

Tractor agrícola: estabilidad frente al vuelco

Tractor: stability against rollover
Tracteur: stabilité contre le reversement

Autor:

Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo (INSHT)

Elaborado por:

Rafael Cano Gordo
CENTRO NACIONAL DE
MEDIOS DE PROTECCIÓN. INSHT

Esta NTP, primera de dos NTP referidas al vuelco del tractor agrícola y que sustituyen a la NTP 259, está dedicada al análisis de la estabilidad del tractor agrícola frente al vuelco, los indicadores que permiten evaluar dicha estabilidad y los fundamentos físicos de los factores causantes de la inestabilidad que puede llegar a ocasionar el accidente por vuelco.

Las NTP son guías de buenas prácticas. Sus indicaciones no son obligatorias salvo que estén recogidas en una disposición normativa vigente. A efectos de valorar la pertinencia de las recomendaciones contenidas en una NTP concreta es conveniente tener en cuenta su fecha de edición.

1. INTRODUCCIÓN

El Reglamento (UE) nº 167/2013 define tractor como "todo vehículo agrícola o forestal de ruedas u orugas, de motor, con dos ejes al menos y una velocidad máxima de fabricación igual o superior a 6 km/h, cuya función resida fundamentalmente en su potencia de tracción y que esté especialmente concebido para arrastrar, empujar, transportar y accionar determinados equipos intercambiables destinados a usos agrícolas o forestales, o arrastrar remolques o equipos agrícolas o forestales; puede ser adaptado para transportar cargas en faenas agrícolas o forestales y estar equipado con uno o varios asientos de pasajeros".

Cuando el tractor como vehículo agrícola está asociado con equipos pueden realizarse tareas como labrar el terreno, abonar, sembrar, segar y acondicionar una cosecha, empacar, recolectar, abrir zanjas, nivelar un terreno, efectuar operaciones de carga y descarga, etc. El tractor puede considerarse como el exponente máximo de la mecanización agraria, que interviene en la mayoría de los trabajos mecanizados y que, al mismo tiempo, es agente material de múltiples accidentes que normalmente tienen consecuencias graves y mortales y debidas principalmente al vuelco del vehículo.

El análisis de los accidentes por vuelco del tractor muestra que los vuelcos laterales son más frecuentes que los vuelcos hacia atrás, mientras que los vuelcos hacia delante se presentan en muy raras ocasiones.

El conocimiento de los fundamentos relacionados con la estabilidad del tractor frente al vuelco debe propiciar la concienciación de los tractoristas acerca de la necesidad de su utilización segura.

2. ESTABILIDAD FRENTE AL VUELCO

En cada instante, la estabilidad del tractor depende de la posición de su centro de gravedad y de la extensión de la zona de estabilidad, que son características de diseño del tractor.

El centro de gravedad de un tractor está situado en una posición más elevada respecto al suelo en comparación con la mayoría de los otros vehículos, como automóviles o camiones. Ello es una característica inherente de diseño debida a que se requiere mayor altura libre sobre el terreno para la realización de las labores agrícolas y la circulación por superficies irregulares. Por tanto, esta posición más alta del centro de gravedad provoca que el riesgo de vuelco del tractor sea mayor que el de un vehículo convencional.

Con carácter general puede decirse que el centro de gravedad del tractor está situado por delante del eje trasero, ligeramente por encima de él y contenido en el plano transversal medio del tractor (figura 1).

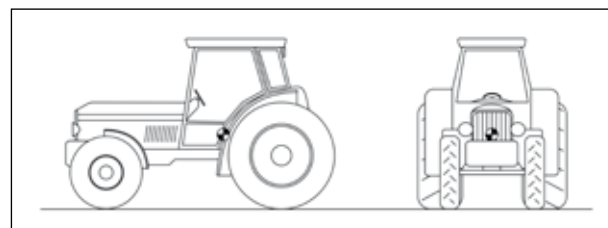


Figura 1. Centro de gravedad.

Cuando un tractor está apoyado en una superficie plana, las líneas imaginarias que unen los puntos de contacto de los neumáticos con la superficie del suelo delimitan la zona de estabilidad (base de apoyo) del tractor (figuras 2a y 2b). La línea que conecta los neumáticos traseros es la línea de estabilidad trasera, mientras que las líneas que conectan los neumáticos traseros y delanteros en el mismo lado son las líneas de estabilidad laterales.

