

LAS CADENAS METÁLICAS EN LOS TRACTORES

PRINCIPIOS DE FUNCIONAMIENTO



En este primer artículo dedicado a los tractores de cadenas metálicas de baja velocidad, que son los empleados en trabajos agrícolas, se analizan sus características más significativas.

El mercado de los tractores agrícolas que utilizan un sistema de propulsión mediante cadenas metálicas es reducido, y limitado a países como Italia y España, en los que se da la posibilidad de realizar agricultura sobre suelos fuertes y en pendiente, lo que exige, especialmente en años de

elevada pluviometría, la utilización de estos propulsores.

Pero los tractores con cadenas metálicas se utilizan en otros campos de actividad: movimiento de tierras, aprovechamiento forestal... Seguidamente se analiza los aspectos más significativos de los propulsores de cadena de baja velocidad, que

son los que se utilizan en la agricultura.

Cadenas frente a ruedas

En la propulsión por cadena existe un paralelismo con la propulsión por rueda, ya que las ca-

denas utilizan 'ruedas' que circulan sobre una superficie dura formada por los elementos constituyentes del conjunto. También, la cadena es una cremallera doble, la interior constituida por la rueda motriz engranando en los bulones de la cadena y la exterior que forman las garras de la cadena cuando se clavan en el suelo (**Fig 1**).

En cualquier caso, hay una mejora notable en la superficie de contacto entre el vehículo y el suelo, pero también se produce una pérdida de energía adicional para vencer la resistencia al movimiento de los elementos de la cadena, incrementada por los fenómenos dinámicos que aumentan cuando se circula a alta velocidad. El hecho de incluir un mecanismo de piñón-cremallera, adecuado para trabajar a veces en contacto con la tierra, incrementan estas pérdidas en comparación con las de la rueda. Las diferencias son, no obstante, significativas en función del diseño de la misma, en especial en lo que se refiere a los elementos de apoyo y a las suspensiones.

Las características de la cadena se han adaptado al tipo de vehículo que la utiliza, estableciéndose, en este sentido, tres grupos diferentes:

- De baja velocidad (hasta 3 km/h) en las que sólo se busca un desplazamiento, o cambio de lugar, como en las palas es-



tacionarias, dragalinas, grúas, etc.

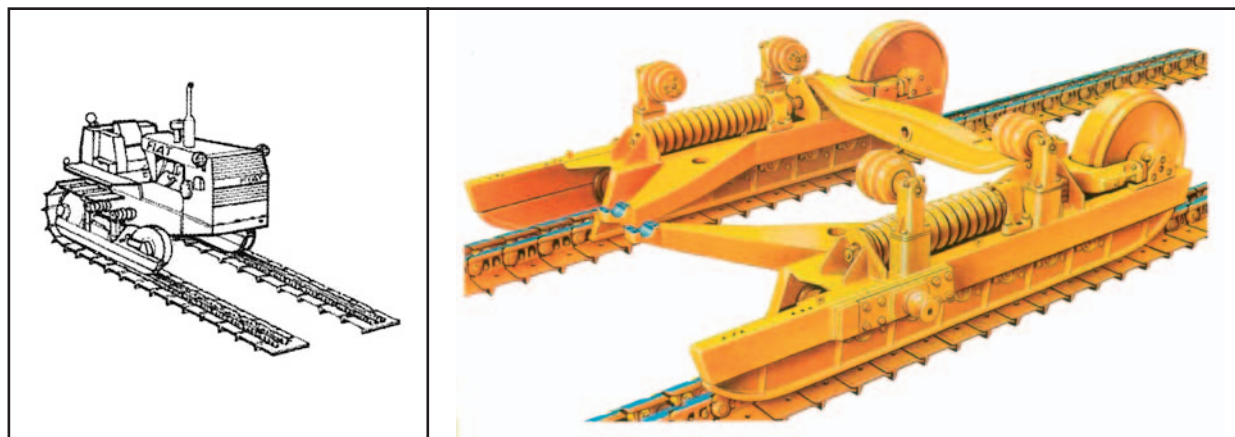
- De media velocidad (hasta 12 - 14 km/h) para el desplazamiento en trabajo, como corresponde a empujadores de hoja, tractores agrícolas, etc.
- De alta velocidad (hasta 90 km/h) para los vehículos en los que la función principal es la locomoción, como son los militares, anfibios, etc.

