



*Universidad Nacional de La Plata  
Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales*

# **ESTABILIDAD DEL TRACTOR AGRÍCOLA**

**Curso de Mecánica Aplicada**

## **1.CONSIDERACIONES GENERALES**

Cuando comenzamos el estudio de los elementos de un tractor, sus medidas, sus funciones, la resistencia de los materiales de los que está compuesto, las fuerzas estáticas que en él actúan, etc. lo estamos haciendo en forma aislada y puntual, pero no debemos olvidar que el tractor y todos sus elementos son parte del trabajo diario de los productores, que circula sobre un sistema heterogéneo con características propias que es el suelo y que es conducido por un productor o tractorista (que prioriza el uso de su maquinaria de acuerdo con el momento del año, la labor, etc.).

El objeto de esta publicación es poner en conocimiento de los alumnos todos los aspectos relacionados con la estabilidad del tractor trabajando en el suelo agrícola. Los demás temas mencionados serán de estudio en éste y otros cursos de la carrera.

La importancia de conocer los conceptos de estabilidad del tractor radica en obtener una correcta vinculación de los aperos al tractor, como así también lograr una operación segura con el mejor rendimiento.

## **2.-DEFINICIONES Y NOMENCLATURA**

Se explicitan a continuación un conjunto de parámetros que son tenidos en cuenta a la hora de evaluar la estabilidad del tractor, así como la simbología empleada para identificarlos.

- Altura del centro de gravedad:  $Y_g$
- Distancia entre ejes ó Batalla:  $L = L_1 + L_2$
- Distancia desde el eje trasero hasta el plano medio del tractor que contiene el centro de gravedad :  $L_1$
- Distancia desde el eje delantero hasta el plano medio del tractor que contiene el centro de gravedad :  $L_2$
- Peso total del tractor :  $Q_t = Q_1 + Q_2$
- Componente del peso total ( $Q_t$ ) sobre el tren trasero :  $Q_1$
- Componente del peso total ( $Q_t$ ) sobre el tren delantero :  $Q_2$
- Reacción del suelo sobre el tren trasero :  $R_1$
- Reacción del suelo sobre el tren delantero :  $R_2$
- Esfuerzo de tiro total del tractor :  $F$
- Componente horizontal de  $F$  :  $T = F \cdot \cos \alpha$
- Componente vertical de  $F$  :  $V = F \cdot \sin \alpha$
- Ángulo que forma la horizontal (  $T$  ) con la fuerza ( $F$ ) :  $\alpha$
- Distancia desde el punto de enganche al plano del eje trasero :  $a$
- Altura de la barra de tiro :  $H_b$
- Distancia desde el plano medio de la rueda perteneciente al eje trasero hasta el plano medio de la otra rueda del mismo eje : Trocha trasera ( $T$ ). Si esta medida se refiere a las ruedas delanteras se denomina Trocha Delantera.
- Peso Adherente en el eje trasero  $Q_{ad1}$  ( se definirá más adelante)
- Peso Adherente en el eje delantero  $Q_{ad2}$  ( se definirá más adelante)
- Radio de ruedas traseras :  $r_1$
- Radio de ruedas delanteras :  $r_2$

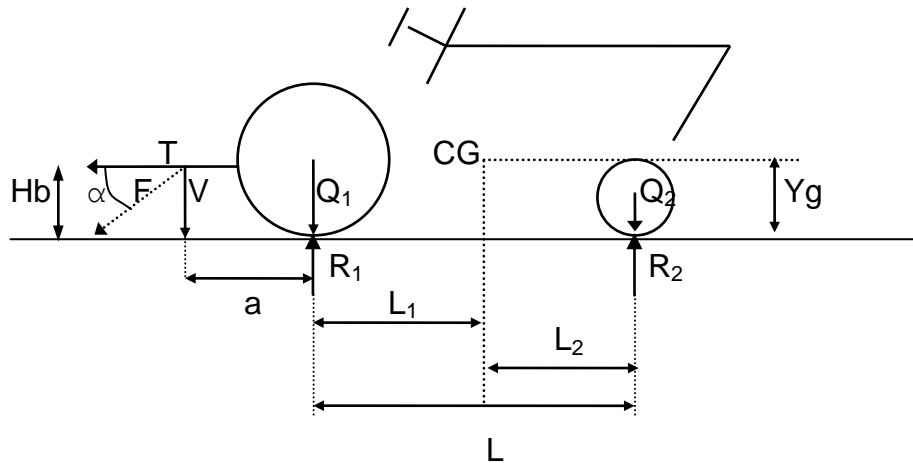


Figura 1: Vista lateral de un tractor

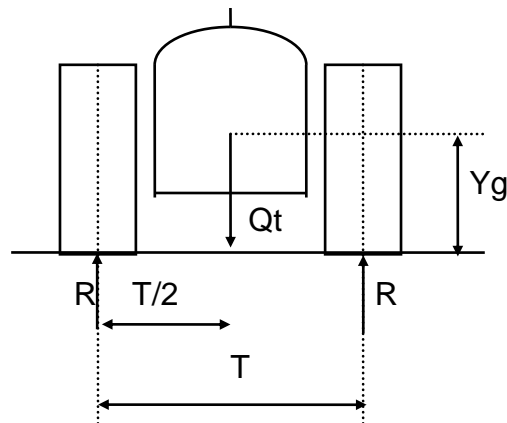


Figura 2: Vista posterior de un tractor

### 3.- CENTRO DE GRAVEDAD

#### 3.1.-Definición:

El centro de gravedad de un cuerpo es el punto por donde pasa la recta de acción de su peso, cualquiera sea su posición.

