

CONSIDERAÇÕES GERAIS SOBRE TEORIA DE TRACÇÃO

1993

ÍNDICE

1- Introdução	1
2- Noções elementares sobre teoria de tracção	1
3- A resistência ao rolamento e o escorregamento	2
4- Principais factores que condicionam a capacidade de tracção	8
4.1- Importância das características do solo e órgãos de locomoção	8
4.2- Importância da desmultiplicação do regime motor para as rodas motrizes	12
4.3- Importância da distribuição de massas nos eixos na capacidade de tracção	13
Bibliografia	16

1- Introdução

A potência desenvolvida por um motor de combustão interna de um equipamentos de tracção é fundamentalmente utilizada para accionamento de equipamentos à TDF ou em trabalhos de tracção. Relativamente à TDF as perdas de potência motor são bastante baixas, pois dependem, quase que exclusivamente, da potência necessária para vencer o atrito da cadeia de transmissão, mas, em relação à tracção, existem numerosos factores consumidores de potência o que implica que a potência disponível à barra possa apresentar valores bastante inferiores aos do motor; o termo **tracção** traduz a força disponível, representada por um vector, desenvolvida por uma roda ou um equipamento de tracção, para realizar trabalho.

2- Noções elementares sobre teoria de tracção

A capacidade de tracção de um tractor depende de vários factores o primeiro dos quais é o momento transmitido às rodas motrizes. Assim, considerando uma roda com um dado momento (**M**), deslocando-se numa superfície não rígida, a uma velocidade constante (**v**) e com um dado regime (**rpm**), as reacções do solo, que se fazem sentir a jusante do ponto de intercepção do plano vertical que passa pelo centro das rodas relativamente àquele, são as representadas na figura 1C; a figura 1A representa uma roda rebocada e a figura 1B uma roda em que o momento apenas permite vencer a inércia.

Relativamente à roda que desenvolve tracção (figura 1C) o momento em relação ao seu centro, em condições de equilíbrio dinâmico, é dado por:

$$M - F_p \cdot r - R \cdot f = 0 \quad (1)$$

em que:

- F_p é a força propulsora;
- r o raio dinâmico de rolamento;
- R reacção do solo à carga W suportada pela roda;
- f o braço do momento resistente;
- R_r resistência ao rolamento.

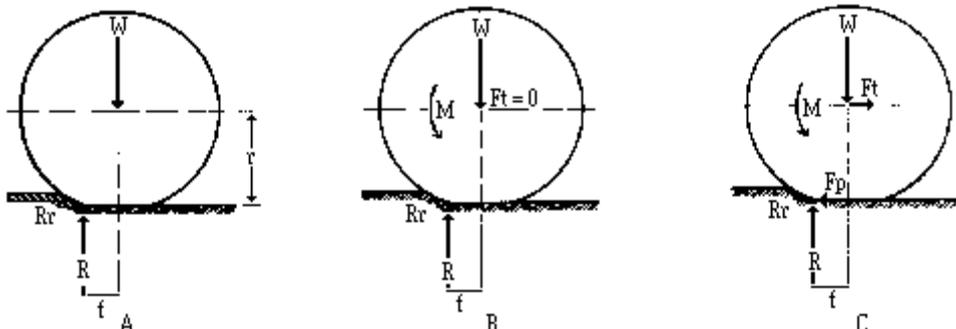


Figura 1- Representação do equilíbrio das forças e momentos numa roda livre rebocada (A), numa roda em tracção vencendo a resistência ao rolamento (B) e em tracção (C).
(Fonte: Bianchi de Aguiar, 1987)

Dividindo a igualdade expressa pela equação 1 pelo raio dinâmico de rolamento (r) e resolvendo a equação em ordem à força propulsora (F_p) tem-se:

$$F_p = \frac{M}{r} - \frac{R \cdot f}{r} \quad (2)$$

em que o membro da equação representado por M / r é a força tangencial ou tracção bruta aplicada na interface pneu - solo, que resulta da interacção do momento motor e do potencial de tracção do solo e o segundo membro, $R \cdot f / r$, representa a resistência ao rolamento (R_r). A força propulsora (F_p), considerando um tractor, é por vezes designada por força de tracção à barra ou tracção líquida (F_t), pois, embora estas duas noções, tenham o mesmo valor nos tractores de quatro rodas motrizes e de rastos, são diferentes nos tractores de duas rodas motrizes porque nestes os pneus directrizes apresentam resistência ao rolamento; o valor da força propulsora nas rodas motrizes é igual à diferença da força tangencial e da resistência ao rolamento.

Relativamente às rodas motrizes a relação entre a potência disponível para realização de trabalho ($F_t \cdot v$), ou seja, a potência à barra (P_b) e a potência utilizada para o seu accionamento ($M \cdot \text{rpm}$), ou seja, a potência no(s) eixo(s) motriz (P_e), define-se como **eficiência de tracção** ($E_{ft} = P_b / P_e$). Esta traduz, assim, a eficiência com que a roda converte a potência do eixo motriz em potência à barra, sendo o seu valor nulo quando as rodas motrizes não tem movimento ou o seu escorregamento é de 100%; os principais factores que condicionam esta eficiência são a resistência ao rolamento, o escorregamento, o atrito e a deflecção dos órgãos de locomoção, etc.