En la cadena de baja velocidad las zapatas que constituyen la cadena son de grandes dimensiones y rígidas, provistas de tetones solidarios y no mecanizados. Tanto los rodillos tensores como las ruedas motriz y conducida actúan directamente sobre el dorso de las zapatas. Los órganos de dirección lo constituyen acoplamientos de garras desplazables; el frenado se realiza por bloqueo con trinquete y las transmisiones son abiertas.

Las cadenas de media velocidad se construyen de manera precisa, con zapatas de dimensiones medias (150 x 300 mm) de pequeño espesor y con perfil nervado. La cremallera la componen eslabones de acero aleado mecanizados y unidos a bulones. La unión a la zapata se realiza por tornillos. La transmisión es cerrada, con engranajes en toma constante en baño de aceite, a través de embragues multidisco.

Las cadenas de alta velocidad deben construirse de manera muy precisa, con zapatas cortas y anchas, prescindiendo en ocasiones de los rodillos tensores. Las ruedas propulsora y conductora se sitúan elevadas sobre el plano de apoyo de la cadena, lo que favorece el comportamiento de la cadena al superar los obstáculos. El mecanismo de dirección cobra una importancia especial y se recurren a diferenciales dobles y triples.

FIGURA 1.— APOYO DEL CONJUNTO DEL PROPULSOR SOBRE LA CADENA Y DE ÉSTA EN EL SUELO



Componentes de la cadena de uso agrícola

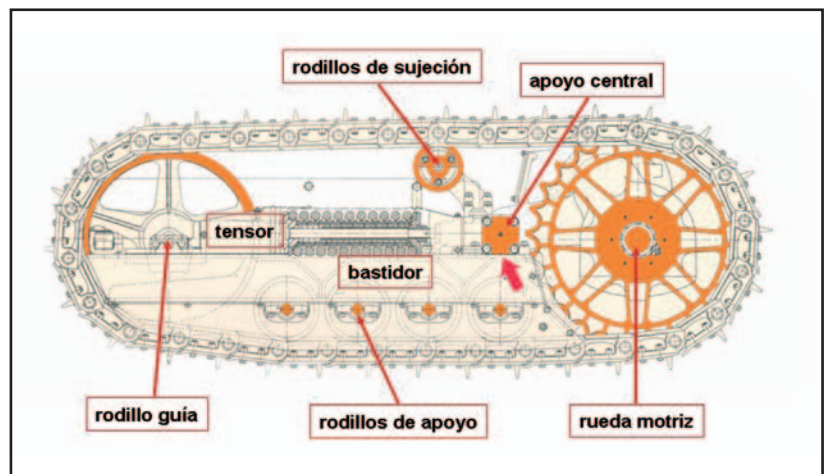
La cadena se encuentra formada por una serie de elementos articulados entre sí, que son los eslabones, formando parejas, de manera que ambos (eslabón derecho e izquierdo) se unen por un extremo a un eje, que actúa de bulón, y por el otro a un casquillo, cuyo diámetro interior permite que lo atraviese de bulón del siguiente par de eslabones, con suficiente holgura para que exista la articulación (Figs. 2 y 3). Sobre cada eslabón se sitúa la 'teja' que es la que establece el contacto de la cadena con el suelo.

Todos los elementos son de acero con endurecimiento superficial para reducir el desgaste. Cada eslabón tiene dos orificios para la fijación de la teja mediante tornillos. Esta teja toma formas diferentes en función de las condiciones del suelo por el que debe transitar la cadena, y generalmente van dotadas de un nervio de agarre para mejorar la adherencia. La anchura de la teja se aumenta para circular sobre suelos de baja capacidad portante.

Los casquillos y los bulones se introducen a presión; para unir los dos extremos de la cadena se utiliza un casquillo con un bulón especial (eje de cierre), asegurado mediante una tuerca o un pasador.

La cadena va situada sobre un conjunto de ruedas interiores

FIGURA 2.- COMPONENTES DE LA CADENA AGRÍCOLA



que la accionan o le transmiten, de manera más o menos uniforme, el peso del vehículo. Al conjunto de todos los órganos que componen la cadena se conocen frecuentemente como 'rodaje'.