La extensión de la zona de estabilidad está determinada por los valores de la distancia entre los ejes del tractor (L) y del ancho de vía de cada eje (S_1 y S_2).

En estas circunstancias el tractor estará en equilibrio estable si la proyección vertical de su centro de gravedad queda dentro de la zona de estabilidad. Por tanto, el

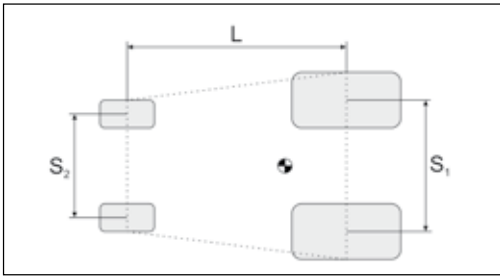


Figura 2a. Zona de estabilidad.

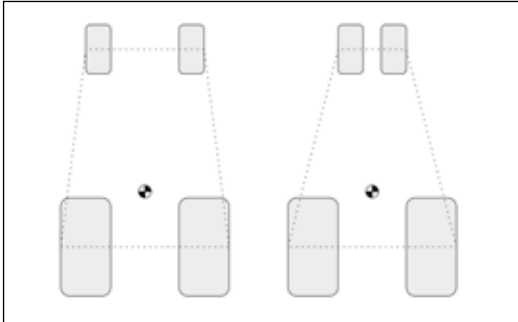


Figura 2b. Zonas de estabilidad con distinta extensión.

tractor será más estable cuanto mayor sea la extensión de su zona de estabilidad (valores mayores de ancho de vía y distancia entre ejes, tractor provisto de neumáticos anchos y ruedas dobles).

Un cambio en la posición relativa del centro de gravedad que lo aproxime a una línea de estabilidad significa que el tractor se está desplazando hacia una posición más próxima a la inestabilidad (figura 3). Si la proyección del centro de gravedad llegara a traspasar las líneas de estabilidad laterales se produciría el vuelco lateral del tractor y si traspasara la línea de estabilidad trasera el vuelco sería hacia atrás.

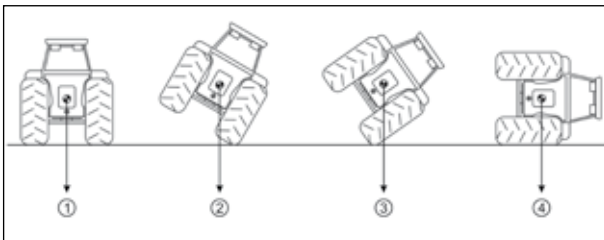


Figura 3. Posición relativa del centro de gravedad.

Por tanto, puede afirmarse que un tractor será más estable cuanto menor sea la altura del centro de gravedad y cuando su centro de gravedad esté más adelantado respecto del eje trasero (figuras 4a y 4b).

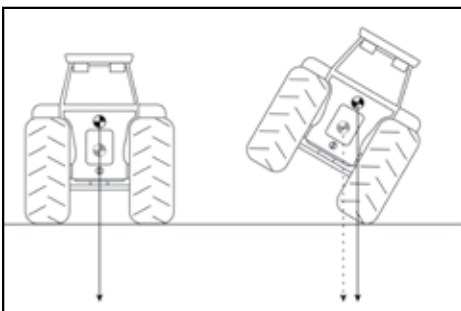


Figura 4a. Centro de gravedad elevado.

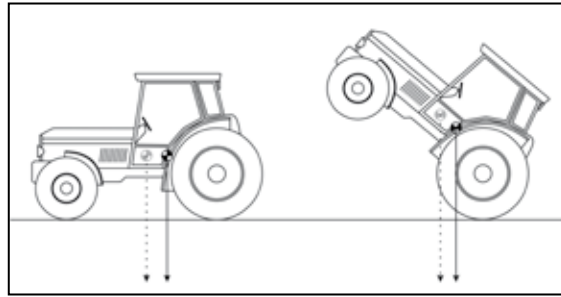


Figura 4b. Centro de gravedad atrasado.

