

AValiação das Propriedades Mecânicas de Misturas de Solo-Cal, em pó e em pasta, para aplicação em camadas nobres de rodovias

Arielton Fonteles Araújo ⁽¹⁾

Suelly Helena de Araújo Barroso ⁽²⁾

Universidade Federal do Ceará/Departamento de Engenharia de Transportes

RESUMO

Este trabalho propõe-se a estudar a melhoria das propriedades tecnológicas de dois solos considerados inadequados ao uso em camadas nobres de rodovias, em função dos resultados obtidos após a adição da cal e a realização dos ensaios de resistência à compressão simples. Foram investigadas duas formas de aplicação do estabilizante aos solos: uma diluída na água de compactação e a outra em pó. As misturas estabilizadas foram ensaiadas com percentagens de 3%, 5% e 7% de cal e foram submetidas, antes da ruptura, aos períodos de cura de 0, 7, 14, 28 e 90 dias. Analisou-se, ainda, o efeito da variação do período entre a mistura e compactação das misturas estabilizadas, adotando-se períodos de espera pré-determinados de 2, 4, 6 e 8 horas. Constatou-se, de modo geral, um incremento de resistência nas misturas estabilizadas com o aumento do tempo de cura e da percentagem de aditivo utilizado.

ABSTRACT

This work proposes to study the improvement of technological properties of two soils considered unsuitable for use in quality layers of soil for construction of highways, based on the results obtained after the addition of lime and testing of resistance to simple compression. We investigated two types of solutions to achieve stabilization of the soil, one a product to be diluted with water then mixed with the soil and compacted, the other to be mixed with the soil in powder-form. The mixtures were tested with stable proportions of 3%, 5% and 7% lime and were left to cure for periods of 0, 7, 14, 28 and 90 days before being tested for strength and broken up in the process. Consideration was also given to the effect of the change in the period between mixing and compaction of the stabilized mixtures, adopting pre-determined waiting periods of 2, 4, 6 and 8 hours. It was found that, in general, an increase of resistance occurred in stabilized mixtures with increased time of curing and with an increased percentage of additive used.

1. INTRODUÇÃO

O Brasil é um país com uma das maiores malhas rodoviárias do mundo. Porém, de acordo com alguns especialistas da área de transportes, apenas uma pequena parcela desta (cerca de 10%) encontra-se pavimentada.

O estado do Ceará não foge a esta realidade. O mesmo apresenta, de acordo com uma pesquisa realizada pela Confederação Nacional dos Transportes – CNT (2007), apenas 17,4% de sua malha rodoviária em condições adequadas de trafegabilidade.

Uma região do estado que é afetada diretamente por essa triste realidade e que apresenta uma carência grande de rodovias adequadas ao transporte diário de pessoas e de produtos é a do agropólo do Baixo Jaguaribe, situado na região leste do estado Ceará, na divisa com o oceano atlântico e o estado do Rio Grande do Norte.

RABÊLO (2006) menciona que a demanda total de pavimentação de rodovias vicinais no território ocupado pelo referido agropólo é de aproximadamente 234,77 km. Grande parte dos produtos agrícolas ali produzidos é transportada utilizando-se rodovias vicinais não pavimentadas que estão em péssimas condições de tráfego.

A racionalização do uso dos materiais locais em pavimentação pode melhorar a qualidade de rolamento das rodovias, resultando em soluções mais econômicas do que as convencionais, que certamente favorecerão o crescimento e desenvolvimento dessa região. Contudo, os solos

naturais que apresentam características tais que permitam o seu uso na construção de bases e sub-bases (camadas nobres) rodoviárias, estabilizadas granulometricamente sem mistura e que atendam às especificações vigentes, encontram-se cada vez mais escassos.

Dessa forma, surge como alternativa para solucionar este problema a utilização de solos finos locais. Porém, muitos destes solos não são aceitos pelas especificações tradicionais, sendo necessária a utilização de técnicas de estabilização que confirmem a eles as características necessárias ao projeto de pavimentação.

Uma das técnicas mais antigas utilizadas pelo homem para obtenção da estabilização ou melhoria de solos instáveis é a da adição da cal. A adição deste estabilizante a um material natural pode resultar na melhoria de algumas de suas propriedades de interesse à pavimentação, possibilitando uma alternativa a mais para a construção de rodovias.

Com o objetivo de tentar viabilizar economicamente os investimentos em obras de pavimentação de rodovias de baixo volume de tráfego no Estado do Ceará, realizou-se o estudo da técnica de solo-cal para dois solos que ocorrem na Região do Baixo Jaguaribe/CE, analisando-se diferentes processos de mistura do estabilizante ao solo: cal em pó e cal em pasta.

2. OBJETIVOS

Estudar a melhoria das propriedades tecnológicas de dois solos considerados inadequados ao uso em camadas nobres de rodovias, em função dos resultados obtidos após a adição da cal e a realização dos ensaios de resistência à compressão simples.

3. MATERIAIS

Para a realização dos ensaios laboratoriais foram selecionadas e coletadas duas amostras de solos finos situadas na região do agropólo do Baixo Jaguaribe, no estado do Ceará. A primeira amostra, identificada por Am-A, apresentou 45,4% de sua composição passando na peneira de nº 200 (0,075 mm) e a segunda, identificada por Am-B, apresentou 44,09% de sua composição passando por esta mesma peneira. De acordo com a classificação do Transportation Research Board - TRB (AASHTO) a amostra Am-A foi classificada como sendo um solo do tipo A-6 e a amostra Am-B um solo do tipo A-4. Pedologicamente a amostra Am-A foi caracterizada como sendo um planossolo háptico e a amostra Am-B um neossolo lítólico.

