



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
IT – Departamento de Engenharia
ÁREA DE MÁQUINAS E ENERGIA NA AGRICULTURA
IT 154- MOTORES E TRATORES

ESTIMATIVA DA CAPACIDADE DE TRACÇÃO DE TRATORES AGRÍCOLAS

Carlos Alberto Alves Varella¹



INTRODUÇÃO

O trator agrícola converte potência do motor em trabalho útil para execução de operações agrícolas. A capacidade de tração dos tratores agrícolas depende das condições físicas do solo, tipo e geometria do rodado, carga aplicada sobre o rodado de tração e da pressão de insuflagem dos pneus. A interação correta entre esses fatores pode aumentar significativamente a capacidade de tração dos tratores agrícolas.

ÁREA DE CONTATO RODADO-SOLO

A área de contato rodado-solo tem importância fundamental na estimativa da capacidade de tração de tratores agrícolas. Os métodos atualmente empregados têm como base a determinação física da área de contato entre o pneu e uma superfície rígida. Um dos métodos utilizados é o da prensa hidráulica.

Método da prensa hidráulica

Consiste na prensagem do pneu sobre molde de argila. Coloca-se argila no interior de uma caixa de madeira e cobre-se com material plástico que funciona como isolante entre a argila e o pneu. A Figura 1 ilustra a prensa utilizada para determinação da área de contato de pneus.

¹ Professor. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, IT-Departamento de Engenharia, BR 465 km 7 - CEP 23890-000 – Seropédica – RJ.
E-mail: varella@ufrj.br

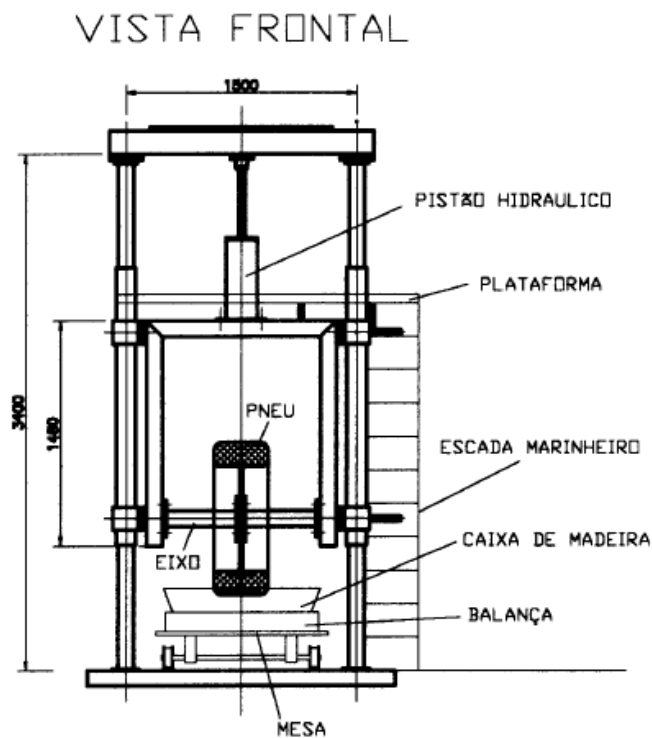


Figura 1. Vista frontal da prensa hidráulica utilizada para determinação da área de contato de pneus. Fonte: SANTOS & LANÇAS (1999).

A carga imposta pela prensa hidráulica resulta numa impressão sobre o molde de argila. Após a prensagem são adquiridas imagens utilizando-se uma câmera instalada na estrutura da prensa hidráulica. A Figura 2 ilustra a imagem obtida após a prensagem do pneu sobre o molde de argila.



Figura 2 - Imagem obtida após a prensagem do pneu sobre o molde de argila. Fonte: SANTOS & LANÇAS (1999).

