

Estudos recentes conduzidos na FURG sobre solos alternativos para pavimentação econômica e obras de terra na Planície Costeira Sul

Cezar Augusto Burkert Bastos

Departamento de Materiais e Construção – FURG, Rio Grande, RS, bastos@dmc.furg.br

RESUMO: O trabalho apresenta uma avaliação de propriedades dos solos encontrados na Planície Costeira Sul e arredores com potencial de emprego em pavimentação de baixo custo e pequenas obras de terra. Foram investigadas diferentes jazidas de solos de 5 agrupamentos geotécnicos: solos lateríticos graníticos, saibros graníticos, areias lateríticas, plintossolos e planossolos. Foram determinadas propriedades de compactação, de capacidade de suporte, de expansão e contração e de infiltrabilidade pela Metodologia MCT. A erodibilidade de solos representativos e a dispersibilidade dos planossolos foram avaliados, assim como o critério tecnológico para uso de SAFLs como bases de pavimentos de baixo custo foi aplicado às areias lateríticas. Os resultados iniciais indicam que os solos estudados vêm a constituir alternativas tecnicamente viáveis para pavimentação econômica e pequenas obras de terra, justificando a continuidade das pesquisas.

1. INTRODUÇÃO

A malha rodoviária do sul do Estado destaca-se a pequena extensão em estradas pavimentadas. A razão para tal, está relacionada à escassez de recursos públicos e aos altos custos dos materiais usualmente empregados na pavimentação de estradas.

Na Planície Costeira Sul (Figura 1), a distância de transporte de materiais considerados nobres (p.ex. brita graduada) para municípios mais próximos a costa é muito grande, encarecendo obras de pavimentação de pequeno a médio porte, como aquelas que envolvem estradas encarregadas do escoamento das produções agrícolas do interior dos municípios da região, chamadas de estradas vicinais. A viabilidade econômica de pavimentação destas estradas secundárias passa pela redução de custos de construção, através da utilização de materiais locais na execução das estruturas dos pavimentos. Por serem destinadas ao tráfego leve, as estradas vicinais são bastante tolerantes quanto às especificações para materiais constituintes das camadas de seus pavimentos. Estas soluções alternativas são extensíveis a outras obras viárias também caracterizadas pelo tráfego leve como pavimentação urbana em bairros, pátios de manobras e estacionamentos.

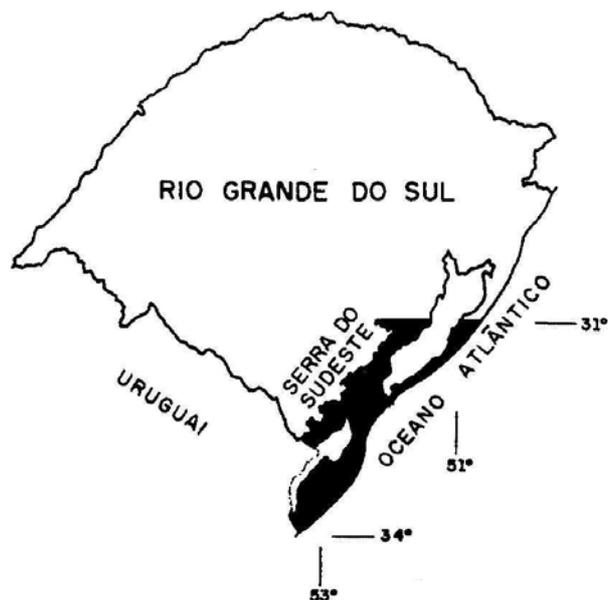


Figura 1. Planície Costeira Sul do RS (segundo definido em Bastos [2])

Cabe à comunidade técnico-científica procurar soluções alternativas que atendam à dois critérios básicos: qualidade e baixo custo. Estas razões justificam pesquisas no sentido de se conhecer o comportamento compactado dos solos regionais encontrados na Zona Sul do Estado. Busca-se com isso alternativas econômicas e viáveis para melhoria das estradas da região e para obras de terra de pequeno porte (pequenas barragens, aterros

sanitários, lagoas de estabilização, aterros em geral, ...). Neste sentido são também indicadas metodologias alternativas para avaliação dos materiais, como a Metodologia MCT.

Neste trabalho são apresentados recentes resultados obtidos pelo Laboratório de Geotecnia da FURG no estudo de propriedades geotécnicas e da aptidão de uso em pavimentação de baixo custo e em pequenas obras de terra de solos regionais encontrados na Planície Costeira Sul e arredores.

2. MÉTODO DE TRABALHO

Os trabalhos de campo na identificação e amostragem de perfis típicos de solos regionais com potencial uso como material de empréstimo foram iniciados no ano de 2001. Num trabalho conjunto com o Laboratório de Resistência dos Materiais da UCPel foram identificados e amostrados 24 perfis representativos de solos regionais.

Em função da origem geológica e pedogênese, estes solos foram reunidos em cinco agrupamentos geotécnicos: solos lateríticos graníticos, saibros graníticos, areias lateríticas, plintossolos e planossolos. Isoladamente uma jazida de areia de duna (AREC) foi estudada como material de referência. O Quadro 1 apresenta os 28 solos estudados.

Os solos foram caracterizados e classificados em laboratório pelos métodos tradicionais e pela Metodologia MCT. Os parâmetros de compactação foram determinados por ensaios de compactação dinâmica em equipamento miniatura (ensaios mini-Proctor) (DNER-ME 228/94).

A erodibilidade de solos representativos dos agrupamentos geotécnicos foi avaliada por ensaios de desagregação e pelo critério MCT. Este último baseado em ensaios de infiltrabilidade e perda por imersão com corpos de prova compactados em equipamento miniatura, segundo proposta de Nogami e Villibor [4]. Este critério incorpora a proposta de avaliação geotécnica da erodibilidade de solos residuais não saturados apresentada em Bastos [1], estendida a avaliação de solos de natureza sedimentar e compactados.

