

ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE A CLASSIFICAÇÃO MCT E O MÓDULO DE RESILIÊNCIA DE SOLOS DA REGIÃO DE SANTA MARIA/RS

Lucas Eduardo Dornelles

Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Thaís Aquino dos Santos

Universidade Federal de Santa Maria

Marina Frederich de Oliveira

Universidade de São Paulo

Taiana Poerschke Damo

Universidade Federal de Santa Maria

Rinaldo José Barbosa Pinheiro

Universidade Federal de Santa Maria

RESUMO

É fundamental para o desenvolvimento econômico do país a existência de um sistema de infraestrutura de transportes de qualidade. A garantia da vida útil de projeto de estruturas de pavimento depende da consideração das condições ambientais e das peculiaridades do solo local, que atualmente não são adequadamente consideradas pelo método de dimensionamento de pavimentos. Assim, essa pesquisa teve como objetivo a comparação entre as classificações MCT (Miniatura, Compactada, Tropical) e valores obtidos de módulo de resiliência para doze amostras de solo da região de Santa Maria, Rio Grande do Sul. Constatou-se, como esperado, que há diferenças entre a classificação de solos TRB/AASHTO e MCT. Ainda, foram notadas diferenças entre módulo de resiliência e a classificação resiliente em alguns casos. Entre solos da mesma formação geológica, foi possível notar variação no valor do módulo de resiliência que pode ser explicada pela diferença granulométrica e pela presença de diferentes argilominerais nas amostras. Salienta-se a importância de mais estudos desenvolvidos na área de caracterização e avaliação do comportamento de solos tropicais, como forma de melhor utilizá-los e mais eficientemente prever seu desempenho em estruturas de pavimentos.

ABSTRACT

The economic development of a country depends on a transport infrastructure system with quality. The useful life of a pavement structure project must consider environmental conditions and peculiarities of the local soil, which has not been considered nowadays in the Brazilian design method. This research aimed to compare classification MCT (Miniature, Compact, Tropical) and values obtained to resilient modulus to twelve types of soil of Santa Maria's region, in Rio Grande do Sul. It was found, as expected, differences between the classification system TRB/AAHSTO and MCT. It was noticed differences between resilient modulus and the resilient classification in some cases. Between soils of the same geological formation, it was noticed variation of resilient modulus that might be explained by the granulometric difference and by the presence of different clay minerals in the samples. The importance of development of studies in the area of characterization and evaluation of the behavior of tropical soils is pointed as a better way to use and efficiently predict its performance in pavement structures.

1. INTRODUÇÃO

A existência de um sistema de infraestrutura de transportes eficiente e de qualidade têm papel fundamental no desenvolvimento econômico de um país. Além de garantir a integração e o acesso da população às suas necessidades como bens de consumo e serviços, tal configuração contribui para a geração de empregos e distribuição de renda.

A Pesquisa de Rodovias (CNT, 2017), importante fonte de consulta para auxílio no planejamento da manutenção das rodovias e formulação de políticas públicas ajustadas às necessidades dos transportadores rodoviários avaliou mais de 100.000km de rodovias pavimentadas em todo o território brasileiro. A partir da avaliação dos resultados da pesquisa, foi constatado que 61,8% da extensão avaliada apresentaram algum tipo de deficiência no pavimento, na sinalização ou na geometria da via. Isso acaba por afetar o desempenho operacional da via e a segurança dos usuários.

A partir de investimentos dos setores público e privado, a malha rodoviária pavimentada segue crescendo ano após ano no Brasil. Mesmo com este crescimento, o Brasil ainda possui uma rede de infraestrutura mais obsoleta em comparação com países com extensão territorial compatíveis como Rússia, Estados Unidos, Austrália e China.

O monitoramento de defeitos e manutenção das rodovias possui papel vital para a conservação dos pavimentos, garantido a vida útil de projeto. É importante que o dimensionamento das camadas constituintes do pavimento seja realizado considerando as peculiaridades do solo local, assim como as condições ambientais e de uso da via (LIMA *et al.*, 2015).

O método de dimensionamento de pavimentos em vigência no Brasil utilizado pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) é baseado em experiências e procedimentos realizados nos Estados Unidos. O método possui alguns benefícios, uma vez que se baseia na condição de ruptura do solo no estado crítico, ou seja, no estado de saturação completa. Entretanto, nesta metodologia não são consideradas as deformações geradas a partir das solicitações cíclicas das cargas na superfície do pavimento. Estas acabam por gerar graves problemas na estrutura do pavimento.

Além disso, o sistema mencionado foi desenvolvido a partir das características geotécnicas dos materiais locais dos Estados Unidos. Ao contrário do Brasil, país predominantemente tropical, estes solos são originados na sua maioria em regiões de clima subtropical e temperado, apresentando comportamento diferente dos solos tropicais brasileiros.

Neste contexto, identifica-se uma necessidade de desenvolvimento de novos métodos e abordagens para avaliar o comportamento das camadas do pavimento a partir das solicitações causadas pelo tráfego de veículos. No Brasil, muitos estudos têm sido realizados com o intuito de incorporar o módulo de resiliência dos materiais, inclusive dos solos de subleito, nos projetos rodoviários, de modo a desenvolver metodologias mais eficientes para o dimensionamento de pavimentos.

