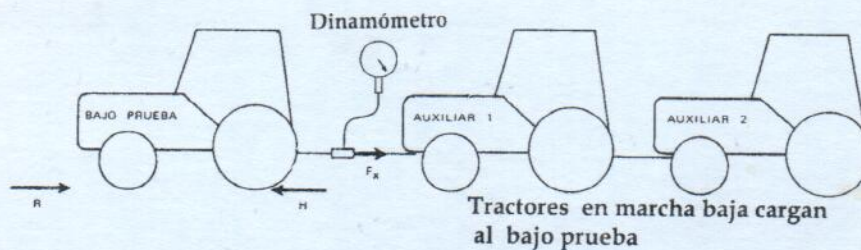




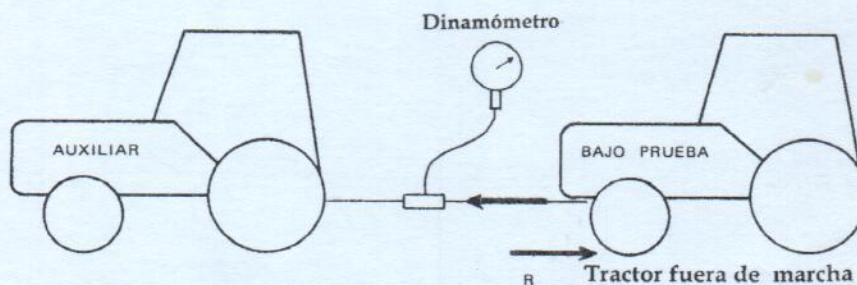
**UNIVERSIDAD DE CONCEPCION
DIRECCION DE EXTENSION**

**FACULTAD DE INGENIERIA AGRICOLA
CAMPUS CHILLAN**

**DESARROLLO DE TRACCIÓN
EN TRACTORES AGRÍCOLAS**



Medición de tracción



Medición de resistencia al rodado

**Autores: Edmundo Hetz H.
Ing. Agrónomo, Ph.D.
Mirta Brevis I.
Ing. Ejec. Mecánico**

**DEPARTAMENTO DE MECANIZACIÓN Y ENERGÍA
Abril 2005**

Boletín de Extensión N° 73

Chillán

UNIVERSIDAD DE CONCEPCION
FACULTAD DE INGENIERIA AGRICOLA
DEPARTAMENTO DE MECANIZACION Y ENERGIA
CAMPUS CHILLAN

DESARROLLO DE TRACCION EN TRACTORES AGRICOLAS

Autores: Edmundo Hetz H.
Ing. Agr., Ph.D.

Mirta Brevis I.
Ing. Eje. Mec.

CHILLAN, MARZO 2005

INDICE DE MATERIAS

	Página
PROLOGO	3
I INTRODUCCION Y ANTECEDENTES	4
II PROPIEDADES DEL SUELO RELACIONADAS CON LA TRACCION	6
III LAS ECUACIONES DE COULOMB Y MICKLETHWAITE	8
IV EL PATINAJE Y LA TRACCION	11
V ELEMENTOS PARA MEJORAR LA TRACCION	12
1. Bloqueador de diferencial	13
2. Lastrado	14
3. Neumáticos	15
4. Tracción doble	16
5. Cadenas	17
6. Ruedas-jaula	17
7. Puntas metálicas	17
8. Semi-orugas	18
9. Orugas	18
VI LITERATURA CITADA Y BIBLIOGRAFIA RELEVANTE	19
CUADRO 1	10
FIGURAS 1 a 9	22-29

PROLOGO

El presente Boletín es parte del Programa de Extensión de la Facultad de Ingeniería Agrícola de la Universidad de Concepción, y su objetivo es contribuir al conocimiento que permita lograr el desarrollo de fuerzas de tracción grandes y eficientes, como así mismo la obtención de altas potencias en la Barra de Tiro de los tractores usados en la agricultura.

Se explican los conceptos de tracción y potencia en la barra de tiro (BT), la resistencia al rodado (RR), el coeficiente de rodado (CR), las condiciones representativas típicas de superficie de rodado, el coeficiente de tracción (CT), y la eficiencia tractiva (ET). Se analizan las propiedades de resistencia cohesiva y friccional de los suelos que afectan la tracción y dos ecuaciones que relacionan el área de contacto con el suelo y el peso sobre ella que permiten determinar la fuerza tractiva que es posible desarrollar en condiciones específicas de suelo. También se explica la relación entre el patinaje y la tracción. Finalmente, se analiza el uso de 9 elementos para mejorar la tracción. Se incluye además 61 citas bibliográficas relevantes para que el lector pueda informarse en profundidad sobre algún aspecto específico de su interés.

Debe destacarse que el tema es complejo y en algunos casos puede ser necesario asesorarse por un especialista. En general, toda vez que sea posible debe preferirse un lastrado que conforme un tractor liviano (45-50 kg/HP), rápido (9-12 km/h) a uno pesado (65-75 kg/HP), lento (4-6 km/h).

I. INTRODUCCION Y ANTECEDENTES

Las palabras tracción y tractor derivan del latín "trahere", que significa arrastrar, siendo el tractor una máquina concebida originalmente para realizar grandes esfuerzos de tracción. La transformación de la potencia del motor en fuerza y potencia de tracción a la barra de tiro (BT) se realiza a través de los elementos de propulsión del vehículo, es decir sus neumáticos u orugas. El torque del motor es convertido en fuerza tractiva por las ruedas motrices que cizallan el suelo entre sus barras, de tal manera que mientras más débil es el suelo menor será la fuerza tractiva disponible. No solamente habrá menor tracción sino que también habrá mayor resistencia al avance por el mayor hundimiento de las ruedas en el suelo blando. Esto reduce la fuerza de arrastre neta que puede utilizarse efectivamente para impulsar al tractor y arrastrar el implemento.

De todas las formas en las que se puede aprovechar la potencia del motor del tractor: potencia al eje toma fuerza (ETF), potencia hidráulica y potencia a la BT, ésta última es la menos eficiente. Los principales factores que reducen la magnitud de esta potencia son la baja resistencia mecánica de algunos suelos con alto contenido de humedad, la resistencia al rodado que presenta el suelo, y la deformación de éste que causa un patinaje excesivo (>20%). Por ello es lamentable que los agricultores chilenos aún utilicen sus tractores mayoritariamente como un animal de tiro.

La interacción rueda-suelo es muy compleja y ha sido muy difícil conocer en profundidad la naturaleza de la misma para predecir con precisión y exactitud el valor de dicha fuerza en una condición de suelo determinada.

En relación con la tracción se utilizan algunos conceptos y terminología que es necesario dominar. Es así como la **resistencia**

al rodado (RR) representa la dificultad que opone (fuerza) una superficie dada (suelo) al avance del vehículo. El factor que tiene mayor influencia sobre la RR es el diámetro de la rueda, pero también debe incluirse la presión de inflado y la naturaleza de la superficie de apoyo. Está muy relacionada con el hundimiento de la rueda en el suelo, siendo pequeña en suelos firmes, consolidados, secos, y grande en suelos blandos, sueltos, húmedos. En suelos que se deforman con facilidad (arenosos sueltos, francos recién labrados) al aumentar la presión de inflado aumenta la RR; en suelos firmes, compactados al aumentar la presión disminuye la RR.

