ANÁLISE MECÂNICA DE UM SOLO ARENO-ARGILOSO ESTABILIZADO COM CAL PARA FINS DE PAVIMENTAÇÃO

VIVIANE DE ARAÚJO OLIVEIRA, MAYARA DA SILVA LIMA,
TERESA RAQUEL LIMA FARIAS

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE)
<viviane87_@hotmail.com>, <myasl16@yahoo.com.br>, <raquelfarias@yahoo.com.br>

DOI: 10.21439/conexoes.v13i3.1274

Resumo. Identifica-se no Estado do Ceará, dificuldade de se encontrar solos que satisfaçam as condições impostas pelas especificações tradicionais para a construção de pavimentos. Devido a este fato, torna-se necessário, por vezes, recorrer a alternativas, como a estabilização desses materiais. Visando a economia dos custos no transporte de materiais até o local de execução da obra e a obtenção de materiais que atendam às especificações de projeto, este artigo tem por objetivo analisar a viabilidade técnica de um solo com características argilosas por meio da estabilização química com a adição da cal em pó. O estudo foi sistematizado em duas etapas: a primeira abrangeu ensaios de caracterização e a segunda consistiu na determinação de Índice de Suporte Califórnia, Resistência à Compressão Simples e aplicação do método de dosagem proposto por Thompson (1966). Os resultados mostraram que com 3% de cal em pó, o solo tornou-se reativo, bem como manifestou melhorias no que diz respeito às suas propriedades físicas. Entretanto, melhor resultado foi obtido para a mistura solo-cal com teor de 5%. Recomenda-se, então, para o tipo de solo analisado, o uso de 5% desse estabilizante. Esse teor justifica-se porque apresentou melhores resultados de resistência à compressão, atingiu valores de resistência superiores aos mínimos exigidos em projetos de pavimentos. De maneira abrangente, as misturas de solo-cal apresentaram comportamento favorável para a execução de camadas de base e sub-base de pavimentos, destacando-se como uma alternativa para a pavimentação.

Palavras-chaves: Ensaios geotécnicos, Estabilização química, Pavimentos.

Abstract. It is identified in the State of Ceará, it is difficult to find soils that meet the conditions imposed by the traditional specifications for the construction of pavements. Due to this fact, it is sometimes necessary to resort to alternatives, such as the stabilization of these materials. The aim of this article is to analyze the technical feasibility of a soil with clay characteristics by means of chemical stabilization with the addition of the lime powder. The study was divided into two stages: the first included characterization tests and the second comprised determination of the California Bearing Ratio (CBR), Simple Compressive Strength and submitted to the proposed dosing method by Thompson (1966). The results showed that with 3% lime powder, the soil became reactive as well as manifested improvements with respect to its physical properties. However, a better result was obtained for the 5% soil-lime mixture. The use of 5% of this stabilizer is then recommended for the type of soil analyzed. This content is justified because in addition to presenting better results of compressive strength, reached resistance values higher than the minimum required in pavement projects. In a comprehensive way, the soil-lime mixtures presented a favorable behavior for the execution of base layers and sub-base of pavements, standing out as an alternative for paving.

Keywords: Geotechnical tests, Chemical Stabilization, Pavements.

1 INTRODUÇÃO

Os materiais para pavimentação estão cada vez mais escassos e de difícil acesso e exploração no meio ambiente, devido a fatores diversos, isso pode gerar custos extras a obra e degradar a região explorada (ARAÚJO; BARROSO, 2007). Os solos granulares geralmente são utilizados na construção das camadas sujeitas a maiores esforços da pavimentação. Entretanto, pode existir uma dificuldade no que diz respeito ao transporte do material até a obra, caso este se localize em áreas distantes. Esse fator eleva os custos do projeto e pode inviabilizá-lo sob o ponto de vista econômico. Tendo em vista a dificuldade de utilização desses materiais, é necessário recorrer a outros recursos que apresentem características semelhantes ou que melhorem as propriedades das camadas de pavimentos e causem menos deterioração ao meio ambiente. Desta forma surge como uma alternativa a utilização de solos finos locais. Entretanto, as características geotécnicas destes materiais muitas vezes não estão de acordo com as especificações do projeto, e nesta situação, tem-se a opção de alterar as propriedades do solo existente de forma a se obter um material que tenha capacidade de atender as necessidades previstas, sendo esta técnica conhecida como estabilização de solos. A estabilização de solos representa o procedimento de melhoramento das propriedades de um solo por meio da mistura com outros materiais, sejam eles outros solos, agregados ou outros materiais, de forma que o produto final seja obtido com propriedades adequadas de estabilidade e durabilidade, quando propriamente compactado. Diversos autores avaliaram a estabilização de solos para fins rodoviários com a aplicação da cal (LOVATO, 2004; OLIVEIRA, 2005; PRUDENTE; REZENDE; GUIMARAES, 2005; PORTELINHA, 2008; ARAÚJO, 2009; GUÉRIOS, 2013; SOUZA, 2014). Os estudos sugerem que a estabilização com a cal é uma alternativa a ser considerada, pois oferece vantagens técnicas, econômicas e ambientais. Dentro desse contexto se insere o desenvolvimento deste trabalho que visa avaliar a viabilidade técnica de utilização da cal em pó na estabilização química de um solo coesivo, em três proporções (3%, 5% e 7%), analisando o comportamento mecânico destes materiais por meio de ensaios laboratoriais com a finalidade de verificar sua possível aplicação em camadas de pavimentos.

