

AVALIAÇÃO DA CORRELAÇÃO ENTRE O MÓDULO DE RESILIÊNCIA E A CLASSIFICAÇÃO MCT DE SOLOS FINOS ARGILOSOS

Ana Elza Dalla Roza
Caroline Dias Amancio de Lima
Laura Maria Goretti da Motta

Universidade do Estado do Mato Grosso, UNEMAT
Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE/UFRJ
Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE/UFRJ

RESUMO

Um novo método de dimensionamento mecanístico-empírico vem sendo implantado no Brasil e uma das vantagens é avaliar melhor os materiais disponíveis com relação às suas propriedades mecânicas. Um dos parâmetros utilizados neste método é o módulo de resiliência (MR). Nesta pesquisa, avalia-se o MR em relação aos parâmetros da classificação MCT (Miniatura, Compactado, Tropical) de solos argilosos. Foram selecionados 16 solos finos, 8 classificados como NG' e 8 como LG' e elaboradas matrizes de correlação entre os parâmetros da regressão do modelo composto de módulo de resiliência e os coeficientes classificatórios MCT. Verificou-se que a classificação com o ábaco de solos transicionais pôde indicar de forma mais satisfatória o comportamento dos solos lateríticos para estes materiais.

ABSTRACT

A new mechanistic-empirical design method has been implemented in Brazil and one of the advantages is to improve the evaluation of the available materials into their mechanical properties. One of the parameters used in this method is the resilient modulus (RM). In this research, the RM is evaluated with the parameters of the MCT (Miniature, Compacted, Tropical) classification of clayey soils. Sixteen fine soils were selected, 8 classified as NG' and 8 as LG' and elaborated correlation matrices between the regression parameters of the composite resilient modulus model and the MCT classification coefficients. It was verified that the classification with the abacus of transitional soils could indicate the behavior of the lateritic soils for these materials in a more satisfactory way.

1. INTRODUÇÃO

No Brasil os profissionais da área de pavimentos discutem a falta de coerência em alguns casos, dos resultados obtidos em campo e os previstos pelo método de dimensionamento vigente no país. De fato, o método encontra-se ultrapassado quanto ao conhecimento adquirido ao longo dos anos e às tecnologias disponíveis para análise destes materiais. Assim, um método mecanístico-empírico vem sendo implantado pelo IPR/DNIT em busca de um melhor dimensionamento de pavimentos asfálticos.

A utilização do *California Bearing Ratio* (CBR), parâmetro empregado no método de dimensionamento brasileiro desde a década de 1960, determina um índice de suporte do material em relação a materiais padronizados. Esta determinação é realizada por carregamento estático com os materiais sob condições pré-definidas (umidade e compactação) e imersos em água por 4 dias. Este critério acaba descartando alguns solos tropicais, que geralmente são materiais de textura fina, que, pelas classificações tradicionais que levam em consideração Limites de Liquidez e Plasticidade são classificados como comportamento de sofrível a mau para camadas de pavimentos.

É importante que não se rejeite qualquer material sem avaliar todas as suas peculiaridades. Para Medrado (2009), a substituição aos solos granulares por solos finos em camadas de pavimentos justifica-se pelo aspecto econômico e ambiental: redução do volume de transporte de materiais e redução de áreas degradadas, respectivamente. Segundo Nogami e Villibor (1995), solos tropicais, principalmente os de comportamento laterítico, apresentam

propriedades satisfatórias para utilização como base ou sub-base de pavimentos como já evidenciado em análises de deformação permanente por Guimarães (2009) e em pavimentos em Minas Gerais (Medrado, 2009) e a vasta malha de rodovias no estado de São Paulo executados com Solos Arenosos Finos Lateríticos (Nogami e Villibor, 2009).

Dentre as propriedades geotécnicas, há de se considerar as respostas mecânicas dos solos e materiais granulares que venham a compor as camadas de base, sub-base e subleito. A devida caracterização destas propriedades, elásticas e plásticas, tem sido realizada por meio de ensaios dinâmicos em equipamentos triaxiais de cargas repetidas que visam simular a repetição das forças de carregamento aplicadas pelo tráfego. O parâmetro de deformabilidade elástica que vem sendo utilizado é o Módulo de Resiliência (MR) que descreve a relação tensão-deformação do material sob aplicações cíclicas de carga. Vale salientar que o Módulo de Resiliência em campo e em laboratório pode ser afetado por fatores como umidade, estado de tensões, quantidade de aplicação de carga, e frequência, em diferentes intensidades dependendo do tipo de material.

No que se refere à classificação dos solos, no Brasil foi desenvolvido a classificação MCT (Miniatura Compactado Tropical) especialmente para prever o comportamento dos solos tropicais, classificando-os em dois grandes grupos, de comportamento Laterítico e Não Laterítico por ensaios baseados em comportamentos mecânicos e hídricos. Esta classificação foi proposta por Nogami e Villibor em 1981, porém vem sendo aprimorada ao longo dos anos de acordo com o aumento do conhecimento dos solos tropicais das várias regiões. A última atualização da metodologia foi proposta por Villibor e Alves (2017) no qual foi incorporada à classificação os solos tropicais de granulometria grossa, denominadas classicamente como lateritas.

Devido à época em que a MCT foi desenvolvida ela ainda contempla o ensaio de mini CBR para a determinação da capacidade de suporte dos solos. Assim, embora muitos pesquisadores nacionais que utilizaram o equipamento triaxial de cargas repetidas para realizar o MR para diferentes materiais de possível utilização em pavimentos rodoviários e ferroviários (Marangon, 2004; Guimarães, 2001, 2009; Lima *et al.*, 2017; Norback, 2018), do qual o pioneiro foi Preussler (1978), façam referência às classes MCT, nem sempre é possível inferir os MR. Bernucci (1995), classifica os solos lateríticos pela MCT e aplica a metodologia à pavimentos com baixo volume de tráfego. Nogami e Villibor (2009), apresentam estudos com solos lateríticos aplicados às bases de pavimentos. Vertamatti (1988) estudou diversos solos da região amazônica e propôs a metodologia MCT-M (solos transicionais). Alvarez Neto (1998) propôs um método de dimensionamento para vias de baixo volume de tráfego baseado na classificação MCT. Estes trabalhos se tornaram referência.

