

ARADOS ROTATIVOS FUNDAMENTOS TEORICOS PARA SU ANALISIS CINEMATICO Y DINAMICO

FERNANDO ALVAREZ MEJIA*

1. INTRODUCCION

1.1 DEFINICION

La rotavación es un procedimiento de trabajo en el suelo mediante el cual una herramienta (cuchilla), provista de aristas cortantes, dispuestas simétricamente alrededor de un eje, gira con movimiento circular (uniforme o variado) arrancando el material sobre el cual trabaja.

1.2 HISTORIA Y EVOLUCION

A comienzos del siglo XIX, cuando las fuentes de potencia para los arados se resumían en parejas de animales y algunos pocos tractores a vapor, el problema de baja potencia disponible era un factor preponderante para el trabajo del suelo. Surgieron ideas para sustituir los órganos activos fijos del arado de vertedera por órganos activos móviles.

En 1885, J.K. Underwood, D.M. Lane y M.T. Hancock, desarrollaron la idea anterior, con la construcción de arados de discos realmente prácticos.

La evolución de la idea de cambiar los órganos activos fijos por órganos activos móviles, redundó en el análisis de un nuevo órgano móvil, denominado arado rotativo o fresadora o rotocultor e incluso "rotavators".

Los primeros ensayos y patentes surgieron en Europa entre los años 1850 y 1860 y su producción industrial fue iniciada en Suiza en 1910.

Se puede afirmar que los principales factores que incidieron en la evolución de los arados rotativos fueron los siguientes:

* Ingeniero Agrícola, M.S. Profesor Asociado Sección Mecanización Agrícola, Facultad de Agronomía de la Universidad Nacional, Seccional Medellín.

- Los arados con órganos activos fijos o móviles exigen considerable fuerza de tracción y una complementación del trabajo ejecutado a través de la labranza secundaria.
- Los arados rotativos, a pesar de que necesitan torques relativamente altos, prácticamente independientes de la fuerza de tracción, ejecutan un trabajo completo, esto es: arada y rastrillada de una sola vez.

1.3 APLICACIONES

Los arados rotativos pueden asumir una gama bastante variable en los trabajos agrícolas:

- Empleado en las fincas hortícolas como complemento de la labor con arado de vertedera o arado de discos o sustituyéndolo totalmente.
- Control de malas hierbas.
- Cultivo entre surcos, caso de la caña de azúcar.
- Permite que se creen condiciones físicas ideales para una rápida descomposición de la materia orgánica y de germinación de las semillas.
- Preparar rápidamente la tierra sin realizar previamente operaciones convencionales de aradura, en el caso en que se desee sacar una cosecha secundaria en el año.
- Romper pastizales permanentes y temporales para renovarlos, mezclando el material verde con el suelo para la rápida descomposición de los residuos vegetales.
- Se adaptan particularmente a la incorporación de sustancias químicas y residuos de cultivos de una manera uniforme dentro del suelo.
- Trabajos especiales en operaciones de desmonte en terrenos de selva y en terrenos vírgenes.
- Sus principios de funcionamiento y diseño están siendo aprovechados para la adaptación y construcción de nuevas máquinas que trabajan en sistemas no tradicionales de labranza, como es el caso de la labranza mínima.

2. PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO

El rotocultor trabaja en el terreno mediante unas cuchillas giratorias accionadas a través de la toma de fuerza del tractor o mediante un motor auxiliar.

La parte operativa consiste, básicamente, en un eje pesado (continuo o seccionado), mediante el cual un cierto número de cuchillas o dientes de diseño especial, están atornilladas en disposición simétrica alrededor del mismo, de tal forma que el conjunto total de unidades forme una hélice. El eje con cuchillas es conocido como rotor.

El trabajo ejecutado por el rotor es debido al movimiento conjugado de rotación y traslación del mismo.

Los arados rotativos están equipados con una caja de transmisión con la finalidad de

variar la velocidad periférica o angular del rotor. La transmisión de movimiento de la tdf o motor auxiliar se hace por la caja de velocidades y de ésta hasta el rotor por medio de un mando de cadena en baño de aceite.

