

## ANÁLISE MECANICISTA DE LATOSSOLO ARGILOSO E DIFERENTES AGREGADOS MIÚDOS PARA EMPREGO EM PAVIMENTAÇÃO ECONÔMICA

### **Leonardo B. de Mello**

Acadêmico do curso de Engenharia Civil da Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul - UNIJUI  
[leobrmello@hotmail.com](mailto:leobrmello@hotmail.com)

### **Jessamine P. de Oliveira**

Acadêmica do curso de Engenharia Civil da Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul - UNIJUI  
[jessamine1995@hotmail.com](mailto:jessamine1995@hotmail.com)

### **Tainara Kuyven**

Acadêmica do curso de Engenharia Civil da Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul - UNIJUI  
[taia-kuyven@hotmail.com](mailto:taia-kuyven@hotmail.com)

### **Katuay Zarth**

Acadêmico do curso de Engenharia Civil da Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul – UNIJUI  
[katuayz@gmail.com](mailto:katuayz@gmail.com)

### **Taciane P. Fracaro**

Acadêmica do curso de Engenharia Civil da Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul - UNIJUI  
[taci\\_fracaro@hotmail.com](mailto:taci_fracaro@hotmail.com)

### **Carlos A. S. P. Wayhs**

Professor/Pesquisador do curso de Engenharia Civil. Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul (UNIJUI)  
[engcaw@gmail.com](mailto:engcaw@gmail.com)

**Resumo.** O elevado custo de implantação, caracteriza-se como a questão restritiva à pavimentação. Portanto estudos estão em desenvolvimento a fim de substituir materiais tradicionais e mais onerosos por elementos regionais ou locais, alternativos e de baixo custo. Assim, o trabalho objetiva relatar pesquisa que avaliou misturas de latossolo argiloso e agregados miúdos (areia natural, areia industrial e resíduo da construção civil – RCC moído fino), com o objetivo de investigar as características de interesse à pavimentação econômica e determinar a possibilidade ou não de aplicação como bases em estradas de tráfego leve a médio. Para o alcance do objetivo, as composições foram

estudadas quanto as propriedades apontadas pela metodologia MCT e desempenho resiliente. A partir dos resultados, foi realizado o dimensionamento de estruturas de pavimentos flexíveis para duas configurações de tráfego distintas. Somente as estruturas dimensionadas para o menor volume de tráfego apresentaram espessuras satisfatórias para a camada de base.

**Palavras-chave:** Pavimento econômico. Dimensionamento. Solo argiloso laterítico.

## 1. INTRODUÇÃO

O presente estudo objetiva apresentar uma análise da possibilidade de emprego de misturas de material regional e agregados miúdos como alternativa ao uso em pavimentos de baixo custo, propondo soluções econômicas e eficientes para projetos e aplicações de pavimentos flexíveis. Dados do Anuário CNT do Transporte (CNT, 2017) mostram que um total de 78,8% das vias existentes no Brasil não são pavimentadas, expressivo valor correspondente a 1.510.024,4 km de um total de 1.720.643,2 km, levando-se em conta vias sob jurisdição municipal, estadual e nacional. Aproximadamente 91,3% das vias não pavimentadas (1.234.918,3 km) estão sob domínio das esferas municipais. O alto custo de concepção advindo do uso de materiais tradicionais na pavimentação, aliado à escassez de recursos governamentais e aos poucos investimentos em infraestrutura, destacam-se como as principais situações responsáveis pelo elevado número de rodovias sem pavimentação.

Villibor e Nogami (2009) propuseram para a redução dos custos de concepção, alternativas mais acessíveis para emprego em vias municipais, essencialmente vicinais e também a utilização de materiais locais nas camadas estruturais dos pavimentos. A fim de conter custos de formulação de rodovias de baixo tráfego, em 2012, criou-se o projeto de pesquisa institucional da UNIJUÍ, “Estudo de Solo Argiloso Laterítico para Uso em Pavimentos Econômicos”, vinculado ao Grupo de Pesquisas em Novos Materiais e Tecnologias para Construção, relacionado ao Diretório de Grupos de Pesquisa do Brasil do CNPQ.

O desenvolvimento desse trabalho pretende relatar pesquisa, que foi tema do Trabalho de Conclusão de Curso de Callai (2017), fazendo parte resultados colhidos a partir da análise de 3 diferentes compostos

formados por latossolo argiloso do Campus da UNIJUÍ e agregados miúdos, dispostos na seguinte organização: argila laterítica mais Resíduo de Construção Civil moído (ALARCC), argila laterítica mais areia natural (ALA) e argila laterítica mais areia industrial (ALAI). Intendeu-se analisar às suas especificidades de interesse à pavimentação, substantificando o dimensionamento em uma análise mecanicista do pavimento flexível com base composta pelas misturas listadas.

## 2. METODOLOGIA

A partir de 3 estudos realizados por Bernardi (2013), Amaral (2015) e Buligon (2015), os quais analisaram, respectivamente, as composições ALA, ALAI e ALARCC, em porcentagens de agregado miúdo de 20, 30 e 40%, selecionou-se amostras enquadradas na zona recomendada e/ou satisfatória do gráfico apresentado na Fig. 1, região proposta por Villibor e Nogami (2009) como adequadas para uso em pavimentação. As amostras com os melhores comportamentos foram aquelas que detinham frações de 40% de agregado e 60% de latossolo argiloso para cada uma das misturas e com elas prosseguiu-se a execução dos ensaios para posterior estudo mecanístico.

