

CONINFRA 2009 – CONGRESSO DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (CONINFRA 2009 - TRANSPORTATION INFRASTRUCTURE CONFERENCE)

29 A 31 DE JULHO DE 2009 (July 29th to 31th 2009)

São Paulo – Brasil

MELHORIAS DAS PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DE SOLOS ORIGINADOS DE ROCHAS SEDIMENTARES PELA ADIÇÃO DE CAL (IMPROVEMENT OF THE PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES ON SOILS ORIGINATED BY SEDIMENTARY ROCKS BY CAL ADDITION)



JULIANA FRANCISCA CORRÊA¹



ANTÔNIO FORTUNATO MARCON²



GLICÉRIO TRICHÊS³

¹ Msc, Engenheira Civil, Leme Engenharia Ltda. / UFSC, Rua Hipólito Mafrá nº203 Ap. 308 Bl. C - Saco dos Limões - CEP: 88045-410, Florianópolis-SC, Brasil, jucorrea.ecv@gmail.com

² Dr, Engenheiro Civil, Departamento de Engenharia Civil / UFSC, Rua João Pio Duarte Silva, s/n - Córrego Grande - CEP: 88040-970 - Cx. Postal 476, Florianópolis-SC, Brasil, marcon@ecv.ufsc.br

³ Dr, Engenheiro Civil, Departamento de Engenharia Civil / UFSC, Rua João Pio Duarte Silva, s/n - Córrego Grande - CEP: 88040-970 - Cx. Postal 476, Florianópolis-SC, Brasil, ecv1gtri@ecv.ufsc.br

RESUMO

Este trabalho apresenta os resultados de um estudo laboratorial de três amostras de solo expansivo coletadas na Rodovia SC-422, implantada com revestimento primário. Trata-se de uma importante rota que liga a cidade de Rio Negrinho à Volta Grande em Santa Catarina, cuja falta de pavimento inibe o desenvolvimento da região. Os objetivos do estudo foram determinar teores de cal para minimizar a expansão e conseqüentes melhorias das características dos solos, possibilitando seu emprego como camadas de pavimentos rodoviários. As características das amostras de solo e da cal utilizada para mistura foram estudadas através dos ensaios: Limites de Atterberg; granulometria; compactação; ISC; ensaios da metodologia de classificação MCT; ensaio triaxial dinâmico de cargas repetidas; e análise química da cal e do solo. Verificou-se por meio do ensaio de LP, que as reações de troca de bases são imediatas. Determinaram-se os teores adequados de cal para minimizar a expansão das amostras através dos métodos do *Lime Fixation Point* (LFP), pH e método das Pastilhas MCT. A adição de teores de cal de 3% para duas amostras e 2% para a terceira provocou: a aglutinação das partículas mais finas, pequena redução do peso específico aparente seco ($\gamma_{dm\acute{a}x}$) e aumento na umidade ótima ($w_{ót}$); e minimizaram a expansão dos solos independentemente da energia de compactação aplicada. Foram também detectados incrementos nos valores de ISC e aumentos significativos dos módulos resilientes dos solos. Verificou-se através

03-022

**CONINFRA 2009 – CONGRESSO DE INFRAESTRUTURA DE
TRANSPORTES (CONINFRA 2009 - TRANSPORTATION
INFRASTRUCTURE CONFERENCE)**

29 A 31 DE JULHO DE 2009 (July 29th to 31th 2009)

São Paulo – Brasil

do ensaio da metodologia MCT e perda de massa por imersão que a adição de cal nas amostras tornou-as de comportamento laterítico.

PALAVRAS-CHAVES: estabilização de solos; solos tropicais; solo-cal; módulo resiliente.

ABSTRACT

This paper presents the results of a scientific study of three soil samples collected on the Road SC-422. It is an important road that connects the town of Rio Negrinho to Vila Volta Grande in Santa Catarina, whose lack of pavement inhibits the economic development of the region. The main objectives of this study were to determine the lime contents to minimize the expansion and the consequent characteristic improvements of the soils, for use as pavement road layers. It was studied the characteristics of the soils and lime mix, which included the tests: Atterberg Limits, grain size determination, compaction and CBR; MCT classification method tests; repeated loads dynamic triaxial test; and chemical analysis of soil and lime samples. It was verified through the test of PL that the reactions of exchanging bases are immediate. The appropriate lime contents to minimize the expansion of these samples were determined using Lime Fixation Point (LFP), pH and MCT methods. The addition of 3%, 2% and 3% lime contents respectively for AM-01, AM-02 and AM-03 samples caused: the agglutination of smaller soil grains; a small reduction of the dry apparent specific weight ($\gamma_{dm\acute{a}x}$); increase of optimum water content (w_{ot}); and expansion minimization of the soils regardless of the compaction energy. It was also detected increases in the CBR values and significant resilient module increases. The MCT tests and mass loss caused by immersion showed that the addition of lime to the samples changes the soil behavior from non lateritic to lateritic condition.

KEY WORDS: soil stabilization; tropical soils, soil-lime, resilient modulus.

CONINFRA 2009 – CONGRESSO DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (CONINFRA 2009 - TRANSPORTATION INFRASTRUCTURE CONFERENCE)

29 A 31 DE JULHO DE 2009 (July 29th to 31th 2009)

São Paulo – Brasil

INTRODUÇÃO

Os materiais propícios e disponíveis para uso em camadas de pavimentos rodoviários nem sempre são de fácil acesso. Isto depende da localização da rodovia e dos materiais que são encontrados na região. Nem sempre o solo local satisfaz às especificações para sua utilização em camadas de base e/ou sub-base de pavimentos. Deve-se optar por alternativas como: aceitar o material original ajustando o projeto às restrições por ele impostas; substituição do material local por material de qualidade superior; ou alterar as propriedades do solo existente criando um material capaz de responder às necessidades da tarefa prevista. Esta última possibilidade é, geralmente, designada por Estabilização de Solos (Núñez, 1991).

A estabilização de solos com cal permite que materiais lindeiros à rodovia possam ser usados para pavimentação da mesma. Percebe-se que há, na atualidade, a preocupação primordial no intuito de melhorar as características de deformação das camadas do pavimento, utilizando-se de solos melhorados e estabilizados com cal mesmo onde há jazidas de rocha.

Neste trabalho foram estudadas três amostras de solo com adição de cal da Rodovia SC-422, trecho Rio Negrinho - Vila Volta Grande, a qual representa uma importante rota rodoviária que liga a Região Norte e o Vale do Rio Itajaí-Açu. O mapa rodoviário de Santa Catarina com indicação da região estudada está apresentado na Figura 1.

