

Avaliação da trafegabilidade de viaturas militares em solos brasileiros

*William Rubbioli Cordeiro, Maria Esther S Marques, Álvaro Vieira
Instituto Militar de Engenharia
Praça General Tibúrcio, 80, 22290-270, Praia Vermelha, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
*rubbioli987@yahoo.com.br

RESUMO: A trafegabilidade de solos é definida, resumidamente, como a capacidade de um veículo passar por um mesmo terreno um determinado número de vezes. Atualmente, no Exército as estimativas de trafegabilidade de solos são embasadas no tirocínio dos motoristas, o qual nem sempre alcança o evento almejado. Este artigo apresenta um método de avaliação da trafegabilidade, procurando avaliar os corredores de mobilidade que possam ser utilizados em manobras militares. Possui como premissas a verificação da resistência do solo, comparando-a com os tipos de veículos que transitarão pelo terreno. Apresenta resultados das pesquisas desenvolvidas em campos experimentais da Academia Militar das Agulhas Negras e do Centro de Avaliação do Exército. Propõe um protocolo para a verificação do índice de cone da viatura, assim como sugere ferramentas para a elaboração de mapas de trafegabilidade. Por fim, evidencia a necessidade da continuidade da pesquisa, aclamando a validação das propostas apresentadas.

PALAVRAS-CHAVE: Trafegabilidade de solos. Método de avaliação

ABSTRACT: Soil trafficability is briefly defined as the ability of a vehicle to traverse the same terrain a certain number of times. Currently, in the Army, estimates of soil trafficability are based on drivers training, which does not always reach the desired event. This work presents a method of evaluation of trafficability, trying to evaluate the mobility corridors that can be used in military maneuvers. It has as premise the verification of the soil resistance, comparing it with the types of vehicles that will traverse the terrain. It presents results of the research carried out in experimental fields of Military Academy and Army Assessment Center. It proposes a protocol for the verification of the cone index of the vehicle, and suggests tools for the elaboration of trafficability maps. Finally, it highlights the need for the continuity of the research, acclaiming the validation of the proposals presented.

KEYWORDS: Soil trafficability. Evaluation method.

1. Introdução

Para a movimentação das tropas no teatro de operações, as forças de combate necessitam de “corredores de mobilidade” (vias de acesso) que lhes assegurem o deslocamento de seus meios até atingirem seus objetivos. Os corredores de mobilidade variam com o tipo da tropa empregada na operação e formam vias de acesso para os diversos elementos de manobra de um determinado escalão (pelotão, batalhão ou brigada militar).

O sucesso de uma operação militar depende, entre diversos aspectos, da análise e da interação entre o terreno e as condições meteorológicas, visando à mobilidade das tropas. O resultado dessas análises é uma variável importante nas batalhas, distinguindo-se, por exemplo, entre uma região “trafegável” de outra

“não trafegável” para os veículos. São informações importantes para os estudos de situação elaborados pelo comandante da tropa e pelo seu Estado-Maior. Em determinados relatos históricos, algumas manobras de guerra tiveram dificuldades de alcançar êxito diante da falta de trafegabilidade das viaturas.

A trafegabilidade de veículos é definida como a capacidade dos solos de suportar a passagem de um veículo, pelo mesmo local, um determinado número de vezes [1].

A avaliação da trafegabilidade possui como premissa o estudo do veículo e a sua interação com o terreno. Nessa técnica, o equipamento para ensaio de campo, penetrômetro de cone, possui um papel importante nas análises. Os resultados desses ensaios são considerados conjuntamente com os testes dos veículos em pistas experimentais [2].

O manual de campanha do Exército Brasileiro (EB) C5-38 [3] apresenta um método de análise de trafegabilidade. Aquele foi elaborado pelo exército dos Estados Unidos da América (EUA) por meio de ensaios de campo no país ao longo de mais de cinco décadas. Ou seja, os modelos de análises têm por base as pesquisas em solos de regiões de clima temperado e características peculiares dos seus campos de testes.

Nos estudos conduzidos por Vieira [1], obteve-se a conclusão de que os parâmetros de cálculo adotados para os solos de regiões temperadas (EUA e Europa) não são adequados para os solos brasileiros. Por outro lado, o método, a utilização dos equipamentos adotados pelo Exército Americano, como o penetrômetro de cone, as definições das variáveis de análise e outras informações são pertinentes de serem utilizados para as pesquisas com solos nacionais. Assim, os conceitos apresentados na literatura constituem significativo subsídio para o desenvolvimento de tecnologia própria do Exército Brasileiro no campo da trafegabilidade de veículos militares. No entanto, alerta a necessidade de adequá-las às nossas características peculiares de solo, vegetação, clima, geologia, equipamentos, métodos e veículos.

Por outro lado, o método apresentado neste artigo é de emprego dual. Pode ser utilizado em situações de defesa nacional, mas também é adequado ao cotidiano civil de determinadas atividades, tais como as práticas de avaliação da compactação do solo agricultável. Outra possível aplicação dual do método é a elaboração de um sistema de gerenciamento de estradas rurais nas localidades de difícil acesso de tráfego automotivo. Esse sistema pode, por exemplo, permitir às prefeituras a elaboração de planejamentos de manutenção de rodovias municipais. Possibilita, assim, a elaboração de mapas de trafegabilidade sazonais (estação chuvosa e seca), facilitando o apoio nas calamidades públicas e na logística humanitária. Outra ciência que se utiliza dos equipamentos e alguns métodos aqui apresentados é a engenharia agrícola.

O estudo sobre a trafegabilidade de solos pode ser descrito por duas linhas de pesquisa distintas, dependendo dos objetivos a serem alcançados: 1) avaliação da trafegabilidade; 2) previsão da trafegabilidade. Uma comparação pragmática entre essas está na

finalidade de cada estudo. Enquanto a avaliação de trafegabilidade visa à demarcação de corredores de mobilidade para o pronto emprego da tropa (tática), a previsão de trafegabilidade almeja inferir o emprego da tropa em situações futuras (estratégica), definindo, por exemplo, tipo de viatura a ser utilizada em determinada área, tipos de pneus a serem empregados nos veículos, período do ano para o melhor emprego das tropas em decorrência das missões e das condicionantes climáticas à época das operações. [2].

