

EL TRÁFICO AGRÍCOLA Y LA RESPUESTA MECÁNICA DEL SUELO

RESUMEN: El tractor agrícola, a diferencia de cualquier otro automóvil, está diseñado y concebido como vehículo automotriz cuya principal función es realizar trabajos de tracción. Es un verdadero “motor de tracción” que no sólo debe ser capaz de autotransportarse sino que debe entregar una fuerza neta de tracción para arrastrar los diferentes implementos sobre un suelo agrícola siempre deformable. De los factores de la potencia, el tractor priorita la fuerza y no la velocidad. Para ello es necesario disponer de un vehículo pesado con rodados de suficiente tamaño como para no sobrepasar la capacidad de hundimiento del suelo ni la máxima resistencia al corte por cizalladura. La resistencia al avance y el patinamiento son dos pérdidas de potencia que pueden anular la eficiencia tractiva del tractor. El desafío es aprovechar las reacciones que brinda el suelo para maximizar el rendimiento en las diferentes situaciones de trabajo. Para obtener la máxima potencia a la barra, es necesario variar la relación peso/potencia

en el eje, según la velocidad de trabajo seleccionada. Las ruedas motrices deben tener un tamaño suficiente como para soportar la carga normal necesaria, a las mínimas presiones de inflado recomendadas por el fabricante. Es también imprescindible armonizar el esfuerzo de tracción demandado con el peso adherente disponible de modo de alcanzar patinamientos cercanos al 13-15%. Si estas cuestiones pueden ser llevadas a la práctica, es factible minimizar las diferencias de prestación tractiva entre los distintos diseños constructivos de tractores.

1. INTRODUCCIÓN. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA.

La forma más común de demandar energía al tractor es a través del trabajo de tracción. La producción agrícola sigue teniendo como característica modal la necesidad de recorrer grandes distancias. Un número importante de implementos se vinculan a través de la barra de tiro del tractor siendo ésta sin duda, la forma más ineficiente de absorber potencia. La demanda de potencia rotacional (a través de la toma posterior de potencia) y la utilización de la potencia hidráulica (a través de sistemas hidráulicos) son alternativas no

siempre posibles y en Argentina poco frecuentes en muchos sistemas productivos.

El tractor, como “motor de tracción”, no sólo debe ser capaz de generar suficiente energía como para autotransportarse sino, entregar un remanente de fuerza como para poder realizar el trabajo de tracción demandado, empujar o arrastrar un apero sobre un sustrato siempre deformable, el suelo agrícola. Como se pretende mantener esa fuerza a lo largo de una distancia, se puede concluir en la necesidad de contar con una suficiente cantidad de potencia tractiva, comunmente llamada “potencia en la barra”, cuya expresión vale:

$$Nb = T \cdot Vr \quad (1)$$

Donde :

Nb = potencia tractiva (kW)

T = componente horizontal del esfuerzo de tiro (N)

Vr = velocidad real de avance (ms^{-1})

Entre la potencia generada en el motor (determinante del precio a pagar por el producto) y la efectivamente utilizable para los trabajos de tracción hay importantes pérdidas. Una de ellas depende de la propia eficiencia que tenga el tren cinemático que compone la transmisión del tractor. Para un tractor de diseño convencional (2RM un eje motriz) aproximadamente un 10-12% se consume fundamentalmente en fricción-rozamiento entre los mecanismos en movimiento. Es decir que entre la potencia

generada en el motor y la potencia disponible en el eje motriz hay una merma ineludible, la cual se expresa a través del rendimiento de la transmisión (η_t). Una vez diseñado el tractor, puede considerarse una pérdida de potencia fija y constante y como usuarios nada se podrá hacer para minimizarla, sólo respetar los criterios de mantenimiento aconsejados por el fabricante.

Una vez que se vinculen las ruedas ú orugas al suelo y deban encontrar suficiente reacción como para traccionar un implemento a una determinada velocidad, surgen otras pérdidas de potencia. Por un lado parte del par motor que llegó al eje de las ruedas será disminuído y por otro, la velocidad teórica de avance, en función del arreglo cinemático de la transmisión, también sufrirá una merma.

En la zona de contacto rueda-suelo se aplican acciones normales producto de la masa que deben soportar los neumáticos y tensiones tangenciales según los trabajos de tracción demandados. La rueda debe tener una superficie de contacto tal que en función del peso no sobrepase la capacidad portante del suelo, no se hunda demasiado, y ejercer una fuerza tangencial periférica, compatible con la tensión resistente del suelo al corte.

La función del neumático será, en definitiva, aprovechar las reacciones disponibles en el suelo para no sólo autotransportarse sino ser capaz de exportar suficiente fuerza de tracción compatible con

la demanda del apero. Aparecen entonces, tensiones normales a la superficie de contacto, producto de la carga normal que recae sobre la rueda; tensiones tangenciales, producto de la tracción bruta que llega a ella a través de la transmisión y fuerzas vibratorias transmitidas desde el motor que, a través de las ruedas ú orugas, son transmitidas al suelo.

A diferencia de cualquier otro automóvil, un tractor es un vehículo de alta relación peso/potencia que debe ser capaz de desarrollar trabajos de tracción y priorizar la oferta de fuerza por sobre la velocidad de desplazamiento. La necesidad de contar con un vehículo pesado y el requerimiento de ser capaz de erogar importantes esfuerzos tractivos, traen como consecuencia la deformación de los suelos. Algunas circunstancias conllevan al predominio de la deformación vertical y parte de la fuerza disponible en el eje será utilizada para vencer esa formación de huellas. Otras veces lo prioritario será la demanda de altos esfuerzos tractivos, la rueda deberá entregar una mayor fuerza tangencial, con el peligro de la deformación excesiva ó rotura del suelo por cizalladura o corte tangencial. Ambas pérdidas serán estudiadas con más detalle en apartados subsiguientes.

El problema enunciado puede resumirse en la necesidad de trasladar un vehículo de alta masa, sobre un suelo siempre deformable, durante un tiempo

acotado, ya que debe respetarse el ciclo biológico de los cultivos, y minimizar las pérdidas de potencia disponible.

