

CONDIÇÕES DE EQUILÍBRIO E TRANSFERÊNCIA DE CARGAS NOS TRACTORES

1996

ÍNDICE

1- Introdução	1
2- Considerações gerais sobre as principais forças que actuam num tractor em condições de equilíbrio longitudinal e transversal	1
2.1- Condições de equilíbrio longitudinal	1
2.1.1- Condições de equilíbrio longitudinal estático em tractores de rodas e terrenos planos	1
2.1.2- Condições de equilíbrio longitudinal dinâmico em tractores de rodas e terreno plano	2
2.1.3- Condições de equilíbrio longitudinal dinâmico em tractores de rastos e terreno inclinado.....	4
2.2- Condições de equilíbrio transversal	7
3- Determinação do centro de gravidade e distribuição da massa nos eixos	9
4- A transferência de massas resultantes da utilização de equipamentos montados e semi-montados	12
Bibliografia	14

1- Introdução

A utilização dos tratores agrícolas faz-se, por vezes, em condições de estabilidade bastante precárias, pelo que o conhecimento das condições de equilíbrio e distribuição de massas é fundamental para se aumentar a segurança dos operadores.

Os trabalhos que oferecem maior risco de acidente são geralmente os transportes, pois são as operações em que se utilizam velocidades mais altas e que envolvem maiores cargas; a maior sinistralidade nestas operações prende-se, também, com a percentagem de tempo que elas ocupam, pois, numa exploração agrícola, é necessário assegurar quer o transporte dos factores de produção quer das produções.

Considerando que os reboques são os equipamentos normalmente empregues nos trabalhos de transporte é importante conhecer as condições de equilíbrio, a transferência de cargas e exigências de força de tracção, especialmente em situações de inclinação e/ou irregularidade do piso. A distribuição das massas, para além da importância no equilíbrio dos equipamentos, condiciona a capacidade de tracção dos tratores, pelo que uma transferência de cargas adequada, sem por em causa as condições de equilíbrio, permite aumentar a força de tracção.

2- Considerações gerais sobre as principais forças que actuam num tractor em condições de equilíbrio longitudinal e transversal.

Atendendo às condições topográficas da maioria das explorações a circulação dos equipamentos deve ter em consideração o declive longitudinal e transversal dos percursos por forma a evitarem-se condições de instabilidade que normalmente se traduzem em acidentes de consequências mais ou menos graves.

2.1- Condições de equilíbrio longitudinal

O estudo das condições de equilíbrio longitudinal pode ser feito considerando o tractor imobilizado (condições de equilíbrio estático), ou desenvolvendo força de tracção (condições de equilíbrio dinâmico) e em situações de terreno plano ou com declive.

2.1.1- Condições de equilíbrio longitudinal estático em tratores de rodas e terrenos planos

Considerando as dimensões e forças representadas na figura 1, a equação que define a situação de equilíbrio é dada por:

$$W * b - R2 * a = 0 \text{ ou } W * c = R1 * a \quad (1)$$

em que:

- W massa do tractor;
- b a distância, medida na horizontal, entre o centro de gravidade e o eixo motriz;
- c distância, medida na horizontal, entre o centro de gravidade e o eixo directriz;
- R1 reacção do solo à carga suportada pelo eixo traseiro;
- R2 reacção do solo à carga suportada pelo eixo dianteiro;
- a distância entre eixos.

Como:

$$W = R1 + R2 \quad (3)$$

$$a = b + c \quad (4)$$

tem-se:

$$(R1 + R2) * b = R2 * (b + c) \quad (5)$$

que é igual a :

$$R1 * b = R2 * c \quad (6)$$

As reacções do solo R1 e R2 são dadas por:

$$R1 = W * \frac{c}{a} \quad \text{e} \quad R2 = W * \frac{b}{a} \quad (7) \quad (8)$$