O objetivo deste artigo é apresentar os principais aspectos para a avaliação da capacidade de trafegabilidade em situações “fora de estrada”, como também os resultados de avaliação da trafegabilidade das viaturas logísticas obtidos em ensaios de campo. Os testes foram realizados em áreas militares da Academia Militar das Agulhas Negras (Aman), Resende/RJ, e do Centro de Avaliação do Exército (CAEx), Rio de Janeiro/RJ.

2. Desenvolvimento

A possibilidade de um veículo se locomover em terrenos com baixa capacidade de suporte é influenciada por vários parâmetros. Cita-se o tipo de veículo, as habilidades do motorista, as características do relevo e solo, os obstáculos naturais e artificiais, o cenário climático e as circunstâncias da missão militar [1]. Ainda, as condições de contorno que aprofundam as modelagens da trafegabilidade são a resistência ao rolamento do veículo e a capacidade de suporte do terreno para resistir aos esforços do tráfego [4]. Esses esforços são consequências da aplicação de cargas verticais e horizontais no solo e das respostas desse às solicitações.

Corriqueiramente no EB, as avaliações de trafegabilidade de solos são embasadas no tirocínio individual dos motoristas militares. Não é empregado qualquer método científico nessas estimativas. As Fig. 1a e 1b contextualizam o fenômeno “atolar” e exemplificam que o tirocínio individual nem sempre alcança o objetivo de ultrapassar uma região de baixa capacidade de tráfego sem uma prévia análise do terreno.



Viatura Guarani (1a)

Viatura Astros (1b)

Fig. 1 – Viaturas impossibilitadas de trafegar. **Fonte:** [2]

A caracterização de um determinado terreno em termos de trafegabilidade exige a consideração de muitos parâmetros inter-relacionados, alguns deles de difícil determinação. Assim, muitos desses fatores precisam ser estimados ao invés de medidos [1]. Cientificamente, o processo de análise da trafegabilidade requer a congregação de tecnologias de diversos campos do conhecimento, como terramecânica, agronomia, engenharia agrícola, meteorologia, geotecnia, geomorfologia, cartografia e outras (tema multidisciplinar).

As propriedades físicas do solo podem ser alteradas após o tráfego de veículos, principalmente por veículos militares pesados. Segundo Schlosser [5], a técnica de avaliação de trafegabilidade pode orientar a ordem de marcha de uma coluna de veículos. Assim, diferentes tipos de veículos, com os respectivos índices de cone da viatura (ICV), podem ser organizados racionalmente para ultrapassar uma determinada região, considerando a interação terreno *versus* veículo, a respectiva mobilização do solo e sua possível perda de resistência pelo efeito do tráfego. Barbosa *et al.* [6] ratificam essa observação ao analisarem a diferença do efeito da intensidade de tráfego em linha reta e pivotada, mostrando que o cisalhamento provocado pelo tráfego dos veículos no solo também é decorrente da forma do deslocamento, seja esse em linha reta ou em curva.

Genericamente, a capacidade de tração dos solos depende de sua resistência ao cisalhamento [7]. Limitando-se à trafegabilidade, a resistência ao cisalhamento de solos é decorrente da combinação das

tensões normais e tangenciais ocasionadas pelo tráfego dos veículos, as quais produzem deformações plásticas na estrutura da superfície de apoio dos veículos [2].

Na avaliação da trafegabilidade, a resistência ao cisalhamento dos solos é avaliada *in situ*. Sabe-se que essa avaliação é realizada pela interpretação empírica dos ensaios, e os resultados são compilados em um índice denominado índice de cone (IC). Solos com valores maiores de IC apresentam maiores resistências ao cisalhamento, e vice-versa. O IC do solo é obtido pelo uso do equipamento penetrômetro de cone, o qual representa a resistência de um solo à penetração de um cone de 30°, com 0,5 pol² de área de base [3]. Esse índice reflete a resistência ao cisalhamento do solo durante a penetração do cone atrelado a um medidor de tensão [8].

O penetrômetro de cone possui emprego na área militar (por ser um equipamento portátil e robusto). Sua utilização também se estende às áreas da agronomia e da engenharia agrícola. Os penetrômetros de cone utilizados atendem às normas ASAE S313.3 [9] e ASAE EP542. [10]. As Fig. 2a e 2b exemplificam tipos de penetrômetros de cone.



Penetrômetro Analógico (2a)

Penetrômetro Eletrônico (2b)

Fig. 2 – Exemplos de penetrômetros de cone. **Fonte:** [2]

3. Apresentação de um método brasileiro de avaliação da trafegabilidade de solos

Em um reconhecimento especializado de engenharia, após avaliado o índice e cone do solo (IC), esse é comparado com o índice de cone da viatura (ICV), e assim é definida a trafegabilidade daquele terreno para aquele tipo de veículo. Se a IC for maior

que as tensões de cisalhamento aplicadas pelo veículo na superfície do terreno (interpretadas por $IC > ICV$), a viatura terá condições de trafegabilidade naquele local. Ou seja, se o solo oferecer uma resistência maior do que a viatura exige para trafegar, então o terreno é dito “trafegável”; caso contrário, “não trafegável” para a viatura em questão [2].

Observa-se que o parâmetro é dependente das condições de resistência do solo na oportunidade da avaliação. Então, essa observação possui um “prazo de validade curto”, visto que a interferência das condições meteorológicas, como as precipitações de chuvas, pode afetar a resistência do solo.

O estudo de trafegabilidade está voltado para a “capa superficial do terreno”, em torno de 60 cm de profundidade. Essa camada é naturalmente heterogênea. Suas propriedades podem variar muito de um ponto para outro, mesmo dentro de uma única área topográfica.

Por exemplo, seu comportamento *in-situ* referente ao fluxo de água (permeabilidade natural) é muitas vezes controlado por macroporos, fraturas, nível do lençol freático, camadas de resistências diferentes, existência de organismos vivos e outros aspectos. E essas características locais podem se alterar de um ponto para outro no terreno [2]. Vennik *et al.* [11] realizaram medições e simulações de profundidade de sulco (camada crítica) devido a passagens únicas e múltiplas de um veículo militar em diferentes tipos de solo.

