

Análise das diferentes distribuições de pressão sob carros de combate

Matias Miguel Peleitay Pinto*, Ricardo Teixeira da Costa Neto
Instituto Militar de Engenharia (IME)

Praça General Tibúrcio, 80, 22290-270, Praia Vermelha, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

*mpeleitay@gmail.com

RESUMO: É apresentado um modelo matemático que permite analisar a resposta do perfil da distribuição de pressão sob rodas de apoio de carros de combate com lagartas. Em cada simulação pode-se avaliar quais das distribuições conduz ao melhor desempenho. Cada um dos perfis de distribuição de pressão é usado no mesmo modelo de carro de combate (VBTP M113), considerando o mesmo terreno deformável, iguais condições de simulação e observando a resposta do veículo em cada caso. O modelo permite dimensionar a influência do valor do coeficiente de coesão na determinação da resistência de terraplanagem analisando o desempenho do veículo segundo os parâmetros de rendimento. Os resultados são comparáveis com os apresentados na literatura, validando a resposta do modelo matemático.

PALAVRAS-CHAVE: dinâmica longitudinal, fluxo de potência, carro de combate, solos deformáveis, distribuição de pressão, veículos sobre lagartas.

ABSTRACT: In this work is introduced a mathematical model that allows to evaluate the performance of a military tracked vehicle considering different types of ground pressure distribution profiles. In each case, it's possible evaluate which of the ground pressure distribution profiles leads to the best performance. Each of the profiles is used in the same vehicle model (APC M113), considering the same deformable terrain, the same simulation conditions and observing the APC behavior in each case. This model allows to verify the influence of the soil cohesion coefficient value in the determination of the bulldozer resistance by analyzing the vehicle's performance according to the efficiency parameters. The results are comparable to those presented in the references, validating the mathematical model.

KEYWORDS: longitudinal dynamics, power flow, Main Battle Tank, deformable soils, pressure distribution, tracked vehicles.

1. Introdução

rente à necessidade de realizar melhorias no desempenho de veículos, particularmente nesse caso de um carro de combate, são desenvolvidos modelos matemáticos que representem, da melhor maneira possível, o comportamento do veículo. Neste trabalho é desenvolvido um modelo matemático que reproduz o comportamento dinâmico de um carro de combate trafegando em dois tipos de solos de consistências díspares.

A dinâmica longitudinal deve considerar toda a cadeia cinemática do veículo [1]-[3], desde o torque produzido pelo motor até a força de tração transmitida pela lagarta, produto da interação com o solo. Também é necessário considerar as forças de resistência ao movimento, as quais são divididas em forças internas, que dependem do perfil do carro, e forças externas,

próprias das características do entorno onde se o veículo se desloca, que, no caso avaliado neste trabalho, em solo deformável. Tais forças externas são regidas pelas propriedades mecânicas dos solos, que impõem severas limitações à mobilidade dos veículos. O solo deformável apresenta comportamento plástico e é usada a teoria do equilíbrio plástico para determinar o que ocorre na interação com a lagarta.

Ao longo dos anos, foram desenvolvidos métodos empíricos e teóricos, buscando solucionar esse problema, os quais tentavam prever o desempenho de veículos sobre lagarta em terrenos deformáveis [4]-[6]. O pioneiro desses estudos foi Bekker [5], que desenvolveu uma técnica para determinar experimentalmente parâmetros que representam o comportamento dos solos segundo suas propriedades mecânicas [5]. Os parâmetros dos solos empregados neste trabalho são apresentados na **tabela 1**.

Tab.1 – Parâmetros dos solos

Ordem	Tipo de Solo	n	c			K	
1	Argila pesada	0,1	1,18	103,27	20,69	6°	0,6
2	Argila	1,0	20,68	814,3	3,45	11°	2,54

Fontes: [4] e [8]

Baseado em resultados empíricos, Bekker [5] afirma que o comportamento da lagarta em um determinado terreno se assemelha ao de uma placa rígida. Empregando as **equações 1 e 2**, calcula-se o afundamento (z_0) e a resistência ao movimento devida à compactação do solo (R_c).

$$z_0 = \left(\frac{w}{\frac{K_c}{b} + k_\phi} \right)^{1/n} \quad (1)$$

$$R_c = \frac{1}{(n+1)b^{1/n} * \left(\frac{K_c}{b} + k_\phi \right)^{1/n}} \left(\frac{w}{l} \right)^{\frac{(n+1)}{n}} \quad (2)$$

Nas **equações 1 e 2**, K_c , K_ϕ , n são parâmetros característicos do solo; b e l são, respectivamente, largura e comprimento da lagarta e w é a massa do veículo.

Uma das limitações da proposta inicial de Bekker [5] é que sua metodologia orienta à aplicação de distribuição uniforme de pressão. Entretanto, a distribuição da pressão sob a lagarta do carro de combate pode ser representada por uma função diferente, relacionada aos parâmetros de projeto de cada tipo de veículo e a forma como a carga é transferida ao solo. Esses parâmetros estão sujeitos às características de cada veículo, tais como a quantidade e o diâmetro das rodas de apoio, a distância entre tais rodas, as dimensões da lagarta, o sistema de suspensão, o sistema de regulação da tensão da lagarta, a posição do centro de gravidade, dentre outros [7].