Los tractores con tracción en las cuatro ruedas son más estables porque su centro de gravedad se encuentra más adelantado que en los tractores de tracción sólo en dos ruedas.

Por otro lado, los tractores estrechos (ancho de vía reducido) son más inestables que los convencionales porque su zona de estabilidad tiene una menor anchura, mientras que los tractores zancudos (altura libre aumentada) también lo son porque la posición de su centro de gravedad es más elevada.

Sin embargo, para determinar la probabilidad de vuelco del tractor es imprescindible conocer su comportamiento en condiciones estáticas y dinámicas ya que, además de los factores que caracterizan el comportamiento estático del tractor, debe tenerse en cuenta aquellos otros que afectan a su estabilidad dinámica. Por ello, la velocidad del tractor, el estado del terreno y las vibraciones deben ser considerados igualmente. El análisis de la estabilidad dinámica debe incluir los centros de gravedad de los equipos acoplados al tractor. Para estudiar el comportamiento dinámico debe analizarse la variación de los ángulos de vuelco en función de los factores mencionados.

Es necesario el control de todos estos factores para evitar el vuelco. La acción conjunta de ambos comportamientos determina el grado de estabilidad del tractor en un instante determinado (figura 5).

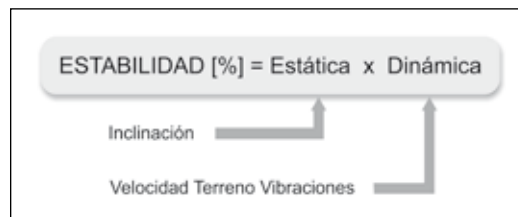


Figura 5: Grado de estabilidad del tractor.

3. FACTORES DE INESTABILIDAD

Determinadas situaciones que se presentan durante la realización de las tareas agrícolas pueden originar el desplazamiento de la posición relativa del centro de gravedad del tractor y por tanto llegar a producir el vuelco.

Los factores de inestabilidad desencadenantes de este desplazamiento pueden ser: la circulación sobre una superficie inclinada, las irregularidades del terreno, el acoplamiento de equipos intercambiables, la acción de la fuerza centrífuga, la rotación del eje trasero del tractor, el apalancamiento de la barra de tiro o una brusca aceleración del tractor.

El análisis de los factores de inestabilidad puede realizarse mediante los indicadores de vuelco que son

considerados como aquellas variables destinadas a evaluar la estabilidad del tractor (figura 6). Algunos de estos indicadores están relacionados con el diseño del tractor mientras otros dependen de los diferentes equipos que pueden llevar acoplados.

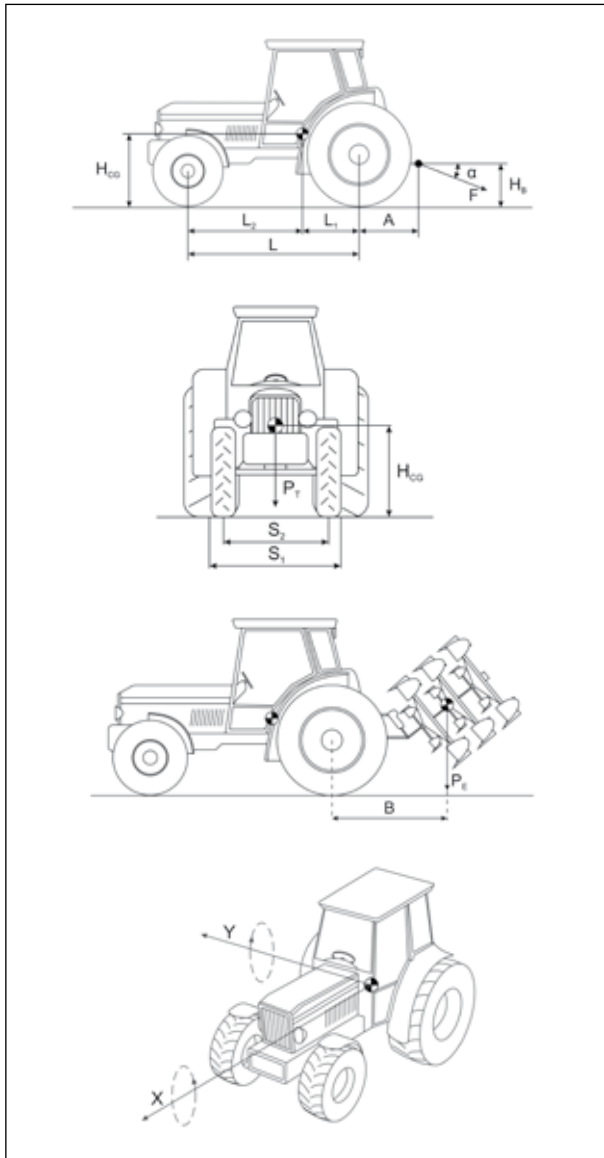


Figura 6: Indicadores de vuelco.

