			1. Relatório Número: CCR-ND-SCH-RTF-SET/2014			
			2. Data do Relatório: Setembro de 2014	3. Folhas: 129		
4. Título da Pesquisa: “Estudo do Comportamento Mecânico de Solos Estabilizados com Cal Hidratada”						
5. Responsável pela coordenação da pesquisa: Centro de Pesquisas Rodoviárias (CPR) da Concessionária NovaDutra, do Grupo CCR			6. Relatório Elaborado para: Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT)			
7. Relatório preparado por: Luis Miguel Gutiérrez Klinsky (CPR) Valéria C. de Faria (CPR) Antônio Donizete Leal (CPR)						
8. Resumo: A estabilização de solos problemáticos com cal é uma técnica bastante utilizada para melhorar a trabalhabilidade dos solos e incrementar a capacidade de suporte. Contudo, sua contribuição estrutural no pavimento tem sido desconsiderada, principalmente devido ao desconhecimento de suas propriedades mecânicas. Neste estudo, foram avaliados os parâmetros de resistência à compressão simples, resistência à tração e módulo de resiliência por compressão triaxial de misturas de solo cal, para incrementar o conhecimento destas propriedades e auxiliar aos projetistas no dimensionamento de estruturas de pavimentos com camadas de solo cal. Os resultados obtidos nesses parâmetros, em dois solos argilosos selecionados para este estudo, mostram o benefício da estabilização de solos com cal hidratada. Os valores de resistência e rigidez obtidos confirmam a possibilidade de considerar que estas camadas contribuem estruturalmente no alívio de tensões e deformações na estrutura do pavimento, quando utilizadas com reforço de subleito ou sub-base.						
9. Palavras Chave: Estabilização de solos, cal hidratada, resistência à compressão simples, resistência à tração, módulo de resiliência.						

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO.....	- 4 -
1.1. OBJETIVO.....	- 5 -
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	- 6 -
2.1. ANTECEDENTES DA ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS COM CAL	- 6 -
2.2. MECANISMOS DE REAÇÃO DO SOLO COM CAL	- 8 -
2.3. EFEITOS DA ADIÇÃO DE CAL NAS PROPRIEDADES DOS SOLOS	- 10 -
2.3.1. Plasticidade e Granulometria	- 10 -
2.3.2. Propriedades de compactação	- 11 -
2.3.3. Índice de Suporte Califórnia (ICS) ou Califórnia Bearing Ratio (CBR)...	- 12 -
2.3.4. Resistência à compressão simples.....	- 13 -
2.3.5. Resistência à tração por compressão diametral	- 15 -
2.3.6. Módulo de Resiliência.....	- 16 -
2.3.7. Durabilidade.....	- 19 -
2.4. DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS COM CAMADAS DE CAL.....	- 20 -
2.4.1. Solo cal como camada estrutural.....	- 20 -
2.4.2. Procedimentos utilizados no exterior.....	- 22 -
2.4.2.1. Programa laboratorial para dosagem de solo cal	- 22 -
2.4.2.2. Obtenção do módulo de resiliência das misturas de solo cal e coeficiente de Poisson	- 23 -
2.4.2.3. Características de fadiga e fratura das misturas de solo cal.....	- 24 -
2.4.2.4. Deformação permanente em estruturas de pavimentos com camadas de solo cal	- 26 -
2.5. EXECUÇÃO DE CAMADAS DE SOLO CAL	- 27 -
2.5.1. Transporte e entrega da cal hidratada	- 27 -
2.5.2. Estabilização de subleitos ou sub-bases.....	- 28 -
2.5.3. Distribuição da cal em campo	- 29 -
2.5.4. Mistura e umedecimento preliminar	- 30 -
2.5.5. Tempo de cura.....	- 32 -
2.5.6. Mistura final e pulverização.....	- 33 -
2.5.7. Compactação.....	- 34 -
2.5.8. Cura final	- 35 -
2.5.9. Considerações adicionais.....	- 36 -
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	- 38 -
3.1. MATERIAIS.....	- 38 -
3.1.1. Cal Hidratada.....	- 38 -