2 FUNDAMENTAÇÃO

2.1 Estabilização de solos, estabilização com o uso de cal e métodos de dosagem

Segundo Gondim (2008) estabilizar um solo consiste em aplicar a este um fator estabilizante, com o intuito de modificar suas propriedades, tornando-o capaz de atender às especificações exigidas a uma dada necessidade prevista em projeto. O fator estabilizante pode ser um

aditivo químico, um material granular ou até mesmo uma aplicação de uma energia dinâmica. A estabilização de solos pode ser físico-química ou mecânica. De acordo com o DNIT (2006), os principais tipos de estabilizações físico-químicas são: solo-cimento, solo melhorado com cimento, solo-cal, solo melhorado com cal, solo-betume e estabilização com cloretos. Já a estabilização mecânica subdivide-se em granulométrica ou por compactação. Estabilização granulométrica é a mistura de dois ou mais solos com o intuito de obter um material com distribuição granulométrica desejada de forma que apresente ganho de resistência e estabilidade volumétrica. A estabilização por compactação, por sua vez, é um processo mecânico causado pela aplicação de pressão, impacto ou vibração, com o intuito de diminuir o volume de vazios do solo. Segundo (AZEVEDO et al., 1998) solo-cal é uma mistura íntima de solo, cal e água em proporções que são determinadas por meio de análises laboratoriais. A técnica tem fundamentação em reações físicas e químicas que ocorrem entre os elementos constituintes do solo e a cal. O uso da cal é recomendado quando há necessidade de se melhorar as propriedades de solos finos que na sua maioria apresentam baixa capacidade de suporte, além de expansão e plasticidade elevadas. Para o estudo dos teores necessários para a estabilização de solos com a adição de cal, são utilizados diversos métodos de dosagem de mistura solo-cal. No Brasil destacam-se: Método do Lime Fixation Point (HILT; DAVIDSON, 1960); Método do PH (EADES; GRIM, 1966); Método do ICL - Initial Consumption of Lime (ROGERS C. D. F.; GLEDENDINNING, 1997), e o método de (THOMPSON, 1966) que foi o utilizado nesta pesquisa. O referido método determina que um solo se classifica como reativo com cal, caso este apresente um aumento de resistência à compressão simples (RCS) de pelo menos 345 KPa em relação a sua condição natural, após 28 dias de cura, precedidos por uma imersão prévia de 24 horas em água potável. Acerca do dimensionamento de pavimentos, Loiola e Barroso (2007) destacam que o pavimento na CE 377, onde foi executada camada de base constituída de solo-cal, com valor de 0,70 MPa de Resistência à Compressão Simples, obtido em estudos laboratoriais, encontra-se em boas condições estruturais após 8 anos de sua execução. Este fato, segundo os autores, ocorreu devido ao bom desempenho apresentado pela camada de base estabilizada. Os autores consideram o valor de 0,70 MPa, como sendo o mínimo aceitável para uma camada de base estabilizada com a cal, em projetos de rodovias com baixo volume de tráfego no estado do Ceará. Já o Illinois Highway Department utiliza valores de RCS mínimos de 0,689 MPa em camadas de sub-base e 1,034 MPa em camadas de base para o uso de misturas de solo-cal em pavimentos.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Amostras

O solo analisado nesta pesquisa foi escolhido com base nas características geotécnicas do material. Este estava sendo utilizado como reforço do subleito em obra de pavimentação realizada no processo de urbanização das margens do rio Maranguapinho situada em um trecho entre a Av. Osório de Paiva e a Rua Jardim Fluminense (Figura 1).