El desempeño de los neumáticos se especifica para 4 condiciones representativas denominadas buena, promedio, pobre y mala (Witney, 1995). La condición "buena" es equivalente a una pradera seca, dura con una resistencia a la penetración de cono de 2 MPa (20 bar) y sin hundimiento visible. La condición "promedio" representa un rastrojo típico en buen estado para arar, con una resistencia al cono de 400 kPa (4 bar) donde los neumáticos dejan solo huellas superficiales. La condición "pobre" se encuentra al arar rastrojos húmedos o realizar labranza secundaria donde quedan huellas bastante profundas con dificultades para la tracción y una resistencia al cono de 250 kPa (2,5 bar). La condición "mala" representa las peores condiciones para realizar trabajos que demandan gran tracción (no recomendables pero inevitables), tales como arar después de la cosecha de raíces en un otoño muy lluvioso o la preparación de una cama de siembra en una primavera lluviosa, cuando la resistencia al cono llega solo a 150 kPa (1,5 bar). Así, el **coeficiente de rodado (CR)** es el cociente entre el valor de la RR y el peso total que gravita sobre las ruedas.

Por otro lado, el **coeficiente de tracción (CT)** es el cociente entre la fuerza de tiro que desarrolla el tractor y el

peso total que gravita sobre las ruedas motrices. Se espera que el valor del CT en condiciones normales de campo en tractores con ruedas neumáticas se ubique en el rango 0,5-0,7.

La **eficiencia tractiva (ET)** es el cociente entre la potencia generada en la BT y la potencia de entrada al eje motriz. En este concepto está involucrada la potencia que depende de la velocidad de avance. Se puede generar potencia como producto de una gran fuerza a baja velocidad o como producto de una pequeña fuerza a una alta velocidad. Por ello es que el valor de la ET está estrechamente asociado al patinaje, de tal manera que cuando éste aumenta la ET disminuye pues al bajar la velocidad, por efecto del mayor patinaje, baja la potencia en la BT.

II. PROPIEDADES DEL SUELO RELACIONADAS CON LA TRACCION

La resistencia de un suelo a la deformación por compresión o deformación por cizalle está determinada por su resistencia mecánica, la cual tiene dos componentes: resistencia cohesiva y resistencia friccional. Los valores varían considerablemente y dependen del contenido de humedad, tamaño de las partículas, tamaño y forma de los agregados, y grado de consolidación. Estos factores, entre otros, existen en tantas combinaciones diferentes que solo la medición directa de los componentes de cohesión y fricción pueden permitir predecir la resistencia verdadera de un suelo en una condición determinada.

Los suelos tienen los estados físicos definidos como sólido o cementado, sólido elástico o friable, plástico y líquido viscoso, tal como se muestra en la Fig. 1. El estado físico de un suelo también depende de los factores antes mencionados, pero en el caso de un suelo específico el factor de humedad es el más importante.

Un suelo cementado presenta alta resistencia a la deformación y se caracteriza por una pequeña deformación elástica antes de que

ocurra una desintegración de su estructura. En cambio el estado friable muestra un rango de elasticidad mucho mayor, en el cual la deformación es proporcional a la carga aplicada y se recupera rápidamente al remover la carga. El estado plástico se caracteriza porque la masa del suelo se sigue deformando lentamente bajo la acción de la carga aplicada y no se recupera cuando ésta es removida; la magnitud de la deformación depende de la duración y de la magnitud de la carga. En el estado líquido el suelo muestra una resistencia proporcional a la velocidad de aplicación de la carga; el suelo tiene un alto contenido de agua y actúa como un fluido viscoso.

Desde el punto de vista mecánico es conveniente definir los esfuerzos a los cuales está sujeto un suelo, en términos de la tensión, compresión y corte o cizallamiento. Cualquier sistema de esfuerzos complejos puede ser siempre resuelto en términos de estos tres tipos de esfuerzos.

Normalmente los suelos fallan debido a los esfuerzos de corte o cizalle, ya que en el límite demuestran una alta resistencia a la compresión y difícilmente pueden ser sometidos a un esfuerzo de tensión. La falla de un suelo causada por fuerzas externas depende de los parámetros de resistencia en la superficie de falla, que consiste en una interfase suelo/suelo y otra suelo/caucho o metal. Los principales parámetros suelo/suelo son la cohesión, la fricción suelo/suelo definida por el ángulo de fricción interna y la densidad de la masa de suelo o densidad aparente.

En forma similar los principales parámetros suelo/caucho son la adhesión y la fricción suelo/caucho, definida por el ángulo de fricción suelo/caucho.

III. LAS ECUACIONES DE COULOMB Y MICKLETWAITE

La resistencia a la falla de un suelo depende del esfuerzo de corte máximo que éste puede resistir, lo cual es una función de la magnitud de la deformación y del esfuerzo normal (presión) sobre la superficie de falla. La forma de las curvas del esfuerzo de corte versus deformación depende del tipo de suelo, según muestra la Fig. 2.

La curva A se refiere a un suelo suelto con propiedades friccionales, tales como un suelo arenoso seco en estado suelto. La curva B es típica de un suelo cementado tal como un suelo arcilloso seco no labrado o disturbado. La curva C identifica a un suelo con propiedades intermedias, tales como los de la mayoría de los suelos agrícolas de textura franca.

La máxima resistencia a la deformación que puede desarrollar un suelo depende del esfuerzo normal en la superficie de falla, tal como muestra la Fig. 3. Al graficar los valores de esfuerzo máximo de corte con los respectivos del esfuerzo normal se obtiene una relación que teóricamente es lineal, como muestra la Fig. 4. La ecuación de la línea lleva el nombre de Coulomb, quien originalmente la desarrolló e estableció que la resistencia máxima al cizallar un suelo depende de los componentes de cohesión y fricción interna, de la siguiente manera (Ashburner y Sims, 1984):

$$EMC = \frac{\text{Fuerza de corte}}{\text{Area de superficie}} = \text{Cohesión} + \text{Fricción}$$

$$EMC = c + \sigma \operatorname{tg} \theta$$

Ecuación de Coulomb

en donde:

EMC = Esfuerzo Máximo de Corte

c = cohesión del suelo

σ = esfuerzo normal en la superficie de falla, igual a Q/A donde Q es la carga (peso) normal en la superficie y A es el área de la superficie de falla

θ = ángulo de fricción interna suelo/suelo

Para ayudar en el desarrollo de la teoría de la tracción, Micklethwaite expresó la ecuación de Coulomb en términos de fuerza, multiplicándola por el área de la superficie de falla, quedando como sigue:

$$H_{\max} = cA + Q \operatorname{tg} \theta \qquad \text{Ecuación de Micklethwaite}$$

en donde:

H_{\max} = fuerza de corte máxima

A = área de la superficie de falla

Q = carga (peso) normal en la superficie de falla

La Fig. 4 muestra los gráficos de la ecuación de Coulomb para diferentes suelos. La línea A representa la situación para un suelo arenoso seco que demuestra las propiedades friccionales pero sin cohesión ($c=0$); la línea B corresponde a una arcilla en estado plástico que demuestra una alta cohesión pero ninguna fricción ($\theta=0$); la línea C representa un suelo franco con características friccionales y cohesivas, muy típico de los suelos agrícolas en las condiciones en que normalmente se realizan las labores de labranza.

Es muy importante señalar además que el contenido de humedad del suelo juega un papel fundamental en las características de resistencia al cizalle. Los efectos son más marcados en las arcillas, tal como se muestra en la Fig. 5. Al considerar la ecuación de Micklethwaite se observa que para un suelo con cierto valor de cohesión y de fricción, la fuerza máxima de corte para

ocasionar una falla en el suelo depende del área de contacto (A) para la componente de cohesión y de la carga normal (Q) para la componente friccional.

De lo anterior se concluye que para aumentar la tracción que puede generar un tractor en un suelo arcilloso húmedo con propiedades cohesivas pero no friccionales se debe aumentar el área de contacto, colocando llantas más grandes o bajando la presión de inflado. En cambio, al trabajar en un suelo arenoso seco o arcilloso removido sin propiedades cohesivas hay que aumentar la carga normal colocando, por ejemplo, lastre en las rueda motrices; llantas más grandes o reducción de la presión de inflado no generarán beneficio alguno.