3.1.2. Solos	- 38 -
3.2. MÉTODOS	- 41 -
3.2.1. Métodos de Ensaios utilizados na pesquisa	- 41 -
3.2.2. Saturação dos corpos de prova por capilaridade para execução do ensaio de compressão triaxial cíclico.....	- 42 -
3.2.3. Estruturação dos ensaios.....	- 45 -
4. RESULTADOS	- 47 -
4.1. ENSAIOS DE CONSISTÊNCIA	- 47 -
4.2. GRANULOMETRIA DAS MISTURAS DE SOLO CAL.....	- 48 -
4.3. COMPACTAÇÃO DAS MISTURAS DE SOLO CAL.....	- 49 -
4.4. ENSAIO DE CBR	- 50 -
4.5. ENSAIO DE COMPRESSÃO SIMPLES.....	- 51 -
4.6. ENSAIO DE COMPRESSÃO DIAMETRAL.....	- 55 -
4.7. ENSAIO DE COMPRESSÃO TRIAXIAL CÍCLICA.....	- 57 -
4.7.1. Descrição do ensaio.....	- 57 -
4.7.2. Modelos de módulo de resiliência	- 59 -
4.7.3. Resultados de módulo de resiliência.....	- 60 -
4.7.4. Determinação do valor do Módulo de Resiliência em amostras submetidas à capilaridade.....	- 67 -
4.7.4.1. Testes com o Solo S-1	- 67 -
4.7.4.2. Testes com o Solo S-2	- 72 -
5. CONCLUSÕES.....	- 79 -
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	- 82 -
ANEXO C-1: RESULTADOS DO ENSAIO DE COMPRESSÃO TRIAXIAL CÍCLICA NAS MISTURAS DE SOLO CAL.....	- 88 -
C-1.1. RESULTADOS DO ENSAIO DE COMPRESSÃO TRIAXIAL CÍCLICA NAS MISTURAS DE SOLO CAL COM O SOLO S-1.....	- 88 -
C-1.2. RESULTADOS DO ENSAIO DE COMPRESSÃO TRIAXIAL CÍCLICA NAS MISTURAS DE SOLO CAL COM O SOLO S-2.....	- 98 -
C-1.3. RESULTADOS DO ENSAIO DE COMPRESSÃO TRIAXIAL CÍCLICA NAS MISTURAS DE SOLO CAL COM O SOLO S-2 APÓS 24 HORAS DE SATURAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA POR CAPILARIDADE.....	- 108 -
C-1.4. RESULTADOS DO ENSAIO DE COMPRESSÃO TRIAXIAL CÍCLICA NAS MISTURAS DE SOLO CAL COM O SOLO S-2 APÓS 48 HORAS DE SATURAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA POR CAPILARIDADE.....	- 117 -
ANEXO C-2: ANÁLISE DE ESTRUTURAS HIPOTÉTICAS DE PAVIMENTOS ..	- 126 -
ANEXO C-3: EXECUÇÃO DE ATIVIDADES.....	- 129 -

1. INTRODUÇÃO

O traçado geométrico de algumas rodovias muitas vezes implica a passagem da via através de regiões com subleitos problemáticos, isto é, solos de granulometria fina, altamente expansivos e com baixa capacidade de suporte, inadequados para resistir às tensões e deformações decorrentes da ação do tráfego intenso. De modo geral, a substituição desse material por outro mais nobre é proibitivo devido ao alto volume de material a ser transportado, o que representaria um elevado custo para a construção de uma estrutura de pavimento. Assim, o melhoramento ou estabilização do solo do subleito por meio de aditivos é uma prática comum no setor rodoviário.

A cal hidratada é um dos aditivos mais empregados para melhorar as características de subleitos problemáticos. A estabilização de solos com cal hidratada é eficaz para: melhorar a trabalhabilidade dos solos e facilitar a construção de camadas subsequentes; reduzir o poder expansivo; melhorar a textura e a durabilidade; aumentar a rigidez do solo e consequentemente melhorar sua resistência à deformação permanente.

Tradicionalmente, os ensaios empíricos de limites de consistência (limite de liquidez e índice de plasticidade) e ISC (índice de suporte Califórnia) têm sido utilizados para avaliar o efeito benéfico da estabilização de solos com cal hidratada. Também parâmetros mais racionais, como a resistência à compressão simples e resistência à tração, são empregados para avaliar o ganho de resistência do solo cal com relação ao solo em estado natural.

Por outro lado, os procedimentos de dimensionamento de pavimentos têm incorporado cada vez mais os conceitos mecanicistas no projeto de novas estruturas. Nesses procedimentos o módulo de resiliência constitui um parâmetro fundamental como dado de entrada. No entanto, existem poucos estudos laboratoriais de solo cal que avaliem o enrijecimento do solo, por meio do módulo de resiliência obtido em laboratório, para diversos tempos de cura.