Numa etapa final, as imagens são transferidas para um computador, e conforme proposto por MAZETTO (2004), calcula-se a área de contato pneu-solo por meio da Equação 1.

$$A_p = \frac{A_q - A_{pf}}{A_{qf}} \quad (1)$$

em que,

A_p = área de contato pneu-solo, cm^2 ;

- A_{qf} = área do quadro na foto, cm^2 ;
 A_q = área do quadro, cm^2 ;
 A_{pf} = área de contato pneu-solo na foto, cm^2 .

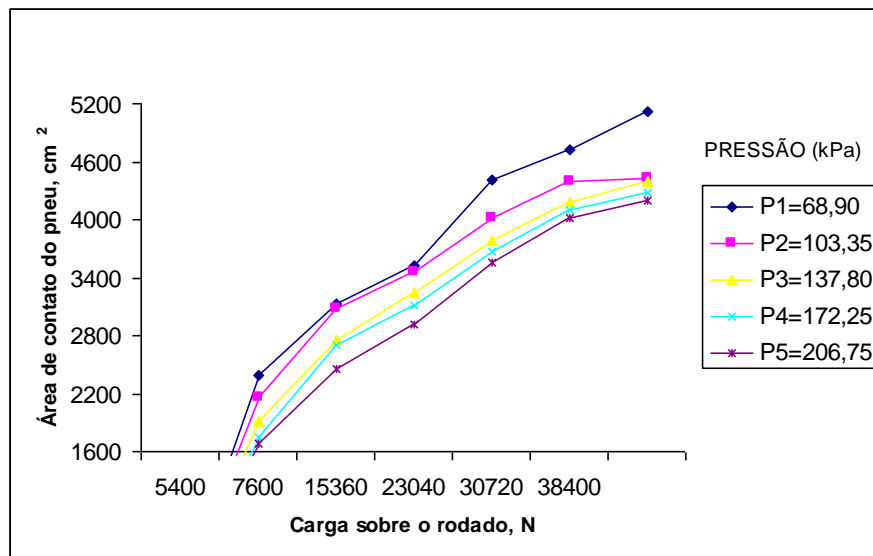


Figura 3 – Variação da área de contato pneu-solo em função da carga aplicada e da pressão de insuflação de um pneu 600/60R-38. Adaptado de SANTOS & LANÇAS (1999).

Estimativa da área de contato utilizando as dimensões do pneu

$$A_p = 1,005 \cdot R \cdot L \quad (2)$$

em que,

- A_p = área de contato pneu-solo, cm^2 ;
 R = raio do pneu, cm ;
 L = largura do pneu, cm ;

NOMENCLATURA DE PNEUS





Fonte: CD goodyear

FORÇA NA BARRA DE TRAÇÃO

A força na barra de tração de um trator agrícola depende de características do solo e dos rodados. Rodado é um dispositivo de autopropulsão onde a tração é obtida pela ação de rolamento contínuo de roda ou esteira sobre o solo. A força oriunda da interação entre rodado-solo é denominada força na barra de tração. A condição ideal seria a conversão de todo o torque do motor em força na barra de tração.

Quando o trator se desloca desenvolvendo esforço, duas forças principais se opõem ao movimento: a força na barra de tração (F_t) e a resistência ao rolamento (R_r). Portanto, o pneu deverá aplicar ao solo um esforço de magnitude suficiente para vencer essas duas forças. Em condições de equilíbrio, temos:

$$F_t = F_s - R_r \quad (3)$$

em que,

- F_t = força na barra de tração;
- F_s = força potencial do solo;
- R_r = resistência ao rolamento que inclui a resistência total ao rolamento de todas as rodas e o efeito do deslizamento “patinamento” das rodas motrizes.

A força máxima na barra de tração que um trator pode desenvolver, sob condições de trabalho agrícola, é função de:

- a) magnitude do torque que o conjunto motor–transmissões é capaz de aplicar às rodas motrizes;
- b) limite do potencial do solo agrícola para o desenvolvimento de força de tração;
- c) resistência externa ao rolamento.