Os planossolos, com um suspeito comportamento dispersivo, tiveram a dispersividade avaliada por ensaios sedimentométricos comparativos, “crumb tests” e ensaios químicos com a água intersticial.

Quadro 1. Solos estudados

Agrupamento geotécnico	Jazida – identificação
Solos lateríticos graníticos	Capão do Almoço (BR116) – CAPV ; Embrapa – EMBB e EMBBp ; Passo do Salso – PSAL ; Turuçu – TURB
Saibros graníticos	Embrapa – EMBC ; Cerro do Estado – CEST1 ; Turuçu – TURC ; Saibro Granel – SGRA
Areias lateríticas	Cotovelo – COTO ; Lás Acácias – LAC Barra Falsa – BFAL ; Domingos Petrolini – PETRO ; Casa do Retiro – CRET ; Areal do Mar – ARMAR ; Prefeitura – PREFE
Plintossolos	Quinta – QUI ; Barrinho Estreito – BARJE e BARJE2
Planossolos	Passo do Moinho – PMOI ; Carucio – CAR1 , CARC1 e CARC2 ; Guilayn – GUY ; Capão do Almoço – CAPL ; Santa Bárbara – SBC1 e SBC2

Com o objetivo de aplicar o critério tecnológico para bases em SAFLs (solos arenosos finos lateríticos), as areias lateríticas tiveram a capacidade de suporte e expansão avaliadas pelo ensaio mini-CBR, a contração ao ar e a infiltrabilidade avaliadas pela Metodologia MCT (Nogami e Villibor [5]).

3. RESULTADOS

3.1. Caracterização dos solos

Na Tabela 1 são resumidos os resultados da classificação geotécnica e dos parâmetros de compactação dos solos.

Na Figura 2 são apresentados os solos estudados no gráfico de classificação MCT em função dos agrupamentos geotécnicos.

Tabela 1. Classificação geotécnica e parâmetros de compactação dos solos

Solo	Classificação geotécnica		Parâmetros compactação *	
	SUCS/HRB	MCT	$W_{ót}$ (%)	$\gamma_{dmáx}$ (kN/m ³)
CAPV	CL/A7-6	LG ⁷	20,9	16,5
EMBB	ML/A7-5	LG ⁷	19,9	16,6
PSAL	MH/A7-5	LG ⁷	23,3	15,8
TURB	MH/A7-5	LG ⁷	21,8	16,5
EMBBp	ML/A7-5	LG ⁷	21,3	16,0
EMBC	MH/A7-5	NG ⁷	18,7	16,2
CEST1	SM/A5	LG ⁷	24,3	14,7
TURC	SM/A4	NG ⁷	15,1	17,4
SGRA	SM/A2-4	NA	15,9	17,0
COTO	SC/A6	LG ⁷	15,3	17,8
LAC	SM/A2-4	LA	12,4	18,9
BFAL	SM/A2-4	LA	12,5	18,9
PETRO	SM/A2-4	NA	14,2	17,7
CRET	SM/A2-4	NA	12,4	17,9
ARMAR	SC/A2-6	NA ⁷	13,5	18,4
PREFE	SC/A2-6	LA	14,5	18,5
QUI	SC/A7-6	NG ⁷	16,5	16,9
BARJE	SC/A6	NG ⁷	18,9	17,5
BARJE2	SC/A2-6	LA ⁷ /LG ⁷	14,0	18,5
PMOI	CL/A7-6	NG ⁷	15,4	18,0
CARC1	CL/A6	NG ⁷	17,0	17,4
GUY	CL/A6	NG ⁷	17,2	17,6
CAPL	CL/A6	LG ⁷	16,9	17,9
SBC1	CL/A6	LG ⁷	16,9	17,5
EPAL	CL/A6	NG ⁷	17,4	17,0
CAR1	CH/A7-6	NG ⁷	22,6	15,6
CARC2	MH/A7-6	LG ⁷	25,6	15,3
SBC2	CL/A7-6	LG ⁷	22,5	15,3
AREC	SP/A3	NA	6,5	15,8

* Ensaio de compactação miniatura (mini-Proctor) na energia equivalente a do Proctor Normal

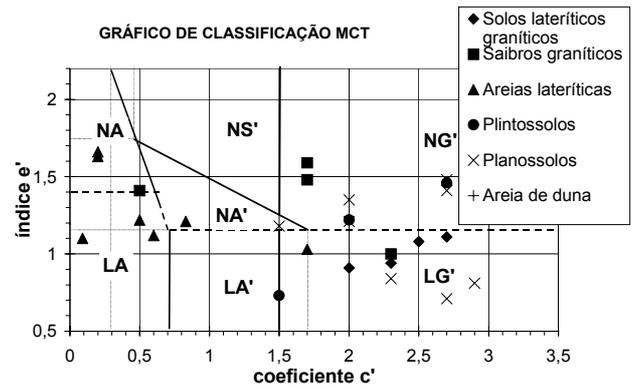


Figura 2. Solos estudados no gráfico de classificação MCT, segundo os agrupamentos geotécnicos

3.2. Avaliação da erodibilidade

3.2.1. Ensaios de desagregação

A avaliação da erodibilidade dos solos foi orientada pelo estudo realizado por Bastos [1]. Neste, os ensaios de desagregação (“slaking tests”) são indicados numa avaliação preliminar do potencial erosivo dos solos.

O ensaio de desagregação consiste em imergir gradualmente em água uma amostra de solo e descrever qualitativamente os fenômenos observados. Os solos erodíveis tendem a desagregar em água. A desagregação em água está associada a fenômenos de dispersão e de desaeração de solos não saturados. Foram utilizadas amostras compactadas no equipamento miniatura ($\phi = 5\text{cm}$ e $h = 5\text{cm}$) na condição de umidade ótima de compactação ($W_{ótima}$) e previamente secas ao ar. A submersão é realizada em três estágios: 1/3 da altura, 1/2 da altura e submersão completa, os dois iniciais por períodos de 30 minutos e submersão total por 23 horas.

