

APROVEITAMENTO DE MATERIAIS ALTERNATIVOS PARA A PAVIMENTAÇÃO NA REGIÃO NOROESTE DO RIO GRANDE DO SUL

Carlos Alberto Simões Pires Wayhs

Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil

Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Washington Peres Núñez

Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil

Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Jorge Augusto Ceratti

Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil

Universidade Federal do Rio Grande do Sul

RESUMO

Este trabalho contém relato de pesquisa onde se caracterizaram três tipos de materiais utilizados em rodovias não pavimentadas no município de Ijuí, na região noroeste do Rio Grande do Sul. De forma aleatória escolheram-se duas jazidas de lateritas e duas de basaltos alterados, que vinham sendo utilizadas pela Prefeitura Municipal de Ijuí. Para representar os subleitos da região escolheu-se uma argila vermelha com características semelhantes a outras encontradas em cerca de 40 % do Estado. A caracterização destes materiais alternativos possibilitou o dimensionamento de estruturas para utilização em pavimentos de baixo volume de tráfego, com o emprego dos métodos do DNER e da Prefeitura de São Paulo. Com módulos de resiliência dos materiais obtidos em laboratório, realizou-se uma análise mecanística de algumas estruturas, possibilitando uma comparação entre os resultados dos dois métodos de dimensionamento e a proposição de espessuras e tipos de materiais para cada volume de tráfego.

ABSTRACT

This paper provides research account where three types of materials, used in road construction in Ijuí county, Northwest region of Rio Grande do Sul State, were characterized. In randomized form two laterites and two altered basalts sites were chosen from those already been used by the Ijuí Roads Department. To represent the subgrades of the region, red clay was chosen. The characterization of those alternatives materials made possible the design of pavement structures for low-volume roads pavements, with the use of design methods issued by the Brazilian Roads Department (DNER) and by São Paulo City Roads Department. With the materials laboratory resilient modulus, a mechanistic analysis of some structures was carried out, making possible a comparison between with the results of the two design methods and the proposition of the thicknesses and types of the materials for the three levels of traffic volume.

1. INTRODUÇÃO

Sabe-se da necessidade e importância da construção e conservação de estradas vicinais e vias urbanas na economia dos municípios. Exemplo disso é o impacto que as obras rodoviárias e a manutenção da malha viária repercutem no orçamento de Ijuí, município com cerca de 78 mil habitantes localizado, segundo o IBGE, na mesoregião “Noroeste Riograndense” e microrregião “Ijuí”. Cerca de 10 % é o valor deste impacto como se pode observar na Tabela 1 apresentada em Wayhs et al. (2001), onde se apresentam alguns dados orçamentários. Esta situação aponta para a necessidade de otimizar o emprego dos recursos. Uma das principais medidas a serem tomadas é o emprego de materiais alternativos locais com custos inferiores aos tradicionais, desde que garantida a boa qualidade técnica.

Desta forma realizou-se pesquisa científica objetivando a caracterização de alguns materiais alternativos da região noroeste do Rio Grande do Sul visando o seu possível aproveitamento na execução de pavimentos e uma análise paramétrica de oito tipos de combinação dos materiais pesquisados gerando estruturas dimensionadas por dois métodos para vários tipos de tráfego. Este artigo relata os principais resultados desta pesquisa.

Tabela 1 – Dados orçamentários do Município de Ijuí

RUBRICAS ORÇAMENTÁRIAS	VALOR ORÇADO	% ORÇ.TOTAL
1. Orçamento da Secretaria Municipal de Obras	3.827.330,00	13,73%
1.1 Estradas Vicinais	1.269.368,00	4,56%
1.2 Transporte Urbano	1.468.100,00	5,27%
Estradas Vicinais e Transporte Urbano (1.1+1.2)	2.737.468,00	9,82%
Orçamento total do Município	27.867.489,00	100,00%

2. METODOLOGIA

2.1 Escolha das jazidas e materiais

Escolheram-se duas jazidas de basalto alterado, denominadas de Balneário Santana (BS) e Linha 3 Oeste (BO) e duas jazidas de lateritas, denominadas de Lixão (LLI) e Olaria (LO), que estavam sendo utilizadas em diversos serviços de pavimentação pela Prefeitura Municipal de Ijuí, em meados de 2000.

A argila vermelha utilizada no estudo foi escolhida por ter as características visuais semelhantes dos subleitos dos milhares de quilômetros das estradas vicinais de Ijuí e região.

2.2 Ensaios realizados

Os ensaios de limite de liquidez e limite de plasticidade foram realizados, respectivamente, de acordo com a NBR 6459/1984 e a NBR 7180/1984. As análises granulométricas da argila vermelha e das lateritas foram realizadas conforme a NBR 7181/1984. A massa específica real foi determinada pelo método preconizado na NBR 6508/1984. Os ensaios de compactação foram executados conforme a NBR 7182/1986 utilizando energia normal para a argila vermelha, energia intermediária para os basaltos alterados e energia modificada para as lateritas. Todas as amostras dos ensaios de caracterização e de compactação descritos acima foram preparadas de acordo com a NBR 6457/1986. Já a determinação do Índice de Suporte Califórnia foi feita conforme prescreve a NBR 9895/1987. Os ensaios de equivalente de areia das lateritas e basaltos alterados foram realizados conforme preconiza o método de ensaio DNER – ME 54-63. Todos os ensaios citados acima foram realizados no ano de 2000 no Laboratório de Engenharia Civil da UNIJUI, Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, na cidade de Ijuí (RS). Salienta-se que os ensaios de massa específica real para as lateritas foram realizados com o material passante na peneira de 2 mm (# n°10) e não na peneira 4,8 mm (# n°4) como preconiza a NBR 6457/1986.