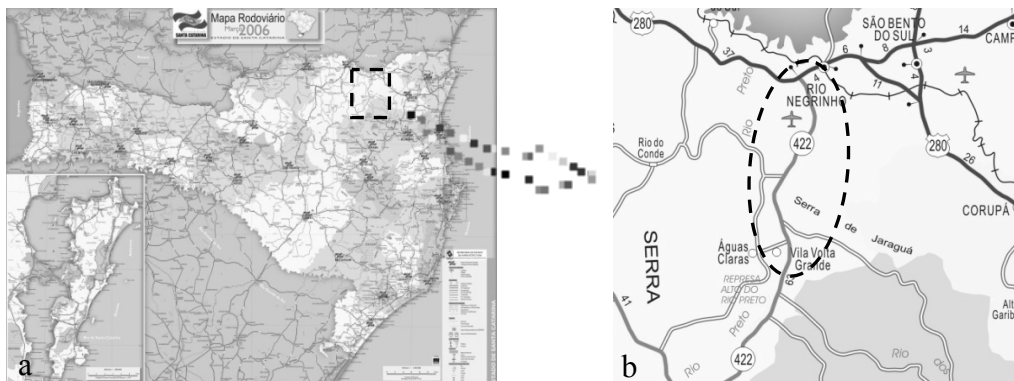


Figura 1. a) Mapa Rodoviário do Estado de Santa Catarina; b) Área de Estudo (DEINFRA, 2006a)

SOLOS TROPICAIS

A definição de solo tropical foi apresentada por Nogami e Villibor (1995) como sendo aquele que apresenta peculiaridades de propriedades e de comportamento, relativamente aos solos não tropicais, em decorrência da atuação no mesmo de processos geológicos e/ou pedológicos, típicos das regiões tropicais úmidas. Dentre os solos tropicais destacam-se duas grandes classes: os solos lateríticos e os solos saprolíticos.

Os solos lateríticos são solos bem intemperizados, característicos de áreas bem drenadas, que ocupam as camadas mais superficiais. Apresentam coloração em que predominam os matizes vermelho e amarelo, com uma macroestrutura aparentemente homogênea e isotrópica. Sua constituição mineralógica é caracterizada pela presença de quartzo e de outros minerais resistentes mecânica e quimicamente na fração areia (Nogami e Villibor, 1983 *apud* Lovato, 2004). Na fração

CONINFRA 2009 – CONGRESSO DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (CONINFRA 2009 - TRANSPORTATION INFRASTRUCTURE CONFERENCE)

29 A 31 DE JULHO DE 2009 (July 29th to 31th 2009)

São Paulo – Brasil

argila, o argilo-mineral geralmente encontrado é a caolinita membro da família dos argilominerais menos ativos coloidalmente. Essa atividade é ainda reduzida quando se associa aos óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio (Nogami e Villibor, 1995).

Os solos de comportamento saprolítico são originados pela decomposição e/ou desagregação de uma rocha consolidada e, em condições naturais, constituem camadas subjacentes às camadas de solos de comportamento laterítico. Sua macroestrutura se caracteriza pela heterogeneidade e anisotropia, geralmente com cores variadas, manchas e mosqueamentos herdados da rocha matriz ou desenvolvidos pelo intemperismo (Nogami e Villibor, 1983 *apud* Lovato, 2004).

ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS COM CAL

A cal adicionada a certos tipos de solos produz algumas reações que são responsáveis por melhorias adversas em suas características as quais permitem a sua utilização em subleitos (quando há correção da expansão elevada), sub-bases ou mesmo, bases de pavimentos rodoviários. Este método de estabilização de solos finos é uma alternativa de custo relativamente baixo.

Os pavimentos de baixo custo podem ser definidos como aqueles que utilizam ao máximo os materiais locais, visando um custo mínimo.

Ingles e Metcalf (1972) afirmam que a estabilização com cal se desenvolveu nos estados do sul dos EUA nos anos 30. Por volta dos anos 50 o uso do tratamento com cal para argilas puras foi difundido no Texas, e o caso remanesce ainda hoje.

A utilização da cal se limita a teores baixos da mesma, fato observado por Nardi (1987) *apud* Ide e Peixoto (2006), o qual verificou numa pista experimental (com utilização de solo arenoso), que os teores de cal de 4 e 6% apresentaram as melhores condições funcionais e estruturais e que misturas de elevada rigidez apresentam trincas de retração que podem refletir no revestimento betuminoso.

Reações Solo-Cal

Algumas das propriedades e características dos solos que influenciam as reações solo-cal são: pH do solo, teor de matéria orgânica, drenagem natural, presença excessiva de sódio permutável, mineralogia da fração argila, grau de intemperismo, presença de carbonos e/ou sulfato, ferro extraível, relação sílica/alumina e sílica/sesquióxidos (Attoh-Okine, 1995 *apud* Lovato, 2004).

A utilização da cal como agente estabilizante é mais eficaz quando adicionada a materiais finos (siltes ou argilas) dos quais o IP (Índice de Plasticidade) varia entre 10 a 50% (*Tensar Corporation*, 1998). A estabilização química com cal é caracterizada por duas fases: a fase inicial rápida, que dura de horas a dias e a fase lenta (que pode levar meses ou anos).

Na fase rápida estão as reações da troca catiônica, floculação-aglomeração das partículas, compressão da dupla camada elétrica e adsorção de cal.

A fase lenta é caracterizada pelas reações pozolânicas que proporcionam aumento da resistência, ou seja, a formação de produtos cimentantes, e pela carbonatação, que, segundo Queiroz de Carvalho

CONINFRA 2009 – CONGRESSO DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (CONINFRA 2009 - TRANSPORTATION INFRASTRUCTURE CONFERENCE)

29 A 31 DE JULHO DE 2009 (July 29th to 31th 2009)

São Paulo – Brasil

(1988), é uma reação prejudicial na mistura por ser um composto cimentante fraco e deletério para o resultado final em termos de ganho de resistência.

Alterações nas Propriedades dos Solos com Adição de Cal

As melhorias obtidas quando se executa a mistura de solo com cal para uso em camadas do pavimento, em especial as melhorias no material de subleito, podem ser verificadas em muitos estudos realizados e publicados até hoje. Cabe, neste momento, diferenciar os termos “modificação” e “estabilização”, os quais dependem da quantidade de estabilizante que é adicionado ao solo.

