

Seleção de Equipamentos sobre Pneus com Método MCT

Selección de Equipos sobre Neumáticos por el Método MCT
Tired Equipment Selection with MCT Method

Alexandre de Sant'Anna, M.Sc.

Doutorando, Depto. de Engenharia de Minas, EPUSP

Wildor Theodoro Hennies, PhD

Prof. Titular, Depto. de Engenharia de Minas, EPUSP

Lindolfo Soares, PhD

Prof. Doutor, Depto. de Engenharia de Minas, EPUSP

Resumo. Os solos lateríticos e saprolíticos, peculiares de regiões tropicais, quando utilizados como pista de rolamento para equipamentos autopropelidos de carga e transporte, em áreas de mineração ou colheita de produtos agrícolas, apresentam uma diversidade de comportamento bastante significativa. Uma seleção de veículos sobre pneus pode ser fundamentada no Método Expedito da Metodologia MCT, usado para projetos de construção de rodovias. Este método simplificado permite inferir algumas características tecnológicas de comportamento dos solos lateríticos e saprolíticos e, a partir destes resultados, estabelecer em caráter preliminar uma avaliação de desempenho do vínculo pneu/solo.

Resumen. Los suelos lateríticos y saprolíticos, propios de las regiones tropicales, al ser utilizados como material constituyente de caminos para vehículos autopropulsados, de carga y transporte en minas a cielo abierto o en áreas de cosecha agrícola presentan un comportamiento variado muy significativo. La selección de vehículos sobre neumáticos puede fundamentarse en el Método Expedito de la Metodología MCT, usado en proyectos de construcción de carreteras. Este método simplificado permite inferir algunas características tecnológicas del comportamiento de los suelos lateríticos y saprolíticos y, sobre la base de estos resultados, establecer con carácter preliminar, una evaluación del desenpeño de la relación neumático/suelo.

Abstract. Lateritic and saprolitic soils, typical of tropical regions of the world, are often used as pavement for autopropelled equipments of load and haul, in the mining industry or for agricultural purposes, exhibiting significative diversity of performance. The equipment selection can use a simple empirical analysis method called as MCT Methodology, which is employed for road construction design. This simplified method allows the determination of the technological behaviour characteristics of latheritic or saprolitic soils and from the results it is possible to establish a preliminary evaluation of the pneumatic/soil performance prevision.

1. Introdução

A correta avaliação do comportamento do vínculo entre o pavimento e os pneus nas mais diferentes situações é essencial para a previsão do desempenho de equipamentos autopropelidos de carga e transporte. Esta avaliação é bastante signifi-

cativa no dimensionamento e definição da tipologia de uma frota, ou mesmo, após este dimensionamento, avaliar o comportamento e o desempenho dos equipamentos ante as variações climáticas anuais, características de regiões tropicais, com estação chuvosa e seca alternadas no ano.

Os Manuais de Produção e Desempenho de Máquinas e Equipamentos (Caterpillar, 1970, 1972, 1988, 1994, 1996) são geralmente desenvolvidos em países de clima temperado e baseados nos conceitos de granulometria visando, principalmente, as aplicações em terraplenagem.

Enquanto o desempenho dos equipamentos sobre piso constituído por rocha sã não apresenta diferenças significativas entre uma região tropical ou não-tropical, nas áreas caracterizadas por solos estes equipamentos, segundo Nogami e Villibor (1986), apresentam comportamentos essencialmente diferentes.

Vários são os motivos para que as novas técnicas e conceitos utilizados na Engenharia Rodoviária não tenham seus conhecimentos e aplicações transferidos para a mineração e outras áreas. O principal deles é o grande número de ensaios de laboratório necessários para a cuidadosa caracterização dos solos normalmente envolvidos nas obras rodoviárias.

O objetivo principal deste trabalho é apresentar algumas considerações que possam auxiliar no dimensionamento de frotas e na seleção de equipamentos sobre pneus, ou ainda na compreensão dos fenômenos que alteram o seu desempenho.

A consideração principal resultante dos estudos ora realizados é a sugestão da aplicação do Método Expedito da Metodologia MCT desenvolvido para fins rodoviários nos solos tropicais, objetivando a avaliação preliminar do vínculo pneu/solo. Como o Brasil e vários outros países em desenvolvimento têm grande parte de seus territórios em clima tropical (Fig. 1), a aplicação de técnicas que considerem este fato pode ser de utilidade econômica relevante.

O Método Expedito da Metodologia MCT aplicado por Nogami e Villibor (1994) é baseado em

apenas dois ensaios e possibilita uma classificação preliminar dos solos L de comportamento laterítico e dos solos N de comportamento não-laterítico.

Estes ensaios expeditos são práticos, rápidos, baratos e suficientemente eficazes para os objetivos de melhoria da avaliação de desempenho de unidades de carga e transporte em áreas de mineração e agricultura. Não existe, portanto, motivo para que não possa ser adaptado para uso na Engenharia de Minas e outras áreas, na previsão do comportamento da interação das pistas de rolamento em solos com os pneus.

Diferentemente da Engenharia Rodoviária, nas atividades de mineração nem sempre se pode trocar um solo ou mesmo cobrir uma pista de rolamento com um material mais adequado, pois esta pista, devido aos processos inerentes à mineração, poderá ser mudada de lugar e ser lavrada em algum outro instante do processo. Caracteriza-se, assim, como situação mais freqüente, a impossibilidade de adequação de todos os trechos às condições desejáveis de rolamento.