O deslocamento de tratores sobre terrenos agrícolas se verifica quando são satisfeitas as seguintes condições:

- a) solo apresenta resistência suficiente para suportar o peso do trator (flutuação – recalque);
- b) solo oferece limitada resistência ao rolamento;
- c) solo apresenta suficiente resistência ao empuxo dos órgãos propulsores (resistência ao cisalhamento).

Do ponto de vista da mecânica da tração, o solo pode ser considerado como uma massa granular, apresentando propriedades que variam de coesivas_ (plasticidade: argilas) a pulverulentas (não plástica: areia). Na massa granular coesiva, os grânulos estão vinculados entre si por forças de coesão; na pulverulenta, os grânulos, são mantidos juntos apenas quando se exerce uma pressão sobre eles.

Nos tratores, a potência total disponível no motor para conversão em tração útil, geralmente excede a capacidade de tração que pode ser desenvolvida entre rodado-solo. Isto é, as limitações encontradas pelos tratores em relação ao aproveitamento da potência disponível no motor são, principalmente, devidas as limitações dos rodados.

FORÇA POTENCIAL DO SOLO

Quando o rodado de um trator se movimenta sobre solo agrícola, desenvolve-se uma força originária da resistência do solo ao cisalhamento, a qual é denominada força potencial do solo. Tanto no caso da esteira, como no de pneu, os espaços entre as garras tornam-se preenchidos com solo, de forma que: quando o trator desenvolve esforço tratório máximo ocorre o cisalhamento. A força potencial do solo é estimada pela Equação 4.

$$F_s = A \cdot c + W_d \cdot \tan\phi \quad (4)$$

em que,

- F_s = força potencial do solo, kgf;
- A = área de contato rodado-solo, cm^2 ;
- c = coeficiente de coesão do solo, kgf.cm^2 ;
- W_d = carga dinâmica sobre rodado de tração, kgf;
- ϕ = ângulo de atrito interno do solo, graus.

Parâmetros do solo: c e ϕ .

Valores extremos de c e ϕ :

Areia seca $\Rightarrow c = 0$

$F_s = W_d \cdot \tan \phi$ \Rightarrow força potencial do solo depende da carga aplicada sobre rodado de tração.

F_s depende de peso $\left\{ \begin{array}{l} \text{lastragem} \\ \text{transferência de peso} \\ \text{localização CG} \end{array} \right\}$

Argila úmida $\Rightarrow \phi = 0 \Rightarrow F_s = A \cdot c \Rightarrow$ força potencial do solo depende da área de contato.

F_s depende da área $\left\{ \begin{array}{l} \text{Tipo rodado} \\ \text{dimensões dos rodados} \end{array} \right\}$

Quadro 1. Alguns valores encontrados para os parâmetros c e ϕ

Tipos de Terreno	c , kgf.cm^{-2}	ϕ , graus
Areia seca	0,0	35-37
Silte	0,10-0,3	30-35
Argila	0,05-0,5	16-28
Argilo-arenoso	0,20-0,3	26-30
argilo-orgânico	0,05-0,5	12-18

Fonte: NUNES, A.J.C. Curso de mecânica dos solos e Fundações, Edit Globo.

Resistência ao rolamento (R_r)

A resistência ao rolamento é dada por:

$$R_r = P \cdot k_r$$

em que,

- R_r = resistência ao rolamento;
- P = peso do trator;
- k_r = coeficiente de rolamento.

Coefficiente de rolamento (k_r)

O coeficiente de rolamento ou coeficiente de resistência ao rolamento, segundo Cañavate (1965), é expresso pela relação entre a resistência ao rolamento (R_r) e o peso sobre o eixo de tração (W_d), dado pela Equação 5.

$$k_r = \frac{k_{r1} \cdot W_{d1} + k_{r2} \cdot W_{d2}}{P} \quad (5)$$

em que,

- k_r = coeficiente de rolamento
- k_{r1} = coeficiente de rolamento das rodas dianteiras;
- k_{r2} = coeficiente de rolamento das rodas traseiras;
- W_{d1} = carga dinâmica sobre eixo dianteiro;
- W_{d2} = carga dinâmica sobre eixo traseiro;
- P = peso do trator.