La ecuación de Micklethwaite también muestra que para un suelo franco, con propiedades friccionales y cohesivas, los aumentos del área y del peso permitirán aumentar la tracción generada. El Cuadro 1 presenta valores típicos para el ángulo de fricción interna y la cohesión de varios tipos de suelo.

CUADRO 1. Valores típicos de la cohesión y ángulo de fricción interna de algunos tipos de suelo.

Tipo de Suelo	Tamaño de partículas (mm)	Estado	Angulo de fricción (°)	Cohesión (kN/m ²)
Arena con partículas medianas	1,1	Compactado	38-40	0
		Suelto	32-35	0
Arena fina con materia orgánica	0,5-0,8	Compactado	25-30	0
		Suelto	18-22	0
Franco Arenoso	0,02-0,2	Friable	24-28	20-25
		Plástico	24-28	10-15
Franco	0,01	Friable	22-26	25-30
		Plástico	15-19	15-20
Arcilloso	0,002	Friable	17-19	40-60
		Plástico	10-14	25-30

Fuente: Ashburner y Sims, 1984

IV. EL PATINAJE Y LA TRACCION

El patinaje es la reducción de la distancia recorrida por revolución de una rueda desarrollando tracción comparada con la distancia recorrida por la misma rueda sin desarrollar tracción, sobre la misma superficie. La ineficiencia generada por este comportamiento se manifiesta claramente en el patinaje excesivo y visible en las ruedas motrices; desafortunadamente, esta ineficiencia nunca puede ser eliminada totalmente. El patinaje de las ruedas motrices constituye un inconveniente ya que hace disminuir la velocidad de avance del tractor, lo cual reduce la potencia en la BT y aumenta el tiempo requerido para terminar el trabajo, además de acelerar el desgaste de los neumáticos, aumentar la compactación del suelo y destruir su estructura.

Sin embargo, es imposible generar tracción en la BT de un tractor sin patinaje. Este debe estar limitado al rango 10-15% en tractores con tracción simple (2 WD) y a 8-12% en tractores con tracción doble frontal asistida (TFA). Generalmente, es muy poco el aumento de la fuerza en la BT con más de 15% de patinaje y la potencia perdida en la BT es tan alta que se hace inaceptable trabajar en esas condiciones.

Para determinar el patinaje con que está trabajando un tractor en una faena específica se puede usar la siguiente ecuación, en cualquiera de sus expresiones:

$$\text{Patinaje (\%)} = ((\text{DRSC} - \text{DRCC}) / \text{DRSC}) \times 100 \quad \text{Ecuación de patinaje}$$

$$\text{Patinaje (\%)} = (1 - (\text{DRCC} / \text{DRSC})) \times 100 \quad \text{Ecuación de patinaje}$$

en que:

DRSC = distancia recorrida sin carga (arado en el aire)

DRCC = distancia recorrida con carga (arado enterrado)

En esta ecuación la DRSC corresponde a la distancia recorrida por el tractor, en un número predeterminado de vueltas de sus ruedas motrices sobre una superficie dura, sin carga es decir sin realizar una faena dada (arar, sembrar, etc). Por otro lado, la DRCC corresponde a la distancia recorrida, en el mismo número de vueltas de sus ruedas motrices, realizando la faena específica para la cual se está determinando el patinaje.

Respecto de la ecuación anterior debe destacarse que ella facilita la medición del patinaje, pero que puede dejar sin responder la pregunta de cual es el patinaje del tractor, pues las ruedas motrices (derecha, izquierda) pueden estar trabajando con patinajes diferentes, especialmente en el caso de la aradura, donde la rueda derecha va dentro del surco (con menor patinaje) y la izquierda sobre la pradera (con mayor patinaje), dados sus diferentes pesos y superficies de rodado. Para solucionar este problema debe reemplazarse en la ecuación anterior DRSC y DRCC por las velocidades desarrolladas por el tractor sin y con patinaje, respectivamente.

V. ELEMENTOS PARA MEJORAR LA TRACCION

En muchas operaciones de campo la velocidad del tractor debe limitarse a valores entre 2 y 3 m/s (7,2 y 10,8 km/h) por cuanto la calidad del trabajo realizado disminuye con la velocidad; por otro lado, a mayores velocidades los efectos del ruido y vibración llegan a ser intolerables para el operador.

Para poder usar la potencia total del tractor a estas velocidades es necesario generar grandes fuerzas en la BT. Por ejemplo, un tractor de 50 kW (67 HP) trabajando a 3 m/s debe generar una fuerza de 17 kN (1733 kg) para usar toda la potencia

disponible, mientras que a 2 m/s será necesario generar 25 kN (2548 kg). Dado que el peso de un tractor de esa potencia (50 kW) solo llega a unos 30 kN (3058 kg), para poder generar las fuerzas antes señaladas, en caso de que ello fuera posible, tendría que trabajarse con un patinaje excesivo y, consecuentemente, con muy baja eficiencia.

La ecuación de Micklethwaite muestra que la tracción que puede desarrollar un tractor depende de la cohesión del suelo y de su ángulo de fricción interna, parámetros que responden al tamaño del área de contacto de los neumáticos con el suelo y al peso sobre las ruedas motrices. De tal manera que para mejorar la tracción se debe actuar sobre ellos, a través de aumentarlos según el tipo de suelo sobre el cual se trabaja. Existe una variedad de elementos para aumentar la tracción basados en lo anteriormente señalado, algunos de fácil aplicación y otros algo más complicados.

Sin embargo, debe tenerse presente que estos elementos ayuda-tracción también aumentan la RR, es decir la resistencia que opone el suelo al desplazamiento del tractor, con lo cual puede aumentar el consumo de combustible y disminuir la eficiencia total. Los principales elementos ayuda-tracción son los siguientes:

1. Bloqueador de diferencial

Los tractores tienen un control que permite eliminar la acción de los engranajes del diferencial, de acción automática en los tractores modernos al superarse cierto nivel (3-5%) de patinaje diferencial entre las ruedas motrices. Ello permite que todas ellas tengan un desempeño parejo aún cuando una o más se desplacen sobre distintas superficies y condiciones de rodado, como ocurre durante la aradura en que las ruedas derechas van dentro del surco y con mayor peso por la inclinación del tractor. El incremento en tracción es modesto pero útil y debe usarse como dispositivo de

emergencia. Dado que el bloqueador dificulta la acción de viraje, debe ser desactivado antes de intentarlo.

2. Lastrado

El uso de lastres es un método barato y efectivo para aumentar la tracción en la mayoría de las condiciones de trabajo, especialmente en suelos con una textura arenosa, validando el dicho campesino "un tractor tira lo que pesa". Al lastrar un tractor no debe excederse la capacidad de carga de los neumáticos y tener presente que mucho lastre puede causar compactación del suelo; si se dan estas condiciones deben usarse neumáticos más grandes o dobles.

Existen tres formas comúnmente usadas para lastrar un tractor: pesos en las ruedas, agua en los neumáticos, y pesos en la parte frontal del tractor. Los pesos sobre las ruedas motrices traseras y el lastrado con agua proveen peso justo donde se le necesita. Debe preferirse el lastrado con agua toda vez que esta adición permanente de peso no genere desventajas, o sea cuando el tractor es usado masivamente para arrastrar máquinas pesadas (labranza primaria, siembra directa). Se sugiere limitar la adición de agua a 50-75% del volumen del neumático para que el neumático mantenga flexibilidad. Al agua debe agregársele un anticongelante en lugares donde la temperatura baja a menos de 0°C.