Enquanto na construção de rodovias é comum a constituição de várias camadas, devidamente selecionadas e compactadas com a utilização de materiais importados de outras áreas para resultar em uma pista durável e com capacidade de suporte suficiente para o tipo de tráfego previsto, em mineração, o usual é que a unidade de transporte tenha de trafegar sobre uma pista constituída pelo próprio solo local compactado.

Nas áreas em processo de mineração é comum os veículos terem que atravessar vários horizontes de solo até a rocha sã (Fig. 2).

A situação mais comum na construção de vias em mineração é apresentada esquematicamente na Fig. 3.

A condição 1 ocorre em trechos que não serão lavrados e podem ser recobertos por uma camada de solo ou material com melhor qualidade, adequado ao tráfego, contribuindo, assim, para a redução de atrasos e formação de filas, com diminuição dos tempos de espera das unidades de carregamento.

Esta condição 1 é comum em estradas de serviço e pistas que levam às pilhas de estéril e rejeitos e, eventualmente, no trecho principal de transporte do minério ao britador primário.

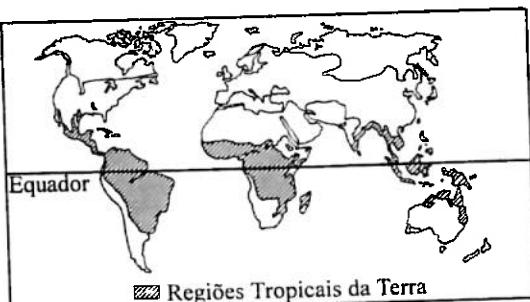


Figura 1. Regiões de ocorrência de processos de lateritação. (Forssblad, 1985).



Figura 2
passando



Figura 3

Tan
do mat
dito da
pois fe
abilida

Out
materia
de ped
capaci
com p
piso, e



Figura 2. Pista de rolamento típica em área de mineração, passando por vários horizontes de solos e rochas (Brita, 1987).

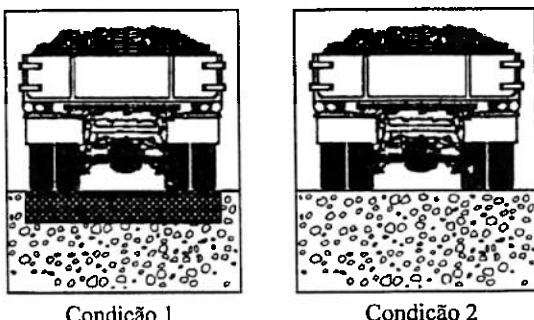


Figura 3. Esquema de rolamento em vias de mineração.

Também neste caso, os critérios para a seleção do material podem ser baseados no Método Experimental da Metodologia MCT, como será visto a seguir, pois fenômenos como a erodibilidade, a permeabilidade ou a capacidade de suporte são relevantes.

Outro caso comum de cobertura do piso com material importado ocorre nas bancadas (rocha sã) de pedreiras de produção de brita, onde, apesar da capacidade de suporte não ser problema, a forração com pó de pedra é comum para nivelamento do piso, evitando assim, o corte de pneus. Como o pó

de pedra é inerte, abundante, barato e sendo subproduto da britagem, o produto da bancada lavrada não é contaminado pela sua cobertura com este material.

A situação mais adversa é mostrada na condição 2, onde não existe a possibilidade de recobrimento do piso com material de outra qualidade, pois este piso é uma área que será lavrada e não pode ser contaminada (caulim, por exemplo). Na ação de recobrimento do piso, a benfeitoria teria uma vida útil tal, que os custos não seriam remunerados pelo produto lavrado, ou ainda, este recobrimento não se justificaria devido à indisponibilidade de materiais com qualidade e a distâncias convenientes.

Neste caso, o trabalho terá de ser realizado dentro das condições que se apresentam e a seleção dos equipamentos é que poderá minorar os efeitos indesejáveis.

Estes efeitos têm duas origens principais:

1. Resultantes do traçado geométrico da pista (aclives, declives, largura da pista, raios das curvas, visibilidade e outras), geralmente determinados pela topografia do terreno e pelo planejamento do avanço das bancadas, que considera, dentre outros fatores, a localização dos teores de minério na jazida.

2. Resultantes das qualidades dos materiais que constituirão os pisos (resistência ao rolamento, facilidade de formação de depressões e desnivelementos, derrapagem de pneus, erodibilidade e formação de poeira entre outros).

Todos estes fatores, combinados com as variações climáticas, influenciam as condições de velocidade de transporte em cada trecho considerado.

2. Aplicação do Método MCT para Classificação de Solos Tropicais

As propriedades tradicionalmente utilizadas na classificação dos solos, granulometria e limites de consistência (liquidez e plasticidade), convenientemente relacionadas, servem para classificação de solos em países de clima temperado; porém, na classificação de solos tropicais, estes critérios são por vezes insuficientes, possivelmente devido à sua espessura e ainda ao fenômeno denominado lateritação.

Enquanto os climas seco e frio ou seco e quente favorecem o intemperismo físico das rochas (desagregação), o clima quente e úmido, típico dos

trópicos, favorece o intemperismo químico, alterando e transformando os minerais devido à presença abundante de água. Esta combinação, segundo Vaz (1996), favorece a formação de camadas de solos residuais, ainda com as características da rocha matriz (solos saprolíticos) e espessas camadas superficiais permeáveis, constituídas por materiais bastante alterados (solos lateríticos).

A série completa da Metodologia MCT de Nogami e Villibor (1988, 1990 e 1991) para classificação de solos é bastante complexa e não teria aplicação prática na mineração, para os objetivos aqui propostos.