La ubicación del centro de gravedad de un vehículo es importante, pues permite determinar la probabilidad de vuelco del mismo.

En este caso, el vehículo es un tractor agrícola y la importancia de conocer la posición del centro de gravedad radica en poder determinar el equilibrio de fuerzas para evitar dos problemas:

- a) el vuelco anteroposterior, y
- b) el vuelco lateral

#### 3.2.- Determinación

El centro de gravedad posee dos coordenadas:

- a) **Y<sub>g</sub>** que es la altura del centro de gravedad y
- b) **L<sub>1</sub>** que es la distancia desde el eje trasero hasta el plano medio del tractor que contiene el centro de gravedad.

### 3.2.1.-Determinación de $L_1$

Un tractor visto lateralmente, puede reducirse a un sistema de dos fuerzas paralelas  $Q_1$  y  $Q_2$ , las que representan los pesos sobre el tren trasero y delantero respectivamente; o sea que el peso total ( $Q_t$ ) puede reemplazarse por dos fuerzas  $Q_1$  y  $Q_2$  aplicadas como se dijo anteriormente en el tren trasero y delantero respectivamente. Cada vez que se considere  $Q_t$  no deberán considerarse sus componentes  $Q_1$  y  $Q_2$  y viceversa (si se usan las componentes  $Q_1$  y  $Q_2$  no deberá utilizarse  $Q_t$ ). En los tractores de diseño tractivo convencional (tracción en el eje trasero), aproximadamente  $2/3$  del peso total ( $Q_t$ ) recaen sobre el eje trasero ( $Q_1$ ) y el 33% remanente sobre el eje delantero ( $Q_2$ ).

Observando la Figura 3, que puede ser un tractor parado o avanzando a velocidad constante sin tirar de ningún apero, llegaremos a conclusiones que nos permitirán determinar  $L_1$ .

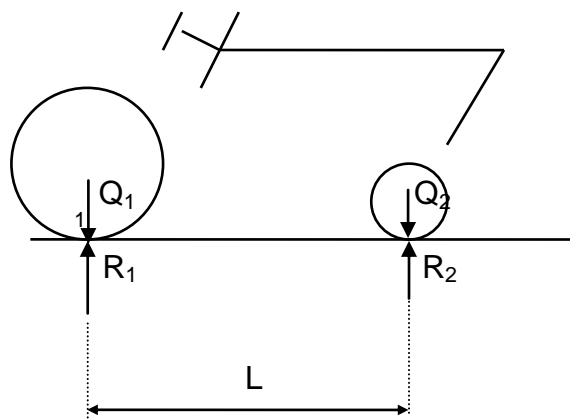


Figura 3: Pesos estáticos y reacciones

Como el tractor de la fig. N° 3 está en equilibrio, se cumplen 3 condiciones:

$$\begin{aligned} \sum F_x &= 0 \\ \sum F_y &= 0 \\ \sum M_1 &= 0 \end{aligned}$$

Como a cada acción se le opone una reacción de igual magnitud pero de signo contrario, tenemos:

- Que a  $Q_1$  y  $Q_2$  se le oponen  $R_1$  y  $R_2$  respectivamente. Entonces:

$$|Q_1 + Q_2| = |R_1 + R_2| \quad |Q_1| = |R_1| \quad |Q_2| = |R_2|$$

A continuación se reemplazan, en la figura 4, las componentes de  $Q_t$  ( $Q_1$  y  $Q_2$ ) por  $Q_t$

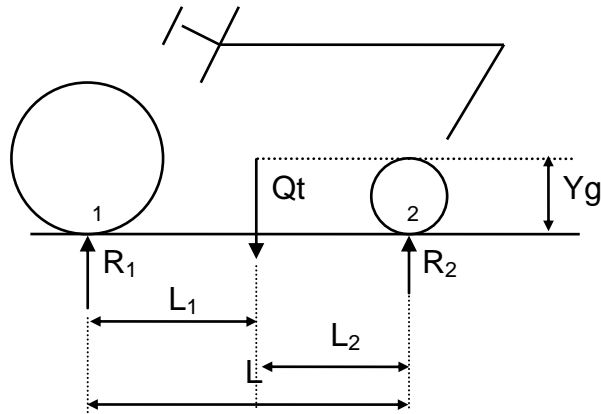


Figura 4: Cálculo de  $L_1$

Tomando momento en los puntos 1 y 2 en la Figura 4 obtenemos:

