Pesquisas em Geociências

<http://seer.ufrgs.br/PesquisasemGeociencias>

Contribuição ao Emprego de Alteração de Basaltos em Pavimentação Rodoviária

Arthur Wentz Schneider, Francisco Xavier Pires Da Rocha
Pesquisas em Geociências, 4 (1): 87-101, Set./Dez., 1974.

Versão online disponível em:

<http://seer.ufrgs.br/PesquisasemGeociencias/article/view/21836>

Publicado por

Instituto de Geociências

Portal de Periódicos
UFRGS

UNIVERSIDADE FEDERAL
DO RIO GRANDE DO SUL

Informações Adicionais

Email: pesquisas@ufrgs.br

Políticas: <http://seer.ufrgs.br/PesquisasemGeociencias/about/editorialPolicies#openAccessPolicy>

Submissão: <http://seer.ufrgs.br/PesquisasemGeociencias/about/submissions#onlineSubmissions>

Diretrizes: <http://seer.ufrgs.br/PesquisasemGeociencias/about/submissions#authorGuidelines>

Data de publicação - Set./Dez., 1974.

Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil

CONTRIBUIÇÃO AO EMPREGO DE ALTERAÇÃO DE BASALTOS EM PAVIMENTAÇÃO RODOVIÁRIA

Eng. Arthur Wentz Schneider (*)

Eng. Francisco Xavier Pires da Rocha (**)

SUMMARY

In Central - South Brazil in an area of more than one million square kilometers, occur basaltic rocks, which frequently present thick layers of decomposed rock overlying the fresh basalt.

These materials have been employed for construction of sub-bases and bases of pavements, which suffered degradation phenomena when covered with asphalt; this degradation has been ascribed to expansive minerals of the montmorillonite clay minerals group.

As shown by Eades, Nichols and Grim the addition of lime to argillaceous soils produces non expansive new minerals. The present authors studied the influence of hydrated lime, fly-ash and Portland cement in the behavior of decomposed basaltic rocks, through California Bearing Ratio (CBR) values; after the CBR testing, the samples were desintegrated and subjected to 10, 15 and 20 cycles of water saturation and drying, to know the resistance of the different mixtures of soil plus additives to degradation.

Soils with hydrated lime plus fly-ash mixtures have shown better performance than soils with hydrated lime alone.

The authors recommend the construction of experimental road sections to test field behavior of decomposed basalts and lime plus fly-ash mixtures.

(*) Professor do Instituto de Geociências da UFRGS

(**) Professor da Escola de Engenharia da UFRGS

Trabalho realizado com auxílio do Instituto de Pesquisas Rodoviárias do CNP

SINOPSE

No Centro-Sul do Brasil, em área superior a um milhão de quilômetros quadrados, ocorrem rochas basálticas freqüentemente cobertas por espessas camadas de solo tipo "alteração de rocha", de acordo com a Nomenclatura de Rochas e Solos da ABNT.

Embora os ensaios tecnológicos desses materiais muitas vezes apresentem resultados que permitiriam seu emprego como sub-base e mesmo como base de pavimentos rodoviários, a experiência tem demonstrado que os mesmos sofrem acentuada degradação quando cobertos por revestimento asfáltico; tal degradação tem sido atribuída à presença, muitas vezes comprovada, de minerais expansivos do grupo da montmorilonita, nos solos do tipo "alteração de rocha", de origem basáltica.

Tendo em vista a reação de aditivos como cal, "fly-ash" e cimento Portland comum com argilo-minerais, foram estudados, neste trabalho, os efeitos dos aditivos citados sobre os valores de CBR, em diversas misturas. Ensaio difratométrico mostraram que a cal hidratada reage com os argilo-minerais, inclusive com os do grupo da montmorilonita, originando novos minerais, os quais não se mostram expansivos.

Para aquilatar o efeito de degradação produzido pela água sobre tais misturas solo + aditivos, realizaram-se 10, 15 e 20 ciclos de umede-

cimento/secagem, sobre material desagregado, efetuando-se, após, novos ensaios de CBR.

Os resultados obtidos permitiram verificar que os valores de CBR apresentam aumento considerável com a adição de cal, cal + "fly-ash" ou de cimento + "fly-ash"; por outro lado, as misturas solo + cal e solo + cal + "fly-ash" mostraram-se mais resistentes à ação de degradação dos sucessivos ciclos de umedecimento/secagem do que as misturas solo + cimento + "fly-ash".

Tendo em vista a inexistência de dados seguros sobre o comportamento, em obra, das misturas de solo tipo "alteração de rocha" basáltica com os aditivos citados, recomenda-se a execução de trechos experimentais, para obtenção de elementos mais seguros de avaliação, pois a utilização dos referidos solos como base ou sub-base traria acentuada redução de custo dos pavimentos rodoviários.

OBJETIVOS

O presente trabalho destina-se a contribuir para o estabelecimento de métodos de caracterização das propriedades tecnológicas de solos residuais (alteração de rocha) originados da intemperização de rochas de natureza basáltica ("saibros"), visando seu emprego em pavimentação rodoviária.

Esses materiais constituem a capa de alteração das rochas basálticas e apresentam frequentemente espessuras consideráveis; podem ser removidos sem o emprego de explosivos e encontram-se próximo aos locais de utilização, razões pelas quais seu custo é relativamente baixo. Outrossim, convém lembrar que mais de 1 milhão de quilômetros quadrados do território brasileiro, na região Centro-Sul (Bacia do Paraná) são constituídos de terrenos de origem basáltica. (2)

Por outro lado, os Índices de Suporte Califórnia (Califórnia Bearing Ratio, CBR), desses materiais são geralmente elevados, satisfazendo, em muitos casos, as especificações para emprego como sub-base e mesmo como base de pavimentos; no entanto, a experiência tem demonstrado que esses materiais são suscetíveis de rápida degradação, especialmente após a colocação da camada asfáltica, produzindo redução drástica do poder suporte, com deformações acentuadas, sub-penetração, etc.