Marangon (2004) devido às desconformidades entre campo e dimensionamento que foram atribuídas às peculiaridades dos solos de clima tropical estudou as características e o comportamento dos solos finos lateríticos do Estado de Minas Gerais, cerca de 40 solos, abrangendo a pedologia, metodologia MCT, e resiliência dos materiais, visando avaliar a adequabilidade do uso destes solos em pavimentos de baixo volume de tráfego. O mesmo fez Castro (2002) para 18 solos da região central de Minas Gerais, avaliando os mesmos com MR, MCT e MCT-M.

Ainda se busca um maior conhecimento conjunto quanto às propriedades mecânicas e a classificação MCT considerando a grande extensão do país com diferentes materiais

disponíveis para camadas de pavimentos. Visando contribuir para esta linha de pesquisa, neste trabalho foram realizadas as caracterizações e classificações geotécnicas tradicionais, como também a classificação MCT e MCT-M e ensaios de caracterização mecânica, o MR, com o objetivo de avaliar as propriedades dos materiais e correlacioná-las. Entretanto, neste primeiro momento o foco foi dado para solos finos argilosos, tanto lateríticos quanto não lateríticos, que podem ser encontrados em vários estados brasileiros.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A substituição do Índice de Suporte Califórnia (ISC), também conhecido como CBR, já mencionado, pela determinação do módulo de resiliência no novo método de dimensionamento brasileiro de pavimentos asfálticos que é mecanístico-empírico se dá pelo fato do MR permitir análises mecânicas com diferentes possíveis tensões às quais as camadas estariam sujeitas, simulando de forma mais adequada a situação em campo.

Vertamatti (1988), Alvarez Neto *et al.* (1998), Marangon (2004), e Takeda (2006) avaliaram o módulo resiliente de pavimentos constituídos de solos finos lateríticos através de técnicas de retroanálise. Trabalhos como de Marangon (2004), Pereira *et al.* (2008) e Yukio *et al.* (2016) buscaram correlação entre o módulo de resiliência e outros parâmetros como o de classificação do método MCT. Pereira *et al.* (2008) reuniram dados de diferentes instituições e concluíram que as melhores correlações foram para o grupo separado em solos que apresentam comportamento laterítico (L) e para o comportamento não laterítico (N).

2.1. Módulo de Resiliência

O Módulo de Resiliência (MR) é usado como uma propriedade mecânica para descrever a relação tensão-deformação, em geral sendo elástico não linear o comportamento dos materiais e solos quando submetidos a carregamento dinâmico no equipamento triaxial de cargas repetidas. Neste equipamento simula-se de maneira mais adequada a repetição das forças de carregamento aplicadas pelo tráfego ao longo da vida do pavimento.

O MR é definido como a relação entre a tensão desvio e a deformação recuperável e o procedimento para sua definição consiste na aplicação de uma tensão confinante constante (σ_3) e aplicações de cargas cíclicas ($\sigma_d = \sigma_1 - \sigma_3$) executadas em diferentes pares de tensões (σ_d/σ_3): 3 no condicionamento totalizando 1500 ciclos e mais 18 no ensaio propriamente dito com cerca de 180 ciclos de carga.

Ao longo dos anos, pesquisadores desenvolveram várias equações para modelar o comportamento elástico de materiais para as camadas subjacentes do revestimento asfáltico como pode ser observado na Tabela 1. O MR foi recomendado desde 1986 pela ASSHTO, de acordo com Medina e Motta (2015), para a avaliação estrutural das camadas de base, sub-base, e do subleito dos pavimentos flexíveis.

Vale salientar que no Brasil o ensaio é realizado na umidade ótima de compactação (Hot). É sabido que a variação da umidade de preparação dos corpos de prova e/ou a variação posterior da umidade podem influenciar na resposta mecânica do material. Esse efeito da umidade já é conhecido e trabalhos como de Castro (2002) que realizou ensaios de módulo de resiliência com corpos de prova de solos imersos em água por 72 horas, Ba *et al* (2012) que analisou materiais britados e Lima *et al* (2018) que estudou um solo laterítico argiloso, dentre outros citados em Lekarp *et al.* (2000), provam que o MR é dependente do teor de umidade e vai decrescer quanto mais úmido estiver, ou seja, menor resistência no ramo úmido da curva de

compactação. Em geral, os solos lateríticos são muito menos sensíveis a esta variação de umidade.

Tabela 1: Modelos de comportamento resiliente de solos (Adaptado de Lekarp *et al.*, 2000, Bernucci *et al.*, 2010 e Medina e Motta, 2015)

Modelo	Destinação
$MR = \sigma_d / \varepsilon_r$	Materiais em geral
$MR = k_1 \cdot \sigma_3^{k_2} \cdot \sigma_d^{k_3}$	Materiais em geral
$MR = k_2 + k_3 \cdot k_1 - \sigma_d $ e $MR = k_2 + k_4 \cdot k_1 - \sigma_d $	Solos coesivos
$MR = k_1 \cdot \sigma_d^{k_2}$	Solos granulares e materiais granulares
$MR = k_1 \cdot \sigma_3^{k_2}$	Solos finos
$MR = k_1 \cdot \theta^{k_2}$ e $MR = k_1' \cdot \sigma_d^{k_2'}$	Solos areno-argilosos e material granulares
$MR = [\Delta(\sigma_1 - \sigma_3) \Delta(\sigma_1 - 2\sigma_3)] / [\varepsilon_r \Delta(\sigma_1 + \sigma_3) - 2 \varepsilon_r \Delta\sigma_3]$	Materiais em geral
$MR = k_1 \cdot P_a (\theta / P_a)^{k_1} [(\tau_{oct}/P_a)+1]^{k_3}$	Materiais em geral
$MR = K$	Saprolíticos silto-arenosos micáceos e solos lateríticos fortemente cimentados

*MR é módulo de resiliência; k_1 , k_2 , k_4 são parâmetros de regressão; ε_r é a deformação específica recuperável; σ_3 é a tensão confinante; σ_d é a tensão desvio ($\sigma_1 - \sigma_3$); θ é a pressão volumétrica sob todos os lados da amostra ($\sigma_1 + 2\sigma_3 = \sigma_d + 3\sigma_3$); alguns gráficos são plotados em log e com diferentes eixos; P_a é a pressão atmosférica; τ_{oct} é a tensão de cisalhamento octaédrica.