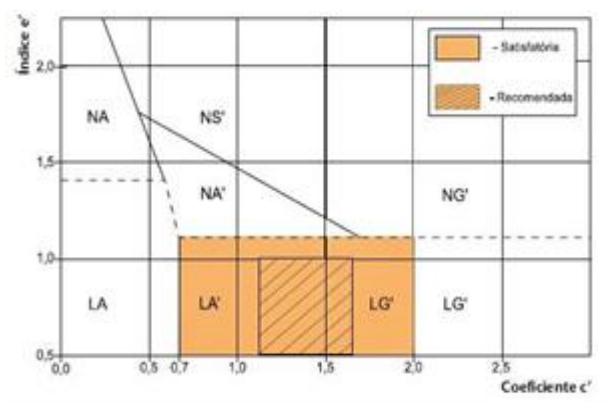


Figura 1. Regiões para localização de solos com característica ALA

Os ensaios foram executados em dois diferentes laboratórios. No LEC/UNIJUÍ -

Laboratório de Engenharia Civil, foram realizados os ensaios que serviram para caracterizar as três misturas e também os ensaios referentes à metodologia MCT, no intuito de avaliar a viabilidade de emprego ou não desses materiais em bases ou sub-bases de pavimentos de baixo custo. No LAPAV/UFRGS – Laboratório de Pavimentação, realizaram-se os ensaios triaxiais dinâmicos de cargas repetidas, no intuito de obter os parâmetros relacionados ao módulo de resiliência, permitindo o posterior estudo mecânico de um pavimento teste. Os dados da caracterização geotécnica que perfazem as características do solo do Campus foram obtidos de resultados de pesquisas anteriores do mesmo projeto de pesquisa.

Posteriormente à análise dos resultados, dimensionou-se uma estrutura de pavimento flexível teste, através do software SisPav, utilizando as misturas na camada de base do exemplo.

### 3. RESULTADOS

Neste tópico serão apresentados os resultados e suas respectivas análises, considerando os testes efetuados com cada uma das três misturas entre agregado miúdo e solo, cujos dados foram obtidos de dissertações prévias.

#### 3.1 Ensaios de caracterização

O solo foi caracterizado por intermédio da análise de sua granulometria e de seus limites de plasticidade. São apresentadas, na Fig. 2 as curvas granulométricas obtidas em laboratório mediante peneiramento dos compostos ALARCC, ALA e ALAI, bem como de cada agregado que os constituem e do solo em sua forma natural.

Percebe-se que o solo extraído do Campus da UNIJUÍ, é extremamente fino, possuindo um total de 94,81% de material que passa na

peneira de abertura de malha igual a 0,075 mm, ou seja, a de nº 200. Adicionando-se agregados em porcentagens de 40% da massa total, nota-se um decréscimo de aproximadamente 60% desses valores. A mistura com 40% de areia natural (ALA 40%) possui aproximadamente 40,30% de material retido na peneira de 0,075 mm e as misturas com areia industrial (ALAI 40%) e RCC (ALARCC 40%), 41,89% e 39,57% de material retido na mesma malha, respectivamente.

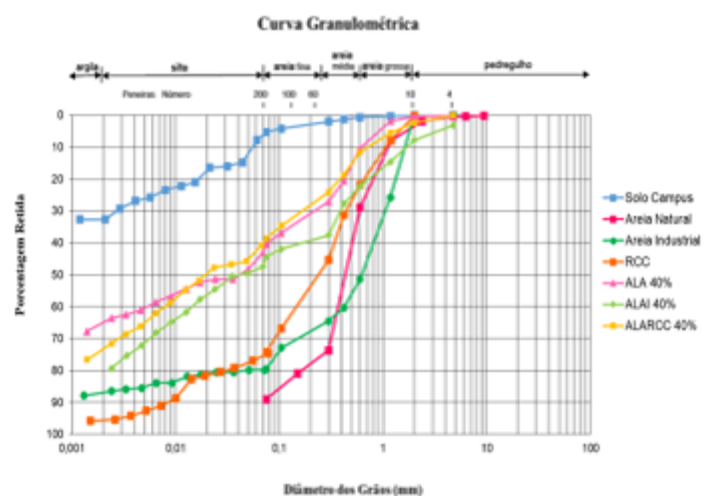


Figura 2. Granulometria dos materiais

Para ajustar misturas ALA como próprias ao uso nas camadas de base de pavimentações de baixo custo, Villibor et al. (2009) determinaram uma faixa granulométrica específica. Ambos os compostos possuíram percentual adequado somente para a peneira de nº 100. Conforme especifica a Tabela 1, nas malhas de abertura igual a 0,075, 0,42 mm e 2 mm, nenhuma esteve dentro das demarcações.

Tabela 1. Avaliação granulométrica

PENEIRA (MM)	PORCENTAGEM PASSANTE RECOMENDADA (%)	PORCENTAGEM PASSANTE OBSERVADA (%)		
		ALARCC 40%	ALAI 40%	ALA 40%
2,000	100	97,61	96,91	99,59
0,420	85 a 100	81,41	77,86	79,51
0,149	40 a 90	65,41	62,42	63,17
0,075	20 a 50	61,43	58,11	59,68

A Tabela 2 resume os resultados obtidos a partir dos ensaios dos Limites de Atterberg.