Se pueden considerar los siguientes indicadores de vuelco relacionados con el diseño del tractor:

- P_T : peso del tractor
- H_{CG} : altura del centro de gravedad (distancia del centro de gravedad a la superficie del suelo).
- L : distancia entre ejes del tractor.
- L_1 : distancia entre el centro de gravedad y el eje trasero.
- L_2 : distancia entre el centro de gravedad y el eje delantero.
- S_1 : ancho de vía del eje trasero (separación entre las ruedas del eje trasero medida de centro a centro de neumático).
- S_2 : ancho de vía del eje delantero (separación entre las ruedas del eje delantero medida de centro a centro de neumático).
- A : distancia entre el punto de enganche y el eje trasero.

H_B : altura de la barra de tiro.

I_{xx} , I_{yy} : momentos de inercia. Tendencia de un cuerpo a permanecer en reposo o a continuar girando sobre un eje de rotación a la misma velocidad. En el caso del tractor se deben medir los momentos de inercia de alabeo I_{xx} y de cabeceo I_{yy} .

Por otro lado, los indicadores de vuelco referidos a los equipos acoplados al tractor son los siguientes:

- F : fuerza de tiro.
- α : ángulo de tiro.
- P_E : peso del equipo acoplado.
- B : distancia entre el centro de gravedad del equipo y el eje trasero del tractor.

A continuación se efectúa el análisis de los fundamentos físicos de los factores de inestabilidad considerados.

Circulación sobre una superficie inclinada

Si el tractor avanza por la línea de máxima pendiente del terreno, la proyección del centro de gravedad está más próxima a la línea de estabilidad trasera (figura 7).

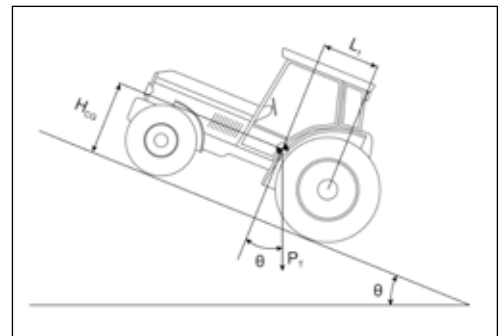


Figura 7. Terreno inclinado. Vuelco hacia atrás.

Si se incrementa la inclinación del terreno se alcanzará un valor del ángulo θ para el que la rueda delantera apenas estará en contacto con el suelo y en ese instante el momento de vuelco será igual al momento de recuperación (el tractor está en equilibrio inestable). El ángulo en que se igualan dichos momentos se denomina ángulo límite y representa la máxima pendiente que podrá subir el tractor sin volcar hacia atrás. Cuando se supera el ángulo límite, la proyección del centro de gravedad queda situada al otro lado de la línea de estabilidad trasera generando un momento de vuelco que hace que el tractor gire hacia atrás.

La probabilidad de vuelco hacia atrás es mayor cuanto mayor es la altura del centro de gravedad y menor es la distancia entre el centro de gravedad y el eje trasero.

Cuando el tractor circula siguiendo una curva de nivel de una superficie inclinada, su centro de gravedad está más próximo a las líneas de estabilidad laterales (figura 8).

Si aumenta la inclinación del terreno se alcanzará un valor límite del ángulo θ para el que el momento de vuelco será igual al momento de recuperación y que representa la máxima pendiente por la que podrá circular el tractor sin volcar lateralmente. Cuando se supera el ángulo límite, la proyección del centro de gravedad queda situada al otro lado de la línea de estabilidad lateral generando un momento de vuelco que hace que el tractor gire hacia un lado.