El control de profundidad por el mecanismo de levante hidráulico no es aplicable a este equipo, debido a que la componente horizontal de la fuerza periférica de corte del suelo no depende únicamente de la profundidad de trabajo, como se verá más adelante. Es por esto que el rotocultor viene equipado con un elemento de soporte para controlar la profundidad de trabajo (rueda de control de profundidad) y un patín para límite de profundidad.

3. TIPOS DE ARADOS ROTATIVOS

En la evolución de los diversos tipos de rotocultores, el único tipo que realmente alcanzó éxito y perdura hasta el momento es el de láminas fijas, de rotor horizontal posicionado transversalmente en relación a la dirección de translación.

Los modelos encontrados en el mercado pueden ser agrupados en tres categorías:

- Tipo de jardín, con dos ruedas y de propulsión propia. Su ancho de corte varía de 20 a 70 cm.
- De tiro o acoplado a los tres puntos de enganche del tractor, cuyo mecanismo es accionado por la toma de fuerza. Su ancho de corte varía de 90 a 130 cm.
- De tiro con motor auxiliar montado sobre la estructura de la máquina. Ancho de corte varía de 120 a 210 cm.

4. ANALISIS CINEMATICO DEL TRABAJO DE ROTURACION

Este análisis está abordado de un modo genérico, de tal forma que comprenda los sistemas que realizan trabajo de roturación en el suelo, con dispositivos de corte rotativos en torno a un eje horizontal ortogonal a la dirección del avance. Se estudiará el caso de un rotor ideal con una cuchilla cortante "A" cuyo reborde se encuentra a una distancia "r" del eje de rotación "O". (Figura 1).

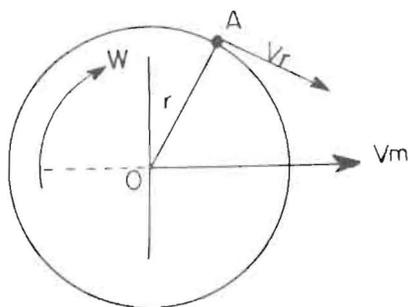


FIGURA 1. Rotor ideal para el análisis cinemático.

El elemento de trabajo está rígidamente unido al eje soporte y gira con éste a una velocidad angular w y una velocidad periférica v_r . El eje de rotación está provisto de un movimiento de traslación con velocidad constante v_m .

Una relación entre la velocidad de avance " v_m " y la velocidad periférica " v_r " puede ser definida como:

$$\lambda = \frac{v_m}{v_r} = \frac{v_m}{w \cdot r}$$

Cuando $\lambda = 1$, el movimiento descrito por el punto "A" corresponde al de una cicloide simple. (Figura 2).

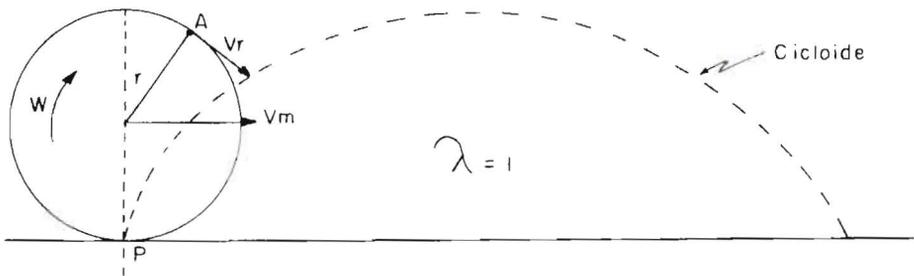


FIGURA 2. Relación unitaria de velocidades describiendo una cicloide simple.

En el caso de los arados rotativos λ asume valores menores que la unidad. En los modelos industriales europeos con velocidades de desplazamiento variando entre 0.3 a 0.7 m/s y con un número de rotaciones "n" comprendido entre 200 y 350 por minuto se obtienen valores de λ inferiores a 1/200.

Más en el caso específico de los rotocultores λ oscila entre $\frac{1}{5}$ y $\frac{1}{20}$.

