **RTO = Rr +/- Rp = KP +/- 10 . p . P,** en kgf., pues se desprecian la resistencia a la inercia y del viento al desplazarse a bajas velocidades

5. **Determinar las resistencias que surgen en la fase de excavación y acarreo (Σ Rad),** como la suma de las siguientes resistencias: la resistencia al corte o excavación (**Rc**), la resistencia al acarreo o transporte de la tierra excavada (**Rt**), la resistencia que se origina por la fricción de la hoja con el suelo que se excava (**Rf**) y la resistencia que ofrece la tierra que se excava y roza el área frontal de la hoja al rotar hacia delante (**Rfs**) para acumularse delante de la hoja, es decir: **Σ Rad = Rc + Rt + Rf + Rfs** (kgf), las que se explican más adelante.

6. **Elección de las velocidades de trabajo** a partir del análisis del cumplimiento de las dos condiciones básicas del movimiento (Fm **>** Rto y Fm ≤ Fadh) y una tercera adicional, que: **Fg > Σ Rad,** mediante lo cualse eligen las velocidades de trabajo.

7. Cálculo de la **Productividad Nominal** del buldócer, empleando la siguiente expresión:

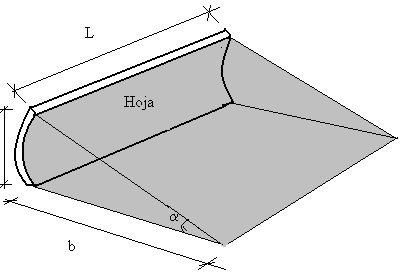
**PNBE = Ca (60/tc) β** expresado en**:** : m³ esponjados/hora

8. **Cálculo de la Productividad o Rendimiento Real del equipo**, multiplicando la nominal antes calculada por un coeficiente de utilización, que se denominará Kup, mediante la multiplicación de los siguientes factores: **Kup = Kh . Ko . Kad . Fev**, usualmente este coeficiente oscila entre 0,40 y 0,60 (40 – 60 %) para estas máquinas de movimiento de tierra.

**Determinacion de términos fundamentales:**

a) **Capacidad de arrastre (Ca):**

Es el volumen máximo de material acumulado delante de la hoja del buldócer, inicialmente puede considerarse como un prisma triangular, de altura igual a la de la hoja del equipo (**h**) y la base (**b**) en función del ángulo de reposo **α** del suelo:



**Ca**

**Figura 1: Capacidad o volumen acumulado delante de la hoja del buldócer**

Donde:

Ca: volumen máximo que se acumula delante de la hoja o capacidad de arrastre del buldócer, en m3 esponjados o sueltos.