Os resultados mostram desagregação total dos solos saprolíticos graníticos, das areias lateríticas, do plintossolo e dos planossolos, sendo portanto identificados como potencialmente erodíveis, segundo critério de Bastos [1]. O solo laterítico granítico mostrou pequena desagregação, mesmo com a submersão total. Os planossolos destacaram-se pela intensa turbidez gerada na água de imersão. Este fato, aliado a evidências de campo, justificou a investigação da dispersibilidade destes solos por ensaios específicos.

3.2.2. Aplicação do critério MCT

O critério de erodibilidade pela metodologia MCT, proposto em Nogami e Villibor [4], é essencialmente empírico e baseado na correlação com o comportamento frente à erosão de um grande número de cortes de estradas. Segundo os autores, as duas propriedades que permitem prever o comportamento dos solos tropicais frente à erosão hídrica são a infiltrabilidade e a erodibilidade específica. A infiltrabilidade, propriedade hidráulica de solos não saturados, representa a facilidade com que a água infiltra no solo através de sua superfície e é quantificada pelo coeficiente de sorção. A erodibilidade específica é representada pela perda de massa por imersão. Ensaio específicos para quantificar estas propriedades compõe a Metodologia MCT: ensaio de infiltrabilidade e ensaio de perda por imersão modificado (ou erodibilidade específica) (Figura 3). A partir dos dados de coeficiente de sorção (s em $\text{cm}/\text{min}^{1/2}$) e perda de massa por imersão modificado (π_i em %), Nogami e Villibor [4] estabeleceram a relação $\pi_i/s = 52$ como limite a ser adotado no critério de erodibilidade: solos com $\pi_i/s > 52$ são considerados erodíveis, alertando para adequadas medidas de proteção à erosão. O critério de erodibilidade MCT foi confirmado para solos residuais da Região Metropolitana de Porto Alegre (Bastos [1]).

Apesar de indicado para avaliação do comportamento dos solos na condição natural, Nogami e Villibor [5] propõem, em uma primeira aproximação, o uso do mesmo critério para avaliação de solos compactados empregados em saias de aterros e bordas de pavimentos.

Os corpos de prova para os ensaios ($\phi = 5\text{cm}$ e $h \approx 5\text{cm}$) foram moldados na umidade ótima pelo equipamento de compactação miniatura. Os ensaios foram realizados em condições diferentes de umidade inicial das amostras: na condição natural (compactadas e ensaiadas na umidade ótima), secas ao ar (após compactadas na umidade ótima) e umedecidas (após a ascensão da frente de umidade ao topo da amostra).

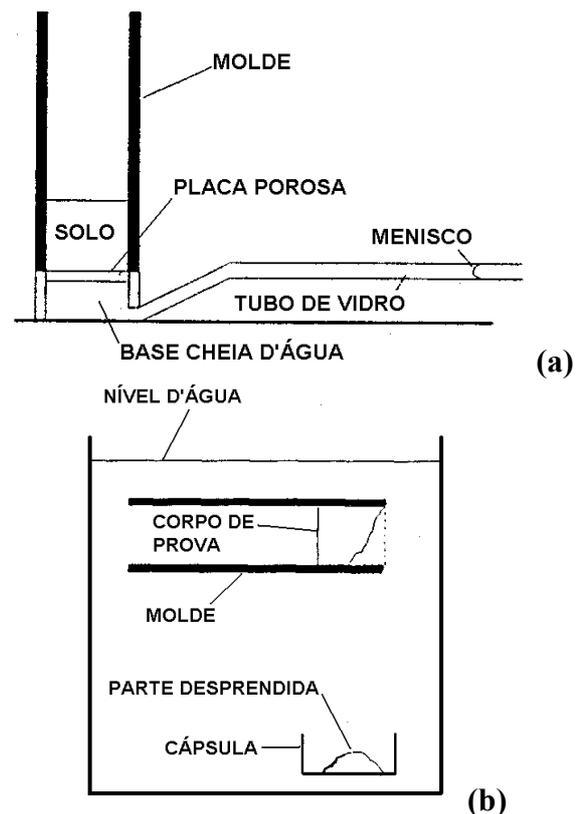


Figura 3. Ensaio de infiltração (a) e erodibilidade específica (b) da Metodologia MCT

A Tabela 2 apresenta a relação π_i/s obtida nos ensaios e a aplicação do critério MCT. A Figura 4 apresenta os solos estudados no Gráfico do Critério de Erodibilidade MCT (Nogami e Villibor [5]).

3.2.3. Considerações sobre a erodibilidade dos solos

O ensaio de desagregação revelou os solos saprolíticos graníticos, as areias lateríticas, o plintossolo e os planossolos como potencialmente erodíveis. O solo laterítico granítico mostrou pequena desagregação mesmo com a submersão total, caracterizando maior resistência a erosão.

Tabela 2. Síntese dos resultados e aplicação do critério de erodibilidade MCT a solos representativos dos agrupamentos geotécnicos estudados

Solo	condição	pi/s	Critério de erodibilidade MCT
PSAL	W _{ótima}	0	não erodível
	seca ao ar	0	não erodível
	pré-infiltrada	0	não erodível
EMBC	W _{ótima}	1512	erodível
	seca ao ar	937	erodível
	pré-infiltrada	9250	erodível
CEST1	W _{ótima}	4	não erodível
	seca ao ar	17	não erodível
	pré-infiltrada	12	não erodível
BFAL	W _{ótima}	977	erodível
	seca ao ar	226	erodível
	pré-infiltrada	11107	erodível
CRET	W _{ótima}	669	erodível
	seca ao ar	204	erodível
	pré-infiltrada	18444	erodível
BARJE 2	W _{ótima}	36	não erodível
	seca ao ar	48	não erodível
	pré-infiltrada	0	não erodível
EPAL	W _{ótima}	4557	erodível
	seca ao ar	1901	erodível
	pré-infiltrada	14136	erodível
SBC2	W _{ótima}	446	erodível
	seca ao ar	72	erodível
	pré-infiltrada	2075	erodível

O critério proposto pela Metodologia MCT permitiu caracterizar como erodíveis as areias lateríticas e planossolos. Os saibros graníticos não apresentaram uniforme comportamento. Maior resistência a erosão é verificada para saibros com comportamento laterítico da fração fina (classificados como LG'). O solo laterítico granítico mostrou-se resistente a erosão, resultado condizente com as propriedades estimadas pela classificação MCT (solo pertencente ao grupo LG'). O plintossolo de comportamento laterítico estudado (BARJE2) apresentou-se resistente a erosão em todas condições de umidade avaliadas.