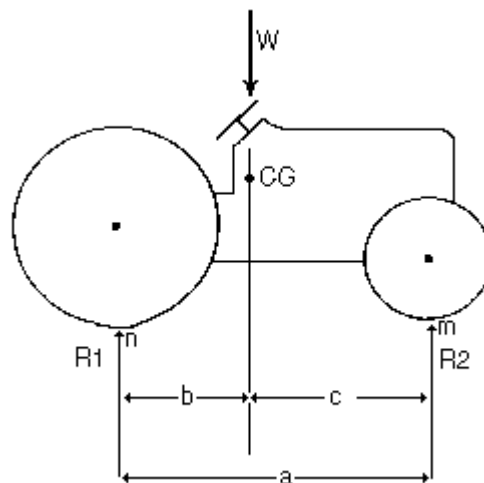


Figura 1- Diagrama de um tractor de tracção simples com as distâncias entre eixos e as distâncias destes ao plano vertical que passa pelo centro de gravidade.

Fonte: Mialhe (1980)

2.1.2- Condições de equilíbrio longitudinal dinâmico em tractores de rodas e terreno plano

Considerando o mesmo tractor e dimensões anteriores, mas desenvolvendo força de tracção (**Ft**), as condições de equilíbrio são muito diferentes, pois para além dos parâmetros anteriores, é

necessário ter em consideração esta força; esta depende da reacção tangencial do solo (potencial de tracção ou tensão de corte do solo) sob as rodas motrizes (**Pt**) e da resistência ao rolamento (**Rr**).

Atendendo à complexidade das forças envolvidas nesta situação o estudo do equilíbrio e transferência de massas é feito considerando as seguintes simplificações:

- o vector que traduz o potencial de tracção do solo é paralelo ao vector da força de tracção;
- o tractor, quando em movimento, desloca-se em linha recta e a velocidade constante, verificando-se um equilíbrio dinâmico entre as várias forças;
- a superfície de circulação é plana, deformável e homogénea;
- a reacção tangencial e normal do solo aplica-se no mesmo ponto, na interface solo sistema de locomoção.

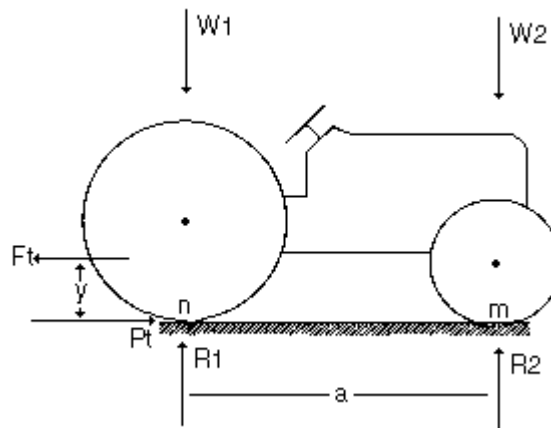


Figura 2- Representação das principais forças que actuam num tractor quando este se encontra em movimento.

Fonte: Mialhe (1980)

Assim, em situação de equilíbrio, as forças paralelas à direcção de deslocamento anulam-se, acontecendo o mesmo com as forças perpendiculares àquela direcção, ou seja:

$$F_t - (P_t - R_r) = 0 \quad (9)$$

$$R_1 + R_2 - W_1 - W_2 = 0 \quad (10)$$

em que:

- W_1 é a massa do tractor suportada pelo o eixo motriz;
- W_2 massa do tractor suportada no eixo directriz.

Considerando os momentos em relação ao ponto n tem-se:

$$\Sigma M_n = W_2 * a - R_2 * a - F_t * y \quad (11)$$

Resolvendo a equação 11 relativamente à carga suportada pelo eixo directriz tem-se:

$$R2 = W2 - Ft * \frac{y}{a} \quad (12)$$

Substituindo a equação 12 em 10 e resolvendo-a em ordem a R1 tem-se:

$$R1 = W1 + Ft * \frac{y}{a} \quad (13)$$

Comparando as equações da reacção do solo (12 e 13) verifica-se que o termo $Ft * y/a$ designado por transferência de carga, tem sinal negativo para a reacção do solo no trem dianteiro e positivo no traseiro; esta distribuição significa que a massa do tractor retirada ao eixo dianteiro é suportada pelo eixo de trás.