As avaliações da trafegabilidade de solos têm por finalidade reunir as informações do terreno, comparando-as com as características das viaturas, e consolidar essas informações em mapas temáticos de trafegabilidade.

A título de implementação do método, sugere-se que essas avaliações sejam realizadas em tempo de paz, podendo ser validadas por meio de pesquisas empíricas. Por vezes, padrões de desempenho de uma região podem ser transferidos para outra, considerando características similares específicas e limitações de cada modelo.

A utilização de penetrômetro eletrônico pode trazer algumas vantagens em relação ao analógico. Por exemplo, conjugando os resultados de IC com as coordenadas geográficas dos pontos de uma campanha de reconhecimento do terreno, é possível montar mapas de trafegabilidade com as características da área em estudo.

O penetrômetro eletrônico exemplificado na Fig. 2b (penetroLOG) é fabricado pela empresa Falker. Possui um sistema de controle de velocidade de ensaio por meio de um sensor de emissão/recepção de ultrassom, o qual é refletido por uma base de metal. Quando a velocidade de ensaio ultrapassa o valor previsto em norma, o sistema alerta o operador. Também, esse equipamento avalia o IC ao longo do perfil de solo durante o ensaio, com a precisão de até 1 cm de profundidade, armazenando até 2.000 leituras (pontos). Estes dados podem ser transmitidos para um computador portátil por meio de *software* específico de análise de dados, denominado “Compactação do Solo”. A Fig. 3 exemplifica o resultado gráfico de um ensaio de penetração em uma areia de praia, exposto no *software* mencionado. As coordenadas geográficas desse ponto foram obtidas por meio de um aparelho de GPS (Sistema de Posicionamento Global) acoplado ao equipamento no momento da coleta das informações.

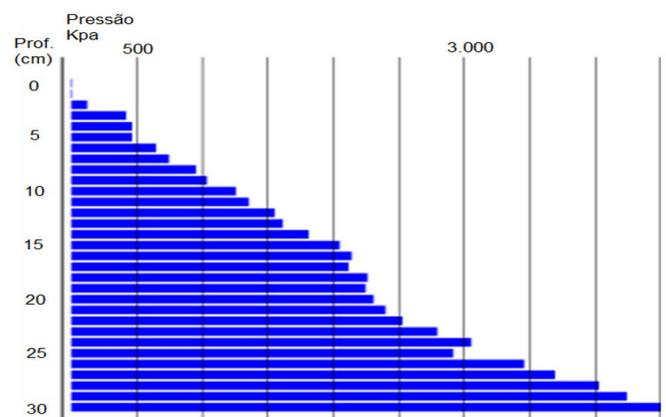


Fig. 3 – Resultado gráfico de um ensaio de IC (kPa), na Praia do Forte São João – Urca (Rio de Janeiro/RJ). **Fonte:** [2]

Durante o desenvolvimento da pesquisa, foi verificado que a Falker é uma empresa brasileira que produz o penetrômetro eletrônico e os respectivos *software* e implementos em escala comercial. A empresa também disponibiliza um sistema de elaboração de mapas de solo, o qual conjuga as coordenadas geográficas e os respectivos resultados dos ensaios de IC obtidos ao longo dos perfis de ensaio. Esse sistema é denominado de FalkerMap.

O esquema da Fig. 4 apresenta um exemplo de um mapa de solos de uma área separada em glebas, numeradas de 39 a 50, com os respectivos IC nas profundidades 15 cm, 30 cm e 45 cm. Esse mapa de solo foi elaborado por meio da compilação de resultados de ensaios realizados com o penetrômetro de cone eletrônico, os quais foram “importados” e organizados no FalkerMap por meio de um sistema de informações geográficas.

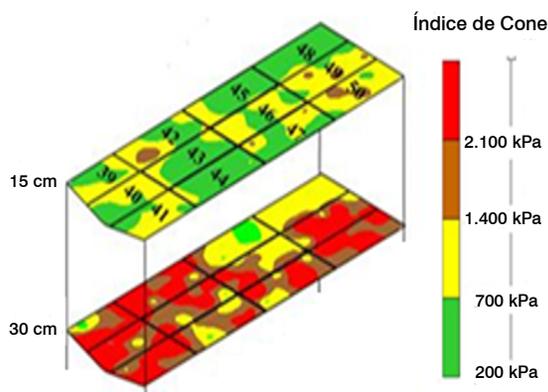


Fig. 4 – Esquema de mapas do solo separados em camadas com os respectivos valores médios de IC. **Fonte:** [2]

Interpretando o esquema, verifica-se que na gleba 44 (Fig. 4) os resultados de IC da camada de 15 cm de profundidade estão situados entre 200 e 700 kPa (legenda na cor verde); na gleba 50, nessa mesma profundidade, os resultados estão situados entre 700 e 1.400 kPa (legenda na cor amarela). No contexto da trafegabilidade de solos, um veículo com ICV de 800 kPa e profundidade da camada crítica de 15 cm não trafegaria na gleba 44 ($IC < 700$). Mas, ao optar por trafegar em outra gleba, trafegaria na maior parte da gleba 50 (Fig. 5), pois nela o IC é superior ao ICV ($IC > ICV$).

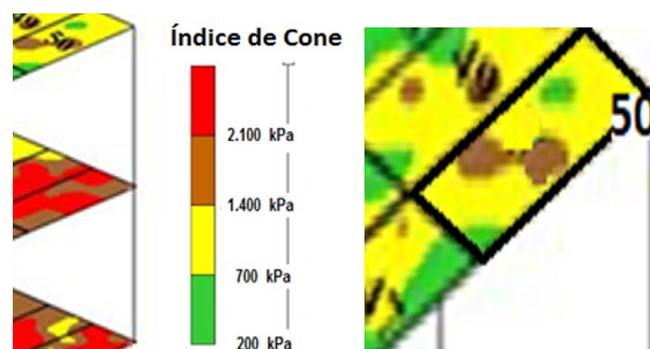


Fig. 5 – Detalhes do esquema de mapas do solo separados em camadas com os respectivos valores de IC. **Fonte:** [2]

Diante das peculiaridades do tema trafegabilidade, o penetrômetro eletrônico apresenta algumas vantagens em relação ao penetrômetro analógico.