Cuando el tractor debe generar grandes esfuerzos de tracción solo esporádicamente los pesos metálicos son preferibles ya que ellos pueden retirarse más fácilmente que el agua, recordando que el exceso de peso consume potencia especialmente en terrenos con colinas. Los pesos en la parte frontal del tractor son necesarios para asegurar la estabilidad y maniobrabilidad en operaciones donde la muy alta tracción causa una gran transferencia de peso desde el eje frontal al eje trasero.

La estrategia de lastrado de un tractor, considerando el tipo de operación a realizar, debe tratar de lograr una de las siguientes condiciones:

1. tractores livianos (45-50 kg/HP), rápidos 9-12 km/h), para operaciones que demandan baja fuerza de tracción en la BT;
2. tractores pesados (65-75 kg/HP), lentos (4-6 km/h) para operaciones que demandan una gran fuerza de tracción en la BT.

Desde el punto de vista de la potencia generada en la BT, toda vez que sea posible debe preferirse la opción más cercana al tractor liviano, rápido.

3. Neumáticos (Figura 6, arriba)

La elección de los neumáticos es muy importante para desarrollar alta tracción. Los fabricantes ofrecen un amplio rango de neumáticos para los distintos usos y clase de terreno; el más común para uso agrícola es el tipo R-1, que tiene barras de tracción abiertas con alrededor de 30% densidad e inclinadas en unos 30 a 35° para tener buena tracción y autolimpieza con una baja resistencia al rodado.

Para desarrollar alta tracción con baja resistencia al rodado se necesitan neumáticos anchos con gran diámetro y baja presión de inflado (0,8-1,1 bar; 12-16 lb/pulg²), pero suficiente para soportar el peso que transportan. Los neumáticos radiales permiten lograr entre 5 y 7% más tracción que los diagonales, siempre y cuando la presión no supere 0,8 bar.

El uso de neumáticos dobles (duales) duplica el área de contacto con el suelo permitiendo la adición de lastre, sin tener que aumentar la presión de inflado, logrando así mayor tracción y flotación en condiciones lodosas y/o arcillosas, además de reducir la compactación. Por cuanto se aumenta la resistencia al rodado su uso se recomienda solo para condiciones especialmente difíciles y/o para arrastrar implementos muy pesados (subsolador). Los

neumáticos dobles deben tener la misma presión de inflado y tamaños que no difieran en diámetro y perímetro en más de 1,5 y 5 cm, respectivamente. La separación entre los neumáticos debe ser alrededor de un cuarto su ancho y bajo condiciones lodosas y pedregosas se debe instalar allí un raspador para impedir que el barro y las piedras le causen daño a sus paredes. Mayor información sobre los neumáticos usados en la agricultura se puede encontrar en Hetz (2004)

4. Tracción doble

La tracción doble señala la presencia de dos ejes motrices con 2 o más ruedas capaces de generar tracción en cada uno de ellos. La distribución de peso en un tractor con tracción simple (hasta 80 HP) debe dejar al menos 20% en el eje frontal, es decir lo suficiente para maniobrar el vehículo. En tracción doble esta distribución es muy diferente y dependerá de la proporción de diámetros entre los neumáticos delanteros y traseros.

La versión de tracción doble usada en Chile es la denominada "tracción frontal asistida" o TFA (hasta 135 HP), en la cual las ruedas delanteras tienen menor diámetro (0,6-0,7) que las traseras y tractores constituyen un poco más de 75% del parque. En general la TFA permite desarrollar un 15-17% más tracción que la versión simple, para el mismo nivel de patinaje.

La tracción doble con todas las ruedas de igual tamaño se usa en tractores con más de 135 HP y es una versión no utilizada en Chile. En el tractor detenido el eje frontal soporta 60% del peso, el cual se redistribuye por la transferencia de peso para quedar en 50% cuando arrastra un implemento pesado, permitiendo desarrollar en promedio un 35% más tracción que la versión simple, para el mismo nivel de patinaje.

Un aspecto importante de la doble tracción es que las ruedas traseras se desplazan por las huellas anchas y firmes de las

ruedas delanteras, las que proporcionan una superficie que presenta menor resistencia al rodado y con mejores condiciones para desarrollar tracción.

5. Cadenas (Figura 6, centro y abajo)

Existen cadenas de acero para usarlas con distintos tamaños de neumáticos y densidad de barras mayor que 30%. Ellas permiten obtener un buen desempeño tractivo en condiciones lodosas, con nieve y/o hielo, tal como en algunas faenas forestales. Con ellas es posible obtener hasta un 15% más de tracción.

6. Ruedas-jaula (Figura 7, arriba)

Las ruedas-jaula son extensiones metálicas apernadas a las llantas de las ruedas motrices usadas principalmente para reducir la compactación del suelo al aumentar el área de contacto y lograr flotación y tracción en condiciones de suelo sobresaturado, tal cual ocurre en el fangueo de arrozales.

Las extensiones deben tener un diámetro levemente menor que los neumáticos para que el tractor pueda operar en superficies duras sin tocarlas. Esta diferencia debe ser muy pequeña para que al trabajar en terreno blando un leve hundimiento de los neumáticos inicie la acción de las jaulas. Su aporte neto a la tracción es bajo dado el aumento a la resistencia al rodado que causan; su mayor aporte es la menor compactación, flotación y capacidad de fangueo.

7. Puntas metálicas (Figura 7, abajo)

Ellas van apernadas al lado de los neumáticos tal como las ruedas-jaula, y cortan el suelo a mayor profundidad donde tiene más resistencia con lo que aumenta la tracción. Es preferible que sean retractables a un diámetro menor que el del neumático para trabajar en superficies duras. Estas puntas consumen algo de potencia por lo cual deben entrar en el suelo solo lo necesario para lograr la tracción requerida, manteniendo al mínimo la RR.

Las puntas son especialmente útiles en suelos blandos, cohesivos, arcillosos. En esas circunstancias pueden duplicar la tracción de un neumático no lastrado. Son mayoritariamente usadas para trabajar en arrozales.

8. Semi-orugas (Figura 8)

Cada semi-oruga consiste en dos bandas de caucho o acero con barras poco distanciadas rodeando las ruedas motrices traseras y adicionalmente ruedas-jinete más pequeñas ubicadas un poco más adelante de las ruedas motrices. El mayor largo del área de contacto con el suelo entrega mayor tracción con menor patinaje, especialmente en suelos cohesivos. En la mayoría de las condiciones es posible duplicar la tracción generada por un neumático solo, reduciendo al mínimo el riesgo de compactación. Son muy útiles en trabajos forestales, con lodo y nieve. En condiciones netamente agrícolas presentan problemas de maniobrabilidad y desprendimiento de las bandas en superficies duras; tampoco pueden usarse en suelos con piedras y en aradura con las ruedas derechas dentro del surco por su baja capacidad para soportar fuerzas laterales.

9. Orugas (Figura 9)

La utilización de tractores con orugas en operaciones agrícolas en condiciones difíciles y terrenos muy accidentados ha sido exitosa durante muchos años. Las orugas proporcionan una gran área de contacto con el suelo que permite desarrollar gran tracción en suelos francos y arcillosos, proporcionando en la BT 20 a 30% más potencia que los neumáticos para una misma potencia del motor. Por otro lado, una oruga ancha aumenta su RR mientras que una oruga angosta pierde flotación, dejando indeseables huellas profundas.

Un aspecto importante del diseño del tractor oruga se refiere a la ubicación de su centro de gravedad. Las aplicaciones

agrícolas requieren una ubicación adelantada para que la transferencia de peso al arrastrar implementos mantenga al tractor horizontal, con igual peso a lo largo de la oruga. Para usos industriales, como movimiento de tierra, se requiere una posición más retrasada para lograr mayor eficiencia en el control de la cuchilla delantera.