No Quadro 2 são apresentados alguns valores dos coeficientes de resistência ao rolamento de pneus utilizados em maquinaria agrícola.

Quadro 2. Coeficientes de resistência ao rolamento de pneus utilizados em maquinaria agrícola

Tipo de roda	Dimensões (L x D) (pol)	Coeficiente de resistência ao rolamento para as diferentes condições de superfícies			
		Concreto	Capim de pastagem	Terreno arado argiloso	Solo arenoso solto
Pneus frontais de tratores	6.00 x 16	0.031	0.070	0.401	0.397
	7.50 x 10	0.029	0.061	0.379	0.429
	9.00 x 10	0.031	0.060	0.331	0.388
Pneus traseiros de tratores	7.50 x 28	0.026	0.052	0.197	0.205
	7.50 x 36	0.018	0.046	0.185	0.177
	9.00 x 24	0.023	0.053	0.186	0.206

	11.25 x 24	0.019	0.044	0.183	0.176
	11.25 x 36	0.016	0.037	0.168	0.162
	12.75 x 32	0.018	0.040	0.182	0.161
Pneus para máquinas e implementos	4.00 x 18	0.034	0.058	0.366	0.392
	4.00 x 36	0.017	0.050	0.294	0.277
	5.00 x 16	0.031	0.062	0.388	0.460
	6.00 x 16	0.027	0.060	0.319	0.338
	7.50 x 16	0.025	0.055	0.280	0.322
	9.00 x 16	0.042	0.054	0.249	0.272
	9.00 x 40	0.018	0.036	0.168	0.199

Fonte: Mckibben e Davidson

ESTIMATIVA DA CARGA DINÂMICA SOBRE RODAS DE TRACÇÃO

Distribuição estática do peso do trator

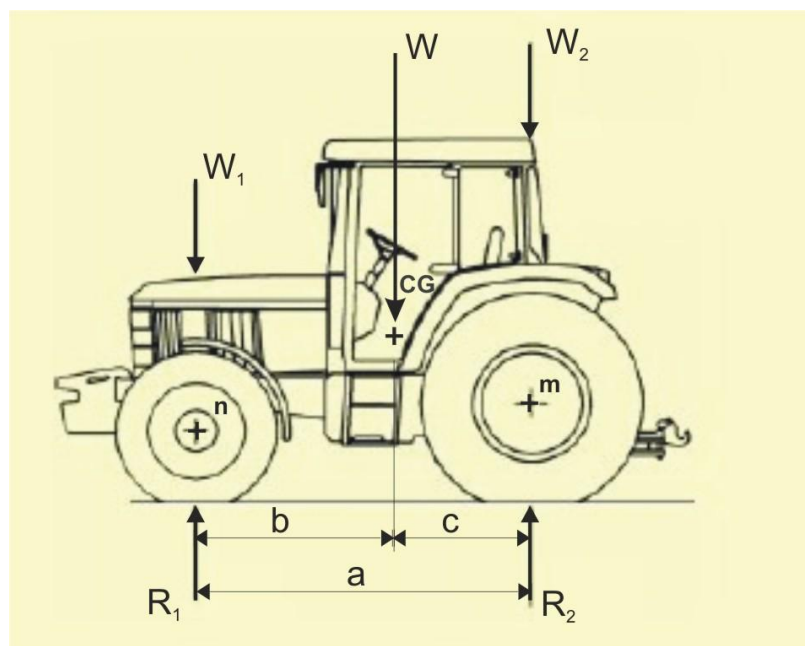


Figura 4. Ilustração da distribuição estática do peso de tratores agrícolas.