$$\sum M_1 = Q_t \cdot L_1 - R_2 \cdot L = 0 \Rightarrow Q_t \cdot L_1 = R_2 \cdot L \text{ y}$$

$$\frac{R_2 \cdot L}{Q_t} = L_1 = \frac{Q_t \cdot L}{Q_t}$$

$$\sum M_2 = -Q_t \cdot L_2 + R_1 \cdot L = 0 \Rightarrow Q_t \cdot L_2 = R_1 \cdot L \text{ y}$$

$$\frac{R_1 \cdot L}{Q_t} = L_2 = \frac{Q_t \cdot L}{Q_t}$$

#### 4. VUELCO ANTEROPOSTERIOR

Teniendo en cuenta la posición del tractor de la figura 6, podemos ver que si se incrementa el ángulo de ascenso del tractor ( $\alpha$ ) va a llegar un punto en que el momento de vuelco del tractor dado por  $Q_t \cdot \text{sen } \alpha \cdot Y_g$  va a ser igual al momento restituyente del mismo definido por  $Q_t \cdot \text{cos } \alpha \cdot L_1$  ( $R'_2$  va a ser 0 porque la rueda delantera se encuentra apenas tocando el suelo debido a que el tractor está a punto de volcar).

Al ángulo en que se igualan dichos momentos se lo denomina ángulo límite y se lo representa como  $\alpha_{\text{lím}}$ . Con ángulos menores que el  $\alpha_{\text{lím}}$  la recta de acción de la fuerza  $Q_t$  pasa a la derecha del punto 1 generando un momento positivo (horario) o restituyente. En el  $\alpha_{\text{lím}}$  la recta de acción de la fuerza  $Q_t$  pasa exactamente por el punto 1 igualándose los momentos restituyente y de vuelco. Cuando se supera el  $\alpha_{\text{lím}}$  la recta de acción de  $Q_t$  pasa a la izquierda del punto 1 generando un momento negativo (antihorario) produciendo el vuelco anteroposterior del tractor que gira en el punto 1.

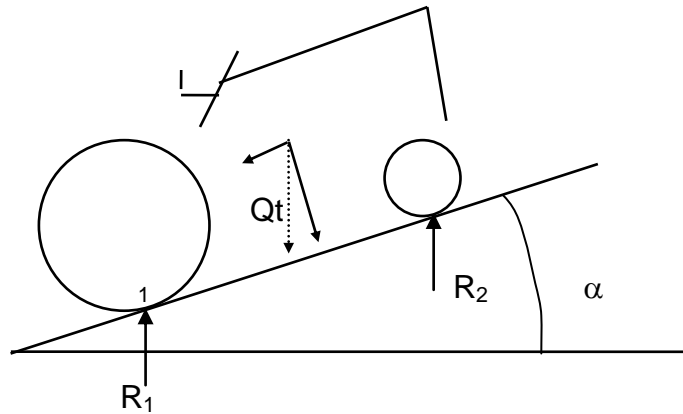


Figura 6: Cálculo del  $\alpha_{\text{lím}}$

#### 4.1. Cálculo del $\alpha_{\text{lím}}$ de ascenso de un tractor

Tomando momento en el punto 1 ( $R_1$  no produce momento) de la figura 6 y suponiendo la condición límite ( $R_2 = 0$ ) tenemos:

$$\Sigma M_1 = Q_t \cdot \cos \alpha \cdot L_1 - Q_t \cdot \text{sen } \alpha \cdot Y_g = 0$$

En estas condiciones el tractor se dice que está en equilibrio inestable. Está ascendiendo un plano tan inclinado que la recta de acción de  $Q_t$  pasa por el punto 1 y como consecuencia el momento restituyente es igual al momento de vuelco.

De la ecuación anterior es posible despejar el ángulo límite:

$$Q_t \cdot \cos \alpha \cdot L_1 = Q_t \cdot \text{sen } \alpha \cdot Y_g$$

$$\frac{\text{sen } \alpha}{\cos \alpha} = \frac{L_1}{Y_g}$$

$$\text{tg } \alpha_{\text{lím}} = \frac{L_1}{Y_g}$$

$$\alpha_{\text{lím}} = \text{arctg} (L_1/Y_g)$$

**Conclusión:** cuanto más elevado esté el centro de gravedad ( $Y_g$  mayores) menor va a ser la pendiente que podrá subir el tractor y por la tanto mayor será la probabilidad de vuelco. Contrariamente cuanto más distante esté el centro de gravedad del eje trasero ( $L_1$  mayores), menor será la probabilidad de vuelco.

#### 4.2. Tractor trabajando en el suelo agrícola

Hasta aquí vimos al tractor detenido o circulando en vacío, es decir, sin arrastrar ningún apero, pero la situación más usual es que el tractor esté arrastrando algún apero (arado de rejas, cincel, rastra, sembradora).