Assim, este estudo tem como objetivo a comparação entre a classificação obtida pela Metodologia MCT e os valores obtidos para módulo de resiliência no ensaio triaxial de cargas repetidas de doze solos da região de Santa Maria/RS. Visa-se um melhor entendimento da relação entre as características dos materiais geotécnicos locais e suas deformações resilientes, uma vez que estas estão entre as maiores componentes da deformação total em pavimentos.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Solos tropicais e Classificação MCT

Nogami e Villibor (1994) relatam que a utilização de solos tropicais em obras rodoviárias no Brasil teve início na década de 1930. Além disso, os autores descrevem que, devido às peculiaridades geológicas e geotécnicas destes materiais, a aplicação das classificações tradicionais fica restrita, uma vez que a hierarquização dos solos para uso em pavimentação não corresponde ao real desempenho em campo.

A partir da necessidade de uma classificação mais condizente com a realidade dos solos tropicais brasileiros, Nogami e Villibor (1981) desenvolveram a Metodologia MCT (Miniatura,

Compactada, Tropical). Baseada em ensaios com corpos de prova compactados em miniatura, este sistema permite identificar o comportamento laterítico ou não laterítico dos solos.

Além disso, a MCT permite avaliar diferentes propriedades dos solos, como resistência, deformabilidade e permeabilidade. A Metodologia é composta por dois ensaios básicos classificatórios, o Mini-MCV e Perda de Massa por Imersão. Além destes, fazem parte do sistema alguns ensaios complementares como Permeabilidade, Infiltrabilidade, Mini-CBR, Expansão e Contração.

Solos lateríticos, quando compactados sob determinadas condições de umidade e energia, adquirem boa capacidade de suporte e pequena perda desta capacidade quando imersos em água. É importante ressaltar que em obras de pavimentação tem-se o interesse pelo conhecimento das características e propriedades dos materiais na condição compactada. Santana e Gontijo (1987) relatam que os solos lateríticos, em geral, apresentam valor de CBR relativamente alto e baixa expansão, elevados Limites de Liquidez (LL) e Índice de Plasticidade (IP) e um alto valor de módulo resiliente.

Na Metodologia MCT, os solos de comportamento laterítico são designados pela letra L e dividem-se em três grupos: LA – areia laterítica; LA' – solo arenoso laterítico; e LG' – solo argiloso laterítico.

Conforme Nogami e Villibor (1981), solos saprolíticos geralmente apresentam um valor de capacidade de suporte abaixo das previsões dos índices classificatórios ou dos grupos tradicionais. São comumente expansivos e geralmente considerados inadequados para uso em pavimentação.

Solos de comportamento não laterítico são designados pela letra N e são subdivididos em quatro grupos: NA – 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 (solo arenoso); NS' – solo siltoso não laterítico; NG' – solo argiloso não laterítico.

2.2. Módulo de Resiliência

Para Erlingsson (2004), o sistema de infraestrutura de transporte deve constituir um dos principais investimentos que toda sociedade moderna deve priorizar. Desse ponto de vista, pode-se afirmar que é de grande importância basear as decisões em um método de projeto bem fundamentado e ter uma boa visão geral da manutenção necessária durante a vida útil do sistema, a fim de minimizar os custos de construção e manutenção. Os pavimentos devem, portanto, ser adequadamente projetados, de modo a apresentar um bom desempenho ao longo de sua vida útil.

Atualmente, os antigos métodos de dimensionamento de pavimentos flexíveis empíricos, baseados em dados e experiências acumuladas para condições específicas de estrutura, clima e materiais de pavimentação, limitados para regiões onde foram desenvolvidos, estão sendo substituídos pelos métodos mecanístico-empíricos. O módulo de resiliência dos materiais de pavimentação constitui um parâmetro fundamental sob a perspectiva da abordagem mecanístico-empírica, visto condicionar a vida útil das camadas superficiais ao fenômeno de fadiga.

Por definição, o módulo de resiliência (MR) é o parâmetro que caracteriza o comportamento resiliente dos materiais sob carregamento cíclico. Segundo Li e Selig (1994), o MR também é reconhecido por apresentar uma noção da rigidez elástica do material: quanto mais deformável, menor será o seu módulo de resiliência.

A determinação do módulo de resiliência por meio de ensaios triaxiais de cargas repetidas (ETCR) permite caracterizar mecanicamente os materiais utilizados nas diversas camadas do pavimento, incluindo o solo do subleito, sob várias condições de teor de umidade, densidade e o estado de tensões. Por esse motivo é considerado um dos elementos chave para a análise e design de pavimentos, amplamente utilizado nos métodos de dimensionamento internacionais, constituindo um dos principais dados de entrada no método de dimensionamento nacional (MeDiNa), atualmente em desenvolvimento.