O desempenho de veículos em terreno deformável é um problema central em assuntos relacionados à mobilidade, motivo pelo qual é necessário focar na interação veículo-solo a partir da perspectiva da

tração [4], e uma das questões é definir a distribuição da pressão no solo para posteriormente determinar a força de tração. Contudo, nem sempre se consegue medir a distribuição de pressão, sendo então necessário estimá-la.

Para calcular a força de tração desenvolvida por um veículo sobre lagartas em solo deformável, é necessário usar o critério de Morh Coulomb [6], que considera que a falha do solo se dá pelo cisalhamento e pode ser representada pela **equação 3**, que expressa o esforço cisalhante máximo produzido na interação entre a lagarta e o solo.

$$\tau_{max} = (c + \sigma \operatorname{tg} \phi) \quad (3)$$

Na **equação 3**, σ representa a distribuição de pressão, c e ϕ são parâmetros do solo, coeficiente de coesão e ângulo de atrito respectivamente. Pode-se demonstrar empiricamente o movimento do solo sob a lagarta, representado pela função exponencial da **equação 4** apresentada por Janosi e Hanamoto [4], sendo que j representa o deslocamento de cisalhamento e K é o módulo de deformação de tensões.

$$\tau = (c + \sigma \tan \phi) \left(1 - e^{-\frac{j}{K}} \right) \quad (4)$$

De Wong [4], tem-se que o deslizamento ou slip (i) e o deslocamento de cisalhamento (j) são definidos, respectivamente, segundo as **equações 5 e 6**,

$$i = 1 - \frac{V_v}{V_t} \quad (5)$$

$$j = V_j t \quad (6)$$

sendo V_v a velocidade longitudinal do veículo, V_j a velocidade real da polia tratora, V_t a diferença entre a velocidade teórica e a velocidade do veículo, e t o tempo de contato de um ponto determinado com o solo. Considerando o deslocamento em velocidade constante, tem-se a relação cinemática,

$$t = \frac{x}{V_t} \quad (7)$$

e arrumando as **equações (5), (6) e (7)** pode se

rescrever a **equação 8**:

$$j = ix \quad (8)$$

Considerando as **equações de 1 a 8**, determina-se a força de tração (F_t) produzida na interação da lagarta com o solo (9) e também a força Drawbar Pull (DP) (10), que são consideradas no modelo matemático apresentado.

$$F_t = b \int (c + \sigma \operatorname{tg} \phi) \left(1 - e^{-\frac{j}{k}}\right) dx \quad (9)$$

$$DP = F_t - \sum R \quad (10)$$

A força *drawbar pull* (DP) é a diferença existente entre a F_t e as forças de resistência, R , que se opõem ao movimento do veículo [9], e representa sua capacidade de puxar um reboque/semirreboque.

Segundo Kogure [11], o empuxo total do solo (H_{solo}) é igual ao momento aplicado na polia tensora dividido por seu raio, **equação 11**.

$$H_{\text{solo}} = \frac{T_{\text{roda}}}{r_{\text{roda}}} = F_t \quad (11)$$

Da **equação 4** tem-se a interação da lagarta com o solo, que depende da distribuição de pressão (σ) que produz essencialmente o esforço de cisalhamento (τ); este afetado pelo deslocamento por cisalhamento ($j(x)$), que por sua vez é calculado em função da posição da lagarta [12]. Portanto, é necessário avaliar os possíveis perfis de distribuição de pressão ao longo do comprimento da lagarta apoiado sobre o terreno, e influência no desempenho do veículo.

Na situação de não haver dados experimentais para descrever a distribuição de pressão de um veículo, deve-se estimar uma função matemática para representá-la. Devido à diversidade de veículos, nem sempre se consegue determinar uma única função que represente a distribuição de pressão comum a

todos os carros, e então parte-se para determinar a função que melhor se adapta a cada veículo.

Há diferentes tipos de distribuição de pressão que podem ser considerados, dependendo das propriedades geométricas do veículo. Inicialmente, Bekker [5] representa um perfil de distribuição de pressão uniformemente distribuída (**figura 1**).



Fig. 1 – Distribuição de pressão uniforme – VBTP M113 [14].

$$\sigma = \frac{w}{bl} \quad (12)$$

$$F_t = (Ac + w \cdot \operatorname{tg} \phi) * \left(1 - e^{-\frac{j}{k}}\right) \quad (13)$$

O perfil de distribuição de pressão do M113 pode ser considerado uniforme devido às suas características, pois sua massa é bem distribuída ao longo de seu comprimento.

Wong [9] apresenta outros perfis de distribuição de pressão e suas respectivas forças de tração para a análise da resposta dos veículos de lagarta, tais como distribuição de pressão senoidal (**figura 2**), linear decrescente (**figura 3**), linear crescente (**figura 4**), e senoidal com máxima pressão na linha vertical do centro de gravidade do carro (**figura 5**). Cada perfil é estimado de acordo com o tipo de veículo. Na **figura 2** é representado um T-72, carro de combate russo desenvolvido no início na década de 1970. Sua arquitetura resulta em uma distribuição de peso tal que a pressão sobre o solo é maior sob cada roda de apoio, decrescendo entre elas. As ilustrações dos

veículos são de [14].