Carga estática sobre o eixo dianteiro

$$\sum M_m = 0 \Rightarrow R_1 \cdot a - W \cdot c = 0 \therefore R_1 \cdot a = W \cdot c$$

$$R_1 = \frac{W \cdot c}{a} \quad (6)$$

em que,

- R_1 = carga estática sobre o eixo dianteiro, kgf;
- W = peso do trator, kgf;
- a = distância entre eixos, mm;
- c = cota horizontal longitudinal do centro de gravidade, mm.

Carga estática sobre o eixo traseiro

$$\sum M_n = 0 \Rightarrow -R_2 \cdot a + W \cdot b = 0 \therefore R_2 \cdot a = W \cdot b$$

$$R_2 = \frac{W \cdot b}{a}, \text{ ou}$$

$$W = R_1 + R_2 \quad \therefore R_2 = W - \frac{W \cdot c}{a}$$

$$R_2 = W \cdot \left(1 - \frac{c}{a}\right) \quad (7)$$

em que,

- R_2 = carga estática sobre o eixo traseiro, kgf;
- W = peso do trator, kgf;
- a = distância entre eixos, mm;
- b = distância do CG ao eixo dianteiro, mm;
- c = cota horizontal longitudinal do centro de gravidade, mm.

Exemplo: peso do trator = 3850 kgf; cota horizontal longitudinal do centro de gravidade = 720 mm; distância entre eixos = 2307 mm.

a) Reação no eixo dianteiro

$$R_1 = \frac{W \cdot c}{a} = \frac{3850 \cdot 720}{2307} = 1201,56 \text{ kgf}$$

b) Reação no eixo traseiro

$$R_2 = W \cdot \left(1 - \frac{c}{a}\right) = 3850 \cdot \left(1 - \frac{720}{2307}\right) = 2648,44 \text{ kgf}$$

Distribuição dinâmica do peso do trator

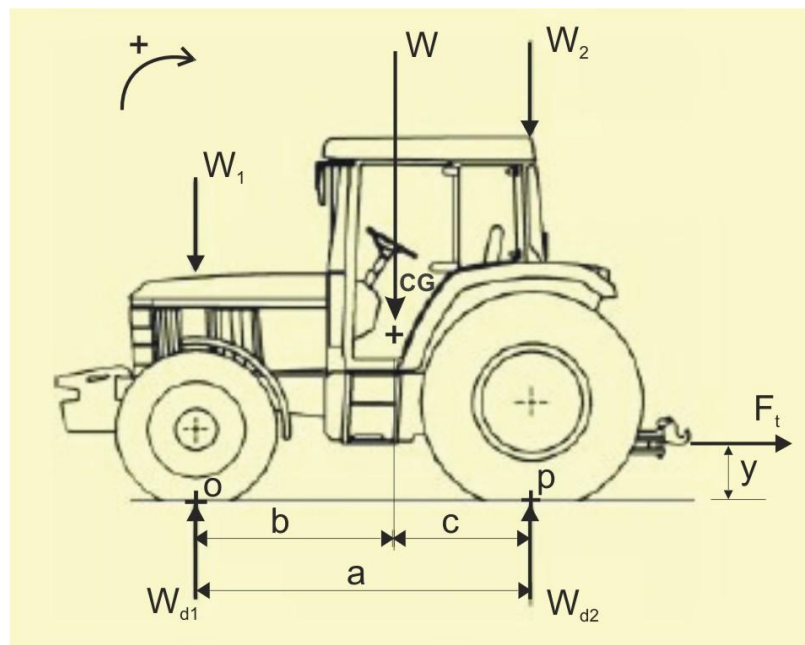


Figura 5. Ilustração da distribuição dinâmica do peso de tratores agrícolas.