De acordo com Lekarp *et al.* (2000), o MR depende de vários fatores, como textura e mineralogia do material, estado de tensões atuante, energia de compactação, peso específico, número de solicitações e teor de umidade. No Brasil, onde há o predomínio de ambiente tropical, o estudo acerca das características resilientes de solos empregados em pavimentação é de suma relevância. Um dos principais sistemas de classificação tradicional, desenvolvido para fins de pavimentação (AASHTO), não descreve com precisão o comportamento dos solos tropicais. Nesse cenário, autores como Alvarez Neto (1998), Silva (2003) e Takeda (2006) buscaram correlações entre a gênese dos solos e seu caráter laterítico ou não laterítico (classificação MCT) com valores de módulo de resiliência típicos e médios.

3. METODOLOGIA

3.1. Etapa de campo

Inicialmente, foram escolhidos os pontos de coleta para posterior realização dos ensaios de laboratório. Todas as amostras foram coletadas na cidade de Santa Maria/RS. A escolha dos pontos de coleta foi realizada tendo como base o mapa geológico da região, que caracteriza as unidades geotécnicas da região, sendo definidos dois perfis típicos de solo de cada uma das seguintes unidades: Botucatu; Caturrita; Rosário do Sul; Santa Maria/Alemao e Santa Maria/Passo das Tropas. Além destes, foram contemplados também os solos da jazida Canabarro e do Distrito Industrial. A Tabela 1 apresenta as coordenadas geográficas e a nomenclatura adotada para cada material. A Figura 1 mostra a localização dos pontos de coleta.

Tabela 1: Informações sobre os locais de coleta das amostras em estudo

Amostra	Local de Coleta/Unidade Geotécnica - Jazida	Coordenadas do Ponto	
		Latitude Sul	Longitude Oeste
BOT1	Santa Maria (Botucatu)	29°40'12.2"	53°47'48.4"
BOT2		29°38'36,6"	53°50'30,9"
CAT1	Santa Maria (Caturrita)	29°41'58.0"	53°47'25.2"
CAT2		29°41'34.7"	53°47'04.9"
SC1	Santa Maria (Rosário do Sul)	29°46'38.0"	53°45'48.3"
SC2		29°46'02.2"	54°00'37.6"
ALE1	Santa Maria (Membro Alemao)	29°42'0.8"	53°47'28.1"
ALE2		29°42'26.8"	53°52'17.1"
PT1	Santa Maria (Membro Passo das Tropas)	29°44'41.5"	53°47'43.1"
PT2		29°42'58.9"	53°42'07.9"
RS	Santa Maria (Canabarro)	29°40'4.34"	53°58'09.41"
TR	Santa Maria (Distrito Industrial)	29°40'53.75"	53°52'29.58"

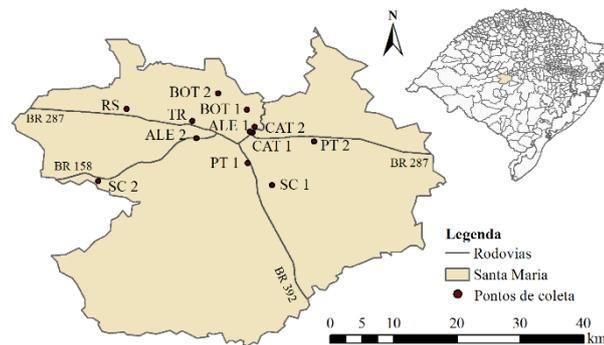


Figura 1: Localização dos pontos de coleta dos materiais em Santa Maria/RS

3.2. Etapa de laboratório

3.2.1 Caracterização geotécnica

A caracterização física dos solos estudados foi realizada através dos ensaios de análise granulométrica com e sem defloculante (ABNT NBR 7181/16), limites de Atterberg (ABNT NBR 6459/16 e NBR 7180/16) e peso específico real dos grãos (ABNT NBR 6508/16). A partir desta caracterização, foi possível classificar os materiais de acordo com a metodologia TRB-AASHTO.

Além destes, foi realizado também o ensaio de análise química completa, que permite analisar parâmetros como percentual de argila, classe textural, pH em água, teores de P e K disponíveis, presença de matéria orgânica, Al, Ca e Mg trocáveis. Além disso, permite também avaliar a saturação por bases e por Al, CTC efetiva e CTC pH 7,0.

3.2.2 Classificação MCT

Para classificar os solos de acordo com a Metodologia MCT são utilizados dois ensaios básicos classificatórios: Ensaio de Mini-MCV e Perda de Massa por Imersão.

O ensaio de Mini-MCV foi realizado de acordo com a normativa DNER-ME 258/94. Para cada solo estudado, cinco amostras com diferentes teores de umidade foram preparadas. Para a compactação, são aplicadas energias crescentes, visando a obtenção de um aumento sensível de densidade para os diferentes teores de umidade. Para cada série de golpes, é feita uma leitura da altura do corpo de prova com o auxílio de um extensômetro.

O coeficiente c' , utilizado na classificação MCT, é obtido a partir da curva de deformabilidade correspondente ao valor que mais se aproxima do Mini-MCV igual a 10. O valor representa o coeficiente angular da parte retilínea da curva de deformabilidade. Ele reflete a argilosidade do solo. Solos com valor de c' elevado, superior a 1,5, são caracterizados como argilas e solos argilosos, enquanto que valores de c' inferiores a 1,0 caracterizam areias e siltes não plásticos ou pouco coesivos. Os demais solos, como areias argilosas, areias siltosas, argilas siltosas e argilas arenosas estão compreendidas no intervalo entre 1,0 e 1,5.