Tabela 2. Limites de Consistência

MATERIAL	LIMITES DE CONSISTÊNCIA (%)		
	LIMITE DE LIQUIDEZ	LIMITE DE PLASTICIDADE	ÍNDICE DE PLASTICIDADE
SOLO CAMPUS	65	39	26
ALARCC 40%	42	20	22
ALAI 40%	42	22	20
ALA 40%	35	5	19

O alto índice de plasticidade de solos finos é uma particularidade marcante, bem como se observa no seu comportamento quando em estado inalterado. Adicionar materiais com granulometrias mais altas conduzem, geralmente, a um decréscimo nessa taxa. A variação ocorreu conforme as porcentagens passantes na peneira 0,075 mm de abertura para cada material utilizado juntamente com o solo na composição. Analisa-se que o uso de 40% de RCC, resulta na menor redução do Índice de Plasticidade das 3 misturas e, em contrapartida, a adição de areia natural gera a maior redução do mesmo parâmetro, comparando ao solo em seu estado primitivo. Isto deve-se ao fato de que o RCC é agregado com a maior taxa de finos.

### 3.2 Classificações Tradicionais

Com o produto dos ensaios dos limites de Atterberg e do estudo granulométrico, realizaram-se as classificações do solo e de cada um dos compostos de acordo com as metodologias tradicionais. Na Tabela 3, apresenta-se um compilado geral da categorização por meio do Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS) e da classificação rodoviária da Transportation Research Board (TRB/AASHTO).

Tabela 3. Classificação dos materiais

MATERIAL	PROPRIEDADES (%)			CLASSIFICAÇÕES	
	PASSANTE Nº 200	LL	IP	SUCS	TRB/AASHTO (IG)
SOLO CAMPUS	98,41	65	26	MH	A-7-5 (18)
ALARCC 40%	61,43	42	22	CL	A-7-6 (10)
ALAI 40%	58,11	42	20	CL	A-7-6 (9)
ALA 40%	89,68	35	19	CL	A-6 (9)

Considerando o sistema TRB/ AASHTO de classificação de solos, pode-se observar que os compostos ALAI e ALARCC se enquadraram no grupo A-7-6 com índice de grupo (IG) 9 e A-7-6 com IG igual a 10, respectivamente. A composição formada por areia natural (40%) mais solo (60%), enquadrou-se nos limites de um material A-6, cujo índice de grupo foi igual a 9. O solo em seu estado inalterado, classificou-se como um material A-7-5, muito similar a um material A-6, contudo estando em condições de possuir alta variação volumétrica e de elasticidade, por possuir um IG 18.

Pelo sistema unificado, as três misturas puderam ser enquadradas solo CL, tendo em vista que os seus valores dos Limites de Liquidez (LL) estiveram entre 30 e 50%, já o solo do Campus, classificou-se como MH, possuindo um LL maior que 50%.

De acordo com essas classificações, observa-se que esses materiais possuem comportamentos previstos como sendo de sofrível a mau ao uso em subleitos, fato ressaltado como incorreto por Villibor e Nogami (2009), devido a não classificar adequadamente os solos tropicais.

### 3.3 Metodologia MCT

O estudo dos materiais a partir da metodologia MCT, ocorreu no intuito de ponderar o possível comportamento de cada material ao serem empregados como camadas de sub-bases ou bases de pavimentações de baixo custo. Os testes ocorreram por meio de 7 dos 9 ensaios propostos por Villibor e Nogami (1994), realizando os ensaios de Compactação Mini-Proctor (M1), Mini-CBR e

Expansão (M2), Contração Axial (M3), Infiltrabilidade e Permeabilidade (M4), Compactação Mini-MCV (M5), o ensaio de Perda de Massa por Imersão (M8) e, finalmente, a própria Classificação Geotécnica (M9).

As três composições foram analisadas a partir dos resultados de umidade ótima ( $W_{ót}$ ) e massa específica aparente seca máxima ( $MEAS_{máx}$ ), retirados do ensaio M1. Optou-se por avaliá-las na energia intermediária com o propósito de qualificar a sua aplicação em bases de pavimentação flexível, empregando revestimento asfáltico com pouca espessura, fundamental propósito do trabalho. As curvas de compactação de ambas as misturas são apresentadas na Fig. 3.

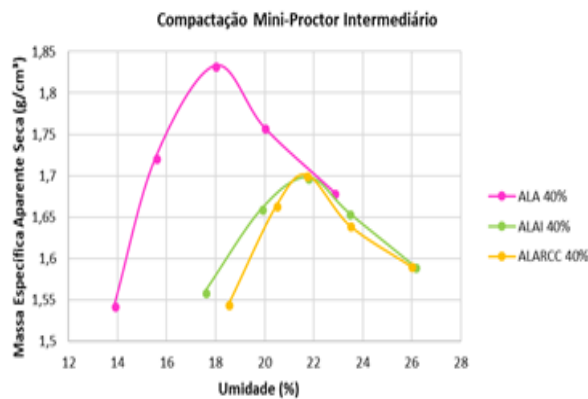


Figura 3. Resultados do ensaio M1

A Tabela 4 apresenta um resumo comparativo entre os resultados de  $W_{ót}$  e  $MEAS_{máx}$  das misturas, obtidos pelo ensaio de Mini-Proctor na energia intermediária e os resultados obtidos por Bernardi (2013) para o solo em seu estado natural pelo ensaio de Proctor Normal.