Figura 1: Execução da obra de urbanização das margens do rio Maranguapinho (a) e local de coleta do solo analisado (b).

(a)

(b)

É importante ressaltar que a amostra coletada e analisada possuía características marcantes de partículas finas (argila) sendo classificada através de análise tátil-visual como areia argilosa. Observou-se ainda, após a realização de ensaios geotécnicos, que o material possuía baixa capacidade de suporte e índices de plasticidade elevados, inviabilizando consequentemente o uso deste material em camadas de base e sub-base dos pavimentos. A cal hidratada calcítica (MgO inferior a 12%) utilizada na pesquisa é a do tipo CH-I, produzida pela Empresa Carbomil Química S/A, adquirida comercial-

mente. Na Tabela 1 apresenta-se composição química, fornecida pelo fabricante.

3.2 Procedimento Experimental

O processo experimental dividiu-se em duas etapas, a primeira onde foram realizados ensaios de caracterização e a segunda, onde foi realizada a dosagem e os ensaios de resistência (Figura 2).

Figura 2: Fluxograma do Processo Experimental

Foram analisadas a amostra em seu estado natural e amostras estabilizadas com teores de 3%, 5% e 7% de cal em relação ao peso seco do solo (Figura 3 a). Os teores foram escolhidos mediante revisão bibliográfica de outros trabalhos experimentais que utilizaram a mesma proporção Oliveira (2005), Araújo (2009) e as mesmas técnicas de estabilização com solos finos para aplicação em pavimentos. A 1ª etapa compreendeu a realização de ensaios de caracterização da amostra de solo, englobando: análise granulométrica, conforme 080/94 (1994), determinação da densidade real, 093/94 (1994), determinação de limites de consistência 082/94 (1994), 087/94 (1994), 093/94 (1994) e ensaios de compactação, de acordo com 162/94 (1994). A 2ª etapa abrangeu a realização de ensaios (Figura 3) para a determinação de Índice de Suporte Califórnia (ISC) e expansão, conforme 049/94 (1994), determinação de resistência à compressão simples (TESTING; ASTM, 1996) e aplicação da dosagem proposta por Thompson (1966).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Ensaios de caracterização e compactação

O solo utilizado, nesta pesquisa, intitulado amostra natural, foi caracterizado, inicialmente através de análise tátil-visual como areia argilosa. Com base nos resultados das análises granulométricas realizadas com as amostras de solo natural e misturas com 3%, 5% e 7% de cal, foram determinados os percentuais das frações granulométricas constituintes (pedregulhos, areias, siltes e

Tabela 1: Composição Química da Cal Hidratada CH-I.

PPC*	Ca(OH) ₂	MgO	RI*	SiO ₂	R2O3
23,0% - 25,0%	92,5% - 98,5%	3,5% máx	0,5% máx	0,3% máx	1,5% máx

*PPC – Perda Por Calcinação *RI – Resíduo Insolúvel em HCL

Figura 3: Mistura solo-cal (a), ensaio de determinação de densidade real (b), tanque com imersão de corpos de provas (c) e prensa utilizada para determinação de Índice de Suporte Califórnia (ISC) e Resistência à Compressão Simples (d)

argilas), conforme faixa granulométrica estabelecida por DNIT (2006) apresentados de forma comparativa na Figura 4 onde encontra-se um resumo comparativo dos resultados da análise granulométrica.

Figura 4: Resumo comparativo de frações granulométricas, conforme faixa estabelecida por DNIT (2006)

Ao analisar os dados expostos, observou-se que as alterações na granulometria do material após a adição da cal não foram significativas. Entretanto, na fração de finos (argila e silte), a porcentagem, que era de 24%, passou a ser de 32% nas misturas de solo com 3% e 5% de cal, e 34% na mistura de solo com 7% de cal. Quanto

à fração de areia, no solo natural o percentual era de 43%, com aumento para os percentuais de 52% e 45% nas misturas de solo com cal, nos teores de 3% e 5% respectivamente, já com o teor de 7% o percentual de areia foi de 41%. Esses percentuais são apresentados na Tabela 2, bem como os demais resultados de parâmetros geotécnicos caracterizados para as amostras de solo natural e misturas solo-cal.