Na Fundação de Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul (CIENTEC), uma amostra de cada basalto alterado foi submetida à análise petrográfica macroscópica, a ensaio de sanidade ao sulfato de sódio (Na₂SO₄) anidro e ao ensaio de desgaste por abrasão Los Angeles de acordo respectivamente com a NBR 7389/1992, o DNER ME 89/1994 e a NBR 6465/1984.

Os ensaios realizados para a classificação MCT da argila vermelha foram realizados no laboratório da Unidade de Normas e Pesquisas do DAER/RS de acordo com o especificado por Nogami e Villibor (1995).

A metodologia do ensaio para determinação do módulo de resiliência da argila vermelha fundamentou-se no método de ensaio DNER-ME 131/94, com combinações de tensões tanto

para solos argilosos como também para solos granulares e no método da ASHTO TP 46-94 com combinação de tensões para solos argilosos. Já para as lateritas e basaltos alterados a metodologia do ensaio para determinação do módulo de resiliência fundamentou-se no método de ensaio AASHTO TP 46-94. Estes ensaios foram realizados no Laboratório de Pavimentação da UFRGS.

No Laboratório de Difração de Raios X da UFRGS, foi realizada a análise difratométrica dos argilominerais da argila vermelha, da laterita LLI e do basalto alterado BS.

3. APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

3.1 Ensaios de Caracterização e Suporte

A argila vermelha utilizada nesta pesquisa de forma a representar os solos de subleito da região, foi retirada de um corte no campus da UNIJUÍ. A profundidade de extração das amostras foi em torno de 1,00 metro da superfície, pertencente ao horizonte B. Já a jazida da laterita LLI localiza-se junto à área pertencente à Prefeitura Municipal denominada Lixão, na Linha 5 Leste, ao lado do aterro sanitário de resíduos sólidos do município e a jazida da laterita LO localiza-se próximo a uma olaria na Linha 3 Leste, estando distantes uma da outra em torno de 3 km. Por último, a jazida do basalto alterado BS localiza-se no Balneário Santana, na região Norte do município de Ijuí e a jazida do basalto alterado BO localiza-se na Linha 3 Oeste, na zona urbana de Ijuí.

Na Tabela 2 apresentam-se resumidamente resultados dos ensaios de limites de liquidez e plasticidade, massa específica real (MEAR), compactação, índice suporte Califórnia (ISC) na umidade ótima, expansão no ensaio de ISC e equivalente de areia para os materiais estudados. Já na Figura 1 apresentam-se as curvas granulométricas da argila vermelha, da laterita LLI e da laterita LO. Também se destaca a faixa de utilização granulométrica “D” da especificação do DNER ES-P 378/98 para bases estabilizadas com utilização de solos lateríticos. Observa-se que o ISC das lateritas é próximo a 100%, o que, em princípio, as qualifica como materiais para base, embora a laterita LLI apresente expansão ligeiramente superior à admitida para essa camada. Já os basaltos alterados apresentam características apropriadas para emprego em sub-bases.

No laboratório da Divisão de Normas e Pesquisas do DAER/RS, foram realizados ensaios para a classificação MCT da argila vermelha estudada. Os valores obtidos para c' e d' foram 1,77 e 69 respectivamente. A perda por imersão correspondente ao Mini-MCV igual a 10 foi zero. Com os valores acima o valor de e' calculado foi de 0,66.

3.2 Classificação dos materiais

Pelo sistema tradicional de Casagrande (Sistema Unificado de Classificação de Solos) a argila vermelha foi classificada como MH, a laterita LLI como SM e a laterita LO como SC. Já pelo sistema tradicional da AASHTO a argila vermelha foi classificada como um solo A-7-5 (18), a laterita LLI um solo A-2-4 (0) e a laterita LO um solo A-2-6 (0,35). Já segundo a classificação geotécnica proposta por Dias e Militiski (1990), a argila vermelha seria classificada como Lea/b – latossolo com substrato arenito ou basalto. Pela classificação resiliente proposta por Preussler e Pinto (1982), a argila seria enquadrada entre o solo tipo II – solo de comportamento regular quanto a resiliência como subleito e reforço de subleito e o solo tipo III – solo de comportamento ruim quanto a resiliência e tanto as lateritas LLI e LO

como os basaltos BS e BO seriam enquadrados como solos granulares do Grupo B – solo com grau de resiliência intermediário com bom comportamento ($k_2 < 0,50$). Por último a classificação MCT da argila vermelha para valores de $e' = 0,66$ e $c' = 1,77$ indicou um solo de comportamento laterítico argiloso – LG'.