Tabela 4.  $W_{ót}$  x  $MEAS_{máx}$

MATERIAL	ENERGIA INTERMEDIÁRIA	
	$W_{ót}$ (%)	$MEAS$ (g/cm³)
SOLO CAMPUS*	28	1,55
ALARCC 40%	21,71	1,7
ALAI 40%	21,77	1,7
ALA 40%	17,98	1,83

\*Compactado na energia normal

Pode-se afirmar, pelos resultados fornecidos do ensaio M1, que o comportamento do solo do Campus é argiloso, comprovado também por sua granulometria. Houve redução da umidade para alcançar a sua  $MEAS_{máx}$ , entretanto, ainda assim, não possuem um comportamento típico de um solo arenoso fino laterítico, os quais possuem  $W_{ót}$  entre 12 e 14%, como indica Pinto (2006).

O M2 da metodologia MCT, foi realizado considerando 5 diferentes umidades tanto na condição imersa quanto na não-imersa, partindo da umidade ótima aferida no ensaio Mini-Proctor. Verifica-se na Tabela 5 os resultados de Mini-CBR e os valores de RIS (relação entre índices de suporte) e de Perda de Suporte por Imersão (PSI), todos na sua umidade ótima.

Tabela 5. Mini-CBR, expansão, RIS e PSI

MISTURA MATERIAL	EXP. (%)	MÉTODO DAS CORRELAÇÕES				MÉTODO DAS CARGAS PAI		
		CBR (%)		RIS (%)	PSI (%)	CBR (%)		RIS (%)
		IMERSO	NÃO IMERSO			IMERSO	NÃO IMERSO	
ALA40%	0,1	21,14	25,9	81,59	18,41	21,63	32,1	67,42
ALAI40%	0,03	18,86	22,77	82,82	17,18	23,87	24,62	96,97
ALARCC40%	0,02	11,93	19,93	59,83	40,17	10,64	20,40	52,15

As curvas do M2 nas duas condições, são apresentadas na Fig. 4, considerando o critério das correlações e o das cargas-padrão.

Constata-se que há alta variabilidade nos resultados de M2 não-imerso, de ordens entre 15 a 20%, variando em torno de 2% da umidade ótima em cada ponto. Tal aspecto levantou a necessidade da execução de pelo menos 4 ensaios à adoção de um resultado consistente. Considerando a grande precisão do equipamento, os resultados do solo natural não são apresentados no presente artigo, por ter sido ensaiado em condições diferentes, aliado ao fato do uso de uma prensa automática, enquanto às demais amostras passaram pelo mesmo processo em prensa manual, não garantindo a credibilidade necessária à comparação.

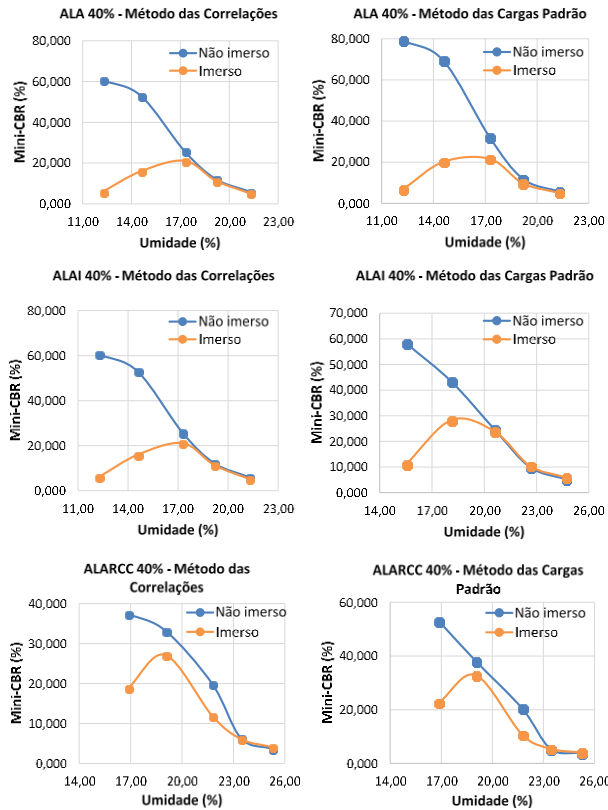


Figura 4. Curvas do mini-CBR das misturas.

Os resultados abordados advêm da metodologia das correlações, apresentada por Villibor e Nogami (2009) e pela normativa ME-192/1998 do DER-SP. Os mesmos autores apresentam também o método das cargas padrão, mas é salientado que a precisão deve ser alta, principalmente nas primeiras leituras, o que não é garantido pelo uso de uma prensa manual, com velocidades de giro da manivela empíricas, reforçando o propósito de ter adotado o método das correlações.

Ambos os compostos tiveram excelentes resultados no que diz respeito a PSI e RIS, destacando os índices alcançados pela mistura ALAI 40%. Contudo o maior valor de M2 não-imerso, foi obtido pela composição ALA 40%, seguindo com ALAI 40% e ALARCC 40%, com resultados atingindo no máximo 25,9%, menor do que os 40% especificados para o uso em pavimentos de baixo custo (VILLIBOR; NOGAMI, 2009).