Modificação ocorre, em certa medida, com quase todos os solos de granulometria fina, mais precisamente na fração argila e em solos de média a alta plasticidade. O fenômeno ocorre principalmente devido à troca de cátions do cálcio fornecido pela cal (Ca(OH) ou cal hidratada) que é causada pelo ambiente de pH alto. Os resultados do mecanismo são: a redução na plasticidade, a redução da umidade ótima, a redução da variação volumétrica, a melhoria da estabilidade e capacidade para construir uma sólida plataforma de pavimento (Little, 1999).

A modificação com cal melhora o desempenho de subleitos, bases e sub-bases através da adição de pequenas quantidades de cal, tipicamente, percentagens de 1 a 3% de cal são utilizadas para a modificação (Tensar Corporation, 1998).

Estabilização ocorre quando maior quantidade de cal é adicionada a um solo reativo e esta quantidade é suficiente para que, a longo prazo, o material estabilizado ganhe resistência a um nível significativo por meio das reações pozolânicas. O fenômeno ocorre devido à reação do cálcio da cal com os aluminatos e silicatos presentes nos argilo-mineirais. Esta reação pode começar rapidamente e é responsável por alguns dos efeitos de modificação. No entanto, estudos revelam que a expressão reação pozolânica pode continuar por um longo período desde que suficiente cal esteja presente e o pH permaneça elevado (acima de 10). Os resultados da estabilização podem ser aumentos nos valores de módulo resiliente e, mesmo após períodos de danos ambientais ou de carregamentos devido à passagem do tráfego, é de longa durabilidade ao longo de décadas de serviço (Little, 1999).

Métodos de Dosagem Solo-Cal

Diferentes métodos de dosagem para misturas solo-cal foram testados por muitos pesquisadores, que resultaram muitas vezes em conclusões distintas a respeito. O fato de haver aspectos negativos ou positivos a respeito de um ou outro método de dosagem pode estar relacionado ao tipo de solo e cal utilizados e a reatividade dos mesmos, bem como à maneira de execução de cada ensaio.

Dos métodos de dosagem solo-cal, citam-se aqui dois: Método LFP (*Lime Fixation Point*) e o Método do pH.

O Método LFP foi proposto por Hilt e Davidson (1960) *apud* Núñez (1991) e tem por objetivo estabelecer o teor de cal a ser adicionado para a melhoria da trabalhabilidade do solo sem produzir aumentos significativos na sua resistência. O ensaio para a determinação do LFP consiste em

03-022

CONINFRA 2009 – CONGRESSO DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (CONINFRA 2009 - TRANSPORTATION INFRASTRUCTURE CONFERENCE)

29 A 31 DE JULHO DE 2009 (*July 29th to 31th 2009*)

São Paulo – Brasil

efetuar o ensaio de Limite de Plasticidade (LP) aumentando o teor de cal até que o LP alcance um valor máximo (LFP). Para teores de cal superiores ao LFP, o solo ganha resistência sem ter sua trabalhabilidade e índices plásticos (LL e LP) modificados. Por este motivo, quando é encontrado o LFP, são adicionados mais 4% no teor de cal para a estabilização.

O Método do pH proposto por Eades e Grim (1966) apud Núñez (1991), fundamenta-se no pH da mistura solo-cal. O princípio básico deste procedimento é adicionar suficiente quantidade de cal de modo a assegurar um pH de 12,4 para a ocorrência das reações pozolânicas (que proporcionam resistência à mistura). Este método foi desenvolvido para solos de climas temperados. Em alguns solos tropicais o limite de pH de 12,4 é impossível de ser alcançado.

METODOLOGIA DA PESQUISA

A metodologia desta pesquisa (Corrêa, 2008) constou da coleta de três amostras de mesma formação geológica localizada na área de abrangência da Rodovia SC-422. O material foi armazenado em sacos e, posteriormente, seco ao ar. As pesagens de materiais (solo, cal e água) foram realizadas com precisão de 0,01 gf. As misturas de solo-cal-água foram realizadas com homogeneização prévia da mistura solo com cal e posteriormente adicionada água em quantidades graduais de modo a garantir total homogeneidade da mistura final.

Os corpos-de-prova para os ensaios realizados foram moldados nas condições de umidade ótima da curva de compactação com variação de peso específico e do teor de umidade de $\pm 0,5\%$.

Na primeira etapa as amostras de solo natural foram submetidas aos ensaios de caracterização e classificação (Limites de Atterberg e Análise Granulométrica com sedimentação), assim como compactação e ISC com a utilização das energias Proctor Normal e Proctor Intermediária; ensaios da metodologia MCT (Mini-MCV); ensaio triaxial dinâmico para determinação do módulo de resiliência.

A segunda etapa da pesquisa é caracterizada pela verificação das características da cal estudada com a utilização da análise química para verificação de seus componentes.

Na terceira etapa, a dosagem da cal foi feita através dos métodos do LFP, pH e método das pastilhas MCT. Nesta etapa também foram verificados os tempos de reação entre o solo e cal a partir da realização dos ensaios de LP com variação do tempo entre mistura e execução do ensaio.

Na quarta etapa, as misturas de solo melhorado com cal foram submetidas a todos os ensaios citados para o solo natural. Para os ensaios de ISC, a imersão dos corpos-de-prova se deu aos 14 dias de cura. Para os ensaios triaxiais dinâmicos foram confeccionados 3 corpos-de-prova para cada caso e para as três amostras (compactação Proctor Normal e Intermediária nas amostras de solo natural e solo melhorado com cal com variação do tempo de cura para 14 e 90 dias) totalizando 54 corpos-de-prova para este ensaio. Foram utilizadas as seguintes normas:

NBR 7182/1986 – Solo: Ensaio de Compactação; NBR 7181/1984 – Solo: Análise Granulométrica; NBR 6459/1984 – Solo: Determinação do Limite de Liquidez; NBR 7180/1984 – Solo:

03-022

CONINFRA 2009 – CONGRESSO DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (CONINFRA 2009 - TRANSPORTATION INFRASTRUCTURE CONFERENCE) - ISSN 1983-3903

29 A 31 DE JULHO DE 2009 (*July 29th to 31th 2009*)

CONINFRA 2009 – CONGRESSO DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (CONINFRA 2009 - TRANSPORTATION INFRASTRUCTURE CONFERENCE)

29 A 31 DE JULHO DE 2009 (*July 29th to 31th 2009*)

São Paulo – Brasil

Determinação do Limite de Plasticidade; NBR 9895/1987 – Solo – Determinação do Índice de Suporte Califórnia; DNER ME 131/1994 – Determinação do módulo de resiliência; Para o ensaio Mini-MCV foi necessário consultar as normas DNER-CLA 259/96, DNER-ME 258/94, DNER-ME 228/94 e DNER-ME 256/94.