Já a cal utilizada no estudo foi a do tipo comercial CH-I. A Tabela 1 apresenta a composição química dessa cal.

Tabela 1: Composição Química da Cal Hidratada CHI.

COMPOSIÇÃO QUÍMICA - CAL HIDRATADA CH-I					
PPC*	Ca(OH) ₂	MgO	RI* (Insolúvel em HCL)	SiO ₂	R ₂ O ₃
23,0 % - 25,0 %	92,5 % - 98,5 %	3,5 % Max	0,5 % Max	0,3 % Max	1,5 % Max

* PPC – Perda Por Calcinação; *RI – Resíduo Insolúvel

4. MÉTODOS

4.1. Misturas

Com relação às técnicas de estabilização utilizadas, cal em pó e cal em pasta, pode-se dizer que a diferença durante a realização dos ensaios encontra-se na forma em que o estabilizante é

adicionado ao solo. No método tradicionalmente utilizado, usando-se cal em pó, adiciona-se inicialmente o aditivo ao solo e, em seguida, é feita a mistura e homogeneização da amostra para, posteriormente, ser adicionada a água de compactação na mistura.

Já no método da cal em pasta (Figura 1), o estabilizante é adicionado ao solo após este ser diluído na água de compactação para, posteriormente, a amostra ser misturada, homogeneizada e compactada. Esse método, citado por Angelim (2005), aparentemente, mostra ser menos agressivo ao ambiente, uma vez que o aditivo reage inicialmente com a água, evitando assim sua dispersão durante a aplicação da técnica, além de se evitar a formação de pó.

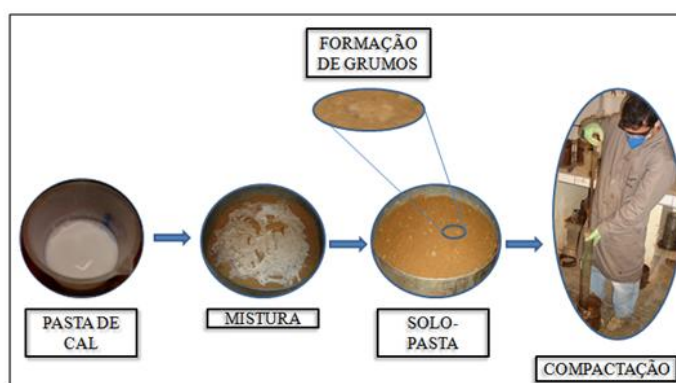


Figura 1: Método de ensaio da cal em pasta.

4.2. Ensaios Preliminares

Inicialmente, foram realizados os ensaios de caracterização, compactação e Índice de Suporte Califórnia (ISC) para as amostras de solos naturais (Am-A e Am-B), a partir da utilização das normas do antigo DNER (atual DNIT) : ME 122/94, ME 82/94, ME 162/94 e ME 049/94.

Em seguida, foram realizados os mesmos ensaios para as amostras de solos estabilizados nos teores de 3, 5 e 7% de cal em relação ao peso seco de solo, para ambas as técnicas investigadas (cal em pó e cal em pasta) e para ambos os solos analisados (Am-A e Am-B). Ressalta-se que para os ensaios de compactação e ISC, realizados para todas as amostras analisadas na pesquisa, foi utilizada a energia de compactação Intermediária.

4.3. Dosagem

O método de dosagem utilizado nesta pesquisa para determinação do teor ótimo da cal foi o proposto por THOMPSON (1966) e adotado por NUNEZ (1991) e LOVATO (2004). Este método considera como um solo reativo à cal aquele que apresenta um incremento de resistência à compressão simples de pelo menos 345 kN/m² (0,345 MPa) após 28 dias de cura (a 22,8°C) e uma imersão prévia de 24 horas em água antes da ruptura. Foram ensaiadas amostras de solo natural (Am-A e Am-B) e amostras de solo tratadas pela cal nos teores de 3%, 5%, 7% e 9%, empregando-se processos de misturas diferentes (cal em pó e cal em pasta).

4.4. Resistência à Compressão Simples

Neste trabalho à resistência à compressão simples, das amostras de solos naturais e das misturas de solo-cal, foi determinada conforme o regulamentado pela norma da ASTM D 5102/96. Ressalta-se que a utilização da norma americana para este ensaio, deu-se pelo fato

de não se ter encontrado uma metodologia nacional para a obtenção do parâmetro em questão para misturas de solos estabilizados quimicamente pela cal. Na moldagem dos corpos-de-prova foi utilizado um molde cilíndrico tripartido, com 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura, obedecendo-se a relação de 2:1.

A moldagem foi realizada manualmente, em três camadas, na energia intermediária sendo aplicados 33 golpes por camada. Depois de compactados, os corpos-de-prova foram retirados do molde cilíndrico, pesados e medidos com uma precisão de 0,01 gf e 0,01 cm, respectivamente. Foram aceitos os corpos-de-prova com $10 \pm 0,2$ cm de altura e $5,0 \pm 0,2$ cm de diâmetro. Em seguida, as amostras compactadas foram enroladas por papel filme, identificadas e deixadas em cura, à temperatura ambiente, por 0, 7, 14, 28 e 90 dias. Após o período de cura os corpos-de-prova foram submetidos a uma imersão em água potável por um período de 24 horas para, posteriormente, serem ensaiados.