Utilizando-se apenas um corpo de prova, moldado em sua umidade ótima na energia intermediária, executou-se o ensaio de Contração Axial, com os valores resultantes apresentados na Tabela 6.

Tabela 6. Contração Axial dos Compostos.

MATERIAL	ENERGIA INTERMEDIÁRIA		
	W <sub>ót</sub> (%)	W (%)	Ct (%)
ALARCC 40%	21,71	21,38	1,02
ALAI 40%	21,77	22,8	1,5
ALA 40%	17,98	18,78	1,91

Villibor e Nogami (2009) sugerem que se trace uma curva, considerando no mínimo 3 umidades diferentes e deduzir a contração axial para a umidade ótima por meio de gráfico. Pelas limitações laboratoriais, não foi possível a obtenção de 3 diferentes umidades.

Apesar de que os resultados de contração identificados para as composições de solo e cada uma das areias estejam sob condições de umidade maior do que a W<sub>ót</sub>, se houver alteração nela, não é esperado que haja decréscimo dos valores, considerando que todas as misturas foram feitas com pelo menos 60% de material passante na malha da peneira de 0,075mm, com características argilosas e de elevada contração axial. Até mesmo a composição ALARCC, analisada abaixo da umidade ótima, obteve valores muito superiores ao máximo estabelecido pelos referidos autores.

A etapa de ensaios que analisam os critérios de infiltrabilidade e permeabilidade, o M4, abrangeu condições semelhantes às do ensaio de Contração Axial, em relação as umidades, apresentando seus resultados na Tabela 7.

Tabela 7. Infiltrabilidade e Permeabilidade

MATERIAL	ENERGIA INTEMEDIÁRIA			
	W <sub>ót</sub> (%)	W (%)	COEFICIENTE DE SORÇÃO D'ÁGUA - S (%)	COEFICIENTE DE PERMEABILIDADE - K (%)
ALARCC 40%	21,71	23,3	4,09x10 <sup>-3</sup>	2,63 x10 <sup>-5</sup>
ALAI 40%	21,77	21,76	2,75x10 <sup>-3</sup>	3,19 x10 <sup>-5</sup>
ALA 40%	17,98	18,81	2,95x10 <sup>-3</sup>	1,9 x10 <sup>-5</sup>

Todas as composições mostraram valores dentro dos critérios de limites de infiltrabilidade descritos pelos autores anteriormente citados, contudo nenhuma atingiu os valores limites no que diz respeito à permeabilidade.

Para os ensaios M5 e M8, ensaiaram-se 5 amostras de cada composição, variando em, 2 amostras, umidades decrescentes em 2%, e em 2 amostras, umidades que cresceram 2% da umidade ótima na energia intermediária. Extraiu-se do ensaio de Mini-MCV os fatores  $c'$  e  $d'$ . Da Perda de Massa por Imersão, retira-se o índice  $PI$ . Junto à classificação geotécnica pela metodologia MCT, são expostos os resultados na Tabela 8 e a partir da mesma retira-se o índice  $e'$ , concernente à laterização do material. Finalmente, na Fig. 5, observa-se a classificação MCT das misturas.

Tabela 8. Coeficientes e Classificação MCT.

MATERIAL	COEFICIENTES À CLASSIFICAÇÃO				CLASSIFICAÇÃO MCT
	$c'$	$d'$	PI (%)	$e'$	
SOLO CAMPUS	2,86	41,50	0	0,78	LG'
ALARCC 40%	2,06	58,80	74	1,03	LG'
ALAI 40%	2,06	38,30	103	1,16	LG'
ALA 40%	1,63	94,30	45	0,87	LG'

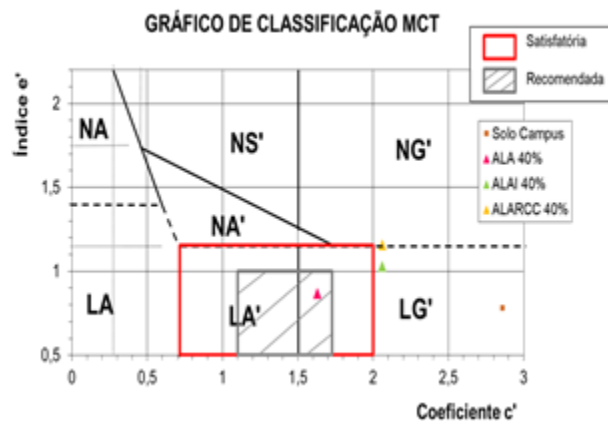


Figura 5. Classificação MCT dos materiais

É reconhecido que solos ou misturas com características  $LG'$  possuem alta coesão e fácil compactação, considerando ideal, índices  $c'$  compreendidos entre 1,5 e 1,7 e o índice  $e'$  próximo a 0,6 como ocorreu nas composições de solo mais areia natural, atingindo 1,63 e 0,87, respectivamente. Os compostos ALARCC 40% e ALAI 40%, apresentaram valores superiores a 1 para  $e'$ , estando em uma zona de interface entre solos com características lateríticas e não lateríticas

A Tabela 9 é um quadro resumo, relacionando as características analisadas e os seus respectivos intervalos de aceitação, os resultados apresentados e, por fim a aprovação ou reprovação de cada critério de acordo com o recomendado pela bibliografia.