Em resumo, os resultados indicam a resistência a erosão dos solos lateríticos graníticos quando compactados, habilitando estes solos em aplicações onde são sujeitos a ação severa do fluxo d'água superficial, na proteção mecânica de outros solos erodíveis e mesmo em soluções de drenagem superficial baixo custo. Por outro lado, as areias lateríticas e os planossolos, mesmo quando compactados, são solos erodíveis e exigem uma especial proteção à erosão quando aplicados em pavimentação e obras de terra. O comportamento dispersivo dos planossolos, constatado pela turbidez na água dos ensaios, despertou o interesse pelo estudo específico desta propriedade. Para os demais solos, somente a investigação específica permite uma tomada de decisão. Neste sentido, a aplicação do critério de erodibilidade MCT é indicada.

3.3. Avaliação da dispersibilidade dos planossolos

3.3.1. "Crumb tests"

O "crumb test", proposto por Sherard et al. [7], consiste na observação visual do comportamento de um torrão de solo imerso em água destilada. A dispersão em água é identificada pela turbidez na água de imersão a partir do torrão. Se o "crumb test" indicar dispersão, é provável que o solo seja dispersivo. O inverso, contudo, não é necessariamente verdadeiro.

A NBR 13601/96 estabelece os procedimentos de ensaio. No caso em questão, onde o interesse é avaliar o comportamento do solo compactado, a norma faculta o uso de

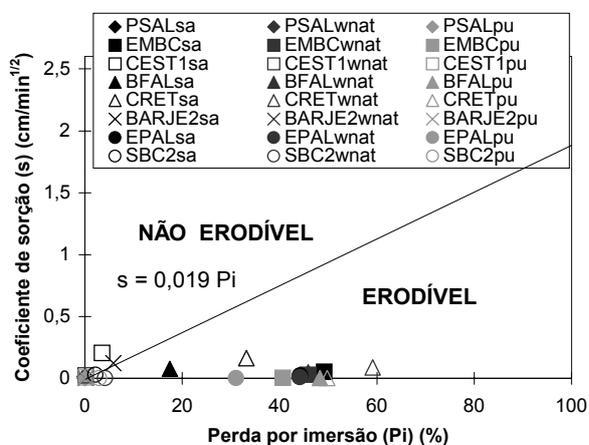


Figura 4. Aplicação do critério de erodibilidade MCT a solos representativos dos agrupamentos geotécnicos estudados

amostras compactadas. Corpos de prova miniatura (CPs de $\phi = 5\text{cm}$ e $h = 5\text{cm}$) foram moldados na umidade ótima de compactação (energia Proctor Normal). De cada solo foram ensaiados CPs pós-compactação e secos ao ar. Os CPs foram imersos em água destilada e conforme o comportamento observado é atribuído um grau, conforme o Quadro 2.

Quadro 2. Graus de dispersibilidade atribuídos no “crumb test” (segundo NBR 13601/96)

Grau	Comportamento
1	Comportamento não dispersivo – o torrão (ou CP) de solo pode absorver água, sofrer esborramento e esparramar-se no fundo do béquer, formando uma pilha achatada, mas não se observa sinal de turvação no líquido;
2	Comportamento levemente dispersivo – há indícios de turvação na água, próximos à superfície do torrão (ou CP);
3	Comportamento moderadamente dispersivo – observa-se uma nuvem de colóides em suspensão, geralmente finos veios espalhando-se no fundo do béquer;
4	Comportamento fortemente dispersivo – observa-se uma nuvem coloidal, geralmente uma película muito fina, cobrindo quase todo o fundo do béquer. Em casos extremos, toda a água torna-se turva.

Os resultados obtidos para os planossolos ensaiados indicam, na grande maioria, comportamento fortemente dispersivo (grau 4) Exceção feita para o solo PMOI, para o qual não foi indicado comportamento dispersivo.

3.3.2. Ensaio sedimentométrico comparativos

A dispersibilidade é estimada a partir de ensaios de sedimentação com e sem dispersão (uso de agente defloculante e agitação mecânica). A porcentagem de dispersão (segundo a NBR 13602/96) é a razão entre os teores de argila ($\phi < 0,005\text{ mm}$) com e sem dispersão. A Razão de Dispersão (Middleton [3]), considera a relação entre o somatório das frações silte e argila ($\phi < 0,05\text{mm}$) com e sem dispersão. Os resultados são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3. Resultados da porcentagem de dispersão e Razão de Dispersão (RD)

Solo	Porcentagem de Dispersão (%)	Razão de Dispersão (RD) (%)
PMOI	34,5	100
CARC1	78,8	92,0
GUY	96,7	100
CAPL	86,4	89,4
SBC1	91,7	94,8
EPAL	57,5	88,9
CAR1	86,1	91,7
CARC2	91,5	95,4
SBC2	77,5	90,0

Os critérios de dispersibilidade pela porcentagem de dispersão identificam solos dispersivos como aqueles com valores $> 40\%$ (segundo Soil Conservation Service/EUA).

A Razão de Dispersão de Middleton foi concebida como critério de erodibilidade. Segundo Middleton [3], solos com $RD > 15\%$ são erodíveis. Já Bastos [1], indica que solos com $RD > 50\%$ são potencialmente erodíveis. É importante esclarecer que sendo os solos caracterizados como erodíveis pelo critério não implica serem considerados dispersivos.