Tabela 2: Resultados de ensaios para a argila vermelha, lateritas e basaltos alterados

MATERIAIS	Plasticidade			MER (kN/m³)	Compactação		Índ. sup. califórnia		EA (%)
	LL (%)	LP (%)	IP (%)		MEAS (kN/m³)	hot (%)	ISC (hot) (%)	Expansão (%)	
ARGILA VERMELHA	63	38	25	28,6	14,0	32,4	12	1,71	****
LATERITA DO LIXÃO LLI	37	29	8	30,2	22,0	12,8	103	0,64	12
LATERITA DA OLARIA LO	41	28	13	30,4	21,4	13,6	104	0,24	12
BASALTO ALTERADO BS	****	****	****	26,5	18,3	18,3	63	0,18	35
BASALTO ALTERADO BO	****	****	****	27,9	16,2	22,6	35,00	0,04	20

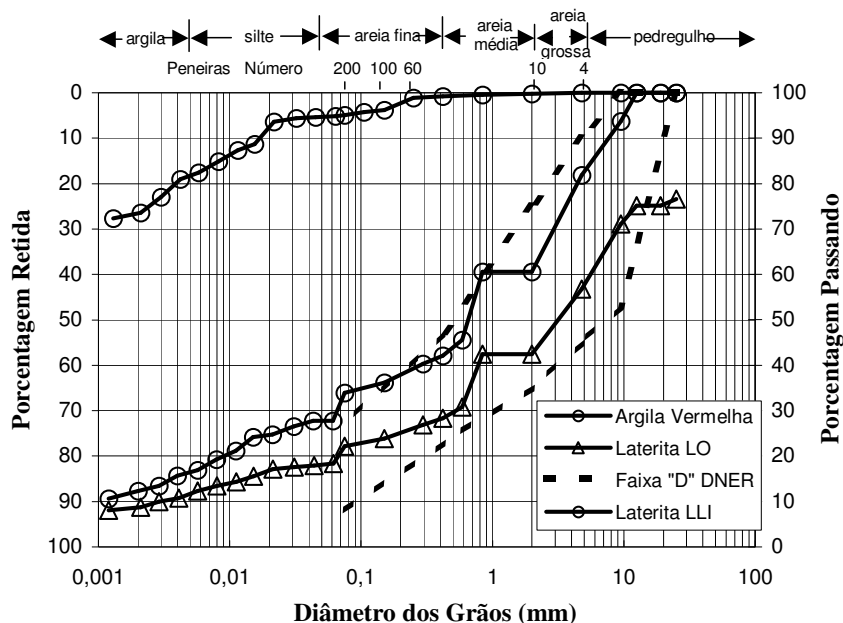


Figura 1: Curva granulométrica da argila vermelha, lateritas LLI e LO e faixa "D" do DNER

3.2 Ensaios de durabilidade

A perda de peso para os dois basaltos no ensaio de sanidade foi maior que 75 %, valores muito altos, comprovando o elevado grau de alteração. Já os coeficientes de abrasão Los Angeles foram de 59 % para o basalto BS e de 60 % para o basalto BO, valores superiores aos normalmente aceitos para agregados. O DAER especifica para agregados graúdos a abrasão Los Angeles máxima de 50% e perda de peso no ensaio de sanidade menor que 10 %, valores bem menores que os apresentados, como esperado pelo elevado grau de alteração dos basaltos.

No Laboratório de Pavimentos da UFRGS foram realizados para a argila vermelha três ensaios triaxiais de carga repetida para determinação do módulo de resiliência. O primeiro ensaio foi realizado de acordo com o método de ensaio DNER ME 131/94 variando-se as características de compactação. Apresenta-se na Figura 2 o resultado deste ensaio. Observa-se que para teores de umidade próximas a ótima (32,4%) e acima da ótima, o módulo de resiliência (próximo a 80.000 kPa) praticamente independe da tensão desvio, caracterizando um comportamento elástico-linear do solo. O segundo ensaio foi realizado pelo método da ASHTO moldando-se o corpo de prova na umidade ótima. O terceiro ensaio foi realizado pelo método do DNER ME 131/94, porém com combinações de tensões para solos granulares. A seguir apresentam-se os dois modelos, representando o segundo e o terceiro ensaio respectivamente:

$$Mr = 77013\sigma_3^{0,0046} \quad (1)$$

$$Mr = 43956\sigma_3^{0,2407} \quad (2)$$

em que Mr: módulo de resiliência (kPa);
 σ_3 : tensão de confinamento (kPa).

Já para as lateritas e os basaltos alterados foram realizados ensaios triaxiais de carga repetida com estados de tensões correspondentes a materiais granulares. Apresentam-se abaixo os modelos representando os ensaios da laterita LLI, laterita LO, basalto BS e basalto BO respectivamente:

$$Mr = 80141\sigma_3^{0,0032} \quad (3)$$

$$Mr = 191722\sigma_3^{0,20} \quad (4)$$

$$Mr = 44282\sigma_3^{0,36} \quad (5)$$

$$Mr = 74725\sigma_3^{0,27} \quad (6)$$

em que Mr: módulo de resiliência (kPa);
 σ_3 : tensão de confinamento (kPa).