Quando o valor da transferência de carga é igual à massa no eixo directriz o trem dianteiro do tractor levanta podendo dar-se o seu capotamento; para se evitar este tipo de acidente a "Draft ISO Recommendations Nº 942", indica como valor máximo de transferência de carga do eixo dianteiro para o traseiro de 80%.

2.1.3- Condições de equilíbrio longitudinal dinâmico em tractores de rastos e terreno inclinado

Para os tractores de rastos desenvolvendo força de tracção e em situação de declive as principais forças envolvidas são as representadas na figura 3.

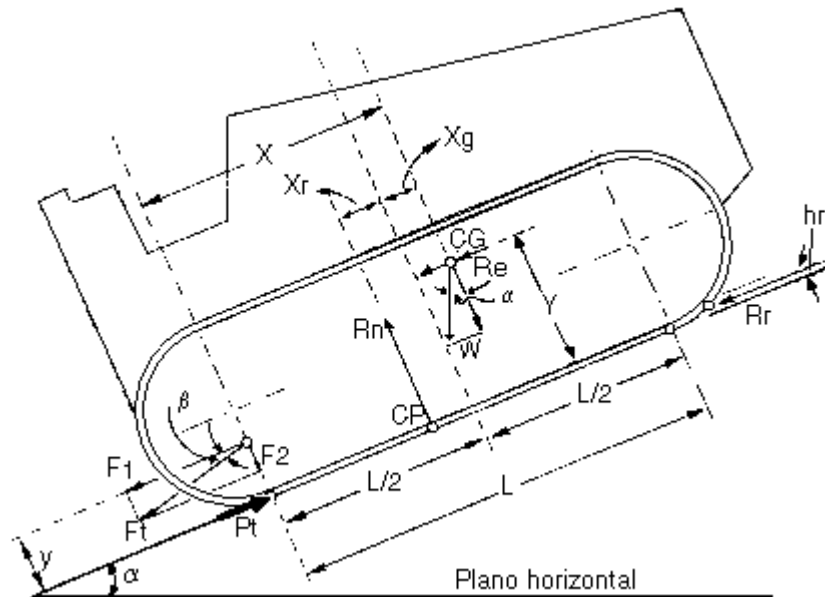


Figura 3 Representação das principais forças que actuam num tractor de rastos em situação de declive e desenvolvendo força de tracção.
Fonte: Mialhe (1980)

Como se pode observar na figura 3 as forças que actuam no plano médio vertical, estabelecido segundo o comprimento do tractor, são as seguintes:

- a massa do tractor (**W**) que, em situações de declive é decomposta numa componente perpendicular ao solo (**W * cos a**) e uma paralela a este (**W * sen a**);
- a resistência de encosta (**Re**) resultante da massa do tractor e inclinação ;
- a força de tracção (**Ft**) decomposta segundo uma componente paralela ao solo (**F1= Ft * cos b**) e uma perpendicular a este (**F2 = Ft * sen b**);
- a reacção do solo (**Pt**) e a resistência ao rolamento (**Rr**);
- a resultante das forças normais de reacção do solo (**Rn**) que actuam no centro de pressão do rasto (**CP**), e a resultante da componente vertical da resistência ao rolamento (**hr**).

O centro de pressão é o ponto de aplicação da resultante das reacções normais do solo (**Rn**) no rasto; a sua localização não coincide normalmente com o ponto médio da área de contacto do rasto com o solo, designando-se esta diferença por afastamento do centro de pressão (**xr**).