Assim, nota-se a importância de estudar o comportamento resiliente do solo cal, através do ensaio triaxial cíclico, em diversos tempos de cura, o que permitiria

contribuir ao conhecimento deste tipo de estabilização para seu emprego na melhora de subleitos problemáticos.

1.1. OBJETIVO

O objetivo desta pesquisa foi realizar um estudo laboratorial da estabilização de solos de granulometria fina com de cal hidratada, para avaliar o efeito da incorporação deste aditivo. A pesquisa foi desenvolvida pelo Centro de Pesquisas Rodoviárias da Concessionária NovaDutra do Grupo CCR.

Para alcançar o objetivo traçado nesta pesquisa, basicamente foram estudados dois solos argilosos de granulometria fina estabilizados com diversos teores de cal hidratada.

Os solos foram estabilizados com cal hidratada do tipo CH-1 e as misturas resultantes foram avaliadas por meio de ensaios tradicionalmente empregados no setor de construção de pavimentos e à luz dos resultados obtidos em ensaios mecânicos, como compressão simples estática, compressão diametral estática e compressão triaxial cíclica.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. ANTECEDENTES DA ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS COM CAL

A estabilização de solos com cal é uma técnica de construção bem estabelecida e documentada, principalmente a partir dos anos 1950 e 1960. Diversos pesquisadores de universidades e de agências rodoviárias ao redor do mundo contribuíram para o melhor entendimento dos mecanismos desta técnica.

De acordo com o grau de estabilização e em função dos materiais utilizados, Little (1995) classifica a estabilização com cal em três técnicas descritas na continuação:

- a) **Estabilização do Subleito:** refere-se à estabilização *in loco* de solos finos do subleito ou materiais de empréstimo utilizados como sub-bases, como por exemplo, argilas e siltes de baixa capacidade de suporte. Essa técnica permite obter uma plataforma de trabalho para a construção das próximas camadas de pavimentos, e em alguns casos pode ser considerada como uma camada estrutural que contribui para o alívio de tensões e deformações. Para obter o teor ótimo de cal a ser utilizado nessa técnica são utilizados ensaios laboratoriais empíricos.
- b) **Estabilização da Base:** essa técnica implica a melhora da resistência do solo, considerado inadequado a princípio para a construção de bases de pavimentos. Os materiais utilizados podem ser misturas de agregados graúdos com argila, agregados sujos ou outros materiais com excessos de finos passando na peneira de No. 40. O teor de cal utilizado é determinado em laboratório através de ensaios que permitam avaliar o ganho de resistência.
- c) **Modificação dos solos:** nessa técnica objetiva-se melhorar a trabalhabilidade dos materiais por meio da adição de pequenas quantidades de cal. A modificação dos solos é empregada nos casos em que pretende-se:
 - Facilitar a compactação em áreas muito úmidas;
 - Facilitar o passo da construção através de subleitos moles;
 - Prover uma plataforma de trabalho para as camadas subsequentes;

- Tratar o solo para facilitar a adição de outros agentes estabilizantes, como cinzas ou cimento Portland.

Segundo Baptista (1976), a estabilização de solos com cal é um método que visa melhorar permanentemente as características do solo, aumentar a resistência à ação da água e incrementar a capacidade de suporte. Os materiais componentes deste método são: a cal, o solo e a água.

a) Cal

A cal, cal viva (ou virgem) ou óxido de cálcio (CaO), é obtida do aquecimento em fornos especiais do carbonato de cálcio (pedra calcária natural) até que é expulso o dióxido de carbono (CO_2). Já a cal hidratada ($\text{Ca}[\text{OH}]_2$) é resultado do umedecimento da cal viva, para assim obter um material mais seguro e fácil de armazenar. Basicamente existem dois tipos de cal: a calcítica que apresenta elevados teores de óxido e hidróxido de cálcio, e a dolomítica, caracterizada por conter algumas impurezas, como o carbonato de magnésio (MgCO_3).

b) Solos

A estabilização com cal é mais efetiva em solos que apresentam elevado conteúdo de argilas, especialmente se são do tipo montmorillonita. De modo geral, as areias não reagem com a adição de cal hidratada devido à ausência de argilo minerais. Contudo, misturas de solo areia e até solo agregado podem ser estabilizadas com cal, desde que apresentem quantidades adequadas de argilas reativas.

c) Água

Normalmente é recomendado utilizar água potável na estabilização de solos com cal. A quantidade empregada depende das exigências de compactação assim como da energia empregada.