Já o coeficiente d' é obtido a partir da inclinação da parte retilínea do ramo seco da curva de compactação, correspondente a 10 golpes do ensaio de Mini-MCV, em gráfico plotado que relaciona o Teor de Umidade (%) e a Massa Específica Aparente Seca (g/cm^3).

Após a realização do ensaio de Mini-MCV, é realizado o ensaio de Perda de Massa por Imersão, de acordo com a normativa DNER-ME 256/94. Os corpos de prova compactados são extraídos cerca de 10mm para fora do molde com o auxílio do extrator do equipamento de compactação. Os cinco corpos de prova são então dispostos em posição horizontal no tanque de submersão.

O ensaio de Perda de Massa por Imersão permite a obtenção do parâmetro P_i , relativo à porcentagem da massa seca antes saliente do corpo de prova. Com a realização dos dois ensaios classificatórios da MCT, é possível obter o parâmetro e' , calculado conforme a Equação 1. Este parâmetro relaciona-se ao caráter laterítico do solo. Com o índice e' e o coeficiente c' é possível plotar os pontos de cada solo no ábaco da MCT.

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

3.2.3 Classificação MCT-M

Com base em estudos com solos plúnticos da região da Amazônia, Vertamatti (1988) propõe um novo ábaco para classificação dos solos denominado MCT-M (M de modificado), que considera a existência de solos transicionais na classificação MCT, que ocupam a faixa intermediária entre os solos de comportamento laterítico e não laterítico.

O autor recomenda a determinação de um parâmetro P_i , considerando a massa despreendida multiplicada por uma constante adicional em função da forma de desagregação do solo. Os valores são $0,25 \times P_i$, quando há queda do bloco maciço; $0,5 \times P_i$, quando há queda parcial do bloco ou queda quando o bloco apresenta fissuras; e $0,75 \times P_i$, quando há queda fragmentada.

É válido ressaltar que esta classificação não é adotada como referência consagrada atualmente, sendo objeto de estudos, assim como nesta pesquisa.

3.2.4 Ensaio Triaxial de Cargas Repetidas

O módulo de resiliência é um parâmetro muito importante para avaliar as características mecânicas dos materiais, de modo que a realização do ensaio triaxial de cargas repetidas visou reproduzir em laboratório as condições impostas em campo. Seguiu-se as diretrizes do método de ensaio DNIT-ME 134/2010 (atualmente substituída pela norma DNIT-ME 134/2017, que ainda não havia sido publicada na data de realização deste estudo) e da AASHTO, TP46/94.

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Pavimentação da Universidade Federal do Rio Grande do Sul – LAPAV/UFRGS. Para cada solo em estudo foi moldado um corpo de prova na condição de umidade ótima de compactação, com valores de referência retirados da curva de compactação na energia Proctor Normal. Para a moldagem, utilizou-se um molde de metal tripartido com 10cm de diâmetro e 20cm de altura, envolto por uma membrana permeável. Com o auxílio computacional foram obtidos os valores de tensão desvio aplicada, deformação elástica e os módulos de resiliência para cada estado de tensões.

Na fase de condicionamento, o solo TR não resistiu ao último par de tensões (0,1029 – 0,309 MPa), optando-se por repetir o penúltimo par descrito na norma para tornar possível a realização do ensaio. Após 600 ciclos desta fase, o ensaio propriamente dito iniciava

automaticamente. A partir das características dos demais solos estudados, optou-se também por repetir o último par de tensões na fase de condicionamento.

Após a realização do ensaio para todos os solos e a correspondente obtenção dos módulos de resiliência em função dos pares de tensões descritos na norma, procedeu-se a análise e classificação conforme os modelos usuais presentes na literatura (tensão confinante, tensão desvio, invariante de tensões e modelo composto).

4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os resultados obtidos nos ensaios de análise granulométrica, limites de Atterberg, peso específico real dos grãos e capacidade de troca catiônica (CTC) estão apresentados na Tabela 2. Com estes valores, foi possível classificar os materiais estudados de acordo com o sistema classificatório SUCS e AASHTO.