A análise difratométrica dos produtos de intemperização dos basaltos sul-brasileiros confirma a presença de minerais do grupo da montmorilonita, caracterizados por sua expansividade quando em contato com água; no perfil dos solos, o teor desses argilo-minerais é geralmente maior junto à rocha basáltica e vai diminuindo gradativamente à medida que se aproxima da superfície, sempre que as camadas superficiais sejam constituídas de so-

los silto-argilosos vermelhos, com elevado grau de maturidade. Os valores do Índice de Suporte Califórnia (CRB) baixam, porém, consideravelmente, quando se passa dos chamados "saibros" (alteração de rocha basáltica) para as argilas vermelhas, que podem ser consideradas lateríticas, "latu senso". Os estudos aqui apresentados referem-se exclusivamente à alteração de rocha e não às argilas vermelhas superficiais. MELFI & FRANCO (1) estudaram os primeiros estágios da intemperização de rochas básicas de natureza basáltica e concluíram que, inicialmente, o plagioclásio se transforma em gibsita (ou hidrargilita, hidróxido de alumínio, $Al(OH)_3$) e, sob condições imperfeitas de drenagem, origina uma fase amorfa intermediária, que se transforma em caolinita; os minerais ferromagnesianos, que no caso dos basaltos estão representados principalmente por piroxênios, magnetita e olivina, originam hidróxido férrico parcialmente amorfo e montmorilonita, a qual, sob condições de drenagem intensa, é instável e se transforma em fase inerte.

Verifica-se, outrossim, através de análise difratométrica, que em muitos saibros basálticos a montmorilonita é o único argilo-mineral presente, fato que pode ser atribuído em parte à abundância de ferro nos basaltos (2), que ensejaria a formação de montmorilonita inclusive a partir do próprio feldspato, em lugar da caolinita.

Face às condições excepcionalmente favoráveis para a utilização dos "saibros" basálticos em pavimentação rodoviária e, tendo em vista os fenômenos de degradação anteriormente referidos, procurou-se, neste trabalho, verificar a influência de aditivos (cal, "fly-ash" e cimento) no comportamento dos citados materiais a fim de obter, através de ensaios adequados, elementos que permitam decidir sobre a viabilidade de emprego do material existente em determinada jazida de alteração de rocha basáltica (saibreira), como sub-base ou como base.

No caso da adição de cal, a análise difratométrica revelou que num "saibro" cujo único argilo-mineral significativo era originalmente montmorilonita, após a adição de teores crescentes de cal (1 a 4%, em peso), os difratogramas apresentavam intenso pico, correspondente a um material cristalino não identificado, que, no entanto, não ocorre em nenhum argilo-mineral, mostrando que a montmorilonita foi substituída por novo mineral, confirmando as conclusões de EADES e outros (3); evidencia-se que a cal hidratada enseja a formação de novos minerais, em substituição a argilo-minerais, dentre os quais se destacam silicatos hidratados de cálcio, produzindo

efeitos permanentes de estabilização dos solos.

Por outro lado segundo diversos autores o "efeito pozolânico" da cal pode ser incrementado pela adição de "fly-ash" (cinzas volantes das usinas termelétricas a carvão).

LARSEN (4) demonstrou que o efeito estabilizador da cal sobre o solo deve-se a reações entre a cal e os constituintes finos do solo, em presença de umidade, sendo as mais importantes: a) troca de cations e b) cimentação. A troca de cations verificar-se-ia pela substituição de cations de sódio e/ou de hidrogênio, adsorvidos pelas partículas de argila, por cations de cálcio; a reação de cimentação entre a cal e alguns constituintes finos do solo ocorre durante longo tempo, que pode durar vários anos, sendo atribuível à formação de ligações cimentantes de combinações de aluminatos e silicatos hidratados de cálcio.

Essa reação cimentante só se verifica quando o solo contém elementos pozolânicos, tais como sílica e alumina, como ocorre geralmente nas argilas; verifica-se, assim, de certo modo, a formação de cimento "in situ". No caso das alterações de basalto ("saibro") o teor de argila "livre" é relativamente pequeno, razão pela qual o efeito pozolânico da cal pode ser incrementado pela adição de "fly-ash" e pela desagregação dos fragmentos constituídos por aglomeração de partículas argilosas, que se encontram presentes nos fragmentos grosseiros, mas que não estão liberadas, devido a sua agregação natural, como produto residual de intemperização de fragmentos de rocha basáltica.

Deve evitar-se a reação de carbonatação da cal, em contato com o ar, pois a mesma empresta ao solo resistência reduzida, comparada com a cimentação pozolânica; por essa razão a superfície das camadas contendo a mistura solo + aditivos deve ser mantida saturada de água durante o período de cura.

Outrossim, dada a falta de experiência relativamente ao comportamento do material em estudo, com aditivos, quando empregado na construção de rodovias, parece razoável a execução de trechos experimentais, pois, caso se confirmem no campo os resultados obtidos em laboratório, poderiam obter-se pavimentos muito mais baratos que os atuais.

CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL UTILIZADO NOS ENSAIOS

Aspectos gerais

O material utilizado nos ensaios provém de saibreira situada no km 49 da rodovia BR-101,

trecho Osório-Tórres (RS), a cerca de 1,5 km, lado direito.

Trata-se de alteração de rocha basáltica (saibro), com aspecto terroso; apresenta nêveis amidaloides, ricos em zeolitas; ao microscópio verifica-se que a rocha primitiva era constituída de cerca de 60% de matriz microcrisalina finíssima, que sofreu intensa argilização, cloritização e formação de hidróxidos de ferro.

Incluídos na matriz, aparecem cristais mais desenvolvidos (micro-fenocristais) de feldspato (plagioclásio), piroxênio e magnetita.

O feldspato está sempre fortemente argilizado e às vezes cloritizado, permanecendo somente pequenos "núcleos" inalterados, com diâmetros da ordem de 0,05 mm, que poderão constituir grãos de areia fina após a desagregação do material.

O piroxênio ocorre sob a forma de cristais com cerca de 0,1 mm de diâmetro, geralmente cloritizados e argilizados; a magnetita forma minúsculos cristais, fracamente limonitizados nos bordos, emprestando-lhe cor amarelo-avermelhada.