En los análisis de equilibrio dinámico se usarán  $Q_1$  y  $Q_2$  en lugar de  $Q_t$  y se calculan de la siguiente manera (observando la figura nº 7):

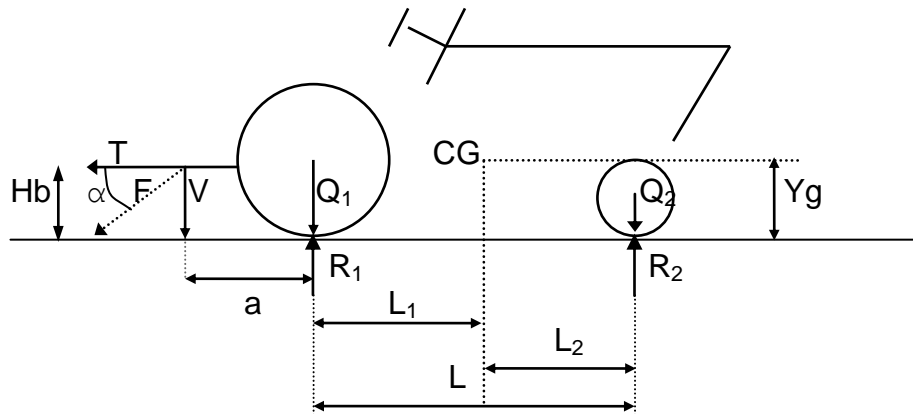


Figura 7: Tractor tirando de un apero

$$Q_1 = \frac{Q_t \cdot L_2}{L}$$

$$Q_2 = \frac{Q_t \cdot L_1}{L}$$

Para obtener las componentes horizontal (T) y vertical (V) de la fuerza F se tiene en cuenta el ángulo  $\alpha$  de inclinación de la barra de tiro. De la misma forma que lo dicho para  $Q_t$  cuando se emplea F no deben emplearse sus componentes y viceversa (de usar T y V no deberá usarse F).

$$T = F \cdot \cos \alpha$$

$$V = F \cdot \sen \alpha$$

Las reacciones que opone el suelo a las fuerzas  $Q_1$  y  $Q_2$  se denominan  $R_1$  y  $R_2$  respectivamente y corresponden a la sumatoria de cargas estáticas y dinámicas que se encuentran sobre los puntos 1 y 2. A dicha suma de cargas se la denomina peso adherente simbolizándose como  $Q_{ad1}$  y  $Q_{ad2}$ . Quiere decir que las reacciones que presenta el suelo se corresponden con los pesos adherentes trasero y delantero ( $Q_{ad1}$  y  $Q_{ad2}$  respectivamente). De estas reacciones del suelo sobre las ruedas del tractor depende la capacidad de tracción de las mismas sobre el suelo. Las reacciones del suelo y los pesos adherentes tienen igual módulo y sentido contrario. Es decir que el valor de  $R_1$  y  $Q_{ad1}$  es el mismo solo que presentan, la primera, sentido ascendente (hacia arriba) y el segundo, descendente, estando aplicados ambos en el mismo punto (1 ó 2).

$$|R_1| = |Q_{ad1}|$$

Para calcular  $Q_{ad1}$  y  $Q_{ad2}$  se toman  $\sum M = 0$  en los puntos 1 y 2 de la figura 7 y en lugar de colocar  $R_1$  y  $R_2$  se ponen sus equivalentes  $Q_{ad1}$  y  $Q_{ad2}$  (hemos visto que presentan el mismo módulo o valor absoluto)

$$\sum M_1 = Q_2 \cdot L - Q_{ad2} \cdot L - V \cdot a - T \cdot Hb = 0$$

$$Q_{ad2} \cdot L = Q_2 \cdot L - V \cdot a - T \cdot Hb$$

$$Q_{ad2} = \frac{Q_2 \cdot L - V \cdot a - T \cdot Hb}{L}$$

$$Q_{ad2} = Q_2 - \frac{V \cdot a}{L} - \frac{T \cdot Hb}{L}$$

$Q_2$  = peso estático que puede ser con o sin lastre

$\frac{T \cdot Hb}{L}$  = transferencia de peso por esfuerzo de tracción y posición de la barra

$\frac{V \cdot a}{L}$  = carga dinámica transferida al eje trasero

$$\sum M_2 = - Q_1 \cdot L + Q_{ad1} \cdot L - V \cdot (a + L) - T \cdot Hb = 0$$

$$Q_{ad1} \cdot L = Q_1 \cdot L + V \cdot (a + L) + T \cdot Hb$$

$$Q_{ad1} = Q_1 + \frac{V \cdot (a + L)}{L} + \frac{T \cdot Hb}{L}$$

$$\frac{T \cdot Hb}{L} + \frac{V \cdot (a + L)}{L} = \frac{T \cdot Hb}{L} + \frac{V \cdot a}{L} + V$$

$\frac{T \cdot Hb}{L} + \frac{V \cdot a}{L}$  = transferencia de peso anteroposterior