En conclusión se puede señalar que la tracción que puede desarrollar un tractor depende de la resistencia mecánica del suelo, especialmente sus propiedades cohesivas y friccionales que son muy afectadas por el contenido de agua. El tamaño del área de contacto de las ruedas motrices con el suelo y el peso que actúa sobre ellas afectan decididamente la fuerza de tracción generada.

VII. LITERATURA CITADA Y BIBLIOGRAFIA RELEVANTE

1. Ashburner, J y B Sims. 1984. La teoría de tracción y los sistemas de rodaje. EN: Elementos de diseño del tractor y herramientas de labranza: 355-422. IICA, San José, Costa Rica
2. Bailey, A and E Burt. 1981. Performance of tandem, dual and single tires. Transactions of the ASAE:1103-1107
3. Baloch, J., A Abro, K Mahar, A Brohi and M Kartio. 1993. Prediction of traction potential of wheel tractors by plate penetration method. AMA 24(2):9-12
4. Bashford, L., K von Bargaen and L Xioxan, 1987. Performance comparisons between duals and singles on the rear axle of a front wheel assist tractor. T of the ASAE 30(3):641-645
5. Bashford, L., S Al-Hamed and C Jenane. 1993. Effects of tire size and inflation pressure on tractive performance. J of Applied Engineering in Agriculture 9(4):343-348
6. Bashford, L., G Woerman and G Shropshire. 1985. Front wheel assist tractor performance in two and four wheel drive modes. T of the ASAE 25(1):23-29
7. Bekker, M 1969. Introduction to terrain-vehicle systems. The University of Michigan Press. Ann Arbor, MI, USA
8. Biondi, P and F Maraziti. 1998. Drawbar pull performance of tractors based on Italian type-approval data. J of Ag Engng Research 69(3):189-198
9. Book, R and C Goering. 2000. A new traction model for crawler tractors. T of the ASAE 43(1):39-46
10. Brixius, W. 1987. Traction prediction equations for bias ply tires. ASAE Paper 87-1622. St. Joseph, MI, USA
11. Buckingham, F. 1976. Tracción, flotación y compactación del suelo. EN: Cultivo:26-35. Deere & Co., Moline, IL, USA
12. Burt, E and W Lyne. 1985. Velocity effects on traction performance. T of the ASAE 28(6):1729-1735
13. Catalan, H y P Linares. 1998. Teorías predictivas de tracción en tractores agrícolas; comparación con resultados experimentales. Memorias CADIR 98:17-27. La Plata; Argentina

14. Domier, K., D Friesen and J Townsend. 1971. Traction characteristics of 2WD, 4WD and crawler tractors. T of the ASAE 14(3). St. Joseph, MI, USA
15. Domier, K. 1978. Traction analysis of Nebraska tractor tests. T of the ASAE 18:2244-248
16. Domier, K and A Williams. 1978. Tractive efficiency – maximum or optimum? T of the ASAE 18:650-653
17. Dwyer, M and G Pearson. 1976. Field comparison of the tractive performance of two and four-wheel drive tractors. Journal of Agricultural Engineering Research 21(1):77-85
18. Dwyer, M. 1983. Soil dynamics and the problems of traction and compaction. The Agricultural Engineer, Autumn:62-68
19. FAO. 1993. Traction improvers. IN: FAO Agricult. Services Bulletin 104:62-68. Rome, Italy.
20. Gee-Clough, D., G Pearson and M McAllister. 1982. Ballasting wheeled tractors to achieve maximum power output in frictional cohesive soils. J of Ag Engng Res 27:1-19
21. Gee-Clough, D. 1980. Selection of tyre sizes for agricultural vehicles. J of Agricultural Engng Research 25:261-278
22. Gill, W and G Vanden Berg. 1967. Evaluating traction performance. IN: Soil dynamics in tillage and traction:365-429. USDA Handbook N°316, Washington, D C, USA
23. Goering, C. 1989. Weight transfer, traction and safety. IN: Engine and tractor power:366-392. ASAE Textbook N°3. St. Joseph, MI, USA
24. Hayes, J and J Ligon. 1981. Traction prediction using soil physical properties. T of the ASAE 24:1424-1425
25. Hetz, E. 2004. Descripción, selección y uso racional de neumáticos agrícolas. Universidad de Concepción, Facultad de Ingeniería Agrícola, Chillán. (Bol. de Ext. N°72). 32p.
26. Jenane, C and L Bashford. 2000. Tractive performance of a mechanical front-wheel assist tractor as related to forward speeds. J of Ag Engn Res 77(2):221-226
27. Jones, F and W Aldred. 1980. Traction devices. IN: Farm power and tractors:365-380. McGraw-Hill, New York, USA
28. Jorajuria, D y L Draghi. 1996. La resistencia al avance en el marco de la teoría de tracción: una revisión. Memorias CADIR 96:19-41. Neuquén, Argentina
29. Kathirvel, K., M Balasubramanian and R Manian. 2001. Tractive performance of power tiller tyres. AMA 32(2):32-36
30. Liljedahl, J., P Turnquist, W Carleton y D Smith. 1984. Tracción. EN: Tractores y sus unidades de potencia:235-260. Ediciones Limusa, México D F
31. Linares, P. 1996. Teoría de la tracción de tractores agrícolas. Monografías, ETSIA-UPM. Madrid, España
32. Linares, P y H Catalan, 2000. Predicción de tracción. Modificación del modelo de ASAE. Anales VI CADIR:25-30. Buenos Aires
33. Linares, P y H Catalan. 2000. Problemática de la modelización del comportamiento de tractores agrícolas. Anales VI CADIR:31-37. Buenos Aires
34. Lohan, S and S Aggarwal. 2001. Effect of inflation pressure and ballasting on the tractive performance of a tractor. AMA 32(3):23-26
35. Macmillan, R. H. 2002. The mechanics of tractor-implement performance. University of Melbourne, Australia. Printed from: <http://www.eprints.unimelb.edu.au>
36. Mortensen, D. 1982. Wheeled vehicle traction performance. ASAE Paper 82-1026. 9p. St. Joseph, MI, USA
37. PAMI. 1996. Ballasting your tractor for performance. Research update 725. Humboldt, SK, Canada. 4p
38. PAMI. 1996. Nine tips for tractor operators. Res. update 726. Humboldt, SK, Canada. 6p
39. Pincu, M y J Hilbert. 2000. Comportamiento a campo de un tractor FWA en modo tracción simple y doble en tres suelos de diferente capacidad portante. Anales VI CADIR:138-143. Buenos Aires, Argentina