Esta metodologia utiliza amostras Miniaturizadas, de diâmetro com até 50 mm de corpos-de-prova Compactados, e é específica para solos Tropicais, donde deriva o nome MCT.

Esta metodologia inclui os seguintes ensaios em corpos-de-prova cilíndricos: compactação, capacidade de suporte estática e dinâmica, contração, infiltração, permeabilidade, perda de massa por imersão, penetração de imprimadura betuminosa e controle de compactação.

Como para a obtenção destes dados são necessários mais de 150 valores numéricos resultados de ensaios, confirma-se a pouca praticabilidade para as aplicações aqui em discussão.

A classificação dos solos tropicais por esta metodologia é feita a partir de um gráfico bidimensional, c' x e' (Fig. 4).

O coeficiente c' é obtido das curvas de deformabilidade no ensaio de compactação, e o índice e' é obtido da relação:

$$e' = \left(\frac{20}{d'} \right) + \left(\frac{Pi}{100} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (1)$$

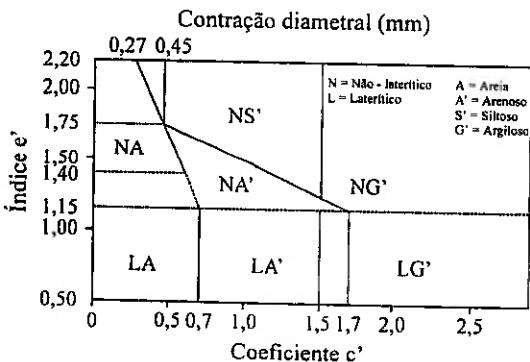


Figura 4. Classificação da Metodologia MCT (Godoy *et al.*, 1994).

onde d' é o ângulo de inclinação da curva de compactação do solo, e Pi , a perda de massa por imersão total em água do corpo-de-prova, valores estes obtidos através dos ensaios citados anteriormente.

3. Método Expedito da Metodologia MCT

Visando uma classificação prática destes solos, foi desenvolvido por Nogami e Villibor (1993) o Método Expedito da Metodologia MCT para classificação dos solos tropicais, que se tem mostrado rápido, barato e confiável.

No método expedito, segundo Godoy (1997), as amostras de solos da fração passante na peneira 40 (abertura de 0,42 mm) são espatuladas sobre uma lâmina de vidro, como mostra a Fig. 5, numa umidade conveniente, e são moldadas, pelo menos, 3 pastilhas com o auxílio de anéis de PVC ou material similar com 20 mm de diâmetro e 5 mm de altura. É moldada ainda com este mesmo material uma esfera de 20 mm de diâmetro, que pode servir para a avaliação de outras propriedades, como resistência ao esmagamento manual e desenvolvimento de trincas após a sua secagem.

A secagem da esfera e das pastilhas é feita em estufa a 60 °C por um período médio de 8 h (podendo chegar a 12 h). Depois de secas, faz-se a medida das contrações das pastilhas com régua milimétrica de precisão e lupa com capacidade mínima de ampliação de 10 vezes.

A seguir, as pastilhas são colocadas sobre papel de filtro e é por esta superfície porosa em contato com a água, que ocorre a reabsorção. Durante a reabsorção da água são feitas as observações de fenômenos como: aparecimento de trincas (Fig. 6), inchamento e outras modificações.



Figura 5. Espatulamento do solo para a moldagem das pastilhas (Godoy, 1997).

Após rítico ou permanêr de resistê (Fig. 7).

A exp de resistê tamentos i que a ma padroniza e a manut solos de ce

Estes c resse na m doviária, a lizada e se pelo tráfeg sujeita à se da chuva.



Figura 6. Solo expansão e apar



Figura 7. Solo c penetração (Nogar

Após esta reabsorção, o comportamento laterítico ou não-laterítico do solo se acentuará, pela permanência da contração ou expansão e pela perda de resistência à penetração de uma agulha padrão (Fig. 7).

A expansão, o aparecimento de trincas e a perda de resistência à penetração da agulha são comportamentos típicos dos solos não-lateríticos, enquanto que a maior resistência à penetração da agulha padronizada (1,3 mm de diâmetro e 10 g de massa) e a manutenção da contração são características dos solos de comportamento laterítico.

Estes comportamentos são de particular interesse na mineração, pois, ao contrário da obra rodoviária, a pista de rolamento não será impermeabilizada e sempre estará sujeita à compactação feita pelo tráfego ou pela manutenção e, alternadamente, sujeita à secagem pelo sol e exposta à ação da água da chuva.



Figura 6. Solo de comportamento não-laterítico com grande expansão e aparecimento de trincas (Nogami e Villibor, 1993).

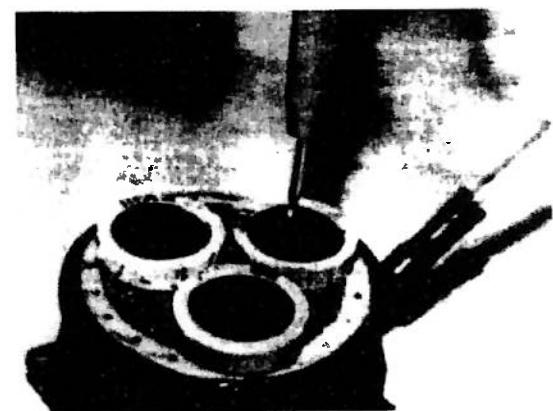


Figura 7. Solo de comportamento laterítico com agulha de penetração (Nogami e Villibor, 1993).