2.1. Classificação MCT

A classificação MCT (Miniatura Compactado Tropical) desenvolvida por Nogami e Villibor no ano de 1981 aplica-se a solos integralmente passantes na #10 (2,00 mm) e divide os solos em dois grandes grupos: os solos de comportamento Laterítico ou Não Laterítico. Os solos com comportamento Laterítico (representados pela letra L) subdividem-se em 3 grupos: as Areias Lateríticas Quartzosas (LA), Solo Arenoso Laterítico (LA') e Solo Argiloso Laterítico (LG'). Já os solos com comportamento Não Lateríticos (representados pela letra N) subdividem-se em 4 grupos: as Areias, siltes e misturas de areias e siltes com predominância de grão de quartzo e/ou mica, não laterítico (NA), misturas de areias quartzosas com finos de comportamento não laterítico (solos arenosos) (NA'), solo siltoso não laterítico (NS') e solo argiloso não laterítico (NG').

Para a classificação dos solos tropicais em Lateríticos ou Não Lateríticos são realizados os ensaios de Compactação Mini-MCV e Perda de Massa por Imersão. A realização destes dois ensaios torna possível a determinação dos coeficientes c' , d' e P_i . Posteriormente define-se o valor do coeficiente e' pela Equação 1, em função de d' e P_i , para então classificar o solo usando o ábaco apresentado na Figura 1.

$$e' = \sqrt[3]{\frac{P_i}{100} + \frac{20}{d'}} \quad (1)$$

em que e' :índice de classificação [adimensional];

P_i :Perda de massa por imersão [%];

d' :inclinação do ramo seco da curva de compactação de 12 golpes [adimensional].

Os valores de e' classificam o material com comportamento laterítico ou não laterítico, sendo verificado por Nogami e Villibor (1995) comportamento laterítico em solos com P_i menores que 100 e d' maiores que 20. Já o critério c' da classificação MCT está relacionado à granulometria do material, arenoso ou argiloso.

Com base na classificação MCT proposta por Nogami e Villibor, Vertamatti (1988) em

estudos com solos da região amazônica delimita novas áreas no ábaco inicialmente apresentado, chamando-os de solos transicionais. As áreas do ábaco proposto por Vertamatti (1988) está apresentado na Figura 1.

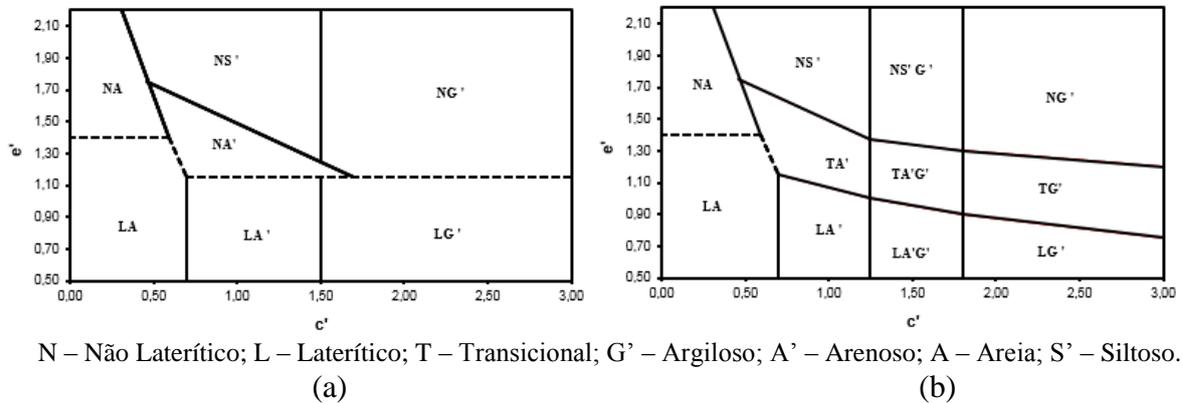


Figura 1: Ábacos de classificação MCT: (a) Ábaco proposto por Nogami e Villibor (1981); (b) Ábaco proposto por Vertamatti (1988)

3. MATERIAIS E MÉTODOS

O total de 16 solos finos argilosos de diferentes estados brasileiros foram avaliados neste trabalho: 8 lateríticos e 8 não lateríticos. Todos foram ensaiados e analisados pelos autores seguindo a nova norma de Módulo de Resiliência. Foram buscadas correlações entre diferentes variáveis que possam estar relacionadas, identificando a intensidade e o tipo de relação com o coeficiente R de Pearson.

O procedimento utilizado para caracterização mecânica foi o normatizado pelo DNIT 134/2017-ME “Pavimentação – Solos – Determinação do módulo de resiliência – Método de ensaio” e para classificação do material foi utilizada a metodologia MCT do DNIT – ME - 228/1994 “Compactação em equipamento miniatura (MCT)” e DNIT – ME 256/1994 “Determinação da perda de massa por imersão”. Todos os ensaios de MR foram realizados na umidade ótima e frequência de 1 Hz. Já as energias utilizadas foram de acordo com as camadas da estrutura do pavimento a que estes materiais seriam destinados. As Tabelas 2 e 3 apresentam, respectivamente, um resumo com as normas utilizadas para classificação e determinação das propriedades dos materiais, e um resumo com a descrição de cada material.