40. Rackham, D and D Blight. 1985. Four-wheel-drive tractors: a review. *Journal of Ag Engineering Research* 57:3-22
41. Sanchez-Giron, V. 1996. Fuerza de tracción de los elementos de propulsión de los tractores agrícolas. EN: *Dinámica y mecánica de suelos*:165-193. Ed. Agrotécnicas, Madrid
42. Southwell, P. 1964. An investigation of traction and traction aids. *T of the ASAE* 7(2):190-193. St. Joseph, MI, USA
43. Souza, E., N Pinho and L Milanez. 1995. Ballast optimization of a front-wheel assist tractor. *AMA* 26(1):13-15
44. Srivastava, A., C Goering and R Rohrbach. 1993. Tractor hitching, traction and testing. IN: *Engineering principles of agricultural machines*:117-148. ASAE Textbook N°6, St. Joseph, MI, USA
45. Taylor, J. 1969. Get more pull from your tractor. *Hoard's Dairyman*, June. WI, USA
46. Taylor, J. 1973. Lug angle effect on traction performance of pneumatic tires. *T of the ASAE* 16(1):16-18
47. Taylor, J. 1974. Lug spacing effect on traction of pneumatic tractor tires. *T of the ASAE* 17(2):195-197
48. Taylor, J and E Burt. 1975. Track and tire performance in agricultural soils. *T of the ASAE* 18(1):3-6
49. Taylor, J. 1976. Comparative traction performance of R-1, R-3 and R-4 tractor tires. *T of the ASAE* 19(1):14-16
50. Taylor, J. 1977. Increasing the efficiency of agricultural traction and transport. *Agriculture and Energy*:223-232. Academic Press, New York, USA
51. Taylor, J., E Burt and A Bailey. 1979. Tire options and consequences for 4WD tractors. SAE Paper 79-0526. Peoria, IL, USA
52. Turner, E J. 1993. Tracks versus wheels; which is for you?. Alberta Farm Machinery Centre. Lethbridge, Canada. 4p
53. Upadhyaya, S., D Wulfsohn and G Jubal. 1989. Traction prediction equations for radial ply tyres. *Journal of Terramechanics* 26:149-175
54. Wang, Z and W Domier. 1989. Prediction of drawbar performance for a tractor with dual tires. *T of the ASAE* 32(5):1529-1533
55. Wathyotha, C and V Salokhe. 2001. Tractive performance of cage wheels with opposing circumferential lugs. *J of Ag Engng Research* 79(4):389-398
56. Wismer, R and H Luth. 1974. Off-road traction prediction of wheeled vehicles. *T of the ASAE* 17(1). St. Joseph, MI, USA
57. Witney, B. 1995. Tractive performance and power selection. IN: *Choosing and using farm machines*: 246-297. Land Technology, Edinburgh, Scotland, UK
58. Wulfsohn, D., S Upadhyaya and W Chancellor. 1988. Tractive characteristics of radial ply and bias ply tires in a California soil. *Journal of Terramechanics* 25:45-66
59. Zoz, F. 1972. Predicting tractor field performance. *T of the ASAE* 15(2):249-255.
60. Zoz, F. 1987. Predicting tractor field performance (updated). ASAE Paper 87-1623. St. Joseph, MI, USA
61. Zoz, F and R Grisso. 2003. Traction and tractor performance. ASAE Distinguished Lecture # 27. ASAE Publication Number 913C0403. St. Joseph. MI, USA. 46p.

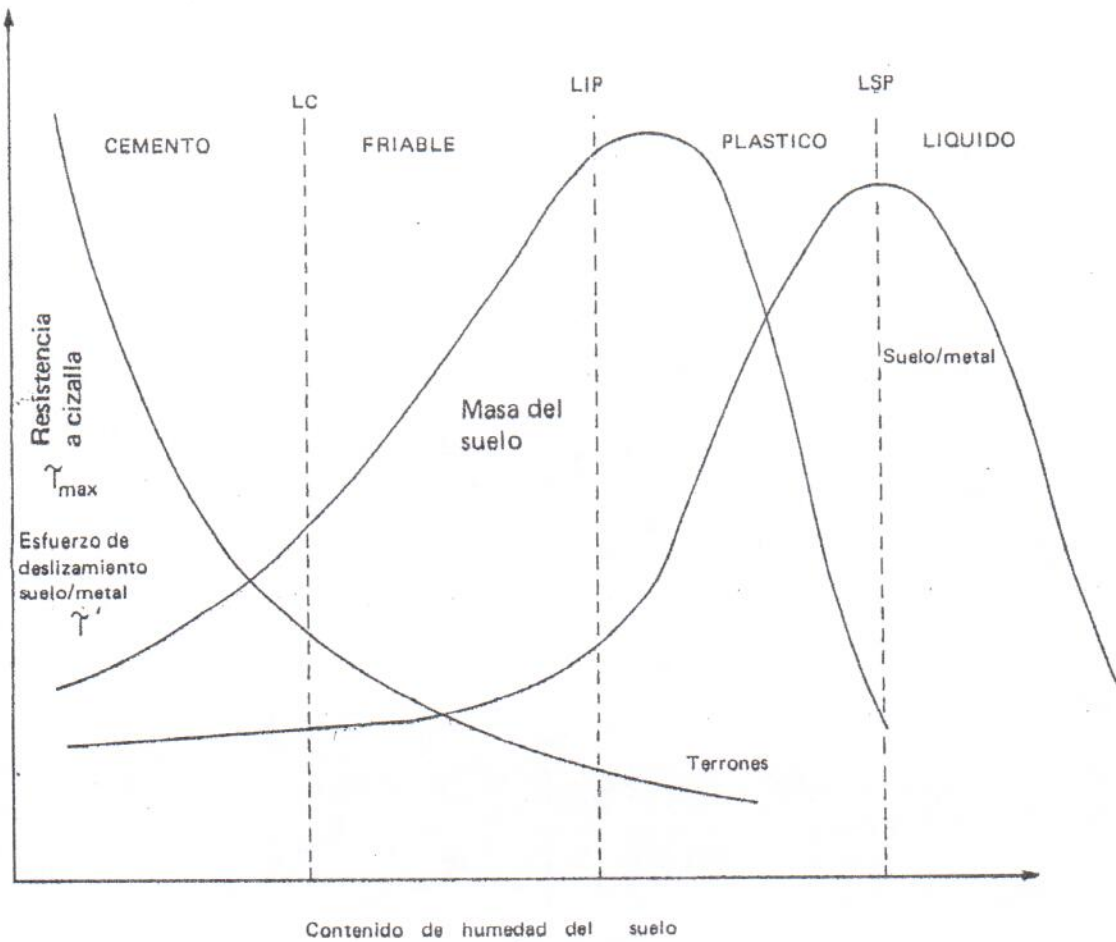


Fig. 1. Resistencia al cizalle de los terrones y de la masa de suelo en función del contenido de humedad y el esfuerzo de deslizamiento suelo metal