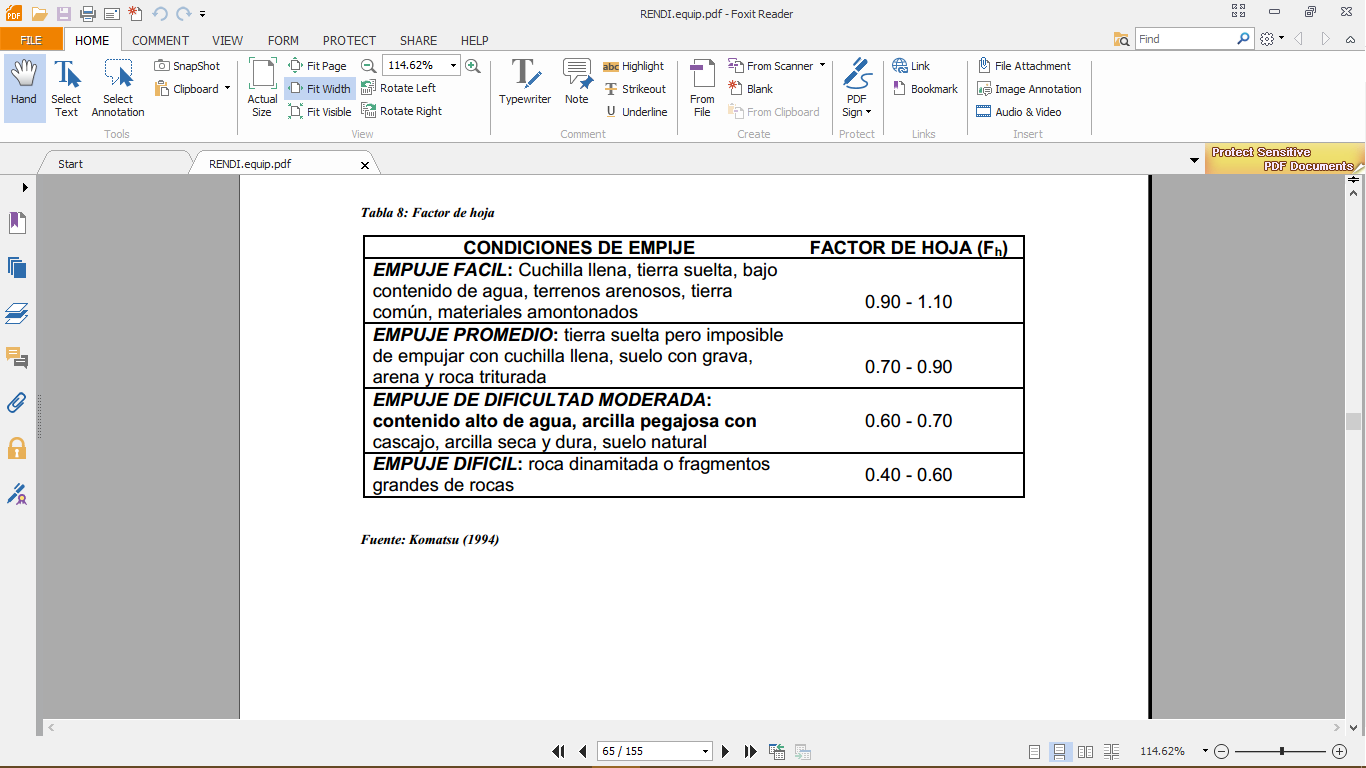
L: longitud de la hoja, en metros.

H: altura de la hoja, en metros

α: ángulo de reposo del suelo, preferentemente debe determinarse en un laboratorio y en caso de no contar con esa posibilidad, mediante la tabla 3 (Orta, 2017)

Ahora bien, en la realidad la uniformidad de la sección supuesta no es realmente cierta, usualmente existen volúmenes adicionales en los laterales y en la parte superior (colmo) o lo contrario, por lo que debe multiplicarse por un factor de corrección “μ” (Blade Factor) que depende del tipo de suelo de que se trate, para tener una idea inicial puede considerarse:

El coeficiente “**μ**” (Blade Factor) puede alcanzar hasta 1,10 en suelos cohesivo granulares uniformes, a cortas distancias y se estimará de acuerdo con la siguiente Tabla 2:



La “Capacidad de Arrastre” del Buldócer puede determinarse según la expresión:

 (si la hoja está perpendicular a su eje longitudinal)

Donde:

Ca = Capacidad de arrastre (en m³ esponjados).

h = altura de la hoja del BE (en m).

L = longitud de la hoja del BE (en m.)

α = ángulo natural o de reposo del suelo (grados)

μ = coeficiente de corrección (“blade factor”), se determina por la Tabla 2.

Ahora bien, si la hoja del equipo no se coloca perpendicular a su eje longitudinal, es decir, trabaja como “Angledozer” con la hoja formando determinado ángulo θ respecto al eje transversal; la longitud real de ataque será: (L• cos θ), luego la expresión de Ca finalmente será:

** ,** en m3 esponjados.

Generalmente: θ varía entre: 24º y 25º, por tanto, el cos θ será siempre menor que 1, pues: cos 25º = 0,906, disminuyendo el volumen de suelo acumulado delante de la hoja (Ca)|

Esto significa que el volumen de arrastre “Ca” se reduce al trabajar con la hoja en ángulo, por lo que para excavar obteniendo altos rendimientos, la misma debe colocarse transversalmente o perpendicular (a 90º) con el eje longitudinal de la máquina, a no ser que la actividad lo requiera como al realizar una excavación “a media ladera”.