La probabilidad de vuelco lateral es mayor cuanto menor es el ancho de vía y mayor es la altura del centro de gravedad.

El hecho de trabajar en ladera con aperos suspendidos hundidos en la tierra tiene como resultado que el tractor se afiance en el terreno y por ello se dificulta y llega a impedirse el vuelco (por ejemplo, labrando en ladera con arado suspendido). Pero puede perderse la estabilidad en el momento en el que el conductor eleva el apero y lo saca de la tierra.

Asimismo, el deslizamiento en una pendiente debido a la pérdida de adherencia puede ocasionar el vuelco del tractor.

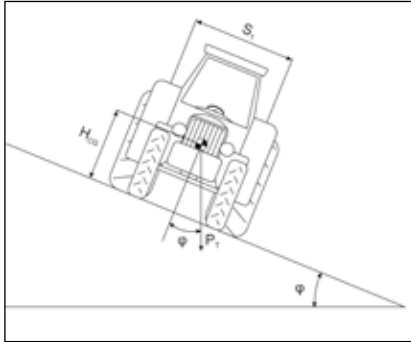


Figura 8: Terreno inclinado. Vuelco lateral.

Irregularidades del terreno

La circulación del tractor por un terreno irregular a velocidad excesiva puede causar el vuelco por el rebote debido al impacto de las ruedas con los resaltes del terreno.

La presencia de baches, huecos, toperas, pedruscos, tocones, amontonamientos de tierra o forraje, lindes en desnivel, zanjas o acequias pueden ocasionar el desequilibrio del tractor y provocar un vuelco.

Si el tractor circula por encima de un resalte o por una elevación del terreno, o entra en un bache o en una zona en depresión, el centro de gravedad se aproximará a los límites de la zona de estabilidad aumentando el riesgo de vuelco (figura 9).

La inestabilidad del tractor se incrementará si además su desplazamiento tiene lugar a lo largo de un terreno inclinado.



Figura 9: Circulación sobre un resalte.

Acoplamiento de equipos intercambiables

Cuando se acoplan al tractor equipos intercambiables suspendidos, tanto en las partes frontal y trasera como en los laterales, el centro de gravedad del conjunto tractor-equipo puede llegar a situarse más próximo a los límites de la zona de estabilidad, aumentando el riesgo de vuelco

(figuras 10a, 10b y 10c). Su nueva ubicación dependerá del peso del equipo intercambiable y de la posición de su centro de gravedad. Por tanto, la utilización de equipos suspendidos está limitada a aquellos equipos que por su peso y dimensiones no generen el vuelco del tractor.

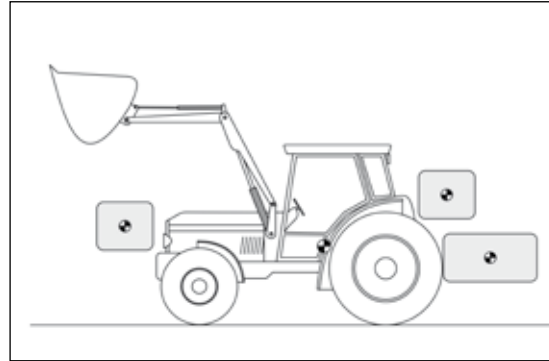


Figura 10a: Acoplamiento frontal y trasero.

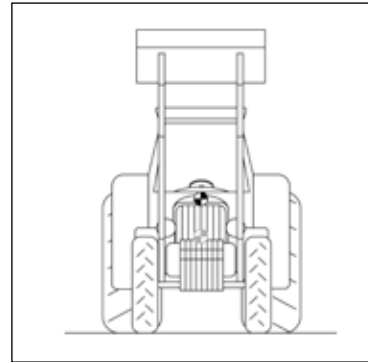


Figura 10b: Centro de gravedad con carga elevada.

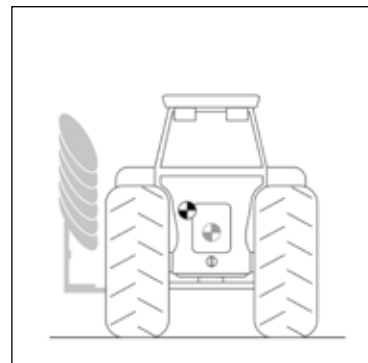


Figura 10c: Centro de gravedad desplazado a la izquierda.