Fig. 2 – Distribuição de pressão senoidal, T-72 [14].

$$\sigma = \frac{w}{bl} \left(1 + \cos \frac{2n\pi x}{l} \right) \quad (14)$$

$$F_t = \frac{w}{bl} \operatorname{tg} \phi \left(1 + \cos \frac{2n\pi x}{l} \right) \left(1 - e^{-\frac{x}{K}} \right) \quad (15)$$

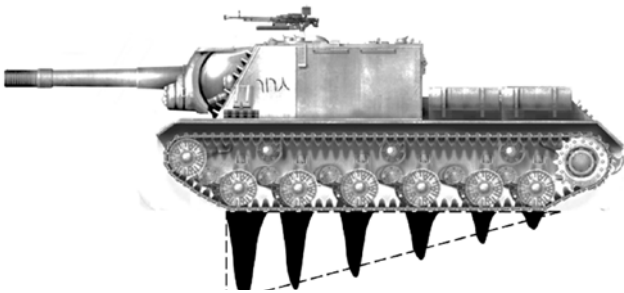


Fig. 3 – Distribuição de pressão linear decrescente – ISU 152 [14].

$$\sigma = \frac{2w(l-x)}{bl} \frac{1}{l} \quad (16)$$

$$F_t = (2w \operatorname{tg} \phi) \left(1 - \frac{K}{il} \left(1 - e^{-\frac{il}{K}} \right) \right) + \quad (17)$$

$$-w \operatorname{tg} \phi \left[1 - 2 \left(\frac{K}{il} \right)^2 \left(1 - e^{-\frac{il}{K}} - \frac{il}{K} e^{-\frac{il}{K}} \right) \right]$$

Representado na **figura 3**, o ISU-152 era um carro caçador soviético empregado na 2ª Guerra Mundial, com a função de destruir outros carros, e seu canhão era postado bem à frente. Assim, devido a essas características, é possível aproximar sua distribuição de pressão para o perfil linear decrescente. Para o moderno obuseiro autopropulsado alemão PzH-2000, **figura 4**, tem-se o oposto, uma vez que a munição e a maior parte do peso está mais à retaguarda do carro.



Fig. 4 – Distribuição de pressão linear crescente– PzH-2000 [14].

$$\sigma = \frac{2w x}{bl} \frac{1}{l} \quad (18)$$

$$F_t = (w \operatorname{tg} \phi) \left[1 - 2 \left(\frac{K}{il} \right)^2 \left(1 - e^{-\frac{il}{K}} - \frac{il}{K} e^{-\frac{il}{K}} \right) \right] \quad (19)$$

O carro de combate alemão Panzer VI, ou Tiger I (**figura 5**), usado na 2ª Guerra Mundial, apresentava rodas de apoio defasadas, para melhorar a distribuição de pressão sobre o solo. Devido a essa particularidade e ter as massas mais concentradas para o centro de sua linha longitudinal, o perfil de pressão pode ser aproximado por uma curva senoidal com valor máximo na direção de seu centro de gravidade.



Fig. 5 – Distribuição de pressão senoidal com máxima pressão no centro – Tiger I [14].

$$\sigma = \frac{w \pi}{bl} \sin \left(\frac{\pi x}{l} \right) \quad (20)$$

$$F_t = (w \operatorname{tg} \phi) \left[1 - \frac{\left(e^{-\frac{il}{K}} + 1 \right)}{2 \left(1 + \frac{i^2 l^2}{\pi^2 K^2} \right)} \right] \quad (21)$$

Kogure [11] apresenta em seu artigo as equações que descrevem a distribuição de pressão de um carro de combate por meio da parametrização de triângulos invertidos sob as rodas de apoio, que representa

a função que transmite as cargas ao solo como se observa na **figura 6**.

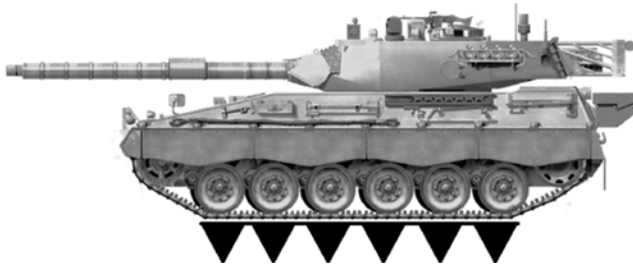


Fig. 6 – Distribuição de pressão – TAM 2C [14]

$$\sigma = \frac{P_{mm}(x - x_t + l)}{l} + \frac{P_{mm}(x - x_t - l)}{l} \quad (22)$$

Na **equação 22** P_{mm} representa a pressão máxima média, l é a distância entre rodas e x, x_t são variáveis que representam as pendentes da distribuição de pressão. Além disso, Kogure [11] explica como obter o empuxo individual de cada roda, **equação 23**. A força de tração total do veículo é o somatório das forças de empuxo desenvolvidas em cada roda de apoio, **equação 24**.

$$T_i = \tau \left(1 - \exp\left(\frac{-j}{K}\right) \right) \quad (23)$$

$$F_t = \sum_{i=0}^n T_i \quad (24)$$

Por meio da teoria desenvolvida por Bekker [5], e usando um modelo matemático da dinâmica longitudinal do veículo M113 desenvolvido em MATLAB/Simulink®, analisa-se qual das funções de distribuição de pressão apresentadas permite ao carro de combate trafegar apresentando seu melhor desempenho, e os resultados são comparados aos encontrados nas referências bibliográficas.