La relación entre la potencia útil para los trabajos de tracción (barra de tiro ó enganche tripuntal) y la disponible en el eje motriz define la eficiencia tractiva ó rendimiento de tracción (η_T).

$$\eta_T = Nb / Neje \quad (2)$$

El desafío es entonces conocer los parámetros de los cuales depende la maximización de esta ecuación y predecir el comportamiento tractivo de los conjuntos para minimizar las pérdidas de potencia variable. Teoría de tracción es el término que comunmente se utiliza para referirse al conjunto de modelos que intentan explicar y aportar soluciones racionales a este problema.

Producto de esta interacción compleja entre la rueda y el suelo, la comprensión acabada de los fenómenos intervinientes, es dificultosa, sobre todo, comprender qué es lo que está pasando en el suelo cuando una "estructura en movimiento" lo somete a esfuerzos tan variados como compresión-tracción-corte y da como resultados muchas veces la plastificación.

Numerosos modelos empíricos se han desarrollado en la década del 70 y 80 para calcular la eficiencia tractiva sin dejar dudas acerca de los parámetros del tractor que tienen influencia decisiva sobre su prestación a campo. Sin embargo, no existe definición

aún de cuáles son las propiedades mecánicas de los suelos que determinan las respuestas. Cómo reacciona el suelo, cómo se deforma en función de las tensiones aplicadas, cuándo se rompe y en qué dirección lo hace, qué alteraciones volumétricas y constitutivas del sistema poroso ocurren, cuánto puede ser analizado a nivel de simples agregados y cuánto necesita de la ampliación hacia el complejo ámbito del suelo, son preguntas reiteradas entre los investigadores. En igual sentido, aún restan por encontrar métodos estandarizados para cuantificar las propiedades mecánicas definidas que permitan repetir los ensayos y comparar los resultados.

Resumido, hay aún muchos interrogantes en la disciplina, sobre todo en lo relativo a estudios básicos-teóricos que contribuyan al mejor entendimiento de los reales fenómenos que ocurren en la interfase rueda-suelo.

2. ANTECEDENTES GENERALES.

Evolución de los conocimientos.

A partir de las últimas tres ó cuatro décadas se ha dejado de lado el concepto del suelo como elemento singular y se ha consolidado la idea del suelo como sistema complejo conformado por factores bióticos y abióticos, que deben necesariamente

caracterizarse a partir de la suma de propiedades y no desde estudios ópticas parciales.

Conjuntamente se ha reconocido que las clasificaciones tradicionales que dividían el objeto de estudio en física, química y biología, son en verdad disciplinas con límites arbitrarios y no unívocamente definibles. Existen propuestas de clasificaciones que incluyen por ejemplo las propiedades físicas, físico-químicas, bioquímicas, biofísicas, etc. Sin embargo no todas estas disciplinas fueron desarrollándose conjuntamente y en igual magnitud. Las problemáticas relacionadas a la química ó a la biología, fueron estudiadas con anterioridad a las demás. Particularmente la física del terreno agrícola fue considerada como tópico significativo de estudio en la comunidad científica, muchos años después, aún cuando las propiedades físicas determinan la mayoría de los fenómenos biológicos.

Durante la segunda guerra mundial, y fundamentalmente para resolver problemas de tránsito de vehículos militares, nació una disciplina denominada Locomoción Extraviaria, cuyo objetivo fundamental fue predecir la capacidad de paso de un vehículo con parámetros conocidos y fácilmente cuantificables, que debía desplazarse sobre un suelo casi desconocido. Años más tarde, su universo de estudio se amplió al campo de la ingeniería agrícola. Allí se suma a la

problemática del tránsito sobre suelos deformables, la necesidad de maximizar el rendimiento tractivo de los conjuntos que sobre él se desplazan.

Su desarrollo coincide con la mecanización total de la producción agropecuaria y se ve favorecido cuando se incrementan significativamente la masa de los tractores y por ende la magnitud de las cargas normales y tangenciales que pretenden aplicarse sobre el suelo. También incidió, la toma de conciencia colectiva, por fuera de la comunidad científica, de la externalidad de los procesos productivos, los cuales pueden generar consecuencias ambientales indeseables perdurables en el tiempo.

Problemas tales como la pérdida de productividad de muchas regiones cultivables, la erosión de inmensas regiones del planeta, la contaminación química de las napas freáticas, la salinización y la compactación de los suelos, presionaron a la comunidad científica internacional para la búsqueda de soluciones y la generación de los límites necesarios que racionalicen la producción alimentaria sin comprometer el que debe ser recurso de futuras generaciones.

El aumento de la demanda de alimentos, obligó a la incorporación de terrenos marginales como zonas productivas. Surgió luego, la preocupación por la conservación de los recursos energéticos y el

encarecimiento de los combustibles. Por último, durante la década del 70 y 80 la prioridad fue maximizar la eficiencia tractiva, minimizar las pérdidas de potencia que aparecen cuando una rueda neumática debe vincularse a un terreno con escasa capacidad portante y limitada reacción al corte tangencial.

El problema de la compactación de los suelos es quizás la temática que más desarrollo ha tenido en la última década, demostrándose una vez más, que una vez instalado un problema siempre complejo y la mayoría de las veces con consecuencias negativas sobre otros aspectos colaterales, la solución es desde el punto de vista ingenieril muy difícil, y desde la óptica económica prácticamente inviable.

En la locomoción extraviaria o fuera de ruta están involucradas cuestiones referidas al vehículo y fundamentalmente propiedades mecánicas de los suelos. Es por ello que esta disciplina es también denominada "relación rueda-suelo" ó terramecánica. La problemática de la locomoción fuera de ruta nació conjuntamente con la invención de la rueda, alrededor del año 3500 AC. Sin embargo y a pesar de la utilización de vehículos tractivos en la agricultura desde comienzos del siglo xx, los progresos tecnológicos estuvieron basados en el empirismo, y en la metodología de "prueba y error". Recién hacia la mitad de la última centuria,

comenzaron los estudios sistemáticos tendientes al desarrollo racional de los vehículos.

3. ALCANCES DE LA TERRAMECANICA.

Como se mencionara, la agricultura demanda el traslado de conjuntos sobre un sustrato particular, que para este estudio, sólo sirve de soporte que brinda las reacciones suficientes como para evitar hundimientos exagerados ó patinamientos elevados. El suelo es quien define, a ultranza, la capacidad de paso de un vehículo y la eficiencia del trabajo realizado. Es el suelo quien puede definir que la rueda malgaste su energía disponible en la formación de huellas. Es el suelo quien puede llegar a inmovilizar al tractor haciendo que la velocidad real de avance se anule y por ende también el rendimiento tractivo.