1. **Ciclos de trabajo:**

Este es uno de los factores esenciales del cual depende el rendimiento de una máquina; no es más que: “el tiempo que demora el equipo en efectuar las operaciones necesarias para completar un ciclo en una labor determinada, en un determinado tiempo”. De dicha definición se desprende, que el equipo para cada labor distinta realizará un ciclo diferente. Los ciclos más comunes son los siguientes y contemplan las posteriores fases u operaciones y tiempos de duración (Gabay y Zemp, 1979)

**Ciclo A**: Excavación, acarreo o transporte y vertido de línea recta. Más usual empleado

**Ciclo B:** Excavación, transporte y vertido “a media ladera”, a distancias cortas.

**Ciclo C:** Desplazamiento de taludes o rellenos de zanjas, efectuado a distancias muy cortas.

La duración aproximada de cada ciclo se determina como se explica seguidamente:

**CICLO A:** Excavación, acarreo y vertido en línea recta (ciclo variable)

**Duración de las operaciones (en minutos**).

Excavación y Acarreo. Variable (Lida / Vida).

Inversión de la Marcha. (0,05÷0.12 min)

Regreso (marcha atrás). Variable (Lreg / Vreg).

Inversión de la Marcha. (0.05÷0.12 min)

Duración Total = Variable.

Luego el tiempo de duración de este ciclo de trabajo variable se calcula como:

**tciclo = t ida + t regreso + t inv.marcha,** en minutos

En este caso se desprecian los tiempos de cambio de una a otra velocidad, pues en los modelos actuales las magnitudes son muy pequeñas.

Se usará la expresión siguiente para determinar el tiempo de ciclo en “excavación y acarreo en línea recta”, siempre que la: L esté en Km y la V en Km/h (las velocidades serán las que cumplan con las dos condiciones básicas de movimiento: Fm > Rto y Fm ≤ Fadh y también la tercera condición adicional: que la Fuerza en el Gancho de Tracción sea mayor que la suma de las resistencias adicionales (Fg > Σ Rad) que surgen en la fase de excavación y acarreo, lo cual se especifica más adelante. Luego la duración de este ciclo de trabajo A se determinará mediante la expresión siguiente:

 , en minutos.

Se empleará la expresión anterior en el Ciclo A: “excavación y acarreo en línea recta” el más utilizado para ejecutar la mayoría de las actividades, siempre que: L se exprese en Km y la V en Km/h. Las velocidades serán las mayores de aquellas que cumplan con las dos condiciones básicas de movimiento y la tercera adicional.

El tiempo total de inversión de la marcha (**t inv. marcha)** en los extremos del ciclo oscila entre: 0,10 y 0,24 minutos, los menores tiempos en equipos modernos provistos de servo transmisión, los mayores del intervalo para los de mando directo de 2 etapas. En los buldóceres antiguos de mando mecánico este tiempo ascendía hasta 0,34 minutos.

Este ciclo lo emplea el Buldócer al ejecutar excavaciones en préstamos (donde usualmente escarifica, excava, acarrea y apila el material excavado y regresa marcha atrás sin trabajar para iniciar un nuevo ciclo), al excavar canales, al realizar compensaciones longitudinales y transversales en las explanaciones de obras viales, al descortezar o eliminar la capa vegetal en la base de las explanaciones, por tales razones es el más comúnmente utilizado.

**CICLO B:** Excavación, transporte y vertido a media ladera del material excavado, a distancias cortas.

Se ha determinado que este ciclo generalmente posee una duración entre **0.85 y 0.90** minutos.

**CICLO C:** relleno de zanjas, a distancias muy cortas.

Se ha calculado que el ciclo completo varía aproximadamente entre **0.65 y 0.75** minutos.