Tabela 2: Resultados de ensaios obtidos para cada tipo de solo

Amostra	Massa específica dos grãos (g/cm ³)	Limites de Atterberg (%)		Granulometria (%)							Análise Química	Classificação	
				Com Defloculante/Sem Defloculante									
				LL	LP	IP	Argila	Silte	Areia Fina	Areia Média			
BOT1	2,698	NL	NP	0	8/0	2/8	64/66	19/19	7/7	0/0	10,5	SM	A2-4
BOT2	2,695	31	19	12	14/0	4/11	67/72	15/17	0/0	0/0	19,3	SC	A2-6
CAT1	2,670	NL	NP	0	0/0	10/21	56/42	34/36	0/1	0/0	9,1	SM	A2-4
CAT2	2,690	NL	NP	0	0/0	9/9	13/16	49/48	29/27	0/0	5,8	SM	A2-4
SC1	2,810	49	27	22	37/0	18/55	17/17	22/22	7/6	0/0	4,8	CL	A7-6
SC2	2,743	38	13	25	32/10	42/54	19/28	7/8	0/0	0/0	23,6	CL	A6
ALE1	2,725	29	18	11	14/0	52/21	21/31	9/27	3/19	1/2	36,7	CL	A6
ALE2	2,742	41	23	18	25/4	24/38	39/45	11/13	0/0	0/0	8,7	CL	A7-6
PT1	2,755	30	20	10	12/0	24/26	50/49	14/24	0/1	0/0	6,6	SC	A4
PT2	2,703	24	20	4	19/7	17/17	15/25	41/40	7/11	0/0	6,4	SM-SC	A4
RS	2,737	47	29	18	41/10	14/32	15/21	16/20	11/15	2/2	4,3	CL	A7-6
TR	2,720	39	20	19	30/12	13/27	18/16	26/29	12/15	1/1	4,6	SC	A6

Com base na classificação SUCS, as amostras SC, ALE e RS são identificadas como argilas inorgânicas de baixa e média plasticidade (CL). O sistema classificatório TRB enquadra as amostras SC1, ALE2 e RS no subgrupo A-7-6, que inclui materiais com elevados índices de plasticidade em relação aos limites de liquidez, estando sujeitos à elevadas mudanças de volume.

As amostras SC2, ALE1 e TR estão inseridas no subgrupo A-6, onde o solo típico é argiloso e plástico, sujeito a elevada mudança de volume entre os estados seco e úmido, não apresentando bom comportamento como subleito rodoviário. Conforme o sistema de classificação SUCS, as amostras BOT2, PT1 e TR são areias argilosas (SC). De acordo com a classificação TRB/AASHTO a amostra BOT2 se enquadra no subgrupo A-2-6, composta por areias com finos argilosos. Amostras PT1 e PT2 se enquadram no subgrupo A-4, que agrupa solos siltosos não plásticos ou moderadamente plásticos, porém divergem na classificação SUCS, já que a PT2 está compreendida no grupo SM-SC.

Segundo a SUCS, a amostra BOT1 e os solos provenientes da Formação Caturrita foram

designados como areias siltosas (SM), havendo concordância com a classificação TRB, que enquadra estes materiais no subgrupo A-2-4, representado pelos solos granulares finos siltosos, sendo considerados materiais de bom comportamento para emprego como subleito rodoviário.

Argilas de baixa atividade, com pouca ou nenhuma presença de matéria orgânica, apresentam valores de CTC entre 3 e 15 cmolc/dm³. Isso indica a presença do argilomineral caulinita, característico de solos não expansivos, na maioria dos materiais deste estudo. Somente as amostras BOT2, SC2 e ALE1 apresentaram uma CTC maior que 20 cmolc/dm³, indicando a presença do argilomineral illita.

A Tabela 2 indica valores nulos ou muito baixos de porcentagem de pedregulho, característico de solos finos, o que permite a utilização da classificação MCT. Os índices de classificação obtidos nos ensaios Mini-MCV e Perda de Massa por Imersão, segundo a proposta de Nogami e Villibor (1981), são apresentados na Tabela 3. A Figura 2 mostra o ábaco da classificação MCT com a indicação da posição dos solos em estudo.

Tabela 3: Índices de classificação MCT

Amostra	Índices Classificatórios MCT				Classif. MCT	Índices Classificatórios MCT-M				Classif. MCT-M
	c'	d'	Pi (%)	e'		c'	d'	Pi (%)	e'	
BOT1	0,44	10,43	257,00	1,65	NA	0,44	10,43	193,00	1,57	NA
BOT2	1,07	34,00	182,00	1,34	NA'	1,07	34,00	136,00	1,25	TA'
CAT1	-	-	-	-	NA	-	-	-	-	NA
CAT2	-	-	-	-	NA	-	-	-	-	NA
SC1	1,55	63,16	0,00	0,68	LG'	1,55	63,16	0,00	0,68	LA'G'
SC2	1,94	5,71	360,00	1,92	NG'	1,94	5,71	270,00	1,84	NG'
ALE1	1,33	32,00	190,00	1,36	NS'	1,33	32,00	142,50	1,27	TA'G'
ALE2	1,62	44,17	161,00	1,27	NG'	1,62	44,17	120,00	1,18	TA'G'
PT1	1,16	33,18	234,00	1,43	NS'	1,16	33,18	174,00	1,33	TA'
PT2	1,42	42,86	48,00	0,98	LA'	1,42	42,86	36,00	0,94	LA'G'
RS	1,77	80,00	47,00	0,90	LG'	1,77	80,00	47,00	0,90	LA'G'
TR	2,06	115,40	15,00	0,69	LG'	2,06	115,40	15,00	0,69	LG'