Pela porcentagem de dispersão, na exceção do PMOI, todos os solos são considerados dispersivos, com destaque aos solos GUY, SBC1, CARC2, CAPL e CAR1 cuja porcentagem de dispersão é superior a 85%. Já a Razão de Dispersão caracteriza todos os solos como erodíveis, condizente com o resultado obtido pelo critério de erodibilidade MCT aplicado a dois solos do grupo dos planossolos (EPAL e SBC2).

3.3.3. Ensaio químicos com a água intersticial

O comportamento dispersivo dos solos está associado principalmente com a relação entre cátions de sódio e a quantidade total de sais dissolvidos, considerada como a soma de cátions de sódio, potássio, cálcio e magnésio dissolvidos na água intersticial (Sherard et al. [7]). O sódio age no sentido de aumentar a espessura da camada dupla de água difusa, que envolve as partículas individuais de argila, daí decorrendo uma redução nas forças de atração entre partículas, possibilitando assim que elas

sejam destacadas da massa de solo com mais facilidade.

Amostras dos planossolos foram encaminhadas ao Laboratório de Análise de Solos da Faculdade de Agronomia da UFRGS para determinação da quantidade de sais dissolvidos no extrato de saturação (cátions de Ca, Mg, Na e K).

Os principais parâmetros calculados a partir dos resultados de ensaios para avaliação da dispersibilidade dos solos foram: Total de Sais Dissolvidos (TSD) (Equação 1); Porcentagem de Sódio (% Na) (Equação 2) e Razão de Absorção de Sódio (índice SAR) (Equação 3). Os parâmetros de calculados a partir dos resultados dos ensaios químicos são apresentados na Tabela 4.

$$TSD = Ca + Mg + Na + K \quad (1)$$

$$\% Na = (Na / TSD) \cdot 100\% \quad (2)$$

$$SAR = Na / [(Ca + Mg)/2]^{1/2} \quad (3)$$

Tabela 4. Parâmetros a partir dos ensaios químicos com a água intersticial

Solo	TSD (meq/l)	% Na (%)	Índice SAR
PMOI	0,67	55,2	1,09
CARC1	42,8	23,4	2,63
GUY	27,6	34,4	3,25
CAPL	38,6	18,7	1,87
SBC1	45,1	14,4	1,51
EPAL	6,8	9,6	0,38
CAR1	30,4	28,0	2,63
CARC2	57,0	22,1	2,70
SBC2	39,0	18,2	1,79

Os resultados indicam um relativamente baixo teor de sais dissolvidos para o solo PMOI. Segundo Sherard et al. [7], considerações teóricas indicam que não é esperada dispersão em solos com TDS < 1 meq/l. O fato pode explicar o comportamento não dispersivo deste solo no ensaio sedimentométrico e no “crumb test”.

Em Sherard et al. [7] é apresentado um critério de identificação baseado no TDS e na % Na. A Figura 5 apresenta os solos estudados frente ao critério. A maioria dos solos situam-se na Zona B do gráfico, correspondente a

solos não dispersivos, já o solo PMOI encontra-se na Zona C, que inclui solos dispersivos e não dispersivos. Estes resultados não concordam com aqueles dos ensaios sedimentométricos e dos “crumb tests”.

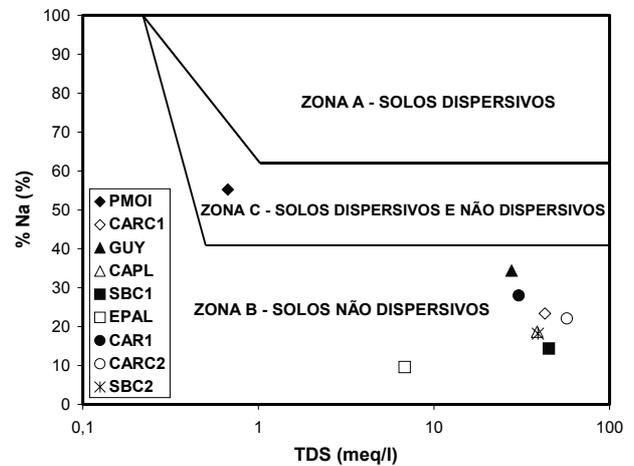


Figura 5. Solos estudados junto ao critério de Sherard et al. [7]

Também em Sherard et al. [7], são apresentados resultados combinando os dados de dispersão SCS e dos ensaios químicos (Figura 6). Observa-se que a maioria dos solos estudados situam-se na zona dos solos dispersivos ou próximo a esta. Os solos EPAL e PMOI são aqueles que mais se aproximam da zona dos solos não dispersivos.

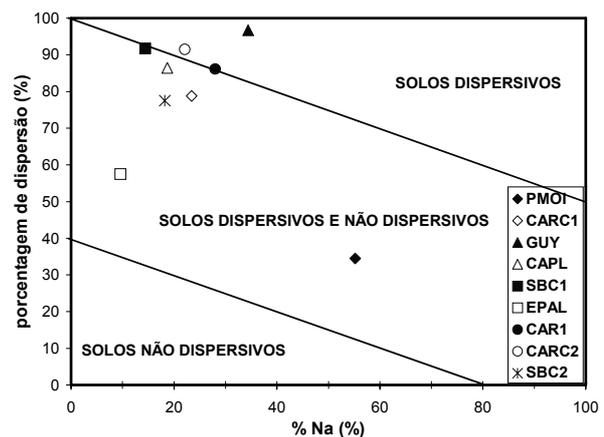


Figura 6. Análise da dispersibilidade combinando porcentagem de dispersão e % Na (proposta desde dados de Sherard et al. [7])

A análise da dispersibilidade em função do índice SAR segue o chamado critério australiano. Neste, considerando a erosão por água pura, os solos são dispersivos se o índice SAR da água intersticial excede a 1 ou 2.

Adotando como limite o valor 1,5, na exceção dos solos EPAL e PMOI, todos os demais planossolos seriam considerados dispersivos.