As correlações realizadas foram do tipo linear separando as amostras para duas distintas análises, sendo uma delas considerando a delimitação transicional, com intuito de verificar se há relação entre o comportamento elástico do material e suas classificações no MCT. Realizaram-se correlações considerando a granulometria, a massa específica aparente seca, coeficientes do MCT e parâmetros de regressão do modelo composto do módulo de resiliência (segundo modelo indicado na Tabela 1).

Tabela 2: Normas utilizadas para caracterização dos solos deste trabalho

Ensaio de caracterização	Normas
Granulometria	NBR 7181/18
Curva de compactação: Hot e MEAS	NBR 7182/16
Módulo de Resiliência (MR)	DNIT 134/17
Compactação em equipamento miniatura (MCT)	DNER-ME 228/94
Determinação da perda de massa por imersão (MCT)	DNER-ME 256/94

*MEAS: Massa Específica Aparente Seca

Tabela 3: Resumo das caracterizações dos solos deste trabalho

Identificação	Hot (%)	MEAS (g/cm ³)	Energia	Pedregulho (%)	Areia (%)	Silte (%)	Argila (%)
NG ⁷ – 1	17,0	1,723	Normal	1	59	23	17
NG ⁷ – 2	21,5	1,621	Normal	7	31	52	10
NG ⁷ – 3	19,5	1,683	Intermediária	7	40	24	29
NG ⁷ – 4	21,5	1,675	Intermediária	1	32	18	49
NG ⁷ – 5	27,5	1,485	Normal	1	30	26	43
NG ¹ – 6	20,3	1,571	Intermediária	4	34	42	20
NG ¹ – 7	25,1	1,505	Intermediária	0	30	14	56
NG ¹ – 8	22,5	1,534	Intermediária	1	67	16	16
LG ¹ – 1	20,5	1,625	Intermediária	0	41	12	47
LG ¹ – 2	20,6	1,599	Intermediária	0	50	19	31
LG ¹ – 3	19,9	1,658	Intermediária	1	66	18	15
LG ¹ – 4	22,5	1,565	Intermediária	1	29	7	63
LG ¹ – 5	23,4	1,557	Intermediária	0	32	13	55
LG ¹ – 6	28,7	1,434	Intermediária	1	24	24	51
LG ¹ – 7	23,5	1,543	Intermediária	0	35	20	45
LG ¹ – 8	17,8	1,775	Intermediária	0	36	4	60

Nota: Escala ABNT para a divisão das frações

4. RESULTADOS E ANÁLISES

Na Tabela 4 apresenta-se um resumo de trabalhos da literatura, com valores de parâmetros do modelo composto de Módulo de Resiliência para diferentes solos brasileiros argilosos com sua respectiva classificação MCT com o intuito de identificar padrões quanto aos MR e contribuir para o banco de dados nacional.

Tabela 4: Parâmetros do modelo composto de MR de solos argilosos na literatura (Santos, 1998; Bezerra Neto, 2004; Takeda, 2006; Guimarães, 2009; Damo, 2016; Santos, 2016; Zago, 2016; Norback, 2018).

Classificação MCT: NG ⁷				Classificação MCT: LG ¹			
k ₁	k ₂	k ₃	R ²	k ₁	k ₂	k ₃	R ²
1037,8	0,28	-0,13	0,65	109,4	0,17	-0,68	0,90
381,7	0,21	-0,08	0,14	446,5	0,25	-0,08	0,85
43,0	0,12	-0,42	0,97	102,5	-0,09	-0,26	0,72
53,3	0,03	-0,49	0,97	838,0	0,15	-0,23	0,95
1005,2	0,96	-0,06	0,94	674,0	0,11	-0,28	0,99
1195,0	-0,07	-0,19	0,94	653,0	0,14	-0,33	0,99
1240,0	-0,01	-0,19	0,97	853,0	0,13	-0,33	0,99
974,0	-0,05	-0,12	0,95	867,0	0,09	-0,23	0,94
822,0	0,01	-0,29	0,99	1308,0	0,07	-0,34	0,98
963,0	0,00	-0,21	0,95	1275,0	0,08	-0,42	0,99
378,0	0,01	-0,13	0,92	746,0	0,05	-0,17	0,97
554,0	0,08	-0,17	0,96	1938,0	0,08	-0,34	0,99
1076,0	0,06	-0,24	0,97	106,0	0,07	-0,44	0,95
135,2	0,26	-0,85	0,85	548,0	0,14	-0,24	0,94
				700,0	0,96	-0,38	0,93
				216,0	0,25	-0,13	0,20
				76,4	0,31	-0,25	0,30
				624,3	0,64	-0,20	0,89
				484,4	0,49	0,07	0,80
				224,0	0,17	-0,44	0,90
				181,0	0,32	-0,53	0,92
				757,1	0,43	-0,11	0,71
				1140,7	0,37	-0,04	0,44
				941,1	0,29	-0,15	0,71

Da Tabela 4, pode-se perceber que dos 38 solos há um predomínio de solos lateríticos argilosos analisados. Além disso, desta tabela é possível observar padrões quanto aos parâmetros: em sua maioria k_2 é positivo e k_3 negativo, com exceção de 4 solos.

A Figura 2 mostra a classificação dos materiais analisados neste trabalho. Os solos classificados como do tipo LG' são solos argilosos de comportamento laterítico que surgem de um processo intenso de intemperismo e tem predominância dos argilominerais do tipo 1:1 como a caulinita e goethita. Quando a composição mineralógica indica argilominerais do tipo 1:2 como a illita e montmorilonita espera-se que estes solos sejam classificados como não lateríticos (Nogami e Villibor, 1995).

Vertamatti (1988) observou que alguns solos classificados como LG' apresentaram-se como tipicamente arenosos finos quando situados em região de fronteira (LA' – LG'), e solos de transição NG'- NS' envolveram solos de características argilosas e silto arenosas. O autor ainda propõe uma divisão para os solos de caráter argiloso (NG' ou LG') em fase incipiente de evolução pedológica. Estas áreas de solos transicionais estão hachuradas na Figura 2.