A amostra de solo natural apresentou um limite de liquidez de 27%, índice de plasticidade de 8% (Tabela 2) e índice de grupo igual a zero, sendo classificado como um solo do tipo A-2-4, de acordo com o sistema de classificação da AASHTO. Pode-se verificar que os valores de LL e IP, apresentaram valores superiores aos especificados por DNIT (2006) para utilização do material em camadas de base e sub-base dos pavimentos rodoviários, que exige um LL igual ou inferior a 25% e um IP igual ou inferior a 6%, impossibilitando o uso do material sem estabilização nas referidas camadas de pavimentos. Quanto aos valores para as misturas tratadas com cal, verificou-se que quanto ao parâmetro de índice de plasticidade, todos os teores atenderam à especificação exigida pelo DNIT (2006). Já para o limite de liquidez, houve um aumento em todos os teores estabilizados. Thomé (1994) observou comportamento similar e verificou que solos de baixa plasticidade e pouco expansivos, tendem a apresentar um aumento nos limites de liquidez, plasticidade e contração quando misturados com a cal. Diamond e Kinter (1965) observaram que solos com aumento do limite de liquidez, são acompanhados por maior aumento do limite de plasticidade, e consequentemente, em redução do índice de plasticidade. Fato esse foi observado também com as amostras ensaiadas, pois todos os valores dos limites de liquidez e plasticidade aumentaram com a adição da cal. Porém, ao se fazer a combinação de ambos para cálculo do IP, foi verificado que este sofreu reduções em seus valores, passando de 8% em seu estado natural para 6% nas misturas de 3% e 5% de cal, e para 2% com a mistura de solo com 7% de cal. A partir da análise dos valores de Índice de Plasticidade das misturas estabilizadas, verificou-se melhora na trabalhabilidade destas, em comparação à amostra de solo natural. Além disso, o aumento dos valores de LL obtidos para as misturas de solo-cal pode ser explicada, dentre outros fatores, pela baixa atividade das argilas constituintes desse material e à composição dos cátions trocáveis presentes no mesmo, pois este também apresentou baixa expansão. Head (1980) conceituou limite de contração como sendo o ponto onde as partículas

Tabela 2: Caracterização geotécnica do solo natural e tratado com cal

	Solo Natural	Solo-cal 3%	Solo-cal 5%	Solo-cal 7%
Pedregulho (%)	33	16	23	25
Areia (%)	43	52	45	41
Silte + Argila (%)	24	32	32	34
LL (%)	27	38	38	32
LP (%)	19	32	32	30
IP (%)	8	6	6	2
LC (%)	48	56	53	57
Densidade relativa dos grãos	2,61	2,63	2,56	2,58
Massa específica aparente seca máxima (g/cm ³)	2,04	2,05	1,98	2,00
Umidade ótima (%)	9,8	9,5	10,5	10,0

sólidas estão intimamente em contato e a água presente no solo é aquela necessária para preencher o vazio entre elas. A adição de cal provoca floculação e há um aumento no tamanho das partículas, assim como observado nos resultados de granulometria, consequentemente os poros das partículas ficam maiores, aumentando assim a quantidade de água dentro dos mesmos. Nesse contexto, o limite de contração tende a aumentar com a adição da cal ao solo, como observado nos resultados. Ao analisar os resultados do ensaio de compactação (Tabela 2), pode-se perceber que os valores de massa específica seca máxima para as amostras de solo misturado com a cal foram menores do que o valor encontrado para o solo natural. Quanto aos valores de umidade ótima, para os teores de 5% e 7% de cal, observou-se aumento em relação ao solo natural. Esses parâmetros diferiram apenas para a amostra de solo tratada com 3% de cal, na qual o valor da massa específica seca máxima obteve um pequeno aumento e no valor da umidade ótima ocorreu uma redução para todos os teores em relação ao solo natural. Segundo Lovato (2004), à medida que uma mistura torna-se mais floculada, aumenta-se o índice de vazios em seu interior, com isso seria necessária uma quantidade maior de água para preenchê-los, resultando, portanto em uma umidade ótima maior e em uma massa específica seca máxima menor. De acordo com o autor, isso só é possível quando a estrutura formada pelo solo, cal e água (estrutura floculada) for forte o suficiente para resistir à compactação com o índice de vazios mais alto.

4.2 Índice de Suporte Califórnia (ISC), expansão e Resistência à Compressão Simples (RCS)

Com o intuito de verificar as alterações ocorridas nos valores de resistência e capacidade do solo após a estabilização com a cal, nos teores de 3%, 5% e 7%, foram realizados ensaios para determinação de Índice de Suporte Califórnia (ISC) e Resistência à Compressão Simples (RCS).