3- A resistência ao rolamento e o escorregamento

O binário nas rodas motrizes deve permitir vencer a resistência ao rolamento (R_r) e desenvolver ainda força de tracção (F_t) suficiente, para que o tractor se desloque; caso se esteja a trabalhar com um equipamento semi - montado ou rebocado a força de tracção deve ainda vencer a resistência ao rolamento deste.

O **coeficiente de resistência ao rolamento** (C_r) é a relação entre a força de tracção necessária para o tractor se deslocar num plano horizontal e a sua massa; esta resistência depende de vários factores, nomeadamente do tipo de solo, massa do tractor e órgãos de locomoção. Relativamente ao estado do solo a resistência ao rolamento é pequena quando a superfície daquele é firme e lisa, aumentando significativamente para as superfícies irregulares e solos com baixo poder de sustentação. A resistência ao rolamento de um tractor é determinada fazendo-o rebocar sendo o valor da resistência tanto mais elevado quanto maior for a força necessária; assim, por exemplo, se o $C_r = 0.10$ é necessário exercer uma força de 10 N para deslocar uma massa de 100 N.

Considerando a massa do tractor constata-se que quanto maior for o seu valor maior é a resistência ao rolamento; estas variações são proporcionais.

Para os órgãos de locomoção observa-se que a resistência ao rolamento é pequena em tractores de rodas deslocando-se em solos duros, mas elevada para os tractores de rastros, devido ao atrito dos rastros, mas em solos com baixo poder de sustentação verifica-se o contrário, pois as rodas enterram-se mais.

Quadro 1- Coeficientes de resistência ao rolamento de pneus (Cr)

TIPO DE SOLO	SECO	HÚMIDO
Argiloso	0,100	0,131
Argilo - arenoso	0,110	0,140
Húmico	0,105	0,145
Areno - húmico	0,100	0,150
Arenoso	0,127	0,123

FONTE: I. M. Pavelescu.

O **escorregamento (E)** dos órgãos de locomoção é a perda de velocidade provocada pela força de tracção e é tanto mais elevado quanto maior for esta força. O seu valor é obtido pelo quociente entre a diferença da velocidade teórica (**Vt**), ou seja, da velocidade determinada considerando o espaço obtido pelo produto do número de voltas da roda com o perímetro de rolamento (determinado a partir do raio dinâmico) e a velocidade real (**Vr**) pela primeira, ou seja:

$$E(\%) = \frac{V_t - V_r}{V_t} * 100 \quad (3)$$

O escorregamento pode também ser determinado considerando o tempo necessário para percorrer um dado trajecto com o tractor a desenvolver força de tracção (Tct) e sem desenvolver esta força (Tst), ou seja, $E(\%) = ((T_{ct} - T_{st}) / T_{ct}) * 100$. O escorregamento deve resultar apenas do deslizamento das rodas e não da variação do regime motor, pelo que o regulador da bomba de injeção deve manter este constante.

As perdas por escorregamento representam assim perdas de potência à barra. Mais importante que a perda de velocidade pode ser a força máxima de tracção que o tractor pode desenvolver, pelo que é importante conhecer o **coeficiente de tracção ou aderência (k)**, ou seja, a relação entre a força máxima de tracção à barra (Ft) e a carga dinâmica nas rodas motrizes.

Nos tractores de 2RM a carga dinâmica é a soma da carga estática suportada pelas rodas motrizes (W) mais a transferência de carga do eixo não motriz; neste tipo de tractores a carga no eixo não motriz não só não influencia a aderência como aumenta a resistência ao rolamento, pelo que em solos de fraca aderência estas rodas devem apoiar sobre o solo apenas o suficiente para proporcionar boa direcção. A aderência depende, para além da massa, do tipo de órgãos de

locomoção, a pressão dos pneus, o tipo de solo e teor de humidade, desenho das garras dos pneus e dimensão destes, etc.

Em encosta, com uma inclinação α , o coeficiente de tracção ou aderência (**Ke**) é dado por:

$$K_e = \frac{F_t}{W * \cos \alpha} \quad (4)$$

O valor de K_e , relativamente a K , é dado por:

$$K_e = K * \operatorname{tg} i \quad (5)$$

em que $\operatorname{tg} i = \alpha/100$, sendo α expresso em %; exemplo $\operatorname{tg} i = 0.3 \Rightarrow \operatorname{arc} \operatorname{tg} 0.3 = 17^\circ$ ($1 \operatorname{rad} = 180 / \pi$)

A força de tracção nos tractores de 4RM e de rastos é dada por $F_t = K * W$ e nos tractores de tracção simples por $F_t = K * W - R_r$.