**NOTA:** los valores de los tiempos de ciclo B y C son propuestos por (Gabay y Zemp, 1979)

Es importante tener presente que las velocidades de trabajo (de excavación y acarreo) a emplear en la determinación del tiempo de ciclo, deben ser las mayores entre aquellas que cumplan con las dos condiciones básicas para el movimiento (Fm > Rto y Fm ≤ Fadh), así como una tercera condición adicional (Fg > Σ Rad)

Al efectuar el Buldócer el retorno marcha atrás, la velocidad de regreso debe ser la máxima posible dado las condiciones imperantes, aquella que cumpla con las 2 condiciones básicas del movimiento, pues se ha comprobado que se acorta la duración del ciclo de trabajo hasta en un 20 % (Orta, 2017)

Como estas máquinas excavadoras realizan sus labores cumpliendo ciclos de trabajo, su productividad nominal se determinará según:

**PN BE = Ca (# ciclos/hora**), en m3/h (esponjados)

Como la duración de los tiempos de ciclo se expresan en minutos, la expresión inicial será:

  , en m3/h

Donde:

PNBE = Productividad Nominal de un Buldócer, m3/h

Ca = Capacidad de Arrastre:  en m3 esponjados.

tc = tiempo que demora el ciclo de trabajo (minutos)

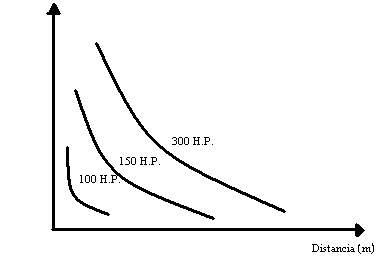
En los cálculos anteriores también hay que tener presente que el volumen del material arrastrado (Ca) disminuye un 5 % cada 30 metros recorridos transportando o acarreando el material pues debido a las no uniformidades del terreno se escapa por debajo de la cuchilla, por los laterales de la misma, incluso por encima de la hoja del buldócer, volumen que se incrementa cuando se baja o desciende y disminuye cuando se asciende o sube una rampa. Se ha determinado que volumen crece o aumenta entre un 4 y 8 % por cada por ciento de pendiente cuando se baja o desciende y por el contrario disminuye o se reduce entre 2 y un 4 % por cada por ciento que posea la rampa de ascenso. Todas estas afectaciones se agrupan en un factor denominado: **β,** el cual se determina mediante la expresión general:

**β = 100% - (+ 5 % cada 30 m + (2 ÷ 4%) por cada % de la rampa – (4÷8%) por cada % bajando).** Finalmente hay que expresar β en “decimales”. Este factor alcanza valores superiores a la unidad trabajando a cortas distancias pendiente abajo (bajando).

Luego la expresión general para determinar la productividad nominal del Buldócer es:

 **,** m3/h **Expresión General**

La variación de la Productividad Nominal de un Buldócer en relación con la Potencia Nominal de su motor y la distancia de excavación más la de acarreo, se aprecia en la siguiente figura 2: “mientras mayor potencia del motor mayor rendimiento se alcanzará” (Day, 1985)



Rendimiento

(m3/h)

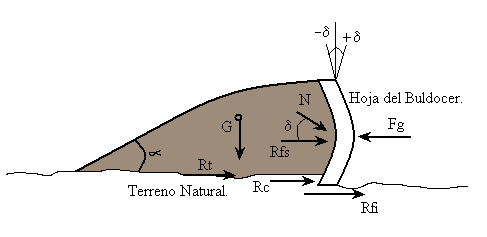
**Figura 2: Variación de la productividad vs. distancia y la potencia nominal el motor**

Como se aprecia, a medida que aumenta la distancia disminuye la productividad, se logran las máximas productividades a distancias cortas (entre los 12 y 30 m) y como máximo hasta los 90 metros, aunque puede trabajarse a distancias superiores hasta 150 m, trabajando con dos buldóceres en paralelo (side by side), tal como recomienda (Perifoy, 1979).

A mayor potencia mayor rendimiento, pero también será mayor el consumo de combustible de estas máquinas, por lo que es importante seleccionar el buldócer de potencia adecuada a la labor a realizar, para asegurar la economía de la labor a realizar.