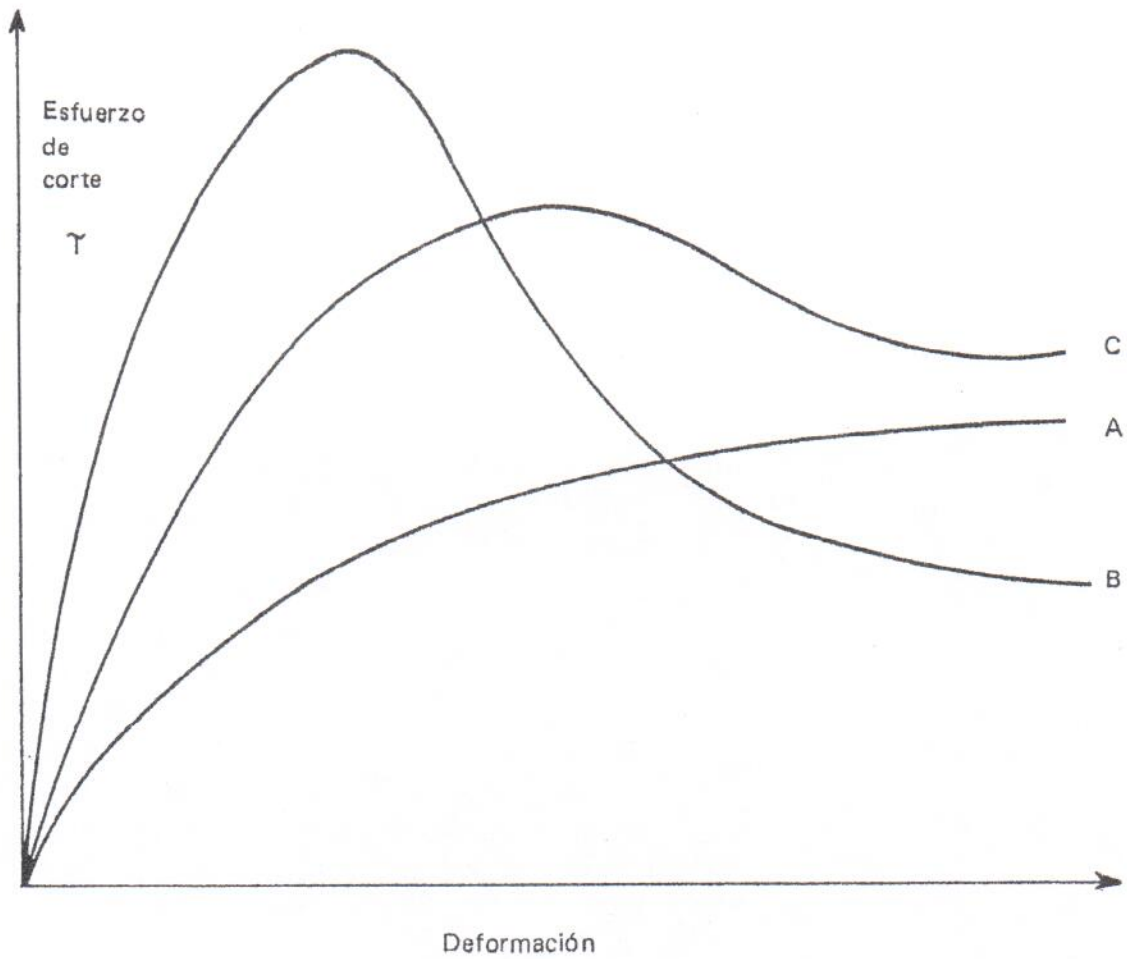


Fig. 2. Curvas de esfuerzo de corte/deformación para un suelo A: arenoso, seco. B: arcilloso compactado, seco. C: franco

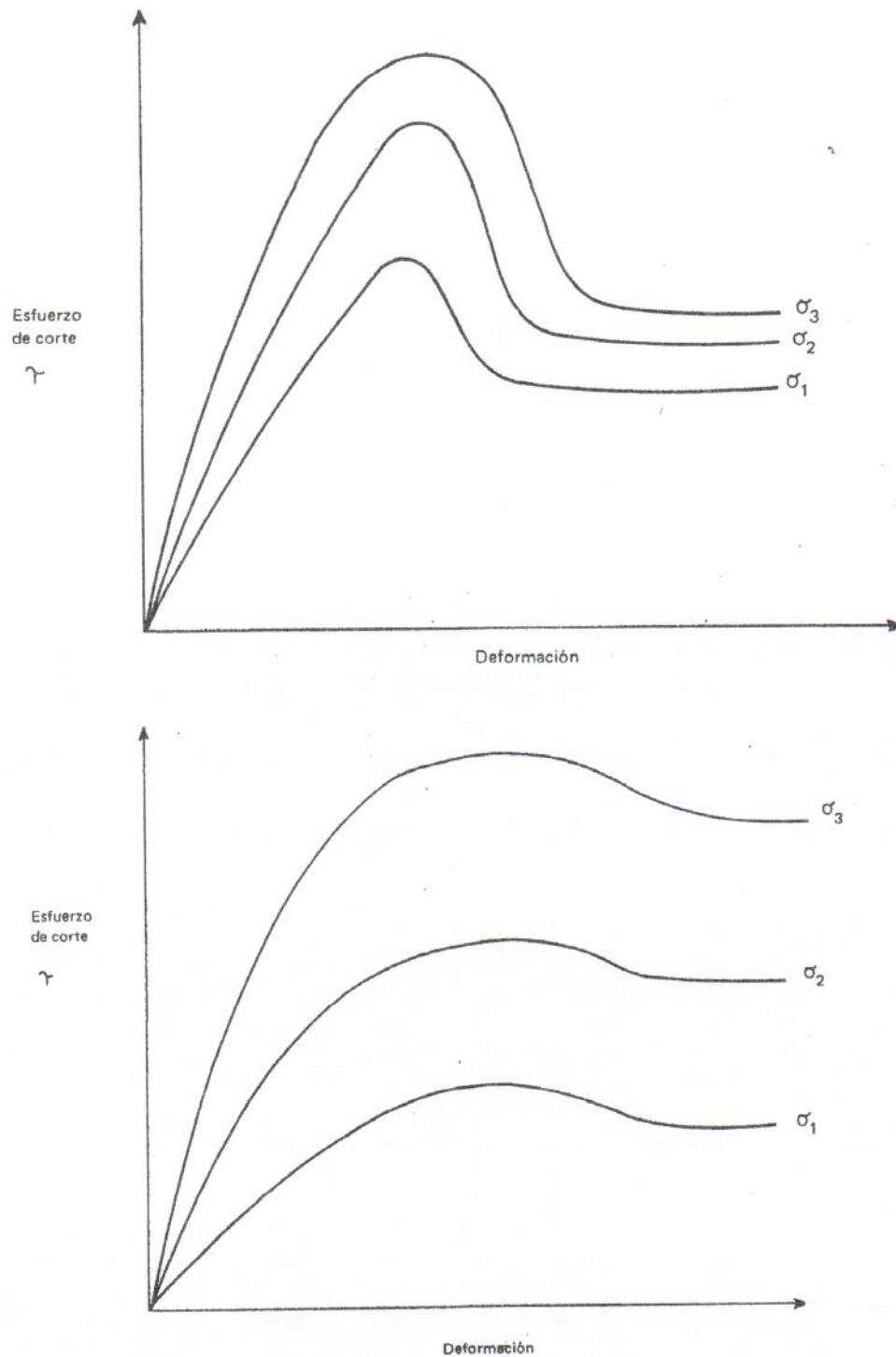


Fig. 3. Comportamiento de dos suelos a una prueba de cizalle con diferentes esfuerzos normales (presión) en que $\sigma_1 < \sigma_2 < \sigma_3$. Arriba: suelo arcilloso compactado, seco. Abajo: suelo franco

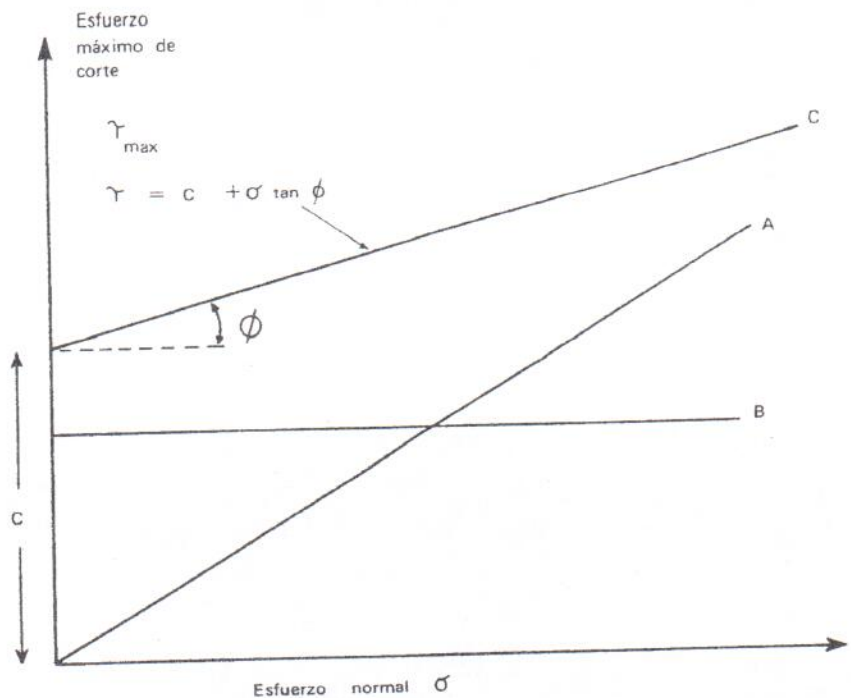


Fig. 4. Gráficos del esfuerzo máximo de corte versus el esfuerzo normal sobre la superficie de falla. Suelo A: arenoso seco. Suelo B: arcilloso húmedo plástico. Suelo C: franco húmedo.