4. Grupos da Classificação do Método Expedito MCT

Tanto na série completa da Metodologia MCT como no Método Expedito, os solos são classificados em 7 grupos com comportamentos bem definidos:

Comportamento Laterítico (L)
LA.....Laterítico areia
LA'.....Laterítico arenoso
LG'.....Laterítico argiloso
Comportamento Não-Laterítico (N)
NA.....Não-laterítico areia
NA'.....Não-laterítico arenoso
NS'.....Não-laterítico siltoso
NG'.....Não-laterítico argiloso

A Fig. 8 mostra a Classificação Expedita do MCT, classificação esta fundamentada na contração e na penetração da agulha na pastilha de solo.

Neste método, o coeficiente c' é dado pelas seguintes formulações empíricas:

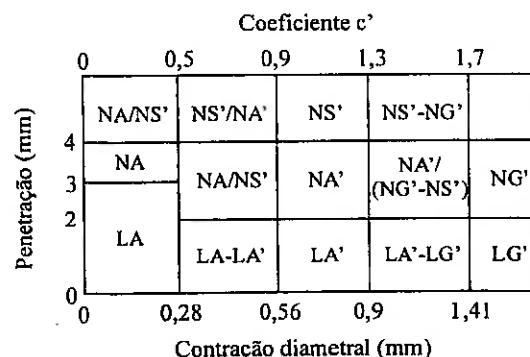
$$c' = \frac{(\log_{10} Ct + 1)}{0,904} \quad (2)$$

para contração $0,1 \text{ mm} < Ct < 0,5 \text{ mm}$, e

$$c' = \frac{(\log_{10} Ct + 0,7)}{0,5} \quad (3)$$

para contração $Ct > 0,6 \text{ mm}$.

A comparação entre os gráficos das Figs. 4 e 8 mostra claramente que o ensaio segundo o Método Expedito não oferece a possibilidade de distinção entre dois tipos de solos com a mesma precisão da



(-) separa opção equivalente; (/) separa opção decrescente

Figura 8. Classificação Expedita do MCT (Sant'Anna, 1999).

Metodologia MCT aplicada com todos os seus ensaios; porém, deve-se atentar que este ensaio define com precisão a separação dos solos de comportamento não-laterítico daqueles de comportamento laterítico.

Considerando, por exemplo, um solo em que a penetração da agulha é menor de 2 mm e a contração diametral está situada entre 0,28 mm e 0,56 mm, embora seja possível caracterizá-lo como laterítico, não se pode precisar se este pertence ao grupo LA ou LA'. Porém, como será visto a seguir, com um pouco de prática de campo, esta classificação é mais do que suficiente para prever, com relativa facilidade, qual será o comportamento de um determinado tipo de caminhão em tempo seco ou sob a ação da água da chuva.

Mesmo para solos de comportamento não-laterítico, com penetração maior de 2 mm e contração diametral entre 0,28 mm e 0,9 mm, onde a distinção entre os grupos NA' e NS' é difícil, para os objetivos da mineração, a escolha de um equipamento por um técnico treinado fica facilitada.

A expansão (que causa consequentemente a redução da densidade e perda de resistência), característica dos solos não lateríticos, implica em maior resistência ao rolamento, devido à penetração dos pneus. Portanto, a baixa capacidade de suporte destes solos implica na formação de depressões transversais e longitudinais ao longo na pista, reduzindo a velocidade de transporte e a eficiência da operação.

Um comportamento argiloso (G') associado à plasticidade implicará no aumento da derrapagem na presença de água.

5. Equipamentos de Transporte Usuais

Tanto na mineração quanto em obras de terraplenagem da construção civil são utilizados como equipamento de transporte caminhões de três categorias, a saber: Caminhões Fora de Estrada (OHT), cuja sigla procede da terminologia inglesa *Off Highway Truck*; Caminhões Convencionais, também denominados Veiculares; e, finalmente, Caminhões Articulados (ADT - do inglês *Articulated Dump Truck*).

Enquanto Caminhões Fora de Estrada e Veiculares são de carroceria rígida, os Caminhões Articulados, modernos, têm dupla articulação, tanto no sentido longitudinal quanto transversal, e adaptam-

se muito bem a pistas de extrema irregularidade e alta derrapagem.

Outra distinção que influí no desempenho das unidades de transporte são as opções de tração oferecidas pelo mercado.

Os Caminhões Veiculares, comuns tanto para rodovias como para estradas não-pavimentadas, em geral com menor capacidade de carga que os grandes Caminhões Fora de Estrada, têm como característica o número de rodas e a tração para sua movimentação. Há dois tipos de Caminhões Veiculares: 4x2 e 6x4, o que indica, respectivamente, quatro rodas com tração em duas e seis rodas com tração nas quatro traseiras.

Finalmente, os Caminhões Articulados apresentam maior variedade de tipos no mercado referentes à tração nas rodas: 4x2, 4x4, 6x4 e 6x6, indicando, assim, o número de rodas e as respectivas trações nas mesmas.

Considerando a classificação e as descrições de cada tipo de solo tropical desenvolvidas por Notami e Villibor (1993), tem-se diferentes expectativas de desempenho ante os vários tipos de equipamentos e, como exemplo, serão usados os de transporte acima descritos.

6. Solos de Comportamento Não-Laterítico (N)

Os solos do grupo NA (Não-laterítico/areia) são representados por areias, siltes e misturas de areias e siltes, com grãos constituídos de quartzo ou mica, com ausência total ou com pequena porcentagem de finos argilosos coesivos. Quando compactados, estes solos possuem baixa ou média capacidade de suporte e são facilmente erodíveis.