**Determinación de las Resistencias Adicionales a vencer en la fase de excavación y acarreo (Σ Rad).**

Con anterioridad se ha hecho referencia a la necesidad de comprobar el cumplimiento de tres condiciones para poder elegir la velocidad del equipo al trabajar. En la figura 3 siguiente, se aprecian las distintas fuerzas que intervienen durante la excavación y el acarreo de los suelos con los Buldóceres (Orta, 2017):



**Figura 3: Fuerzas resistentes que surgen al excavar y acarrear con un Buldócer**

En este caso:

**Fgi:** Es la fuerza disponible en el gancho de tracción del Buldócer en cada velocidad, una vez cumplidas las condiciones básicas para el movimiento, en kgf. Esta se determina para cada velocidad, según la expresión**: Fgi = Fmi - Rto**, en: kgf

Donde:

**Fmi** = Fuerza Motriz del Equipo en cada velocidad, que depende directamente de su Potencia Motriz e inversamente proporcional a la velocidad empleada, en kgf.

**Rto:** Resistencia total al movimiento, en este caso la suma de la Resistencia a la Rodadura y a la Pendiente, es decir: **Rto = Rr +/- Rp** expresada en kgf.

Para que el buldócer trabaje además de las dos condiciones básicas antes expresadas, debe cumplirse al trabajar que: **Fg > Σ Rad** (tercera condición)

Donde:

**Rc:** Resistencia que ofrece la capa o camada de terreno natural de espesor (e) al ser cortada o excavada por la cuchilla del buldócer, la que se denominará Resistencia al Corte del terreno y se determina según la siguiente expresión:

, en kgf

Donde:

Ac: Área de la sección transversal que se opone al corte, en cm2

Ac = L • e, expresada en cm2

Donde:

L: longitud de la cuchilla del Buldócer, expresada en cm.

e: espesor de la capa a excavar, también expresada en cm. Este espesor se adopta en dependencia de la dureza del suelo, usualmente entre 5 y 20 cm, pudiendo ser mayor en suelos blandos (Clasificación I)

Kc: Coeficiente de Resistencia del Suelo al ser excavado (kgf/cm2). Se determina a manera de orientación inicial en la Tabla 11 (Orta, 2017), más confiable hay que obtenerlo en laboratorios de Mecánica de Suelos en ensayos de corte directo.

**Rt:** Resistencia al transporte o acarreo del volumen de tierra que se acumula delante de la hoja al realizar el trabajo, en kgf

  , en kgf

Donde:

G: peso del suelo delante de la hoja (peso del volumen Ca) en kgf a su vez: G = γesp• Ca

Donde:

**γesp.:**peso específico esponjado del suelo que se ha excavado, en Kg/m3. Una manera aproximada es usando la Tabla 1 del libro (Orta,2017)

**Ca:** volumen de tierra máximo acumulado delante de la hoja del buldócer, en m3 esponjados

**G**: Peso del volumen de tierra acumulado delante de la hoja sobre el terreno, en kg.

**α**: ángulo natural o de reposo del terreno excavado, grados. Una forma aproximada es obtenerlo en la tabla 3 del anexo del libro (Orta, 2017)

**ϕ:** ángulo de fricción interna del suelo natural, grados. A manera de orientación inicial puede emplearse la tabla 12 del anexo del libro (Orta, 2017)

**tan ϕ:** Coeficiente de fricción del suelo acumulado delante de la hoja con el de la superficie del terreno natural sobre el cual se desliza, se determina en Laboratorios de Mecánica de Suelos, de manera aproximada el ángulo de fricción interna se adopta de la tabla 12 del libro (Orta, 2017)

**Rfi:** es la resistencia debida a la fricción entre la cuchilla de la hoja Buldócer al excavar y el suelo que se excava, en kgf, se determina por la expresión:

**Rf i = (Ph+ Feg+ Pd) fas** ,en kgf

Donde:

Ph : Peso de la hoja del Buldócer y sus aditamentos, kgf. DATO de los fabricantes

Feg: Fuerza de empuje de los gatos hidráulicos al accionar la hoja para producir su penetración en el terreno, kgf. DATO de los fabricantes. Esto supone que el buldócer trabaja apoyando plenamente sus esteras u orugas sobre la superficie de apoyo.