Desde el punto de vista analítico λ representa el número de rotaciones completas que hace el punto "A" alrededor de "O" en un tiempo "t" necesario para "O" recorrer con velocidad v_m un espacio (trayectoria rectilínea horizontal) igual al desarrollo de la circunferencia de radio r .

$$\text{Entonces: } v_m \cdot t = 2\pi r \Rightarrow t = \frac{2\pi r}{v_m} \quad (1)$$

Evidentemente cada rotación completa es hecha en un tiempo $t_0 = t$. Si indicamos por "E" el espacio que "O" completa en un tiempo " t_0 ", podemos escribir:

$$E = v_m \cdot t_0 = v_m \lambda t$$

$$\text{y por (1) } E = \lambda (2\pi r)$$

Este coeficiente representa el espacio en correspondencia a la superficie libre del terreno no trabajado por el filo "A" conforme a la Figura 3.

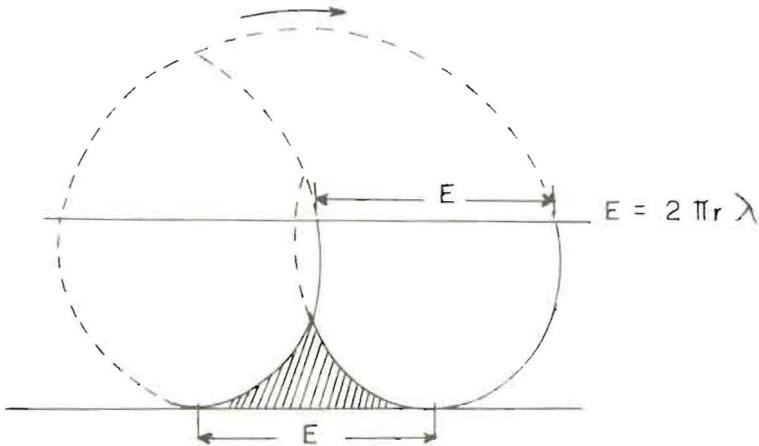


FIGURA 3. Terreno no trabajado por el filo cortante de la cuchilla.

5. ESTUDIO ANALITICO DE LA TRAYECTORIA DEL MOVIMIENTO CICLOIDAL

Se considerará la ecuación de la trayectoria que completa el punto "A" (correspondiente a la herramienta de corte) en función del parámetro λ y del radio.

Según la Figura 1, la trayectoria del borde cortante de la cuchilla (punto A), es resultante de dos movimientos componentes:

- Un movimiento circular:

$$v_r = \frac{2 \pi r n}{60} \text{ m/s}; \quad v_r = \frac{w \cdot r}{60} \text{ rad/s}$$

Donde: v_r = velocidad periférica en m/s (4 a 7 m/s).

r = radio del rotor en m (0.20 a 0.30 m).

n = revoluciones por minuto (120 - 280 rpm).

w = velocidad angular en rad/s.

• **Un movimiento rectilíneo:**

v_m = velocidad de avance en m/s.

v_x = velocidad en sentido x en m/s.

v_y = velocidad en sentido y en m/s.

α = ángulo recorrido en grados.

t = tiempo en segundos.

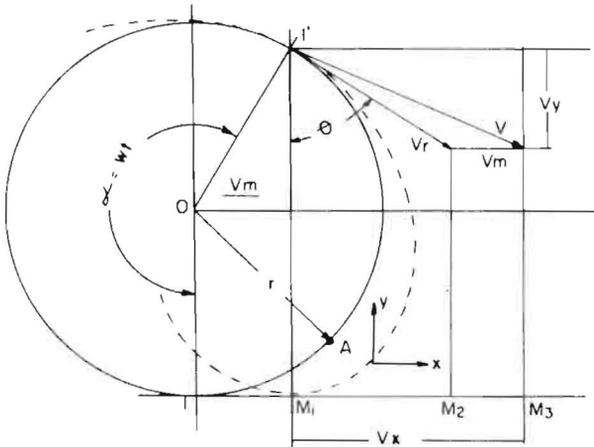


FIGURA 4. Análisis de la trayectoria del movimiento cicloidal.