Nos fragmentos mais alterados desaparecem os núcleos inalterados dos grãos de feldspato, o qual se argiliza totalmente.

Nas porções amidalóides observa-se que os minerais secundários pertencem ao grupo das zeolitas, as quais, além de preencherem os vacúolos, irradiam-se na própria massa da rocha, embora em escala reduzida.

No destorroamento, os fragmentos mais grosseiros reduzem-se a material mais fino (areia, silte e argila), os quais estão presentes nos fragmentos grosseiros, formando "agregados", que tendem a ser desfeitos sob a ação de esforços mecânicos de máquinas rodoviárias ou de outros veículos; assim, muitos fragmentos que figuram na análise granulométrica inicial como pedregulho, por exemplo, passam para as frações areia, silte e argila; pode-se, assim, considerar a existência de **pedregulho verdadeiro** e **pedregulho aparente**; o primeiro é constituído de fragmentos (núcleos) de rocha praticamente inalterada, capazes de manterem o seu tamanho ao serem submetidos aos esforços oriundos do tráfego ou a ensaios de durabilidade (sanidade), ao passo que o "pedregulho aparente" é constituído de fragmentos que se desagregam, passando a graduações inferiores; fato semelhante ocorre com as demais graduações da escala granulométrica, resultando, assim, a tendência geral de redução granulométrica do agregado, quando submetido aos esforços acima citados, com o conseqüente aviltamento das propriedades mecânicas, intimamente relacionadas com a granulação do material (valores de CBR, p. ex.).

Análise difratométrica

A análise difratométrica do material mostrou que os argilo-minerais dominantes pertencem ao grupo da montmorilonita, caracterizados por sua expansividade quando em contato com água.

Análise granulométrica

Foram efetuadas duas séries de ensaios granulométricos: a) com material natural, como o colhido na saibreira; b) com o mesmo material, após submetido ao ensaio de durabilidade (sanidade ou "soundness-test"). Os resultados obtidos foram os seguintes:

	Material natural	Após o ensaio de sanidade
Pedregulho	36,0%	9,9%
Areia grossa	42,0%	53,3%
Areia média	10,5%	12,7%
Areia fina	5,5%	9,1%
Silte	4,2%	10,0%
Argila	1,8%	5,0%

Observação: Foi utilizada a Terminologia de Rochas e Solos TB-13, da ABNT.

O exame desses resultados mostra a acentuada redução granulométrica, sofrida pelo material, especialmente do pedregulho; o teor de finos (silte + argila) praticamente triplicou, em virtude do teste de durabilidade.

Massa específica real dos grãos

$$= 2,73 \text{ g/cm}^3$$

Limites de consistência

O material mostrou-se não plástico, tanto antes como após o ensaio de sanidade ("soundness-test").

ENSAIOS DE LABORATÓRIO

Metodologia

As amostras foram preparadas pelos métodos correntes de ensaio de CBR (6 e 7), para energias de compactação de 13 e 29 golpes.

Após a moldagem dos corpos de prova, com os respectivos teores de aditivos, foram os mesmos curados segundo o método sugerido por EADES, NICHOLS e GRIM (3), para evitar fenômenos de carbonatação da cal em contato com o ar.

No método sugerido por EADES e colaboradores, o material misturado com aditivo é compactado em moldes padrão de CBR; após, vedam-se as extremidades dos moldes com borracha para evitar carbonatação e perda de umidade durante a

cura, que se efetua em estufa, à temperatura de 70° C, durante 3 dias; após o esfriamento, são os corpos de prova submetidos ao ensaio de CBR (8).

Os autores citados, através de correlação entre resultados de ensaios de laboratório e de campo, concluíram que a cura, durante 3 dias, em estufa, a 70° C, corresponde à cura, durante o período de 1 ano, na estrada.

Na realização dos ensaios foram utilizados:

- amostra natural, sem aditivos;
- misturas de solo com teores crescentes de cal (de 1 a 4%, em peso);
- misturas de solo com 4% de "fly-ash" e teores crescentes de cal (1 a 4%);
- misturas de 4% de "fly-ash" e teores crescentes de cimento Portland comum (1 a 3%).

As amostras de solo natural, sem aditivos, bem como as de solo + aditivos, foram submetidas a 10, 15 e 20 ciclos de umedecimento/secagem.

O método adotado foi o seguinte:

- execução de ensaio de CBR sobre a amostra curada em estufa, durante 3 dias, à temperatura de 70° C;
- desagregação do corpo de prova e execução de 10 ciclos de umedecimento/secagem;
- compactação e execução de novo ensaio de CBR;
- desagregação do corpo de prova e execução de mais 5 ciclos de umedecimento/secagem; compactação e execução de ensaio de CBR;
- desagregação do corpo de prova e execução de mais 5 ciclos de umedecimento/secagem; finalmente, nova compactação e execução de ensaio de CBR.

A execução de sucessivos ciclos umedecimento/secagem, com o material desagregado, visou permitir que a água tivesse o maior contato possível com as misturas solo/aditivos, pois a durabilidade das misturas solo/aditivos é aspecto dos mais controvertidos. No caso presente, o material foi submetido às condições mais severas, através da desagregação dos corpos de prova. Preferiu-se o processo de ciclos sucessivos de umedecimento/secagem com água, à utilização do ensaio de sanidade ("soundness-test") pois este utiliza sulfato de sódio (ou de magnésio), substâncias que poderiam reagir com os aditivos utilizados, dificultando a interpretação dos resultados obtidos.

Outros métodos, citados por HERRIN e MITCHELL (5), aplicados a corpos de prova não desagregados, destinados a simular em laboratório a ação destrutiva do intemperismo natural são os seguintes:

- variação cíclica de calor e frio;
- congelamento/descongelamento

Alguns testes avaliam a durabilidade em função da perda de peso ocasionada por escovamento dos corpos de prova; outros utilizam a variação percentual da resistência à compressão.

Dentre os testes não destrutivos citados pelos autores referidos (5) merece citação o "teste sonoscópico", que mede a variação da velocidade

de propagação de impulsos ondulatórios nas misturas solo/cal; esse método tem a vantagem de permitir igualmente a avaliação da durabilidade de misturas solo/cal na própria estrada onde foram aplicadas.