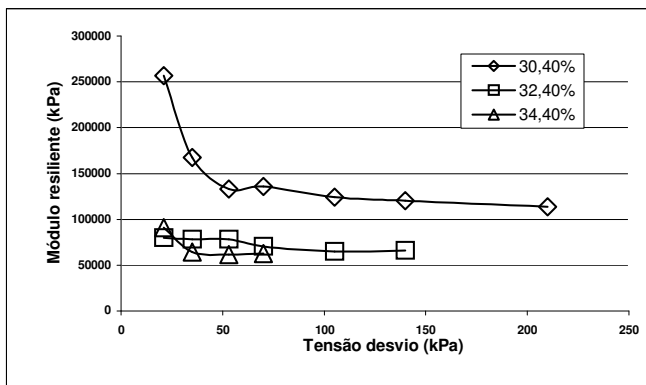


Figura 2: Módulo resiliente versus tensão desvio – argila vermelha

Observa-se que os módulos das lateritas superam largamente os dos basaltos alterados, destacando-se o comportamento elástico do material da jazida Olaria (modelo 4). Entre os basaltos alterados, o da jazida BO (modelo 6) apresenta comportamento elástico bem superior ao da jazida BS. Observa-se que os resultados de ensaios de ISC e módulo de resiliência não guardam qualquer relação. No caso das lateritas, ambas apresentaram idênticos valores de ISC, mas o comportamento elástico da laterita da jazida LO é muito superior ao da LLI. No caso dos basaltos alterados, o material com ISC mais elevado, basalto BS, apresenta o pior comportamento elástico. Evidencia-se, mais uma vez, que a tentativa de estimar valores de módulo a partir do ISC conduz a graves erros.

Para atender às exigências do DNER, a argila vermelha de Ijuí poderá ser utilizada como subleito, mas não como reforço do subleito (expansão maior que 1% e menor que 2%). Verificou-se também que os latossolos comparados na pesquisa têm ISC > 10% e < 20%, sendo bons para subleito e reforço de subleito, mas não para sub-base. Já as lateritas (ver a Tabela 2 e a Figura 1) atendem parcialmente à especificação ESP-378/98 do DNER para bases, sendo necessária uma pequena correção granulométrica para sua inclusão na faixa D da especificação. No tocante a plasticidade a laterita LLI atende aos limites de LL e IP e a laterita LO atende ao IP e no LL ultrapassa o limite em apenas 1%. No caso do equivalente de areia o limite mínimo da especificação é muito superior aos valores apresentados. Pelos valores apresentados de ISC, as lateritas podem ser utilizadas em bases de acordo com o DNER (maior que 80 %). Quanto aos basaltos alterados, observou-se que o basalto BO apresenta-se muito mais intemperizado que o basalto BS, por isso o BS apresenta melhor ISC que o BO, confirmando o melhor comportamento indicado nos ensaios de compactação. Os basaltos alterados são materiais adequados para sub-base, pois tem ISC > 20% e expansão menor que 1%, atendendo às exigências do DNER.

3.3 Comparação da argila vermelha com outras argilas semelhantes

Comparou-se na pesquisa a argila vermelha com resultados apresentados por Nogami e Villibor (1995), Passos (2000) para solos no noroeste do RS, por Abitante (1997) para solos localizados no Meio Oeste Catarinense e por Dias (1989) para solos localizados na região das Missões e dos Campos de Cima da Serra, RS. Observou-se uma notável semelhança da argila de Ijuí com a argila estudada por Abitante. Todos os latossolos apresentam baixa atividade

(índice de atividade menor que 0,75) conforme Skempton (1953). A pesquisa indicou que todos os solos têm granulometria fina e são argilas ou argilas arenosas, pois apresentam c' maior que 1,5. O caráter laterítico destes solos é visualizado por apresentarem e' menor que 1,15. Por isso são classificados como LG' – argilas lateríticas.

Na Tabela 3 apresentam-se os parâmetros dos modelos de comportamento resiliente para os latossolos de Ijuí e outros semelhantes. Já os valores dos módulos de resiliência dos basaltos alterados são menores que os apresentados pelas lateritas, próximos às da brita graduada, do ponto de vista elástico adequado para sub-base. Ressalta-se que o basalto BO apresenta valores mais altos de MR comparando como o basalto BS.

Tabela 3: Parâmetros de resiliência e frações finas de latossolos

Nº	ARGILA	PARÂMETROS DE RESILIÊNCIA			Argila	#200	Grãos <2m
		MR(MPa)=k ₁ (s ₃ /100) ^{k₂} (s ₃ emkPa)					
		K ₁ (Mpa)	K ₂	R ₂	%	%	%
01	Argila vermelha da pesquisa de Ijuí	133,17	0,24	0,35	82	95	73
02	Latos.Vermelho Escuro PINMAR Passos(2000) amostra 1	237,53	0,34	0,90	31	40	35
03	Latos.Vermelho Escuro PINMAR Passos(2000) amostra 2	224,37	0,30	0,88	31	40	35
04	Latossolo Vermelho Escuro PF33 Passos(2000) amostra 1	150,47	0,23	0,88	35	54	40
05	Latossolo Vermelho Escuro PF33 Passos(2000) amostra 2	151,21	0,30	0,95	35	54	40
06	Latossolo Vermelho Escuro PF14 Passos(2000) amostra 1	153,18	0,24	0,92	34	53	30
07	Latossolo Vermelho Escuro PF14 Passos(2000) amostra 2	152,77	0,28	0,90	34	53	30
08	Latossolo Vermelho Escuro SJ Passos(2000) amostra 1	187,90	0,18	0,73	33	35	35
09	Latossolo Vermelho Escuro SJ Passos(2000) amostra 2	251,98	0,26	0,83	33	35	35

3.4 Análise difratométrica de raios X

A análise difratométrica da argila vermelha constatou a presença de argilomineral do grupo das caolinitas. Para as lateritas constatou a presença dos argilominerais muscovita e caolinita e das fases cristalinas dos minerais quartzo e goetita. E para os basaltos alterados revelou a presença do argilomineral caolinita e fase do mineral cristobalita.