MATERIAIS

A coleta das amostras foi baseada nos elementos de geotecnia e geologia do projeto de pavimentação do Trecho Rio Negrinho – Volta Grande da Rodovia SC-422, junto ao DEINFRA SC. Na região foi constatada a influência das unidades estratigráficas representadas pelo Complexo Granulítico Santa Catarina, Conglomerado Baú, Grupo Itararé e Sedimentos Quaternários Continentais (DEINFRA, 2006b).

O substrato da região é formado por rochas sedimentares pertencentes aos Grupos Itararé e Guatá, do Super Grupo Tubarão. Todo o trecho está assentado sobre rochas sedimentares, correspondentes a Formação Mafra e Rio do Sul. Há grande dificuldade de se localizar ocorrência de rocha adequada à produção de brita, pois estas Formações, segundo estudo geológico, são constituídas por arenitos finos a grosseiros, folhelhos e secundariamente diamictitos de matriz arenosa e argilosa, conglomerados, ritmitos, argilitos e argilitos varvicos, os quais não se mostram adequados para a produção de agregados para a utilização em pavimentação de rodovias.

Diante dessas informações, verificou-se que no trecho há materiais argilosos e siltosos em grande escala e, em muitos pontos, verifica-se também a elevada expansão desses solos.

Nos locais de coleta das amostras 01 e 02 foi observada a existência de “borrachudos” (aflorescimento de água+solo de baixa resistência) na estrada existente que evidenciou a expansibilidade e baixo suporte do subleito. Ocorrem banhados, cujas sondagens realizadas identificaram a presença de argila siltico arenosa marrom, argila siltosa cinza, silte arenoso marrom, argila siltosa marrom, silte argiloso marrom e argila siltico arenosa cinza clara.

No local de coleta da amostra 03, o horizonte B é representado por argila siltosa marrom, e o horizonte C, por uma argila siltosa amarelada, silte argiloso amarelado a róseo, silte argiloso rosado a arroxeadado e areia fina esverdeada. Pela análise dos resultados de ensaios, constata-se que o horizonte C tende a ser mais expansivo que o horizonte B.

De acordo com a classificação HRB, a AM-01 é classificada como A-7-5. Quando se realizou o ensaio Mini-MCV e Perda de Massa por Imersão, a classificação foi de NG'. De acordo com a classificação HRB, a AM-02 é classificada como A-7-5. Utilizando a classificação MCT quando se realizou o ensaio Mini-MCV e Perda de Massa por Imersão, a classificação foi de NG'. A AM-03 de acordo com a classificação HRB, é classificada como A-7-6 e NA' pela classificação MCT.

Para efetuar os ensaios de laboratório, foi escolhido um tipo de cal cálcica hidratada (CH-I) produzida pela empresa EMAL – Empresa de Mineração Aripuanã Ltda. em Nobres / MT. A análise química deste material constatou um valor de 72,7% em Óxido de Cálcio (CaO) e 0,99% de Óxido de Magnésio (MgO).

03-022

CONINFRA 2009 – CONGRESSO DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (CONINFRA 2009 - TRANSPORTATION INFRASTRUCTURE CONFERENCE)

29 A 31 DE JULHO DE 2009 (July 29th to 31th 2009)

São Paulo – Brasil

APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

Resultados da Dosagem Solo-cal – Método pH

O ensaio para dosagem solo-cal com o método do pH foi realizado nas amostras AM-01, AM-02 e AM-03 utilizando as dosagens: 0%, 2%, 3%, 4%, 5%, 6% e 7%. Para amostra AM-01 obteve-se o valor de 4,0% de cal; a amostra AM-02 apresentou um teor de cal obtido pelo método do pH de 4,0%; e a amostra AM-03, o teor de cal obtido foi de 3,0%, conforme mostra a Figura 2.

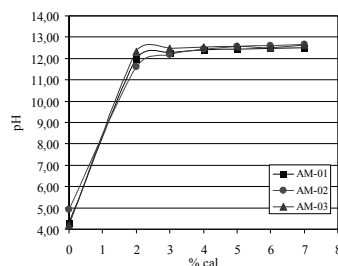


Figura 2. Dosagem Método Eades e Grim – pH (AM-01, AM-02 e AM-03)

Resultados da Dosagem Solo-cal – Método LFP

O Limite de Plasticidade (LP) foi realizado variando as porcentagens de cal e tempo entre mistura e execução (imediatamente, 1 hora, 2 horas, 4 horas, 8 horas, 24 horas e 1 semana). As Figuras 3, 4 e 5 mostram o comportamento das amostras AM-01, AM-02 e AM-03 respectivamente. Para o tempo imediato entre a dosagem e a execução do ensaio, os valores estão na Tabela 1.

Para os tempos utilizados nos ensaios de Limite de Plasticidade (LP) no método de dosagem LFP, houve diferenças nos resultados, porém, o teor de cal onde ocorre o ponto LFP (*Lime fixation Point*) para cada amostra, foi o mesmo na maioria dos casos, tornando mais confiável o valor para o teor de cal adotado. Os resultados foram ligeiramente diferentes dos valores obtidos no ensaio do pH.

Os valores obtidos para as amostras AM-01 e AM-02 foram de 4,0% de cal a ser adotado. A amostra AM-03 tem seus valores de LFP na ordem de 3,0% de cal.