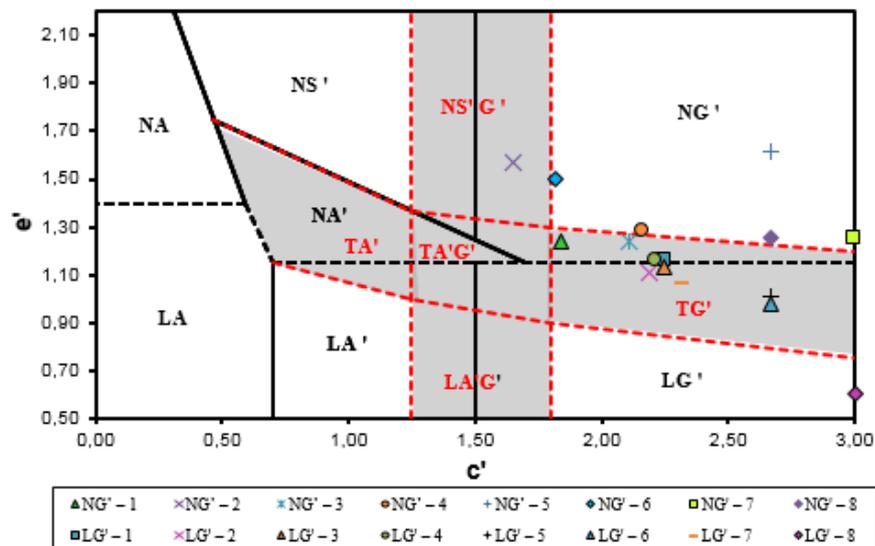


Figura 2: Localização dos solos deste estudo nos ábacos propostos por Nogami e Villibor (1981) e Vertamatti (1988)

Para interpretação dos resultados dividiu-se os solos argilosos em dois grupos: Grupo 1 separado em lateríticos e não lateríticos, e Grupo 2 que englobam além dos argilosos lateríticos (LG') e não lateríticos (NG') os solos transicionais com representação TG' (transicional argiloso) e NS'G' (solo silto-argiloso não laterítico). A Tabela 5 contém os valores de cada parâmetro (c' , d' , Pi e e') e sua respectiva classificação.

Os solos LG' – 1 e LG' – 4, localizados sobre a fronteira NG' e LG' do gráfico MCT, apresentam curvas de PI *versus* Mini MCV e umidade *versus* Mini MCV decrescentes entre Mini MCV 10 e 15, indicando comportamento laterítico de acordo com Nogami e Villibor (1995), e assim foi considerado nesta pesquisa, passando para a classificação de LG'. Vale salientar que dos 16 solos, 6 são não transicionais.

Na Tabela 6 estão os materiais nas suas diferentes classificações e seus respectivos resultados de MR, incluindo os parâmetros de regressão para o modelo composto.

Tabela 5: Parâmetros da metodologia MCT de classificação para os solos deste trabalho

Grupo 1	Grupo 2	c'	Pi (%)	d'	e'
NG' - 1	TG'	1,83	150	45,7	1,25
NG' - 2	NS'G'	1,64	298	20,2	1,58
NG' - 3	TG'	2,10	117	25,8	1,25
NG' - 4	NG'	2,15	125	22,8	1,29
NG' - 5	NG'	2,66	90	5,9	1,62
NG' - 6	NG'	1,81	323	83,3	1,51
NG' - 7	NG'	2,99	130	29,5	1,26
NG' - 8	NG'	2,66	170	66,7	1,26
LG' - 1	TG'	2,24	125	60,0	1,17
LG' - 2	TG'	2,18	118	85,7	1,12
LG' - 3	TG'	2,24	130	102,5	1,14
LG' - 4	TG'	2,20	130	68,8	1,17
LG' - 5	TG'	2,66	100	291,7	1,02
LG' - 6	TG'	2,66	82	142,9	0,99
LG' - 7	TG'	2,31	95	75,0	1,07
LG' - 8	LG'	3,00	0	89,3	0,61

Tabela 6: Parâmetros de regressão do modelo composto dos solos deste trabalho.

Grupo 1	Grupo 2	k ₁	k ₂	k ₃	R ²	MR _{médio}	MR _{mín}	MR _{máx}
NG' - 1	TG'	293,0	0,39	-0,50	0,68	304	186	568
NG' - 2	NS'G'	99,2	0,35	-0,59	0,55	146	81	343
NG' - 3	TG'	135,2	0,26	-0,65	0,85	303	110	390
NG' - 4	NG'	109,4	0,17	-0,68	0,90	353	124	476
NG' - 5	NG'	16,2	0,37	-1,28	0,93	183	54	599
NG' - 6	NG'	44,04	0,01	-0,52	0,37	142	66	534
NG' - 7	NG'	248,88	0,32	-0,54	0,43	350	159	772
NG' - 8	NG'	370,71	0,30	-0,46	0,56	458	211	868
LG' - 1	TG'	309,97	0,34	-0,46	0,68	334	192	562
LG' - 2	TG'	207,60	0,15	-0,40	0,47	338	208	821
LG' - 3	TG'	315,45	0,32	-0,43	0,50	330	169	585
LG' - 4	TG'	147,52	0,19	-0,56	0,63	300	148	645
LG' - 5	TG'	149,40	0,30	-0,58	0,52	245	93	608
LG' - 6	TG'	123,74	0,36	-0,66	0,63	221	89	499
LG' - 7	TG'	283,04	0,28	-0,49	0,63	388	226	738
LG' - 8	LG'	430,2	0,24	-0,42	0,95	567	313	789

Observando a Tabela 6, tem-se que, para o Grupo 1, os maiores MRs foram para os solos de classificação LG' que apresentou em sua maioria $MR_{médio} > 300$ MPa. Comparando-se os valores dos MR para as classificações no Grupo 2, os solos ficam melhor divididos: os solos transicionais TG' ficaram em sua maioria dentro de uma faixa média entre 200 e 300 MPa, enquanto o NS'G', assim classificado pela MCT-M e NG' pela classificação MCT tradicional, teve sua reclassificação coerente por ter apresentado um MR abaixo dos demais NG'. Verifica-se também que o solo NG' - 6, que se encontra em região de fronteira (NG' e NS'G') apresenta valor de MR próximo ao solo classificado como NS'G'. O solo classificado em ambos ábacos como LG' (LG' - 8), podendo ser chamado de LG' puro, foi aquele que apresentou maior MR. Esta análise leva a concluir que a classificação com o ábaco de solos transicionais pode indicar melhor o comportamento dos solos lateríticos. Esta tendência também foi verificada em estudos de Vertamatti (1988) e Castro (2002).