Se puede apreciar que cuando el tractor arrastra un apero  $Q_1 \neq Q_{ad1}$  y  $Q_2 \neq Q_{ad2}$ . A  $Q_1$  y a  $Q_2$  se les han agregado y quitado respectivamente los correspondientes términos de transferencia de peso anteroposterior, que son funciones de la fuerza  $F$  (esfuerzo de tiro del tractor) y de la posición de la barra de tiro. Obsérvese que existe una diferencia entre el aumento de  $Q_1$  y la disminución de  $Q_2$ . Dicha diferencia corresponde a la componente  $V$  que se suma a  $Q_1$  pero que no se resta de  $Q_2$ . La transferencia de peso, en cambio, es peso que se resta de  $Q_2$  y se suma a  $Q_1$ . En los tractores de diseño convencional las ruedas que traccionan están en el eje trasero y la transferencia de peso es ventajosa debido a que va a permitir al eje tractivo afirmarse mejor al suelo y con ello disminuir el patinamiento. Sin embargo es recomendable dejar un remanente de un 15% del  $Q_t$  recayendo sobre el eje delantero para no disminuir la maniobrabilidad del vehículo.

#### Conclusión:

Cuando el tractor está trabajando (arrastrando un apero), sobre el tren trasero aparece una carga que se suma a  $Q_1$  y que en el tren delantero se resta a  $Q_2$ . Es decir que el peso adherente aumenta en el tren trasero, respecto a las condiciones de vacío.



El  $Q_{ad1}$  de un tractor se incrementa cuando:

- es menor su batalla ( $L$ );
- es mayor el esfuerzo de tiro ( $F$ );
- es mayor la altura de la barra de tiro ( $H_b$ );
- es mayor el largo de la barra de tiro ( $a$ )

La batalla y el esfuerzo de tiro no se modifican para un tractor y labor determinados, por lo que solo podemos modificar  $H_b$  y  $a$  si queremos modificar los pesos adherentes.

#### 4.2a. Lastre y mejora del peso adherente

Las ecuaciones de  $Q_{ad1}$  y  $Q_{ad2}$  muestran que para aumentar el peso adherente tanto en ruedas delanteras como traseras se pueden adoptar varias soluciones.

#### Peso adherente en el tren trasero: $Q_{ad1}$

La forma directa de aumentarlo es incrementar el  $Q_1$  lastrando al tractor en las ruedas traseras. Esta operación se puede efectuar llenando la cámara con agua (hidroinflado) y/o colocando lastres metálicos sobre las llantas. Este peso recae directamente sobre las ruedas. La forma indirecta de conseguirlo es colocar la barra de tiro lo más alta y larga posible.

#### Peso adherente en el tren delantero: $Q_{ad2}$

La única forma de aumentarlo es colocar lastres metálicos a modo de valijines en una barra dispuesta a tal fin en el chasis del tractor que se encuentra por delante del eje delantero (no recae directamente sobre las ruedas), razón por la cual produce un esfuerzo extra sobre el chasis.

Veremos que sucede con  $Q_{ad1}$  y  $Q_{ad2}$  al utilizar el lastre delantero.

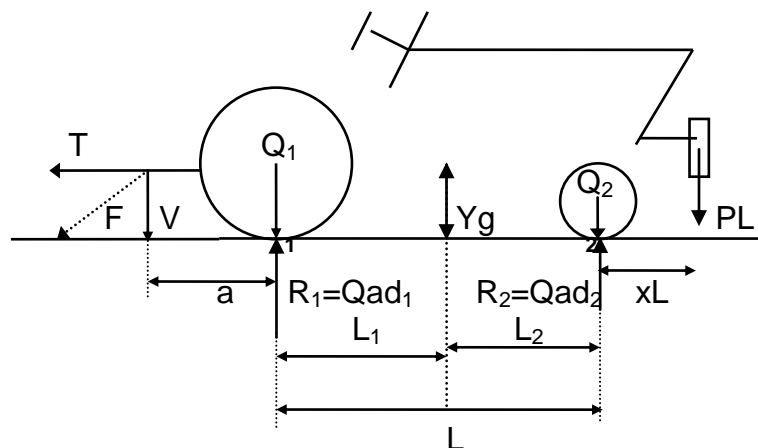


Figura 8: Peso adherente trasero y delantero

Donde  $PL$  es el peso del lastre y  $xL$  es la distancia entre la recta de acción de  $PL$  y el plano medio de la rueda perteneciente al eje delantero.

Tomando momento en el punto 2 de la figura 8 y suponiendo que está en equilibrio nos queda:

$$\Sigma M_2 = PL \cdot xL + Q_{ad1} \cdot L - Q_1 \cdot L - V(a + L) - T \cdot Hb = 0$$

$$Q_{ad1} = \frac{Q_1 \cdot L}{L} + \frac{V(a + L)}{L} + \frac{T \cdot Hb}{L} - \frac{PL \cdot xL}{L}$$

$$Q_{ad1} = Q_1 + \frac{V(a + L)}{L} + \frac{T \cdot Hb}{L} - \frac{PL \cdot xL}{L}$$

Esto demuestra que el  $Q_{ad1}$  disminuye si se coloca lastre en el tren delantero ya que el término  $\frac{PL \cdot xL}{L}$  aparece restando.