El accionamiento lo realiza una rueda motriz, también conocida como rueda de 'cabillas', situada en la parte trasera del rodaje, y en la parte delantera se sitúa la rueda guía, que en las cadenas de los tractores agrícolas y vehículos de baja velocidad, actúa como elemento tensor. En las cadenas para tractores de gran potencia que se utilizan en movimiento de tierras, la cadena toma forma triangular, con dos rodillos tensores delante y detrás y un tercer rodillo motor, situado en un plano más elevado, accionado por el eje de salida de la transmisión.

El bastidor que soporta todos los componentes de la cadena incorpora otros elementos,

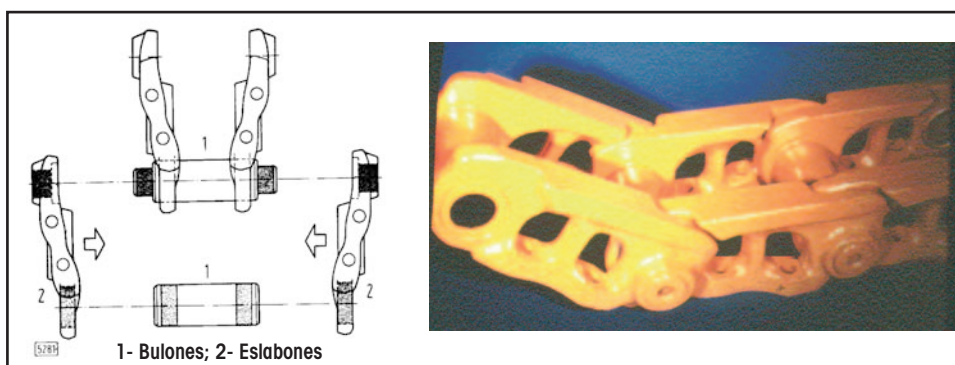
como son los rodillos de apoyo, que transmiten la carga, de manera más o menos uniforme, a la cadena, y, en el ramal conducido, uno o varios rodillos de sujeción.

La carga del tractor sobre la cadena se realiza, por una parte, a través del mismo eje que transmite el movimiento, aunque a medida que el tractor aumenta de tamaño se utiliza una viga más avanzada, que apoya sobre los bastidores que soportan los rodillos de apoyo. En la parte delantera hay otro apoyo, generalmente una ballesta, que da flexibilidad para que las cadenas se ajusten a las irregularidades del suelo (Fig. 4).

La rueda motriz construida de acero fundido tratado, tiene dientes endurecidos, que son los que enganchan en los bulones, y la rueda guía dispone de un resalte central para dirigir la cadena. Sobre ella actúa el tensor que mantiene a la cadena en posición de trabajo, solución mecánica utilizada generalmente para las cadenas de baja velocidad (12-14 km/h) y suelos con grandes obstáculos.

En las cadenas de alta velocidad (más de 50 a 60 km/h) y suelos con grandes obstáculos la construcción de los elementos es ligeramente diferente. La rueda motriz y la rueda guía se sitúan en un plano superior, de manera que los ramales de la cadena que llegan a ellas desde los

FIGURA 3.- ESLABONES DE LA CADENA Y FORMA EN LA QUE SE UNEN ENTRE SÍ



1- Bulones; 2- Eslabones

rodillos de apoyo forman cierto ángulo con la horizontal. Además, estas ruedas o rodillos de apoyo pueden estar dotadas de un dispositivo de suspensión independiente que favorece la adaptación de la cadena a las irregularidades del terreno.

Esta solución constructiva, fabricada con menos precisión dimensional para reducir los costes de producción, se utiliza en tractores agrícolas de origen ruso, especialmente adaptados para desplazarse sobre suelos con grandes obstáculos (árboles derribados) y en trabajos forestales sobre suelos helados. Con este sistema se da prioridad a la facilidad de desplazamiento en condiciones de suelos con obstáculos, frente a la uniformidad de distribución de las cargas sobre el suelo.