2. Metodologia

O modelo matemático é baseado na metodologia do fluxo de potência, desenvolvido em MATLAB/

Simulink® (**figura 7**). A força de tração transmitida ao solo pela lagarta é calculada a partir do torque fornecido pelo motor. É modelada a interação da lagarta com o solo com base em Bekker [5], permitindo identificar o esforço de cisalhamento que surge da interação supracitada. Igualando a força produzida na polia tratora, com a resposta da lagarta decorrente da interação entre o veículo e o solo, determina-se a

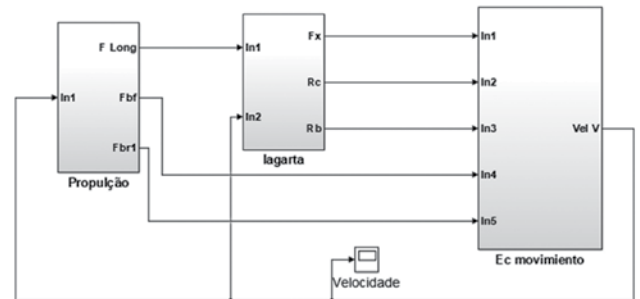


Fig. 7 – Modelo matemático em diagrama de blocos.

O torque do motor é baseado no equacionamento apresentado em [1], calculado por meio de uma função polinomial de segundo grau. Tal torque é multiplicado pelo sistema de transmissão e é fornecido à polia tratora do carro de combate. O modelo considera que a roda de tração está diretamente no contato com a lagarta e, por sua vez, apoiada no solo. Posteriormente, é considerada a equação de movimento do veículo, levando em conta a força propulsora bem como as resistências que se opõem ao deslocamento do veículo.

Nesse modelo, considera-se a resistência à compactação e a resistência de terraplanagem.

A resistência à compactação (R_c) é imposta pelo terreno às lagartas, definida pela **equação 25**. As variáveis l e b são, respectivamente, o comprimento e a largura da lagarta; W é o peso do veículo; K_c, K_ϕ, n são parâmetros característicos do solo.

$$R_c = \frac{b}{(n+1) \left(\frac{K_c}{b} + K_\phi \right)^{(1/n)}} \left(\frac{W}{bl} \right)^{(n+1/n)} \quad (25)$$

No caso da resistência de terraplanagem (R_b) é necessário interpretar o que acontece na interface

lagarta-solo. Na porção anterior da lagarta, que afunda a um valor geralmente igual ao afundamento inicial (z_0) do carro, forma-se uma barreira de solo α à sua frente, que impõe resistência ao deslocamento do carro [5], **equação 26**,

$$R_b = \left(\frac{b \sin(\alpha + \phi)}{2 \sin \alpha \cos \phi} \right) [2z_0 K_c + \gamma z^2 K_\gamma] \quad (26)$$

sendo z o afundamento, γ a densidade do solo, K_c e K_γ são parâmetros adimensionais do atrito interno do solo, e α a inclinação do carro de combate, que resulta do afundamento causado pelo deslocamento da lagarta. A **equação 26** é válida para ângulos de inclinação de até 6° .

O arrasto aerodinâmico é representado na **equação 27**:

$$R_{ae} = \frac{1}{2} \rho C_D A_f V_v^2 \quad (27)$$

sendo ρ a densidade do ar, C_D o coeficiente de arrasto aerodinâmico, determinado experimentalmente, A_f a área frontal do veículo, e V_v a velocidade longitudinal.

A resistência à rampa não é considerada nessa situação, dado que as simulações são todas desenvolvidas em terreno horizontal; sua equação é apresentada como:

$$R_{ramp} = W \sin \alpha_t \quad (28)$$

sendo α_t o ângulo de inclinação da superfície onde o carro se desloca e W o peso.

Na simulação é usado o veículo VBTP M113A2, equipado com o motor DETROIT DIESEL 6V 53T e com a caixa de transmissão ALLISON – MODELO TX 100-1 (**tabela 2**).

Tab. 2 – Parâmetros do veículo

VBTP M113A2	
Motor	Em V, 6 cilindros, 2 tempos, diesel
Potência Máxima	157 kW (210 hp) a 2.200 rpm
Torque Máximo	724 Nm a 1.600 rpm
Peso	11.300 kgf
Relação 1ª marcha	3,81:1
Relação 2ª marcha	1,93:1
Relação 3ª marcha	1,00:1
Relação do planetário	4,412:1
Velocidade máxima	64 km/h

Fonte: [13]

As simulações consideram o veículo trafegando sobre os solos deformáveis elencados na **tabela 1**, e as forças de tração calculadas baseando-se nos perfis de distribuição de pressão apresentados nas **equações 12 a 28**.