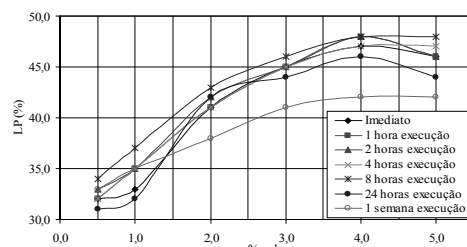


Figura 3. Dosagem Método LFP (AM-01)

03-022

CONINFRA 2009 – CONGRESSO DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (CONINFRA 2009 - TRANSPORTATION INFRASTRUCTURE CONFERENCE)

29 A 31 DE JULHO DE 2009 (July 29th to 31th 2009)

São Paulo – Brasil

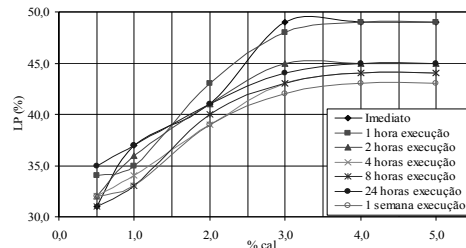


Figura 4. Dosagem Método LFP (AM-02)

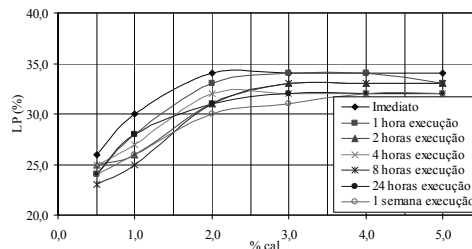


Figura 5. Dosagem Método LFP (AM-03)

Tabela 1. Resultados da dosagem solo-cal das amostras – Método LFP

% cal	LP (%)		
	AM-01	AM-02	AM-03
0,0	35,0	34,0	25,0
0,5	32,0	31,0	26,0
1,0	33,0	37,0	30,0
2,0	41,0	41,0	34,0
3,0	45,0	49,0	34,0
4,0	47,0	49,0	34,0
5,0	46,0	49,0	34,0

Estes resultados dão uma boa indicação de que estão ocorrendo as reações solo-cal. Os valores de LP para as misturas com 0,5% de cal são menores do que para o solo natural. Como verificado na literatura, em pesquisas realizadas, tanto em amostras de solo de comportamento não laterítico (Pomatti, 2000) quanto em solos de comportamento laterítico, o aumento nos teores de cal eleva o valor de LP até certo ponto a partir do qual este valor permanece constante, ou diminui. Pelos resultados obtidos de LP, verifica-se que as reações da cal com o solo são imediatas e a alta expansão das amostras estudadas tende a ser suprimida. Ambos os métodos apresentados para dosagem solo-cal, LFP e pH forneceram resultados muito próximos.

Resultados da Dosagem Solo-cal – Método das Pastilhas MCT

Nos ensaios de pastilhas foram utilizados os valores de 2%, 3% e 4% para as Amostras 01 e 02 e para a Amostra 03 foram utilizados os teores de 1%, 2% e 3%. Os resultados estão apresentados na Tabela 2 e os resultados para os três tipos de dosagem realizados está apresentado na Tabela 3.

A AM-01 foi classificada como NG' pelo método das pastilhas MCT. Ao adicionar cal e realizar os ensaios de pastilha, a penetração da agulha foi diminuindo gradativamente fazendo com que esta

**CONINFRA 2009 – CONGRESSO DE INFRAESTRUTURA DE
TRANSPORTES (CONINFRA 2009 - TRANSPORTATION
INFRASTRUCTURE CONFERENCE)**

29 A 31 DE JULHO DE 2009 (July 29th to 31th 2009)

São Paulo – Brasil

amostra fosse classificada como LG' com 3% de cal. A AM-02 apresentou inicialmente, para solo natural, uma classificação LG' pela metodologia expedita MCT. Ao adicionar 2% de cal esta classificação se manteve. Esta amostra, pelo critério de classificação de solos pelo método MCT (laterítico ou saprolítico), não necessitaria de adição de cal, pois naturalmente é um solo de comportamento laterítico. No entanto foi utilizado o valor de 2% de cal para verificar a diminuição na expansão pelo ensaio ISC. A AM-03 apresentou uma classificação NS'-NG' pelos ensaios de pastilhas de solo natural, passando para LG' quando foram adicionados 3% de cal.

Tabela 2. Resumo da dosagem solo-cal das amostras – Método das Pastilhas

Amostra solo-cal	Contração diametral (mm)	Penetração agulha 10 g (mm)	Classificação Geotécnica MCT
AM 01+0% cal	2,68	2,68	NG'
AM 01+2% cal	2,35	2,36	NG'
AM 01+3% cal	2,45	0,14	LG'
AM 01+4% cal	2,28	0,00	LG'
AM 02+0% cal	2,79	1,81	LG'
AM 02+2% cal	2,31	1,92	LG'
AM 02+3% cal	2,44	1,27	LG'
AM 02+4% cal	2,09	0,57	LG'
AM 03+0% cal	1,17	6,73	NS'-NG'
AM 03+1% cal	1,71	4,78	NG'
AM 03+2% cal	1,56	3,64	NG'
AM 03+3% cal	1,42	0,78	LG'

Tabela 3. Resumo dos resultados da dosagem solo-cal das amostras

Ensaio	Cal (%)		
	AM-01	AM-02	AM-03
pH	4	4	3
LFP	4	4	3
Pastilhas MCT	3	2	3

Resultados dos Ensaio de Limites de Atterberg e Granulometria

Os Limites de Atterberg no ensaio determinado imediatamente após a mistura solo-cal para as Amostras 01, 02 e 03 são apresentados na Tabela 4. Os valores classificam a AM-01+3% de cal como A-7-5, a AM-02+2% de cal como A-7-5 e a AM-03+3% de cal como sendo A-6.

Quando se compara estes valores com os valores obtidos para amostras de solo natural, verifica-se que para as amostras AM-01 e AM-02 houve decréscimo do LL e para a AM-03 observa-se que este limite se manteve constante. O LP de todas as amostras estudadas sofreu aumento. Nota-se também que houve decréscimo nos valores de IP.

Nas Tabelas 5, 6 e 7 estão as análises granulométrica das amostras. Verifica-se como aspecto mais importante a alteração da granulometria do solo com a diminuição do teor de argila e aumento do teor de silte para as amostras AM-01 e AM-02 e diminuição para a amostra AM-03 e ainda o

**CONINFRA 2009 – CONGRESSO DE INFRAESTRUTURA DE
TRANSPORTES (CONINFRA 2009 - TRANSPORTATION
INFRASTRUCTURE CONFERENCE)**

29 A 31 DE JULHO DE 2009 (July 29th to 31th 2009)

São Paulo – Brasil

aumento do teor de areia fina para as 3 amostras. Debitam-se estas mudanças ao efeito de aglutinação dos grãos finos do solo pela incorporação da cal (Corrêa, 2008).