A baixa capacidade de suporte deste tipo de solo implicará na formação de depressões irregulares, tanto longitudinais como transversais à via, favorecendo o uso de caminhões com pneus de diâmetros maiores, como os Fora de Estrada (OHT) ou os caminhões com oscilações de eixos independentes, como os Articulados (ADT 4x2). Com isso ficam inviabilizados os Caminhões Convencionais (Veiculares 4x2 ou 6x4) que, devido à rigidez e ao pequeno diâmetro dos pneus, diante das depressões, perderá uma de suas principais características que é a velocidade.

As variedades de solos não-lateríticos quartzosos com pouca ou nenhuma argila são muito pouco

expansão
Estrada
de solos
favorece
erodibil
mação
de lento
chuva,
tenção

Os
co/areia
minera
contrár
tes sol
laterític
Est
rochas
arenito

Qu
do co
aprese
dos co
ser rev
rial gr
não fo
serão i
dades
ao sol
erosão

Os
comp
(Não-
suíter
finos
sequê
utiliz
derra

P:
escol
(OH)
pluvi
finen
cia d
C
jam a
quad
C
ende
tes d

expansivas, favorecendo os Caminhões Fora de Estrada (OHT) rígidos, enquanto que as variedades de solos micáceos podem ser altamente expansivas, favorecendo os Caminhões Articulados (ADT). A erodibilidade deste tipo de solo facilitará a formação de sulcos no leito das rampas e a deposição de lentes arenosas em sua base nos períodos de chuva, implicarão em grande demanda de manutenção com motoniveladoras e compactadores.

Os solos do grupo NA' (Não-laterítico/arenoso) são misturas de areias quartzosas ou de minerais com propriedades similares; porém, ao contrário do grupo NA (Não-laterítico/areia), estes solos possuem finos de comportamento não-laterítico passantes na peneira 0,075 mm.

Este tipo de solo normalmente é originado de rochas ricas em quartzo, como granitos, gnaisses, arenitos e quartzitos impuros.

Quando a areia for bem graduada, dependendo do comportamento dos finos, estes solos podem apresentar propriedades adequadas para serem usados como base de pavimentos, desde que possam ser revestidos com uma camada razoável de material granular, como a brita. Porém, quando a areia não for bem graduada e contiver micas, estes solos serão impróprios para esta aplicação. Muitas variedades de micas são muito expansivas, conferindo ao solo baixa capacidade de suporte e facilidade de erosão.

Os desempenhos destes solos podem apresentar comportamento superior aos dos solos do grupo NA (Não-laterítico/areia), com o agravante de possuirem maior plasticidade, devido à presença de finos que favorecem a derrapagem. Como consequência, no caso de pneus dimensionados para a utilização sobre rochas, são previsíveis maiores derrapagens nos períodos de chuva.

Para os dois grupos, NA e NA', na opção de escolha entre os Caminhões Fora de Estrada rígidos (OHT) e os Articulados (ADT), a topografia e a pluviosidade da região são determinantes, pois definem tanto a intensidade da erosão como a frequência de exposição alternada à secagem e à saturação.

Caso os solos apresentem muita mica, e/ou sejam altamente expansivos, serão provavelmente enquadrados no grupo NS'.

O grupo NS' (Não-laterítico/siltoso) compreende os solos saprolíticos silto-arenosos, resultantes do intemperismo tropical sobre rochas eruptivas

e metamórficas com feldspato, mica e quartzo. Mesmo que convenientemente compactados estes solos apresentam baixa capacidade de suporte, elevada expansibilidade quando úmidos e elevada erodibilidade quando sujeitos à ação da água.

Em estado natural, este tipo de solo atinge por vezes a ruptura, possui baixa capacidade de suporte e alta erodibilidade.

No caso de região de baixa pluviosidade, os caminhões Fora de Estrada (OHT) são recomendáveis, devido ao diâmetro dos seus pneus para vencer as depressões causadas pela baixa capacidade de suporte destes solos. A topografia também deverá ser considerada, pois a alta erodibilidade implicará na formação de lentes de material erodido sem coesão, que é depositado nos trechos mais baixos da pista. A alta pluviosidade favorecerá fortemente o uso de Caminhões Articulados (ADT) (Figs. 9a e 9b) e demandará manutenção permanente das pistas.

Os solos do grupo NG' (Não-laterítico/argiloso) são os solos saprolíticos argilosos que derivam de rochas sedimentares argilosas (folhelhos, argilitos e siltitos), pobres em quartzo e que, quando compactados convenientemente, apresentam as ca-



Figura 9a. Caminhão Articulado (ADT) 6x4 superando um desnívelamento de solo (Articulated, 1993).



Figura 9b. Caminhão Articulado (ADT) 6x6 operando em solo de alta plasticidade (Articulated, 1993).

racterísticas das argilas tradicionais (alta expansibilidade e alta plasticidade).

Estas argilas, quando submetidas à secagem, apresentam ainda elevadas compressibilidade e contração.

Este tipo de solo, sob a ação da água, resultará em derrapagem dos equipamentos causada pela alta plasticidade e alta resistência ao rolamento, mesmo quando seco, formando ainda depressões ao longo da pista. Este condicionamento favorece o uso dos Caminhões Articulados (ADT) 4x2 e 6x4, devido aos eixos oscilantes independentes e aos pneus de baixa pressão.

7. Solos de Comportamento Laterítico (L)

No grupo LA (Laterítico/areia) há predominância de areias com baixa porcentagem de finos de comportamento laterítico que, quando compactados, podem ser relativamente permeáveis, pouco coesivos, pouco contráteis quando secos e com elevada capacidade de suporte.