Considerando os momentos das forças apresentadas relativamente ao centro de pressão tem-se:

$$\Sigma M_{CP} = W * \cos \alpha * (xr + xg) - (W * \sin \alpha + Re) * Y - F1 * y - Rr * hr - F2 * (X - xr - xg) \quad (14)$$

em que:

- X é a distância do centro de gravidade ao eixo da roda motriz, medida paralelamente ao solo;
- xg o deslocamento do centro de gravidade relativamente ao ponto médio de assentamento do rasto, sendo o seu valor positivo se o CG estiver posicionado à frente deste ponto, ou, caso contrário, o seu valor é negativo;
- Y coordenada vertical do centro de gravidade;
- y distância ao solo à barra de tracção;

Desprezando o valor do produto $Rr * hr$ e resolvendo a equação 14 em ordem a **xr** tem-se:

$$xr = \frac{(W * \sin \alpha + Re) * Y + Ft * (y * \cos \beta + X * \sin \beta)}{W * \cos \alpha + Ft * \sin \beta} - xg \quad (15)$$

que dá o afastamento do centro de pressão quando o tractor se desloca em plano inclinado.

Para as mesmas condições, mas em plano horizontal a equação é a seguinte:

$$xr = \frac{Ft * (y * \cos \beta + X * \sin \beta)}{W * \cos \alpha + Ft * \sin \beta} - xg \quad (16)$$

Quanto maior for o valor de x_r , menor é a área de assentamento do rasto, diminuindo a capacidade de tracção e aumentando-se a resistência ao rolamento. Para os tractores agrícolas o CG situa-se na metade anterior do plano médio transversal da área de contacto do rasto - solo [$x_g \approx (0.05 - 0.08) L$] e nos tractores industriais, em que os equipamentos são montados geralmente na parte dianteira dos tractores, o CG é deslocado para a traseira do tractor [$x_g \approx (0.02 - 0.05) L$].

Relativamente à localização do centro de aplicação da reacção normal do solo no rasto dos tractores, centro de pressão, depende fundamentalmente da distribuição das reacções ao longo do comprimento da interface solo - rasto; esta distribuição depende por sua vez das características do solo e rasto (número de roletes e sua disposição).

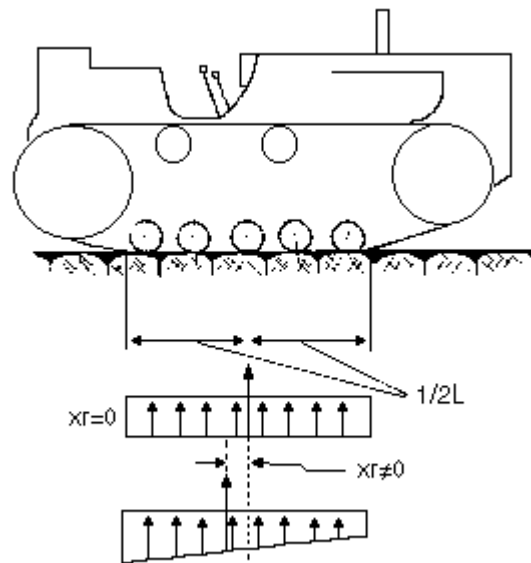


Figura 4 Exemplo da distribuição das reacções do solo nos rastos em função do afastamento do centro de pressão.
Fonte: Mialhe (1980)

Considerando que a área de contacto solo - rasto depende do somatório das zonas de apoio que se formam sob cada um dos roletes, que são independentes umas das outras, pode-se afirmar que, para um número grande destes, a superfície de contacto coincide com a do rasto; esta situação verifica-se quando a relação entre a distância entre eixos dos roletes (m) e o passo dos elos das sapatas (l) é:

$$\frac{m}{l} \leq 1.5 \text{ a } 1.7 \quad (17)$$

Assim, e como se pode observar na figura 4, à medida que o centro de pressão se afasta do ponto médio do rasto, a reacção normal do solo vai diminuindo, deixando o diagrama das pressões de ser rectangular para ser trapezoidal. Aumentando aquela distância (x_r) o diagrama pode ser representado por um triângulo com o vértice coincidente com o bordo dianteiro da superfície do rasto; para valores de x_r mais altos o vértice do triângulo que representa a distribuição das forças afasta-se do ponto de contacto dianteiro da superfície de apoio, o que implica uma diminuição da reacção do solo.

2.2- Condições de equilíbrio transversal

O estudo das condições de equilíbrio transversal é especialmente importante quando se trabalha em declives laterais e tem como objectivo permitir determinar o valor da inclinação que permite trabalhar sem haver riscos de capotamento. A inclinação é expressa em % e é determinada pela tangente do ângulo formado pela superfície do terreno relativamente ao plano horizontal ($\cdot 100$).