A Tabela 7 contém um apanhado dos parâmetros dos materiais apresentados na Tabela 6

agrupados em: média, máximo, e mínimo. Os parâmetros variaram bastante, não seguindo um padrão, sendo somente o k_3 para o Grupo 1 que apresentou pequena variação.

Tabela 7: Síntese dos parâmetros de regressão para modelo composto de MR dos solos deste trabalho.

Grupo 1									
	k_1			k_2			k_3		
	Média	Máximo	Mínimo	Média	Máximo	Mínimo	Média	Máximo	Mínimo
NG'	164,58	370,71	16,20	0,27	0,39	0,01	-0,65	-0,46	-1,28
LG'	245,87	430,20	123,74	0,27	0,36	0,15	-0,50	-0,40	-0,66
Grupo 2									
	k_1			k_2			k_3		
	Média	Máximo	Mínimo	Média	Máximo	Mínimo	Média	Máximo	Mínimo
NG'	157,85	370,71	16,20	0,23	0,37	0,01	-0,70	-0,46	-1,28
LG'		430,2			0,24			-0,42	
TG'	218,32	315,45	123,74	0,29	0,39	0,15	-0,53	-0,40	-0,66
NS'G'		99,2			0,35			-0,59	

As correlações foram realizadas por meio de *software* estatístico. As melhores correlações nas tabelas são apresentadas em destaque na cor vermelha. A correlação total desconsiderando os 3 solos que não tiveram sua granulometria determinada está na Tabela 8 e as correlações de todos os materiais sem considerar suas granulometrias estão na Tabela 9. No geral, observaram-se correlações com intensidades próximas e mesmas relações quanto aos sinais. As variáveis d' e k_2 não apresentaram nenhuma correlação significativa, já c' passou a apresentar correlação com e' e a correlação entre MEAS e e' diminuiu quando somados os 3 materiais que não se tem dados da granulometria.

Avaliando por classificações do ábaco MCT (Figura 2), mais 7 matrizes de correlações foram analisadas dentro dos grupos de identificação 1 e 2, com e sem granulometria. A Tabela 10 contém o resumo das melhores correlações para NG', LG', e TG'.

Tabela 8: Matriz de correlação de 13 solos deste trabalho incluindo a granulometria de cada um.

	MEAS	Areia	Silte	Argila	c'	Pi	d'	e'	k_1	k_2	k_3
MEAS	1,00										
Areia	0,35	1,00									
Silte	-0,14	-0,13	1,00								
Argila	-0,20	-0,65	-0,67	1,00							
c'	-0,31	-0,16	-0,65	0,63	1,00						
Pi	-0,10	0,05	0,81	-0,66	-0,71	1,00					
d'	-0,18	-0,06	-0,26	0,26	0,28	-0,21	1,00				
e'	-0,29	-0,05	0,72	-0,51	-0,52	0,73	-0,50	1,00			
k_1	0,42	0,59	-0,58	0,01	0,35	-0,42	0,06	-0,66	1,00		
k_2	-0,12	0,13	-0,07	-0,03	0,25	-0,32	-0,02	-0,02	0,25	1,00	
k_3	0,39	0,42	-0,22	-0,15	-0,14	0,09	0,26	-0,52	0,66	-0,25	1,00

Tabela 9: Matriz de correlação dos parâmetros de módulo de resiliência e coeficientes da classificação MCT para os 16 solos finos argilosos deste trabalho.

	c'	Pi	d'	e'	k ₁	k ₂	k ₃
c'	1,00						
Pi	-0,71	1,00					
d'	0,28	-0,21	1,00				
e'	-0,52	0,73	-0,50	1,00			
k ₁	0,35	-0,42	0,06	-0,66	1,00		
k ₂	0,25	-0,32	-0,02	-0,02	0,25	1,00	
k ₃	-0,14	0,09	0,26	-0,52	0,66	-0,25	1,00

Tabela 10: Resumo dos coeficientes que apresentaram maior correlação para as classificações individualmente analisadas com e sem granulometria.