Já os solos do grupo LA' (Laterítico/arenoso), são areno-argilosos e geralmente com coloração vermelha ou amarela.

Os cortes nos solos classificados como LA' são estáveis e pouco erodíveis, apresentando a superfície trincada quando exposto às intempéries ou ciclos de secagem e umedecimento.

No estado natural podem apresentar baixas resistência e capacidade de suporte e entram em colapso quando imersos em água; porém, quando devidamente compactados, adquirem elevada resistência, ótima capacidade de suporte, pequena contração por perda de umidade, razoável coesão e pequena expansão por imersão em água.

Estes solos favorecem de forma excepcional a utilização de Caminhões Fora de Estrada rígidos (OHT) e Caminhões Convencionais (Veiculares), devido à baixa resistência ao rolamento.

Estas propriedades têm grande importância econômica, uma vez que nas regiões tropicais predominam países pobres ou em desenvolvimento, e o uso de Caminhões Veiculares permite menor investimento inicial.

Na mineração de argila, areia e brita para uso na construção civil, as jazidas devem estar localizadas próximas às regiões de demanda, devido tais produtos possuírem baixo valor agregado. O baixo

valor do investimento inicial e a adequabilidade dos equipamentos são, por vezes, fatores determinantes da viabilidade econômica destes empreendimentos.

A grande maioria destas minerações estão situadas próximas aos grandes centros consumidores. Pode-se citar, como exemplo, a Região Metropolitana da Grande São Paulo, onde operam cerca de 42 pedreiras predominantemente de granitos e gnaisses, produzindo agregados para a construção civil.

Por outro lado, no interior paulista (Bacia do Paraná), os agregados geralmente são obtidos a partir de pedreiras de basaltos e diabásios, também localizadas próximas aos centros de demanda.

O transporte de todos estes materiais é feito, em sua grande maioria, por Caminhões Convencionais (Veiculares).

O maior testemunho da viabilidade da aplicação de Caminhões Convencionais (Veiculares) neste tipo de pista de rolamento (LA') não está nem na construção civil nem na mineração, e sim na agricultura. A região Norte do Estado de São Paulo, grande produtora de cana-de-açúcar, tem toda sua produção transportada em Caminhões Convencionais (Veiculares), através de estradas de terra de solos lateríticos arenosos (Fig. 10).

O aumento da produção das pedreiras, bem como do número de pedreiras instaladas sobre rochas basálticas nesta região, que tem mostrado grande crescimento econômico, favoreceria fortemente a aplicação de caminhões rígidos (OHT, Veiculares), pois as características dos Articulados (ADT) representam custos adicionais desnecessários.

No grupo LG' (Laterítico/argiloso), os solos mais freqüentes são as argilas e argilas arenosas, que, se possuírem razoável porcentagem de areia,



Figura 10. Caminhão Veicular no transporte de cana-de-açúcar em solo laterítico arenoso.

podem adquirir características próximas das observadas no grupo LA' (**Laterítico/arenoso**), porém, com maior plasticidade e menor capacidade de suporte. Neste caso, dependendo da pluviosidade e da topografia, a presença da água provocará a derrapagem, prejudicando a utilização dos Caminhões Convencionais 4x2 (Veiculares) e favorecendo os Convencionais 6x4 e os Fora de Estrada (OHT) (Fig. 11). Diante de más condições de manutenção das pistas, os Caminhões Articulados (ADT) 4x2 também são adequados para uso neste tipo de solo.

Os solos lateríticos argilosos (**LG'**), além de mostrarem baixo efeito de derrapagem, baixa resistência ao rolamento e grande capacidade de suporte, são bastante resistentes à erosão e apresentam contração (trincas) por perda de umidade.

Apesar de serem granulometricamente classificados como argilosos, estes solos são altamente permeáveis e geralmente seus taludes são estáveis e resistentes à erosão.

Deve-se destacar ainda que na avaliação do comportamento dos solos feita anteriormente, não foram considerados solos coluvionares e aluvionares. Os primeiros são materiais de pouco interesse à mineração, compreendendo geralmente coberturas descartáveis. Por outro lado, os solos aluvionares, quando usados como substrato para locomoção de veículos, apresentam geralmente comportamento semelhante ao descrito no grupo LA.

Nas regiões tropicais, é comum a ocorrência de pedregulhos lateríticos, frações retidas na peneira 4 (abertura de 4,8 mm), que são na realidade con-

creções lateríticas, recebendo, regionalmente, o nome de "piçarras".

Este material, embora não sendo solo, é largamente utilizado na cobertura das pistas de rolamento e apresentam um excepcional desempenho sob tráfego pesado.

Portanto, quando for disponível e viável técnica e economicamente, este tipo de material, bastante comum nas regiões tropicais, é altamente recomendado para uso nos aterros e revestimentos para manutenção de pistas com condições de rolamento desfavoráveis.

8. Conclusões

O Método Expedito MCT fornece uma gama de informações bastante rica, que permite uma antecipação do desempenho de equipamentos submetidos a algumas condições rotineiras em mineração.

É um método prático, rápido e barato, que, apesar de algumas limitações, fornece uma precisão bastante satisfatória para trabalhos de dimensionamento de frotas, ou mesmo para a compreensão de alguns fenômenos que interferem no seu desempenho já em trabalhos de produção.

Mesmo assim, para o estabelecimento de uma referência rápida para previsão de desempenho ou dimensionamento de uma frota de transporte em atividades de mineração, é sugerida aqui uma maior simplificação. Esta compreende basicamente um reagrupamento dos tipos de solos apresentados no Método Expedito da Metodologia MCT (Nogami e Villibor, 1993) em 4 grandes grupos, baseando-se nas considerações que se seguem.