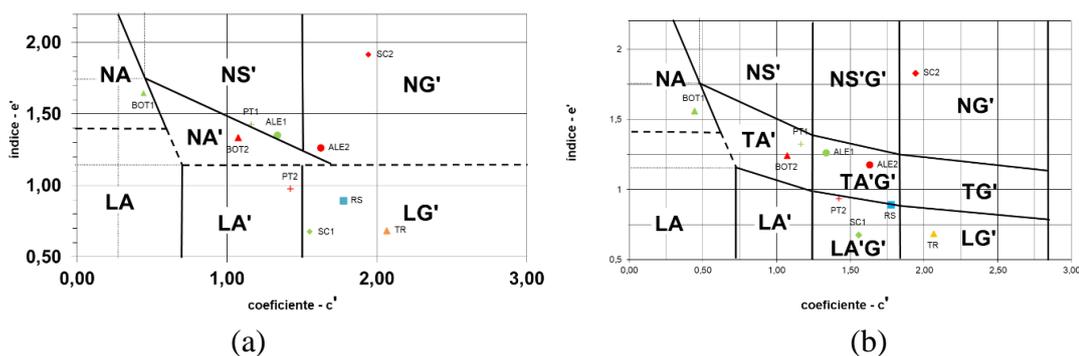


Figura 2: Ábacos para classificação segundo metodologia MCT.

Os solos da Formação Caturrita não atingiram o patamar de compactação inicial no Mini-MCV, sendo classificados como NA (areia não laterítica), não aparecendo no gráfico da MCT.

Verificou-se que, das doze amostras, quatro são classificadas como solos de comportamento laterítico, sendo que o solo PT2 apresentou comportamento laterítico arenoso (LA') e os solos SC1, RS, TR comportamento laterítico argiloso (LG'). Estes possuem granulometria típica de

argilas e argilas arenosas, alta capacidade de suporte, baixa perda de massa por imersão, baixa expansão, média à alta contração, baixa permeabilidade e média à alta plasticidade.

Zago (2016) e Santos (2016) estudaram solos típicos de subleitos rodoviários da região de Santa Maria/RS, incluindo a caracterização e classificação de solos da mesma unidade geotécnica dos solos RS e TR. Assim como neste estudo, os materiais foram classificados como solos argilosos de comportamento laterítico (LG').

De acordo com a Metodologia MCT, tais materiais são considerados adequados para o uso em pavimentação, seja como base, reforço de subleito, subleito, aterro compactado, proteção à erosão, como também para revestimento primário.

O elevado índice classificatório e' , associado ao índice c' , qualificam os demais solos como materiais não lateríticos. Dentre eles, os solos da Formação Caturrita e o solo BOT1 são classificados como areias não lateríticas (NA), a amostra de solo BOT2 é enquadrado como solo não laterítico arenoso (NA'), as amostras PT1 e ALE1 são classificadas como solos não laterítico siltosos (NS') e os solos SC2 e ALE2 são considerados não lateríticos argilosos (NG').

No que diz respeito aos ensaios triaxiais de cargas repetidas, no geral, verificou-se que dentre os modelos analisados o modelo composto foi o que melhor descreveu as características resilientes dos solos em estudo, visto considerar o estado de tensões atuante no material. Assim, a Tabela 4 apresenta somente a modelagem obtida para o referido modelo. Para fins de comparação, adotou-se um par de tensões médio (confinante: 0,05MPa; desvio: 0,10MPa), obtido a partir da norma DNIT ME 134/2010 e com base em análises mecanicistas realizadas por Santos (2016), de modo a obter um módulo resiliente linear. Além dos valores de MR, a tabela apresenta ainda a classificação resiliente dos solos.

Tabela 4: Valores obtidos para o caso de Modelo Composto

Amostra	Modelo Composto				Módulo de Resiliência (MPa)*	Classificação Resiliente
	k1	k2	k3	R ²		
BOT1	2134.63	0.83	0.34	0,93	81	A
BOT2	362.46	0.7	0.01	0,94	44	A
CAT1	445.66	0.52	-0.02	0,99	98	A
CAT2	2663.85	0.71	0.23	0,95	187	A
SC1	700	0.96	-0.38	0,93	95	II-I
SC2	42.99	0.12	-0.42	0,97	79	II
ALE1	137.45	0.49	0.08	0,97	26	III
ALE2	53.3	0.03	-0.49	0,97	151	I
PT1	1005.23	0.96	-0.06	0,94	65	II-I
PT2	929.27	0.69	-0.08	0,90	141	II-I
RS	484.39	0.49	0.07	0,80	95	I
TR	624.31	0.64	-0.2	0,89	145	I

Analisando-se os valores obtidos para o módulo de resiliência, é evidente a diferença dos valores encontrados para solos de uma mesma formação. Tal diferença foi expressiva em todos os materiais estudados, exceto para os solos da formação SC. Isso pode ser explicado pela diferença na granulometria entre os solos de uma mesma formação. Na formação Botucatu, a amostra BOT2, que possui um maior percentual de argila do que a amostra BOT1, apresentou um valor de MR inferior. Para as amostras da formação Caturrita, o solo CAT2, mais arenoso,

possui um módulo de resiliência duas vezes maior do que a amostra CAT1. Nos solos da formação Passo das Tropas, a amostra PT2, com maior percentual de areia média e menos silte em sua composição, apresentou um MR muito maior do que o do solo PT1. Nas amostras BOT2 e ALE1, que apresentaram os menores valores de módulo de resiliência, destaca-se a presença do argilomineral ilita em sua composição.