Quadro 2- Coeficientes de tracção para pneus (**k**)

TIPO DE SOLO	SECO		HÚMIDO	
	PNEU	RASTO	PNEU	RASTO
Argila dura	0,6 - 1,0	0,4 - 0,7	0,1 - 0,3	0,1 - 0,3
Argiloso duro	0,5 - 0,8	0,6 - 0,6	0,15 - 0,4	0,4 - 0,9
Arenoso firme	0,4 - 0,8	0,6 - 1,0	0,25 - 0,8	0,6 - 1,0
Argiloso esponjoso	0,4 - 0,6	0,7 - 1,0	0,15 - 0,3	0,6 - 0,9
Argiloso com trilhos (rodeiras)	0,3 - 0,5	0,7 - 1,0	0,15 - 0,3	0,6 - 0,9
Solo com cascalho duro	0,5 - 0,8	0,7 - 0,9	0,3 - 0,9	0,7 - 0,9
Cascalho não compactado	0,3 - 0,5	0,5 - 0,9	0,4 - 0,6	0,6 - 1,0
Cascalho solto	0,2 - 0,4	0,4 - 0,7	0,3 - 0,5	0,5 - 0,8
Areia solta	0,1 - 0,2	0,3 - 0,5	0,1 - 0,4	0,4 - 0,7

FONTE: X de Megille.

A importância de conhecer o escorregamento das rodas motrizes prende-se geralmente com a necessidade que há de limitar o seu valor pois à medida que aumenta cresce também o desgaste dos pneus, pelo que, embora a força de tracção aumente, torna-se antieconómica a utilização do tractor; o valor máximo de escorregamento não deve ultrapassar os 25% (Achart, 1973)

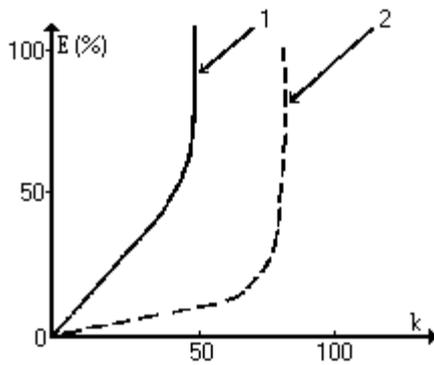


Figura 2- Variação do coeficiente de aderência (k) tractor com o escorregamento (E)
 1- Solo com baixa aderência 2- Solo com boa aderência
 (Fonte:Achart, 1973)

A variação da potência à barra, relativamente à potência no eixo motriz, resulta da variação da resistência ao rolamento e do coeficiente de aderência, pelo que, para um dado tractor e condições de trabalho, pode-se ter as seguintes situações:

- 1º - tractor sem lastragem, terreno com boa aderência e baixa Rr;
- 2º - tractor sem massas, terreno com baixa aderência e elevada Rr;
- 3º - tractor com massas, terreno com boa aderência e baixa Rr;
- 4º - tractor com massas, terreno com má aderência e elevada Rr.

A potência à barra é dada pela diferença entre a potência no eixo motriz e a potência perdida por rolamento e escorregamento. Potência motor \Rightarrow potência no eixo motriz \Rightarrow potência na jante \Rightarrow potência à barra. A potência na jante é dada pela diferença entre a potência no eixo e a potência perdida devido à resistência ao rolamento.

Assim, e para um tractor com as seguintes características:

- potência no eixo motriz 36.7 kW (50cv);
- massa sem lastragem 19600 N (2000 kg) e com lastragem 29300 N (3000 kg),

tem-se:

1ª situação:

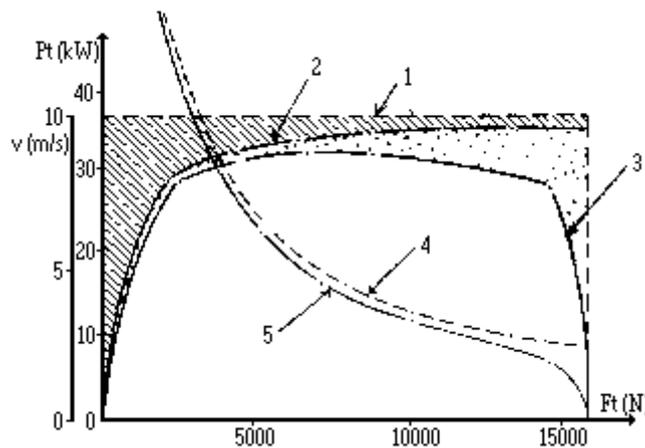


Figura 3- Representação da variação da potência à barra para as condições da situação 1º
 1- Potência no eixo motriz 2- Potência à jante 3- Potência à barra 4- Velocidade teórica 5- Velocidade real ($V_r = V_t * (100 - E)$)
 (Fonte: Achart, 1970)

Do gráfico da figura 3 relativo às condições da situação 1º constata-se que:

- a força de tracção é $\pm 80\%$ da massa do tractor;
- a potência à barra é de ± 31.6 kW;
- a potência à barra permanece, para variações importantes de força de tracção e velocidade, próxima da potência no eixo motriz;
- a potência óptima à barra é obtida para uma força de tracção de ± 8820 N e uma velocidade de 3.5 m/s.