2.2. MECANISMOS DE REAÇÃO DO SOLO COM CAL

A adição de cal nos solos provoca diversas reações que se processam em curto e longo prazos. Segundo Ingles e Metcalf (1972), Baptista (1976) e Jung (2008), essas reações são:

a) Intercâmbio Iônico

Os argilominerais presentes nos solos, tais como mica, esmectita e clorita, têm superfícies carregadas negativamente devido à substituição isomórfica da estrutura mineral. Usualmente, nessa superfície são encontrados íons metálicos fracos de Mg^{++} , Na^{++} e K^{+} que são substituídos pelos cátions fortes de Ca^{++} , ao ser adicionada a cal hidratada no solo. Assim, a ligação entre duas partículas de argila é regida pela carga e tamanho dos íons de cálcio.

O intercâmbio iônico reduz a espessura da dupla camada, como mostra a Figura 2.1, de modo que o solo se torna menos suscetível a mudanças volumétricas na presença de água. A redução da dupla camada transforma a estrutura achatada e paralela das partículas de argila em uma disposição mais aleatória, com contato das bordas dos grãos com as faces de outros grãos. Este processo se inicia durante as primeiras horas da adição da cal hidratada ao solo.

b) Floculação e aglomeração

A redução da dupla camada, como resultado da troca catiônica, é referida como a floculação. Já os fenômenos de reorganização e disposição aleatória dos grãos são conhecidos como aglomeração. Nesta etapa do processo, os solos mudam de textura devido à aglutinação das partículas, tornando-se um material mais friável e granular, o que implica em uma redução do índice de plasticidade. A floculação e aglomeração acontecem poucas horas após a mistura da cal hidratada e o solo.

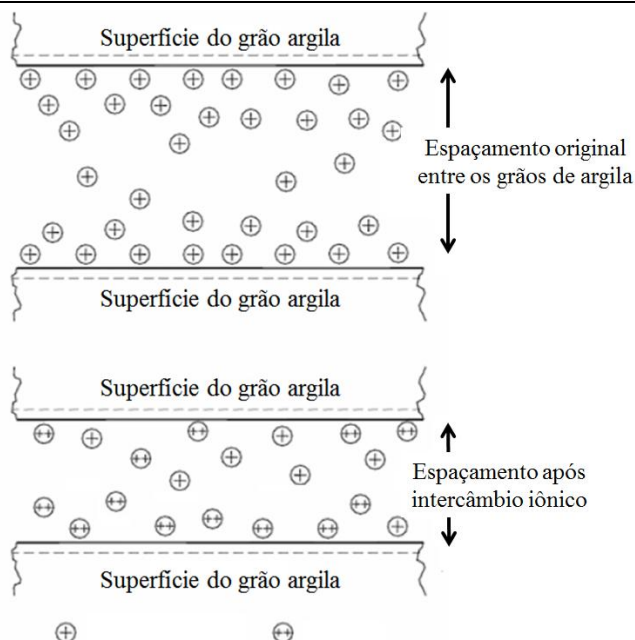


Figura 2.1: Esquematização do intercâmbio iônico [Jung (2008)]

c) Reações pozolânicas e cimentantes

A reação entre a sílica e o alumínio do solo com a cal hidratada produz compostos pozolânicos de silicato de cálcio hidratado e aluminato de cálcio hidratado. Esses compostos pozolânicos têm efeito cimentante, similar ao produzido pela hidratação de cimento Portland, e fornecem à estrutura do solo maior rigidez e resistência. As reações pozolânicas acontecem pouco tempo depois da adição da cal hidratada ao solo, mas podem continuar por anos. Algumas características que podem influenciar estas reações são: as propriedades naturais do solo, tipo e teor de cal hidratada utilizada e condições de cura, entre outras.

d) Carbonatação

A carbonatação é um processo associado à adição de cal hidratada aos solos, no qual é originado o carbonato de cálcio (CaCO_3) devido à reação entre a cal e o dióxido de carbono (CO_2) presente na atmosfera. Apesar de ser um processo indesejável durante a estabilização do solo, seus efeitos podem ser negligenciados.