A modo de resumen se pueden enunciar las principales características del tráfico agrícola :

- 1.- Traslado sobre un sustrato trifásico, siempre deformable, no homogéneo, con propiedades variables en el tiempo y en el espacio.
- 2.- Aplicación de cargas en movimiento, con velocidades de desplazamiento lentas
- 3.- Oportunidad de labor acotada para adecuarse al ciclo biológico de los cultivos

4.- Aplicación de altas cargas normales, con el consiguiente peligro de sobrepasar la capacidad portante del suelo

5.- Aplicación de elevados esfuerzos tangenciales, los cuales deben ser inferiores a las tensiones máximas que soporte el suelo para evitar deformaciones que conduzcan a patinamientos excesivo de los vehículos.

6.- Respeto por las condiciones óptimas necesarias para el desarrollo radicular, evitar consecuencias desfavorables para el crecimiento posterior de los cultivos.

Todas estas particularidades conforman un sistema suelo-vehículo muy complejo que demanda de soluciones interdisciplinarias. Hasta los años 80 por un lado, aparecían las soluciones que aportaban los agriculturalistas, cuyo objeto de estudio se circunscribía a los cultivos y sus necesidades. Por otro lado, estaban los enfoques netamente ingenieriles cuyo meta era maximizar la capacidad tractiva de los tractores, sin prestar demasiada atención a las consecuencias sobre el suelo y el desarrollo de las plantas. A partir de esos años , y fundamentalmente a partir de los trabajos de K. Bekker (1905-1989) la comunidad científica tomó conciencia de que el sistema involucra el suelo-la máquina- el cultivo, por ende la interdisciplina es el camino más racional y seguro para alcanzar las soluciones buscadas.

Basado en las características del tráfico agrícola, pueden resumirse los objetivos de la Terramecánica en:

- 1.- Encontrar los principales aspectos relacionados con la performance de los vehículos para propender al desarrollo racional de los diseños.
- 2.- Caracterizar y cuantificar los principales parámetros que expliquen el comportamiento mecánico del terreno
- 3.- Evaluar metodologías de ensayo a campo de los vehículos y máquinas ya diseñadas para cuantificar sus prestaciones
- 4.- Predecir las consecuencias del tráfico sobre otros aspectos edáficos, biológicos y ambientales.

A pesar de las consideraciones ya enunciadas, hay dos propiedades mecánicas del suelo que fácilmente se pueden relacionar con las pérdidas de potencia enunciadas más arriba. Ellas son, la resistencia máxima del suelo al corte y la resistencia a la penetración que expresa la capacidad de soporte del suelo.

4. RESISTENCIA DEL SUELO AL CORTE

Se define como la resistencia al resbalamiento de una capa de suelo sobre otra inmediatamente contigua. Fue estudiada por Charles A. Coulomb (1736-1806) quien

concluyó que el suelo no se comporta como un sólido metálico. Las partículas minerales, asociadas siempre a las fases gaseosa y líquida, reaccionan de manera diferente a como lo hacen los sólidos metálicos monofásicos. La ecuación que explica los factores involucrados es:

$$\tau = c + \sigma e \operatorname{tg} \varphi \quad (3)$$

Donde:

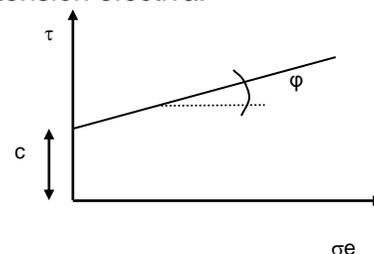
τ = tensión máxima de corte del suelo (kPa)

c = cohesión del suelo (kPa)

σe = tensión normal efectiva en el plano de rotura (kPa)

φ = ángulo de rozamiento interno del suelo

Los cambios medibles de tensión, son debidos exclusivamente a modificaciones en la tensión efectiva, la cual surge de la diferencia entre la tensión normal total y la tensión neutra o presión en los poros de agua : $\sigma e = \sigma t - u$. Cuando se aplica una carga sobre el suelo, es soportada en principio por el agua retenida en los poros y por los sólidos del suelo. El incremento en la presión dentro de los poros con agua, causa el drenaje de la misma y la carga puede ser transferida a las partículas sólidas, ésta es la tensión efectiva.



La cohesión representa la atracción por la cual se mantienen unidas entre sí las partículas y agregados del suelo. Incluye la cohesión molecular ó verdadera y la superficial ó aparente. La primera, es inherente a las cargas eléctricas. Es una propiedad característica de las arcillas y de la doble capa o capa difusa que las separa. El factor decisivo que determina un valor elevado de cohesión molecular es la amplitud de la capa difusa y el agua presente en el suelo. Si hay suficiente cantidad de agua, sus moléculas se interponen entre las partículas de arcilla, no dando lugar a la aparición de las fuerzas de atracción y la cohesión molecular será despreciable.

Por el contrario si la arcilla está seca, con porcentaje de humedad por debajo del límite de retracción, habrá más probabilidad de que prevalezcan las fuerza de atracción y la cohesión será máxima. En este momento, la resistencia intra agregados determina que la labranza del suelo sólo reordenará los terrones sin producir la roturación buscada.

La cohesión superficial, viene determinada por la tensión superficial que aparece en los meniscos de agua presentes en los poros antes de alcanzar la saturación. Cuando el porcentaje de humedad es suficiente como para que aparezcan suficiente cantidad de meniscos, en estado de consistencia plástica, la cohesión superficial será elevada.

El rozamiento interno está dada por la rugosidad o aspereza producto de la naturaleza de las partículas del suelo que determinan la trabazón entre ellas. Las partículas de arena, de gran tamaño y forma y bordes irregulares, tienen elevado rozamiento interno.

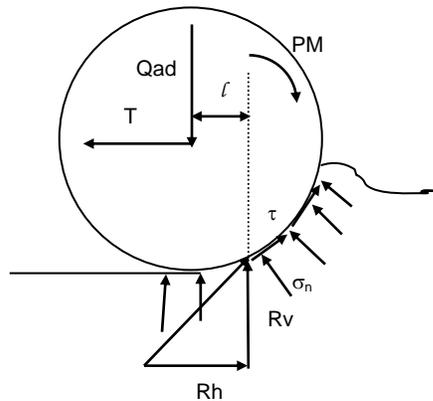
Se puede convertir la ecuación de Coulomb en fuerza máxima simplemente multiplicando todos sus términos por la superficie vinculante y visualizar más claramente qué parámetros son inherentes al suelo y no modificables por el usuario y cuáles sí:

$$F_{m\acute{a}x} = c s + Qadh tg\varphi \quad (4)$$

Aumentando tanto la superficie de contacto como el peso adherente se puede alcanzar un mayor valor de $F_{m\acute{a}xima}$.