Em concordância com outros autores, solos de comportamento laterítico (SC1 e PT2) apresentaram valores superiores em comparação aos solos da mesma formação, porém com comportamento não laterítico (SC2 e PT1). O maior valor encontrado foi para o solo CAT2, enquanto que o menor foi o da amostra BOT2.

De acordo com a classificação resiliente desenvolvida por Preussler e Pinto (1982), os solos granulares da formação Botucatu (BOT1 e BOT2) e da formação Caturrita (CAT1 e CAT2) pertencem ao grupo A. Ou seja, possuem um elevado grau de resiliência e constituem subleitos de má qualidade, não sendo recomendados para uso em pavimentos rodoviários. É possível identificar que os valores de MR são ótimos valores para uso em subleito, com exceção da amostra BOT2, que apresenta o argilomineral ilita em sua composição. Isso indica a falta de compatibilidade entre a classificação resiliente e o módulo de resiliência nas amostras BOT1, CAT1 e CAT2.

Dentre os solos finos estudados, o solo SC2 foi classificado como Tipo II, que engloba solos com regular comportamento quanto utilizados em subleito ou reforço de subleito. O solo ALE1 foi classificado como tipo III, o que indica a recomendação de não ser utilizado em camadas de pavimentos. As amostras SC1, PT1 e PT2 foram enquadradas inicialmente no Tipo II. Devido ao seu comportamento granular, o incremento da tensão desvio levou ao aumento do módulo de resiliência, o que enquadra os pontos finais no Tipo I.

Por fim, os solos RS, TR e ALE2 são classificados como Tipo I, ou seja, solos com bom comportamento resiliente como subleito e reforço de subleito, podendo também ser utilizados como sub-bases.

A Tabela 5 apresenta uma comparação em relação ao comportamento de cada um dos materiais estudados em relação aos diferentes sistemas classificatórios utilizados no estudo.

Tabela 5: Comparação entre comportamentos dos materiais

Amostra	Comportamento quando aplicado em pavimentação		
	Sistema TRB/AASHTO	Classificação MCT	Classificação Resiliente
BOT1	Bom	Inadequado	Inadequado
BOT2	Bom	Inadequado	Inadequado
CAT1	Bom	Inadequado	Inadequado
CAT2	Bom	Inadequado	Inadequado
SC1	Inadequado	Bom	Regular a bom
SC2	Inadequado	Inadequado	Regular
ALE1	Inadequado	Inadequado	Cuidados especiais
ALE2	Inadequado	Inadequado	Bom
PT1	Inadequado	Inadequado	Regular a bom
PT2	Inadequado	Bom	Regular a bom
RS	Inadequado	Bom	Bom
TR	Inadequado	Bom	Bom

É possível observar que para os solos BOT1, BOT2, CAT1 e CAT2 a classificação TRB é a mais correta em relação aos valores de módulo de resiliência. A amostra BOT2, por outro lado, apresentou um valor baixo de MR (44MPa), mais próximo do que retrata as classificações MCT e Resiliente. Além disso, todos foram classificados como areias de comportamento não laterítico (NA) ou solos arenosos de comportamento não laterítico (NA') na MCT e solos do grupo A na Classificação Resiliente. Na classificação MCT-M, somente a amostra BOT2 é de um grupo transitório. Aliado às demais características do solo, como a presença do argilomineral ilita, pode-se explicar essa diferença nos valores de módulo de resiliência.

Para os solos SC1, SC2, PT1 e PT2, a classificação TRB não avalia de forma eficiente o real comportamento do material. Para estas amostras foi possível identificar uma maior concordância entre a MCT e a Classificação Resiliente. A amostra PT1, que apresentou o menor valor de módulo de resiliência, é a única que foi classificada num grupo transitório da MCT-M.

A amostra ALE1 foi a que apresentou o menor valor de módulo de resiliência dentre todos os materiais estudados (26MPa). Para este material, a relação entre o MR e a Classificação Resiliente é compatível. Além disso, destaca-se também que esta amostra possui um comportamento transitório na MCT-M e presença do argilomineral ilita em sua composição, o que pode explicar seu comportamento diferenciado em relação ao outro material da mesma formação.

Para as amostras RS e TR, foi possível identificar uma concordância entre a MCT e Classificação Resiliente, que indicam os materiais como ótimo desempenho até como sub-base de pavimentos. Além disso, a relação entre os valores de módulo de resiliência e a Classificação Resiliente é compatível.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir da análise dos resultados obtidos nas classificações geotécnicas tradicionais, classificação MCT e módulo de resiliência, pôde-se identificar algumas concordâncias e discordâncias entre as diferentes metodologias. Assim como em outros estudos classificatórios realizados na região de Santa Maria/RS, foi possível verificar para alguns materiais uma diferença entre a MCT e o sistema TRB/AASHTO. Isso é esperado quando se estudam solos tropicais.