4. ANÁLISE PARAMÉTRICA DE PAVIMENTOS

Neste capítulo apresentam-se os resultados de dimensionamentos de pavimentos nos quais empregaram-se parâmetros de resistência (ISC) e deformabilidade (MR) dos materiais estudados (lateritas, basaltos alterados e argila vermelha). Foram empregados os métodos do DNER e da Prefeitura de São Paulo. Complementarmente, apresentam-se os resultados de uma análise paramétrica realizada com o objetivo de estimar as respostas estruturais dos materiais estudados, empregados em pavimentos de rodovias de baixo volume de tráfego.

Os dois revestimentos utilizados foram o tratamento superficial simples e o pré-misturado a frio, ambos com espessura de 3 cm. Já para as bases, utilizaram-se os dois tipos de lateritas, para as sub-bases, os dois tipos de basalto alterado e por último para o subleito, a argila vermelha, totalizando dezesseis estruturas.

A determinação dos coeficientes de equivalência estrutural dos materiais foi obtida da relação sugerida pela AASHTO (1986) e comentada em Radda (1989) a partir dos coeficientes de Poisson conforme Trichês (1985) (0,25 para misturas asfálticas, 0,35 para as lateritas e

basaltos e 0,45 para a argila vermelha) e dos módulos de resiliência do material referido e do material padrão (brita graduada). Na Tabela 4 apresentam-se os valores calculados.

Tabela 4: Coeficiente de equivalência estrutural dos materiais

Material e camada	a_i
Laterita LLI e=15cm	0,97
Laterita LO e=15 cm	1,07
Basalto BS com base e=15cm	1,03
Basalto BO com base e=15cm	1,16

4.1 Dimensionamento das estruturas selecionadas

O método do DNER (1979) fornece como coeficiente de equivalência estrutural de 1,2 para tratamento superficial e 1,4 para revestimento com PMF. Para os demais materiais empregaram-se os coeficientes da Tabela 4. O ISC da argila vermelha foi 12%. Na Tabela 5 apresentam-se as espessuras das bases e sub-bases mínimas segundo o método do DNER, para 3 volumes de tráfego.

Tabela 5: Espessuras mínimas de bases e sub-bases (método do DNER)

VALOR DE N	N=10 ⁵		N=5*10 ⁵		N=10 ⁶	
	Esp.da base	Esp.sub-base	Esp.da base	Esp.sub-base	Esp.da base	Esp.sub-base
ESTRUTURAS	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)
TS-B _{LLI} -SB _{BS}	19	19	20	22	21	23
TS-B _{LO} -SB _{BS}	17	20	18	22	19	23
TS-B _{LLI} -SB _{BO}	19	17	20	20	21	21
TS-B _{LO} -SB _{BO}	17	17	18	20	19	21
PMF-B _{LLI} -SB _{BS}	18	20	19	23	20	24
PMF-B _{LO} -SB _{BS}	16	20	17	23	18	24
PMF-B _{LLI} -SB _{BO}	18	18	19	20	20	21
PMF-B _{LO} -SB _{BO}	16	18	17	20	18	21

Já pelo método da Prefeitura Municipal de São Paulo (1991 e 1992) utilizando as mesmas espessuras de revestimentos e valores dos coeficientes de equivalência estrutural dos revestimentos do método do DNER, obtiveram-se as espessuras mínimas apresentadas na Tabela 6 para volumes de tráfego muito leve (TML), tráfego leve (TL) e tráfego médio (TM).

4.2 Análise de tensões e deformações

Com o auxílio do programa computacional ELSYM5, para os dois métodos, calcularam-se as tensões verticais no topo da camada do subleito, no topo da sub-base e no topo da base para todas as estruturas.

As tensões e deformações unitárias na fibra inferior do revestimento tanto para as estruturas revestidas com PMF como com tratamento superficial foram calculadas, porém sempre foram de compressão, tornando desnecessária a análise de ruptura por fadiga o que era esperado em face da pequena espessura do revestimento. As tensões e deformações foram calculadas para as posições exatamente abaixo da roda e no meio do rodado, considerando a aplicação da carga através do eixo padrão, ou seja, um eixo simples com rodado duplo de 82 kN. As

Equações 3, 4, 5 e 6 foram utilizadas para o cálculo do módulo de resiliência das lateritas e basaltos alterados em função da tensão de confinamento S_3 .