		NG'		LG'		TG'
MEAS	c'	-0,71 ^{*1**1} ; -0,66 ^{*2,**2}	Silte	-0,69 ^{*1}	Areia	0,78 ^{*2}
	k ₂	-0,61 ^{*2,**2}	k ₁	0,86 ^{*1} ; 0,86 ^{**1}	Argila	-0,73 ^{*2}
			k ₃	0,80 ^{*1} ; 0,80 ^{**1}	c'	-0,84 ^{*2,**2}
					Pi	0,85 ^{*2,**2}
					e'	0,89 ^{*2,**2}
Areia	Argila	-0,53 ^{*1} ; -0,71 ^{*2}	Argila	-0,90 ^{*1}	Argila	-0,91 ^{*2}
	d'	0,51 ^{*1} ; 0,51 ^{*2}	k ₃	0,74	c'	-0,64 ^{*2}
	k ₁	0,81 ^{*1} ; 0,77 ^{*2}			Pi	0,71 ^{*2}
	e'	-0,53 ^{*1}			e'	0,53 ^{*2}
					k ₁	0,70 ^{*2}
					k ₃	0,68 ^{*2}
Silte	c'	-0,73 ^{*1} ; -0,76 ^{*2}	c'	-0,64 ^{*1}	Argila	-0,60 ^{*2}
	Pi	0,83 ^{*1} ; 0,78 ^{*2}	Pi	0,58 ^{*1}		
	e'	0,74 ^{*1} ; 0,73 ^{*2}	e'	0,62 ^{*1}		
	k ₁	-0,56 ^{*1} ; -0,68 ^{*2}	Argila	-0,56 ^{*1}		
	k ₂	-0,72 ^{*2}				
Argila	c'	0,67 ^{*1}	c'	0,50 ^{*1}	c'	0,62 ^{*2}
	Pi	-0,64 ^{*1} ; -0,67 ^{*2}			Pi	-0,53 ^{*2}
	d'	-0,72 ^{*1} ; -0,83 ^{*2}			e'	-0,52 ^{*2}
	Silte	-0,60 ^{*1}			k ₁	-0,53 ^{*2}
c'	Pi	-0,63 ^{*1**1} ; -0,72 ^{*2,**2}	Pi	-0,91 ^{*1,**1}	Pi	-0,86 ^{*2**2}
	k ₁	0,54 ^{*2,**2}	e'	-0,92 ^{*1,**1}	d'	0,79 ^{*2**2}
	k ₂	0,92 ^{*2,**2}	k ₁		e'	-0,92 ^{*2**2}
Pi	d'	0,89 ^{*1} ; 0,55 ^{*1,**1} ; 0,90 ^{*2,**2}	e'	0,99 ^{*1,**1}	e'	0,85 ^{*2**2}
	k ₂	-0,79 ^{*1} ; -0,86 ^{*2,**2}	k ₁	-0,51 ^{*1,**1}	d'	-0,51 ^{*2**2}
	k ₃	0,54 ^{*2,**2}				
d'	k ₂	-0,58 ^{*1**1} ; -0,66 ^{*2,**2}	k ₃	-0,56 ^{*1}	e'	-0,75 ^{*2**2}
	k ₃	0,65 ^{**1} ; 0,74 ^{*2,**2}				
e'	k ₁	-0,75 ^{*1**1} ; -0,81 ^{*2,**2}	k ₁	-0,51 ^{*1,**1}		
	k ₃	-0,58 ^{*1**1} ; 0,74 ^{*2,**2}				

* Análise com granulometria; ** Análise sem granulometria; ¹ Grupo 1; ² Grupo 2

As correlações passaram a ser diferentes quando analisadas por classificação. Vale salientar que não foi possível correlacionar individualmente as variáveis para as classificações NS'G' e LG' no Grupo 2, visto os poucos dados, insuficientes para análise.

A partir das informações reunidas na Tabela 10, pode-se concluir que, para os solos

estudados, a parcela de areia apresentou correlação positiva (quando duas variáveis movem-se juntas na mesma direção) em todos os parâmetros de MR, a porcentagem de silte apresentou uma tendência contrária de aumento, ou seja, correlação negativa (quando as variáveis movem-se em direções opostas) para os parâmetros k_1 e k_2 nos grupos NG'. A parcela de argila se correlacionou de forma negativa com os parâmetros k_1 para os solos classificados como TG'.

Com relação aos parâmetros da classificação MCT o c' quando foi correlacionado com algum dos parâmetros de MR foi positivo e em nenhuma das análises houve correlação deste coeficiente com o parâmetro k_3 . A P_i apresentou correlação de maneira negativa com os parâmetros k_1 e k_2 e positiva com o parâmetro k_3 . O coeficiente e' em nenhuma das análises realizadas se correlacionou com o parâmetro k_2 e quando se correlaciona com k_1 e k_3 apresenta uma correlação negativa. Verifica-se que o parâmetro da classificação MCT que apresentou a maior quantidade de parâmetros correlacionados foi o parâmetro e' , com todos os solos classificados como não transicionais.

Os solos classificados como TG' nesta pesquisa não apresentaram correlações com os parâmetros MCT. Entretanto a classificação NG' do grupo 2 apresentou melhores correlações com os parâmetros MCT quando comparados com os solos NG' do grupo 1. Adicionalmente foi possível identificar maiores R entre os parâmetros k_2 e c' , com um R de 0,92 para a classificação NG' do grupo 2 e P_i também com o parâmetro k_2 , apresentando um R de -0,86 para o mesmo grupo de solos. Este fato corrobora com a ideia de que a classificação com o ábaco de solos transicionais corresponde melhor com o comportamento elástico dos solos deste estudo.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esta pesquisa visou analisar o comportamento elástico dos materiais no equipamento triaxial de cargas repetidas e buscou correlacionar o Módulo de Resiliência com as classificações MCT proposta por Nogami e Villibor e a de transicional por Vertamatti, comparando-as. Foram observados MR mais elevados para classificação LG' tanto para proposição de Nogami e Villibor, em sua maioria, quanto para a de Vertamatti; e que o NS'G' seria um NG' com menor rigidez, o que faz sentido. No geral, as análises realizadas permitiram verificar a existência de correlação entre algumas variáveis e possibilitaram identificar que a proposição considerando solos transicionais descreveu de forma mais satisfatória os comportamentos elásticos dos solos do que quando delimitados em regiões pela proposta MCT inicial.

Além disso, esta pesquisa contribuiu com o novo método de dimensionamento brasileiro que tem base mecanicista considerando as deformações elásticas dos solos, e para tal forneceu valores de parâmetros do modelo composto de módulo de resiliência de 16 solos argilosos. Ademais, mais solos estão sendo ensaiados com o mesmo procedimento de módulo de resiliência e MCT o que permitirá trabalhos futuros com novas correlações e melhor entendimento quanto ao comportamento destes materiais para aplicação em camadas de pavimento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alvarez Neto, L. (1998) *Proposta de um método de dimensionamento de pavimentos flexíveis para vias de baixo volume de tráfego com a utilização de solos lateríticos*. Tese de Doutorado. USP. São Paulo, SP.
- Ba, M., Fall, M., Sall, O. A., et al. (2012) *Effect of Compaction Moisture Content on the Resilient Modulus of Unbound Aggregates from Senegal (West Africa)*. *Geomaterials*, 2, 19-23.
- Bernucci, L. L. B. (1995) *Considerações sobre o dimensionamento de pavimentos utilizando solos lateríticos*