As misturas solo/cal são obviamente mais duráveis quando protegidas por uma capa superficial betuminosa; nesses casos, a durabilidade ultrapassa a que pode ser prevista pela maioria dos testes de laboratório, relatando-se exemplos de pavimentos executados com misturas solo/cal, com mais de 7 anos de serviço e que se mantiveram em excelentes condições.

A durabilidade das misturas solo/cal ou solo + cal + "fly-ash" aumenta com o tempo de cura; por outro lado, as reações são favorecidas por temperaturas elevadas. Por isso, é recomendável executar os pavimentos no início da estação quente; uma mistura solo/cal aplicada no fim da estação quente, que haja alcançado resistência satisfatória em curto período de cura, pode ter pequena durabilidade e romper-se no inverno, por ter sido demasiadamente curto o período de cura.

Resultados dos ensaios de CBR com material natural, sem aditivos

Os resultados dos ensaios de CBR obtidos com o material natural, sem aditivos, constam no Quadro I, onde são destacados com a letra x.

QUADRO I

— Resultados de ensaios de CBR com adição de teores crescentes de cal, comparados com os resultados obtidos com o solo natural, sem aditivos (x = material natural, sem aditivos).

CAL %	VALORES DE CBR (%)				Número de Golpes
	Inicial	Após 10 Ciclos	Após 15 Ciclos	Após 20 Ciclos	
Zero (x)	23	20	16	16	13
1	23	23	23	20	
2	43	28	36	36	
3	57	24	32	34	
4	60	31	35	36	29
Zero (x)	32	30	30	28	
1	60	51	37	45	
2	64	55	45	51	
3	66	60	50	53	
4	64	57	51	51	

A descrição do material utilizado consta no item anterior.

Como se pode verificar no Quadro I, os valores de CBR do material natural alcançaram 23% e 32%, para energias de compactação de 13 e 29 golpes, respectivamente.

Os sucessivos ciclos de umedecimento/secagem reduziram os valores de CBR, para energia de compactação de 13 golpes, de 23% para 16%, após 20 ciclos; para energia de compactação de 29 golpes a redução foi menos acentuada, pois passou de 32% para 28%.

Resultados dos ensaios de CBR com misturas solo + cal

Os ensaios de CBR foram realizados de acordo com o Método DNR-DPT-50-60.

Utilizaram-se misturas solo/cal hidratada, curadas de acordo com o método proposto por EADES, NICHOLS e GRIM (3), citado anteriormente.

Empregaram-se em amostras separadas, teores de 1%, 2%, 3% e 4% de cal hidratada, em peso, em relação a solo seco, e energias de compactação de 13 e 29 golpes. (Curva 2 das figuras 1 e 2).

Executado o ensaio de CBR destorroaram-se as amostras, sendo então submetidas a 10 ciclos de umedecimento/secagem, empregando-se água para umedecimento das amostras; esse umedecimento era feito até a saturação e a secagem, em estufa, a 70°C. Após 10 ciclos de umedecimento/secagem, executava-se novo ensaio de CBR. (Curva 3 das figuras 3 e 6).

Igual sequência de operações efetuou-se com o mesmo material, após mais 5 ciclos de umedecimento/secagem e subsequente ensaio de CBR, considerando-se, então, o material como tendo sido submetido a 15 ciclos de umedecimento/secagem. (Curva 3 das figuras 4 e 7).

Finalmente, repetiram-se as mesmas operações, procedendo-se a mais 5 ciclos de umedecimento/secagem e posterior execução de CBR, completando-se, assim, 20 ciclos de umedecimento/secagem. (Curva 3 das figuras 5 e 8).

Os resultados de CBR obtidos com as diversas misturas solo/cal hidratada constam no Quadro I.

A análise dos resultados obtidos permite concluir que:

- 1 — para energia de compactação de 13 golpes, o incremento nos valores de CBR foi proporcional ao teor de cal adicionada, ao passo que, para energia de compactação de 29 gol-

pes, houve certa dispersão, especialmente com 4% de cal, que apresentou valor de CBR inferior ao obtido com 3% de cal;

- 2 — a influência negativa dos ciclos de umedecimento/secagem, sobre os valores de CBR, embora crescente, apresentou algumas dispersões; no entanto, apesar da severidade do processo, os valores obtidos com teores de cal acima de 2% foram favoráveis, mantendo-se os valores de CBR em mais de 100% superiores aos obtidos com o material natural, sem aditivos, para energia de compactação de 13 golpes. Para energia de compactação de 29 golpes os incrementos permanentes foram superiores a 80%.

Resultados dos ensaios de CBR com misturas solo + cal + "fly-ash".

Conforme verificaram diversos estudiosos do assunto, a "reatividade" dos solos com a cal pode ser incrementada com a adição de substâncias que possuem efeito pozolânico, destacando-se entre elas as "cinzas" produzidas pela queima de carvão mineral em usinas termelétricas, conhecidas como "fly-ash" ou "cinzas volantes", devido a sua extrema finura.

Dada a impossibilidade de executar toda a sequência de ensaios com teores variáveis de cal e de "fly-ash", empregaram-se valores crescentes de cal (de 1% a 4%, em peso) e manteve-se teor constante de 4% (em peso) de "fly-ash". Os resultados obtidos constam no Quadro II.

Os ensaios obedeceram ao Método DNR-DPT-50-60 e consistiram na execução de CBR com energias de compactação de 13 e 29 golpes, efetuando-se cura em estufa, a 70°C, durante 3 dias. A metodologia empregada foi a mesma descrita para o caso anterior.

Para maior clareza na observação dos resultados obtidos com a adição de 4% de "fly-ash" às misturas solo + cal hidratada, representaram-se graficamente os valores de CBR das amostras curadas em estufa, de acordo com o método de EADES e outros (3), bem como os efeitos de 10, 15 e 20 ciclos de umedecimento/secagem, obedecendo-se a mesma sistemática descrita anteriormente. (Vide curvas 1 e 2 das figuras 3, 4, 5, 6, 7 e 8 e curva 1 das figuras 1 e 2).