Tabela 6: Valores calculados para as espessuras das bases e sub-bases (método da PMSP)

TIPO DE TRÁFEGO	TML		TL		TM	
	Esp.da base (cm)	Esp.sub-base (cm)	Esp.da base (cm)	Esp.sub-base (cm)	Esp.da base (cm)	Esp.sub-base (cm)
ESTRUTURAS						
TS-B _{LLI} -SB _{BS}	14	10	18	10	18	15
TS-B _{LO} -SB _{BS}	13	10	16	10	16	15
TS-B _{LLI} -SB _{BO}	13	10	17	10	16	15
TS-B _{LO} -SB _{BO}	12	10	15	10	15	15
PMF-B _{LLI} -SB _{BS}	13	10	18	10	17	15
PMF-B _{LO} -SB _{BS}	12	10	16	10	16	15
PMF-B _{LLI} -SB _{BO}	12	10	16	10	15	15
PMF-B _{LO} -SB _{BO}	11	10	15	10	14	15

A argila vermelha apresentou módulos de resiliência variando de 102 a 114 MPa, para as estruturas dimensionadas pelo método do DNER e entre 111 a 129 MPa para as estruturas dimensionadas pelo método da PMSP. Na pesquisa, analisando as combinações de tensões calculadas, a Equação 2 oriunda do ensaio com combinação de tensões para solos granulares propostas pelo método de ensaio do DNER-ME-131/94 é o modelo matemático de comportamento que melhor caracteriza a argila vermelha.

Estimou-se a tensão admissível vertical para cada material utilizando a equação de Heukelom e Klomp (Pinto & Preussler, 2001), em função do módulo de resiliência e do número N conforme o modelo apresentado na Equação 7:

$$\sigma_{vadm} = (0,006 * MR) / (1 + 0,70 * \log N) \quad (7)$$

em que σ_{vadm} : tensão admissível vertical (kPa)

MR :módulo de resiliência (kPa)

N :tráfego em número equivalente de operações do eixo padrão de 82 kN

Para verificar a adequação estrutural dos pavimentos dimensionados, utilizou-se da razão entre a tensão vertical estimada pelo Elsym5 e a tensão vertical admissível, em porcentagem. Apresentam-se os resultados para as estruturas dimensionadas pelo método do DNER na Tabela 7 e para as estruturas dimensionadas pelo método da PMSP na Tabela 8. Pode-se perceber pelas tabelas referidas, nas estruturas dimensionadas pelo dois métodos, pelo grifo em negrito, apenas duas estruturas, **TS-B_{LLI}-SB_{BS}** e **TS-B_{LLI}-SB_{BO}**, tiveram tensão vertical calculada maior que a admissível, sempre no topo da base, para $N=5.10^5$ e para $N=10^6$ no método do DNER e apenas para um $N=10^6$ para o método da PMSP. Percebeu-se na pesquisa também, que para as estruturas dimensionadas, a base é a camada mais crítica, muito mais no ponto abaixo da roda do que no eixo do rodado. Para as sub-bases a situação mais crítica é para o ponto abaixo da roda, porém bem menos pronunciado. Já para os subleitos, o mais crítico é no ponto do eixo do rodado. Não se apresentam neste trabalho as tabelas da porcentagem da razão entre tensões calculadas versus tensões admissíveis para as estruturas dimensionadas pelo dois métodos no eixo do rodado por limitação de espaço e por apresentar nas simulações como máximo a razão de 54 %, bem abaixo do admissível.

Tabela 7 – Porcentagem da razão entre tensões calculadas versus tensões admissíveis para as estruturas dimensionadas pelo método do DNER abaixo da roda

VALOR DE N	N=10 ⁵			N=5*10 ⁵			N=10 ⁶		
(abaixo da roda)	S _v atuante	S _v atuante	S _v atuante	S _v atuante	S _v atuante	S _v atuante	S _v atuante	S _v atuante	S _v atuante
	S _v admiss.	S _v admiss.	S _v admiss.	S _v admiss.	S _v admiss.	S _v admiss.	S _v admiss.	S _v admiss.	S _v admiss.
ESTRUTURAS	topo base	tp sub-base	tp subleito	topo base	tp sub-base	tp subleito	topo base	tp sub-base	tp subleito
TS-B _{LLI} -SB _{BS}	91%	48%	36%	102%	51%	35%	107%	51%	35%
TS-B _{LO} -SB _{BS}	70%	47%	34%	78%	50%	35%	81%	49%	34%
TS-B _{LLI} -SB _{BO}	94%	43%	37%	106%	47%	36%	111%	46%	36%
TS-B _{LO} -SB _{BO}	71%	42%	36%	79%	45%	36%	83%	45%	35%
PMF-B _{LLI} -SB _{BS}	78%	43%	31%	79%	46%	31%	79%	46%	31%
PMF-B _{LO} -SB _{BS}	65%	44%	32%	66%	48%	32%	66%	47%	31%
PMF-B _{LLI} -SB _{BO}	80%	39%	32%	80%	41%	33%	81%	41%	32%
PMF-B _{LO} -SB _{BO}	66%	41%	33%	66%	43%	34%	67%	43%	33%

Tabela 8 – Porcentagem da razão entre tensões calculadas versus tensões admissíveis para as estruturas dimensionadas pelo método da PMSP abaixo da roda