As amostras foram moldadas em triplicata e o valor da resistência à compressão simples de cada mistura, para cada teor de cal especificado e para cada período de cura analisado, foi determinado através do valor da média aritmética dos 3 resultados obtidos, foram admitidos os valores de tensão de ruptura de $\pm 10\%$ da média. No caso em que um dos valores se apresentasse fora dessa faixa, determinava-se novamente a média dos dois restantes.

Foram analisadas misturas de solos naturais e estabilizados quimicamente pela cal, em teores pré-determinados de 3%, 5% e 7% da cal em relação ao peso seco de solo. Essas misturas foram moldadas com a utilização da cal em pó e cal em pasta. Essas amostras foram ensaiadas utilizando-se um modo de deformação controlada, com velocidade de 1,25 mm/min.

4.5. Resistência à Compressão Simples - Ensaios Não-Convencionais

Nestes ensaios, verificou-se a influência do tempo de espera entre a mistura dos materiais e a compactação das amostras analisadas. Foram pré-determinados alguns períodos de espera, após a mistura/homogeneização das amostras, antes da realização do ensaio de RCS. Os períodos de espera adotados foram de 2, 4, 6 e 8 horas. As misturas de solo-cal foram submetidas a um período de cura de 28 dias e foram modificadas/estabilizadas com a adição de apenas 3% de estabilizante, sendo submetidas a uma imersão prévia de 24 horas, em água potável, antes da realização do ensaio.

5. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

5.1. Dosagem

Foram ensaiadas amostras de solo natural (Am-A e Am-B) e amostras de solo tratadas pela cal nos teores de 3%, 5%, 7% e 9%, empregando-se processos de misturas diferentes (cal em pó e cal em pasta). Os resultados obtidos para as amostras de solo-cal encontram-se apresentados nas Figuras 2 e 3.

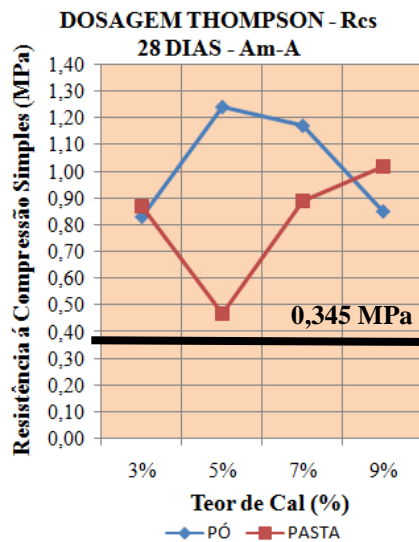


Figura 2: Dosagem (Solo Am-A).

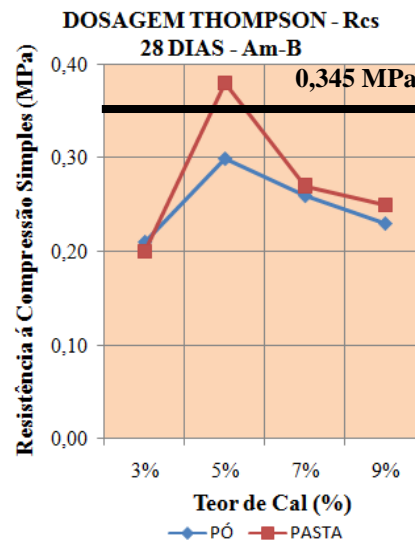


Figura 3: Dosagem (Solo Am-B).

A amostra de solo natural Am-A apresentou um valor de resistência à compressão simples (RCS) de 226,58 kN/m² sem imersão prévia e não resistiu à imersão em água, de 24 horas, antes da realização do ensaio. Essa mesma amostra, após ser tratada pela cal, atendeu o critério de THOMPSON (1966) com a adição de apenas 3% do estabilizante para ambas as técnicas estudadas (cal em pó e cal em pasta), apresentando um ganho de resistência superior a 345 kN/m² aos 28 dias de cura. Dessa forma, de acordo com este método o teor ótimo de cal para estabilização da amostra de solo Am-A é de 3%.

Já a amostra de solo natural Am-B apresentou um valor RCS de 164,26 kN/m² sem imersão prévia e também não resistiu à imersão em água, de 24 horas, antes da realização do ensaio. Para essa amostra de solo, o teor ótimo de cal obtido através do método de dosagem de THOMPSON (1966) foi de 5%, quando utilizada a forma de aplicação da cal em pasta. Já para as amostras ensaiadas com a cal em pó, não foi encontrado nenhum valor que apresentasse um acréscimo de RCS superior a 345 kN/m² (após 28 dias de cura) quando comparado com o obtido para o solo natural (Am-B).

No entanto, mesmo se verificando que o critério de dosagem proposto por THOMPSON (1966) não foi atendido para as misturas de solo Am-B com cal (em pó), percebe-se que essa técnica melhorou as propriedades mecânicas do solo analisado, proporcionando-lhe um aumento de 296,03 kN/m² (após o período de cura e de imersão mencionados anteriormente). Verificou-se que a amostra de solo natural não apresentou nenhuma resistência depois de ser imersa em água por 24 horas, sendo completamente desintegrada.

Com relação ao efeito da forma de aplicação da cal, em pó e em pasta, nos resultados de RCS obtidos verifica-se, de um modo geral, uma melhor aplicabilidade da técnica cal em pó na estabilização da amostra de solo Am-A e uma melhor aplicabilidade da técnica cal em pasta na estabilização da amostra de solo Am-B. Observa-se ainda que as maiores discrepâncias ocorridas nos valores de resistência, em função da forma de aplicação do estabilizante, foram verificadas para as misturas de solo com 5% de cal. Desconhece-se a razão da discrepância nos valores de RCS dessas misturas, não se podendo estabelecer parâmetros mais eficazes do

comportamento dessas amostras em virtude da pequena quantidade de corpos de prova ensaiados.