Para un tiempo t genérico la velocidad \vec{v} del punto "A" se obtiene de dos vectores componentes v_m y v_r . Después del tiempo t contado a partir de 1 (Figura 4) el punto "A" habrá girado alrededor de O describiendo un ángulo $\alpha = \omega t$, hasta el punto I' .

En el punto I' , los vectores \vec{v}_m y \vec{v}_r determinan el vector \vec{v} resultante, que es la velocidad del punto "A" en el instante t . Entonces, para cada instante t se puede determinar las proyecciones cartesianas v_x y v_y del vector \vec{v} sobre los ejes coordenados.

Del estudio cinemático de los movimientos planos, se sabe que:

$$v_x = dx/dt \Rightarrow dx = v_x \cdot dt \tag{1}$$

$$v_y = dy/dt \Rightarrow dy = v_y \cdot dt \tag{2}$$

$$\text{De (1)} \quad x = \int_0^t v_x dt \tag{3}$$

$$\text{De (2)} \quad y = \int_0^t v_y dt \tag{4}$$

De la Figura 4; para un instante genérico "t"

$$v_x = \overline{M_1 M_2} + \overline{M_2 M_3} = v_r \operatorname{sen} \theta + v_m$$

$$v_y = -v_r \cos \theta$$

Pero $\theta = (3/2 \pi - \alpha)$, luego $\operatorname{sen} \theta = -\cos \alpha = -\cos (wt)$

$$\cos \theta = -\operatorname{sen} \alpha = -\operatorname{sen} (wt)$$

De ahí que:

$$v_x = v_m - v_r \cos (wt) \quad (5)$$

$$v_y = v_r \operatorname{sen} (wt) \quad (6)$$

(5) y (6) en (3) y (4):

$$\begin{aligned} \int_0^t v_x dt &= \int_0^t v_m dt - \int_0^t v_r \cos (wt) dt \\ &= \int_0^t v_m dt - v_r \int_0^t \cos (wt) \frac{d(wt)}{w} \\ &= v_m \cdot t - \frac{v_r}{w} \int_0^t \cos (wt) d(wt) \end{aligned}$$

$$x = v_m t - \frac{v_r}{w} \operatorname{sen} (wt)$$

$$\begin{aligned} \int_0^t v_y dt &= \int_0^t v_r \operatorname{sen} (wt) dt = v_r \int_0^t \operatorname{sen} (wt) \frac{d(wt)}{w} \\ &= \frac{v_r}{w} [\cos (wt)]_0^t = \frac{v_r}{w} [\cos (wt) - 1] \end{aligned}$$

$$y = \frac{v_r}{w} [1 - \cos (wt)]$$

Asumiendo que el número de rotaciones por minuto de la herramienta de corte es igual a $1/T_0$, esto es el recíproco del tiempo en segundos para "A" completar una rotación completa alrededor de O, se obtiene:

$$x = v_r \left[\frac{v_m t}{v_r} - \frac{1}{w} \operatorname{sen} (wt) \right] = 2 \pi r n \left[\lambda t - \frac{\operatorname{sen} (wt)}{2 \pi n} \right]$$

$$x = 2 \pi r n \left[\frac{2 \pi n \lambda t - \operatorname{sen} (wt)}{2 \pi n} \right]$$

$$x = r \left(2\pi\lambda \frac{t}{T_0} - \text{sen}(wt) \right) \quad (7)$$

Asimismo:

$$y = \frac{v_r}{w} [1 - \cos(wt)] = r [1 - \cos(wt)] \quad (8)$$

Se obtienen así dos ecuaciones paramétricas (7) y (8) que representan una cicloide alargada en función del parámetro λ , del radio r y del tiempo t .

6. DISTANCIA ENTRE DOS CORTES CONSECUTIVOS DEL FILO CORTANTE DE LA CUCHILLA

El trabajo sobre el terreno va a depender de la acción de corte, levante y aflojamiento de la tierra por parte de las cuchillas.