- para rodovias de baixo volume de tráfego. Tese de Doutorado. Escola Politécnica, USP. São Paulo, SP.
- Bernucci, L. B., Motta, L. M. G., Ceratti, J. A. P., et al. (2010) *Pavimentação Asfáltica: formação básica para engenheiros*. 4. ed., v.1, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro: Petrobras, ABEDA
- Bezerra Neto, R. S. (2004) *Análise comparativa de pavimentos dimensionados através dos métodos empírico do DNER e mecanístico e proposta de um catálogo simplificado de pavimentos para a região de Campo Grande (MS)*. Tese de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos, EESC. São Carlos, SP.
- Castro, B. A. C. (2002) *Caracterização geotécnica de solos da região central de minas gerais para aplicação em obras rodoviárias*. Tese de Mestrado. Programa de Engenharia Civil da COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro.
- Damo, T. P. (2016) *Classificação dos solos e rochas sedimentares da região de Santa Maria/RS segundo a metodologia MCT*. Tese de Mestrado. Programa de Engenharia Civil da UFSM. Santa Maria, RS.
- Guimarães, A. C. R. (2001) *Estudo de Deformação Permanente em Solos e Teoria do Shakedown Aplicada a Pavimentos Flexíveis*. Tese de Mestrado. Programa de Engenharia Civil da COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro.
- Guimarães, A. C. R. (2009) *Um Método Mecânico-Empírico para a Previsão da Deformação Permanente em Solos Tropicais Constituintes de Pavimentos*. Tese de Doutorado. Programa de Engenharia Civil da COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro, Brasil.
- Lekarp, F., Isacsson, U., e Dawson, A. (2000) *State of the art. I: Resilient response of unbound aggregates*. Journal of transportation engineering, 126(1), 66-75.
- Lima, C. D. A., da Motta, L. M. G., e Guimarães, A. C. R. (2017) *Estudo da deformação permanente de britas granito-gnaíse para uso em base e sub-base de pavimentos*. Transportes, 25(2), 41-52.
- Lima, C. D. A.; Motta, L. M. G. ; Guimarães, A. C. R.; Aragão, F. T. S. (2018) *Contribution to the Study of Brazilian Tropical Soils as Pavement Materials*. In: 3th ISAP (International Society for Asphalt Pavements) Conference on Asphalt Pavements. Fortaleza, Ceará. Brasil.
- Marangon, M. (2004) *Proposição de Estruturas Típicas de Pavimentos para Região de Minas Gerais Utilização Solos Lateríticos Locais a Partir da Pedologia, Classificação MCT e Resiliência*. . Tese de Doutorado. Programa de Engenharia Civil da COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro, Brasil.
- Medina, J. e Motta, L. M. G. (2015) *Mecânica dos Pavimentos*. 3ª ed. Editora Interciências. Rio de Janeiro, RJ.
- Medrado, W. A. (2009) *Caracterização geotécnica de solo da região norte de Minas Gerais para aplicação em obras rodoviárias*. Tese de Mestrado Profissional em Engenharia Geotécnica. UFOP. Ouro Preto, MG.
- Nogami, J. S. e Villibor, D. F. (1995). *Pavimentação de baixo custo com solos lateríticos*. Ed. Villibor. São Paulo.
- Norback, C. (2018) *Caracterização do módulo de resiliência e da deformação permanente de três solos e misturas solos-brita*. Tese de Mestrado. Programa de Engenharia Civil da COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro.
- Pereira, P. S., Marangon, M., Motta, L. M. G. (2008) *Tentativa de Correlação entre Módulo de Resiliência e Parâmetros da Classificação*. In: XIV COBRAMSEG. Búzios, RJ.
- Preussler, E. S. (1978) *Ensaio Triaxiais Dinâmicos de um Solo Arenoso*. Tese de Mestrado. Programa de Engenharia Civil da COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro.
- Santos, J. D. G. (1998) *Contribuição ao estudo dos solos lateríticos granulares como camada de pavimento*. Tese de Doutorado. Programa de Engenharia Civil da COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro, Brasil.
- Santos, T. A. (2016) *Avaliação da resistência e da deformabilidade de quatro solos empregados em subleitos rodoviários no estado do Rio Grande do Sul*. Tese de Mestrado. UFSM. Santa Maria, RS.
- Takeda, M. C. (2006) *A influência da variação da umidade pós-compactação no comportamento mecânico de solos de rodovias do interior paulista*. Tese de Doutorado. USP. São Paulo, SP.
- Vertamatti, E. (1988) *Contribuição ao conhecimento geotécnico de solos da Amazônia com base na investigação de aeroportos e metodologias MCT e resiliente*. Divisão de Pós-Graduação do Instituto Tecnológico de Aeronáutica. São José dos Campos, SP.
- Villibor D. F. e Alves D. M. L. (2017). *Classificação de solos tropicais de granulação fina e grossa*. Revista Pavimentação. ABPV, Rio de Janeiro, v. 46, p. 16-37.
- Yukio, C., Ribeiro, M. R. B. M., Cavalcante, A. C. , et al (2016) *Análise Mecânica da Aplicabilidade de Solos em Sublastro de Pavimentos Ferroviários por meio de parâmetros obtidos por correlações com a classificação MCT para solos da Região Norte do Brasil*. In: XVIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica.
- Zago, J. P. (2016) *Avaliação de Quatro Solos Tropicais para Sublastro da Estrada de Ferro Carajás*. Tese de Mestrado. UFSM. Santa Maria, RS.

Ana Elza Dalla Roza (ana.roza@unemat.br)

Caroline Dias Amancio de Lima (carolinedias@coc.ufrj.br)

Laura Maria Goretti da Motta (laura@coc.ufrj.br)

Câmpus Aquarela - Avenida Francisco de Aquino Correa, S/n, sala B6, Bairro Aquarela das Artes, Sinop – MT.
Centro de Tecnologia - Rua Horácio Macedo, Bloco G, 2030 - 101 - Cidade Universitária, Rio de Janeiro – RJ.