Acciones entre cadena y suelo

La velocidad teórica de avance del vehículo de cadenas puede calcularse con la expresión:

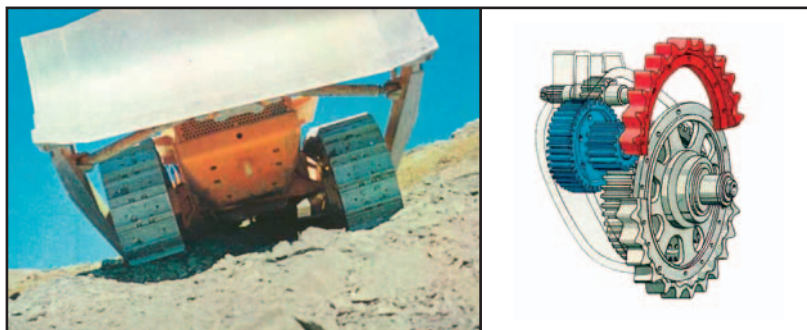
$$v_t = w_1 \times r_1$$

siendo:

w_1 = velocidad angular de la rueda motriz (en rad/s)

r_1 = radio de la rueda motriz (en m).

FIGURA 4.— ARTICULACIÓN FRONTAL DE LAS CADENAS EN EL BASTIDOR DEL TRACTOR MEDIANTE BALLESTA TRANSVERSAL Y DENTADO DE LA RUEDA MOTRIZ



Por otra parte, la longitud de la circunferencia de la rueda motriz es igual al número de dientes activos multiplicado por el paso de la cadena:

$$2\pi \times r_1 = t_1 \times Z;$$

$$\text{o sea: } r_1 = t_1 \times Z / 2\pi$$

siendo:

t_1 = paso de la cadena (m)

Z = número de dientes de la rueda motriz

por lo que:

$$v_t [\text{m/s}] = (t_1 \times Z / 2\pi) \times w_1 =$$

$$t_1 \times Z \times n_{1s}$$

siendo:

n_{1s} = régimen de giro de la rueda motriz (en rev/s) = $w_1 / 2\pi$

En consecuencia:

$$v_t [\text{km/h}] = t_1 \times Z \times n_1 \times 60 /$$

$$1000 = t_1 \times Z \times n_1 \times 0.06$$

siendo:

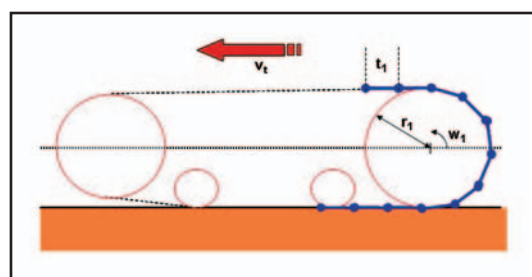
n_1 = régimen de giro de la rueda motriz (en rev/min).

Esta velocidad es una velocidad media, ya que las cadenas no son bandas elásticas, sino que están compuestas por eslabones articulados, y la velocidad real cambia con el ciclo correspondiente al ángulo de rotación de la rueda motriz. Esta oscilación periódica de la velocidad produce efectos dinámicos peligrosos en los vehículos rápidos, que se reducen acortando la longitud de los eslabones (Fig. 5).

Resistencia a la rodadura en las cadenas metálicas

La resistencia a la rodadura de los mecanismos de la cadena incluye dos componentes principales: las resistencias interiores debidas a las fuerzas de rozamiento en sus elementos (M_c/r_1) y las resistencias exteriores debidas a la deformación del suelo.

FIGURA 5.— CINEMÁTICA DE LA CADENA



CUADRO 1.- COEFICIENTES DE RESISTENCIA A LA RODADURA Y DE TRACCIÓN EN PROPULSORES DE CADENA

Naturaleza y estado del suelo	Coefficiente k	Coefficiente μ
Camino de tierra firme y seco	0.05 – 0.07	0.9 – 1.1
Suelo virgen o baldío muy compacto	0.06 – 0.07	1.0 – 1.2
Baldío 3-4 años – pradera	0.06 – 0.07	0.9 – 1.1
Rastrojo	0.06 – 0.08	0.8 – 1.1
Tierra labrada	0.08 – 0.10	0.6 – 0.8
Tierra preparada para sembrar	0.09 – 0.12	0.6 – 0.7
Suelo pantanoso seco	0.11 – 0.14	0.4 – 0.6
Camino de nieve compactado	0.06 – 0.07	0.5 – 0.7

M_C es la suma de los pares de rozamiento y depende mucho de la correcta tensión de las cadenas.