5.2. Ensaios de Caracterização, Compactação e Índice de Suporte Califórnia (ISC)

5.2.1. Solos Naturais – Limites de Consistência, Compactação, ISC

Os resultados dos limites de consistência, de umidade ótima, de massa específica aparente seca máxima, de capacidade de suporte e expansão encontrados para as amostras de solos Am-A e Am-B encontram-se expostos na Tabela 2.

Tabela 2: Resultados dos ensaios de limites de liquidez (LL), limite de plasticidade (LP), de índice de suporte Califórnia e de compactação das amostras de solo Am-A e Am-B.

AMOSTRA	LL (%)	LP (%)	IP (%)	CBR (%)	EXPANSÃO (%)	w (%)	$\sigma_{sm\acute{a}x}$ (g/cm ³)
Am-A	29,00	18,00	11,00	4,00	0,21	14,00	1,93
AMOSTRA	LL (%)	LP (%)	IP (%)	CBR (%)	EXPANSÃO (%)	w (%)	$\sigma_{sm\acute{a}x}$ (g/cm ³)
Am-B	22,00	15,41	6,59	17,62	0,03	10,50	1,98

Analisando-se os valores expostos na Tabela 3, percebe-se que a amostra de solo Am-A apresentou valores de LL e IP, respectivamente, superiores a 25% e 6%, o que, de acordo com as especificações do Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes – DNIT (2006), impossibilitaria o uso desse material em camadas de base e sub-base de pavimentos rodoviários. Com relação à capacidade de suporte deste mesmo material, verifica-se que o valor de CBR = 4% também inviabiliza o uso da amostra de solo Am-A nas camadas referidas anteriormente. Já o resultado obtido para a expansão do material apresentou-se inferior a 0,5%.

Já os valores de LL, IP, CBR e expansão, encontrados para a amostra de solo Am-B (expostos na Tabela 2), apresentaram melhores resultados que os encontrados para a amostra de solo Am-A, quando considerados os valores especificados pelo DNIT (2006). No entanto, essa amostra também não se enquadrou como um solo apto a ser usado em camadas de bases e sub-base de pavimentos. Dessa forma, as amostras A e B devem passar por um processo de estabilização antes de serem empregadas em obras rodoviárias.

5.2.2. Solos Estabilizados – Caracterização, Compactação e ISC

Os valores do índice de plasticidade (IP) encontrados para as amostras de solo Am-A estabilizadas (com 3, 5 e 7%) apresentaram em sua totalidade uma condição de NP (não plástico) e valores de limite de liquidez de NL (não líquido). Já os resultados encontrados para as misturas estabilizadas com o solo Am-B apresentaram para todas suas amostras (com 3, 5 e 7% de cal) valores de IP inferiores a 6% e pequenos aumentos nos valores de LL.

Acredita-se que o aumento nos valores dos LL encontrados para as misturas do solo Am-B com cal deve-se, dentre outros fatores, à baixa atividade das argilas constituintes desse material e à composição dos cátions trocáveis presentes no mesmo. Além disso, ressalta-se que este solo é pouco expansivo. Pode-se concluir, de um modo geral, que a adição da cal aos solos estudados reduziu, ou anulou, os IPs das misturas estabilizadas, melhorando a trabalhabilidade destas quando comparadas as amostras dos solos naturais.

Já os valores obtidos após a realização dos ensaios de compactação para as misturas de solos Am-A e Am-B estabilizadas encontram-se na Tabelas 3.

Tabela 3: Resultados da compactação na energia intermediária para amostra Am-A e Am-B.

AMOSTRA Am-A							
Resultados	Natural	Pó 3%	Pó 5%	Pó 7%	Pasta 3%	Pasta 5%	Pasta 7%
w (%)	14,00	15,52	15,60	16,40	15,40	15,80	16,80
ρ (g/cm ³)	1,93	1,92	1,86	1,85	1,85	1,84	1,81
AMOSTRA Am-B							
Resultados	Natural	Pó 3%	Pó 5%	Pó 7%	Pasta 3%	Pasta 5%	Pasta 7%
w (%)	10,50	13,40	13,60	14,00	13,30	13,60	13,80
ρ (g/cm ³)	1,98	1,87	1,83	1,82	1,94	1,89	1,87

Analisando-se os resultados obtidos para as amostras de solo natural e de solo-cal, para ambos os solos ensaiados (Am-A e Am-B) e técnicas investigadas (pó e pasta), percebe-se, de forma geral, que os valores encontrados da massa específica seca máxima para as amostras de solo tratado com cal foram inferiores ao da massa específica seca máxima obtida com o solo natural (sem estabilizante). Enquanto que os valores da umidade ótima das amostras de solo-cal cresceram em relação à umidade ótima da amostra de solo natural, à medida que o teor da cal adicionado na mistura foi aumentado.

Com relação à capacidade de suporte das misturas de solo-cal foram obtidos os valores de CBR especificados nas Figuras 4 (Am-A) e 5 (Am-B).

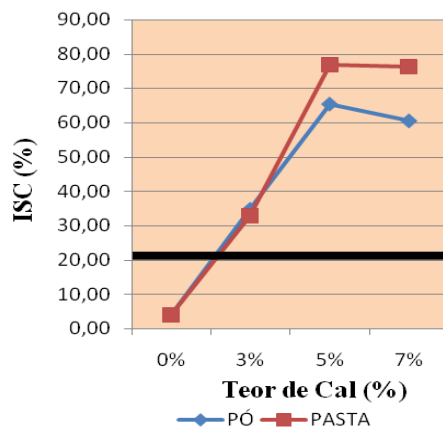


Figura 4: Evolução do ISC com o teor da cal para a amostra Am-A.