Retomando-se o gráfico da classificação expedita do MCT (Fig. 8), que hierarquiza os solos tropicais e a descrição dada por Nogami e Villibor (1993), nota-se que, apesar das limitações do Método Expedito, estão dadas as hierarquizações fundamentais para os objetivos aqui propostos.

Em Godoy (1997), pode-se ter acesso a um número considerável de ensaios, e concluir que a precisão dos resultados expeditos são suficientes para as aplicações aqui sugeridas.

Ainda, conforme salientado por Godoy (1997), o método é passível de novas reformulações, tanto quantitativa (penetração da agulha) como qualitativa (preparo da pastilha).

Assim sendo, existe a possibilidade de se pesquisar procedimentos que considerem eventuais



Figura 11. Caminhão Fora de Estrada (OHT) 35 t operando sob chuva tropical na Amazônia, em pista de solo laterítico arenoso.

aplicações específicas na mineração (Hennies e Santana, 1999).

A Fig. 12 mostra a hierarquização fundamental nº 1, que é a separação entre solos lateríticos e não-lateríticos.

A hierarquização fundamental nº 2 (Fig. 13) é o resultado da observação e análise atenta da descrição destes solos.

Esta descrição foi apresentada no item 4. Seu comportamento e interação com os equipamentos são discutidos nos itens 6 e 7. Esta hierarquização é decorrente da capacidade de suporte, erodibilidade e contração/expansibilidade.

Esta análise permitiu ainda a formulação da hierarquização nº 3 (Fig. 14), que é resultante das características de plasticidade.

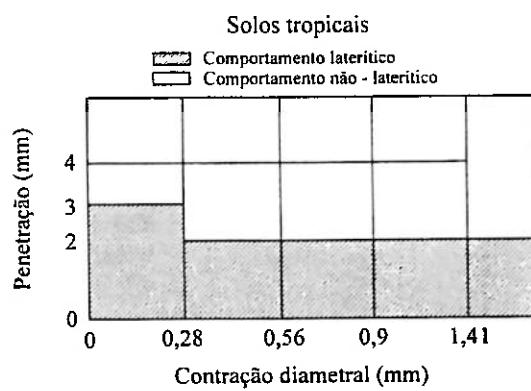


Figura 12. Hierarquização fundamental nº 1.

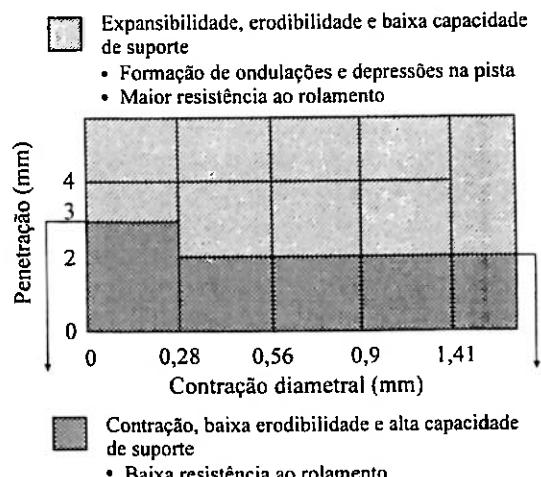


Figura 13. Hierarquização fundamental nº 2.

A análise integrada destas hierarquizações sugere a proposição de um gráfico que apresenta quatro grandes grupos de solos com características geotécnicas semelhantes, permitindo uma seleção mais criteriosa de equipamentos de transporte em empreendimentos de mineração e atividades agrícolas e mostrando um desempenho mais adequado ante as condições de operação.

A sugestão de reagrupamento dos solos aqui sugerida está apresentada na Fig. 15.

Partindo deste reagrupamento e considerando as características de cada tipo de unidade de carregamento, sugere-se o quadro exposto na Fig. 16 como Referência Rápida para uma seleção preliminar de equipamentos de transporte, onde os trechos críticos do percurso sejam constituídos pelos tipos de solos relacionados na última coluna desta figura.

Recomenda-se, ainda na aplicação desta Referência Rápida, a adoção da sugestão dos criadores do método MCT, que reiteram em seus artigos a necessidade de correlação dos resultados com os

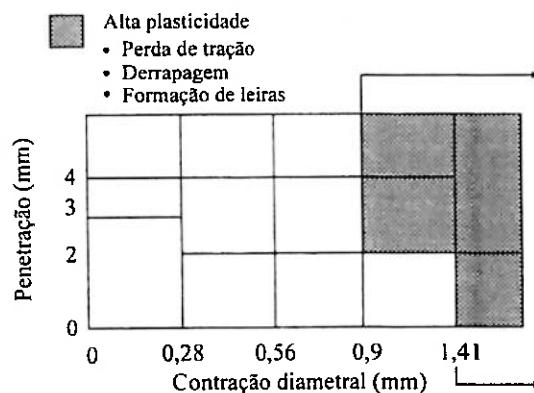


Figura 14. Hierarquização fundamental nº 3.

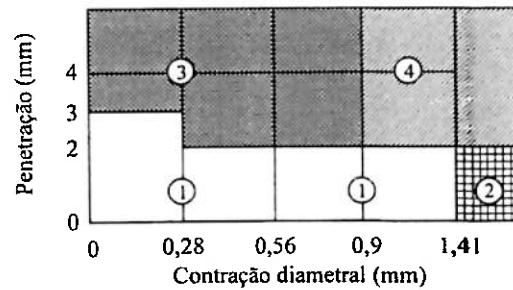


Figura 15. Sugestão de reagrupamento dos solos para seleção de equipamentos sobre pneus.