Carga dinâmica sobre o eixo dianteiro

$$\sum M_p = 0 \Rightarrow F_t \cdot y + W_{d1} \cdot a - W \cdot c = 0 \quad \therefore W_{d1} \cdot a = W \cdot c - F_t \cdot y$$

$$W_{d1} = \frac{W \cdot c}{a} + \frac{F_t \cdot y}{a}, \text{ sendo } R_1 = \frac{W \cdot c}{a}, \text{ temos que :}$$

$$W_{d1} = R_1 - \frac{F_t \cdot y}{a} \quad (8)$$

em que,

- W_{d1} = carga dinâmica sobre o eixo dianteiro, kgf;
- R_1 = carga estática sobre o eixo dianteiro, kgf;
- F_t = força na barra de tração, kgf;
- y = altura da barra de tração, mm;
- a = distância entre eixos, mm.

Carga dinâmica sobre o eixo traseiro

$$\sum M_o = 0 \Rightarrow F_t \cdot y - W_{d2} \cdot a + W \cdot b = 0 \therefore W_{d2} \cdot a = F_t \cdot y + W \cdot b$$

$$W_{d2} = \frac{W \cdot b}{a} + \frac{F_t \cdot y}{a}, \text{ sendo } R_2 = \frac{W \cdot b}{a}, \text{ temos que :}$$

$$W_{d2} = R_2 + \frac{F_t \cdot y}{a} \quad (9)$$

em que,

- W_{d2} = carga dinâmica sobre o eixo traseiro, kgf;
- R_2 = carga estática sobre o eixo traseiro, kgf;
- F_t = força na barra de tração, kgf;
- y = altura da barra de tração, mm;
- a = distância entre eixos, mm.

Transferência de peso devido a força na barra de tração

Pela Equação 9 observa-se que $\frac{F_t \cdot y}{a}$ é a transferência de peso “Tp” devido a força na barra de tração “Ft”.

$$T_p = F_t \cdot \frac{y}{a} \quad (10)$$

em que,

- T_p = transferência de peso, kgf;
- F_t = força na barra de tração, kgf;
- y = altura da barra de tração, mm;
- a = distância entre eixos, mm.

Exemplo: altura da barra tração = 410 mm; força máxima na barra de tração = 2590 kgf; distância entre eixos = 2307 mm.

$$T_p = F_t \cdot \frac{y}{a} = 2590 \cdot \frac{410}{2307} = 460,29 \text{ kgf}$$

$$W_{d2} = R_2 + \frac{F_t \cdot y}{a} = 2648,44 + 460,29 = 3108,73$$

W_{d2} é carga dinâmica sobre as rodas de tração (eixo traseiro) para um trator 4x2.

Exemplo: Um trator trabalhando em solo argilo-arenoso que apresenta coeficiente de coesão de 0,3 kgf.cm⁻² e ângulo de atrito interno de 30°. A resistência ao rolamento é de 520 kgf, carga dinâmica sobre o eixo de tração é 3000 kgf e área de contato rodado-solo de 0,12 m².

Estime a força máxima de tração na barra que o trator pode desenvolver.

$$F_s = A \cdot c + W_d \cdot \tan\phi = 1200 \cdot 0,3 + 3000 \cdot 0,5774 = 2092,05 \text{ kgf}$$

$$F_s = R_r + F_t \therefore F_t = F_s - R_r = 2092,05 - 520 = 1572,05 \text{ kgf}$$

$F_t = 1572,05 \text{ kgf}$ é a estimativa da força máxima de tração na barra.

Coefficiente de tração (k_t)

O coeficiente de tração é definido por Barger et al (1966) como a relação entre a força de tração na barra e a carga dinâmica atuante sobre os rodados de tração. Representa quanto de peso do trator é transformado em força na barra de tração, é uma medida da eficiência do sistema rodado-solo em relação a adição de pesos adicionais (lastro) ao eixo de tração.