Quanto ao índice de suporte Califórnia (ISC) e a expansão do solo natural, os valores obtidos em labora-

tório foram respectivamente 13% e 0,06%, utilizando energia Proctor Intermediária na compactação do corpo de prova. Analisando a expansão do solo natural e das misturas, verifica-se que os valores foram baixos, quase nulos, atendendo ao limite de 0,5% especificado pelo DNIT para aplicação em camadas de base rodoviária, apesar dos valores de LL e IP do solo natural não atenderem às especificações do DNIT para construção de camadas de base e sub-base de pavimentos rodoviários. Essa inconsistência entre os valores de limites de consistência e expansão do solo, mostra que os limites de Atterberg possuem limitações para caracterizar alguns tipos de solos para aplicação em pavimentação. A exemplo, solos com comportamento laterítico, que segundo (NOGAME; VILLIBOR, 1995), podem apresentar elevados valores de LL e IP, porém têm baixa expansão, capacidade de suporte elevada e consequentemente, boa empregabilidade em pavimentação.

Além disso, pode-se constatar que o valor de ISC apresentado está abaixo dos valores aceitáveis para uso em camadas de base e sub-base dos pavimentos, segundo especificação do DNIT (2006), que exige valores mínimos para a utilização do material nessas camadas, de; ISC igual ou superior a 20% para aplicação em camadas de sub-base e não inferior a 60% para camadas de base. Além de uma expansão não superior a 0,5%. Os valores de ISC obtidos para os teores 3%, 5% e 7% respectivamente foram 41%, 67% e 53%, conforme Figura 5, que também inclui os resultados de RCS.

Contudo, os resultados de CBR das misturas foram avaliados neste estudo somente como indicador de incremento de resistência comparativamente ao solo natural. No caso de misturas estabilizadas quimicamente o Índice de Suporte Califórnia, parâmetro utilizado em dimensionamento empírico de camadas de pavimentos flexíveis com materiais granulares, segundo metodologia do DNIT (2006) não deve ser utilizado como parâmetro de dimensionamento de pavimentos. De acordo com Araújo (2009), no caso de dimensionamento de camadas de pavimentos com materiais estabilizados quimica-

Figura 5: Resumo dos resultados dos ensaios de ISC e RCS

mente, é indicado o parâmetro de Resistência à Compressão Simples. Também, o Módulo de Resiliência tem sido indicado como parâmetro para caracterização mais adequada de materiais empregados em pavimentação, segundo Medina e Motta (2015), este parâmetro foi também empregado na avaliação de materiais estabilizados com cal, nos estudos de Oliveira (2005), Araújo (2009).

Com base nos resultados apresentados, observam-se melhorias nos valores de ISC das amostras estabilizadas com cal, comparando-se com o valor obtido do solo natural. Segundo Núñez (1991) este comportamento de melhoria no ISC de amostras de solos quimicamente tratadas pela cal, pode ser explicado devido à capacidade de troca catiônica, que ocorre com a finalidade de equilibrar as cargas negativas nas faces das partículas de argila, e a reação de floculação. Entretanto, no teor acima de 5%, houve uma redução no valor de ISC, ao comparar com o resultado obtido no teor de 5% de cal. Segundo os mesmos autores isso pode ocorrer devido a uma baixa capacidade de troca catiônica que faz com que teores de 3% e 5% de cal satisfaçam a afinidade da cal pelo solo. Enquanto para teores acima de 5% o consumo ocorre por reações pozolânicas de cimentação, que não acontecem de imediato e que também não se iniciam durante os quatro dias de imersão, a que são submetidos os corpos de provas durante o ensaio de ISC.

Quanto aos valores de expansão apresentados para as amostras de solo tratadas com cal em pó, pode-se verificar que ocorreram reduções nos valores obtidos após a estabilização, em comparação com o solo natural. No teor de 3% a expansão registrada foi de apenas 0,01% e com o aumento da porcentagem de cal nas amostras, foram obtidos resultados nulos para os teores de 5% e 7%, corroborando os resultados obtidos por Araújo (2009), ao estabilizar um solo da Região do Baixo Jaguaribe, com a adição de cal em pó e em pasta, nos mesmos teores. Nas Figuras 6 (a), (b) e (c) são apresentados os corpos de provas após a realização do ensaio de determinação da resistência à compressão.

Destaca-se a forma de ruptura destes, com superfície cisalhada na extremidade de base superior até a base inferior. Comportamento similar foi observado nos estudos de Araújo (2009), Lovato (2004). Os autores verificaram que a maioria dos corpos de prova tendem a apresentar uma ruptura frágil durante o procedimento de ensaio, sendo essa uma característica marcante de materiais cimentados.