2ª situação:

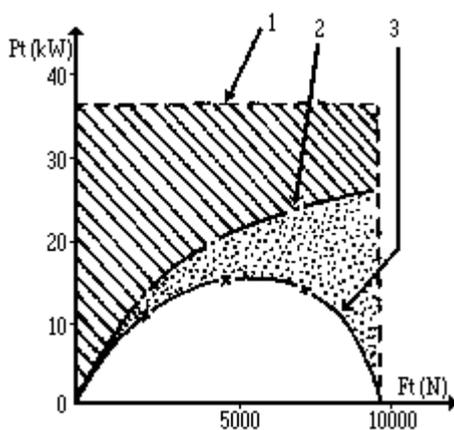


Figura 4- Representação da variação da potência à barra para as condições da situação 2º
1- Potência no eixo motriz 2- Potência à jante 3- Potência à barra
(Fonte: Achart, 1970)

Do gráfico da figura 4 relativo às condições da situação 2º constata-se que:

- a potência à barra é pouco superior a 14.7 kW, sensivelmente 40% da obtida no eixo motriz;
- a potência à barra apresenta os seus valores mais elevados num intervalo de força de tracção de 3920 - 6860 N a que correspondem velocidades de 4.8 e 2.1 m/s.

3ª situação:

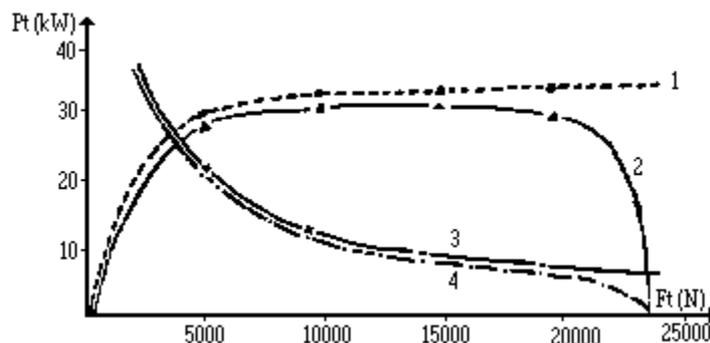


Figura 5- Representação da variação da potência à barra para as condições da situação 3º
1- Potência na jante 2- Potência à barra 3- Velocidade teórica 4- Velocidade real
(Fonte: Achart, 1970)

Do gráfico da figura 5 relativo às condições da situação 3º constata-se que:

- a potência óptima à barra é semelhante à da 1ª situação;
- a potência à barra aproxima-se da determinada na jante num intervalo de forças de tracção de 4420 - 20100 N, a que correspondem velocidades de 6.5 e 1.3 m/s;
- a potência óptima à barra é obtida com uma força de tracção de 12280 N e a uma velocidade de 2.5 m/s.

4ª situação:

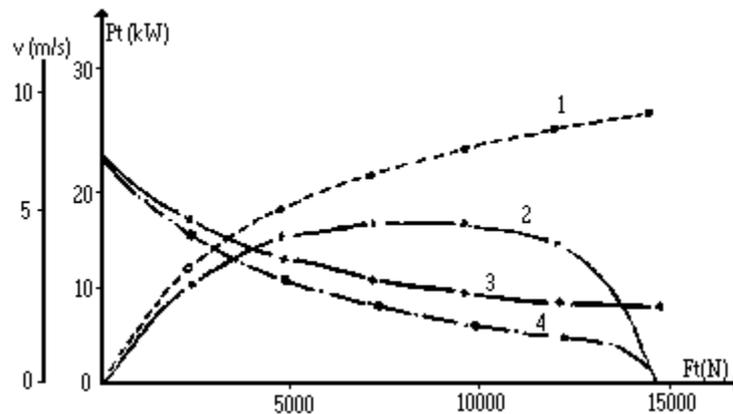


Figura 6- Representação da variação da potência à barra para as condições da situação 4º
1- Potência à jante 2- Potência à barra 3- Velocidade teórica 4- Velocidade real
(Fonte: Achart, 1970)

Do gráfico da figura 6 relativo às condições da situação 4º constata-se que:

- a potência máxima à barra é semelhante à da 2ª situação;
- a zona útil da força de tracção, onde a potência à barra se aproxima da potência do eixo motriz, apresenta uma amplitude bastante importante; a velocidade está compreendida entre os 2.8 e 1.3 m/s.

Assim, e considerando as várias situações, pode concluir que:

- em terrenos com boa aderência e com baixa resistência ao rolamento a potência à barra mantém-se relativamente alta numa faixa de velocidades e força de tracção bastante largas; estes intervalos crescem casos se proceda à lastragem dos tractores, pelo que esta operação deve ser efectuada mesmo quando se pretende utilizar o tractor para transportes;
- em terrenos de fraca aderência e com elevada resistência ao rolamento o factor limitante é, geralmente, o escorregamento, pelo que a potência à barra representa cerca 30 a 40% da potência no eixo motriz; a tentativa de aumento destes valores conduz normalmente ao acréscimo do escorregamento;

- considerando que nos tractores mais recentes a tendência é para a diminuição da relação peso / potência, que varia entre os 60 e 40 Kg / cv (Achart, 1970), conforme são ou não lastrados, é de todo o interesse, especialmente em terrenos de fraca aderência, a utilização de massas adicionais e trabalhar com equipamentos montados ou semi - montados.

4- Principais factores que condicionam a capacidade de tracção

A capacidade de tracção dos tractores, que para que este se desloquem tem de ser superior à resistência ao rolamento, depende de vários factores dos quais os mais importantes são:

- as características do solo e órgãos de locomoção;
- a desmultiplicação do regime motor para as rodas motrizes;
- a massa do equipamento e sua distribuição nos eixos.