A análise das curvas de variação permite as seguintes apreciações:

- 1 — a figura 1 mostra os incrementos dos valores de CBR, com energia de compactação

de 13 golpes, adicionando-se 4% de "fly-ash" ao material natural, bem como teores crescentes de cal (1 a 4% em peso). A curva 1 refere-se aos valores de CBR obtidos com adição de cal hidratada e de 4% de "fly-ash"; a curva 2 mostra o efeito da cal hidratada, sem cinzas. Observa-se que a adição de 4% de "fly-ash" teve como consequên-

cia incrementos consideráveis nos valores de CBR, quando comparados com os incrementos obtidos com a adição de cal somente. Parece lícito concluir que a adição de "fly-ash", face a seu efeito pozolânico, favoreceu a reação da cal com os argilo-minerais do material utilizado.

CAL (%)	«Fly-ash» (%)	VALORES DE CBR (%)				Número de Golpes
		Após Inicial	Após 10 Ciclos	15 Ciclos	20 Ciclos	
(x) Zero	(x) Zero	23	20	16	16	13
1	4	76	42	41	40	
2	4	82	43	40	46	
3	4	105	40	40	42	
4	4	139	55	42	40	
(x) Zero	(x) Zero	32	30	30	28	29
1	4	68	60	59	50	
2	4	70	60	55	64	
3	4	110	64	56	63	
4	4	165	72	57	67	

QUADRO II — Resultados dos ensaios de CBR com adição de teores crescentes de cal e de 4% de «fly-ash» (cinzas volantes), comparados com os resultados obtidos com o material natural, sem aditivos, assinalado com x.

Figura 1 - Valores de CBR - 13 golpes, com teores crescentes de cal
Amostras curadas em estufa
Curva 1: Com adição de 4% de cinzas ("fly-ash")
Curva 2: Sem adição de 4% de cinzas ("fly-ash")

Figura 2 - Valores de CBR - 29 golpes, com teores crescentes de cal, após cura em estufa
Curva 1: Com adição de 4% de cinzas ("fly-ash")
Curva 2: Sem adição de 4% de cinzas ("fly-ash")

Figura 3 - Valores de CBR - 13 golpes, com adição de teores crescentes de cal hidratada
Curva 1: Após cura em estufa, com adição de 4% de "fly-ash"
Curva 2: Após 10 ciclos de umedecimento/secagem, com adição de 4% de "fly-ash"
Curva 3: Após 10 ciclos de umedecimento/secagem, sem adição de "fly-ash"

Figura 4 - Valores de CBR - 13 golpes, com adição de teores crescentes de cal
Curva 1: Após cura em estufa, com adição de 4% de cinzas ("fly-ash")
Curva 2: Após 15 ciclos de umedecimento/secagem, com adição de 4% de cinzas
Curva 3: Após 15 ciclos de umedecimento/secagem, sem adição de cinzas

Figura 5 - Valores de CBR - 13 golpes, com adição de teores crescentes de cal

Curva 1: Após cura em estufa, com adição de 4% de cinzas ("fly-ash")

Curva 2: Após 20 ciclos de umedecimento/secagem, com adição de 4% de cinzas

Curva 3: Após 20 ciclos de umedecimento/secagem, sem adição de cinzas

Figura 6 - Valores de CBR - 29 golpes, com adição de teores crescentes de cal

Curva 1: Após cura em estufa, com adição de 4% de cinzas ("fly-ash")

Curva 2: Após 10 ciclos de umedecimento/secagem, com adição de 4% de cinzas

Curva 3: Após 10 ciclos de umedecimento/secagem, sem adição de cinzas

Figura 7 - Valores de CBR - 29 golpes, com teores crescentes de cal

Curva 1: Após cura em estufa, com adição de 4% de cinzas ("fly-ash")

Curva 2: Após 15 ciclos de umedecimento/secagem, com adição de 4% de cinzas

Curva 3: Após 15 ciclos de umedecimento/secagem, sem adição de cinzas

Figura 8 - Valores de CBR - 29 golpes, com teores crescentes de cal

Curva 1: Após cura em estufa, com adição de 4% de cinzas ("fly-ash")

Curva 2: Após 20 ciclos de umedecimento/secagem, com adição de 4% de cinzas

Curva 3: Após 20 ciclos de umedecimento/secagem, sem adição de cinzas

- 2 — A curva 1 da figura 2 mostra que os efeitos da adição de "fly-ash", para energia de compactação de 29 golpes, são semelhantes aos obtidos para 13 golpes, pois para 3% de cal e 4% de "fly-ash", por exemplo, o valor de CBR ultrapassou 100%, quando com adição de 3% cal, sem "fly-ash", o valor de CBR atingiu apenas 66%.

- 3 — A figura 3 refere-se a valores de CBR de 13 golpes:

- a) a curva 1 representa os valores de CBR do material com 4% de "fly-ash" e teores crescentes de cal, após cura em estufa (sem ser submetido a ciclos de umedecimento/secagem). Trata-se da curva 1 da fig. 1, reproduzida para servir de referência, para mostrar os efeitos de 10 ciclos de umedecimento/secagem;
- b) a curva 2 mostra os efeitos de 10 ciclos de umedecimento/secagem sobre amostras com 4% de "fly-ash" e teores crescentes de cal hidratada. Observa-se redução drástica dos valores de CBR comparados com os valores da curva 1, que mostra os valores de CBR após cura em estufa, sem que o material tenha sido submetido a ciclos de umedecimento/secagem. Verifica-

se, contudo, que os valores de CBR se mantêm acima de 40%;

- c) a curva 3 mostra os efeitos de 10 ciclos de umedecimento/secagem sobre os valores de CBR de 13 golpes, para material com adição de teores crescentes de cal hidratada, porém sem adição de "fly-ash". Observa-se que a ausência de "fly-ash" acarretou a diminuição da resistência do material face a 10 ciclos de umedecimento/secagem; os valores de CBR mantiveram-se, em média, 15% abaixo dos que foram obtidos com adição de cal e de "fly-ash".