VALOR DE N	TML			TL			TM		
(abaixo da roda)	S _v atuante	S _v atuante	S _v atuante	S _v atuante	S _v atuante	S _v atuante	S _v atuante	S _v atuante	S _v atuante
	S _v admiss.	S _v admiss.	S _v admiss.	S _v admiss.	S _v admiss.	S _v admiss.	S _v admiss.	S _v admiss.	S _v admiss.
ESTRUTURAS	topo base	tp sub-base	tp subleito	topo base	tp sub-base	tp subleito	topo base	tp sub-base	tp subleito
TS-B _{LLI} -SB _{BS}	74%	49%	49%	90%	45%	49%	105%	56%	41%
TS-B _{LO} -SB _{BS}	57%	46%	47%	69%	44%	49%	80%	55%	41%
TS-B _{LLI} -SB _{BO}	76%	49%	50%	92%	44%	50%	107%	59%	50%
TS-B _{LO} -SB _{BO}	58%	46%	49%	69%	44%	50%	81%	55%	48%
PMF-B _{LLI} -SB _{BS}	64%	44%	45%	77%	38%	43%	90%	50%	43%
PMF-B _{LO} -SB _{BS}	54%	44%	45%	65%	40%	44%	75%	49%	43%
PMF-B _{LLI} -SB _{BO}	65%	44%	46%	78%	40%	45%	91%	53%	46%
PMF-B _{LO} -SB _{BO}	54%	45%	47%	65%	40%	45%	75%	52%	46%

4.4 Comparação dos métodos de dimensionamento

Pela análise das Tabelas 5 e 6 percebe-se que o método de dimensionamento da PMSP gera espessuras menores do que o método do DNER. A média das espessuras da camada granular (base + sub-base) das estruturas do método do DNER é de 39 cm. Já para as estruturas do método da PMSP é de 27 cm. Isto representa que em média a espessura da camada granular de uma estrutura dimensionada pelo método da PMSP será 30% menor do que uma estrutura dimensionada pelo método do DNER, para os materiais da pesquisa.

4.5 Proposição das estruturas adequadas

Sabe-se que camadas granulares muito delgadas são de difícil execução. Nogami e Villibor (1995) recomendaram que “por razões práticas, utilizar, sempre que possível espessura mínima de base igual a 15 cm”, referindo ao uso de solos arenosos finos lateríticos (SAFL) em pavimentação rodoviária. Silveira (2000) descartou espessuras de base menores que 10 cm prevendo problemas executivos nas estruturas. Já o DNER recomenda em DNER (1996) que a espessura mínima a adotar para compactação de camadas granulares é de 10 cm. Como as

lateritas têm uma granulometria não muito grossa (cerca de 80 % passa na peneira nº 4) e os basaltos alterados são muito frágeis e são quebrados e até moídos na compactação, recomenda-se a manutenção do limite de 10 cm para a utilização de camadas das lateritas e dos basaltos alterados. Em virtude deste critério, nenhuma das estruturas dimensionadas deverá ter aumentado a sua espessura.

Quanto ao critério da comparação da razão da tensão calculada e a tensão admissível, recomenda-se a não utilização de tratamento superficial para a laterita LLI em valores de N maior que 10^5 para estruturas dimensionadas pelo método do DNER e em tráfego médio para estruturas dimensionadas pelo método da PMSP.

6. CONCLUSÕES

Apresentam-se as considerações importantes da pesquisa a seguir:

- As classificações tradicionais são importantes como informação complementar, porém as classificações alternativas descreveram e classificaram mais adequadamente a argila vermelha.
- Pode-se concluir que para a argila vermelha de Ijuí, a interpretação das curvas de deformabilidade prevendo que o solo seria uma argila ou argila arenosa e uma classificação MCT do tipo LG' ou NG' proposta por Nogami e Villibor (2001) correspondeu plenamente.
- Não é possível quantificar a resistência do solo a partir da sua granulometria. Verifica-se que todos os latossolos têm ISC maior que 10% e menor que 20 % e são solos bons para subleito e reforço de subleito, mas não para sub-base, desde que não tenham expansão maior que 1%. A argila vermelha de Ijuí por ter expansão maior que 1% não é recomendada para reforço de subleito de acordo com as especificações do DNER.
- Analisando as combinações de tensões calculadas, o modelo $k-\sigma_3$ oriundo do ensaio com combinação de tensões para solos granulares propostas pelo método de ensaio do DNER-ME-131/94 é o modelo matemático de comportamento que melhor caracterizou a argila vermelha de Ijuí, principalmente pelo nível de tensão de confinamento semelhante ao que ocorre na simulação com o ELSYM5 e no pavimento.
- A tensão de confinamento calculada pelo ELSYM5 variando de 31 a 54 kPa no método de dimensionamento do DNER e variando de 46 a 85 kPa no método da PMSP e a tensão desvio apresentada nos cálculos variando de 16 a 161 kPa no método do dimensionamento do DNER e 50 a 308 kPa no método da PMSP, sugere a utilização de uma combinação de tensões mais adequada nos ensaios triaxiais, talvez utilizando a combinação proposta por Aranovich (1985) utilizada por Passos (2000) com tensões de confinamento de 20, 40 e 100 kPa e tensão desvio de 20, 40, 70 e 100 kPa e para a tensão de confinamento de 20 kPa com as tensões desvio adicionais de 35 e 52,5 kPa.
- As duas lateritas atendem as especificações do DNER para a utilização como base de pavimentos, ressalvando que uma pequena correção granulométrica deve ser feita e o valor permitido de equivalente de areia (30 % contra os 12% apresentados pelas lateritas).
- Os dois basaltos alterados atendem as especificações do DNER para a utilização como sub-base de pavimentos. Interessante ressaltar que o basalto BS tem um comportamento melhor quanto às características de compactação e suporte e um pior comportamento do ponto de vista resiliente que o basalto BO.
- Comparando a razão da tensão calculada e a tensão admissível, recomenda-se a não utilização de tratamento superficial para a laterita LLI em valores de N maior que 10^5 (estruturas dimensionadas pelo método do DNER) e em tráfego médio para estruturas dimensionadas pelo método da PMSP.