Considerando a complexidade destes factores os estudos de tracção são efectuados fazendo-se algumas simplificações que não alteram, no entanto, os resultados obtidos nos ensaios (Bianchi de Aguiar, 1987). Nestas simplificações, e segundo este autor, considera-se que:

- o tractor se desloca em linha recta a uma velocidade uniforme e numa situação de equilíbrio dinâmico de forças;
- a superfície do solo é plana, deformável e homogénea;
- a reacção do solo é representada pelas componentes normal e tangencial à superfície do solo;
- a força de tracção desenvolve-se no plano longitudinal médio do tractor e paralelamente ao solo;
- as forças menores são desprezadas.

4.1- Importância das características do solo e órgãos de locomoção

Relativamente à importância que o solo e órgãos de locomoção têm na capacidade de tracção esta advém do facto de o tractor, para se poder deslocar, precisar que o solo apresente resistência suficiente para suportar a massa do equipamento, que ofereça uma resistência ao rolamento possível de ser vencida por aquele e que tenha um potencial de tracção superior à força tangencial desenvolvida pelos órgãos de locomoção.

Para o estudo das condições de tracção, tendo em consideração as características do solo e órgãos de locomoção, é necessário conhecer os fenómenos que ocorrem na interface solo - órgãos de locomoção.

Representando esquematicamente as áreas destas interfaces para os tractores de rodas e rastos tem-se:

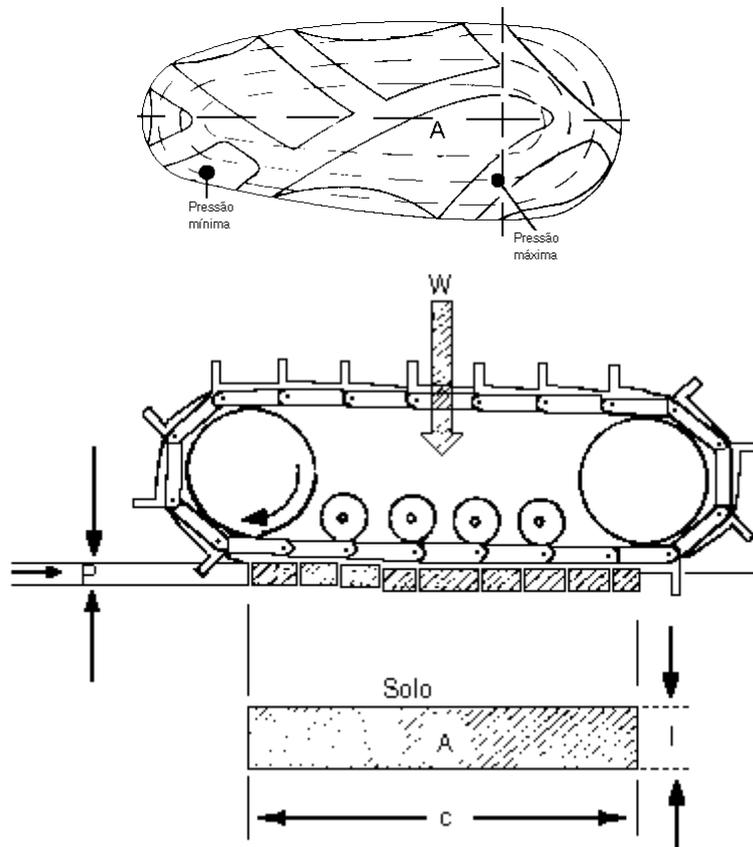


Figura 7- Área de contacto de um pneu motriz e de um rasto, com o solo.
A- Área de contacto com o solo B- Comprimento do rasto P- Profundidade de enterramento da sapata.
(Fonte: Mialhe, 1980)

Como se pode observar na figura 7 a área de contacto com o solo (**A**) dos dois sistemas de locomoção é muito diferente, o que condiciona o potencial de tracção deste. Para além da área, a força de tracção potencial depende de muitos outros factores, nomeadamente a textura e estrutura do solo, que condicionam a coesão e o ângulo de atrito interno das partículas; estes factores devem permitir ao solo apresentar poder de sustentação suficiente para suportar a massa do tractor e oferecer uma resistência limitada ao rolamento. De uma forma geral pode-se dizer que a força de tracção em solos muito coesos é menos influenciada pela massa do tractor do que nos solos pouco coesos, em que o potencial de tracção máximo depende muito da carga a que o solo está sujeito.

Relativamente ao estudo do potencial de tracção este baseia-se na tensão de corte, definida pelas leis de Coulomb, sendo o seu valor dado por:

$$\tau = c + \sigma * \text{tg } \phi \quad (4)$$

em que:

- τ é a tensão de corte, em kgf.cm^{-2}
- c o coeficiente de coesão do solo, em kgf.cm^{-2} ;
- σ a carga normal unitária, em kgf.cm^{-2} ;
- ϕ o ângulo de atrito interno, em graus.