O coeficiente de tração é uma relação entre forças, dado pela Equação 11:

$$k_t = \frac{F_t}{W_d} \quad (11)$$

em que,

- k_t = coeficiente de tração;
- F_t = força na barra de tração, kgf;
- W_d = carga dinâmica sobre o eixo de tração, kgf.

O valor de W_d para tratores agrícolas de pneus é:

$$W_d = R_2 + T_p$$

Exemplo: Qual a força potencial do solo para que o trator apresente coeficiente de tração de 80%?

$$k_t = \frac{F_t}{W_d} \therefore F_t = k_t \cdot W_d = 0,8 \cdot 3000 = 2400 \text{ kgf}$$

$$F_t = 2400 \text{ kgf}$$

$$F_s = R_r + F_t = 520 + 2400 = 2920 \text{ kgf}$$

$$F_s = 2920 \text{ kgf}$$

Quadro 3. Valores de k_t e k_r sob diferentes condições operacionais (CAÑAVATE, 1965)

Condição	Pneu		Esteira	
	k_t	k_r	k_t	k_r
Pista concreto seca	0,84-1,10	0,02-0,03	-	-
Estrada de terra solo seco	0,80-0,70	0,05	1,25-1,00	0,06
Solo agrícola seco	0,65-0,50	0,06-0,08	0,85	0,07
Solo agrícola úmido	0,60-0,45	0,10-0,15	-	-
Limo úmido pastoso	0,15	0,20	0,65	0,10
Areia solta de praia	0	0,35	0,55	0,20

Rendimento de tração (n_t)

O rendimento de tração ou rendimento de conversão da potência do motor em potência na barra de tração é definido, por Barger et al (1966), como a relação entre a potência na barra de tração e a potência

do motor. A perda nas transmissões dos tratores atuais é mínima quando comparada com as perdas do sistema rodado-solo. Pode-se considerar o rendimento de tração como uma medida do rendimento segundo o qual o sistema rodado-solo transforma o torque do motor em tração na barra.

O rendimento de tração é dado pela Equação 12:

$$n_t = \frac{P_b}{P_m} \quad (12)$$

em que,

- n_t = rendimento de tração;
- P_b = potência na barra de tração;
- P_m = potência no motor.

Exemplo: potência do motor = 68,8 cv e potência na barra de tração = 49,1 cv.

$$n_t = \frac{P_b}{P_m} = \frac{49,1}{68,8} = 0,7945$$

Coefficiente de deslizamento (k_d)

O coeficiente de deslizamento, também conhecido como coeficiente de patinamento (Equação 13). É diretamente responsável pela redução da velocidade de deslocamento do trator, e conseqüentemente, tem influência significativa na perda de potência na barra de tração. Representa a distância perdida em função do deslizamento das rodas motrizes do trator.

$$k_d = \frac{L_0 - L_1}{L_0} \cdot 100 \quad (13)$$

em que,

- k_d = coeficiente de deslizamento;
- L_0 = distância percorrida no tempo 't' sem força de tração;
- L_1 = distância percorrida no tempo 't' com força de tração.

Cálculo da potência na barra de tração de tratores agrícolas (P_{bt})

$$P_{bt}(cv) = \frac{F_t(kgf) \times V(km.h^{-1})}{270} \quad (14)$$

em que,

- P_{bt} = potência na barra de tração;
- F_t = força na barra de tração;
- V = velocidade de deslocamento do trator.

Então, o valor 270 é o resultado das transformações de unidades, isto é:

$$P_{bt}(cv) = F(kgf) \times V(km.h^{-1}) \times \frac{1000}{3600 \cdot 75};$$

1000 --> para transformar km em metros;

3600 --> para transformar horas em segundos;

75 ----> para transformar kgf.m.s⁻¹ em cavalo vapor.

cv=75 kgf.m.s⁻¹

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

MONTEIRO, L.A.; SILVA, P.R.A. **Operação com tratores agrícolas**. 1ª.Ed.UNESP, Botucatu, SP. 2009.