La resistencia debida a las deformaciones del suelo (R_{2x}) es similar a la que se produce en la rueda conducida y depende del hundimiento de la cadena en el suelo, y por tanto depende de la naturaleza de este.

En consecuencia, la resistencia total a la rodadura será:

$$R_k = M_C / r_1 + R_{2x}$$

Y el coeficiente de resistencia a la rodadura:

$$k = R_k / P_C = M_C / (r_1 \times P_C) + R_{2x} / P_C$$

siendo:

P_C = masa sobre la cadena.

El coeficiente de resistencia a la rodadura para la cadena del tractor agrícola se encuentra comprendido entre 0.06-0.07 en terreno compactado y 0.20-0.30 sobre suelo labrado (laboreo secundario). En **(Cuadro 1)** se presentan los valores del coeficiente de rodadura de la cadena en diferentes condiciones de suelo.

Comparando la resistencia a la rodadura de una cadena con respecto a la rueda **(Fig. 6)**, se observa que la resistencia de la rueda con respecto a la cadena (RR/RC) se incrementa a medida que lo hace la relación entre la separación entre rueda motriz y rodillo tensor de la cadena y el diámetro de la rueda (relación L/D); también resulta afectada por la relación de las anchuras entre los dos propul-

sores (BC/MR). La ventaja a favor de la cadena aumenta a medida que el suelo por el que se transita es más blando.

Al igual que para la rueda, diferentes autores han establecido ecuaciones semi-empíricas que permiten calcular de manera aproximada la resistencia a la rodadura de la cadena en función de sus parámetros dimensionales y el estado del suelo.

Así, Wismer y Luth (1971) establecen para la resistencia a la rodadura de la cadena la expresión matemática:

$$R_{2x} / P = 0.45 / T_n + 0.045$$

Siendo:

T_n = número característico de la cadena = $CI \times b \times l / P^*$

CI = índice de cono (en psi)

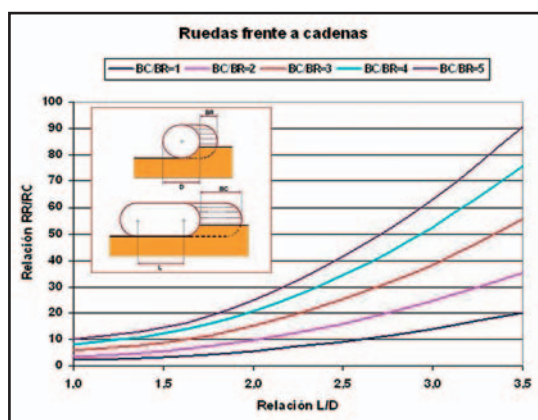
b = anchura de la cadena (en pulgadas)

l = longitud del apoyo de la cadena (en pulgadas)

P^* = carga dinámica sobre la cadena (en libras).

Esta ecuación se puede aplicar a tractores de cadenas que producen, en el área de contacto con el suelo ($P^*/b.l$), una presión de 4 a 12 psi \approx , trabajando a velocidades inferiores a 3 mph (4.8 km/h) con penetración completa de la teja.

FIGURA 6.- DIFERENCIAS EN LA RESISTENCIA A LA RODADURA ENTRE RUEDAS Y CADENAS EN FUNCIÓN DE SUS DIMENSIONES RELATIVAS



Fuente: Orlandi, mod.





■ Capacidad de tracción

La cadena, además, al igual que la rueda motriz, transmite al suelo una fuerza horizontal que asegura la propulsión y que es consecuencia del par motor. Si el suelo puede soportar este empuje, que se produce sobre toda la longitud de la cadena, el vehículo avanza venciendo las resistencias a la rodadura y arrastrando cargas adicionales enganchadas al vehículo.

El empuje que puede proporcionar la cadena, como en el caso de la rueda motriz, depende de la carga vertical sobre la cadena y su distribución sobre la superficie de apoyo.