Representando esquematicamente a variação da tensão de corte, em função da carga a que um pneu está sujeito, para um solo arenoso e um argiloso tem-se:

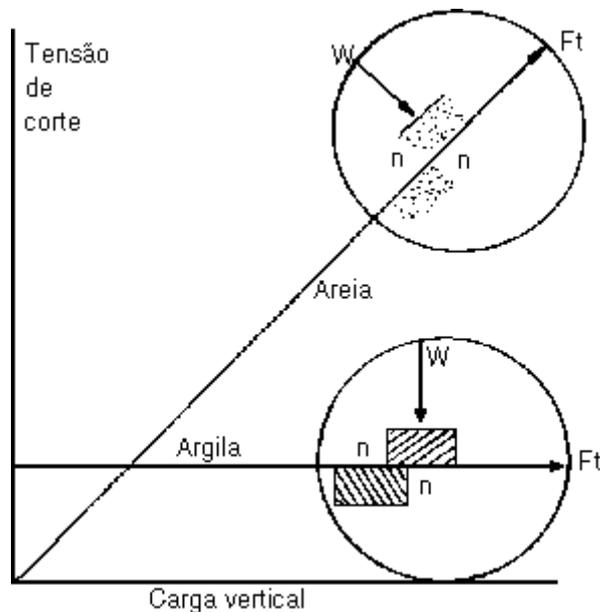


Figura 8- Tensão de corte vs carga vertical para dois tipos de solo.
(Fonte: Mialhe, 1980)

Como se pode observar na figura 8, a tensão de corte não se altera nos solos argilosos com o aumento de carga, pois estes têm elevada coesão mas, nos solos arenosos, à medida que a carga aumenta cresce a tensão de corte.

Aplicando a equação 4 a duas situações perfeitamente distintas como a areia seca e argila húmida, tem-se:

- para a areia seca $c=0$ e $\tau = \sigma * \text{tg } \phi$;
- para a argila húmida $\phi = 0$ e $\tau = c$;

o que permite concluir que para o primeiro caso a tensão de corte é função da carga normal, desde que ϕ permaneça constante, ou seja, que a força de tracção depende da carga nos eixos motrizes; este tipo de solos são caracterizados por apresentarem um baixo valor de coesão o que corresponde a uma massa granular semelhante à da areia seca. Para o segundo caso a força de tracção é principalmente função da área de contacto solo - órgãos de locomoção (**A**); os solos em que $\phi = 0$, são solos muito coesos e plásticos, como os solos orgânicos húmidos.

Considerando estas duas situações extremas de solo pode dizer-se que, relativamente à areia seca, a capacidade de tracção depende fundamentalmente da massa do tractor, sendo muito importante a localização do centro de gravidade, a colocação das massas e sua transferência e que o tipo de órgãos de locomoção tem pouca importância.

Para os solos pesados a capacidade de tracção depende principalmente da área de contacto da interface solo-órgãos de locomoção, sendo a massa do tractor e sua distribuição sobre os eixos, pouco importante.

Relativamente aos solos com características intermédias das citadas, a força potencial de tracção do solo (**F_p**) dependerá da sua tensão de corte e área de contacto com os órgãos de locomoção, ou seja:

$$F_p = \tau * A \quad \text{ou} \quad \tau = \frac{F_p}{A} \quad (5)$$

em que a área é definida em cm^2 e a tensão de corte em kgf.cm^{-2} .

A carga normal unitária é dada por:

$$\sigma = \frac{W}{A} \quad (6)$$

Substituindo as equações 5 e 6 em 4, tem-se:

$$F_p = A * c + W * \text{tg } \phi \quad (7)$$

que traduz a relação entre a força de tracção potencial do solo, para um tractor de massa **W**, em que a área de contacto com o solo é **A**, para as constantes do solo **c** e ϕ .

Nestas situações a escolha do tipo de órgãos de locomoção e massas nos eixos deve ser efectuada tendo em consideração que quanto mais arenoso for o solo, mais importante é o não enterramento (sustentação) do equipamento, uma vez que a tracção depende da massa, e, para solos mais pesados, deve maximizar-se a área de contacto, uma vez que a tracção depende desta.

Considerando, por exemplo, um solo arenoso ($c = 0$ e $\phi = 35^\circ$) $F_p \approx 0.7 * W$, ou seja, o potencial de tracção máximo do solo é 70% da massa do tractor aplicada no eixo motriz; caso o binário seja superior ao valor necessário para vencer 70% da carga verifica-se escorregamento das rodas.

Quadro 3- Coeficientes de coesão do solo (c) e ângulos de atrito interno (ϕ)

TIPO DE TERRENO	c (Kgf/cm ²)	ϕ (graus)
Areia seca	0,0	35 - 37
Limo	0,1 - 0,3	30 - 35
Argila	0,05 - 0,5	16 - 28
Argilo - arenoso	0,2 - 0,5	26 - 30
Argilo - orgânico	0,05 - 0,5	12 - 18
Arenoso (lavrado e gradado 16 dias antes)	0,7 psi	20° 00'
Arenoso fino (lavrado 5 dias antes)	1,02 psi	20° 30'
Arenoso fino (não lavrado)	1,63 psi	42° 30'

FONTE: NUNES, A. J. C. in Curso de Mecânica dos Solos e Fundações, Edit. Globo

BARGER, E. L. *et al.*, in Tractores e seus Motores. Edit. Edgard Blucher

4.2- Importância da desmultiplicação do regime motor para as rodas motrizes

O motor de um tractor desenvolve um determinado binário (**B**) a um dado regime (**rpm**), que desprezando as perdas na transmissão, é convertido num binário e um regime nas rodas motrizes cujos valores dependem da relação de desmultiplicação entre o motor e estas; a perda de binário é de $\pm 1-2\%$ por cada par de carretos engrenados, pelo que, numa transmissão clássica estas perdas podem atingir os 10% (Achart, 1970).