En el caso de acoplamiento trasero, el tractor es más inestable cuando el peso del equipo o la distancia entre su centro de gravedad y el eje trasero del tractor son mayores, siendo capaces de generar un momento de vuelco superior al momento de recuperación debido al peso del tractor (figura 11).

Además, en los casos descritos se incrementará el riesgo de vuelco si el tractor se desplaza a lo largo de un terreno inclinado.

La transmisión de esfuerzos al tractor como consecuencia del volteo de un apero reversible también es causa de inestabilidad.

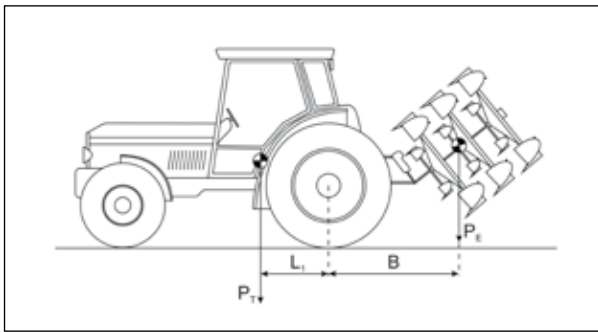


Figura 11: Equilibrio de momentos en un acoplamiento trasero.

Fuerza centrífuga

Es la fuerza que tiende a volcar lateralmente el tractor cuando su movimiento describe una trayectoria circular (figura 12).

El valor de la fuerza centrífuga en cada momento es función de la masa, la velocidad del tractor y de la curvatura de la trayectoria.

La fuerza centrífuga es directamente proporcional a la masa del tractor e inversamente proporcional al radio de curvatura de la trayectoria. Por tanto, será mayor cuanto más pesado sea el tractor y más cerrada sea la curva. Si el radio de curvatura se reduce a la mitad, la fuerza centrífuga se duplica.

La fuerza centrífuga es directamente proporcional al cuadrado de la velocidad del tractor. Por ello, si se duplica la velocidad del tractor, el valor de la fuerza centrífuga aumenta cuatro veces. Si se triplica la velocidad del tractor, la fuerza centrífuga aumenta nueve veces.

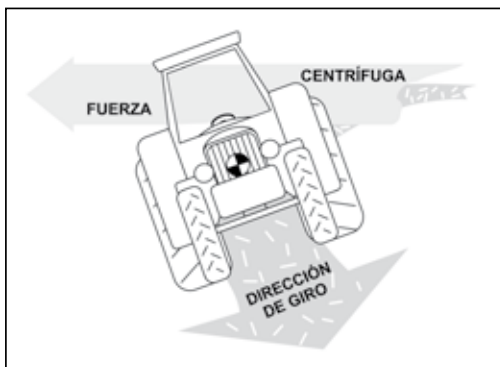


Figura 12: Fuerza centrífuga.

La manifestación más común de la fuerza centrífuga tiene lugar cuando el tractor circula demasiado rápido en una curva. Pero también la acción de la fuerza centrífuga puede presentarse si la circulación por caminos irregulares llegara a provocar que las ruedas delanteras del tractor se despegaran del suelo y aterrizaran de nuevo sobre él pero en una posición girada. Otro ejemplo que ilustra que la fuerza centrífuga es un factor que interviene en los vuelcos laterales es la maniobra brusca para corregir la dirección cuando el tractor comienza a salirse de la carretera.

Si el tractor está situado en un plano inclinado, estando por ello su centro de gravedad desplazado hacia la línea de estabilidad lateral, la acción de una fuerza centrífuga pequeña sería suficiente para empujar el tractor y volcarlo.

La fuerza centrífuga actuante es mayor cuando el tractor gira con un equipo suspendido.

Rotación del eje trasero

Para los tractores con tracción en dos ruedas, el motor del tractor transfiere energía al eje trasero generándose una fuerza de rotación en ese eje que permite al tractor desplazarse hacia delante.