Tabela 9. Quadro Resumo da resultados MCT

PROPRIEDADE	INTERVALOS ADMISSÍVEIS	RESULTADOS			SITUAÇÃO		
		ALA	ALAI	ALARCC	ALA	ALAI	ALARCC
Grupos MCT	LG', LA', LA	LG'	LG'	LG'	OK	OK	OK
Mini-CBR <sub>15</sub> * (%)	≥ 40	25,9	22,8	19,9	NÃO	NÃO	NÃO
Expansão - Es (%)	≤ 0,3	0,1	0,03	0,02	OK	OK	OK
RIS (%)	≥ 50	81,59	82,82	59,83	OK	OK	OK
Ct (%)	0,1 a 0,5	1,91	1,5	1,02	NÃO	NÃO	NÃO
Coefficiente s (cm <sup>3</sup> /min)	10 <sup>-2</sup> a 10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-3</sup>	10 <sup>-3</sup>	10 <sup>-3</sup>	OK	OK	OK
Coefficiente k (cm/s)	10 <sup>-6</sup> a 10 <sup>-8</sup>	10 <sup>-5</sup>	10 <sup>-5</sup>	10 <sup>-5</sup>	NÃO	NÃO	NÃO

Com os valores compilados acima, é possível compreender quais se enquadraram nos limites sugeridos pelas normativas. Por mais que três características não se cumpriram com os requisitos mínimos, as demais foram aprovadas para todas as composições. Com pequenos resultados de expansão com sobrecarga, elevadas taxas RIS e fator de sorção de água dentro do permitido.

No caso do Mini-CBR em seu estado não imerso na  $W_{ót}$  da energia intermediária, não atinge os valores mínimos recomendados e possuem valores de contração axial mais elevadas do que os limites máximos. Tal comportamento pode ser justificado pela adoção de pelo menos 60% de materiais finos

na composição, valores superiores aos 50% que foram sugeridos por Villibor e Nogami (2009).

Conforme a situação exposta, nenhuma das composições atendem a todos os requisitos mínimos para uso em camadas de base de pavimentação de baixo custo. Contudo, optou-se por prosseguir com os ensaios propostos na metodologia, prevendo o dimensionamento através de métodos mecânicos, pois os citados métodos consideram o comportamento resiliente dos materiais para o emprego em pavimentação, os quais independem dos resultados obtidos pela Miniatura Compactada Tropical.

### 3.4 Ensaio Triaxial de Cargas Repetidas

Na Tabela 10 são expostos os resultados do Módulo de Resiliência (MR), por meio de ensaios triaxiais de cargas repetidas realizados no Laboratório de Pavimentação da Universidade Federal do Rio Grande do Sul – LAPAV/UFRGS, considerando as condições de umidade ótima para cada uma das composições na sua energia modificada, valores esses retirados das dissertações de Bernardi (2013) – ALA, Buligon (2015) – ALARCC e Amaral (2015) – ALAI, através do ensaio de Proctor na energia modificada.

Tabela 10. Módulos de Resiliência no Triaxial

$\sigma_3$ (kPa)	$\sigma_d$ (kPa)	MÓDULO DE RESILIÊNCIA (kPa)				
		ALA40%-1	ALA40%-2	ALA40%-3	ALA40%	ALARCC40%
21	21	310.025	360.548	364.211	414.346	198.439
	42	277.008	295.932	310.796	376.929	162.115
	63	262.487	296.459	310.182	339.625	143.312
35	35	326.190	330.152	363.199	414.613	203.127
	70	278.973	316.077	325.243	362.932	174.366
	105	269.089	289.371	322.160	330.480	156.452
53	53	341.334	361.623	389.020	394.510	232.462
	105	310.215	332.441	361.597	354.909	200.402
	158	283.402	299.394	328.752	330.474	179.118
70	70	353.945	386.846	414.927	405.053	268.910
	140	318.981	344.936	371.237	370.898	224.063
	210	288.152	287.048	343.912	329.445	198.930
105	105	392.795	429.152	458.389	417.388	318.212
	210	305.794	341.239	395.564	372.178	260.076
	315	282.433	303.464	353.507	324.669	221.722
140	140	414.060	441.152	507.993	452.851	346.003
	280	345.447	359.634	421.938	390.139	286.174
	420	285.443	289.992	341.520	311.788	228.381

Realizaram-se ensaios em uma amostra de ALARCC, duas amostras de ALAI, ocorrendo um erro de execução do mesmo em uma delas, o que impossibilitou a apresentação desses resultados na tabela acima e três da mistura ALA.

Para a tensão confinante constante e com o aumento da tensão desvio ( $\sigma_d$ ), há um decréscimo do MR. Nas amostras ALARCC 40% e as três da composição ALA 40%, houve um crescimento do MR com o aumento da tensão confinante ( $\sigma_3$ ), quando compara-se aos valores de  $\sigma_d$  equivalente a 3 vezes  $\sigma_3$ ,  $\sigma_d$  equivalente a duas vezes  $\sigma_3$  e, finalmente  $\sigma_d$  equivalente a  $\sigma_3$ , a meio-termo de duas tensões confinantes subsequentes.