Tabela 4. Resumo dos valores dos Limites de Atterberg

Amostra	LL (%)	LP (%)	IP (%)
01	102	35	67
01+3% cal	73	45	28
02	82	34	48
02+2% cal	68	41	27
03	42	25	17
03+3% cal	42	34	8

Tabela 5. Análise Granulométrica – AM-01 e AM-01+3% cal

AM-01 com defloculante – solo natural								
Argila	Silte	A. Fina	A. Média	A. Grossa	P. Fino	P. Médio	P.Grosso	P.Mão
68,16%	17,69%	6,51%	3,47%	4,16%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
AM-01 + 3% cal com defloculante								
Argila	Silte	A. Fina	A. Média	A. Grossa	P. Fino	P. Médio	P.Grosso	P.Mão
10,05%	31,93%	47,17%	5,73%	5,13%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%

Tabela 6. Análise Granulométrica – AM-02 e AM-02+2% cal

AM-02 com defloculante – solo natural								
Argila	Silte	A. Fina	A. Média	A. Grossa	P. Fino	P. Médio	P.Grosso	P.Mão
60,17%	24,60%	8,20%	2,35%	3,31%	1,30%	0,08%	0,00%	0,00%
AM-02 + 2% cal com defloculante								
Argila	Silte	A. Fina	A. Média	A. Grossa	P. Fino	P. Médio	P.Grosso	P.Mão
27,3%	28,14%	36,44%	2,36%	4,27%	1,40%	0,00%	0,00%	0,00%

Tabela 7. Análise Granulométrica – AM-03 e AM-03+3% cal

AM-03 com defloculante – solo natural								
Argila	Silte	A. Fina	A. Média	A. Grossa	P. Fino	P. Médio	P.Grosso	P.Mão
4,42%	67,63%	14,60%	7,46%	5,88%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
AM-03 + 3% cal com defloculante								
Argila	Silte	A. Fina	A. Média	A. Grossa	P. Fino	P. Médio	P.Grosso	P.Mão
1,83%	47,16%	45,84%	2,92%	2,25%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%

Resultados dos Ensaios de Compactação

Com base nos resultados de ensaios de compactação nas energias Normal e Intermediária, para as amostras de solo natural e solo melhorado com cal (Tabela 8), pode-se verificar que houve na maioria dos casos decréscimo nos valores de γ_{dmax} , que era de se esperar, tendo em vista que o solo, após a adição de cal passou a ter menor quantidade de grãos de argila e silte, que formaram flocos pela adição da cal. A AM-02 apresentou aumento no valor de γ_{dmax} quando se adicionou 2% de cal na realização do ensaio de compactação com energia normal. Este resultado se mostrou contrário ao verificado na bibliografia consultada. Os valores de $\omega_{ót}$ para as três amostras e para ambas energias de compactação mostrou leve incremento em seus valores, com exceção da AM-02, a qual, para energia de compactação Proctor Normal mostrou redução de seu valor.

03-022

**CONINFRA 2009 – CONGRESSO DE INFRAESTRUTURA DE
TRANSPORTES (CONINFRA 2009 - TRANSPORTATION
INFRASTRUCTURE CONFERENCE)**

29 A 31 DE JULHO DE 2009 (July 29th to 31th 2009)

São Paulo – Brasil

Tabela 8. Resumo dos resultados dos Ensaio de Compactação

Amostra	Energia de Compactação			
	Proctor Normal		Proctor Intermediário	
	$\omega_{ót}$ (%)	γ_{dmax} (kN/m ³)	$\omega_{ót}$ (%)	γ_{dmax} (kN/m ³)
01	30,8	14,1	27,3	15,1
01+3% cal	31,2	14,1	28,0	14,8
02	32,4	14,0	27,2	15,1
02+2% cal	30,3	14,3	29,0	14,9
03	25,6	15,1	21,9	16,3
03+3% cal	26,5	14,8	22,9	15,9

Índice de Suporte Califórnia (ISC) e Expansão das Amostras

De acordo com os dados da Tabela 9, houve acréscimo significativo nos valores de ISC para AM-01 quando esta foi melhorada com 3% de cal, passando de valores em torno de 2,0% na Energia Proctor Normal para valores próximos a 45%. Para a Energia do Proctor Intermediário, de valores próximos a 2,0% para valores em torno de 60%. A AM-02 também mostrou valores com acréscimo significativo com adição de cal, porém, para Energia Intermediária, obtiveram-se valores próximos aos conseguidos com Energia do Proctor Intermediário.

Com relação à AM-03, esta apresentou valores de ISC que passaram de aproximadamente 6% para valores próximos a 43% (Energia Proctor Normal) e de valores em torno de 9% para valores em torno de 63%. Como estes ensaios foram realizados com as amostras saturadas após período de imersão, verificou-se que a resistência provocada pela adição de cal se desenvolveu mesmo dentro da água, pois provocou aumento nos valores de ISC para as três amostras ensaiadas.

Com relação aos valores de expansão após a adição de cal foram reduzidos a quase zero. Quando se comparam os valores de expansão para Energia Proctor Normal com os valores para Proctor Intermediário do solo natural, todas as amostras mostraram acréscimos em seus valores. Isto pode ser explicado pelo fato que a expansão é um valor relativo e leva em conta o valor da altura do corpo-de-prova, não levando em conta a energia que foi aplicada para sua compactação, quanto maior a energia que se aplica, mais o corpo-de-prova tende à expansão.

Tabela 9. Resultados dos Ensaio de ISC e Expansão aos 14 dias de cura

Amostra	ISC (%)		Expansão (%)	
	Energia Proctor Normal	Energia Proctor Intermediário	Energia Proctor Normal	Energia Proctor Intermediário
01	2,0	2,0	6,6	7,1
01+3% cal	44,9	59,4	0,1	0,0
02	7,8	9,1	0,6	3,0
02+2% cal	17,4	16,5	0,1	0,4
03	5,8	9,2	1,6	2,5
03+3% cal	42,5	62,8	0,0	0,0

CONINFRA 2009 – CONGRESSO DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (CONINFRA 2009 - TRANSPORTATION INFRASTRUCTURE CONFERENCE)

29 A 31 DE JULHO DE 2009 (July 29th to 31th 2009)

São Paulo – Brasil

Classificação Mini-MCV e Análise da Perda de Massa por Imersão

No gráfico da Figura 6 estão resumidos os resultados da Classificação MCT das três amostras (AM-01, AM-02 e AM-03) com e sem a adição de cal. A adição de cal resultou na passagem da classificação de comportamento Não Laterítico para comportamento Laterítico em todos os casos.