Para uma dada desmultiplicação (**d**) o binário nas rodas motrizes, não considerando as perdas, é dado por $B * d$, sendo o regime dado pelo quociente entre o regime motor e o coeficiente de desmultiplicação. Assim, para uma desmultiplicação grande, obtida pela utilização das relações de transmissão mais baixas, o binário disponível nas rodas é elevado mas a velocidade é baixa, e inversamente para uma desmultiplicação mais pequena.

Considerando os dois extremos da desmultiplicação das relações de transmissão constata-se a importância da existência de um número de relações suficientemente grande, para se dispor da combinação que permita obter um binário suficiente para realização de um trabalho à velocidade mais alta possível. Assim, por exemplo, considerando que uma dada relação de transmissão permite obter uma força de tracção de ± 10000 N e que com a relação imediatamente a seguir, em que a velocidade é dupla da anterior, a força é de 5000 N, caso o trabalho que se pretende efectuar necessite de uma força de tracção de 5500 N, apenas se pode utilizar a 1ª relação de transmissão e portanto uma velocidade inferior (50%) à permitida por esta última. A presença de uma terceira relação de transmissão intercalada entre aquelas duas seria muito importante pois permitiria desenvolver a força de tracção necessária e obter um rendimento em trabalho bastante superior.

A presença de uma caixa de velocidades com um elevado número de relações de transmissão é também muito importante para o accionamento dos equipamentos à TDF, pois, funcionando estes ao regime normalizado, só é possível para cada relação de transmissão, uma

velocidade de deslocamento. Assim, para que seja possível desenvolver um binário suficiente para accionar o equipamento e a velocidade de deslocamento ser a mais alta, é necessário dispor de uma caixa de velocidades com numerosas relações de transmissão para escolher a relação que permita obter o binário necessário a uma velocidade alta. A presença de um elevado número de relações de transmissão conduz, no entanto, a maiores perdas por atrito.

Quadro 4- Rendimento à tracção (η_t) (potência à barra / potência à TDF)

Condições de superfície do solo	Força de tracção baixa ($F_t = 10\%$ da massa do tractor)	Força de tracção média	Força de tracção elevada (sem escorregamento excessivo)
Betão	0.75	0.85	0.90
Superfície dura, não mobilizada	0.60	0.75	0.80
Superfície mediamente dura, mobilizada	0.40	0.55	0.65
Superfície de um solo recentemente mobilizado	0.25	0.4	0.45

(Fonte: Hunt, D., 1977)

4.3- Importância da distribuição de massas nos eixos na capacidade de tracção

Considerando um tractor, para que este se desloque é necessário vencer, ao nível de cada roda, o atrito entre esta e o solo, que é função, entre outros factores, da carga a que aquelas estão sujeitas, o tipo de pneus e as condições do próprio solo. Para além destes factores é necessário considerar se os equipamentos de deslocam em plano horizontal ou inclinado, pois, nesta última situação, a resistência ao rolamento é acrescida da componente da massa paralela à inclinação, ou seja, de $W \times \sin \alpha$, figura 9.

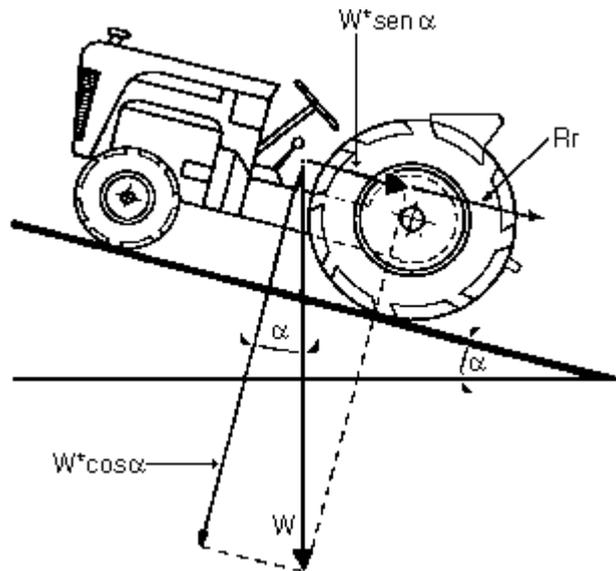


Figura 9- Representação das forças desenvolvidas para deslocar um trator num plano inclinado. (Fonte: CEMAGREF, 1974)

Como se pode observar na figura 9, a força de tração está directamente relacionada com a carga suportada pelas rodas motrizes, que é limitada quer pelo trator quer pela possibilidade que o solo tem de suportar a carga dos equipamentos.