3.3.4. Considerações sobre a dispersibilidade dos planossolos

Os “crumb tests” realizados com os planossolos indicaram, na grande maioria, comportamento fortemente dispersivo.

Os ensaios sedimentométricos também indicaram o potencial de dispersibilidade dos planossolos estudados. Pela porcentagem de dispersão, a maioria dos solos são considerados dispersivos, ratificando os resultados dos “crumb tests”.

Os ensaios químicos indicaram resultados não condizentes com os “crumb tests” e ensaios sedimentométricos comparativos. O critério de Sherard et al. [7], baseado no TDS e na % Na, caracterizou os solos estudados como não dispersivos. Entretanto, com a análise combinada dos dados sedimentométricos com a % Na, a dispersibilidade dos planossolos estudados torna-se evidente.

O solo PMOI, identificado como não dispersivo na maioria dos critérios, tem seu comportamento explicado pela evidente maior evolução pedogenética deste solo (incipiente laterização e mais baixo teor de sais).

Em resumo, conclui-se que os planossolos solódicos encontrados na Planície Costeira Sul do RS são na maioria potencialmente dispersivos e exigem uma investigação específica desta propriedade a cada aplicação dos mesmos em obras de terra na região.

3.4. Avaliação das areias lateríticas frente aos critérios tecnológicos para bases de SAFLs

3.4.1. SAFLs em pavimentação de baixo custo

Os solos arenosos finos, em particular aqueles de comportamento laterítico, chamados de SAFLs (solos arenosos finos lateríticos), têm um histórico de sucesso no uso em pavimentação de baixo custo. Até o presente, nos estados de São Paulo, Paraná, Bahia e Mato Grosso do Sul já foram construídos mais de 7000 km de pavimentos com base de SAFL,

muitos dos quais com mais de 25 anos em serviço.

Conceitua-se SAFL como o solo de comportamento laterítico, pertencente aos grupos LA, LA' ou LG' da classificação MCT, com menos de 50% passante na peneira n.200 e no mínimo com 90% passante na peneira n.10, sendo a fração arenosa constituída predominantemente por quartzo.

3.4.2. Aplicação do critério tecnológico para uso de SAFL como base

O SAFL para uso em bases de pavimento de baixo custo deve atender especificações tecnológicas indicadas na Tabela 5 para o solo compactado na energia intermediária.

Tabela 5. Critérios tecnológicos para SAFLs empregados em bases de rodovias de baixo volume de tráfego (Nogami e Villibor [5])

Propriedade	Ensaio	Intervalo de valores recomendáveis	Métodos de Ensaios
Capacidade de suporte	Índice de Suporte Mini-CBR e Expansão	$\geq 40\%$	DER SP M192-89 DNER ME 254/94
Perda da capacidade de suporte	Índice de Suporte Mini-CBR e Expansão	$< 50\%$	DER SP M192-89 DNER ME 254/94
Expansão por imersão em água	Índice de Suporte Mini-CBR e Expansão	$< 0,3\%$	DER SP M192-89 DNER ME 254/94
Contração ao ar	Contração de Solos Compactados	0,1% a 0,5%	DER SP M193-89
Sorção	Infiltrabilidade de Solos Compactados	10^{-2} a 10^{-4} cm/min ^{1/2}	DER SP M194-89

O critério acima foi aplicado às areias lateríticas estudadas, solos com características físicas e morfológicas similares aos SAFLs. Apesar da similaridade física e morfológica, para nem todos os materiais foi caracterizado o comportamento laterítico, conforme indica a classificação MCT dos solos (Tabela 1). As chamadas areias lateríticas constituem o horizonte subsuperficial de perfis de Argissolos

Vermelho-Amarelos desenvolvidos sobre a Barreira Litorânea BII pleistocênica, presente na porção sul da Planície Costeira do RS.

Os resultados iniciais obtidos são sumarizados na Tabela 6.

Tabela 6. Resultados iniciais obtidos nos ensaios da Metodologia MCT visando aplicação do critério para bases em SAFLs

Propriedade	Parâmetro	Intervalo de valores obtidos
Capacidade de suporte	Índice de suporte mini- CBR sem imersão	18 a 62%
Perda da capacidade de suporte	100% - RIS*	38 a 73%
Expansão por imersão em água	Expansão	0,1 a 0,5%
Contração ao ar	Contração	0,2% a 0,6%
Sorção	Coefficiente de sorção	$1,8 \cdot 10^{-2}$ a $5 \cdot 10^{-2}$ cm/min ^{1/2}

* RIS – razão percentual entre o índice de suporte mini-CBR com e sem imersão

Nenhuma das areias lateríticas estudadas atendem rigorosamente a todos os critérios estabelecidos para emprego como base de pavimento. É destacada a variabilidade nos valores dos parâmetros obtidos.

Apesar disso, dentre os solos estudados, foi considerado o solo ARMAR aquele com maior potencial, mesmo sendo classificado como não laterítico.

De maneira geral, a perda de suporte e a expansão com a imersão são as características mais fortemente restritivas destes solos.

Cabe destacar que pode ser viável o uso destes materiais em aplicações cujos critérios tecnológicos sejam menos exigentes, como em sub-bases e no reforço de subleitos. A continuidade dos estudos com a ampliação na base de dados e variantes de ensaios, com certeza permitirá alcançar resultados conclusivos sobre a recomendação de uso das areias lateríticas em pavimentação econômica.

4. CONCLUSÕES

4.1. Síntese das propriedades geotécnicas dos solos estudados

4.1.1. Solos lateríticos graníticos

Os solos lateríticos graníticos encontrados na Encosta do Sudeste são solos argilo-arenosos avermelhados, plásticos e de baixa atividade coloidal, classificados como ML, MH ou CL e como A7-5 ou A7-6. Apresentaram umidade ótima entre 20 e 24% e densidade aparente seca máxima entre 16 e 17 kN/m³.