4.1 EL PATINAMIENTO: DEFINICIÓN Y FORMAS DE MEDICIÓN

Para visualizar cómo y porqué se alcanza la rotura del suelo cuando un tractor patina, es conveniente resumir qué fuerzas intervienen en el caso de una rueda motriz. Como toda rueda, debe soportar un valor de carga normal (Q) y gracias a que recibe un par motor en el eje (PM) es capaz de entregar una fuerza neta de tracción (T).



Rueda motriz:

$$\sum F_y = 0 = Q_{ad} = R_v$$

$$\sum F_x = 0 = T = R_h$$

$$\sum M = 0 = PM - R_h r - R_v l$$

$$F r - T r - Q l = 0$$

$$F = T + Q k$$

$$F = T + R \quad (5)$$

Donde:

T = componente horizontal del esfuerzo de tracción

PM = par motor en el eje = fuerza tangencial (F) x radio de la rueda (r)

l = distancia desde la línea de acción de la componente vertical de la reacción hasta el eje de la rueda.

r = radio de la rueda

La ecuación (5) es conocida como ecuación general de la Terramecánica y expresa que la fuerza total que llega al eje, fuerza bruta de tracción, deberá utilizarse en parte para vencer el autotransporte ó resistencia al avance, y el resto, estará

disponible para realizar trabajo de tracción. Otra forma de decirlo es que la fuerza neta de tiro disponible es aquella que surge de la diferencia entre la fuerza que llega al eje, según la marcha seleccionada, y la fuerza que demande la rodadura del tractor. La fuerza tangencial demandada al eje, debe encontrar en el suelo la correspondiente reacción, para evitar deformaciones indeseadas, por lo tanto no debe nunca superar a la $F_{m\acute{a}x}$ que calculamos en el capítulo anterior.

Cada vez que una rueda aplique un determinado valor de torque en el suelo, su recorrido no es equivalente al traslado producto de su velocidad angular por el radio ($\omega.r$). El patinamiento puede definirse como el movimiento relativo entre el elemento que tracciona y el suelo subyacente. O el deslizamiento de la capa superior del terreno respecto a la inferior contigua, en sentido contrario al de avance del vehículo determinando que la velocidad tangencial desarrollada sea menor que la teórica. Cuanto mayor sea el esfuerzo de tracción demandado, mayores serán las deformaciones del suelo, la principal causa del patinamiento es entonces, el esfuerzo de tracción demandado.

El patinamiento puede expresarse como la diferencia entre la velocidad teórica del tractor y la real. Esta diferencia de velocidades es producto del corte del suelo y su desplazamiento por debajo del rodado,

con la consiguiente disminución de la capacidad de trabajo del conjunto. Puede expresarse como:

$$Pat(s) = \frac{Vt - Vra}{Vt} \times 100 \quad (6)$$

Siendo Vt = velocidad teórica

Vra = velocidad real de avance

Esta discordancia cinemática puede medirse fácilmente a campo. Una alternativa es medir el tiempo transcurrido para recorrer una distancia conocida y calcular la velocidad de avance como el cociente entre distancia y tiempo. Esta operación deberá realizarse con el tractor en vacío para calcular la velocidad teórica ó el cero de referencia y luego con el tractor trabajando, a la profundidad y en las condiciones de velocidad que se pretendan desarrollar en la situación real de estudio. Esta segunda determinación servirá para calcular la velocidad real y por diferencia calcular el porcentaje de patinamiento presente. Sin embargo para estar seguros de que la pérdida de velocidad es debida exclusivamente al patinamiento, debe corroborarse que en ambas condiciones, el régimen de funcionamiento del motor sea el mismo, es decir que la carga demandada no haya bajado las vueltas del motor. Esta condición, muy difícil de cumplir, determina una restricción para este método.

Otra alternativa es registrar la diferencia de espacio recorrido que se presenta cuando un tractor patina . Para ello lo más aconsejado es medir la distancia

recorrida para un número de vueltas fijo de la rueda en ambas situaciones: tractor en vacío y bajo carga. Para el cálculo del patinamiento es necesario conocer la distancia sin carga ($d_{s/c}$) y la distancia con carga ($d_{c/c}$) :

$$Pat(s) = \frac{d_{s/c} - d_{c/c}}{d_{s/c}} \times 100$$

Las principales consecuencias de un alto porcentaje de patinamiento son, las pérdidas de tiempo que ocasiona, el aumento en el consumo de combustible, el desgaste exagerado de neumáticos.

Si la velocidad real del tractor termina siendo cero producto de un patinamiento del 100%, la potencia disponible para trabajos de tracción se anula. Por lo tanto, el patinamiento es una pérdida de potencia tractiva producto de un disminución de velocidad. No es una pérdida de fuerza, por el contrario conviene pensar que la fuerza demandada es tan grande que el suelo no la resiste.

4.2. ALTERNATIVAS DISPONIBLES PARA LA DISMINUCIÓN DEL PATINAMIENTO.

Ante la ocurrencia de esta problemática, existen diferentes alternativas de solución. Los factores involucrados para aumentar la reacción presente en el suelo, aparecen en la ecuación (4). La cohesión es una propiedad inherente a los suelos con

altos porcentajes de arcilla, suelos con partículas de muy pequeñas dimensiones, de forma casi lenticular y con bordes lisos. Una muestra de arcilla pura, limpia y seca, prácticamente tiene un ángulo de rozamiento interno cero y la resistencia al corte que manifieste se debe exclusivamente a su cohesión molecular. Además, esas pequeñas partículas dejan entre sí pequeños espacios porosos que determinan otras características de este tipo de suelo que son su baja permeabilidad, su lento drenaje y su porosidad total basada casi exclusivamente en microporos.