Assim, considerando que W_1 e W_2 são as massas suportadas pelo eixo traseiro e dianteiro do trator, tem-se:

- em terrenos planos:

$$k * W_1 > (W_1 + W_2) * Cr; \quad (8)$$

- em terrenos inclinados:

$$k * W_1 * \cos \alpha > (W_1 + W_2) * (Cr * \cos \alpha + \text{sen } \alpha); \quad (9)$$

$$k * W_1 > (W_1 + W_2) * (Cr + \text{tg } \alpha) \quad (10)$$

Esta última expressão é igual a:

$$W_1 * [k - (Cr + \text{tg } \alpha)] > W_2 * (Cr + \text{tg } \alpha); \quad (11)$$

que é verdadeira quando:

$$k - (Cr + \text{tg } \alpha) > 0 \quad (12)$$

Considerando a expressão:

$$k - (Cr + tg \alpha) \quad (13)$$

observa-se que, para o equipamento se deslocar, é necessário que o coeficiente de aderência seja superior ao de rolamento mais a tangente da inclinação. Para a expressão 12 e para terrenos de mau piso, o valor de k pode ser demasiado pequeno e o de Cr suficientemente grande, para que o valor da expressão seja positivo, pelo que o tractor não se desloca

Para valores positivos da expressão 12, a expressão 11 será tanto maior quanto maior for a diferença entre a carga sobre o eixo traseiro relativamente ao dianteiro, deslocando-se mais facilmente o tractor em maus terrenos ou encostas.

Para o conjunto tractor semi - reboque as forças envolvidas são as seguintes:

$$k \times W_1 \times \cos \alpha > (W_1 + W_2 + W_3) \times (Cr \times \cos \alpha + \sin \alpha) \quad (14)$$

$$k \times W_1 > (W_1 + W_2 + W_3) \times (Cr + tg \alpha) \quad (15)$$

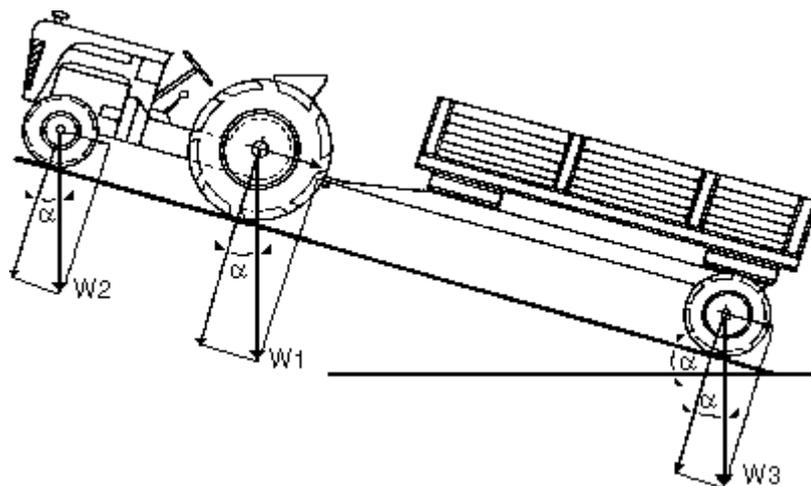


Figura 10- Distribuição da massa de um tractor e um reboque num terreno inclinado (Fonte: CEMAGREF, 1974)

Considerando diferentes tipos de terreno e os resultados da equação 13 tem-se:

Quadro 6- Diferentes situações de piso e inclinação

Diferentes situações de piso e inclinação	$k - (r + tg \alpha)$
I - Bom piso e solo plano $k = 0.8$; $Cr = 0.05$; $\alpha = 0$; $tg \alpha = 0$	0.75
II - Bom piso e solo inclinado $k = 0.8$; $Cr = 0.05$; $\alpha = 14^\circ$; $tg \alpha = 0.25$	0.50
III - Mau piso e solo plano $k = 0.6$; $Cr = 0.15$; $\alpha = 0$; $tg \alpha = 0$	0.45
IV - Mau piso e solo inclinado $k = 0.6$; $Cr = 0.15$; $\alpha = 14^\circ$; $tg \alpha = 0,25$	0.20

Para estas situações de piso e inclinação o comportamento de um tractor de 2000 kg, com 1300 kg no eixo traseiro, e reboque de 4000 kg, e do mesmo tractor mas para um semi - reboque de 4000 kg, 3000 kg no seu eixo e 1000 kg no eixo traseiro do tractor é o seguinte:

Quadro 7- Comportamento de um tractor com reboque e com semi - reboque em diferentes situações de piso e inclinação do solo.

Diferentes situações	Tractor + reboque	Tractor + semi - reboque
I	Transita	Transita
II	Não transita	Transita
III	Não transita	Transita
IV	Não transita	Não transita

Bibliografia

- Achart, J.; Murat, H.; Paillou, G.; Moulinard, R. (1970). Tracteurs et machines agricoles. Périgueux. Pierre Fanlac Éditeur.
- Barger, E.; Liljedahl, J.; Carleton, W.; McKibben, E. (1963). Tractors and their power units. London. John Willey & Sons, Inc.
- Bianchi de Aguiar, F. (1987). Comportamento à tração do tractor de rastos nos novos sistemas de cultura da vinha na Região Demarcada do Douro. Vila Real. UTAD.
- Mialhe, L. (1980). Máquinas motoras na agricultura. S.Paulo. EPUL.