A infiltrabilidade (avaliada para o solo PSAL) é baixa ($s < 10^{-2}$ cm/min^{1/2}). São solos considerados resistentes a erosão.

Pela Metodologia MCT são classificados como LG' (solos argilosos lateríticos). As propriedades estimadas para o solo compactado na densidade máxima correspondente a energia normal, segundo Nogami e Villibor [5]:

- Capacidade de suporte elevada (Mini-CBR de 12 a 30% sem imersão) e baixa perda de suporte com a imersão (< 40%);
- Baixa expansão (< 0,5%);
- Média a elevada contração (> 0,5%);
- Baixa permeabilidade ($K < 10^{-6}$ cm/s);

Segundo a mesma referência, são considerados materiais de 1ª categoria para proteção a erosão, materiais de 2ª categoria para revestimento primário e materiais de 3ª categoria para base de pavimento, reforço de subleito compactado, subleito compactado e aterro compactado. Apresentam grande potencial de uso em outras obras de terra: diques, pequenas barragens e camadas de revestimento em aterros sanitários, lagoas de estabilização, tanques e açudes.

4.1.2. Saibros graníticos

Solos saprolíticos originários da alteração das rochas graníticas e metamórficas encontradas na Serra do Sudeste, apresentam composição granulométrica e mineralógica muito variada. São solos areno-siltosos, areno-argilosos e argilo-arenosos, pedregulhosos ou não, de mediana plasticidade a não plásticos e de baixa atividade coloidal. Foram classificados como SM ou MH e como A2-4, A4, A5 ou até A7-5.

A grande variabilidade nas características texturais e mineralógicas dos saibros é determinante de uma diversificada classificação MCT dos solos: de solos arenosos não lateríticos (NA) a solos argilosos lateríticos (LG'), passando por solos de comportamento argiloso não laterítico (NG'), tornando inviável a estimativa de propriedades sem um estudo mais aprofundado focado neste material.

Também as propriedades de compactação são muito variáveis. Foram encontrados valores de umidade ótima entre 15 e 25% e densidade seca máxima entre 14 e 18 kN/m³. Aqueles saibros pobres em finos de comportamento laterítico são considerados erodíveis, exigindo proteção à erosão das bordas de pavimento e taludes de aterro.

Estes solos têm sido tradicionalmente usados em obras de Engenharia na região, embora com distâncias de transporte um tanto elevadas em se tratando dos locais da Planície Costeira Sul mais distantes da Serra do Sudeste (mais próximos a costa). São considerados materiais "nobres" para aterros, como reforço de subleito compactado e como base de pavimento para vias de pequeno volume de tráfego, estacionamentos, pátios de manobras e acostamentos.

4.1.3. Areias lateríticas

As areias lateríticas, solos arenosos finos avermelhados, com variável teor de finos lateríticos, são encontrados ao longo Barreira Litorânea BII pleistocênica. São solos na maioria não plásticos, classificados como SM ou SC e como A2-4, A2-6 ou A6.

Estes solos foram classificados na maioria como LA (areias lateríticas) e NA (areias não lateríticas) e NA' (solos arenosos não lateríticos). O comportamento laterítico não foi identificado para todas as jazidas estudadas. As propriedades de compactação foram relativamente homogêneas e consideradas adequadas para aplicações em obras de terra. Foram encontrados valores de umidade ótima entre 12 e 16% e densidade seca máxima entre 17 e 19 kN/m³ (energia normal).

As propriedades do solo compactado avaliadas na energia do proctor normal:

- Capacidade de suporte média a muito elevada (Mini-CBR de 9 a 33% sem imersão

e sem sobrecarga) e baixa a média perda de suporte com a imersão (< 52%);

- Baixa expansão (< 0,4%);
- Média a baixa contração por secagem (< 0,6%);
- Média infiltrabilidade ($2,3 \cdot 10^{-2}$ a $5,8 \cdot 10^{-2}$ cm/min^{1/2})

São solos muito erodíveis, exigindo apropriada proteção à erosão quando expostos ao fluxo d'água superficial.

Segundo Nogami e Villibor [5], o maior teor de finos lateríticos nestes solos determina melhores propriedades: elevada capacidade de suporte, elevado módulo de resiliência, baixa permeabilidade e infiltrabilidade, pequena contração por perda de umidade, razoável coesão e pequena expansibilidade por imersão em água, excelente compactibilidade (alcançando facilmente o grau de compactação de 100%), satisfatória receptividade à imprimadura betuminosa (boa aderência ao revestimento) e fácil acabamento da superfície da base e baixo desgaste superficial sob a ação do tráfego de serviço. Estas propriedades possibilitam o seu uso em bases e sub-bases de pavimentos.

O critério tecnológico para emprego destes solos como base de rodovias de baixo volume de tráfego não foi rigorosamente atendido por nenhum dos solos estudados. Entretanto, para outras aplicações menos exigentes, solos como o ARMAR tem grande potencial.

O uso das areias lateríticas como constituinte da areia-asfalto tem sido recentemente estudado pelo grupo de pesquisa.

4.1.4. Plintossolos

Apesar da pequena amostragem, foi possível reconhecer os plintossolos como materiais areno-argilosos e plásticos, mas de baixa atividade coloidal, formados na Barreira Litorânea III holocênica, em áreas de relevo plano com cotas ligeiramente superiores aos planossolos. O horizonte plíntico destaca-se pela presença de mosqueados (manchas) vermelhas e amarelas e ocorre em profundidades em torno de 0,30 m, com espessuras médias de 1 m. Os plintossolos têm ocorrência esparsa na Planície Costeira, com destaque ao longo da restinga da Laguna dos Patos.

Foram classificados como SC e A2-6, A6 ou A7-6. Foram encontrados valores de umidade ótima entre 14 e 19% e densidade seca máxima entre 16 e 19 kN/m³.

A classificação MCT para estes solos foi NG' (solos de comportamento argiloso não laterítico) ou LA'/LG'. Conforme o comportamento laterítico ou não laterítico seja identificado, as propriedades estimadas para o solo compactado são muito variáveis.