Em relação ao módulo de resiliência, ficou evidente a diferença no valor obtido para solos de uma mesma formação geológica. Essa diferença pode ser justificada pela diferença de granulometria entre as amostras, assim como pela presença de diferentes argilominerais na composição dos materiais. Além disso, identificou-se também a falta de concordância entre valores de módulo de resiliência e a classificação resiliente em alguns casos.

Por fim, ressalta-se a importância de estudos que contemplem diferentes sistemas classificatórios para aplicação em projetos rodoviários, de modo a se obter características mais detalhadas acerca do comportamento de solos tropicais utilizados em pavimentação. Aliados aos valores de módulo de resiliência, é possível prever o comportamento dos materiais geotécnicos utilizados de uma forma mais condizente com a realidade.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALVAREZ NETO, L. *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. Universidade de São Paulo, São Paulo, 1998, 288 p.
- AMERICAN ASSOCIATION OF HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. AASHTO. Designation TP 46/94. *Standard Method for Determining the Resilient Modulus of Soils and Agregate Materials*. Washington, EUA. 1986.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 6459: Solo – Determinação do limite de liquidez*. Rio de Janeiro, 2016. 6p. Origem: MB-30.
- _____. *NBR 6508: Grãos de solo que passam na peneira de 4.8mm – Determinação da massa específica*. Rio de Janeiro, 2016. 8p. Origem: MB-28.
- _____. *NBR 7180: Solo – Determinação do limite de plasticidade*. Rio de Janeiro, 2016. 3p. Origem: MB-31.
- _____. *NBR 7181: Solo – Análise granulométrica*. Rio de Janeiro, 2016. 13p. Origem: MB-32.
- CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE – CNT. *Pesquisa de Rodovias*. Relatório Gerencial. Brasília/DF, 2017.
- DEPARTAMENTO AUTÔNOMO DE ESTRADAS DE RODAGEM – DAER (UNP). *DNER-ME 256: Solos compactados com equipamento miniatura – determinação da perda de massa por imersão*. Rio de Janeiro, 1994. 06p.
- _____. *DNER-ME 258: Solos compactados com equipamento miniatura – MiniMCV*. Rio de Janeiro, 1994. 14p.
- Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. DNIT. Norma DNIT 134/2010 – ME: pavimentação: solos: determinação do módulo de resiliência: método de ensaio. Rio de Janeiro, RJ. 2010.
- ERLINGSSON, S., 2004. Mechanistic Pavement Design Methods – A Road to Better Understanding of Pavement Performance. *Via Nordica 2004 – NRA's 19th Road Congress*, C8: Berekräftige vegkonstruksjonar, 8 p.
- LI, D.; SELIG, E. Resilient modulus for fine-grained subgrade soils. *Journal of Geotechnical Engineering*. ASCE, vol. 120, No. 6, pp. 939-957, 1994.
- LIMA, M.C; ALVES, H.C; MOREIRA, K.C.; FERNANDES, G.; Estudo comparativo de determinação do módulo de resiliência utilizando os métodos Geogauge H4140 e California Bearing Ratio (CBR) de campo e de laboratório. *44ª Reunião Anual de Pavimentação*. ABPv. Foz do Iguaçu/PR, 2015.
- LEKARP, F.; ISACSSON, U.; DAWSON, A. State of the Art. I: Resilient response of unbound aggregates. *Journal of Transportation Engineering*, vol. 126, No. 1, pp. 66-75, 2000.
- NOGAMI, J. S.; VILLIBOR, D. F. Uma Nova Classificação para Finalidades Rodoviárias. *Simpósio Brasileiro de Solos Tropicais em Eng. COPPE/ABMS*, Rio de Janeiro, 1981.
- NOGAMI, J. S.; VILLIBOR, D. F. Identificação expedita dos grupos da classificação MCT para solos tropicais. In: *X Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações*. Foz do Iguaçu, PR, 1994.
- SANTANA, H.; GONTIJO, P.R.A. Os materiais lateríticos na pavimentação de baixo custo. In: *22ª Reunião Anual de Pavimentação*. Anais. 1987. Maceió – AL.
- SANTOS, T.A. dos (2016). *Avaliação da Resistência e Deformabilidade de Solos Empregados em Subleitos Rodoviários do Estado do Rio Grande do Sul*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, 150p.
- SILVA, B.-H. D. A. *Apliação das metodologias MCT e resiliente a solos finos do centro-norte do Mato Grosso*. Dissertação de Mestrado. Rio de Janeiro: Instituto Militar de Engenharia - IME, 2003, 260p.
- TAKEDA, M. C. *A influência da variação da umidade pós-compactação no comportamento mecânico de solos de rodovias do interior paulista*. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Escola de Engenharia de São Carlos, São Paulo, 2006.
- VERTAMATTI, E. *Contribuição ao conhecimento geotécnico de solos da Amazônia com base na investigação de aeroportos e metodologia MCT e resiliente*. Tese (Doutorado em Ciências) - Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, SP, 1998. 276p.
- ZAGO, J.P. *Estudo da Deformação Permanente de Três Solos Típicos de Subleitos Rodoviários de Santa Maria – RS*. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria/RS, 2016.