- O método de dimensionamento da PMSP gerou espessuras menores do que o método do DNER. A média das espessuras da camada granular (base + sub-base) das estruturas do método do DNER é de 39 cm. Já para as estruturas do método da PMSP é de 27 cm. Isto representa que em média a espessura da camada granular de uma estrutura dimensionada pelo método da PMSP será 30% menor do que uma estrutura dimensionada pelo método do DNER, para os materiais da pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABITANTE, Edgar (1997) *Proposta metodológica de mapeamento geotécnico com o uso de pedologia em solos tropicais visando obras rodoviárias*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil – Área: Infraestrutura e Gerência Viária – Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFSC. Florianópolis.
- AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS (1986) *Guide for Design of Pavement Structures*. Washington, DC.
- ARANOVICH, L.A.S. (1985) *Desempenho de pavimentos de baixo custo do Estado do Paraná*. Dissertação de Mestrado. Coordenação de Programas de Pós-Graduação em Engenharia. UFRJ. Rio de Janeiro, RJ. 359p.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM (1996) *Manual de Pavimentação*. Rio de Janeiro. 2.ed.
- DIAS, R.D. (1989) Geomecânica dos solos lateríticos do Sul do Brasil. *Anais do II Colóquio de Solos Tropicais e Subtropicais e Suas Aplicações Em Engenharia Civil*. CPGEC/UFRGS. Porto Alegre.
- DIAS, R.D. e MILITITSKY, J. (1990) *Proposta preliminar de um sistema de classificação de perfis de solos tropicais e subtropicais*. Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil – UFRGS. 12p.
- NOGAMI, J. e VILLIBOR, D.F. (1995) *Pavimentação de baixo custo com solos lateríticos*. Villibor, São Paulo.
- NOGAMI, J.S.; VILLIBOR, D.F. (2001) Interpretação da forma das curvas de deformabilidade da metodologia MCT. *Anais da XXXIII Reunião Anual de Pavimentação*. Florianópolis. Associação Brasileira de Pavimentação. p.791-803.
- PASSOS, Maria Cristina Ferreira (2000) *Metodologia MCT aplicada aos solos arenosos finos lateríticos do Rio Grande do Sul visando Pavimentação*. Dissertação de Mestrado em Geotecnia – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFRGS. Porto Alegre, RS.
- PREUSSLER, E.S. e PINTO, S. (1982) Proposição de método para projeto de reforço de pavimentos flexíveis considerando a resiliência. *Anais do XVII Reunião Anual de Pavimentação*, Associação Brasileira de Pavimentação, Brasília. p.2204-2263.
- PINTO, S. e PREUSSLER, E. (2001) *Pavimentação rodoviária. Conceitos fundamentais sobre pavimentos flexíveis*. Rio de Janeiro. 25p p.
- RADDA, G.R.; WITCZAK, M.W.; RABINOW, S.D. (1989) *Comparison of AASHTO Structural evaluation Techniques Using Nondestructive Deflection Testing*. pp. 134-144. Transportation Research Board 1207.
- SILVEIRA, Joel (2000) *Metodologia para projeto de pavimentos flexíveis em vias urbanas da região metropolitana de Porto Alegre*. 133p. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFRGS. Porto Alegre, RS.
- SKEMPTON A.W. (1953) The colloidal activity of clays. *Proceedings 3rd International Conference on soil mechanic and foundation engineering*. Zürich. v.1, p.57-61.
- TRICHÊS, Glicério (1985) *Determinação do coeficiente de Poisson de solos compactados no ensaio triaxial dinâmico e o cálculo da deflexão de pavimentos*. Rio de Janeiro. 163p. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil – COPPE/UFRJ.
- WAYHS, C.A.S.P.; NUÑEZ, W.P.; CERATTI, J.A. (2001) Caracterização de materiais alternativos para pavimentação na região Noroeste Colonial do Rio Grande do Sul. *Anais da XXXIII Reunião Anual de Pavimentação*. Associação Brasileira de Pavimentação. Florianópolis p.041-050.

Endereço dos autores:

Primeiro Autor: Rua Benjamin Constant n° 541
98700-000 – Ijuí, RS, Brasil
Segundo e terceiro autor:
Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil
Av. Osvaldo Aranha n° 99 – 3° andar
90035-190 – Porto Alegre, RS, Brasil

Fone: (55)-3331-2470
E-mail: caliti@brturbo.com

Fone: (51)-3316-3659
E-mail: wpnunez@cpgec.ufrgs.br