Cuando los neumáticos traseros quedan bloqueados en el terreno, el eje trasero no puede girar y el chasis del tractor rotará alrededor de dicho eje. Esta rotación inversa provoca que la parte delantera del tractor se levante del suelo y que el centro de gravedad llegue a traspasar la línea de estabilidad trasera. Una vez alcanzada esta posición de no retorno, el tractor continuará rotando hacia atrás por su propio peso hasta que choca contra el suelo (figura 13). El vuelco hacia atrás ocurre tan rápidamente que el conductor apenas tiene tiempo para reaccionar. Se estima que la posición de no retorno se alcanza en 0,75 segundos y que el vuelco tiene lugar en 1,5 segundos.

En ocasiones este tiempo es menor debido a que la distancia entre el centro de gravedad y la línea de estabilidad trasera queda reducida cuando el tractor está estancado en un hoyo profundo o está subiendo por una pendiente pronunciada.

Los tractores con tracción en las cuatro ruedas tienen menos posibilidades de sufrir una rotación del eje trasero que los tractores de tracción en dos ruedas porque la fuerza de rotación es aplicada tanto en los ejes traseros como en los delanteros. A su vez, el centro de gravedad está más desplazado hacia adelante cuanto más peso es soportado por el eje delantero. Estas características reducen la tendencia de la parte delantera de los tractores con tracción en las cuatro ruedas a volcar hacia atrás.

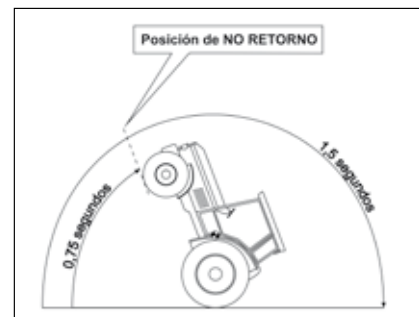


Figura 13: Rotación del eje trasero.

Efecto palanca

Los neumáticos de las ruedas traseras ejercen presión contra el suelo cuando un tractor con tracción en dos ruedas está remolcando una carga. Simultáneamente, la carga acoplada al tractor está tirando hacia atrás y hacia abajo oponiéndose al movimiento de avance del tractor. Por tanto, la carga remolcada actúa como una fuerza que trata de volcar el tractor hacia atrás (figura 14).

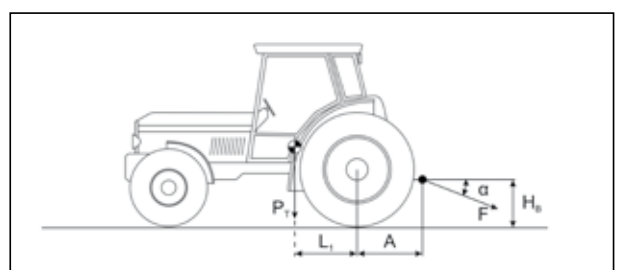


Figura 14: Acciones de la carga en el punto de enganche.

Cuanto más pesada sea la carga remolcada y mayor sea el ángulo de aplicación de la fuerza de tiro en el punto de enganche (ángulo de tiro), mayor será el efecto palanca y por tanto la carga arrastrada tendrá más posibilidad de provocar el vuelco hacia atrás.

El punto de enganche del tractor está diseñado para evitar el vuelco hacia atrás cuando se remolcan cargas. Pero este diseño dejará de ser efectivo para tal fin si la carga está enganchada en cualquier otro punto del tractor que no sea el diseñado específicamente para ello.

Cuando la parte delantera del tractor se levanta, el punto de enganche pasa a ocupar una posición más baja. Cuanto más se eleve la parte delantera, más bajo quedará situado el enganche, y de esta forma se reducirán el ángulo de tiro y el efecto palanca originado por la carga que tiende a inclinar el tractor hacia atrás. Por diseño, una carga siempre perderá su capacidad de inclinar un tractor hacia atrás antes de que el centro de gravedad del tractor alcance la línea de estabilidad trasera. Como la carga carece de suficiente capacidad para volcar el tractor hacia atrás, la parte delantera cae nuevamente al suelo. Si el conductor no detiene la tracción, todo el proceso se repetirá, provocando un rebote de la parte delantera del tractor.