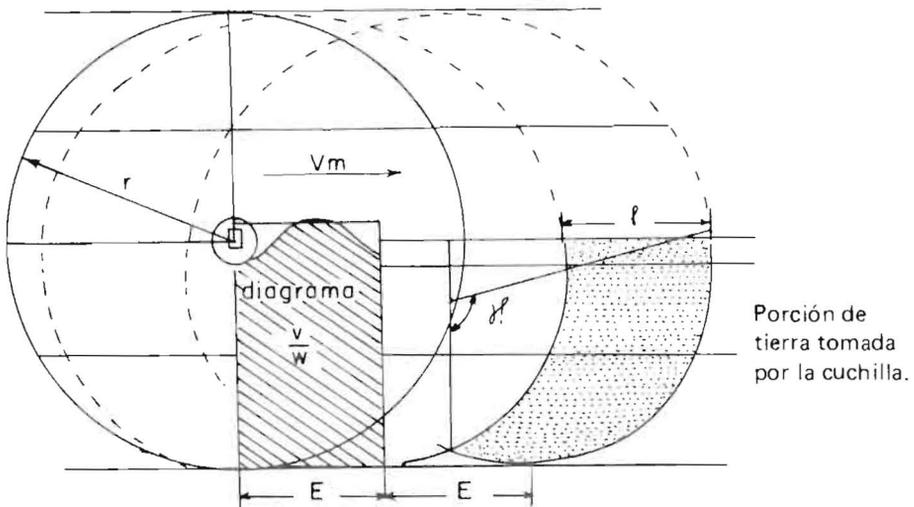


FIGURA 5. Distancia entre dos cortes consecutivos del filo cortante de la cuchilla.

La distancia (1) entre dos cortes sucesivos va a depender de las revoluciones del rotor (n), de la velocidad de avance de la máquina (v_m) y número de cuchillas (m) en el plano perpendicular al eje del rotor (normal 3 cuchillas).

$$\begin{aligned} \gamma &= \text{ángulo recorrido por el filo de la cuchilla a través del suelo.} \\ \ell &= \frac{60 \cdot v_m}{m \cdot n} \quad (\text{m}) \end{aligned} \quad (9)$$

7. DESPLAZAMIENTO DE LA TIERRA

La porción de tierra tomada por la cuchilla, será cortada y acelerada aproximadamente hasta la misma velocidad de la cuchilla antes de salir de ella. Al salir la tierra será desplazada hacia atrás sobre una distancia x igual a:

$$x = \frac{v_r^2 \operatorname{sen} 2\beta}{g} \quad (10)$$

- Donde:
- x : desplazamiento de la tierra en (m)
 - β : ángulo de salida de la tierra respecto a la horizontal (generalmente 45°)
 - g : aceleración de la gravedad (m/s^2)
 - V_r : velocidad periférica del rotor (m/s).

8. ANGULO DE CORTE

El ángulo de incisión requerido por la hoja de la cuchilla no debe rozar la pared durante el trabajo. Es por esto que la hoja debe tener una posición inclinada respecto a la tangente de la trayectoria descrita por el borde cortante de la cuchilla (ya se mencionó atrás: la cicloide).

Si la cuchilla no tiene suficiente ángulo de incisión, la hoja tocará contra la pared, con el resultado de un incremento de la resistencia de corte o sea, que la potencia requerida aumentará considerablemente, además: la tierra será compactada.

- γ = ángulo entre el plano de la cuchilla y la tangente a la trayectoria de corte.
- β = ángulo del filo de la cuchilla.
- δ = ángulo entre el filo y la tangente al círculo
- $\gamma_0 = \delta$, si la cuchilla es afilada por dentro
- $\gamma_0 = \delta + \beta$, si la cuchilla es afilada por fuera
- $\Delta\delta$ = el incremento del ángulo de corte.

$$\text{Si } \gamma < \gamma_0 \rightarrow \gamma = \gamma_0 - \Delta\delta$$

De la Figura 6: $\delta' = \delta - \Delta\delta$, donde δ' es el ángulo entre la tangente a la cicloide y el filo de la cuchilla que debe ser mayor que cero para prevenir que la hoja de la cuchilla pegue en el suelo disturbado. Para prevenir el desgaste y ruptura de la cuchilla el valor de este ángulo no debe ser menor que 5°