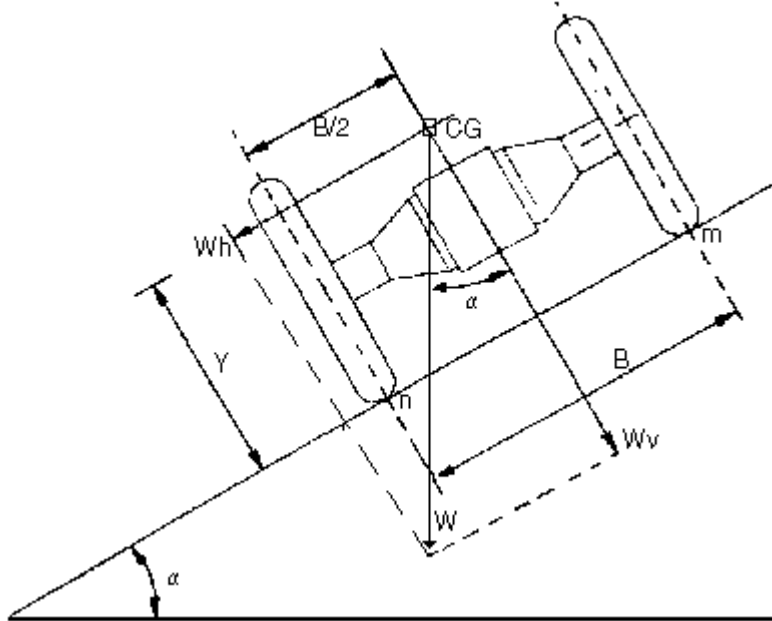


Figura 5- Diagrama das forças que actuam num tractor de rodas ao deslocar-se num terreno inclinado.
Fonte: Mialhe (1980)

Como se observa na figura 5 a massa do tractor actua em dois planos, um vertical ao solo e outro paralelo a este, sendo os seus valores dados por:

$$W_v = W \cdot \cos \alpha \quad (18)$$

$$W_h = W \cdot \sin \alpha \quad (19)$$

pelo que o equilíbrio estático lateral se obtêm quando o somatório dos momentos em relação ao ponto n se anulam, ou seja:

$$\sum M_n = W_v \cdot B/2 - W_h \cdot Y = 0 \quad \text{ou} \quad W_v \cdot B/2 = W_h \cdot Y \quad (20)$$

Substituindo as equações 18 e 19 em 20 tem-se:

$$(W \cdot \cos \alpha) \cdot B/2 = (W \cdot \sin \alpha) \cdot Y \quad (21)$$

ou seja:

$$\frac{B}{2Y} = \frac{W \cdot \sin \alpha}{W \cdot \cos \alpha} = \text{tg } \alpha \quad (21)$$

o que, como $\text{tg } \alpha$ corresponde ao declive transversal, permite concluir que a estabilidade lateral verifica-se quando o declive (d) for inferior ao valor dado por:

$$d = \frac{B}{2y} * 100 \quad (22)$$

Quando em movimento o capotamento lateral do tractor verifica-se muito antes de se atingir este valor, pelo que deve determinar-se o declive operacional limite (d_l), ou seja, o declive que permite trabalhar sem haver perigo de acidente.

Para estudo deste declive consideremos um tractor a mobilizar um terreno com uma dada inclinação e em que as rodas a jusante da encosta se encontrem no fundo do rego, figura 6.