fas: Coeficientes de fricción acero de la hoja – suelo natural, según la siguiente Tabla 1

|  |  |
| --- | --- |
| **Tipos de suelos** | **Coeficiente de fricción (fas)** |
| Arenas | 0,35 |
| Arcillas arenosas | 0,50 |
| Suelos buenos como relleno (gravo-areno-arcillosos) | 0,60 – 0,80 |
| Suelo vegetal (orgánico) | 0,90 |
| Turba húmeda | 0,65 |

Donde:

**Pd**: Parte del peso del tractor del Buldócer que baja por la parte delantera u hoja del equipo, en kgf. Este aparece cuando el suelo es duro y para iniciar el corte el operador apoyándose en la hoja levanta la parte delantera de las esteras, para que una parte importante del peso del equipo colabore en la penetración de la cuchilla en el suelo a excavar (Gabay y Zemp, 1979). Se adoptará que: Pd = 0.66 P, es decir que un 66% del peso total del equipo baja o colabora en la hinca de la cuchilla al terreno (Orta, 2017) Este término se anula en los equipos de mandos de cable y es válido al iniciar la excavación en suelos duros (Clasificación III), con sistemas de mando hidráulico que ayudan a iniciar el corte con la cuchilla.

En esta situación el valor del Rf alcanza un valor máximo, contribuyendo notablemente a que la Σ Rad alcance un alto valor, que en no pocas ocasiones supera la Fg máxima del equipo, razón principal para que el equipo no trabaje usualmente de esta manera, solo excepcionalmente al iniciar los cortes en terrenos duros (Clasificación III)

**Rfs:** Resistencia que se origina debido a la fuerza de empuje del suelo (N) delante de la hoja y la fricción de éste con el área de acero frontal de la hoja, al subir la misma durante la excavación, en kgf.

**Rfs = N. fas,** enkgf

Donde:

**N** = (γesp. **.** Ca) tan2 (45 - ϕ/2), en kgf

Siendo N la fuerza que ejerce el suelo acumulado delante de la hoja al ser empujado por el buldócer durante el proceso de excavación, la que sube rozando la superficie de la hoja, donde: (45 - ϕ/2) es el coeficiente de empuje activo del suelo (Sowers and Sowers, 1979), en kgf.

**fas**: coeficiente de fricción acero de la superficie frontal de la hoja-suelo excavado que se desliza, puede ser definido por la anterior tabla 1

**ϕ** ; es el ángulo de fricción interna del suelo, de manera orientativa en la tabla 12 del anexo del libro (Orta, 2017) y más exacto en un Laboratorio de Mecánica de Suelos

**Ca:** volumen máximo de suelo acumulado delante de la hoja, m3 esponjados

Conocidas todas las fuerzas actuantes, haciendo la Σ Fuerzas en el Eje Horizontal se tiene que:

Σ Fx = Fg - (Rt + Rf + Rc + Rfs) = Fg – Σ Rad

Pueden suceder dos casos:

1. Si: Σ Fx > 0 (es decir: Fg > Σ Rad)

Entonces el Buldócer efectuará la excavación y acarreo del suelo (realiza trabajo útil en la velocidad escogida y con el espesor de corte elegido)

1. Si: Σ Fx ≤ 0 (es decir: Fg ≤ Σ Rad)

El Buldócer no podrá ejecutar el trabajo en ese terreno en la velocidad escogida y con el espesor de corte elegido inicialmente, debiendo iniciar un proceso iterativo suponiendo un espesor de corte (e) menor para disminuir la resistencia al corte (Rc), para tratar de cumplir la condición a) y de esa manera ejecutar el trabajo.