La aplicación de cargas normales durante un tiempo muy acotado, en este tipo de sustratos, determina que sea el agua y no la granulometría del suelo quien soporte ese mayor peso. La tensión normal entonces no se traduce en tensión efectiva sino en lo que se conoce como tensión neutra. Para traducir el aumento de carga normal en mayor reacción del suelo, es necesario dejar esa estructura un tiempo suficientemente grande como para evacuar el agua retenida con mucha fuerza en esos pequeños poros.

Estas cuestiones llevan a concluir que la mejor vía para aumentar la reacción de un suelo arcilloso ante problemas de patinamiento, es aumentar la superficie de contacto rueda-suelo. La colocación de rodados duales o de neumáticos de mayor tamaño (ancho de la banda de rodamiento ó alto) son alternativas

posibles. El consejo debiera ser, “pasar el problema por encima, flotar y no pretender encontrar mayor reacción en el suelo en el escaso tiempo que se dispone durante el traslado de vehículos agrícolas”. La mayor superficie, multiplicada por un importante valor de cohesión agrandará la reacción disponible en el suelo y por lo tanto disminuirá el patinaje. Desde un punto de vista estrictamente aritmético, el insignificante valor de rozamiento interno, dificulta pretender aumentar la $F_{m\acute{a}x}$ del suelo por intermedio de este término. Estas razones sumadas, pretenden dar fundamento para la necesidad ocasional de recurrir a la solución más onerosa para reducir el patinaje, como es la compra de neumáticos más altos ó más anchos. Luego se verá que la mejor solución es aumentar la superficie vinculante a través de rodados de mayor altura y no exagerar con su ancho.

Si por el contrario el problema se presenta en un suelo arenoso, con insignificante cohesión y gran ángulo de rozamiento interno, la carga normal aplicada, por la colocación de mayor número de contrapesos, se traduce inmediatamente en tensión efectiva. Los grandes espacios vacíos que quedan entre las partículas de bordes angulosos, con importante grado de trabazón entre ellas, evacuan rápidamente el agua presente. Son suelos de rápido drenaje, donde la solución más económica es factible

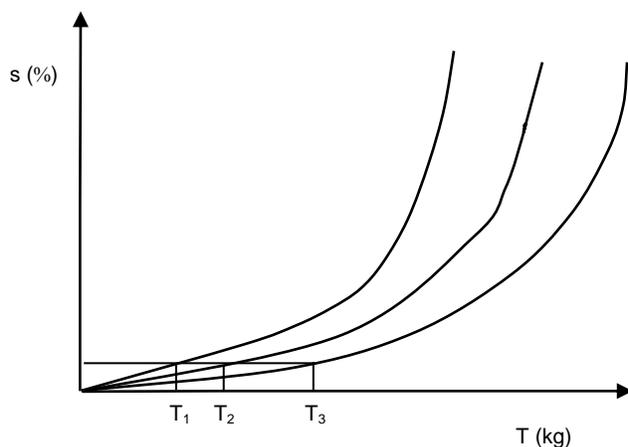
que sea suficiente como para encontrar reacción en el suelo y disminuir el patinaje.

4.3 HAY VALORES DE PATINAMIENTO ÓPTIMOS?

El patinamiento es función directa de la tracción ó carga demanda y el principal parámetro del tractor que puede contrarrestar su efecto, es el peso adherente del eje motriz (ver capítulo .I.....punto.....). Es por ello que una forma rápida para predecir el porcentaje de patinamiento, es calcular la razón entre estas dos fuerzas, denominada coeficiente de tracción (t):

$$t = T / Qadh$$

Si se representa en un eje cartesiano la relación entre el esfuerzo de tracción demandado y el patinamiento esperable, la función que resulta determina una figura característica:



Puede verse que al comienzo la relación entre el esfuerzo demandado y el patinamiento es lineal, luego hay una zona

donde pequeños aumentos del esfuerzo se corresponden con mayores incrementos de patinamiento para pasar rápidamente a una zona de crecimiento prácticamente exponencial del patinamiento con el esfuerzo de tracción. Dentro de la primera zona, con patinamientos proporcionales a los esfuerzos demandados puede expresarse:

$$T1 / Qadh1 = T2 / Qadh2 = T3 / Qadh3 = cte = t$$

Numerosos trabajos de investigación demuestran que la máxima eficiencia tractiva (Nb/N_{eje}) se alcanza cuando el coeficiente de tracción vale aproximadamente 0,4, y este valor se corresponde con patinamientos cercanos al 12-15%. Es decir que una primera hipótesis básica es, armonizar el esfuerzo de tracción demandado por el implemento con el peso adherente del tractor. La magnitud del tiro debe estar cerca del 40% del peso adherente.

Si el tamaño del implemento ó la profundidad de trabajo ó la velocidad de labor determinan que el coeficiente de tracción valga por ejemplo 0,6 la eficiencia tractiva será mucho menor debido a que la velocidad real de desplazamiento se verá reducida por los altos valores de patinamiento. Si por el contrario la demanda de esfuerzo es tan baja que el coeficiente de tracción vale por ejemplo 0,2 tampoco será posible alcanzar la máxima eficiencia tractiva ya que se estará desperdiciando capacidad de tracción, ese tractor obviamente dispone

de mucha más potencia tractiva que la realmente demandada. Esta situación de trabajo llevará a tener un motor muy descargado trabajando dentro de la zona de acción de regulador muy cerca del volumen de inyección mínimo, pero con un consumo específico muy elevado.

Un modelo sencillo para estimar el peso adherente del eje motriz es el propuesto por F.M. Zoz quien luego de numerosos ensayos a campo trabajando con tractores de diseño convencional y diferentes tipos de enganche entre la máquina y el tractor, encontró la siguiente relación entre esfuerzo de tracción demandado y peso adherente:

$Q_{ad} = Q_1 + 0.25 T$ para implementos de arrastre

$Q_{ad} = Q_1 + 0.45 T$ para implementos semimontados

$Q_{ad} = Q_1 + 0.65 T$ para implementos montados en los tres puntos del tractor

Debe decirse que estos son valores máximos esperables para cada caso. Es decir que si el enganche del implemento, vinculado al tractor a través de la barra de tiro, está correctamente realizado y el implemento está también regulado adecuadamente, como máximo el 25% del esfuerzo de tracción demandado puede sumarse al peso estático del eje motriz en concepto de transferencia dinámica.