- 4 — A figura 4 refere-se, igualmente, a valores de CBR de 13 golpes:

- a) a curva 1 representa os valores de referência citados no item 1.
- b) a curva 2 mostra o efeito de 15 ciclos de umedecimento/secagem sobre os valores de CBR de material com adição de 4% de "fly-ash" e teores crescentes de cal hidratada;
- c) a curva 3 mostra os efeitos de 15 ciclos de umedecimento/secagem sobre os valores de CBR de material com teores crescentes de cal, porém sem adição de "fly-

ash". Verifica-se também neste caso, que que a ausência de "fly-ash" resultou em degradação mais acentuada do material submetido aos ciclos sucessivos de umedecimento/secagem.

Os valores de CBR de 13 golpes do material com 4% de "fly-ash" e teores crescentes de cal hidratada, mantiveram-se acima de 40%, após 15 ciclos de umedecimento/secagem.

5 — A figura 5 refere-se igualmente a valores de CBR de 13 golpes:

- a) a curva 1 representa os valores de referência já citados;
- b) a curva 2 mostra os efeitos de 20 ciclos de umedecimento/secagem sobre os valores de CBR de 13 golpes em misturas solo + 4% "fly-ash" e teores crescentes de cal hidratada. Verifica-se que os valores de CBR se mantiveram iguais ou superiores a 40%, embora o processo de umedecimento/secagem tenha causado diminuição acentuada dos valores de CBR, representados na curva 1, correspondentes à mesma mistura, logo após a cura;
- c) a curva 3 mostra os efeitos de 20 ciclos de umedecimento/secagem sobre os valores de CBR de 13 golpes para misturas de solo com teores crescentes de cal hidratada, porém sem adição de "fly-ash". Observa-se que os valores de CBR situam-se abaixo daqueles que correspondem à mistura adicional de 4% de "fly-ash".

6 — A figura 6 trata de valores de CBR de 29 golpes:

- a) a curva 1 refere-se a valores de CBR para teores crescentes de cal e adição de 4% de "fly-ash", após cura em estufa;
- b) a curva 2 mostra os efeitos de 10 ciclos de umedecimento/secagem sobre os valores de CBR para teores crescentes de cal e 4% de "fly-ash". Observa-se queda acentuada dos valores de CBR, mas eles se mantêm iguais ou superiores a 60%.
- c) a curva 3 mostra os efeitos de 10 ciclos de umedecimento/secagem sobre os valores de CBR de amostras com teores crescentes de cal, porém sem adição de "fly-ash";
Os valores de CBR mantêm-se iguais ou superiores a 50%, mas permanecem sempre inferiores àqueles obtidos com adição de 4% de "fly-ash".

7 — A figura 7 trata ainda de valores de CBR de 29 golpes:

- a) a curva 1 refere-se aos valores de CBR para teores crescentes de cal e adição de 4% de cinzas, após cura em estufa;
- b) a curva 2 mostra os efeitos de 15 ciclos de umedecimento/secagem sobre os valores de CBR em amostras com teores crescentes de cal e adição de 4% de "fly-ash". Observa-se que, apesar da acentuada redução dos valores de CBR, estes se mantêm acima de 50%;
- c) a curva 3 mostra os efeitos de 15 ciclos de umedecimento/secagem, sobre os valores de CBR em amostras com teores crescentes de cal, porém sem a adição de "fly-ash"; verifica-se que a redução dos valores de CBR é maior que no caso anterior, em que foram adicionados 4% de "fly-ash"; os valores de CBR mantêm-se, também neste caso, acima de 50% para teores de cal iguais ou superiores a 3%.

8 — A figura 8 trata de valores de CBR de 29 golpes:

- a) a curva 1 refere-se aos valores de CBR do material com adição de teores crescentes de cal e 4% de cinzas, após cura em estufa;
- b) a curva 2 mostra os efeitos de 20 ciclos de umedecimento/secagem sobre os valores de CBR do material com adição de teores crescentes de cal e 4% de "fly-ash". Os valores de CBR mantêm-se acima de 60%;
- c) a curva 3 mostra os efeitos de 20 ciclos de umedecimento/secagem sobre os valores de CBR com teores crescentes de cal porém sem adição de "fly-ash".

Observa-se que os valores de CBR são inferiores àqueles obtidos com adição de 4% de "fly-ash", mas mantêm-se iguais ou superiores a 50%. Cabe observar que o efeito de 20 ciclos de umedecimento/secagem mostra-se mais atenuado que o de 15 ciclos: esse fato parece contraditório mas pode ser interpretado como sendo uma "reativação" do material, o qual, face à presença dos aditivos, atinge um máximo de degradação com cerca de 15 ciclos de umedecimento/secagem, e, após atingir aquele máximo, torna a melhorar suas características de resistência.

Resultados dos ensaios de CBR com misturas solo + "fly-ash" + cimento

Foram executados ensaios de CBR sobre misturas de solo da mesma jazida anteriormente referida, utilizando "fly-ash" (4%) e teores crescentes de cimento Portland comum.

Oe resultados obtidos figuram no quadro III e estão representados graficamente nas figuras 9 e 10.

1 — A figura 9 refere-se a valores de CBR de 13 golpes. A curva 1 representa os valores de CBR de misturas solo + 4% de "fly-ash" e teores crescentes de cimento Portland comum, após cura em estufa, de acordo com o método de EADES e outros (3) utilizado para a cura das misturas solo + cal + "fly-ash". Comparando-se esses resultados com os que foram obtidos para misturas solo + cal + "fly-ash" verifica-se que os valores de CBR, após cura em estufa, das misturas solo + "fly-ash" + cimento são superiores aos que foram obtidos para misturas solo + "fly-ash" + cal.

No entanto, a análise das curvas 2, 3 e 4 da figura 9 mostra que as misturas solo + cimento e "fly-ash" não resistem tão bem à ação de degradação de sucessivos ciclos de umedecimento/secagem quanto as misturas solo + cal + "fly-ash", cujos valores constam no Quadro II; os valores de CBR mantêm-se, porém, entre 30% e 50%, para sucessivos ciclos de umedecimento/secagem.