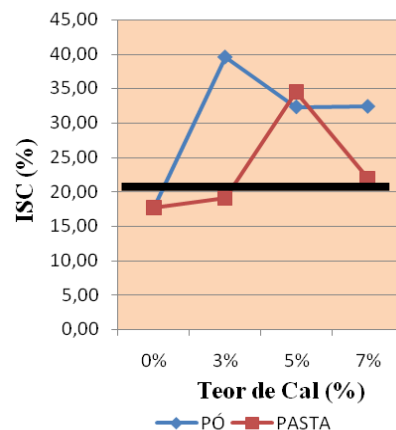


Figura 5: Evolução do ISC com o teor da cal para a amostra Am-B.

Pode-se verificar, após a análise dos dados contidos nas Figuras 4 e 5, que as duas amostras de solo analisadas apresentaram, de um modo geral, uma melhoria em suas capacidades de suporte após serem tratadas pela cal. A amostra Am-A, no entanto, apresentou melhores resultados que os obtidos para a amostra Am-B após o processo de estabilização, indicando ser um pouco mais reativa que a segunda amostra.

5.3. Resistência à Compressão Simples – Ensaio Convencionais

Com relação aos resultados de RCS encontrados para as misturas de solo-cal, verificou-se a influência de alguns fatores preponderantes para a melhoria da resistência mecânica dos solos analisados, tais como: porcentagem da cal adicionada à amostra de solo, período de cura aos quais os corpos de prova foram submetidos, tipo de técnica de estabilização aplicada (cal em pó e cal em pasta) e tipo de solo utilizado. A influência de cada um desses fatores é abordada nos itens 5.3.1, 5.3.2 e 5.3.4.

5.3.1. Amostra Am-A

A Figura 6 apresenta a evolução dos valores de RCS, em função do teor de estabilizante e do tempo de cura, para as misturas de solo Am-A tratadas com a cal, em pó e em pasta. As linhas vermelhas dessa figura indicam os valores de RCS mínimos, citados por LITTLE (1995), exigidos pelo Illinois Highway Department para o uso de misturas de solo-cal em camadas de subbase (0,689 MPa) e base (1,034 MPa) de pavimentos rodoviários.

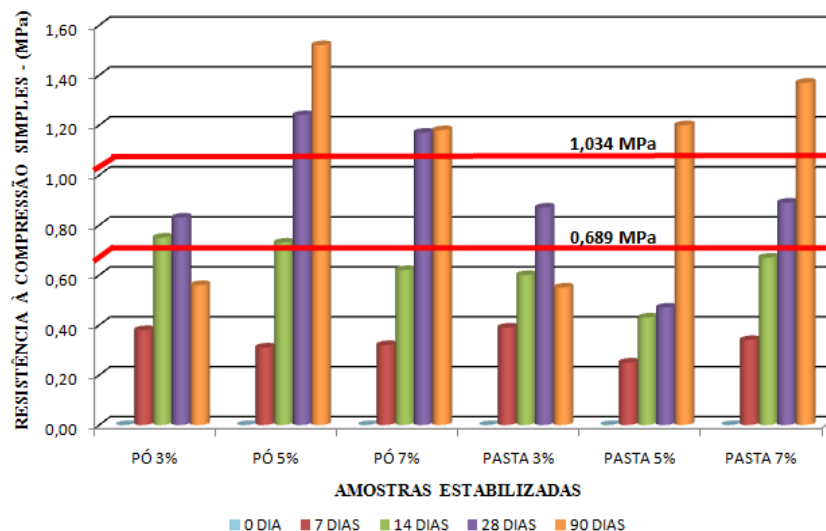


Figura 6: Evolução dos valores da RCS para as misturas de solo Am-A mais cal em função do teor de estabilizante e do período de cura.

Com base nos resultados de RCS apresentados na Figura 6, observa-se que as amostras de solo Am-A tratadas com a cal, em pó e em pasta, apresentaram, de um modo geral, ganhos de resistência com o aumento dos períodos de cura. Contudo, verificou-se que as misturas de solo Am-A + 3% de cal (em pó e em pasta) alcançaram sua resistência máxima aos 28 dias de cura (0,83 MPa e 0,87 MPa), apresentando uma redução nesses valores para um tempo de cura de 90 dias. O comportamento apresentado por essas misturas permitiu supor que as reações pozolânicas foram cessadas para as mesmas entre o período de 28 a 90 dias. Um dos motivos para a ocorrência desse fato seria o de não haver mais cal disponível para combinar-se a sílica e a alumina dos argilominerais presentes no solo.

Analisando a Figura 6 percebeu-se, ainda, que para menores períodos de cura (0 – 14 dias), a adição da cal em pó na percentagem de 3% apresentou valores de RCS mais elevados do que as misturas com 5% e 7%. Contudo, para períodos de cura mais elevados (28 – 90 dias) percebeu-se a ocorrência expressiva das reações pozolânicas nas misturas mais ricas (com 5% e 7% de cal). Esse fato ocorreu, possivelmente, devido as misturas com 3% de cal possuírem uma quantidade de estabilizante suficiente apenas para satisfazer a capacidade de troca catiônica (CTC), responsável pela melhoria na trabalhabilidade da amostra e pelo ganho inicial de resistência. Enquanto isso, as misturas com 5% e 7% de cal, além de apresentarem cal suficiente para satisfazerem a CTC, apresentaram uma quantidade excedente que proporcionou a ocorrência das reações cimentantes, responsáveis pelo aumento da resistência do solo com o passar do tempo. Fato semelhante foi observado por NÚÑEZ (1991).