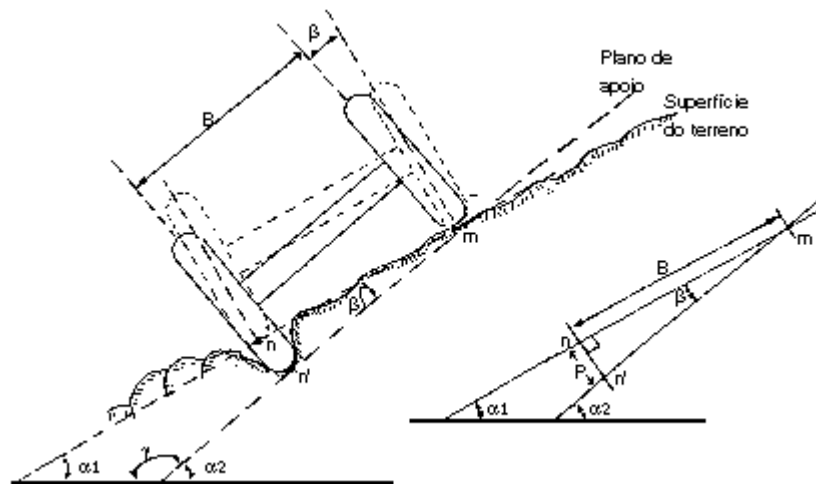


Figura 6- Mobilização de um solo com declive lateral em que o tractor apresenta as rodas a jusante no fundo do rego.

Fonte: Mialhe (1980)

Nestas condições o declive operacional é determinado considerando o ângulo do plano de apoio, que é função da bitola do tractor, e o desnível entre os pontos de contacto n e n' .

Assim, tem-se:

$$\text{tg } \beta = \frac{P}{B} = k \quad (23)$$

que representa o aumento de declive motivado pela deslocação do tractor com um dos rodados no fundo do rego; a inclinação do plano de apoio das rodas será o resultado daquela inclinação e da inclinação natural da superfície do terreno, ou seja:

$$\text{tg } \alpha_2 = \text{tg } (\alpha_1 + \beta) \quad \text{ou} \quad \text{tg } \alpha_2 = \frac{\text{tg } \alpha_1 + \text{tg } \beta}{1 - \text{tg } \alpha_1 * \text{tg } \beta} \quad (24)$$

Substituindo a equação 23 em 24 e resolvendo-se em ordem a $\text{tg } \alpha_1$, que representa o declive operacional limite tem-se:

$$\operatorname{tg} \alpha_1 = \frac{\operatorname{tg} \alpha_2 + k}{\operatorname{tg} \alpha_2 * k + 1} \quad (25)$$

Considerando que α_2 representa o declive do plano de apoio o declive operacional limite d_l , será dado por:

$$d_l = \frac{d_{pa} + \frac{P}{B}}{d_{pa} * \frac{P}{B} + 1} \quad (26)$$

Em condições de equilíbrio estático ($d_{pa} = B / 2y$) a equação 26 será:

$$d_l = \frac{\frac{B^2}{2 * y} - P}{\frac{P * B}{2 * y} + B} \quad (27)$$

em que P representa o desnível entre o contacto dos pneus com o solo, quer este resulta da situação anterior, mobilização do solo, quer das irregularidades do piso.

Como norma de segurança deve-se trabalhar apenas até metade da inclinação correspondente ao declive operacional limite.

3- Determinação do centro de gravidade e distribuição da massa nos eixos

O estudo das condições de equilíbrio implica que se determine a localização do centro de gravidade dos equipamentos. Em trabalhos por nós realizados utilizamos o método da dupla pesagem por suspensão, que consiste na montagem de quatro extensões aparafusadas nas jantes das rodas, que são ligadas por quatro cabos de aço a duas barras transversais; estas encontram-se ligadas por dois cabos a duas roldanas que deslizam na trave superior de um pórtico, onde será suspenso o tractor. Nestes cabos, entre as roldanas e as duas barras transversais, encontram-se intercalados dois captosres extensométricos que estão ligados a uma unidade de leitura que indica a carga suportada por cada um dos cabos.

A suspensão do tractor segundo o esquema apresentado permite obter a sua horizontalidade transversal e variar a inclinação longitudinal, simulando assim diferentes declives do terreno.

Na ausência dos equipamentos mencionados a determinação do centro de gravidade pode ser efectuada como a seguir se indica, ou seja, utilizando o método da dupla pesagem, sem suspensão, que consiste na determinação da carga no eixo dianteiro em condições de horizontalidade e inclinação; caso se suspende-se o tractor pelo centro de gravidade, com um cabo, este manter-se-ia perfeitamente horizontalizado quer no plano longitudinal quer no transversal.