Tomando momento en el punto 1 de la figura 8 y suponiendo que está en equilibrio nos queda:

$$PL \cdot (xL + L) + Q_2 \cdot L - Q_{ad2} \cdot L - V \cdot a - T \cdot Hb = 0$$

$$Q_{ad2} = Q_2 + \frac{PL \cdot (xL + L)}{L} - \frac{V \cdot a}{L} - \frac{T \cdot Hb}{L}$$

Se deduce así que el  $Q_{ad2}$  aumenta con la colocación de un lastre delantero (PL) y con  $Q_2$ , pero disminuye cuando aparecen T y V. Si los términos de transferencia de peso (T y V) superan a los que contienen a  $Q_2$  y PL entonces el tractor tiende a volcar hacia atrás (encabritamiento).

#### 4.2b. Cálculo de la componente horizontal de F ( T ) máxima o límite

##### *4.2.b1. En un plano horizontal*

La fuerza que ejercen en determinados casos los aperos puede provocar el “encabritamiento” del tractor, y en condiciones límites el vuelco anteroposterior.

Forma de cálculo del T límite:

Tomando momento en 1 de la figura 7 y considerando que el tractor se encuentra en equilibrio queda:

$$\Sigma M_1 = Q_t \cdot L_1 - R_2 \cdot L - T \cdot Hb - V \cdot a = 0$$

$$R_2 \cdot L = Q_t \cdot L_1 - T \cdot Hb - V \cdot a$$

En la situación de vuelco anteroposterior por exceso de esfuerzo de tiro, la rueda delantera apenas toca el suelo, por eso  $R_2$  se considera igual a 0.

$$Q_t \cdot L_1 - T \cdot H_b - V \cdot a = 0$$

$$T \cdot H_b = Q_t \cdot L_1 - V \cdot a$$

$$T_{\text{crítico}} = \frac{Q_t \cdot L_1 - V \cdot a}{H_b}$$

Conclusiones:

Ante un mismo esfuerzo de tiro las probabilidades de encabritamiento del tractor se verán reducidas cuando:

- Más pesado sea el tractor (  $Q_t$  ),
- Más corta y baja esté la barra de tiro (  $a$  y  $H_b$  ),
- Más larga sea la batalla del tractor (  $L$  ).

La variable más fácilmente manejable es la barra de tiro, siendo más complicado variar  $Q_t$  y no variable la batalla, para un determinado tractor.

Hay maquinarias que no poseen la componente vertical de  $F$  (  $V$  ), por ejemplo un acoplado, es decir que solo poseen componente horizontal (  $T$  ). En este caso la ecuación vista anteriormente se reduce a la siguiente:

$$T_{\text{crítico}} = \frac{Q_t \cdot L_1}{H_b}$$

4.2.b.2. En un plano inclinado

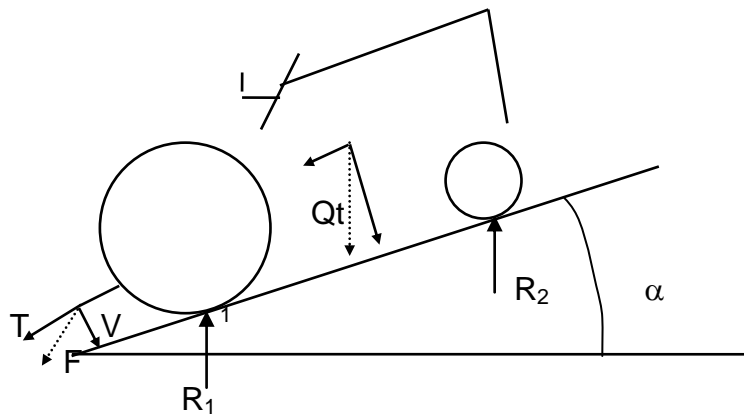


Figura 9: Tractor tirando en un plano inclinado

Tomando momento en el punto 1 (se anula  $R_1$ ) de la figura 9 y considerando que está en la condición límite ( $R_2 = 0$ ) se verifica que:

$$\Sigma M_1 = Q_t \cdot \cos \alpha \cdot L_1 - T \cdot H_b - V \cdot a - Q_t \cdot \sin \alpha \cdot Y_g = 0$$

$$T \cdot H_b = Q_t \cdot \cos \alpha \cdot L_1 - V \cdot a - Q_t \cdot \sin \alpha \cdot Y_g$$

$$T \text{ crítico} = - \frac{V \cdot a}{H_b} + \frac{Q_t \cdot (\cos \alpha \cdot L_1 - \sin \alpha \cdot Y_g)}{H_b}$$

En caso de maquinarias que no posean la componente vertical la ecuación vista anteriormente se reduce a la siguiente:

$$T \text{ crítico} = \frac{Q_t \cdot (\cos \alpha \cdot L_1 - \sin \alpha \cdot Y_g)}{H_b}$$

#### 4.3 Tractor acelerándose

Cuando un tractor es acelerado (aumenta o disminuye su velocidad), como cualquier cuerpo sometido a una acción, manifiesta una reacción que consiste en una tendencia a mantener su estado original de reposo o de velocidad constante en el que se encontraba. Esta reacción se denomina fuerza de inercia y se puede considerar que se encontrará ubicada en el punto de apoyo de la rueda trasera del tractor. Si el tractor sufre una aceleración o aumento de velocidad (hacia delante) la fuerza de inercia se dirigirá hacia delante y el vehículo deja de estar en equilibrio de traslación por lo que la sumatoria de fuerzas en el eje x difiere de 0. Analizaremos el caso de aceleración positiva o aumento de velocidad.