Para la durabilidad de la cuchilla el valor del ángulo β no debe ser menor que 10°

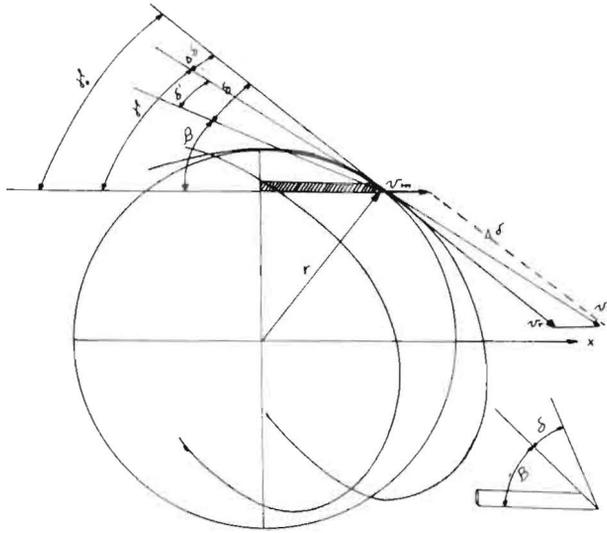


FIGURA 6. Análisis del ángulo de corte requerido por la hoja de la cuchilla.

Así el ángulo mínimo de corte debe ser de:

$$\gamma_{\min} = \beta_{\min} + \delta'_{\min} = 15^\circ$$

9. RELACION ENTRE EL RADIO DEL ROTOR (r), PROFUNDIDAD DE LA LABOR (d) Y EL TRABAJO

El trabajo, y por consiguiente la potencia requerida serán relativamente mínimos cuando existe la siguiente relación entre el radio del rotor y la profundidad de la labranza efectuada:

$$r \left(1 - \frac{v_m}{v_r}\right) = 0.6 d \quad (11)$$

Experimentos de campo relacionados con este asunto han demostrado que en realidad la demanda de potencia es baja en circunstancias en las cuales el radio del rotor es más o menos igual a 0.612 d .

Hendrick comprobó que los arados rotativos con rotación hacia adelante llegan a retornar hasta el 30% de la potencia recibida en forma de potencia de tracción.

10. ANALISIS DINAMICO

10.1 RESISTENCIA DEL SUELO A LA CUCHILLA (R).

$$R = F_s + F_a + F_w \text{ [kgf]}$$

F_s : Fuerza de corte para cortar la porción del suelo.

F_a : Fuerza de aceleración para acelerar la porción de la tierra.

F_w : Fuerza de fricción, entre suelo y metal.

Cálculo de la fuerza de corte:

$$F_s = C_s \cdot b \text{ [kgf]}$$

C_s : Fuerza específica de corte en kgf/m. Su valor varía entre 75 y 100 kgf/m. por metro de corte.

b: Ancho de la cuchilla en m.

Cálculo de la fuerza de aceleración:

$$F = m \cdot a = \frac{G}{g} \cdot a \text{ [kgf]}$$

G : Peso en kgf de la porción de tierra cortada por la cuchilla.

g : Aceleración de la gravedad 9.8 m/s²

a : Aceleración en m/s²

$$G = l \cdot d \cdot b \cdot w = \frac{60 \cdot v_m}{m \cdot n} \cdot d \cdot b \cdot w \text{ [kgf]}$$

w = Peso específico de la tierra en kgf/m³

$$a = \frac{v_c}{t} \text{ m/s}^2$$

v_c = Velocidad de la tierra al salir de la cuchilla.

$$v_c = 0.75 v_r \text{ [m/s]}$$

t = Tiempo en segundos en el cual la cuchilla pasa por la zona de corte.

$$t = \frac{\gamma_1}{2\pi} \cdot \frac{60}{n} \text{ [s]}$$

$$\therefore a = 0.008 r n^2 \frac{1}{\gamma} \text{ [m/s}^2 \text{]}$$

$$\text{Así: } F_a = 0.05 v_m d \cdot b \cdot w \cdot r \cdot n \cdot \frac{1}{m \gamma_1} \text{ [kgf]}$$

Cálculo de la fuerza de fricción:

$$F_w = F_c \cdot C_f \text{ [kgf]}$$

F_c = Fuerza centrífuga promedio actuando sobre la porción de tierra cortada durante la aceleración de ella.