Por otro lado, si se acopla incorrectamente la carga por encima del punto de enganche del tractor, aumentarán el ángulo de tiro y el apalancamiento de la carga (figura 15). Cuando la parte delantera del tractor gire hacia atrás, es posible que dichas variables no puedan ser reducidas a un valor suficientemente bajo, provocando que el centro de gravedad del tractor alcance la línea de estabilidad trasera. Cuando se engancha una carga al eje trasero, el ángulo de tiro y el apalancamiento no se reducen a medida que la parte delantera del tractor se levanta porque el punto de enganche (eje trasero) permanece constante mientras el tractor gira hacia atrás.

Un punto de enganche más alto también aumenta la presión de los neumáticos traseros contra el suelo, pero en el caso de que las ruedas traseras dejen de girar, la fuerza de rotación en el eje trasero comenzará a levantar la parte delantera del tractor. En ocasiones, el enganche incorrecto está relacionado con el arrastre de tocones, leños, piedras, equipos sin ruedas, como comederos para

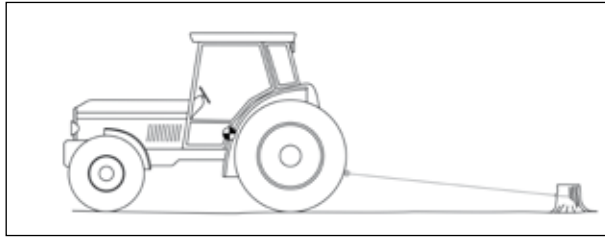


Figura 16: Tractor arrancando un tocón.

el ganado y tanques, y equipos agrícolas atascados en el barro. Muchas veces el conductor tiende a acoplar la carga por encima del punto de enganche del tractor para levantarla mientras la arrastra.

Para el caso de un tractor que arrastra una carga por una pendiente es necesario menos apalancamiento para voltearlo hacia atrás porque el centro de gravedad está más próximo a la línea de estabilidad trasera.

Cuando la carga está acoplada correctamente al punto de enganche es posible que el tractor vuelque hacia atrás si avanza demasiado rápido en una pendiente y la carga (por ejemplo, un leño de gran tamaño) de repente se clava en el terreno. Esto es debido a que la tracción puede ser tan rápida y fuerte que el momento generado hacia atrás ocasione el vuelco.

Supongamos que se quiere extraer un tocón utilizando un tractor (figura 16). Para ello se amarra una cadena alrededor del tocón y se acopla al punto de enganche del tractor. Si el tocón opone suficiente resistencia cuando el tractor comienza a tirar puede llegar a producirse un movimiento giratorio de las ruedas traseras por pérdida de adherencia. Esto continuará hasta que el conductor detenga el tractor. Pero puede darse el caso de que el movimiento giratorio de las ruedas traseras no sea suave y uniforme sino que resbalen de forma rápida y repentina y pudiendo incluso un neumático resbalar más que el otro. En estas condiciones puede desencadenarse la elevación de la parte delantera del tractor.

Aceleración brusca del tractor

Cuando el tractor es sometido a una aceleración, puede llegar a alcanzar un valor suficiente para que el momento de vuelco generado por la fuerza de avance supere el momento de recuperación debido al peso del tractor. En este instante el tractor dejaría de apoyarse en las ruedas delanteras e iniciaría el vuelco hacia atrás girando en el punto de apoyo de las ruedas traseras.

La probabilidad de vuelco debido a la aceleración es mayor cuanto menor es la distancia entre el centro de gravedad y el eje trasero y mayor es la altura del centro de gravedad.

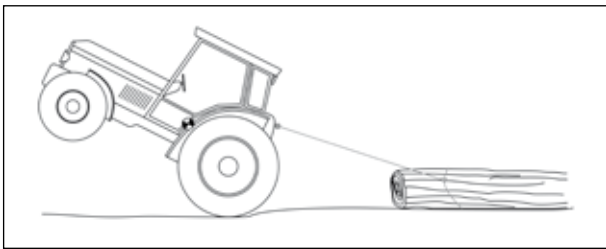


Figura 15: Acoplamiento en un punto inseguro.

BIBLIOGRAFÍA

Reglamento (UE) N° 167/2013 relativo a la homologación de los vehículos agrícolas o forestales y a la vigilancia del mercado de dichos vehículos.

Estabilidad del tractor agrícola. Curso de Mecánica Aplicada. Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales. Universidad Nacional de La Plata.

Tractor Stability and Instability. Agricultural and Biological Engineering. Pennsylvania State University.