Já para as misturas de solo Am-A tratadas com cal em pasta verificou-se que a adição de 3% do estabilizante apresentou valores de RCS mais elevados do que os obtidos para as misturas

ensaiadas com 5% e 7% de cal, submetidas a períodos de cura menores (0 – 7 dias), como observado para as amostras ensaiadas com cal em pó. Para períodos de cura maiores (14 – 90 dias) observou-se que a mistura ensaiada com 7% de cal em pasta apresentou os maiores valores de RCS.

Com relação aos valores de RCS mínimos exigidos pelo Illinois Highway Department, para o uso de misturas de solo-cal em camadas de base e subbase de rodovias, pode-se verificar, através da Figura 5, que todas as amostras estabilizadas apresentaram valores de RCS superiores a 0,689 MPa em pelo menos um dos períodos de cura analisados. Além disso, observa-se que as misturas tratadas por 5% e 7% de cal, em pó e em pasta, apresentaram valores de RCS superiores a 1,034 MPa, para períodos de cura específicos.

Com relação aos valores mínimos de RCS a serem adotados, vale ressaltar o trabalho de LOIOLA e BARROSO (2007), onde foi discutido o caso de uma rodovia cearense (conhecida localmente por rodovia do Melão - CE 377), executada com uma camada de base em solo-cal, que apresenta-se até hoje em boas condições estruturais depois de decorridos 7 anos de sua execução. Esse fato, segundo os autores ocorreu devido o bom desempenho apresentado pela camada de base estabilizada. A mistura utilizada nessa camada apresentou um valor de RCS, em laboratório, de aproximadamente 0,7 MPa (após 60 dias de cura e uma imersão em água de 4 horas antes da ruptura).

Dessa forma, recomenda-se o uso de 5% de cal para ser adicionado a amostra de solo Am-A. Este teor se justifica para as duas formas de aplicação da cal, uma vez que as misturas atingiram valores superiores a 0,7 MPa. Acredita-se que esse valor seja recomendável para ser aceito como resistência mínima em projetos de rodovias de baixo volume de tráfego. Observa-se que no trabalho de LOYOLA e BARROSO (2007) há comprovações práticas para aceitação desse resultado.

5.3.2. Amostra Am-B

A Figura 7 apresenta a evolução dos valores de RCS, em função do teor de estabilizante e do tempo de cura, para as misturas de solo Am-B tratadas com a cal, em pó e em pasta.

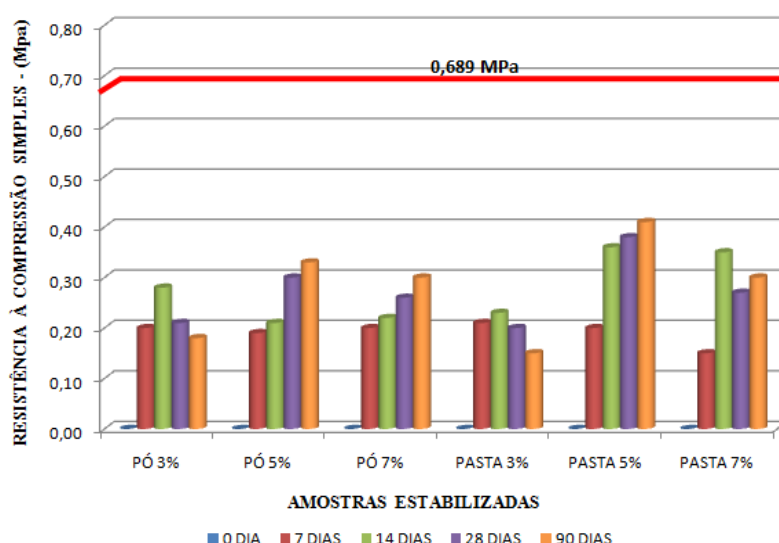


Figura 7: Evolução dos valores da RCS para as misturas de solo Am-B mais cal em função do teor de estabilizante e do período de cura.

Com base nos resultados apresentados na Figura 7, verifica-se que as misturas de solo Am-B mais cal em pó apresentaram maiores incrementos de resistência em seus valores quando ensaiadas com teores mais elevados de cal (5% e 7%), em função do aumento dos períodos de cura aos quais estas amostras foram submetidas antes da ruptura. Já a mistura de solo Am-B mais cal em pó (3%) apresentou uma redução no valor de RCS para períodos de cura mais longos (28 – 90 dias), como verificado para a mistura de solo Am-A mais cal em pó (3%). Porém, essa mistura, diferentemente da outra, alcançou sua resistência máxima aos 14 dias (0,28 MPa).

Acredita-se que a evolução dos valores de RCS para essas amostras, assim como observado para as misturas de solo Am-A mais cal, ocorreu dessa maneira, possivelmente, devido às misturas com 3% de cal possuírem uma quantidade de estabilizante suficiente apenas para satisfazer a capacidade de troca catiônica (CTC) do solo. Enquanto isso, as misturas com 5% e 7% de cal (pó) apresentaram estabilizante suficiente para satisfazerem tanto a CTC como a ocorrência das reações pozolânicas.