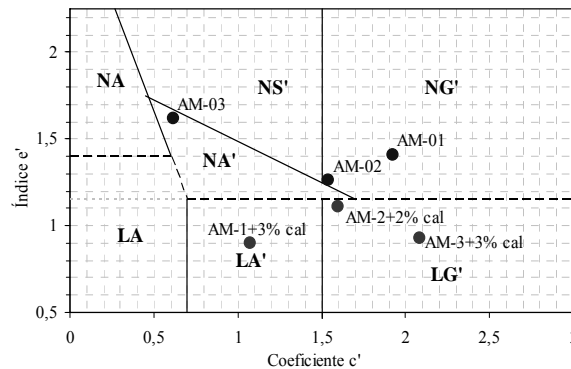


Figura 6. Classificação Geotécnica MCT – Amostras naturais e melhoradas com cal

Valores Modulares das Amostras

O ensaio Triaxial de Cargas Repetidas para foi realizado no laboratório de pavimentação da Universidade Federal de Santa Catarina. O comportamento modular das três amostras de solo natural e melhoradas com cal está apresentado nas Tabelas 10, 11 e 12.

Tabela 10. Valores Modulares para AM-01 e AM-01+3% cal (MPa)

σ_d (MPa)	AM-01		AM-01+3% de cal			
	PN	PI	14 dias de cura		90 dias de cura	
			PN	PI	PN	PI
0,02	261	305	691	708	702	761
0,04	240	297	678	715	668	736
0,05	220	291	678	742	683	766
0,07	207	284	669	761	690	780
0,11	169	255	659	759	686	793
0,14	132	228	655	783	695	805
0,21	84	169	645	798	704	824

Tabela 11. Valores Modulares para AM-02 e AM-02+2% cal (MPa)

σ_d (MPa)	AM-02		AM-02+2% de cal			
	PN	PI	14 dias de cura		90 dias de cura	
			PN	PI	PN	PI
0,02	292	479	469	539	492	584
0,04	277	463	461	542	491	591
0,05	251	468	454	545	496	589
0,07	235	445	453	555	526	586
0,11	180	423	440	559	522	570
0,14	124	409	433	562	510	567
0,21	61	381	410	568	524	556

03-022

**CONINFRA 2009 – CONGRESSO DE INFRAESTRUTURA DE
TRANSPORTES (CONINFRA 2009 - TRANSPORTATION
INFRASTRUCTURE CONFERENCE)**

29 A 31 DE JULHO DE 2009 (July 29th to 31th 2009)

São Paulo – Brasil

Tabela 12. Valores Modulares para AM-03 e AM-03+3% cal (MPa)

σ_d (MPa)	AM-03		AM-03+3% de cal			
			14 dias de cura		90 dias de cura	
	PN	PI	PN	PI	PN	PI
0,02	114	239	426	104	475	679
0,04	80	215	407	199	437	648
0,05	61	186	402	237	472	668
0,07	53	170	406	369	446	675
0,11	42	134	384	455	475	663
0,14	37	111	366	588	422	660
0,21	0	84	331	604	403	640

PN - Energia de Compactação Proctor Normal

PI - Energia de Compactação Proctor Intermediária

A AM-01 apresentou valores modulares altos, não esperados, mais elevados que a AM-02. O fato contraria o ensaio de ISC, para o qual se obtiveram valores mais elevados para esta última. Neste caso, o fato pode estar associado à sucção da mesma e ao ensaio ser realizado na forma não saturada. Os valores modulares da AM-01+3% de cal mostram que o material, quando melhorado com cal, teve seu comportamento melhorado, ou seja, valores modulares tiveram elevação quando comparados com a amostra no estado natural. Estes valores foram similares para ambas energias de compactação (Proctor Normal e Proctor Intermediário). Este incremento foi dado com 14 dias de cura, tanto para amostra compactada na energia Proctor Normal quanto na Intermediário. Aos 90 dias de cura, os valores não apresentaram aumento significativo devido ao baixo teor de cal empregado.

Para energia de compactação Proctor Normal, a AM-02+2% apresentou valores modulares maiores quando comparados aos valores obtidos no ensaio a partir da amostra de solo natural. No entanto, para o ensaio realizado com CPs moldados na energia de compactação Proctor Intermediário, o incremento nos valores modulares foi baixo. Analisando os dados obtidos para AM-02+2% de cal com período de cura de 90 dias, pode-se verificar que os valores de módulos apresentaram pequenos incrementos. Deve-se entender que pequenas adições de cal não são suficientes para gerar ganhos de resistência com o passar do tempo, pois a quantidade de cal presente no material, neste caso na ordem de 2%, não é capaz de manter as reações pozolânicas no período.

A amostra AM-03+3% de cal ensaiada na energia de compactação PI, é o único caso que apresentou não linearidade expressiva, sendo que outros casos podem ser considerados de comportamento quase constante com relação à tensão desvio.

CONCLUSÕES

Os resultados dos ensaios laboratoriais apresentados e analisados, bem como o dimensionamento realizado empregando a análise mecanicista, levaram às seguintes conclusões:

- A amostra AM-01, com cerca de 68% de argila, LL de 102% e IP de 67%, é um solo argiloso de comportamento não-laterítico (NG'), pela classificação HBR é do tipo A-7-5. A amostra AM-02, com cerca de 60% de argila, LL de 82% e IP de 48%, é um solo argiloso de comportamento

CONINFRA 2009 – CONGRESSO DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (CONINFRA 2009 - TRANSPORTATION INFRASTRUCTURE CONFERENCE)

29 A 31 DE JULHO DE 2009 (July 29th to 31th 2009)

São Paulo – Brasil

laterítico (LG'), pela classificação HBR é do tipo A-7-5. E a amostra AM-03, com cerca de 4,42% de argila e 67,63% de silte, LL de 42% e IP de 17%, é um solo na transição siltoso-argiloso de comportamento não-laterítico (NS'-NG'), pela classificação HBR enquadra-se como A-7-6;

- Quanto à dosagem solo-cal pelo método do pH, as três amostras de solo apresentaram elevação no seu pH à cerca de 12 com apenas 2% de cal adicionada. O método do LFP apresentou valores semelhantes aos da dosagem com pH para melhoria das amostras de solo;

- Através dos ensaios de LP realizados com variação dos tempos entre mistura e procedimento de ensaio, foi comprovado que as reações de troca de bases ocorrem imediatamente;

- A dosagem da cal utilizando o método das pastilhas MCT mostrou-se válida e se apresenta como uma metodologia adequada para dosagem de cal para melhoria dos solos tropicais;

- Para amostra AM-01+3% e AM-02+2% de cal, verificou-se que houve alteração significativa nas frações siltosas e argilosas. Para a amostra AM-03+3% de cal, a alteração na percentagem de finos foi menor.