- O meio acadêmico tem utilizado esse equipamento para análises na área agrônômica; assim, as pesquisas desenvolvidas podem complementar os estudos do terreno de um teatro de operações.
- O equipamento pode ser operado por um único indivíduo, enquanto o manual C5-38 [3] especifica duas pessoas para a utilização do penetrômetro analógico. Cita-se outras características do penetrômetro eletrônico:
 - permite a coleta do IC de forma automatizada ao longo do perfil em análise, possui um mecanismo de controle de velocidade durante o ensaio, possui uma discretização de resultados a cada 1 cm e atinge profundidades suficientes para as análises da trafegabilidade;
 - durante a operação, o armazenamento dos ensaios é automático, sendo inclusive facilitado pelo *software* “Compactação do Solo”;
 - os dados do penetrômetro eletrônico podem ser tratados em um mapa;
 - é fabricado e comercializado por uma empresa brasileira, indo ao encontro das orientações governamentais de fomento da “indústria nacional de defesa”; e
 - é um equipamento de simples emprego e adequado a ser transportado individualmente.

3.1 Descrição do terreno e respectivo IC

A observação sistêmica do comportamento da resistência do solo permite entender que determinados tipos de terreno são mais suscetíveis à perda da capacidade de suporte perante às alterações sazonais meteorológicas. Normalmente, esses estão localizados em áreas planas ou suavemente onduladas. O Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) [8] define os seguintes tipos de topografia de terreno, qualificados pelo critério de declividade (Tabela 1):

Tabela 1 – Classes de declividade do terreno.

Classes de declividade	Declive (%)
Plano	0% a 3%
Suave ondulado	3% a 8%
Ondulado	8% a 20%
Forte ondulado	20% a 45%
Montanhoso	45% a 75%

Fonte: IBGE [12]

Dessa forma, a simples discriminação do terreno em um mapa de declividades já proporciona uma qualificação de locais a serem ponderados quanto à trafegabilidade. Afinal, explicado até mesmo pela morfologia do terreno, os solos de declividade plana (0% a 3%) podem ser formados por sedimentação natural de processos erosivos (solos transportados). Sendo assim, são considerados, em sua maioria, solos jovens, os quais despertam a necessidade de maiores estudos sobre a sua resistência. É relevante destacar que essa é uma primeira análise, tendo em vista a necessidade da conjugação de outras variáveis para melhor esclarecer a possibilidade de um veículo trafegar em um terreno.

A Fig. 6 apresenta um esboço que relaciona a topografia do terreno com a sua respectiva resistência (IC), concluindo-se pela dificuldade de trafegabilidade. Por exemplo, em um contexto geral, no extremo do gráfico pode-se exemplificar um solo de alta resistência e de topografia plana, o qual provavelmente apresentará uma grande facilidade de trafegabilidade para vários tipos de veículos. Por outro lado, um terreno ondulado e de baixa resistência apresentará elevada dificuldade de trafegabilidade, como é o caso das regiões de dunas litorâneas ou mesmo de dunas em zonas desérticas.

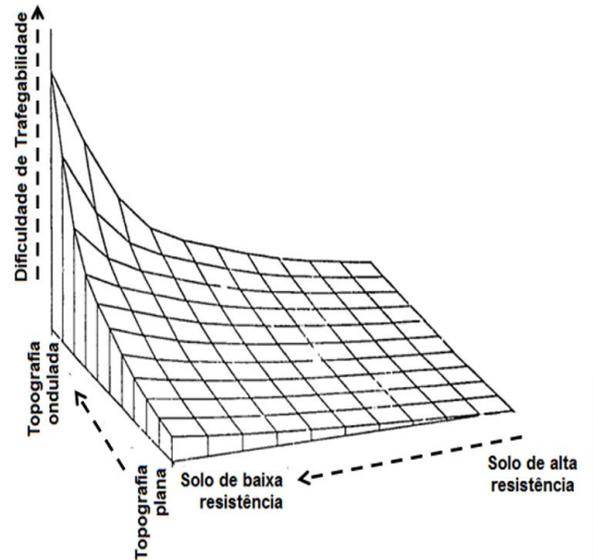


Fig. 6 – Esboço de correlação entre as características de resistência do solo e topografia com a dificuldade de trafegabilidade. Fonte: [2]

O emprego sistêmico de imagens aéreas auxilia em muito a demarcação de regiões para uma averiguação inicial. Para tal, é facultada a utilização das mais diversas fontes de informações, mas destaca-se nessa pesquisa a utilização sistêmica de veículos aéreos não tripulados (VANT) na obtenção de imagens atualizadas das áreas em estudo.

3.2. Estudos do índice de cone da viatura (ICV)

O ICV é o índice atribuído a uma dada viatura que indica a resistência mínima do solo, em termos de IC, necessária para as passadas da viatura em uma pista teste. É um parâmetro peculiar de cada viatura que resume empiricamente os esforços que aquela exerce nas camadas superficiais do terreno com a finalidade de trafegar. Esse índice decorre das características técnicas do veículo, como a pressão exercida no solo, tipo de tração, carga por roda, potência do motor, tipo de rodado (pneu ou esteira), entre outros parâmetros, todos interagindo com as características do terreno [2].

Valores baixos de ICV são atribuídos ao melhor desempenho do veículo em termos de capacidade de trafegabilidade “fora de estrada”. Uma viatura de ICV igual a 480 kpa indicará que essa possui atributos compatíveis com terrenos de IC superiores a 600 kpa, por exemplo ($ICV < IC$).