Debe tenerse en cuenta que hasta el momento se ha considerado que no existe patinaje o deslizamiento entre el sistema de rodaje y el terreno, es decir: Fm ≤ Fadh, pues de lo contrario no pudiese desarrollarse la suficiente Fg para vencer las resistencias que surgen en la excavación y el acarreo. Esa fuerza de reacción se determina por la expresión:

**Fadh = Pmo . f adh,** en kgf,

Donde:

Pmo: parte del peso del equipo que baja por el eje motriz, en t

Para los equipos de un solo eje motriz se considera que el 66% baja por ese eje y el resto por el delantero o direccional, es decir: Pmo = 0,66 P

Para los sobre esteras u orugas: **Pmo = P** del equipo (**t)**

**fadh:** factor de adherencia, kg/t. Se estima por la tabla 5 del libro (Orta, 2017)

Para equipos con sistemas de rodaje sobre esteras este factor llega hasta 900 kg/t en arcillas y margas secas, siendo aproximadamente el doble que para los sobre neumáticos, pues además de intervenir la fricción de la superficie de las esteras con el suelo, se añade la resistencia a cortante del mismo, en un plano que pasa por la superficie de las protuberancias de las zapatas de las esteras. Por la razón anterior, los buldóceres sobre esteras son los que pueden desarrollar mayores fuerzas disponibles o fuerzas en el gancho, siendo los predominantes en el mercado.

Para asegurar que: Fg > Σ Rad el operador del buldócer debe disminuir el espesor del corte, trabajar en la menor velocidad disponible para poseer la máxima fuerza motriz y a favor de la pendiente, lo cual hace que la Fg aumente y la Rc disminuya, incidiendo en que la máquina trabaje con la mayor productividad.

Otro factor fundamental a calcular es el Costo Unitario Directo real (CUDr) de las labores de movimiento de tierras, que se determina por la expresión simplificada siguiente:

**CUDr = CHM / PR**, en $/m3

Donde:

CHM: es el Costo Horario del Buldócer, en $/h, que es la suma de los Costos de Posesión más los de Operación. En Cuba es obtenido por el anexo 2.45 Lista de Costos Horarios de Equipos, del sistema de precios (PRECONS), vigente desde enero del 2021.

PR: productividad real del buldócer, en m3/h

Lo ideal es emplear para ejecutar una excavación buldóceres que alcancen altas productividades y los menores costos, no obstante, para lograr una mejor gestión de explotación de estas máquinas excavadoras se recomienda cumplir con las siguientes recomendaciones:

1. “Emplear buldóceres de potencia adecuada para realizar las labores”, de esa manera se aprovecha racionalmente la capacidad potencial del equipo, siendo más eficaz económicamente. Una mala práctica es emplear buldóceres con demasiada potencia en una labor que no lo requiere, lo cual es antieconómico, pues consumirá más combustible innecesariamente, incrementando injustificadamente los costos unitarios directos reales (CUDr) del trabajo. Por el contrario, si se escoge uno de potencia insuficiente o muy por debajo de la que requiere la labor a realizar, pudieran producirse roturas injustificadas en los gavilanes en la cuchilla, en los gatos hidráulicos, generándose gastos adicionales injustificados y pérdidas de tiempo innecesarias.
2. “Calcular la productividad de los buldóceres de manera analítica, evitando el uso de manuales de otros países”, lo anterior asegura:
3. La determinación confiable de la productividad de estas máquinas, al considerarse todos los factores influyentes, ajustándose a las condiciones y características del trabajo a realizar.
4. Efectuar pagos indebidos a los operadores de los buldóceres por sobrecumplimientos no reales de la productividad, lo que afecta la economía de la empresa.
5. Estimar con mayor exactitud los plazos de duración de los trabajos realizados con estas máquinas.
6. Calcular correctamente los Costos Unitarios Directos reales obtenidos (CUD) al acometer las actividades con estas máquinas excavadoras

Todo lo antes afirmado, evidencia la conveniencia del empleo del procedimiento analítico propuesto y de las anteriores recomendaciones, para gestionar con mayor eficacia estas importantes y útiles máquinas excavadoras disponibles en las empresas constructoras.