Quanto a erodibilidade, o plintossolo de comportamento laterítico avaliado apresentou-se resistente a erosão.

Segundo Nogami e Villibor [5], quando identificado comportamento não laterítico, estes solos não são recomendados como base de pavimento, reforço de subleito compactado, material de proteção a erosão e como revestimento primário. São considerados materiais de 6^a categoria como subleito compactado e de 7^a categoria como material de aterro compactado.

Apesar destas limitações, estes solos têm sido estudados como material alternativo em regiões como a restinga da Laguna dos Patos, onde as distâncias de transporte de materiais pétreos são muito elevadas. Nesta região, este solo, apelidado de "barrinho", foi usado como subleito natural e como base de pavimento (estabilizado com aditivo químico) na RST 101 (83km – trecho Bacopari-Mostardas – "Estrada do Inferno").

A estabilização de plintossolos da região com cal para emprego em pavimentação e na construção de aterros estradais foi pesquisada pioneiramente por Nunez et al. [6] e voltou recentemente a ser estudada pelo grupo de pesquisa a fim de propiciar alternativas viáveis a recuperação das trilhas ecológicas da restinga da Laguna dos Patos.

4.1.5. Planossolos

Os planossolos são solos areno-argilosos a argilo-arenosos, pedregulhosos ou não, predominantemente cinzentos, plásticos e de baixa atividade coloidal. Alguns destes, altamente plásticos e de atividade normal, foram individualizados para análise e chamados de planossolos plásticos. Os planossolos são classificados como CL, MH ou CH e A6 ou A7-6.

Ocorrem em grande extensão na Planície Costeira e particularmente nos terraços de transição desta com a Encosta do Sudeste, em extensas áreas cortadas pela BR116, onde existem um grande número de pequenas obras de terra destinadas a irrigação das lavouras de arroz.

As propriedades de compactação obtidas nos ensaios foram umidade ótima entre 15 e 18% e densidade aparente seca máxima entre 17 e 18 kN/m³. Os chamados planossolos plásticos, com IP > 25%, caracterizam-se por maiores valores de umidade ótima (entre 22 e 26%) e menores densidades (entre 15 e 16 kN/m³).

A classificação MCT variou entre LG' e NG' (solos argilosos de comportamento laterítico e não laterítico, respectivamente). Esta variação na classificação dos solos não ficou clara pelas características morfológicas destes solos.

A estimativa de propriedades e aptidão de uso destes solos é muito variável em função do comportamento não ser definido entre laterítico ou não laterítico. Os mesmos têm sido usados em obras de terra de pequeno porte na região: diques, taipas e pequenas barragens. Entretanto, são destacados os problemas com erosão associados a dispersibilidade destes solos.

Os estudos conduzidos na avaliação do potencial de dispersão da fração fina destes solos permitiram concluir que os planossolos solódicos encontrados na Planície Costeira Sul do RS são na maioria potencialmente dispersivos e que a dispersibilidade reduz com a evolução pedogenética do horizonte estudado. Logo, é justificada a exigência de uma investigação específica desta propriedade a cada aplicação destes solos em obras de terra na região.

4.2. Considerações finais

A investigação do potencial dos solos estudados permite vislumbrar novas possibilidades de emprego destes materiais na pavimentação de estradas e em outras obras de terra. Porém, é importante lembrar que um programa de pavimentação com materiais alternativos deve necessariamente prever uma pesquisa específica com os solos envolvidos,

um controle tecnológico mais rigoroso, e acima de tudo, uma freqüente ação preventiva de manutenção.

O emprego destes solos regionais como materiais alternativos para melhoria e pavimentação de estradas de baixo volume de tráfego e para obras de terra de pequeno porte na região pode tornar técnica e economicamente viável estas obras tão imprescindíveis para a retomada de desenvolvimento da chamada Metade Sul do Rio Grande do Sul.

Agradecimentos

O autor agradece a FAPERGS pelo financiamento da pesquisa, aos colegas Cláudio Dias e Celso Pedreira pela troca de idéias e opiniões, ao técnico Celso Mendonça e aos bolsistas Christian Einsfeldt, Igor Salles, Carilene Welter, Márcio S. de Souza, Vagner Mota e Everton B. das Neves pelo apoio na execução dos ensaios.

REFERÊNCIAS

1. Bastos, C.A.B.- *Estudo geotécnico sobre a erodibilidade de solos residuais não saturados*. Tese de Doutorado. PPGE/UFGRS. Porto Alegre: 1999, 298p.
2. Bastos, C.A.B.- *Caracterização geotécnica do solos da Planície Costeira Sul do RS visando o mapeamento geotécnico*. Relatório Técnico de Pesquisa FAPERGS, 66 p., 9 anexos, 2002.
3. Middleton H.E.- *Properties of soils wich influence soil erosion*. U.S. Department Agricultural Technical Bulletin, n.178, 16p., 1930.
4. Nogami, J.S. e Villibor D.F.- *Soil characterization of mapping units for highway purposes in a tropical area*. Bulletin of the IAEG, n.19, p.196-199, 1979.
5. Nogami, J.S. e Villibor D.F.- *Pavimentação de Baixo Custo com Solos Lateríticos*, Editora Villibor, São Paulo: 1995, 213p.
6. Nunez, W.P.; Bastos, C.A.B. e Dias, C.R.R.- *Caracterização e estudo da potencialidade de emprego em estradas vicinais de solos plintíticos ocorrentes no sul da Planície Costeira do Rio Grande do Sul*. In: 26^a Reunião Anual de Pavimentação. Aracajú /SE. Anais ... ABPv: Aracajú/SE. v.1, p.1-23. 1992.
7. Sherard, J.L.; Dunnigan L.P. and Decker, R.S.- *Identification and nature of dispersive soils*. Journal of the Geotechnical Engineering Div., ASCE, v.102, n.GT4, p.287-301, 1976.