As viaturas sob lagartas estão, normalmente, mais aptas a trafegar em terrenos de baixa capacidade de suporte (IC baixos) comparadas a alguns caminhões logísticos ou mesmo algumas viaturas administrativas. As Fig. 7a e 7b apresentam dois tipos de viaturas militares que possuem desempenhos distintos em relação à trafegabilidade, sejam essas sob lagartas (7A) ou sob rodas (7B). Essas viaturas empregam solicitações diferentes no solo, e, portanto, possuem ICVs distintos. Por exemplo, a maioria das viaturas sob lagartas apresentam ICVs menores que a maioria das viaturas pesadas sob rodas. Nesse contexto, o ICV é um parâmetro atribuído a uma dada viatura, o qual indica os esforços de cisalhamento que o veículo aplica no solo para que possa se locomover. Quanto menor o ICV, melhor é o desempenho do veículo quanto à trafegabilidade.



Fig. 7 – Viaturas de desempenho diferentes. Fonte: [2].

O parâmetro do índice de cone da viatura pode ser modelado por meio de expressões matemáticas, mas esses modelos demandam calibrações constantes, diante da quantidade de variáveis que interferem na operacionalidade das viaturas. Assim, esse índice é melhor avaliado por meio de experimentos empíricos em pistas experimentais padronizadas ou pistas naturais controladas. Nelas, é possível medir os teores de umidade e a resistência do solo, registrando a interação do veículo com terreno. Procura-se a comparação da situação da viatura “atolada” com o respectivo IC da pista, formulando-se a questão: qual o menor IC da pista (ou do terreno) em que o veículo consegue ultrapassar? Esse valor remete à definição do ICV.

No contexto da trafegabilidade, a Fig. 8 exemplifica alguns experimentos em execução nos campos de teste Aberdeen Test Center, o qual possui diferentes tipos de pistas e respectivos protocolos de ensaios de viaturas militares [13].



Fig. 8 – Exemplo de teste de trafegabilidade sendo realizado em pistas preparadas artificialmente. Fonte: [13].

3.2.1 Proposta de um protocolo de testes empíricos

No ensaio de definição do ICV são utilizadas pistas experimentais, sejam essas naturais ou artificiais.

3.2.1.1 Pista experimental artificial

Apresenta-se, a seguir, uma proposta de pista experimental artificial, esboçando um protocolo de teste para a definição do ICV das viaturas que são avaliadas no Centro de Avaliação do Exército (CAEx).

Acompanhando as técnicas de avaliação empírica das análises de tratores pela engenharia agrícola, entende-se que as pistas artificiais devem ser construídas com os tipos de solos “extremos” de dificuldade de trafegabilidade.

Portanto, elencam-se, como proposta, dois tipos de pistas padronizadas: uma com o solo tipo areia e outra com o solo fino de baixa resistência. As pistas padronizadas para os testes de trafegabilidade devem possuir as seguintes características:

- plana, com inclinações próximas a 0%;
- preparada, para absorver a água e assim aumentar a umidade, quando for conveniente;

- possuir um sistema para simular a precipitação de chuva;
- possuir as condições de operação de equipamentos que possam revolver a camada de solo superficial, como tratores equipados com implementos de grade de disco, enxada rotativa, e outros;
- possuir, no mínimo, 50 m de comprimento, 8 m de largura e 2 m de profundidade;
- não deverá possuir materiais que possam servir de obstáculos durante os ensaios, como pedras ou outros; e
- deverá possuir uma superfície regular, evitando-se as considerações da irregularidade do terreno que interfiram na trafegabilidade.

Os esquemas das Fig. 9 e Fig. 10 apresentam a geometria da proposta de “pista padronizada”, adaptados de Francisco [14], bem como os aparatos de simulação de chuva para umedecimento do terreno e equipamentos eletrônicos de medição de velocidade de deslocamento e filmagem dos ensaios.

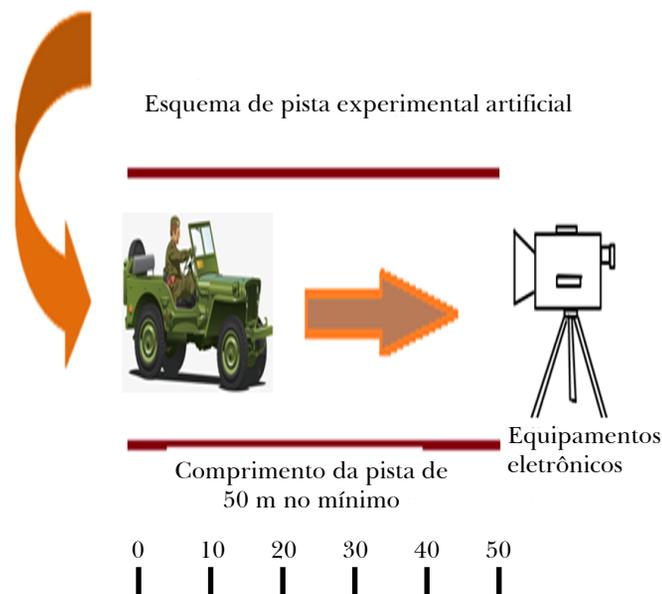


Fig. 9 – Esquema em planta da pista padronizada de teste de trafegabilidade. Fonte: [2].

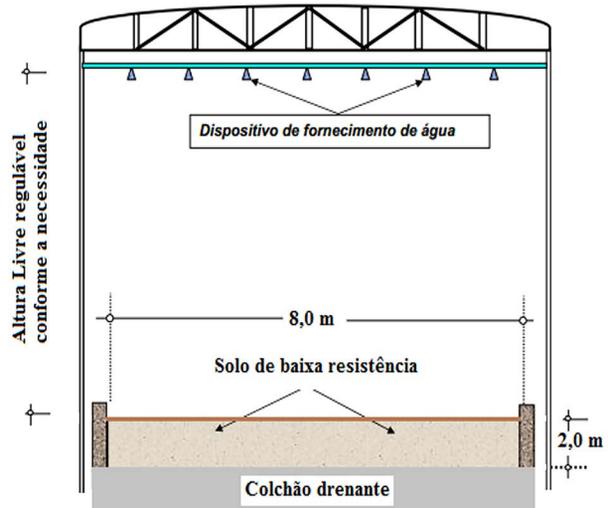


Fig. 10 – Esquema em corte transversal da pista padronizada de teste de trafegabilidade. Fonte: [2].