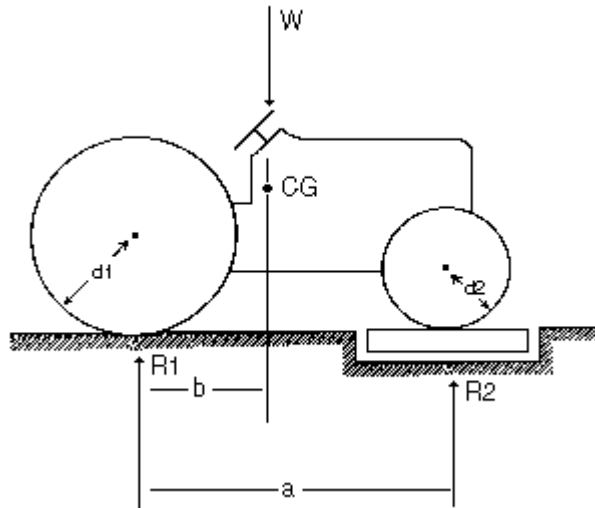


Figura 7 Determinação da localização do centro de gravidade num trator de duas rodas motrizes colocado num plano horizontal, utilizando o método da dupla pesagem.
Fonte: Mialhe (1980)

Considerando a figura 7, o momento relativamente ao ponto de contacto solo - rodas traseiras é dado por:

$$b = \frac{R_2 \cdot a}{W} \quad (28)$$

sendo b a distância, medida na horizontal, entre o CG e o eixo motriz.

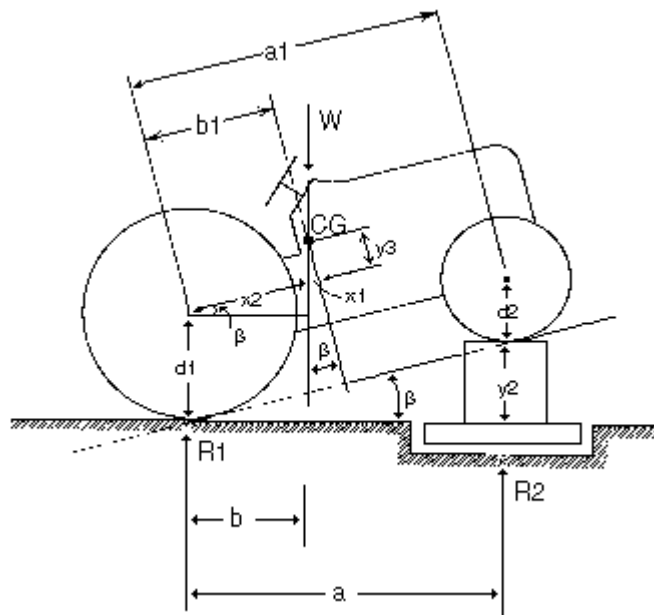


Figura 8 Determinação da localização do centro de gravidade num trator de duas rodas motrizes colocado num plano inclinado, utilizando o método da dupla pesagem.
Fonte: Mialhe (1980)

O levantamento do trem dianteiro faz com que o plano que contém o CG seja deslocado para a parte posterior do trator sendo a distância ao eixo motriz dada por b1 e y3; a localização do CG resulta

assim da intercepção dos planos verticais ao declive que passam por b (posição horizontal) e b1 (posição inclinada).

Da figura 8 conclui-se que:

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{x_1}{y_3} \quad \text{ou} \quad \operatorname{tg} \beta = \frac{b_1 - x_2}{y_3} \quad (29)$$

donde se obtêm:

$$y_3 = \frac{b_1 - x_2}{\operatorname{tg} \beta} \quad (30)$$

como:

$$\cos \beta = \frac{b}{x_2} \quad \text{ou} \quad x_2 = \frac{b}{\cos \beta} \quad (31)$$

tem-se:

$$y_3 = \frac{b_1 - \frac{b}{\cos \beta}}{\operatorname{tg} \beta} \quad (32)$$

que dá a distância do centro de gravidade ao plano paralelo ao solo e que passa pelo centro do eixo motriz.