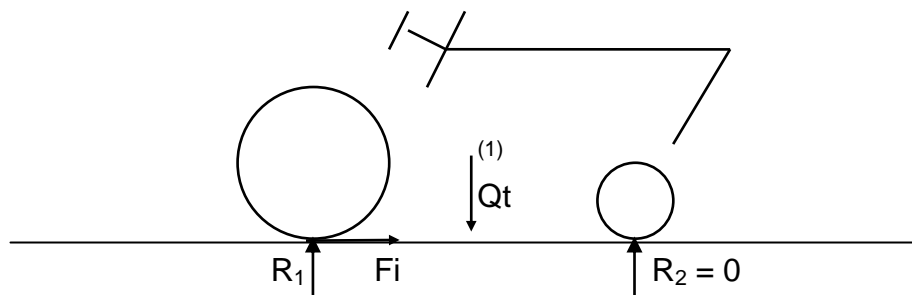


Figura 10: Tractor acelerándose

En el caso de la aceleración límite, el momento de vuelco generado por la fuerza de inercia sería tan grande que igualaría el momento restituyente dado por  $Q_t$  y el tractor dejaría de apoyar en el tren delantero ( $R_2 = 0$ ) para volcar hacia atrás girando en el punto de apoyo de la rueda trasera. Por lo tanto la ecuación de momento quedaría:

$$\sum M_1 = 0 = +R_1 \cdot L_1 - F_i \cdot Y_g$$

Obsérvese que  $R_1 \cdot L_1$  constituye el momento restituyente y  $F_i \cdot Y_g$  el momento de vuelco siendo además  $R_1 = Q_t$  pues es la situación límite (ya que  $R_2$  vale cero) resultando:

$$Q_t \cdot L_1 = F_i \cdot Y_g$$

$$\text{Siendo } F_i = m \cdot a$$

$$\text{donde } m = \text{masa del tractor} = Q_t / g \quad g = 9,8 \text{ m/s}^2$$

Reemplazando queda

$$Q_t \cdot L_1 = m \cdot a \cdot Y_g$$

$$Q_t \cdot L_1 = a \cdot Y_g \cdot Q_t / g$$

$$a = L_1 \cdot g / Y_g$$

## 5. VUELCO LATERAL

Es posible que ocurra cuando el tractor se desplaza en forma perpendicular a una pendiente (por ejemplo cuando compacta el forraje en un silo o se trabaja siguiendo las curvas de nivel), o también cuando gira en una curva muy cerrada y/o lo hace a gran velocidad.

### Cálculo del ángulo límite de vuelco lateral:

#### 5.1 Caso de pendiente excesiva:

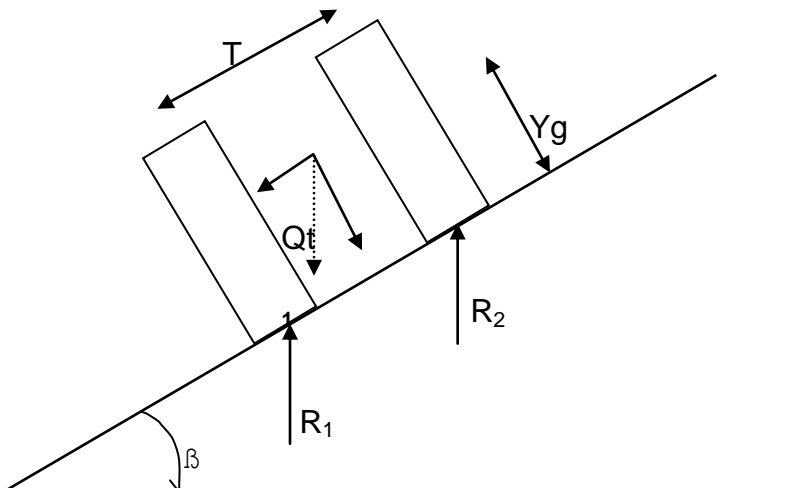


Figura 11: Vuelco lateral. Pendiente excesiva

Tomando momento en el punto 1 de la Figura 11 y considerando que el tractor se encuentra en la condición límite ( $R_2 = 0$ ) la recta de acción de  $Q_t$  pasa por el punto 1 y se verifica que:

$$\Sigma M_1 = Q_t \cdot \cos \beta \cdot T/2 - Q_t \cdot \sin \beta \cdot Y_g = 0$$

$$\frac{\sin \beta}{\cos \beta} = \frac{T/2}{Y_g}$$

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{T/2}{Y_g}$$

$$\beta_{\text{límite}} = \operatorname{arctg} \frac{T/2}{Y_g}$$

### Conclusiones:

En un tractor la probabilidad de vuelco lateral va a ser menor cuando:

- Mayor sea la trocha, parámetro modificable;
- Menor altura tenga el centro de gravedad, no modificable.