Al igual que sucede en la rueda motriz, las fuerzas horizontales que actúan en el conjunto cadena suelo provienen, por una parte, de la resistencia que opone el suelo al avance de la cadena (R_{2x}), y por otra, de la fuerza de empuje (R_{1x}) que debe de soportar el suelo para que el propulsor avance.

En una primera aproximación, aplicando la ley de Coulomb, la fuerza horizontal que puede aplicar la cadena sobre el suelo será igual a la carga vertical multiplicada por el coeficiente de adherencia, que viene definido por la rotura del suelo en el plano que definen las garras de la cadena. Esta sería la situación límite, ya que una vez producida la rotura del suelo, y, de acuerdo con la naturaleza de este, el valor de coeficiente cambia, y puede relacionarse con el

deslizamiento del propulsor en el avance.

La relación entre el empuje bruto (sin descontar las pérdidas por rodadura) que puede proporcionar un propulsor de cadenas y la carga vertical sobre el mismo, según Wismer y Luth (1971), viene definida por la expresión:

$$R_{1x} / P^* = 0.95 \times (1 - e^{-0.1Tn}) \times (1 - e^{-Tn\sigma})$$

siendo:

Tn = número característico de la cadena

$$= Cl \times b \times l / P^*$$

P^* = carga dinámica sobre la cadena (en libras)

σ = patinamiento.

Para predecir el comportamiento de vehículos de cadena en aplicaciones militares se han desarrollado modelos matemáticos que determinan la probabilidad de paso por una determinada zona de una unidad o de un tren de vehículos.

Estos modelos toman como referencia el Índice de Cono (CI) del suelo, hasta una determinada profundidad en función de la masa del vehículo, y otras características mecánicas del mismo, que definen su capacidad portante, utilizando como parámetro básico el MI (*Mobility Index*). Para las cadenas de uso agrícola las ecuaciones de predicción inicialmente desarrolladas por Zoz, Wismer y Luth, ofrecen una precisión suficiente (Fig. 7) y (Fig. 8).

En consecuencia, el empuje neto será:

$$E_C / P^* = (R_{1x} / P^*) - (0.45 / Tn + 0.045)$$

El par en la rueda motriz de la cadena será:

$$M_1 / (P^* \times r_1) = 0.95 \times (1 - e^{-0.1Tn}) \times (1 - e^{-Tn\sigma})$$

o sea:

$$M_1 = 0.95 \times (1 - e^{-0.1Tn}) \times (1 - e^{-Tn\sigma}) \times P^* \times r_1$$

siendo:

r_1 = radio de la rueda motriz de la cadena

La distribución de las reacciones horizontales del suelo en las garras es variable y depende de la carga, de las formas constructivas y de las condiciones de

FIGURA 7.- SISTEMA DE FUERZAS QUE ACTÚA SOBRE LA CADENA

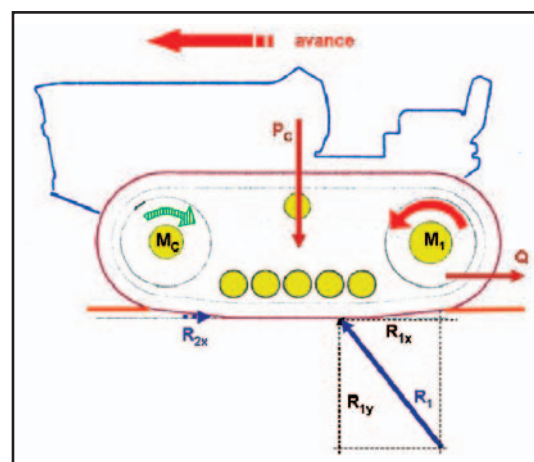
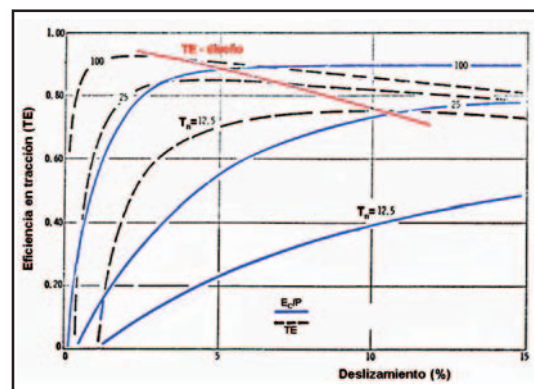