O veículo se desloca em linha reta, acelerando até atingir a velocidade máxima. Em cada uma das situações são considerados dois valores de deslizamento ($i = 20\%$ e $i = 80\%$).

Observa-se particularmente as respostas de velocidade final do veículo (V_F), de força de tração (F_t), e o *Drawbar Pull* (DP), definido segundo a **equação 29**.

$$DP = F_t - R_{ae} - R_{solo} \quad (29)$$

sendo R_{solo} a resistência total produzida pela interação lagarta/solo [3].

São considerados dois parâmetros: o coeficiente de DP (**equação 30**), que representa a relação em que o peso do veículo é usado para produzir tração de Drawbar Pull [9]; o coeficiente de eficiência de tração, **equação 31**, que representa a produtividade potencial do veículo, ou seja, a velocidade com que o trabalho produtivo pode ser realizado [9], sendo então os parâmetros de comparação entre os resultados obtidos.

$$Coef DP = \frac{DP}{w} \quad (30)$$

$$Coef Pw = DP V_F \quad (31)$$

Com a finalidade de avaliar adequadamente a influência da distribuição de pressão na obtenção de força de tração, em todas as simulações foi considerado o mesmo afundamento inicial.

3. Resultados

3.1 Ensaios A

Os Ensaios A compreendem 4 simulações, e o objetivo é avaliar o comportamento da

distribuição de pressão em solo argiloso. As simulações são realizadas com valores diferentes de deslizamentos. Em todas as simulações, os valores de afundamento (Z_o), resistência à compactação (R_c) e resistência de terraplanagem (R_b) são sempre os mesmos (tabela 3).

Tab. 3 – Parâmetros característicos dos solos.

Solo	Z_o (m)	R_c (kN)	R_b (kN)
Argila pesada (HC)	0,003	0,111	0,055
Argila úmida (CL)	0,064	0,369	5,131

Nas duas primeiras simulações (A-1 e A-2) é considerando o deslizamento $i = 80\%$ em cada tipo de solo, e na terceira e quarta (A-3 e A-4), $i = 20\%$ (tabela 4).

Tab. 4 – Simulações Ensaio A

Simulação	Solo	c (kPa)	ϕ (°)	i %
A-1	Argila pesada (HC)	20,69	6°	80
A-2	Argila úmida (CL)	3,45	11°	80
A-3	Argila pesada (HC)	20,69	6°	20
A-4	Argila úmida (CL)	3,45	11°	20

As respostas das simulações são apresentadas nas tabelas 4.1 a 4.4.

Tab. 4.1 – Resultados da simulação A-1

Nº	Perfil Dist. Pressão	F_t (kN)	V_F (km/h)	V_{50seg} (km/h)	Coef DP	DP Power
(1)	Linear crescente	32,77	62,64	62,43	0,4737	935,3
(2)	Senoidal c/ máx. no mio	32,77	62,64	62,43	0,4737	935,3
(3)	Uniforme	32,67	62,64	62,43	0,4720	932,3
(4)	Linear decrescente	32,65	62,61	62,43	0,4718	931,6
(5)	Senoidal	32,57	62,59	62,38	0,4708	928,3
(1)	Kogure	32,86	62,67	62,42	0,4747	938,3

Tab. 4.2 – Resultados da simulação A-2

Nº	Perfil Dist. Pressão	F_t (kN)	V_F (km/h)	V_{50seg} (km/h)	Coef DP	DP Power
(1)	Linear crescente	18,13	24,15	21,74	0,1987	151,4
(2)	Senoidal c/ máx. central	18,12	24,15	21,71	0,1986	151,3
(3)	Uniforme	17,91	23,93	21,45	0,1957	147,7
(4)	Linear decrescente	17,74	23,75	21,21	0,1935	144,9
(5)	Senoidal	17,68	23,69	21,14	0,1927	144,0
(3)	Kogure	17,94	23,97	21,49	0,1963	148,3

Tab. 4.3 – Resultados da simulação A-3

Nº	Perfil Dist. Pressão	F_t (kN)	V_F (km/h)	V_{20seg} (km/h)	Coef DP	DP Power
(1)	Linear crescente	32,77	62,64	62,43	0,4734	935,2
(2)	Senoidal c/ máx. no mio	32,76	62,64	62,43	0,4734	935,2
(3)	Uniforme	32,37	62,54	62,32	0,4681	923,2
(4)	Linear decrescente	32,28	62,52	62,29	0,4670	920,6
(5)	Senoidal	32,97	62,43	62,43	0,4628	911,2
(6)	Kogure	31,00	62,17	61,90	0,4499	882,1

Tab. 4.4 – Resultados da simulação A-4

Nº	Perfil Dist. Pressão	F_t (kN)	V_F (km/h)	V_{20seg} (km/h)	Coef DP	DP Power
(1)	Linear crescente	18,06	24,09	21,65	0,1979	150,4
(2)	Senoidal c/ máx. no mio	18,00	24,00	21,52	0,1967	148,8
(3)	Uniforme	17,22	23,18	20,42	0,1866	136,4
(4)	Linear decrescente	16,58	22,39	19,22	0,1782	125,9
(5)	Senoidal	16,35	22,09	18,58	0,1754	122,2
(4)	Kogure	16,69	22,53	19,50	0,1796	127,7

É escolhida a simulação A-4 para apresentar a resposta do veículo de cada uma das distribuições de pressão, porque nela melhor se observam as diferenças de desempenho (figura 8), enquanto nas demais não se consegue evidenciá-las.