O composto formado por 60% de solo mais 40% de areia industrial, comportou-se diferentemente das demais, tendo resultados de MR diminuindo no  $\sigma_3$  21 kPa para 53 kPa e subindo entre  $\sigma_3$  igual a 53 kPa a 140 kPa.

A Tabela 11, apresenta a execução das modelagens dos fatores para encontrar os módulos de resiliência conforme o sistema areno-argiloso para  $\sigma_d$  e os sistemas arenoso e areno-argiloso de  $\theta$  ( $\sigma_d + 3*\sigma_3$ ).

Tabela 11. Modelagem da Resiliência

AMOSTRA	MODELOS								
	$MR = K_1 * \sigma_3^{k_2}$			$MR = K_1 * \theta^{k_2}$			$MR = K_1 * \sigma_d^{k_2}$		
	k1	k2	R <sup>2</sup>	k1	k2	R <sup>2</sup>	k1	k2	R <sup>2</sup>
ALA40%-1	415,62	0,1	0,27	334,36	0,06	0,09	307,29	-0,01	0
ALA40%-2	416,25	0,08	0,15	347,57	0,03	0,03	314,15	-0,03	0,03
ALA40%-3	540,45	0,14	0,44	413,34	0,09	0,22	389,16	0,02	0,02
ALA40%	375,27	0,01	0	355,43	-0,03	0,04	318,03	-0,07	0,26
ALARCC40%	506,69	0,3	0,66	288,26	0,23	0,42	318,03	-0,07	0,26

Em vermelho estão destacados os melhores resultados dos modelos adotados para cada mistura, esses sendo adotados para a continuidade do dimensionamento estrutural de um pavimento flexível. É possível concluir que os compostos ALARCC e ALA mostraram características resilientes arenoso ou granular, ao passo que ALAI é melhor representada pelo sistema areno-argiloso em



consequência de  $\sigma_d$ , catalogados no software SisPav.

### 3.5 Dimensionamento pelo SisPav

Dimensionar uma estrutura de pavimento flexível através do software SisPav, necessita inserir os dados relativos às características de cada camada. Para essa análise, adotou-se uma camada de revestimento asfáltico de Concreto Betuminoso Usinado a Quente (CBUQ) com CAP 50/70 e espessura igual a 5 cm e uso de faixa granulométrica A, adotando os valores do coeficiente de Poisson ( $\mu$ ) e MR sugeridos pelo software.

Adotando-se como camada de base as composições ALARCC e ALA, estimou-se comportamento resiliente granular e, para ALAI, comportamento coesivo. Para as três composições utilizou-se um solo argiloso laterítico como formato representativo, aderindo  $\mu = 0,35$ ,  $\mu = 0,45$  e  $\mu = 0,41$  para materiais granulares, argilosos e às misturas, respectivamente, conforme propõe Medina e Motta (2015).

O material utilizado no subleito, foi o solo do Campus da UNIJUÍ, o qual segundo Wayhs (2004), é uma argila vermelha laterítica com comportamento elástico linear, com valor mínimo de MR igual a 80 MPa. Inseriu-se então as informações relativas ao MR, bem como um total de 13% de silte na fração fina e 12% de CBR em sua energia normal, retirados de Wayhs (2004), adotando ainda  $\mu = 0,45$ , para material argiloso conforme recomenda Medina e Motta (2015).

Optaram-se por rodovias vicinais com Volume Diário Médio (VDM) menor que 100, em localidades mais próximas o possível do município de Ijuí/RS, denominadas VRS 818 e VRS 832, e o volume previsto para um ano de passagem de tráfego, fatores introduzidos no software.

Compôs-se o tráfego da primeira via no programa, gerando  $3,03 \times 10^6$  para N, exigindo a aplicação de base com a composição ALA

com camada de proteção. Já para a VRS 832, obteve-se  $1,8 \times 10^6$  para N, optando-se por uma vida de projeto igual a 10 anos para as duas situações. A Tabela 12, mostra o arranjo estrutural da rodovia, considerando os resultados ND, como não definidos, pois a espessura máxima aceita pelo programa é de 60 cm.

Tabela 12. Arranjos Estruturais para Diferentes Tráfegos.

MATERIAL PARA BASE	ESPESSURA DO REVESTIMENTO (CM)	ESPESSURA DA BASE CONFORME O TRÁFEGO (CM)	
		VRS 818 N= $3,03 \times 10^6$	VRS 832 N= $1,7 \times 10^6$
ALARCC 40%	5	ND	ND
ALAI 40%	5	ND	20
ALA 40%	5	ND	35

Para a primeira situação de tráfego, VRS 818, nenhuma das composições teve valores menores que 60 cm, resultando em espessuras ND. Para VRS 832, ALARCC não possuiu espessura capaz de atender as solicitações esperadas, já ALA e ALAI resultaram em valores satisfatórios para bases de pavimentos. Inerente às tensões e deformações, a vida útil de fadiga da mistura ALA foi de 5,4 e 10,4 anos na VRS 818 e VRS 832, respectivamente, à medida que ALAI 7,2 e 11,2 anos, atenderam com satisfação ao tráfego solicitado. Referente ao desempenho de todas as misturas à fadiga e ATR das estruturas, em percentagem, relacio as duas e a vida de projeto inserida, como demonstrado na Tabela 13.