Os equipamentos eletrônicos de medição (Fig. 8) têm as seguintes finalidades: 1) filmar cada passagem durante os testes, permitindo análises posteriores; e 2) medição da velocidade de deslocamento, e definir o parâmetro do ICV.

3.2.1.2 Pistas experimentais naturais

As pistas naturais de teste deverão ser analisadas antes dos ensaios propriamente dito. Deverão ser obtidos parâmetros como o tipo do solo e sua respectiva classificação pelo Sistema Unificado de Classificação de Solos (Sucs), da camada superficial da pista até a profundidade de 60 cm. Também devem ser considerados parâmetros da situação *in situ* do terreno, como a umidade do solo antes do início dos testes, peso específico aparente natural, porosidade do solo e grau de saturação.

Também pode ajudar na caracterização dessas pistas experimentais naturais a utilização de equipamentos portáteis tipo “Vane Test” [2].

A fim de atingir a situação de “não trafegável” nessas pistas, o terreno poderá ser molhado até a situação de saturação do solo durante a realização dos testes.

3.3 Apresentação do método de ensaio

Os ensaios para a definição do ICV são realizados nas pistas experimentais. Cabem algumas observações a serem contempladas na proposta de protocolo de teste de ICV.

- Os testes devem ser realizados em dias não chuvosos, a fim de evitar interferências externas.
- O desempenho é previsto para cada veículo operando isoladamente.
- O ICV passa a ser definido por meio de uma interpolação gráfica obtida durante os ensaios na pista padrão, visando atender à limitação de velocidade supracitada. Essa forma de definição diminui a subjetividade exposta nas bibliografias relativas ao tema, favorecendo a elaboração de um protocolo de ensaio a ser adotado pelo CAEx.
- As características do veículo durante a execução do ensaio devem ser:
 - ✓ carga máxima permitida, com tanque de combustível cheio;
 - ✓ todos os mecanismos de melhoria de trafegabilidade funcionando, ou seja, tração total, controle de tração, ou outras; e
 - ✓ calibragem dos pneus correspondente ao tipo de solo, conforme as orientações do fabricante.
- As características de execução do ensaio devem ser:
 - ✓ a umidade inicial da pista de solos finos deve ser correspondente a um teor que leva a iniciar os testes na situação desfavorável à trafegabilidade;
 - ✓ deslocamento em primeira marcha das viaturas;
 - ✓ velocidade de deslocamento no início do teste, ou seja, na entrada da pista, em torno de 20 km/h;
 - ✓ deslocamento em linha reta, evitando virar a direção para tentar sair da situação de atoleiro; e
 - ✓ repetição dos procedimentos do ensaio para a validação das interpretações; estima-se que sejam necessárias três repetições para ratificar os resultados obtidos.

O teste na pista inicia-se pela caracterização do IC inicial e a respectiva umidade do solo. Na sequência,

a viatura posiciona-se para o teste no início da pista, a uma velocidade de entrada na área de ensaio em torno de 20 km/h. Inicia-se, então, a primeira passada da viatura. Durante isso, a velocidade é aferida por meio de equipamentos eletrônicos. Na sequência, completada a primeira passada, é aferida a profundidade da camada crítica. A pista é, então, revolvida (e molhada, se for o caso), piorando as condições de trafegabilidade. Entende-se que a cada “piora” das condições de trafegabilidade, a velocidade de deslocamento diminui.

A definição da condição “atolar” nesta pesquisa foi ajustada à variável temporal. De forma geral, é caracterizada a situação como “não passa”, durante os testes em pistas, se a viatura ficar atolada (imobilizada) por dez segundos, tentando sair do local.

O ensaio é repetido n vezes, aferindo-se a nova “velocidade de deslocamento” e o IC correspondente à cada passada da viatura. Quando a viatura atola (impedida por dez segundos), os testes são interrompidos e são medidos o IC do solo e a profundidade da camada crítica. O IC deverá ser medido no entorno das rodas do veículo, identificando-se o menor dos valores desse índice naquele momento. Coletam-se amostras de solos para a identificação da umidade. Os resultados de cada passada são processados e, então, condensados em um gráfico de: IC *versus* Velocidade de Deslocamento. A partir de então, é inferido o ICV.

Entende-se que quanto pior for a condição de trafegabilidade do solo, o veículo encontra maior resistência ao deslocamento, e, por tal motivo, diminui a sua velocidade. A fim de esclarecer lacunas das bibliografias sobre o tema, o critério para a definição do ICV foi correlacionado às práticas militares. De tal modo, tendo por base que a velocidade de marcha a pé da tropa é de 4 km/h (dados de manual militar), definiu-se que o limite mínimo de velocidade de deslocamento nas pistas testes de identificação de ICV deverá ser:

- Viaturas Logísticas $\geq 5,0$ km/h;
- Viaturas Operacionais $\geq 10,0$ km/h

Ou seja, o ICV passa a ser definido, a favor da segurança, por meio de um critério técnico de velocidade de deslocamento, e não mais de forma subjetiva. Tal critério de ICV é, então, entendido como o mínimo de velocidade aceitável nos deslocamentos táticos.

Ratificando, o ICV é uma característica técnica de uma dada viatura, que se relaciona à resistência mínima do solo necessária para as passadas de tal viatura em uma pista teste, atendendo ao critério de velocidade mínima de deslocamento. Esse índice procura resumir todas as qualidades de trafegabilidade que esse veículo possui, admitindo-se que esteja se deslocando em velocidade baixa, constante, no plano e sem tracionar reboque.

4. Resultados de avaliação da trafegabilidade obtidos em ensaios de campo

Os locais em que foram realizados os ensaios *in situ* são o campo de instrução da Aman e as áreas de teste de avaliação do CAEx. Os motivos que levaram à escolha dessas áreas são os tipos de terrenos mais comuns naquelas glebas, sendo os solos com textura fina na área da Aman e os solos arenosos típicos de região litorânea na área do CAEx.