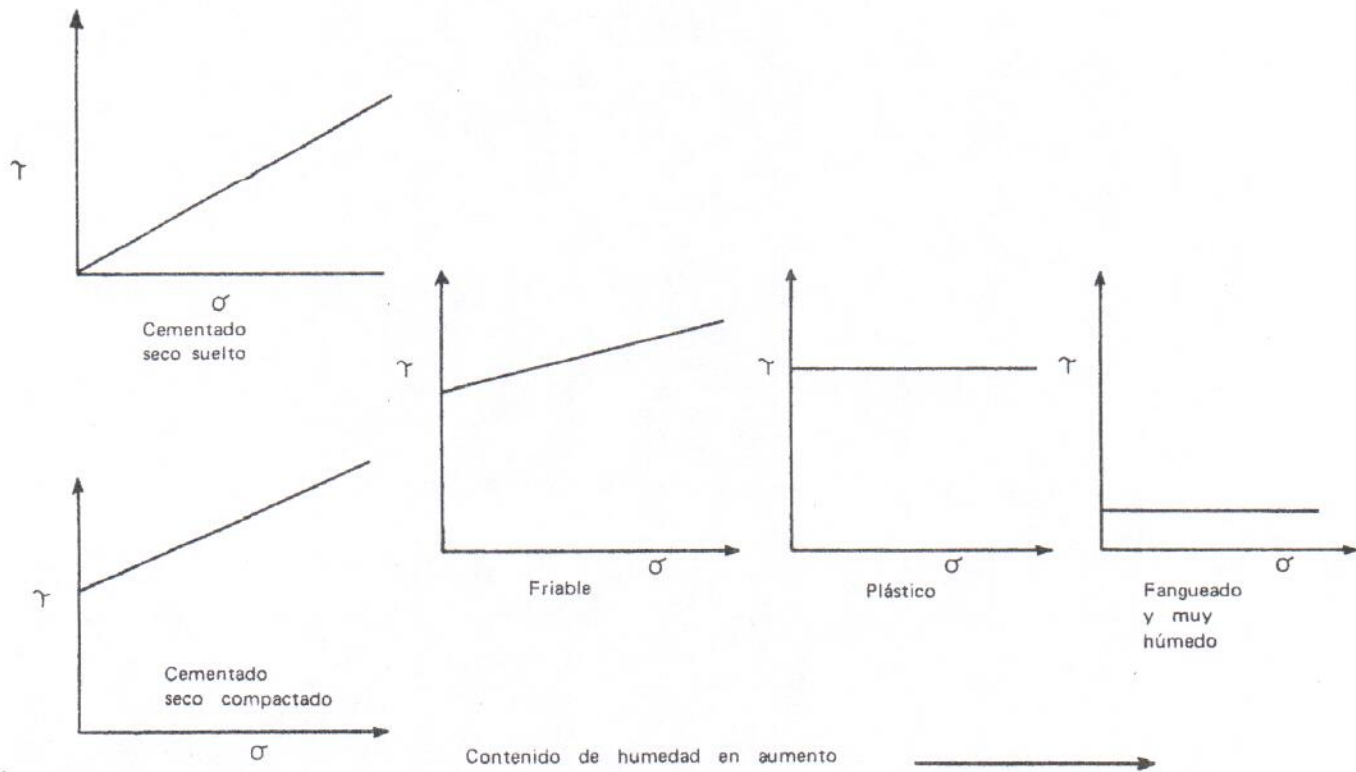


Fig. 5. Resistencia al cizalle de un suelo arcilloso de acuerdo con su contenido de humedad y grado de compactación.

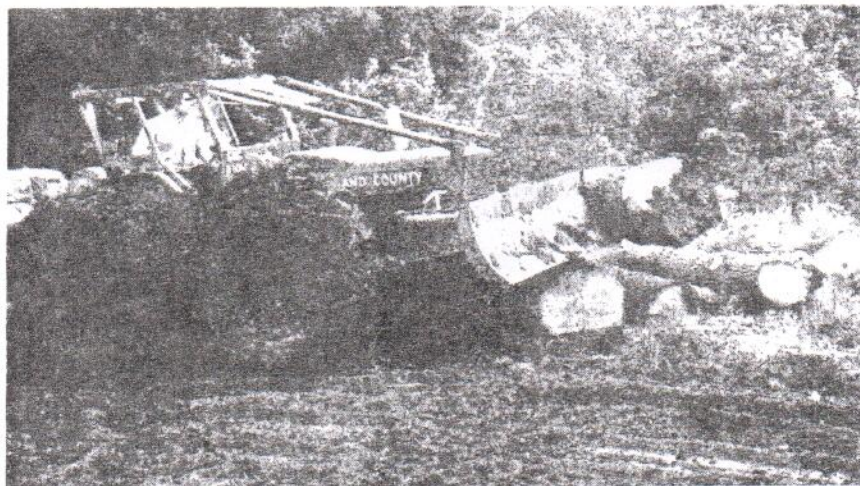
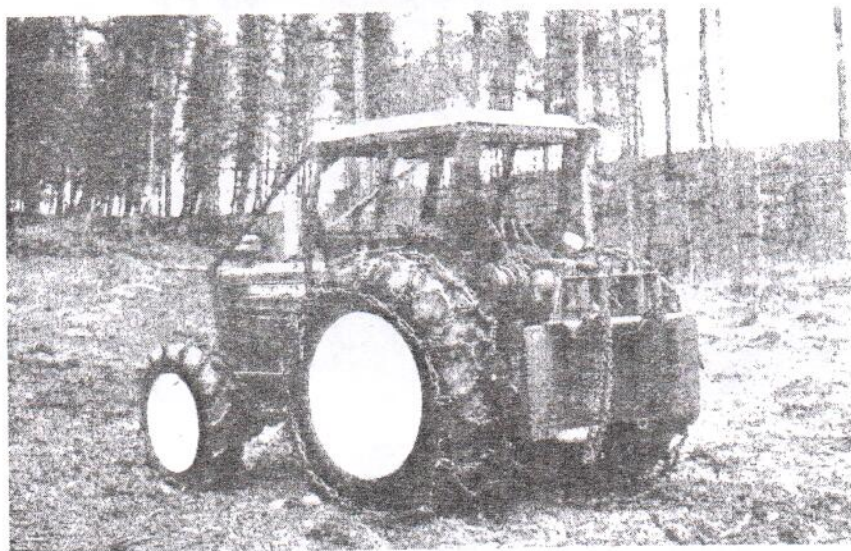
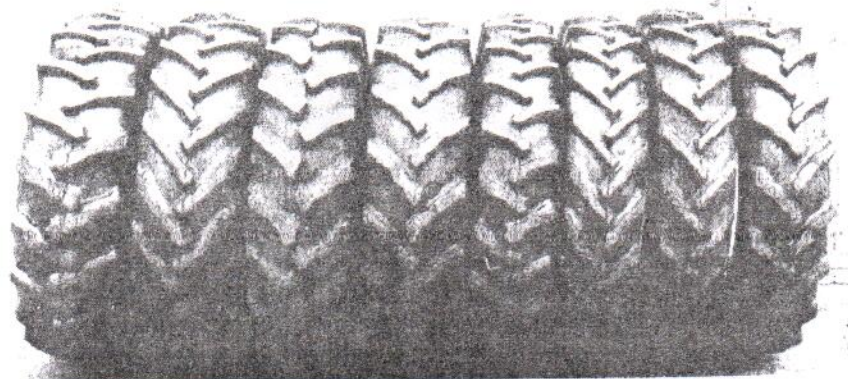


Fig. 6. Arriba: neumáticos motrices para distintos usos.
Centro y abajo: uso de cadenas en faenas agrícolas y forestales.