5. CAPACIDAD DE SOPORTE DEL SUELO. RESISTENCIA A LA PENETRACIÓN.

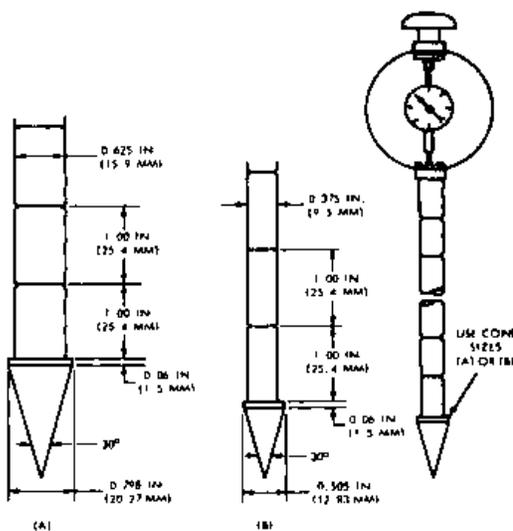
Una forma muy sencilla de definir un tractor y diferenciarlo de otro vehículo automotriz es a través de su importante relación peso/potencia y del diseño de la transmisión capaz de multiplicar los pares generados en el motor para poder convertirse en un "motor de tracción". Un vehículo pensado para utilizar la potencia en base a la fuerza y no a la velocidad. Esta importante carga normal que soportan los vehículos debe encontrar reacción en el suelo para evitar hundimientos exagerados que ocasionarán pérdidas de potencia tractiva.

En cuanto a la reacción de suelo a la compresión, los suelos responden a las presiones aplicadas de diferentes modos, teniendo cada uno su propia relación compresión-deformación.

La forma más común de caracterizar el suelo a la compresión es a través de su resistencia a la penetración. Para ello, el uso del penetrómetro de cono ó "cono de Ohio", es prácticamente universal. Este aparato, ha sido estandarizado por la Asociación Americana de Ingeniería Agrícola bajo la norma ASAE. S 313 (American Society of Agricultural Engineering, 1992). Allí se especifican dos medidas de cono, ambos de 30 °, grande de 20,27 mm y pequeño de 12,83 mm de diámetro. También se

estandariza una velocidad de penetración de $30,5 \text{ mm s}^{-1}$. La fuerza necesaria para la penetración, relacionada a la superficie de la base del cono, termina dando como dato el Índice de cono (kPa).

El penetrómetro de cono ASAE S.313, es un dispositivo de fácil construcción y utilización, ya muy avalado por el extenso uso que muchos investigadores han hecho de él y permite hacer muchas mediciones rápidamente, lo que posibilita compensar la muy alta variabilidad horizontal que los suelos agrícolas tienen, respecto al parámetro resistencia a la penetración. Puede además, ser utilizado para explorar el perfil hasta profundidades importantes.



Este aparato es utilizado para diferentes fines tales como: estudio del perfil del suelo para la localización de posibles capas compactadas, estudios sobre

distribución y desarrollo de raíces, ecuaciones para predecir prestación tractiva de conjuntos. Sin embargo, varios autores han demostrado en esta determinación están involucrados efectos combinados de corte, compresión, tensión y fricción suelo metal, variando su participación principalmente con el porcentaje de humedad del suelo. Cuando el contenido de humedad es elevado, el suelo que se adhiere a las paredes del cono, cambia sensiblemente su geometría y el significado del parámetro registrado. Por lo tanto alertan sobre la correcta interpretación de los datos de penetrometría. Sin embargo, y como se dijo anteriormente, en las década del 70 y 80 numerosos grupos de investigación desarrollaron modelos netamente empíricos que concluyen con en el enunciado de sencillas ecuaciones para el cálculo de la eficiencia tractiva. Todos ellos utilizan el Índice de cono como parámetro de la resistencia mecánica del suelo. Seguramente la estandarización del aparato y de la metodología para la obtención del dato contribuyeron en gran medida a su amplia utilización.

A partir del dato de IC de un suelo se puede inferir la condición mecánica del mismo según esta posible clasificación:

Clase de suelo	IC (kPa)	Condiciones mecánicas
0	> 2000	Sin huellas visibles. Pastura vieja muy seca
I	900 - 2000	Sin problemas de tracción. Rastrojo

		seco del año anterior
II	450 - 900	Condiciones pobres de tracción. Rastrojo blando o tierra consolidada suelta
III	200 - 450	Marginal para el tránsito, huellas muy profundas. Suelo recién labrado.

RESISTENCIA AL AUTOTRANSPORTE O RESISTENCIA AL AVANCE.

La resistencia a la rodadura es la fuerza necesaria que el tractor debe disponer para poder avanzar y llevarse a sí mismo ó autotransportarse. Es equivalente a la suma de las componentes horizontales de las tensiones normales cuyo sentido es siempre opuesto al avance. En realidad tiene tres componentes:

$$R = R_c + R_b + R_t$$

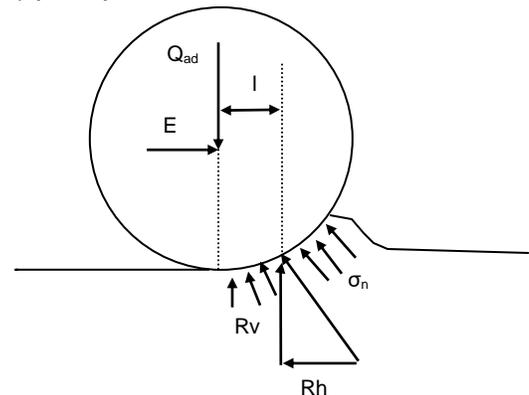
R_c = es la deformación vertical que sufre el suelo producto de la masa que soporta la rueda. Se relaciona directamente a la formación de huellas y puede verse como la fuerza necesaria para subir esa pendiente que aparece cuando se forma dicha huella.

R_b = es la fuerza necesaria para empujar y arrastrar el suelo que va explotando por delante y a los costados del neumático. En situaciones de suelo muy sueltos y rodados demasiado anchos, aunque el hundimiento sea pequeño, se forma una importante bufanda de terreno

suelto, que se ha roto por compresión, y que debe ser empujada constantemente con el consiguiente gasto de energía. Por la similitud del trabajo de una pala empujadora, se lo denomina efecto "buldozing".

R_t = es debida a la deflexión del propio neumático. Sólo es considerable ante la presencia de suelos muy rígidos y presiones de inflado muy bajas. En la mayoría de los casos no es tenida en cuenta.