Tabela 13. Previsão de vida útil por fadiga e Fundamento de Trilha de Roda

MATERIAIS - VIA	VIDA DE PROJETO (N)	VIDA ÚTIL DE SERVIÇO POR FADIGA (N)	FADIGA DO REVESTIMENTO (%)	VIDA ÚTIL DE SERVIÇO POR ATR (N)	ATR NO TOPO DO SUBLEITO (%)
ALAI 40% - VRS 832	$1,7 \times 10^6$	$1,91 \times 10^6$	89,00	$1,68 \times 10^7$	10,12
ALA 40% - VRS 832	$1,7 \times 10^6$	$1,85 \times 10^6$	92,06	$1,42 \times 10^7$	11,97

#### 4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nessa pesquisa, avaliaram-se o comportamento de três composições de 40% de agregado miúdo e 60% de solo argiloso laterítico, analisando parâmetros relativos à granulometria, propriedades resultantes da metodologia MCT e desempenho resiliente pelo ensaio triaxial dinâmico de ALA, ALAI e ALARCC. Verificou-se que mesmo com o acréscimo de agregados maiores, as porcentagens ainda não são suficientes, ao atendimento de alguns parâmetros. Por mais que os valores retirados do ensaio de M2, Mini-CBR, não atendam às especificações das normas, prova-se através do uso do software SisPav que legitimamente há a possibilidade de sua aplicação em camadas de base de pavimentos flexíveis. Ressalta-se a atenção a ser dada para os valores de contração axial das misturas, as quais apresentaram resultados muito elevados, podendo causar trincas após o processo de compactação e secagem, ocasionando na perda de propriedades estruturais da camada.

O dimensionamento realizado com espessura de 5 cm da camada de revestimento e o alto MR (4173 MPa), auxiliou no decréscimo de deformações advindas do tráfego, diferentemente do que aconteceria com o uso de Tratamentos Superficiais (TS), os quais aceitam espessuras máximas de 3 cm, sendo o tipo de revestimento recomendado para pavimentos de baixo custo. Por esse motivo, a substituição de uma camada de TS pelo uso de CBUQ, acaba desenquadrando a estrutura no que diz respeito aos conceitos de pavimentos econômicos, pois o concreto asfáltico possui custos mais elevados. O SisPav, também não é o programa mais adequado para a realização de análise de pavimentação econômica, pois possui um acervo limitado de características de materiais, tanto relativo a sua espessura, quanto a biblioteca de materiais, impossibilitando a

análise de TS. Outro indício negativo apresentado por esse método é que o tempo de vida útil se baseia no fenômeno de fadiga, característica não considerada para revestimentos feitos com Tratamentos Superficiais. Análises de maior confiabilidade e consistência, poderiam ser simuladas em métodos que aceitem tais especificações.

#### *Agradecimentos*

Ao laboratorista Luiz Donato, ao LEC da UNIJUÍ e aos companheiros do Grupo PET e do Grupo de Pesquisas em Solos que auxiliaram na realização do presente artigo.

#### 5. REFERÊNCIAS

AMARAL, M. B. (2015). **Estudo de misturas de solo argiloso laterítico do noroeste do Rio Grande do Sul e areia industrial para uso em pavimentos econômicos.** 67 p. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) – Departamento de Ciências Exatas e Engenharias, Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí, 09 nov.

BERNARDI, C. (2013). **Estudo de misturas de solo argiloso laterítico com agregados finos para uso em pavimentos econômicos.** 68 p. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) – Departamento de Ciências Exatas e Engenharias, Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí, 26 nov.

BULIGON, L.B. (2015). **Estudo de misturas de solo argiloso laterítico e resíduo de construção civil para uso em pavimentos econômicos.** 89 p. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) – Departamento de Ciências Exatas e Engenharias, Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí, 16 nov.

CALLAI, N. D. **Estudo mecânico de misturas de argila laterítica e agregado miúdo para emprego em pavimentos econômicos**. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso. Curso de Engenharia Civil, Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul – UNIJUÍ, Ijuí, 2017.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE. **Anuário CNT do Transporte 2017**: Estatísticas consolidadas. Brasília: CNT, 2017. 27 p. Disponível em: <<http://anuariodotransporte.cnt.org.br/2017/Rodoviario/1-1-/Principais-dados>>. Acesso em: março de 2018.

DER-SP - Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de São Paulo. (1991). **Manual de Normas, Pavimentação**. São Paulo.

MEDINA, J; MOTTA, L.G. (2015). **Mecânica dos pavimentos**. Rio de Janeiro: UFRJ. 640 p.

PINTO, C.S. **Curso básico de mecânica dos solos em 16 aulas**. 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2006. 367 p.

VILLIBOR, D.F. et al. **Pavimentos de Baixo Custo para Vias Urbanas**. 2. ed. São Paulo: Arte & Ciência, 2009. 196 p.

VILLIBOR, D.F.; NOGAMI, J.S. (2009). **Pavimentos Econômicos: tecnologia do uso dos solos finos lateríticos**. São Paulo: Arte & Ciência. 291 p.

WAYHS, C.A.S.P. **Estudo de materiais alternativos utilizados em pavimentação de baixo custo na região noroeste do Rio Grande do Sul**. 2004. 104 f. Dissertação de Mestrado (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.