Solo \ Solo	OHT Fora de Estrada	Convencional Veicular 4x2	Convencional Veicular 6x4	ADT Articulado 4x2 4x4	ADT Articulado 6x4 6x6	Principais características dos solos
1	😊😊	😊😊	😊😊	😢	😢	Lateríticos, areias, arenosos a argilosos
2	😊😊	😊	😊😊	😐	😐	Lateríticos, argiloso ou areno-argilosos
3	😊	😢	😐	😊	😊	Não-lateríticos, areias e siltos ou misturas
4	😐	😢😢	😢	😊😊	😊😊	Não lateríticos, siltos argilosos a areno-argilo-siltosos
5	Rígido. Alta tonelagem	Rígido. Rodovia Estrada vicinal Tração 2 rodas	Rígido. Rodovia Estrada vicinal Tração 4 rodas	Articulado Tração em 2 ou 4 rodas	Articulado Tração em 4 ou 6 rodas	

Figura 16. Referência Rápida para pré-seleção de equipamentos de transporte.

tipos genéticos de solos, conforme Vaz (1996), para melhor ajustar os resultados e possibilitar a criação de um banco de dados.

Agradecimento

Como item final deste artigo, deseja-se ainda assinalar o auxílio recebido na cuidadosa revisão das referências bibliográficas, feita pela Bibliotecária do Departamento de Engenharia de Minas, Sra. Maria Cristina Martinez Bonésio, pelo qual os autores deixam aqui registrado o seu mais profundo agradecimento.

Referências Bibliográficas

- Articulated trucks for maximum return on investment. Peoria: Caterpillar Inc., 1993.
- Brita: Uma pedreira dentro da zona urbana. Mínérios: Extração & Processamento, n. 120, p. 62-3, jan./fev. 1987.
- Caterpillar performance handbook. Peoria: Caterpillar Tractor Co., 1970.
- Caterpillar performance handbook. 2.ed. Peoria: Caterpillar Tractor Co., 1972.
- Caterpillar performance handbook. 19. ed. Peoria: Caterpillar Inc., 1988.
- Caterpillar performance handbook. 25. ed. Peoria: Caterpillar Inc., 1994.
- Caterpillar performance handbook. 27. ed. Peoria: Caterpillar Inc., 1996.

Forssblad, L. **Compactação vibratória de solos e enrocamentos**. Solna: Dynapac Maskin AB., 1985.

Godoy, H. **Identificação e classificação geotécnica de latossolos do Estado de São Paulo pelo método das pastilhas MCT**. São Paulo, 1997. 132 p. Tese (Doutorado) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.

Godoy, H.; Nogami, J.S. e Carvalho, A. Procedimentos para caracterização geotécnica de perfis em solos de granitos e gnaisses, para obras viárias. **Solos & Rochas**, São Paulo; v. 17, n. 1, p. 31-44 1994.

Hennies, W.T. e Sant'Anna, A. Excavation equipment selection for surface mining in Brazil. In: **International Symposium on Mine Planning and Equipment Selection**, 8, Dnipropetrovsk. Proceedings..., Dnipropetrovsk: National Mining University of Ukraine, p. 27-33, 1999.

Nogami, J.S. e Villibor, D.F. The problem of classification of soils used as road construction materials in tropical areas. In: **International IAEG Congress**, 5, Buenos Aires. Proceedings... Rotterdam: Balkema. Sec. 5.4.7, p. 1663-9, 1986.

Nogami, J.S. e Villibor, D.F. Nova metodologia (MCT) de estudos geotécnicos e suas aplicações em rodovias vicinais. In: **Seminário Nacional de Vicinais**, 1, São Paulo. Anais São Paulo: DER. p. 124-35, 1988.

- Nogami, J.S. e Villibor, D.F. Identificação tecnológica de solos tropicais pela metodologia MCT. In: **Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia, 6/Congresso Brasileiro de Mecânica de Solos e Fundações, 9**, Salvador. Anais... São Paulo: ABGE/ABMS. v. 2, p. 281-7, 1990.
- Nogami, J.S. e Villibor D.F. Utilização da metodologia do MCT de ensaios em organizações não-especializadas em pavimentação. In: **Reunião Anual de Pavimentação, 25**, São Paulo. Rio de Janeiro: ABP, 1991. v. 1, p. 58-84, 1991.
- Nogami, J.S. e Villibor, D.F. Novos rumos dos estudos geotécnicos para obras viárias pela identificação expedita dos grupos MCT. In: **Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, 7**, São Paulo. Anais... São Paulo: Departamento de Engenharia de Transportes da Escola Politécnica da USP. v. 2, p. 923-35, 1993.
- Nogami, J.S. e Villibor, D.F. Identificação expedita dos grupos da classificação MCT para solos tropicais. In: **Cobramsef, 10**, Foz do Iguaçu. São Paulo: ABMS, v. 4, p. 1293-300, 1994.
- Sant'Anna, A. **Considerações sobre a seleção de equipamentos para transporte de minérios**. São Paulo, 1999. 82 p. + anexo. Dissertação (Mestrado) - Departamento de Engenharia de Minas, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
- Vaz, L.F. Classificação genética dos solos e dos horizontes de alteração de rocha em regiões tropicais. **Solos & Rochas**, São Paulo, v. 19, n. 2, p. 117-36, 1996.

Recebido em 17/8/1999
Aceitação final em 25/2/2000
Discussões até 31/1/2001

am
abc
dos
prc

en
pra
tra
coi
coi

en
stu
wi
thi

1.

te
mi
an
da
Ne
re