**CONCLUSIONES.**

* Actualmente se acometen errores en el cálculo de la productividad de los buldóceres, al emplearse manuales que no consideran todas las condiciones y factores con que se acometen los trabajos, el empleo del procedimiento analítico que se propone asegura la necesaria fundamentación científica y veracidad en el cálculo de este importante indicador de eficacia, lo cual es un aporte de alcance internacional en la temática.
* La determinación de la productividad real analíticamente, asegura el cálculo correcto de los costos unitarios directos reales de las actividades hechas por los buldóceres, la estimación confiable de la duración de los trabajos ejecutados; evita sobrepagos injustificados a los operadores de estas máquinas, aspectos que contribuyen a una mayor eficacia económica productiva de las empresas constructoras de obras de ingeniería.
* La adecuada selección de la potencia de estas máquinas para ejecutar los trabajos, asegura su correcta explotación, incidiendo en la disminución de los costos unitarios directos y por consiguiente en el incremento de la eficacia de las labores de movimiento de tierras, que estas máquinas excavadoras ejecutan.
* Se sugiere el empleo de este procedimiento analítico en la definición de las normas de trabajo de los buldóceres, de reciente adquisición por las empresas constructoras del MICONS, del MITRANS, del MINFAR, del MINEM, del MINAG y otras entidades que empleen estos equipos, lo cual incidirá en una mayor eficacia económica productiva en las excavaciones que se ejecutan con estas importantes máquinas.

**BIBLIOGRAFÍA:**

* Abrosimov, K. y otros. Road Making Machinery. Editorial MIR, Moscú, 1973
* Alfonso, Eduardo. Equipos de Construcción. / Eduardo Alfonso – Primera Edición. Cuba: Editorial MICONS,1979
* Ballester, Francisco y Capote, Jorge. Máquinas de Movimiento de Tierra. Criterios de Selección. 2da. Edición. Editorial PEDECA, España, 1998. – 405 p.
* Cherne Tarifonte, Juan y González Aguilar, Andrés. Movimiento de Tierras, Construcciones Industriales. España, 2010
* Day, David. Maquinaria para Construcción. Editorial Limusa, México. 1985, 616 p.
* Gabay, A. y Zemp, J. Máquinas para Obras. Francia, Editorial Pueblo y Educación, La Habana, Cuba, 1979, 389 p.
* García, Yelena. (2013) Análisis de los costos de los movimientos de tierras en la ECOING 25. Trabajo de Diploma, Tutor. Pedro A. Orta. UCLV, Santa Clara, Cuba.
* Komatsu, Catálogos de buldóceres. Tokio, Japón, 1994
* Manual de Normas de Rendimiento de las Maquinarias de Construcción, C.E.C., La Habana, Cuba, 1979.
* Manual de la Caterpillar, Edición 39, EUA, 2009
* Nichols, Herbert. Movimiento de Tierra. Manual de Excavaciones. Instituto cubano del libro, La Habana, Cuba, 1968, 1111 p.
* NC 052 – 027: 1978. Uso y Operación del Topador Frontal Sobre Esteras
* Orta Amaro, Pedro A. Maquinarias de Movimiento de Tierras. Editorial “Félix Varela”, La Habana, Cuba, 2017, 244 p.
* Peurifoy, R.L., Construction Planning Equipment and Methods (2011) Four Edition. Editorial Mc. Graw Hill, USA, 720 p.
* Rodríguez, Francisco. Tecnología de la Construcción. Partes 1 y 2. Editorial Félix Varela, La Habana, 2015.

- Ruiz Rivas, Tayanis. Análisis de los costos de los trabajos de movimiento de tierras

en empresas constructoras de obras de ingeniería. Tesis de Maestría, Tutor. Dr. Ing

Pedro A. Orta Amaro, UCLV, Santa Clara, Cuba

* Sowers and Sowers. Introducción a la Mecánica de Suelos y Cimentaciones. Editorial Limusa, México, 1975
* Titkin, Juan. Movimiento de Tierras**.** Publicación del Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Madrid, España, 1997.
* Yepes, V. (2014). Maquinaria de movimiento de tierras. Apuntes de la Universidad Politécnica de Valencia, Ref. 204. Valencia, España, 158 pp.
* Zapata, I. E. (2013). Maquinaria para construcción de carreteras. Universidad Nacional, Sede Medellin, Colombia