As respostas em velocidade de cada uma das distintas distribuições de pressão mantiveram sempre a mesma relação de ordenamento relativo considerando seu desempenho geral. Pode-se observar que aquela distribuição de pressão, que tem o melhor desempenho no solo argiloso pesado (HC), também tem o melhor desempenho no solo argiloso úmido (CL) segundo as tabelas 4.1 a 4.4.

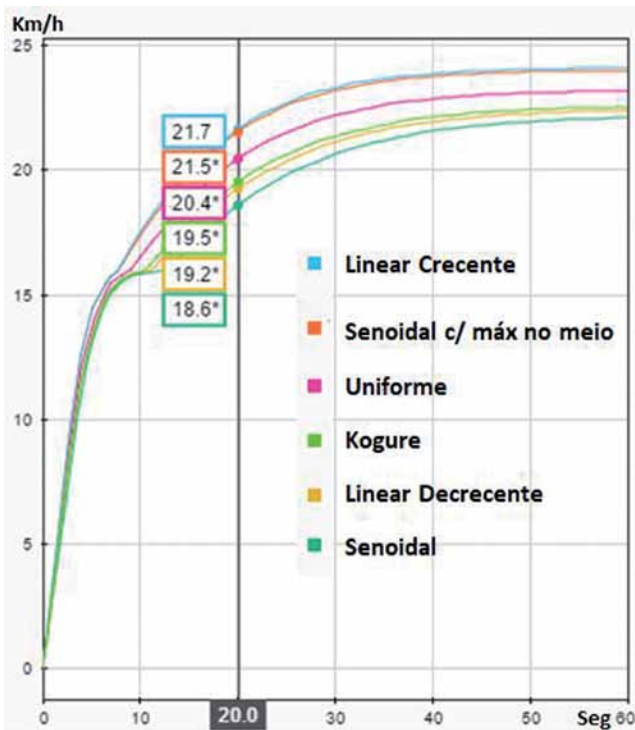


Fig. 8 – Velocidade: desempenho de acordo com cada perfil de distribuição de pressão na simulação A-4.

Observa-se que o perfil de distribuição de pressão linear crescente, é o que apresenta o melhor desempenho em todas as simulações, ainda que variando o deslizamento. Os resultados obtidos para cada perfil de distribuição de pressão podem ser ordenados na seguinte sequência:

- linear crescente;
- senoidal com máximo central;
- uniforme;
- linear decrescente;
- senoidal.

O caso do perfil de distribuição de Kogure apresenta resultados de acordo com as distribuições previstas em [9], mas sofre pequenas variações relativas em cada tipo de solo. Ainda, ao modificar o valor do deslizamento não mantém a mesma relação no ordenamento geral dos desempenhos em velocidade das distribuições apresentadas. Pode-se observar que no caso do solo argiloso pesado (HC), com 80% de deslizamento, tem o melhor desempenho (tabela 4.1),

mas quando o deslizamento é 20%, está em sexto lugar no ordenamento (tabela 4.3). No caso do solo tipo argila úmida (CL), com 80% de deslizamento, ocupa a terceira posição (tabela 4.2) e com deslizamento de 20% cai para quarta posição (tabela 4.4). Portanto, o modelo de Kogure é mais sensível ao deslizamento do que o modelo de Bekker.

3.2 Ensaios B

Nos ensaios B verifica-se a influência do valor do coeficiente de coesão no desempenho do carro de combate considerando a distribuição de pressão uniforme. Neste caso são realizadas quatro simulações considerando os solos selecionados e variando o valor do coeficiente de coesão em cada solo, e quer-se observar a influência do valor do coeficiente de coesão no desempenho do veículo. Na tabela 5 são apresentadas as características de cada simulação.

Tab. 5 – Solo e deslizamento, Ensaios B.

Simulação	Solo	c (kPa)	Φ (°)	i %
B-1	Argila pesada (HC)	20,69	6°	80
B-2	Argila pesada (HC)	0	6°	80
B-3	Argila úmida (CL)	3,45	11°	80
B-4	Argila úmida (CL)	0	11°	80

Nas tabelas 5.1 e 5.2, pode-se observar a velocidade do veículo, a força de tração (F_t) e o valor da resistência de terraplanagem (R_b), após trafegar 20 segundos, assim como os parâmetros de rendimento, o Coeficiente de DP e DP Power.