2 — A figura 10 refere-se a valores de CBR de 29 golpes. Na curva 1 está registrada a variação dos valores de CBR para misturas solo + 4% de "fly-ash" + teores crescentes de cimento. Verifica-se, também neste caso, que os valores de CBR, após cura em estufa, são superiores aos que foram obtidos, nas mesmas condições, com misturas solo + 4% de "fly-ash" e teores crescentes de cal. No entanto, os ciclos de umedecimento/secagem produzem efeitos de degradação bem mais acentuados do que aqueles registrados para misturas solo + 4% "fly-ash" + teores crescentes de cal. Assim, para 4% de "fly-ash" e 2% de cimento, os valores de CBR tornaram-se inferiores a 40%, para 20 ciclos de umedecimento/secagem.

Cimento (%)	«Fly-ash» (%)	VALORES DE CBR (%)				Número de Golpes
		Após Inicial	Após 10 Ciclos	15 Ciclos	20 Ciclos	
(x) Zero	(x) Zero	23	20	16	16	13
1	4	101	48	41	30	
2	4	125	49	40	42	
3	4	161	52	40	34	
(x) Zero	(x) Zero	32	30	30	28	29
1	4	106	68	46	39	
2	4	135	58	52	35	
3	4	174	55	52	38	

QUADRO III — Resultados de ensaios de CBR, com adição de teores crescentes de cimento «Portland» comum e 4% de «fly-ash» (cinzas volantes), comparados com os resultados obtidos com o material natural, sem aditivos. (x = material natural, sem aditivos).

CONCLUSÕES

1. Considerando-se que mais de um milhão de quilômetros quadrados da região Centro-Sul do Brasil estão ocupados por rochas basálticas e que, com grande frequência, essas rochas apresentam capas espessas de produtos de alteração ("saibros"), cuja utilização "in natura", sem aditivos, em pavimentação rodoviária, tem acarretado sérios problemas, devido a sua degradação acentuada, a obtenção de métodos de estabilização de tais materiais poderá resultar em grande economia na pavimentação de rodovias.

2. Os ensaios realizados com o material natural demonstram a presença de teores elevados de minerais expansivos, do grupo da montmorilonita; tal fato tem sido verificado em quase todas as ocorrências de alteração de basaltos ("saibros").

O teor de montmorilonita, num mesmo local, é geralmente maior próximo à rocha alterada e diminui na direção da superfície; as argilas vermelhas, de maior grau de maturidade, estão frequentemente isentas de minerais expansivos ou os contêm em teor muito reduzido.

3. Os valores de CBR do material natural, sem aditivos, situam-se frequentemente abaixo de 30% e sua degradação, face a vários ciclos de umedecimento e secagem, faz baixar ainda mais os referidos valores.

4. A adição de cal aos produtos de alteração de basaltos ("saibros") tem como consequência a elevação dos valores de CBR e a formação de novos minerais, não expansivos, que substituem os argilo-minerais do grupo da montmorilonita, conforme se verifica através de ensaios difratométricos.

5. A cura em estufa, segundo método preconizado por EADES e outros (3) das misturas solo + cal mostrou que a adição de cal eleva substancialmente os valores de CBR, tanto de 13 como de 29 golpes; conforme se verifica no Quadro II, tais valores ultrapassam 50%, com adição de 3% de cal hidratada, para ambas energias de compactação.

6. Os sucessivos ciclos de umedecimento/secagem reduzem sensivelmente os valores de CBR das misturas solo + cal. Para teores de cal iguais ou superiores a 3%, os valores de CBR de 13 golpes permanecem acima de 30% após 20 ciclos de umedecimento/secagem, enquanto que os de 29 golpes situam-se em torno de 50%.

7. A adição de 4% de "fly-ash" à cal produz incrementos acentuados nos valores de CBR de 13 e 29 golpes, após cura em estufa, em com-

paração com os valores obtidos com adição de cal, unicamente.

8. Os valores de CBR das misturas solo + cal + "fly-ash", sofrem acentuada redução, face a sucessivos ciclos de umedecimento/secagem; no entanto, essa redução é inferior à sofrida pelas misturas solo + cal, sem "fly-ash".

9. Os valores de CBR de 13 golpes, de misturas de alteração de basalto com 4% de "fly-ash" e 2% de cal permanecem acima de 40%, mesmo após 20 ciclos de umedecimento/secagem.

10. Os valores de CBR de 29 golpes, de misturas de alteração de basalto com 4% de "fly-ash" e 2% de cal permanecem acima de 50%, mesmo após 20 ciclos de umedecimento/secagem.

11. A adição de 4% de "fly-ash" e de teores crescentes de cimento à alteração de basalto estudada, produziu incrementos acentuados nos valores de CBR após cura em estufa. No entanto, após 20 ciclos de umedecimento/secagem houve queda pronunciada dos referidos valores que, mesmo para 3% de cimento, situaram-se abaixo de 40%, para energias de compactação de 13 e 29 golpes.

12. Face à sensibilidade das reações dos aditivos com os argilo-minerais em relação à temperatura, recomenda-se a execução dos pavimentos de preferência no início da estação quente, devendo evitar-se tal execução no fim da estação quente ou durante as estações frias.

13. O efeito pozolânico de cimento e de "fly-ash" sobre a alteração de basalto estudada mostrou-se inferior ao produzido pela adição de cal hidratada e "fly-ash", conforme se verifica pelos efeitos de sucessivos ciclos de umedecimento/secagem.