Com relação aos resultados de RCS encontrados para as amostras de solo Am-B mais cal em pasta, percebeu-se que estas apresentaram incrementos de resistência em seus valores, em função do aumento do tempo de cura, para as misturas ensaiadas com 5% de estabilizante. Porém, para as amostras ensaiadas com 3% e 7% de cal verificou-se uma redução nos valores de RCS após 14 dias de cura.

Os resultados de RCS encontrados para as misturas de solo Am-B mais cal em pasta (7%), apresentaram um comportamento diferente dos obtidos para as misturas de solo Am-B mais cal em pó (7%). Não foi suposta nenhuma explicação para ocorrência desse fato. Constatou-se, porém, que as reações pozolânicas foram menos expressivas, entre os períodos de cura de 14 a 28 dias, para amostra de solo Am-B mais 7% de cal (em pasta).

Observou-se ainda que as misturas estabilizadas com maiores quantidades de cal (5% e 7%) exigiram maiores períodos de cura para o desenvolvimento das reações cimentantes nas amostras e, conseqüentemente, apresentaram ganhos de resistência mais expressivos para períodos mais longos (28 – 90 dias). Para as duas formas de aplicação da cal investigadas, observou-se que a inserção de 5% do estabilizante proporcionou os maiores incrementos de resistência as amostras naturais.

Com relação aos valores de RCS mínimos exigidos pelo Illinois Highway Department, para o uso de misturas de solo-cal em camadas de base e subbase de rodovias, pode-se verificar, através da Figura 6, que nenhuma das amostras de solo Am-B tratada pela cal atingiu o valor de 0,689 MPa. O acréscimo de RCS para essa amostra não se mostrou muito satisfatório. Acredita-se que esse solo esteja mais apto a ser estabilizado por outro processo químico, como o da inserção de betume. GONDIM (2008) estabilizou esse mesmo material com 5% de emulsão RL-1C obtendo valores de RCS superiores a 1,5 MPa (para cura seca).

5.4. Resistência à Compressão Simples – Ensaio Não-Convencionais

As Figuras 8 e 9, apresentam a evolução dos valores de RCS das misturas de solo-cal, em função do tempo de espera entre a mistura e compactação das misturas estabilizadas dos solos Am-A e Am-B, respectivamente. Os resultados encontrados para as misturas de solo-cal, ensaiadas com a amostra de solo Am-A (Figura 8), apresentaram valores mais elevados de RCS com a adoção de um tempo de espera, entre a mistura e a compactação, de 1 hora.

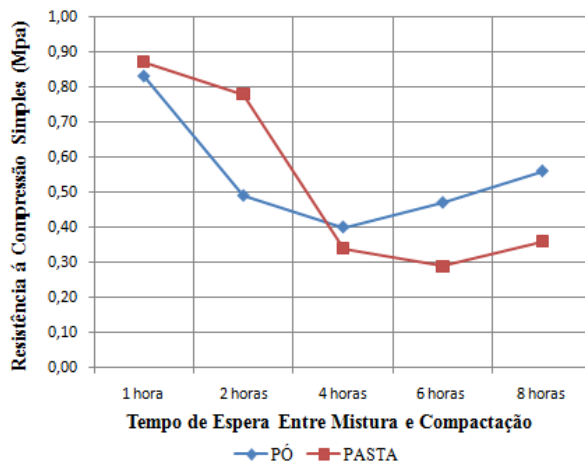


Figura 8: Ensaio não convencional: Am-A.

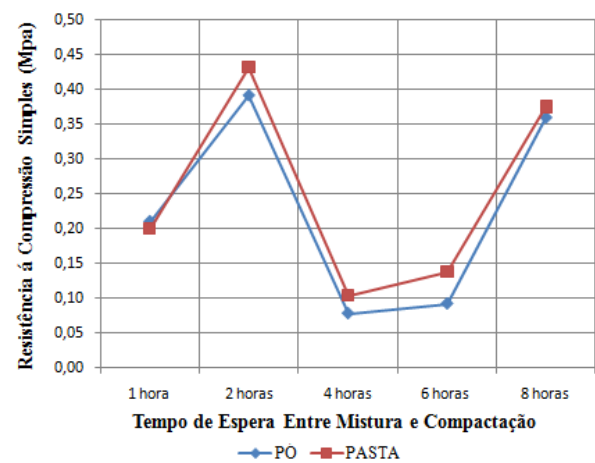


Figura 9: Ensaio não convencional: Am-B.

Observou-se que a demora no tempo de espera proporcionou uma acentuada redução nos valores de RCS. Contudo, percebeu-se que ocorreu um ganho na resistência das misturas (19,15% para a amostra com cal em pó e 24,14% para a amostra com cal em pasta) quando o tempo de espera até a compactação aumentou de 6 para 8 horas. Fato inesperado e apresentou um comportamento ímpar, quando relacionados aos outros mencionados na literatura.

Já os resultados encontrados para as misturas de solo Am-B mais cal (Figura 9), apresentaram um maior incremento no valor de RCS após um período de espera, até a compactação, de 2 horas, sendo similar aos resultados encontrados por LOVATO (2004). Esta amostra de solo, assim como a outra analisada, também apresentou um ganho na resistência das misturas de solo-cal quando o tempo de espera aumentou de 6 para 8 horas. Assim como mencionado para o solo Am-A, não se chegou a uma explicação cabível para o aumento dessa resistência.