Karafiath [15] mencionou que até 1977 não existia nenhum sistema de classificação de solos adotado por técnicos que estudam terramecânica. Tal argumentação foi ratificada ao longo dos estudos de trafegabilidade realizados por Cordeiro [2], o qual apresenta que não existem classificações de solos específicas para as análises da interação “terreno *versus* veículo”. Cabe ressaltar que os ensaios foram realizados com o apoio logístico e técnico de engenheiros agrônomos da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa) e militares do Curso de Engenharia da Academia, nos ensaios realizados na Aman, como também dos militares do CAEx nos ensaios realizados no centro de avaliação [2].

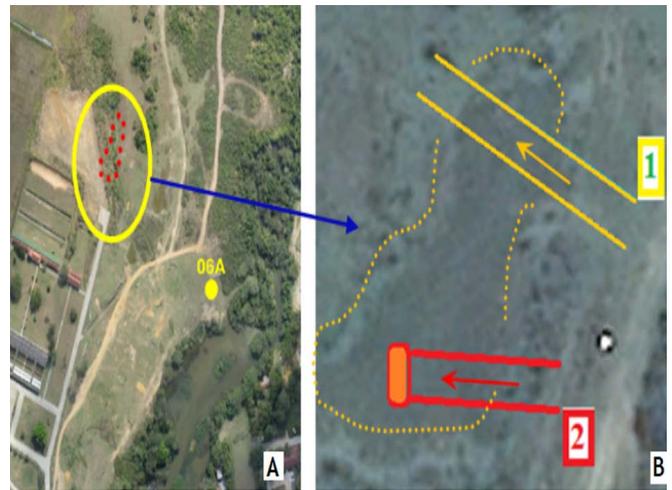
Diante de uma dificuldade logística de construção de uma pista teste padronizada, a pesquisa deu continuidade tendo por orientação as pistas em terreno natural dos campos de teste mencionados.

Para tal, serviram de motivação as pesquisas realizadas com tratores na Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Santa Maria/RS e da Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa/MG, as quais se valem de terrenos naturais para as atividades de ensaios.

4.1. Testes *in situ* realizados na Aman

A Fig. 11 apresenta alguns ensaios realizados no campo de instrução da Aman (Resende/RJ), em pista de terreno natural.

A área de teste na Aman trata-se de uma região plana, com solo hidromórfico (muito mal drenado). A Fig. 12b traz em detalhe os locais de teste 1 e 2. O local 2 apresentou dificuldades de trafegabilidade para todas as viaturas ensaiadas, mas no local 1 todas as viaturas obtiveram êxito no deslocamento.



Área de solo de baixa resistência e solo fino

Fig. 11 – Local dos ensaios realizados na Aman. **Fonte:** [2]

A falta de trafegabilidade apresentada no local 2 da Fig. 11b foi constatada por meio do penetrômetro eletrônico. As Fig. 12a e Fig. 12b apresentam a realização dos ensaios de avaliação da trafegabilidade dos solos. Na oportunidade, foi constatado que a capacidade de suporte do local 2 estava incompatível com os esforços de cisalhamento aplicados pelos veículos na superfície do terreno. Assim, o solo não apresentou trafegabilidade, ou seja, $IC < ICV$.

Os ensaios, conforme foram realizados no campo de instrução da Aman, serviram para validar a percepção da diferença entre veículos e a heterogeneidade do solo. Um fato a ser destacado é que esses locais se distanciam em menos de 30 m, mas oferecem características diferentes o bastante para apresentarem capacidades de trafegabilidade distintas.

Ainda, apresentado na Fig. 12, diante da necessidade da utilização da placa repetidora do penetroLOG, foi adaptada uma “boia” para amparar a referida placa durante os testes com presença de lâmina d’água. Tal adaptação remete à investigação de leitos de cursos d’água, identificando-se o IC de vaus possíveis de serem utilizados nas travessias em manobras militares.



Teste de IC com penetrômetro de cone eletrônico

Fig. 12 – Ensaios na Aman. **Fonte:** [2]

Nesse sentido, a fim de avaliar a proposta de método para a definição do ICV, foram conduzidos ensaios *in situ* no CAEx e na Aman com viaturas administrativas do Exército. A Fig. 13 representa alguns ensaios realizados no campo de prova do Aman (Resende/RJ), local 2.



Viatura Marruá-teste em local de solo com textura fina.

Fig. 13 – Ensaios realizados na Aman. **Fonte:** [2]

4.2. Testes *in situ* realizados No CAEx

A Fig. 14 apresenta alguns ensaios realizados no campo de prova do CAEx (Rio de Janeiro/RJ), em pista de terreno natural, com solos arenosos em região de praia ou em terreno de mangue.



Fig. 15 – Viatura Marruá em teste de trafegabilidade em solo arenoso típico de região litorânea (A) e Viatura Hilux em solo típico de mangue (B). **Fonte:** [2]

Nos testes realizados foram adotados os métodos empíricos resumidos na seção 3.2 deste estudo, a fim de aferir o ICV que pudesse caracterizar a capacidade das viaturas em relação à trafegabilidade.

4.3. Resultados alcançados nos dois locais de testes

Nos testes realizados foram adotados os métodos empíricos resumidos no tópico 3.2 deste artigo, a fim de aferir o ICV que permitisse a trafegabilidade das viaturas no terreno. A Tabela 2 apresenta as características básicas das viaturas que participaram desses ensaios.

Tabela 2 – Descrição das viaturas.

Viatura operacional Marruá 4x2, marca Agrale
peso máximo na roda: 745 kgf (sem a carga)
Viatura transporte Hilux, marca Toyota
peso máximo na roda: 967 kgf (sem a carga)
Viatura transporte logístico marca Volk
peso máximo no conjunto de roda dupla: 2185 kgf (sem a carga)
Viatura caçamba de 10m³, marca Mercedes-Benz
peso máximo no conjunto de roda dupla: 1620 kgf (sem a carga)

Fonte: [2]

A Tabela 3 resume os valores obtidos nos ensaios de identificação de ICV, por meio da interpretação de valores obtidos nas pistas, como também em testes de campo em outras oportunidades ou dados técnicos de bibliografias. Essa tabela apresenta os resultados em kPa e Psi, a fim de possibilitar futuras avaliações com bibliografias do Exército Americano, visto que nos manuais daquele exército as unidades adotadas para os cálculos do ICV resultam em valores em Psi.