FIGURA 8.- PRESTACIONES DE LA CADENA (LUTH, 1971)



LA CADENA

**TRANSMITE AL SUELO
UNA FUERZA
HORIZONTAL QUE
ASEGURA LA
PROPULSIÓN Y QUE ES
CONSECUENCIA DEL PAR
MOTOR**

utilización del vehículo. Según datos experimentales para tractores de cadena metálica la distribución es la siguiente:

- Esfuerzo de tiro débil: agarre distribuido principalmente en las garras de las tejas delanteras (puntas entre 100 y 600 daN).
- Esfuerzo medio (1000 a 2000 daN): reacciones distribuidas en todas las garras con puntas en las frontales de 150 a 250 daN.
- Esfuerzo elevado (2500 a 4500 daN): reacciones de 150 a 250 daN concentradas en el centro de la cadena.

La distribución de las cargas verticales depende de la posición del centro de gravedad del vehículo y de las cargas dinámicas que se generan durante el trabajo.

Para tractores agrícolas que realizan operaciones que demandan tracción, o utilizan equipos suspendidos, conviene el centro de gravedad se encuentre ligera-

mente por delante del punto medio de la longitud del apoyo de la cadena en el suelo.

Se da como recomendación que el centro de carga se encuentre entre el 5 y el 8% por delante de la longitud del apoyo. Si se utilizan equipos suspendidos pesados en el enganche tripuntal, conviene aumentar la masa frontales de lastre.

En tractores industriales dirigidos a operaciones de movimiento de tierra, con empujadores, el centro de gravedad se suele sitúa por detrás de la mitad de la longitud de apoyo de la cadena (**Fig. 9**).

Como consecuencia del esfuerzo que se aplica al suelo, se produce una reducción del avance, o patinamiento, que define, al igual que para la rueda, como la pérdida de velocidad de avance dividida por la velocidad teórica, que es equivalente a:

$$\delta = 1 \times (v / v_t) = 1 \times (r / r_t)$$

siendo:

r = radio real de rodadura.

Se puede decir que el patinamiento es proporcional al esfuerzo de tracción, si se mantiene constante la cara dinámica sobre la cadena.

Eficiencia de la cadena metálica

La eficiencia en tracción de la cadena metálica se puede calcular dividiendo el producto del empuje por la velocidad real de avance entre el producto del par motor en la rueda motriz por su velocidad angular, o sea:

$$\eta_c = (R_{1x} - R_{2x}) \times v / M_1 \times \omega_1$$

siendo:

R_{1x} = empuje de la cadena en el suelo

R_{2x} = resistencia del suelo al avance de la cadena

v = velocidad real de avance

M₁ = par en el eje de la rueda motriz de la cadena

ω₁ = velocidad angular de la rueda motriz de la cadena.

Al igual que en la rueda, la eficiencia total de la cadena η_c será el producto de la eficiencias en la transmisión, en rodadura y en patinamiento.

Para calcular la eficiencia de la transmisión hay que considerar dos aspectos: lo que son las pérdidas entre el volante del motor y la salida a la rueda motriz de la cadena, y lo que son las pérdidas en el conjunto de elementos mecánicos que componen la cadena.

Tomando sólo en consideración las pérdidas en la propia cadena, la eficiencia de la cadena como propulsor será:

$$\eta_c = \eta_r \times \eta_k \times \eta_\delta$$

siendo:

η_r = eficiencia en la cadena

η_k = eficiencia en rodadura

η_δ = eficiencia en deslizamiento

Dejando al margen las pérdidas en la transmisión del movimiento entre el motor y las ruedas motrices de un propulsor por cadena metálica, que pueden estar entre el 12 y el 18%, las derivadas de la rodadura de la cadena, junto con los rozamientos que en la misma se producen, para un propulsor de aplicación agrícola, pueden ser del 85 al 93% de las pérdidas totales en propulsor, y el resto debidas al patinamiento.

LUIS MÁRQUEZ

FIGURA 9.- VARIACIÓN DE LA REACCIÓN VERTICAL DEL SUELO EN FUNCIÓN DEL ESFUERZO DE TRACCIÓN REALIZADO