### 5.2. Caso de tractor tomando una curva:

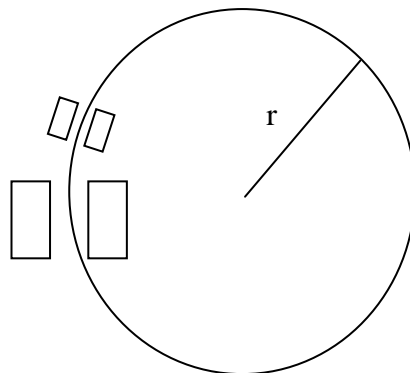


Figura 12: vuelco lateral en una curva (vista en planta)

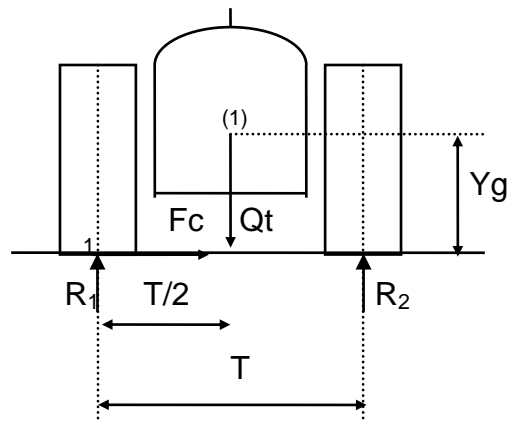


Figura 13: vuelco lateral en una curva (vista posterior)

Producto de la adherencia del suelo con el neumático aparece la fuerza de roce que se aplica en la zona de contacto rueda-suelo y que puede traducirse en una fuerza centrípeta  $F_c$ . En el momento de vuelco, la reacción en la rueda interna a la curva vale cero y todo el peso es soportado por  $R_1$ .

$F_c$  = fuerza centrípeta que puede expresarse como:

$$F_c = m \cdot a_c$$

$m$  = masa del tractor ( $Q_t / g$ )

$a_c$  = aceleración centrípeta

$$a_c = \omega^2 \cdot r \quad \omega = v / r$$

$\omega$  = velocidad angular

$r$  = radio de giro

$$a_c = (v^2 / r^2) \cdot r = v^2 / r$$

$v$  = velocidad de avance del tractor

$$F_c = m \cdot v^2 / r$$

Quedan definidos dos momentos; uno equilibrante y uno de vuelco dados por:

$$M_v = F_c \cdot Y_g \quad M_e = Q_t \cdot T / 2$$

Tomando momento en el punto 1 de la Figura 13 y considerando que el tractor se encuentra en equilibrio ( $R_2 = 0$ ) se verifica que:

$$\Sigma M_1 = Q_t \cdot T/2 - F_c \cdot Y_g = 0$$

$$Q_t \cdot T/2 = \frac{m \cdot v^2}{r} \cdot Y_g$$

$$Q_t \cdot T/2 = \frac{Q_t \cdot v^2}{g \cdot r} \cdot Y_g$$

$$T/2 = \frac{v^2}{g \cdot r} \cdot Y_g$$

$$r = \frac{2 \cdot v^2 \cdot Y_g}{g \cdot T}$$

Se puede concluir que el tractor tendrá menos posibilidad de volcar lateralmente cuando la velocidad sea menor, mayor sea el radio de giro, menor sea la altura del centro de gravedad y mayor sea la trocha. Asimismo, obsérvese que si elevamos la velocidad de avance al doble, habrá que aumentar el radio de giro 4 veces para mantener la condición de equilibrio. Las formas de limitar el momento de vuelco son no tomar curvas muy cerradas (aumentar  $r$ ) o disminuir la velocidad de avance ( $v$ ). La forma de aumentar el momento restituyente es agrandar la trocha.

## **Bibliografía recomendada**

Botta, Draghi, Jorajuria (*Ex\_aequo*). "Los Tractores Agrícolas". 2000. Ed. Universidad Nacional de Luján.

Careri, S. "Física para estudiantes de Ciencias Agrarias" Ed. Universidad de Lomas de Zamora. Facultad de Ciencias Agrarias.

Klein, A. "Mecánica de los cuerpos rígidos". 1963. Editorial El Ateneo.

Mingot, M. "El tractor agrícola. Utilización y costos de trabajo". 1974. Ed. Agrícola Española S.A.

Ortiz – Cañavate, J; Hernanz, J.L. "Técnica de la mecanización agraria".1989. Ed. Mundi-Prensa.

Parker, H. "Texto simplificado de Estática y Resistencia de Materiales". 1975. Ed. Paramount.

Ripoll Palacio, V. "El tractor". 1972. Dilagro Ediciones

Timoshenko, S.; Young, D. "Mecánica Técnica". 1957. Ed. Librería Hachette S.