4- A transferência de massas resultantes da utilização de equipamentos montados e semi-montados.

A utilização de equipamentos montados e semi-montados implica que toda ou parte da sua massa seja transferida para os tractores o que, para além de alterarem as condições de equilíbrio, implicam diferenças no comportamento à tracção.

Assim, e considerando a figura 9, observa-se que para além das massas já anteriormente consideradas, existe ainda a que resulta do equipamento com que o tractor se encontra a trabalhar, que se considera como tendo o seu fulcro na extremidade dos braços inferiores do sistema tripolar de engate; o equipamento é semi-montado não existindo qualquer ligação com o terceiro ponto do sistema tripolar de engate.

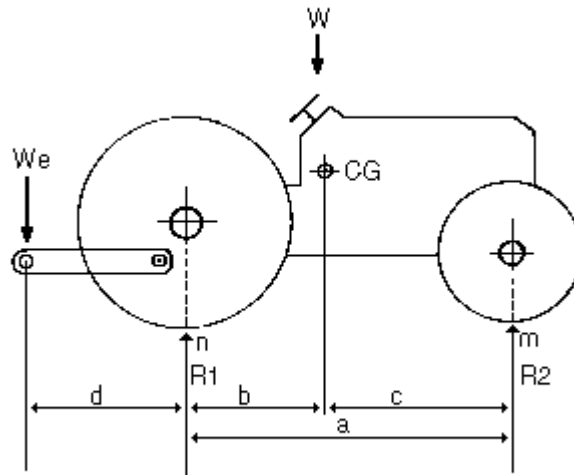


Figura 9- Representação das principais forças que actuam num conjunto tractor - equipamento, sendo este semi-montado.
 Fonte: Mialhe (1980)

Considerando o momento relativo ao ponto de contacto solo pneus traseiros tem-se:

$$\Sigma Mn = W * b - R2 * a - We * d = 0 \quad \text{ou} \quad W * b = R2 * a + We * d \quad (33)$$

Resolvendo esta equação em ordem a R2 tem-se:

$$R2 = \frac{W * b - We * d}{a} \quad (34)$$

que traduz a redução da massa no eixo directriz do tractor como resultado do peso que se exerce no sistema de engate.

A situação de equilíbrio para as condições representadas na figura 9, serão assim obtidas quando as forças normais ao solo se anulam, ou seja:

$$W + We - R1 - R2 = 0 \quad \text{ou} \quad W = R1 + R2 - We \quad (35)$$

que quando se aplica à equação 35 obtém-se:

$$R1 * b + R2 * b - We * b = R2 * a + We * d \quad (36)$$

Como $a = b + c$ a equação 37 transforma-se em:

$$R1 * b = R2 * c + We * (b + d) \quad (37)$$

Caso o valor de We no sistema de engate seja nulo as condições de equilíbrio são semelhantes às anteriormente apresentadas; a existência desta massa no sistema tripolar implica um aumento de carga no eixo traseiro do tractor, que se designa por transferência de carga, e que altera não só as condições de equilíbrio como também a capacidade de tracção.

Bibliografia

Barger, E.; Liljedahl, J.; Carleton, W.; McKibben, E. (1963). Tractors and their power units. New York. John Wiley & Sons, Inc.

Bianchi de Aguiar, F. (1987). Comportamento à tracção do tractor de rasto nos novos sistemas de cultura da vinha da Região Demarcada do Douro. UTAD.

CEMAGREF- Livre du Maitre. (1974). Tracteurs et machines agricoles. Tome 3. Antony. CEMAGREF.

Mialhe, L. (1980). Máquinas motoras na agricultura. Volume 2. S.Paulo. E.P.U.

Zwaenepoel. (1989). Le matériel roulant agricole et forestier. Danger: pente. BTMEA **35**: 34-42. CEMAGREF.