Com relação a forma de aplicação do estabilizante percebeu-se, de um modo geral, que as misturas modificadas/estabilizadas com a cal em pasta apresentaram resultados de RCS superiores aos encontrados para as misturas modificadas/estabilizadas com a cal em pó. Contudo, os resultados obtidos para as duas técnicas foram bem parecidos. Já com relação ao tipo de solo tratado, observou-se, assim como nos ensaios convencionais, que os valores de RCS foram bem superiores para as misturas de solo Am-A estabilizadas.

Por fim, vale ressaltar a importância da análise realizada nesse subitem, uma vez que esta aponta a demora mínima, entre a mistura e compactação, para cada amostra investigada, necessária para se evitar perdas de resistência desnecessárias.

6. CONCLUSÕES

- A cal exerceu influência de maneira imediata na resistência dos solos, reduzindo ou anulando a plasticidade destes e melhorando a trabalhabilidade dos mesmos;
- A adição da cal aumentou os valores de umidade ótima das misturas estabilizadas e reduziu os valores de massa específica aparente seca das mesmas;
- A resistência das amostras estabilizadas aumentam, de um modo geral, para períodos de cura mais longos e para maiores teores de cal. Porém, foram verificados padrões distintos de resistência para os solos estudados. O solo Am-A apresentou maiores incrementos de resistência que o solo Am-B, após a estabilização com a cal;

- À luz dos resultados de RCS, pôde-se constatar que a aplicação da cal pode ser utilizada satisfatoriamente na estabilização do solo designado por Am-A. Enquanto que para a amostra de solo Am-B não foram encontrados incrementos de resistência tais que pudessem classificar este solo como apto a estabilização com a cal, para o uso em camadas nobres de rodovias.
- As duas formas de aplicação da cal proporcionaram resultados bem parecidos, constatando-se, porém, uma melhor aplicabilidade da forma convencional (cal em pó) para solo Am-A e do método proposto (cal em pasta) para a amostra de solo Am-B;

Agradecimentos

O autor agradece a CAPES pela bolsa de pós-graduação concedida, ao Laboratório de Mecânica dos Pavimentos (LMP/DET/UFC) pelo apoio operacional concedido, bem como à FINEP/CTPETRO e à Petrobrás pelo apoio financeiro aportado na REDE DE ASFALTO N/NE, Projeto Cooperativo 03 – Avaliação do Uso dos Ligantes Betuminosos e Rejeitos Ambientais para Estabilização de Bases e Sub-Bases de Pavimentos Asfálticos..

REFERÊNCIAS

- American Society For Testing And Materials (1966). *ASTM D 5102: Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Compacted Soil-Lime /mixtures*. Philadelphia.
- Angelim, R. R. (2005) *Influência do Procedimento de Misturas da Cal Hidratada ao Solo no Comportamento do Solo Estabilizado para Fins de Pavimentação Rodoviária*. In: Simpósio Sobre Solos Tropicais e Processos Erosivos no Centro-Oeste, 2. 2005, Goiânia. Anais, Goiânia, UFG, p 195-200.
- Confederação Nacional de Transporte (2007). *Relatório Anual dos Transportes*. Net, Set. 2007. Disponível em: www.cnt.org.br. Acesso em: 28 set. 2007.
- Dner (1994) ME 049/94 – Solos – *Determinação do Índice de Suporte Califórnia Utilizando Amostras Não Trabalhadas*. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Brasília, DF.
- Dner (1994) ME 082/94 – Solos – *Determinação do Limite de Plasticidade*. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Brasília, DF.
- Dner (1994) ME 122/94 – Solos – *Determinação do Limite de Liquidez – Método de Referência e Método Expediente*. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Brasília, DF.
- Dner (1994) ME 162/94 – Solos – *Compactação Utilizando Amostras Trabalhadas*. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Brasília, DF.
- Dnit (2006). *Manual de Pavimentação*. Departamento Nacional de Infra-estrutura de Transportes. Publicação IPR 719, 3 ed. Rio de Janeiro, RJ. 278 p.
- Gondim, L. M. (2008) *Estudo Experimental de Misturas Solo-Emulsão Aplicado às Rodovias do Agropólo do Baixo Jaguaribe/Estado do Ceará*. Dissertação de Mestrado, Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, 213 fl.
- Little, D. N. (1995). *Stabilization of Pavement Subgrades and Base Courses with Lime*, Published by Kendall/Hunt Publishing Company.
- Loiola, P. R. R.; S. H. A., BARROSO (2007) *Aplicação da Técnica de Solo Cal na Construção da Rodovia do Melão no Estado do Ceará*. Anais da 37ª Reunião Anual de Pavimentação. Goiânia, GO.
- Lovato, R. S. (2004) *Estudo do Comportamento Mecânico de um Solo Laterítico Estabilizado com Cal, Aplicado à Pavimentação*. Dissertação – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.
- Núñez, W. P. (1991) *Estabilização Físico-Química de um Solo Residual de Arenito Botucatu, Visando Seu Emprego na Pavimentação*. Dissertação – CPGE/UFRGS, Porto Alegre. 150p.
- Rabêlo, A. N. (2006). *Contribuição ao Estudo da Imprimação Betuminosa das Rodovias de Baixo Volume de Tráfego do Estado do Ceará*. Dissertação de Mestrado, Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, 186 fl.
- Thompson, M. R. (1966) *Lime Reactivity of Illinois Soils*. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*. ASCE, v.92, p.67-92.

(1) Aluno do Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes – PETRAN. Universidade Federal do Ceará.
e-mail: arielton@det.ufc.br

(2) Profa. Adjunta do Departamento de Engenharia de Transportes - Universidade Federal do Ceará, Campus do Pici s/n. Fone: (85) 40089488. Fortaleza, Ce – Brasil - e-mail: suelly@