C_f = Coeficiente de fricción entre suelo-metal, el cual varía entre 0.5 y 0.7.

$$F_c = \frac{m v_c^2}{2 \cdot r} = \frac{G}{g} \cdot \frac{(0.75 v_r)^2}{2 \cdot r} = \frac{6}{10} \cdot \frac{(0.75 \cdot \frac{2 \pi r \cdot n}{60})^2}{2 \cdot r}$$

Entonces:

$$F_w = 0.0185 v_m d \cdot b \cdot w \cdot r \cdot n \frac{1}{m} \cdot C_f \text{ [kgf]}$$

10.2 CALCULO DE LA FUERZA F_t ACTUANDO TANGENCIALMENTE SOBRE LA CUCHILLA.

La resistencia R actúa sobre la cuchilla bajo un ángulo de aproximadamente 15° entonces:

$$F_t = R \cdot \cos 15^\circ \text{ [kgf]}$$

10.3 CALCULO DEL NUMERO DE CUCHILLAS QUE SE ENCUENTRAN DENTRO DE LA ZONA DE CORTE.

El ancho de trabajo de la máquina es B metros. El ancho de cada cuchilla es b metros. Por la hilera de cuchillas el rotor tendrá (B/b) cuchillas. De éstas se encuentran en la zona de corte un número P de cuchillas:

$$P = \frac{\gamma_1}{2} \cdot \frac{m \cdot B}{b}$$

10.4 CALCULO DE LA FUERZA F QUE ACTUA SOBRE EL ROTOR.

$$F = p \cdot F_t$$

10.5 POTENCIA REQUERIDA PARA HACER GIRAR EL ROTOR.

$$N = \frac{F \cdot v_r}{75} = \frac{F \cdot 2 \pi r n}{60 \cdot 75} = 0.0014 r \cdot n \cdot F \text{ [hp]}$$

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

1. BEENY, J.M. and KHOO D.C.P. Preliminary Investigations Into the Performance of Different Shaped Blades for the Rotary Tillage of wet Rice Soil. Journal Agricultural Engineering. Research No. 1. 1970.
2. BERLIJN, J. Arados Rotativos, Fresadoras. Servicio de Ingeniería Agrícola. F.A.O. pp. 1-18 (Mimeografiado). Chile.
3. BERNACKI, H. HAMAN, J. and KANAFOJSKI, C. Z. Active Tilling Rotary Machines. Agricultural Machines. Theory and Construction. Vol. 1. Tomo 1. pp. 382-450. 1972. Polonia.
4. FONSECA, A. Curso de Mecánica. 2da. ed. Río de Janeiro. Ao Livro Técnico. V. 2. Cap. 8, pp. 111-146. 1963.
5. HENDRICK, J. and GILL, W. Rotary Tiller Design Parameters. Partes I - II and III. Transactions of the ASAE. No. 4. pp. 669-679. 1971.
6., Rotary - Tiller Design Parameters. Parte IV Blade Clearance Angle. Transactions of the ASAE. No. 1. pp. 4-7. 1974.
7. HENDRICK, J. G. A Powered Rotary Chisel. Transactions of the ASAE. No. 6 pp. 1349 - 1352. 1980.
8. MANTREDI, E. Cinemática Delle Frese Agricole. Estrato Dagli Atti del Convegano Tenuttosì a Pessaro in Ocasione Della 3a. Mostra Mercato di Meccanica Agraria per L'Italia Centrale. 1952.
9. ROSSI, M. Fresadoras. Máquinas Herramientas Modernas. 6a. ed. Barcelona, Editorial Científica Médica. Cap. 19. pp. 504-548. 1967.