Para visualizar fácilmente esta fuerza se debe recordar la situación de equilibrio que se presenta en una rueda conducida donde el par motor que recibe en el eje es cero y necesita recibir una fuerza de empuje (E) para poder avanzar:



$$\sum F_y = 0 = Q_{ad} = R_v$$

$$\sum F_x = 0 = E = R_h$$

$$\sum M = 0 = R_h r - R_v l$$

$$R_h = E = Q_{ad} l / r$$

$$E = Q_{ad} k \quad (7)$$

Donde :

Q_{ad} = peso adherente que soporta el neumático

E = fuerza de empuje

R_v = componente vertical de la reacción del suelo

R_h = componente horizontal de la reacción del suelo

l = distancia desde la línea de acción de la componente vertical de la reacción hasta el eje de la rueda.

r = radio de la rueda.

La fuerza $R_h = E$ es la sumatoria de las componentes horizontales de las tensiones normales, tiene sentido contrario u opuesto al de avance. Esta fuerza es la que se denomina resistencia al avance ó esfuerzo de rodadura . Su magnitud depende según la ecuación (7) del peso que soporte el neumático y del coeficiente de rodadura (k). Para una misma condición de carga normal cuanto más blando sea el suelo, mayor será la zona de contacto rueda-suelo, mayor el hundimiento y mayor la magnitud de las componentes horizontales de las tensiones normales. Por otro lado, para una misma condición de suelo, cuanto mayor sea el peso que recaiga sobre la rueda, mayor también deberá ser la reacción del suelo. Empujar un vehículo más pesado ó sobre un suelo con menor capacidad portante, cuesta más esfuerzo.

Un modelo sencillo para predecir el coeficiente de rodadura K es el propuesto por Wismer y Luth desarrollado para tractores de dos ruedas motrices y de construcción de carcasa diagonal. La ecuación obtenida a

partir de numerosos ensayos en diferentes condiciones de suelo y vehículos es:

$$k = 1.2 / C_n + 0.04$$

$$C_n = IC b d / Q_{ad}$$

IC = Índice cono promedio entre 0 y 6" de profundidad

b = ancho de la banda de rodamiento

d = diámetro de la cubierta sin carga

Q_{ad} = peso adherente sobre la rueda

El C_n denominado valor numérico de la rueda es un parámetro adimensional que depende fundamentalmente del dato de resistencia a la penetración del suelo. Valores típicos de C_n varían entre 30-50 para condiciones de suelos duros hasta 10-15 para suelos labrados. Aún en condiciones de suelos prácticamente indeformables, al menos el 4% del peso adherente del tractor, deberá ser utilizado para autotransporte.

Cálculo de la resistencia al avance de un tractor de diseño convencional que está tirando una rastra pesada sobre un rastrojo de soja a una velocidad de 7,4 km/h. Datos:

$$N_m = 120C.V.$$

$$Q_t = 52920 \text{ N (5400 kg)}$$

$$Q_1 = 34937 \text{ N (3565 kg)}$$

Rodados posteriores: 18.4 x 34

$$d = 1640 \text{ mm}$$

Está tirando una herramienta de arrastre que demanda un esfuerzo de tracción $T = 1500 \text{ kg}$ sobre un suelo cuyo $IC = 827 \text{ kPa (120 psi)}$

Cálculo del peso adherente sobre una rueda :

$$Q_{ad} = Q_1 + 0.25T$$

$$Q_{ad} = 3565 \text{ kg} / 2 + 375 \text{ kg} = 1970 \text{ kg} \\ = 4348 \text{ lb}$$

$$Cn = 120 \text{ psi } 18.4 \text{ pulg } 64.52 \text{ pulg} / 2174 \text{ lb}$$

$$Cn = 32.8$$

$$K = 0.077$$

$$R = Qad \text{ eje } (3940 \text{ kg}) \times k (0.077) = 303.38 \text{ kg}$$

$$\text{Potencia perdida en rodadura } Nk = 8.3 \text{ C.V.}$$

ALTERNATIVAS PARA REDUCIR EL ESFUERZO DE RODADURA

Una primera pregunta es ¿la resistencia al avance puede ser de tal magnitud que anule la potencia tractiva disponible ? Para es necesario pensar qué condiciones de suelo y vehículo maximizan esta pérdida de fuerza. Ya se ha demostrado analíticamente que cuanto más blando esté el suelo y cuanto más pesado sea el vehículo mayor será la rodadura. Una situación extrema sería, el tractor con todos los lastres colocados que pretende avanzar sobre un suelo recién labrado ó muy suelto, en una marcha alta. Esta suma de condiciones puede fácilmente determinar que el vehículo no pueda desplazarse debido a que la fuerza disponible en el eje, escasa por la alta relación de transmisión elegida, no es suficiente para vencer la deformación vertical del suelo. La resistencia al avance adquiere tal dimensión que no sólo no resta fuerza para realizar trabajos de tracción , sino que la fuerza bruta del eje iguala a resistencia al avance:

$$R = F \therefore T = 0$$

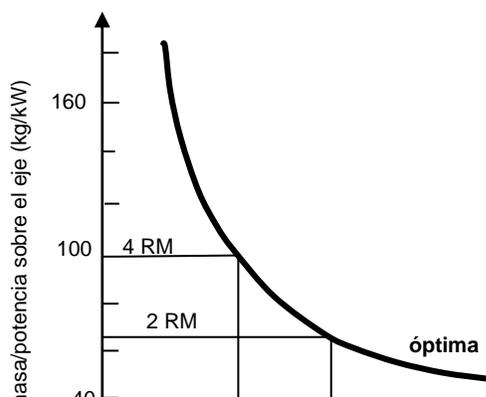
La primera consideración para achicar esta pérdida es alivianar el tractor todo lo posible, sacarle todos los lastres , de ahí la importancia de contar con lastres de tamaño no demasiado elevado y con un fácil sistema de sacado y colocación. Este aspecto ha sido considerado por algunos fabricantes de tractores y no es una cuestión menor para maximizar la eficiencia tractiva en diferentes condiciones de trabajo. Como fue dicho más arriba, para reducir el problema del patinamiento es ideal contar con un tractor pesado, mientras que para evitar la formación de huellas, es necesario tener un vehículo liviano.