Figura 6: Corpos de prova de misturas solo-cal na proporção de 3%, 5% e 7%, respectivamente, após execução de ensaio de determinação de Resistência à Compressão Simples (RCS)

Com base nos resultados de Resistência à Compressão Simples (RSC) obtidos, verificou-se que as misturas de solos tratadas com a cal em pó nos teores de 5% e 7% resultaram em melhores valores de RCS do que a amostra de solo com 3% de cal. Isso ocorreu, segundo interpretação de Araújo (2009), pelo fato de que a mistura com 3% de cal em pó possui quantidade de estabilizante suficiente apenas para satisfazer a capacidade de troca catiônica, sendo esta responsável pela melhoria na trabalhabilidade e pelo ganho de resistência inicial da amostra, enquanto que as amostras de 5% e 7%, além de apresentarem quantidade suficiente para satisfazer a capacidade de troca catiônica, obtiveram uma quantidade excedente de estabilizante, capaz de proporcionar a ocorrência de reações cimentantes, responsáveis pelo aumento da resistência do solo, passado o período de cura estabelecido.

4.3 Dosagem com o método de Thompson e análise de critérios exigidos para aplicação em pavimentação.

Nesta pesquisa, utilizou-se o método de (THOMPSON, 1966), como referência para a determinação do teor ótimo de cal, que considera como um solo reativo aquele que apresenta um incremento de resistência à compressão simples de pelo menos 0,345 MPa após 28

dias de cura e com uma imersão prévia de 24 horas antes do rompimento do corpo de prova.

A amostra de solo natural apresentou um valor de resistência à compressão simples de 0,91 MPa sem imersão prévia (Tabela 3) e não apresentou resistência após à imersão em água por 24 horas. Após ser adicionada a cal, atendeu ao critério de (THOMPSON, 1966) com a adição dos três teores do estabilizante. Desta forma, de acordo com este método o teor ótimo de cal para a estabilização deste solo analisado é de 3%. Os valores de resistência à compressão são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3: Resistência à Compressão Simples

S/Imersão	Com Imersão em água		
S/Cura	Cura 28 dias		
0% de cal	3% de cal	5% de cal	7% de cal
0,91	0,7	2,06	2,06

Ao se comparar os valores obtidos de resistência à compressão simples para as misturas das amostras estabilizadas com cal, com a amostra de solo natural sem imersão prévia, pode-se perceber que todos os teores avaliados atenderam ao critério local, de resistência à compressão mínima de 0,70 MPa, estabelecido com base na construção de trechos experimentais no estado do Ceará, segundo Loiola e Barroso (2007) para rodovias de baixo volume de tráfego (inferior a 200 veículos/dia, critério estabelecido por Parente (2000).

Com relação aos valores mínimos exigidos para projetos de pavimentação, ao comparar com os valores estabelecidos pelo Illinois Highway Department, pode-se verificar por meio da Figura 7, que todas as amostras, tratadas com cal, obtiveram o valor mínimo exigido de 0,689 MPa para camada de sub-base no período de cura de 28 dias. Entretanto, apenas nas misturas de solo-cal nos teores de 5% e 7% atenderam a referência mínima exigida de 1,034 MPa para camada de base, no período de cura estabelecido de 28 dias.

Figura 7: RCS das amostras estabilizadas nos teores de 3%, 5% e 7%, e valores de referência mínimos do Illinois Highway Department para aplicação em camadas de base e sub-base rodoviárias estabilizadas