Tab. 5.1 – Argila Pesada (HC)

Nº	Perfil	F_t (kN)	V_{20seg} (km/h)	R_b (kN)	Coef DP	DP Power
B-1	Unif.	32,67	53,5	0,055	0,4720	932,3
B-2	Unif.	7,42	25,7	0,001	0,1038	110,1

Nas simulações B-1 e B-2 com solo do tipo argila pesada (HC), tem-se que:

- No caso da determinação da Força de tração e considerando que o coeficiente de coesão influencia o valor da força, vê-se que quando o

valor do coeficiente é 20,69 kPa, a força atinge um valor de 32,67 kN. Logo depois, na simulação, é considerado $c = 0$, portanto a F_t diminui, na ordem de 77%, atingindo 7,42 kN.

- b. Na simulação inicial, o valor de Resistência de terraplanagem é 0,055 kN. Isso ocorre pelo fato de ter um afundamento pequeno (0,003m) e ter um valor grande de coeficiente de coesão. Mas para $c = 0$, a R_c muda para um valor de 0,001 kN. É preciso lembrar que os dois parâmetros participam no equacionamento para determinar a R_b (ver **equação 24**).

O afundamento tem uma influência maior no equacionamento, mas por causa de seu grande neste tipo de solo, o valor de R_b (0,055 kN) na simulação B-1 não é significativo.

Na análise da velocidade, quando o valor do coeficiente de coesão é 20,69 kPa, o carro de combate alcança uma velocidade de 53,5 km/h em 20 s. Na simulação para $c = 0$, o veículo alcança uma velocidade de apenas 25,7 km/h em 20 s.

Analisando os parâmetros de rendimento, o Coeficiente DP diminui 78%, de 0,4220 a 0,1038. No caso de DP Power o valor também diminui, na ordem de 88%, de 932,3 a 110,1 (**tabela 4.1**).

A resposta em velocidade da simulação do solo de argila pesada (HC) com valores de coeficiente de coesão $c = 20,69$ e $c = 0$ são apresentados na **figura 9**.

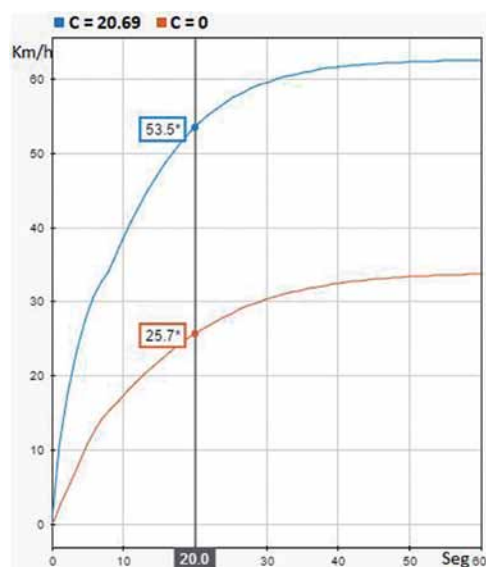


Fig. 9 – Valores de velocidade em solo de argila pesada (HC) para dois diferentes valores de coesão (ensaios B-1 e B-2).

Por outro lado, nos ensaios B-3 e B-4 com solo argiloso úmido (CL), observa-se os seguintes detalhes da **tabela 5.2**:

Tab. 5.2 – Argila úmida (CL)

Nº	Distribuição Pressão	F_t (kN)	V_{20seg} (km/h)	R_b (kN)	Coef DP	DP Power
B-3	Uniforme	17,91	21,4	5,131	0,1957	147
B-4	Uniforme	13,69	30,3	0,002	0,1801	187

No caso da determinação da força de tração e considerando o coeficiente de coesão de 3,45 kPa ela atinge o valor de 17,91 kN. Quando é considerado $c = 0$, a F_t diminui na ordem de 23%, obtendo o valor de 13,69 kN.

Observando a resistência de terraplanagem, o valor inicial é 5,131 kN. Isso ocorre pelo fato de haver afundamento (0,064 m) e um valor de coeficiente de coesão de $c = 3,45$ kPa. Mas logo ao empregar $c = 0$, muda para um valor de 0,002 kN.

Nas análises de valores de velocidade, quando o valor do coeficiente de coesão é 3,45 kPa, o carro de combate alcança uma velocidade de 21,4 km/h em 20 s. Na simulação sobre o mesmo solo, para $c = 0$, o veículo alcança uma velocidade maior, de 30,3 km/h em 20 s. Isso se deve a uma pequena variação na F_t e principalmente pela grande redução do R_b no caso de $c = 0$.

É importante ressaltar que neste caso particular, a variação na F_t não é grande (decrece 23%). Além disso, o valor de R_b sofre uma grande mudança, de 5,131 kN para 0,002 kN. Portanto o rendimento geral é bem melhor, permitindo ao veículo alcançar maior velocidade (**figura 10**).

Analisando os parâmetros de rendimento, o Coeficiente DP diminui 8%, passando de 0,1957 a 0,1801. Mas no caso de DP Power, aumenta cerca de 27%, de 147,7 para 187,8.