Otra cuestión a tener en cuenta es la superficie de contacto rueda-suelo. Si este valor aumenta, la presión específica será menor y el hundimiento del vehículo también disminuirá. Hay varias alternativas en el mercado para lograr aumentar la superficie de los rodados: colocación de ruedas más anchas, más altas ó duales. De estas tres opciones, numerosos trabajos de investigación concluyen que el aumento del diámetro del rodado es la mejor alternativa. El aumentar la superficie en base al ancho, tiene la limitante del efecto bulldozing explicado más arriba. El hecho de contar con una gran superficie de contacto es beneficiosa para reducir las dos pérdidas de potencia estudiadas, patinamiento y rodadura.

¿CÓMO LOGRAR LA MÁXIMA EFICIENCIA TRACTIVA?

El objetivo como usuarios del tractor es hacer máximo el valor del rendimiento tractivo. Un parámetro del tractor agrícola que ha evolucionado en los últimos años, es la relación peso/potencia. Era común en la década del 50 y 60 que los tractores tuvieran una relación cercana a los 60 kg/C.V.

Con posterioridad, la tendencia (fundamentalmente en Europa) fue diseñar vehículos más livianos, con valores extremos muy amplios entre la masa del tractor sin lastres y aquella con todos los lastres colocados, valores entre los 30 kg/C.V. hasta 50 kg/C.V. Dos tractores de igual potencia en el motor pero de muy diferente relación peso/potencia pueden ambos alcanzar la misma eficiencia tractiva. La diferencia será que el más pesado lo hará cuando entregue un mayor valor de fuerza y por ende se desplace a menos velocidad. Será eficiente con implementos de mayor ancho de trabajo y velocidades lentas. El vehículo más liviano para alcanzar la misma capacidad de trabajo y la misma eficiencia deberá desplazarse a mayores velocidades y realizando menores esfuerzos de tracción, la opción será equipos de escaso ancho de labor y marchas altas



Este gráfico representa la relación entre la velocidad de avance y la relación peso/potencia. Una forma de encontrar la relación analítica entre estos parámetros aquí representados, es recordar que la máxima eficiencia tractiva se corresponde con un coeficiente de tracción de aproximadamente 0.4 y que en buenas condiciones de tracción (suelo duro y adecuados neumáticos) se puede alcanzar un valor de 0.7 de eficiencia tractiva neta (N_b/Ne_{je}).

Por lo tanto:

$$N_b / Ne_{je} = 0.7$$

$$T Vr = 0.7 Ne_{je} \quad \text{Reemplazando } t = 0.4$$

Qad

$$0.4 Q_{adh} Vr = 0.7 Ne_{je}$$

$$\boxed{Q_{adh} / Ne_{je} = 1.75 / Vr}$$

Esta relación es la que aparece en la fig ()

A partir del gráfico puede verse que para alcanzar la eficiencia óptima a 6.5 km/h de velocidad de avance, es necesario tener una relación peso/potencia en el eje de 100 kg/kw (73.6 kg/C.V.). Debe recordarse que como peso adherente debe incluirse el peso

estático y las cargas dinámicas debidas a la transferencia de peso que aparecen producto de realizar trabajos de tracción, las cuales obviamente serán significativamente mayores si el implemento es montado en los tres puntos del sistema hidráulico. La capacidad de lastre de los neumáticos tiene un límite y estará muy relacionada con la presión de inflado. El fabricante de las ruedas entrega una tabla donde el usuario encontrará estos valores para cada situación. De todas formas la eficiencia tractiva óptima debería encontrarse preferentemente con la mínima presión de inflado recomendada según la carga normal en el eje. Cada vez que se aumente la presión de inflado por sobre el mínimo recomendado, se estará reduciendo el área de contacto rueda-suelo (fundamentalmente en rodados diagonales) y se estará contribuyendo a aumentar la compactación del suelo.

Sin embargo, la realidad muestra que prácticamente ningún tractor de diseño convencional puede lograr una relación de 73.6 kg/C.V. de potencia en el eje (algo más de 80 kg/C.V. de potencia en el motor). En la fig. () aparece la relación peso/potencia que comúnmente tienen los tractores de dos ruedas motrices, la cual se acerca a los 50 kg/C.V. para trabajar con la mínima presión de inflado recomendada. Esta relación implica que para que ese tractor alcance su máxima eficiencia deberá desplazarse a una velocidad muy cercana a los 10 kmh⁻¹ . Esta

velocidad no es la que comúnmente se usa para trabajar con implementos de altos esfuerzos traccionales. Por otro lado también aparece la relación peso/potencia típica de los tractores 4 ruedas motrices todas de igual tamaño. Estos vehículos tienen normalmente un tamaño de rodados que permite alcanzar la relación peso/potencia óptima para desplazarse a velocidades lentas, para trabajos de altos esfuerzos de tracción.

El problema es entonces el correcto dimensionamiento de los rodados, que en el caso de los tractores de diseño convencional, generalmente están por debajo de lo aconsejable. A modo de ejemplo podría decirse que un tractor de 100 C.V. de potencia que normalmente tiene colocados neumáticos 18.4-34 debería tener 23.1-30 singles ó 18.4-34 duales. De esa forma podría alcanzar la eficiencia tractiva óptima que se acerca a 0.7 (Nb/Neje). Es verdad que existen algunas dificultades de orden práctico que pueden aparecer con neumáticos de mucho tamaño, como el trabajo dentro del surco, ó la imposibilidad real de alcanzar los valores de citados si se utilizan implementos de arrastre. La transferencia de peso de un implemento vinculado a través de la barra de tiro del tractor nunca supera el 25% del esfuerzo de tracción demandado. Por ello sería importante poder transferir mayor carga con

la utilización de implementos semimontados ó montados.

Recomendaciones finales:

1) Adecuar la relación peso/potencia según la velocidad de trabajo, para velocidades algo superiores a los 6 kmh^{-1} la relación debiera acercarse a los 100 kg/kW (74 kg/C.V. en el eje) ó como mínimo a 80 kg/kW (59 kg/C.V.)

2) Armonizar el esfuerzo de tracción demandado hasta aproximarse al 40% de peso adherente del eje motriz. Eso redundará en valores de patinamientos cercanos a los 15%.

3) Asegurarse que la presión de inflado de los neumáticos esté de acuerdo a la carga soportada, según las recomendaciones del fabricante y dentro de los valores mínimos recomendados.