A Tabela 4 traz um resumo comparativo de valores

de resistência à compressão de estudos anteriores referenciados neste trabalho. Considerando os diversos estudos, os teores de cal avaliados variaram de 1% a 10%, com resistência à compressão simples variando de 0,30 MPa a 3,29 MPa, sendo a menor resistência encontrada para mistura com teor de cal de 1% e a maior com 10%. Verifica-se que os valores de resistência à compressão simples obtidos nas diversas pesquisas se encontram na mesma ordem de grandeza daqueles observados neste estudo, entretanto, o que pode explicar a diferença nos resultados de RCS em cada estudo, além dos diferentes teores de cal utilizados nas misturas, variações na composição química dos tipos de cal e as diferentes características geotécnicas e mineralógicas dos solos testados, formados a partir de processos distintos de pedogênese, utilizados nas misturas. Os resultados deste estudo sugerem que, dentre os teores avaliados, o uso de 5% de cal como estabilizante do solo do tipo areno-argiloso analisado seria o recomendado, sendo este satisfatório para atender aos critérios exigidos em projetos de pavimentos para a execução de camadas de sub-bases e bases rodoviárias de rodovias de baixo volume de tráfego. A indicação do uso de 5% de cal na estabilização do solo em questão é consolidada também, pelos resultados obtidos nos estudos de Lovato (2004), Oliveira (2005), Araújo (2009), Guérios (2013) que obtiveram resultados satisfatórios e similares de resistência à compressão simples para o mesmo teor.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base na avaliação experimental realizada verificou-se que o teor de 3% de cal já foi suficiente para estabilizar o solo em questão, com base no critério de dosagem proposto por Thompson (1966), sendo que para este teor foi registrado um aumento superior a 0,345 MPa em relação à resistência à compressão simples inicial do solo em seu estado natural. Observou-se, ainda, melhorias na capacidade de suporte das amostras tratadas pela cal, apresentando um melhor resultado para o teor de 5%, pois houve um aumento de 515% em relação ao seu índice de suporte inicial. Quanto à expansão, percebeu-se que após a inserção da cal todas as amostras tiveram tendência a valores nulos, à medida que se aumentava a quantidade de cal nas misturas. Diante dos resultados de Resistência à Compressão Simples, pôde-se constatar que a aplicação da cal pode ser utilizada satisfatoriamente na estabilização do tipo de solo em questão. Recomenda-se, porém, para o solo analisado, o uso de 5% desse estabilizante. Esse teor justifica-se porque além de apresentar melhores resultados nos ensaios de compactação, índice de suporte e resistência à compressão, atingiu valores de resistência superiores aos mínimos exigidos em projetos de pavimentos, atendendo ao critério local de 0,70 MPa, estabelecido para rodovias de baixo volume de

Tabela 4: Resistência à Compressão Simples

Estudo	Autor/Ano	% Cal	RCS (MPa)
Estudo do comportamento mecânico de um solo laterítico estabilizado com cal, aplicado à pavimentação.	Lovato (2004)	3% 4% 5%	0,90 1,52 2,00
Estudo do comportamento mecânico de misturas de fosfogesso e cal para utilização na construção rodoviária.	Oliveira (2005)	3% 5% 7% 10%	0,69 0,81 0,86 1,02
Efeitos da cal e do cimento na modificação dos solos para fins rodoviários: Mecanismos de reação, parâmetros de caracterização geotécnica e resistência mecânica.	Portelinha (2008)	1% 2% 3%	0,30 0,43 0,61
Avaliação de misturas de solos estabilizados com cal, em pó e em pasta, para aplicação em rodovias do estado do Ceará.	Araújo (2009)	3% 5% 7%	0,83 1,24 1,17
Estudo do melhoramento de solo com adição de cal hidratada para uso em pavimento urbano.	Guérios (2013)	2% 5% 10%	1,72 1,86 3,29
Estudo da mistura solo-cal para base de pavimento rodoviário.	Souza (2014)	6% 8% 10%	0,62 0,35 0,69
Este estudo		3% 5% 7%	0,71 2,07 2,07

tráfego (LOIOLA; BARROSO, 2007) e satisfazendo o critério do Illinois Highway Department, que exige um valor mínimo de 1,034 MPa para camadas de base em rodovias com características de tráfego leve. Portanto, a análise de viabilidade técnica do material, realizada neste estudo indicou o uso satisfatório da amostra de solo com 5% de estabilizante para camadas de sub-base e também para camadas de base de rodovias de baixo volume de tráfego.