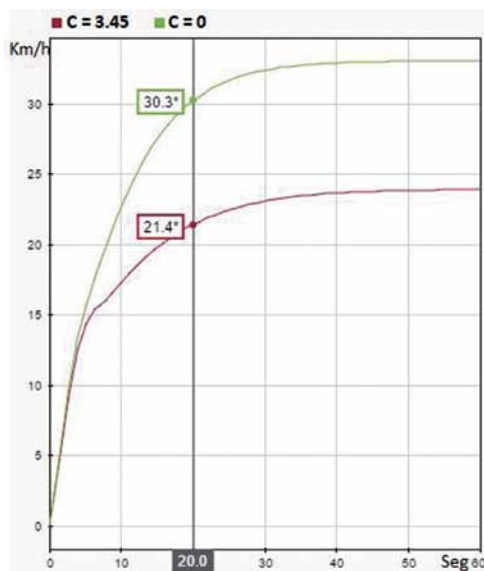


Fig. 10 – Valores de velocidade em solo de argila (CL) para dois diferentes valores de coesão (B-3 e B-4).

4. Discussões

Das simulações realizadas é possível observar que, ao mudar o perfil de distribuição de pressão, a força de tração é influenciada, sendo também influenciada a resposta do veículo (simulações A).

Aquelas distribuições de pressão que têm um valor absoluto menor na parte inicial da lagarta desenvolvem forças de tração mais altas (simulações A).

Comprova-se, ao comparar os dois perfis de distribuições lineares (figuras 3 e 4), que quando a distribuição de pressão tem menor valor absoluto na parte dianteira do veículo, a força de tração, o *Drawbar Pull* e o desempenho do carro de combate são bem melhores (ver tabelas 4.1 a 5.2).

Embora na simulação do deslizamento de $i = 20\%$ e $i = 80\%$, não seja observada grande diferença nos valores absolutos da força de tração, as relações entre um tipo de perfil de distribuição de pressão e outro permanecem as mesmas, exceto para a simulação de Kogure.

Em solos macios que proporcionam maior afundamento, a resistência de terraplanagem (R_t) tem grande influência sobre o rendimento geral do veículo, principalmente se o solo é do tipo coesivo.

5. Conclusões

Considerando que diferentes perfis de distribuição de pressão foram considerados para o mesmo veículo (M113), e os parâmetros dos solos foram os mesmos no momento das simulações para todos os perfis de distribuição de pressão, no ensaio A e no ensaio B, somente foi modificado o valor c , observa-se que os resultados são coincidentes com os de Wong [9]. Além disso, as diferentes distribuições mantêm sempre a mesma relação entre elas em todas as simulações.

O modelo de distribuição de pressão apresentado por Kogure e modelado neste trabalho tem resposta geral similares à apresentadas por Wong [9]. Só que este modelo não mantém a mesma relação com as outras distribuições apresentadas.

Quando o solo é bem macio, o afundamento é maior, e assim a resistência de terraplanagem tem grande influência no rendimento geral do carro de combate, uma vez que tanto o afundamento como o coeficiente de coesão participam na determinação de seu valor. O modelo de simulação é bem representativo da realidade, e permite verificar o desempenho de cada tipo de veículo com o perfil de distribuição de pressão adequado.

Referências Bibliográficas

- [1] Jazar, R. N. Vehicle Dynamics, – Theory and application, Springer, 2008.
- [2] Rill, G. Road Vehicle Dynamic, Fundamentals and Modeling, Taylor and Francis Group, 2011.
- [3] Gillespie, T. Fundamentals of Vehicle Dynamics, SAE Inc, 1992.
- [4] Wong, J. Theory of ground vehicles, 3rd Edition, John Wiley & Sons Inc, Nova Jersey, 2001.
- [5] Bekker, M. G. Theory of Land Locomotion, University of Michigan, Michigan, 1956.
- [6] Bekker, M.G. Introduction to Terrain-Vehicles Systems, University of Michigan, Michigan, 1969.
- [7] Garber, M. Wong,Y. Prediction of ground pressure distribution under tracked vehicles - I. J, Terramechanics, 1981,18:1, p. 01-23
- [8] Janarthanan, B. Chandramouli, P. Sujath, C: Longitudinal dynamics of a tracked vehicles: Simulation and experiment. J Terramechanics, 2012, 49, p. 63-72.
- [9] Wong, J. Terramechanics and off-road vehicles engineering, 2nd Edition, Elsevier Ltd, 2010.
- [10] Laughery, S. Gerhart, G. Goetz, R: Bekker`s Terramechanics Model for Off-road Vehicle Research. US Army TARDEC Warrem, MI 48397-5000.
- [11] Kogure, K. Sugiyama,N A study of soil thrust exerted by a tracked vehicle. J, Terramechanics, 1975, 12:3/4, p. 225-238.
- [12] Dwyer, M. Okello, J. Scarlett, A, A theoretical and experimental investigation of rubber tracks for agriculture. J, Terramechanics, 1993, 30:4, p. 285-298.
- [13] TM 9-2350-261-10. Technical manual. Operator`s manual for carrier, personnel, full tracked, armored, M113A2, Headquarters, Departament of the Army, 2005.
- [14] <https://tanks-encyclopedia.com>