Tabela 3 – Valores de ICV das viaturas ensaiadas.

Tipo de Viatura	ICV (kPa)	ICV (Psi)
Marruá	470	69
Hilux	540	79
Volk	800	116
Caçamba	930	135

Fonte: [2]

A viatura logística marca Volk apresentou maiores facilidades de trafegabilidade comparada à caçamba (local de teste 2 – Aman). Tal fato pode ser explicado pelo peso na roda da primeira ser maior que o peso na roda da segunda, quando as duas viaturas encontram-se sem carga.

As viaturas logísticas (administrativas) ensaiadas apresentaram desempenhos similares.

5. Conclusão

Este artigo apresentou os principais aspectos para a avaliação da trafegabilidade.

Destaca-se que é necessário desenvolver um modo peculiar e regional para que os especialistas do terreno possam interpretar as informações disponíveis de uma dada região. Essa conveniência remete-nos aos conceitos de hierarquização da técnica de avaliação ou previsão de trafegabilidade. Ou seja, as análises iniciais podem fornecer um parecer provisório do terreno.

Mas esse parecer pode ser construído, reformado, mantido e ampliado ao longo do

tempo das atividades de validação das modelagens. Nesse sentido, a utilização do método alicerçado no penetrômetro de cone apresenta-se como o principal processo de estudo do terreno para inferir a resistência do solo. Tal equipamento possui a vantagem da robustez necessária às atividades táticas de combate e oferece resultados que expressam a variabilidade do terreno.

Mais especificamente, o penetrômetro de cone eletrônico traz vantagens significativas à avaliação da trafegabilidade em comparação ao analógico. A proposta de identificação do índice de cone do veículo embasada na velocidade mínima de deslocamento define um método menos subjetivo, comparando-se ao descrito nas bibliografias.

Os resultados colhidos de ICV nos campos experimentais da Aman e do CAEx dão credibilidade ao método proposto e, principalmente, estabelecem parâmetros importantes para o planejamento tático de operações militares que envolvem a trafegabilidade das viaturas analisadas neste estudo.

Acredita-se que as inovações desta pesquisa tenham a capacidade de convidar os especialistas do terreno da Arma de Engenharia a maiores aprofundamentos na matéria mobilidade de tropas militares.

Afinal, a quantidade de variáveis para a análise do terreno vai além das considerações técnicas, estendendo-se à individualidade humana da condução do veículo. Por outro lado, as técnicas de avaliação de trafegabilidade são ferramentas poderosas para o planejamento de operações militares.

Por fim, a avaliação da trafegabilidade em corredores de mobilidade na faixa de fronteira brasileira é um exemplo da aplicação desse método. A condução de estudos estratégicos para as definições de corredores de trafegabilidade a serem aplicados nessa região do Brasil contribui para a garantia da soberania nacional.

Referências

- [1] VIEIRA, Á. Trafegabilidade dos Solos: Modelagem e Aplicações. Relatório de pesquisa. Vicksburg: U. S. Army Engineers Waterways Experiment Station, 1994.
- [2] CORDEIRO, W. R. Método de avaliação e de previsão da trafegabilidade de viaturas militares em solos brasileiros. Tese (Doutorado em Engenharia de Defesa) – Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2018.
- [3] BRASIL. Ministério da Defesa. Exército Brasileiro. Estado-Maior. Portaria nº 149-EME, de 19 de dezembro de 2001. Aprova o Manual de Campanha C 5-38 – Estradas, 1ª edição, 2001. Boletim do Exército, Brasília, DF, n. 52, 2001.
- [4] LINARES, P. Análisis de la movilidad de vehículos militares en caminos de características desconocidas. Madrid: Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos de Madrid, 1995.
- [5] SCHLOSSER, J. F. Comunicação pessoal. Professor da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), 2009-2013.
- [6] BARBOSA, B. W.; PEDRON, F. A.; MÜLLER, C. R.; RODRIGUES, M. F.; GUBIANI, P. I.; SCHENATO, R. B.; DALMOLIN, R. S. D. Physical properties of a Brazilian sandy loam soil after the traffic of a military vehicle M113BR. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 44, p. 1–25.
- [7] BARGER, E. L.; LILJEDAHL, J. B.; CARLETON, W. M.; MCKIBBEN, E. G. Tratores e seus motores. São Paulo: Edgard Blucher, 1963.
- [8] BEKKER, M. G. Introduction to terrain-vehicle systems. Ann Arbor: University of Michigan Press, 1969.
- [9] ASAE – AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERS. Soil Cone Penetrometer. In: Agricultural Engineers Yearbook. St. Joseph: ASAE, 1999.
- [10] ASAE – AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERS. Procedures for using and reporting data obtained with the Soil Cone Penetrometer. In: Agricultural Engineers Yearbook. St. Joseph: ASAE, 1999.
- [11] VENNIK, K.; KUKK, P.; KREBSTEIN, K.; REINTAM, E.; KELLER, T. Measurements and simulations of rut depth due to single and multiple passes of a military vehicle on different soil types. Soil & Tillage Research, v. 189, p. 120-127.
- [12] IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Manuais Técnicos em Geociência, número 4. Manual Técnico de Pedologia. 2. ed. Rio de Janeiro: IBGE, 2007.
- [13] US ARMY. Vehicle test facilities at aberdeen test center and yuma test center. Test Operations Procedure 01-1-011A. 2012.
- [14] FRANCISCO, G. M. Proposta de validação de um modelo para a avaliação da trafegabilidade dos solos inserida no estudo de situação de inteligência. Dissertação (Mestrado em Ciências Militares) – Escola de Comando e Estado-Maior do Exército, Rio de Janeiro, 2004.
- [15] KARAFIATH, L. L. Soil mechanics for off-road vehicle engineering. Switzerland: Trans Tech, 1978.