REFERÊNCIAS

- 049/94, D. N. de Estradas e R. M. *Solos – Determinação do Índice de Suporte Califórnia Utilizando Amostras Não Trabalhadas*. 1994.
- 080/94, D. N. de Estradas e R. D. M. *Solos – Análise Granulométrica por Peneiramento. Solos – Análise Granulométrica por Peneiramento*. 1994.
- 082/94, D. N. de Estradas e R. D. M. *Solos – Determinação do Limite de Plasticidade*. 1994.
- 087/94, D. N. de Estradas e R. D. M. *Solos – Determinação dos Fatores de Contração*. 1994.
- 093/94, D. N. de Estradas e R. D. M. *Solos – Determinação da Densidade Real*. 1994.
- 122/94, D. N. de Estradas e R. D. M. *Solos – Determinação do Limite de Liquidez*. 1994.
- 162/94, D. N. de Estradas e R. D. M. *Solos – Ensaio de Compactação utilizando Amostras Trabalhadas*. 1994.
- ARAÚJO, A.; BARROSO, S. H. A. O uso da técnica de solo-cal para melhoramento das propriedades tecnológicas de um solo da região do baixo jaguaribe no estado do ceará. In: **XXI Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes**. [S.l.: s.n.], 2007.
- ARAÚJO, A. F. **Avaliação de Misturas de Solos Estabilizados com cal, em pó e em pasta, para aplicação em Rodovias do Estado do Ceará**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Ceará, 2009.
- AZEVEDO, A. L.; JÚNIOR, A. O.; PEDROSA, R. A. A.; RAMALHO, R. W. Estabilização de solos com adição de cal. **Revista Vias Gerais, Publicação do Centro de Transferência de Tecnologia do PIH/IPC – DER/MG**, 1998.
- DIAMOND, S.; KINTER, E. B. Mechanisms of soil lime stabilization: an interpretive review. **Highway Research Record**, 1965.
- DNIT, D. N. d. I. d. T. **Manual de Pavimentação**. 2006.
- EADES, J. L.; GRIM, R. E. A. A quick test to determine lime requirements for lime stabilization. **Highway Research Board**, 1966.
- GONDIM, L. M. **Estudo Experimental de Misturas Solo-Emulsão Aplicado às Rodovias do Agropólo do Baixo Jaguaribe/Estado do Ceará**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Ceará, 2008.
- GUÉRIOS, E. M. **Estudo do Melhoramento de Solo com Adição de Cal Hidratada para seu uso em Pavimento Urbano**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2013.
- HEAD, K. H. **Manual of Soil laboratory testing**. 1980.
- HILT, G. H.; DAVIDSON, D. T. Lime fixation in clayey soils. **Highway Research Board**, 1960.

LOIOLA, P. R. R.; BARROSO, S. H. A. Aplicação da técnica de solo cal na construção da rodovia do melão no estado do ceará. In: **12ª ENACOR**. [S.l.: s.n.], 2007.

LOVATO, R. S. **Estudo do Comportamento Mecânico de um Solo Laterítico Estabilizado com Cal, Aplicado á Pavimentação**. Dissertação (Mestrado) — UFRGS, 2004.

MEDINA, J.; MOTTA, L. M. G. **Mecânica dos Pavimentos**. 3. ed. Rio de Janeiro: Saraiva, 2015.

NOGAME, J. S.; VILLIBOR, D. F. **Pavimentação de baixo custo com solos lateríticos**. 1995.

NÚÑEZ, W. P. **Estabilização Físico-Química de um Solo Residual de Arenito Botucatu, Visando Seu Emprego na Pavimentação**. Dissertação (Mestrado) — CPGE/UFRGS, 1991.

OLIVEIRA, S. M. F. d. **Estudo do Comportamento Mecânico de Misturas de Fosfogesso e Cal para utilização na construção rodoviária**. Dissertação (Mestrado) — EESC-USP, 2005.

PARENTE, F. E. **Rodovias de Baixo Volume de Tráfego em Revestimento Asfáltico (TCP – Tratamento Contra Pó)**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Ceará, 2000.

PORTELINHA, F. H. M. **Efeitos da Cal e do Cimento na modificação dos Solos para fins Rodoviários: Mecanismos de Reação, Parâmetros de Caracterização Geotécnica e Resistência Mecânica**. Dissertação (Mestrado) — UFV, 2008.

PRUDENTE, J. P.; REZENDE, L. R.; GUIMARAES, R. C. Estabilização de solos lateríticos finos com cal hidratada para utilização em pavimentação. In: **36a Reunião Anual de Pavimentação**. [S.l.: s.n.], 2005.

ROGERS C. D. F.; GLEDENDINNING, S. R. T. E. J. Lime modification of clay soils for construction expediency. **Geotechnical Engineering**, 1997.

SOUZA, A. N. S. **Estudo de Mistura Solo-Cal para Base de Pavimento Rodoviário**. Dissertação (Mestrado) — Centro Universitário de Brasília, 2014.

TESTING, A. S. F.; (ASTM)., M. **Test Methods for Unconfined Compressive Strength of Compacted Soil-Lime Mixtures**. [S.l.]: ASTM International, 1996.

THOMÉ, A. **Estudo do Comportamento de um solo mole tratado com cal, visando seu uso em fundações superficiais**. Dissertação (Mestrado) — UFRGS, 1994.

THOMPSON, M. R. Journal of the soil mechanics and foundations division. **ASCE**, 1966.