- Em geral houve redução do peso específico aparente seco ($\gamma_{dm\acute{a}x}$) e aumento na umidade ótima ($w_{\acute{o}t}$), após a adição de cal nas amostras. No entanto, em todos os três casos a variação foi pequena.

-A adição de pequenas percentagens ($\leq 3\%$) de cal foi suficiente para inibir a expansão do solo independentemente da energia de compactação aplicada.

- Detectou-se que houve incrementos nos valores de ISC após cura de 14 dias, com a amostra submersa;

- As amostras apresentaram aumentos significativos dos valores de módulos de resiliência após a adição de cal, permitindo o uso em camadas estruturais de pavimentos;

- O ensaio da metodologia de classificação MCT e Perda de Massa por imersão mostrou que a adição de pequenas quantidades de cal nas amostras tornou-as de comportamento laterítico.

- Face aos problemas verificados em toda a malha rodoviária do país, vale a alternativa de buscar a utilização dos materiais lindeiros à rodovia, melhorando-os a fim de fazê-los propícios à estrutura do pavimento. É importante verificar todas as alternativas de materiais, com o intuito de minimizar os impactos ambientais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6459: Solo – Determinação do limite de liquidez.** Rio de Janeiro, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6508: Grãos de Solos que passam na peneira de 4,8mm – Determinação da Massa específica.** Rio de Janeiro, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7180: Solo – Determinação do limite de Plasticidade.** Rio de Janeiro, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181: Solo – Análise Granulométrica.** Rio de Janeiro, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7182: Solo – Ensaio de Compactação.** Rio de Janeiro, 1986.

**CONINFRA 2009 – CONGRESSO DE INFRAESTRUTURA DE
TRANSPORTES (CONINFRA 2009 - TRANSPORTATION
INFRASTRUCTURE CONFERENCE)**

29 A 31 DE JULHO DE 2009 (*July 29th to 31th 2009*)

São Paulo – Brasil

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9895: Solos – Determinação do Índice de Suporte Califórnia.** Rio de Janeiro, 1987.

CORRÊA, J. F.. **Avaliação das Melhorias das Propriedades Físicas e Mecânicas de Solos Originados de Rochas Sedimentares pela Adição de Cal para Fins de Pavimentação.** 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia). PPGECC – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC.

Departamento Nacional de Estradas e Rodagem. **DNER ME 131/94: Solos – Determinação do Módulo de Resiliência.** Rio de Janeiro, 1994.

Departamento Nacional de Estradas e Rodagem. **DNER ME 180/94: Solos Estabilizados com Cinza Volante e Cal Hidratada – Determinação da Resistência à Compressão Simples.** Rio de Janeiro, 1994.

Departamento Nacional de Estradas e Rodagem. **DNER ME 181/94: Solos Estabilizados com Cinza Volante e Cal Hidratada – Determinação da Resistência à tração por Compressão Diametral.** Rio de Janeiro, 1994.

Departamento Nacional de Estradas e Rodagem. **DNER ME 228/94: Solos – Compactação em Equipamento Miniatura.** Rio de Janeiro, 1994.

Departamento Nacional de Estradas e Rodagem. **DNER ME 256/94: Solos Compactados com equipamento miniatura – Determinação da perda de massa por imersão.** Rio de Janeiro, 1994.

Departamento Nacional de Estradas e Rodagem. **DNER ME 258/94: Solos Compactados com equipamento miniatura – Mini-MCV.** Rio de Janeiro, 1994.

Departamento Nacional de Estradas e Rodagem. **DNER CLA 259/96: Classificação de Solos Tropicais para finalidades rodoviárias utilizando corpos-de-prova compactados em equipamento miniatura.** Rio de Janeiro, 1996.

DEINFRA. Departamento Estadual de Infra-Estrutura – Secretaria de Estado da Infra-Estrutura. **Mapa Rodoviário do Estado de Santa Catarina.** Disponível em: <<http://www.deinfra.gov.br>> 2006a. Acesso em 10/09/2006.

DEINFRA. Departamento Estadual de Infra-Estrutura – Secretaria de Estado da Infra-Estrutura. **Projeto de Implantação e Pavimentação – Rodovia SC 422 Trecho Rio Negrinho (BR 280) – Entroncamento Volta Grande e Acesso a Volta Grande.** V 3: Memória Justificativa, 2006b.

IDE, D. M.; PEIXOTO, A. S. P.. **Estudo da Estabilização com Cal de Solo Arenoso e Controle de sua Capacidade de Suporte.** In.: 37ª REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO. Goiânia, GO. 2006. Anais em CD.

INGLES, O. G.; METCALF, J. B.. **Soil Stabilization: Principles and Practice.** Sidney: Butterworths, 1972.

03-022

CONINFRA 2009 – CONGRESSO DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (CONINFRA 2009 -
TRANSPORTATION INFRASTRUCTURE CONFERENCE) - ISSN 1983-3903

29 A 31 DE JULHO DE 2009 (*July 29th to 31th 2009*)

**CONINFRA 2009 – CONGRESSO DE INFRAESTRUTURA DE
TRANSPORTES (CONINFRA 2009 - TRANSPORTATION
INFRASTRUCTURE CONFERENCE)**

29 A 31 DE JULHO DE 2009 (*July 29th to 31th 2009*)

São Paulo – Brasil

LITTLE, D. N.. **Evaluation of Structural Properties of Lime Stabilized Soils and Aggregates.** Volume 1: Summary of Findings. Prepared for The Nacional Lime Association, 1999.

LOVATO, R. S.. **Estudo do Comportamento Mecânico de um Solo Laterítico Estabilizado com Cal, Aplicado à Pavimentação.** 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia). PPGEC - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS.

NOGAMI, J. S.; VILLIBOR, D. F.. **Pavimentação de Baixo Custo com Solos Lateríticos.** São Paulo: Vilibor, 1995.

NÚÑEZ, W. P.. **Estabilização Físico-química de um Solo Residual de Arenito Botucatu, Visando seu Emprego na Pavimentação.** 1991. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS.

QUEIROZ DE CARVALHO, J. B.. **Propriedade e Comportamento de Solos Lateríticos Estabilizados com Cal.** In.: 23^a REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO. Florianópolis, SC. 1988. Anais v1, p. 689-706.

TENSAR CORPORATION. **Technical Note: Chemical and Mechanical Stabilization of Subgrades an Flexible Pavement Sections.** Disponível em: < tensarcorp.com/uploadedFiles/SPECTRA_TTN_BR10.pdf > Publicado em julho de 1998. Acesso em: 12/08/2007.