ANEXOS

Metodologia proposta para ensaios de laboratório de misturas solo + aditivos (cal + "fly-ash")

- 1 — Colhem-se cerca de 250 kg do material representativo da jazida de alteração de rocha basáltica (saibreira) que se pretende utilizar.
- 2 — Reduz-se a granulometria aos diâmetros exigidos para execução do ensaio de CBR (6 e 7 — Bibliografia).
- 3 — Preparam-se amostras de material para execução de CBR:
 - a) amostra natural, sem aditivos;
 - b) amostra com adição de 2% de cal hidratada e 4% de "fly-ash";

- c) amostra com adição de 3% de cal hidratada e 4% de "fly-ash".
- 4 — Executam-se as compactações das amostras para o ensaio de CBR. (6 e 7 — Bibliografia).
 - 5 — Executa-se o ensaio de CBR da amostra natural sem aditivos (8).
 - 6 — Mantêm-se as amostras com aditivos nos cilindros e vedam-se as extremidades com borraça para evitar carbonatação e perda de umidade durante a cura.
 - 7 — Levam-se as amostras com aditivos a estufa, à temperatura de 70° C, durante 3 dias (72 horas).
 - 8 — Determinam-se os valores de CBR.
 - 9 — Destorroam-se as amostras utilizadas, mantendo-as separadas.
 - 10 — Executam-se 10 (dez) ciclos de umedecimento/secagem; o umedecimento é feito até a saturação com água e a secagem em estufa, até 70° C.
 - 11 — Após 10 ciclos de umedecimento/secagem, compactam-se novamente as amostras, na umidade adequada, e determinam-se os valores de CBR.
 - 12 — Destorroam-se as amostras, mantendo-as separadas.
 - 13 — Executam-se mais 5 (cinco) ciclos de umedecimento/secagem, de acordo com o item 10.
 - 14 — Compactam-se as amostras na umidade adequada e determinam-se os valores de CBR.
 - 15 — Repetem-se as operações descritas em 12 e 13.
 - 16 — Os valores de CBR obtidos com as amostras (b) e (c) do item 3, após 20 ciclos de umedecimento/secagem, são considerados como representativos do material da saibreira.
 - 17 — O teor de aditivos a ser utilizado decorre dos valores de CBR obtidos após 20 ciclos de umedecimento/secagem.
 - 18 — Recomenda-se a execução de ensaios granulométricos e de plasticidade (LL e LP) após a realização dos ensaios de CBR do material que foi submetido a 20 ciclos de umedecimento/secagem.
 - 19 — Solicita-se enviar cópia dos resultados ao IPR e aos autores deste trabalho.

Metodologia proposta para execução de sub-bases e bases, com aditivos (cal + "fly-ash")

1 — Construção de sub-bases

- 1.1 — Preparada a pista para receber a sub-

base, coloca-se uma camada de no máximo 15 cm de espessura, com a granulometria indicada no item 1.2.

1.2 — A granulometria do material deve obedecer às seguintes especificações: 100% passando na peneira de 1 polegada e, pelo menos, 60% passando na peneira nº 4, conforme preconiza a National Lime Association.

1.3 — A mistura dos aditivos (cal e/ou "fly-ash") poderá ser executada em usina ou no próprio local.

1.4 — No caso da mistura ser executada no próprio local, o espalhamento dos aditivos (cal ou cal + "fly-ash") poderá ser feito da seguinte maneira: os sacos, contendo os aditivos, são colocados na pista, de acordo com as respectivas percentagens a serem utilizadas, sendo após abertos e espalhados manualmente.

1.5 — Mistura-se a cal ou cal + "fly-ash" com o solo, até obter homogeneidade.

1.6 — Adiciona-se água até obter mistura de solo + aditivos com teor de umidade de aproximadamente 5% acima da ótima; controla-se a umidade para verificar se é necessário corrigir.

1.7 — Caso não seja necessário corrigir o teor de umidade, compacta-se o material até obter a massa específica desejada.

1.8 — Realiza-se a cura da mistura solo + aditivos durante um período de 7 dias, no mínimo, mantendo-se molhada, durante esse lapso de tempo, a superfície da camada.

1.9 — Completada a cura da primeira camada, executam-se as seguintes de modo análogo ao indicado para esta.

1.10 — A superfície da última camada deve manter-se molhada até a selagem final.

2 — Construção de bases

2.1 — Quando o material for utilizado para construção de bases, deverá ficar retido no mínimo 5% na peneira nº 40; neste caso recomenda-se, sempre que possível, a adição de "fly-ash" à cal.

2.2 — As exigências do item 1.2, com relação à granulometria permanecem as mesmas quanto ao diâmetro máximo passando na peneira 4.

2.3 — Com relação à cura deve atender-se ao que foi especificado no item 1.8, para a construção de sub-bases.

3 — Recomendações finais

3.1 — O grau de compactação a ser atingido, deve ser de 100% "Proctor" intermediário.

3.2 — Recomenda-se que a operação de mis-

tura do solo com os aditivos seja executada, sempre que possível, em usina de solos, para obter maior uniformidade da mistura e controle mais rigoroso da umidade.

3.3 — Todas as percentagens indicadas para os aditivos referem-se a peso total de solo seco.

BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

- 1 — MELFI, A. J. & FRANCO, L. — 1971 — Geochemical and Mineralogical Study on the First Stages of Weathering of Basic and Related Rocks — *Revista Brasileira de Geociências*, Rio de Janeiro, 1 (1): 22.
- 2 — SCHNEIDER, A. W. — 1964 — *Contribuição à Petrologia dos Derrames Basálticos da Bacia do Paraná* — Porto Alegre — Escola de Engenharia da UFRGS.
- 3 — EADES, J. L., NICHOLS, F. P. JR., & GRIM, R. E. — 1960 — Formation of new Minerals with Lime Stabilization as Proven by Field Experiments in Virginia — *Bulletin of the Highway Research Board*, USA, 335.
- 4 — LARSEN, J. — 1963 — O uso da cal para estabilização de solos em pavimentação. *Highway Research Board* — USA.
- 5 — HERRIN, M. MITCHELL, H. — 1961 — Durabilidade e propriedades físicas de misturas cal-pozolana-solo. *Bulletin of the Highway Research Board*, USA, 304.
- 6 — DNER — DPT: M-47-60 — Ensaio de Compactação de Solo — Método A — 13 golpes por camada, Rio de Janeiro.
- 7 — DNER — DPT: M-48-60 — Ensaio de Compactação de solos — Método B — 29 golpes/camada, Rio de Janeiro.
- 8 — DNER — DPT: M-50-60 — Determinação do Índice Suporle California (CBR) de Solos, Rio de Janeiro.