2.3. EFEITOS DA ADIÇÃO DE CAL NAS PROPRIEDADES DOS SOLOS

2.3.1. Plasticidade e Granulometria

O índice de plasticidade (IP) é o parâmetro mais comumente utilizado para mensurar as mudanças na consistência dos solos devido aos efeitos físico químicos produzidos pela alteração do conteúdo de água. Segundo diversos pesquisadores, (THOMPSON, 1969; LIMA, 1981; CORRÊA, 1989; YUSUF et al., 2001 e GUNEY et al., 2006), a adição de cal hidratada reduz o IP dos solos, o que implica em uma melhora na trabalhabilidade do material na construção da camada do pavimento, assim como maior facilidade de compactação. Segundo Baptista (1976), a redução do IP é atribuída ao aumento do limite de plasticidade (LP) e à diminuição do limite de liquidez (LL) do solo.

A redução do IP é sensível nas primeiras horas após a adição de cal e, depois de dois ou três dias não acontecem maiores mudanças neste parâmetro. Segundo Herrin e Mitchell (1967), o emprego de cal virgem é mais efetivo na redução do IP do que a adição de cal hidratada.

São vários os fatores que afetam as mudanças na plasticidade do material estabilizado, tais como: o tipo de solo, tipo e teor de cal utilizada e o tempo de cura da mistura. Por exemplo, quanto mais plástico um determinado material é, maior será a redução do índice de plasticidade. Segundo Thompson (1966), quantidades elevadas de óxido de cálcio em alguns tipos de cal hidratada produzem reduções mais efetivas do IP, e essas reduções são mais notórias nos menores teores do aditivo. Isto é, as maiores reduções do índice de plasticidade dos solos é observada nos teores de 1% até 4% de cal hidratada (QUBAIN et al., 2000).

Segundo Basma e Tuncer (1990), a adição de cal hidratada nos solos modifica o tamanho efetivo das partículas e, portanto, altera a classificação do material. Esses autores realizaram estudos em um solo classificado como CH, segundo a USCS (*Unified Soils Classification System*). Depois de 28 dias de cura, o solo tratado com 8% de cal hidratada, reduziu o conteúdo de partículas de argila de 57% até menos que 2%. Assim, a mistura solo cal, em vez de ser classificada como CH, foi classificada como um solo com comportamento similar a um ML.

2.3.2. Propriedades de compactação

As propriedades geotécnicas do solo, de interesse à pavimentação, tais como capacidade de suporte, expansão, resistência, permeabilidade e compressibilidade, são dependentes da umidade e da massa específica nas quais é compactado. De modo geral, o bom comportamento de um material, em serviço, exige determinado nível de compactação, sendo que energias maiores de compactação representam melhores características geotécnicas dos solos.

A adição de cal hidratada altera as características de compactação dos solos, principalmente pela mudança da distribuição granulométrica dos materiais. Segundo o TRB (1987), diferentes autores têm notado que solos estabilizados ou modificados com cal apresentam menor massa específica seca máxima (MES_{max}) que o solo sem cal, para a mesma energia de compactação. Geralmente, para teores elevados de cal, o decréscimo da MES_{max} é mais notório. Segundo Sweeney et al. (1988), a cimentação promovida pela adição de cal desenvolve pontos de contato das bordas com as faces dos grãos do solo, formando uma estrutura do tipo *house of cards* (castelo de cartas, tradução livre), que exige maior energia de compactação.

Em relação à umidade ótima de compactação (w_{ot}), a incorporação de cal incrementa a demanda de água e, quanto maior a porcentagem do aditivo utilizado no solo, maior será a umidade ótima da mistura para saturar as partículas de cal hidratada (SIVAPULLAIAH et al., 1998).

As curvas de compactação (massa específica seca versus umidade), das misturas de solo cal apresentam uma forma mais achatada do que as curvas de compactação dos solos naturais. Esse formato achatado indica a facilidade de alcançar uma MES_{max} em uma faixa maior de umidade. Por outro lado, estas mudanças nas inclinações e picos da curva de compactação podem representar economia significativa de tempo, esforço e energia (ISMAIEL, 2006).

Vale notar que, apesar da MES_{max} dos solos estabilizados com cal hidratada apresentar valores inferiores ao do solo sem cal, a resistência mecânica da mistura

solo cal, determinada através de ensaios de resistência a compressão simples e à tração por compressão diametral, é superior.

De modo geral, os estudos em campo têm demonstrado que camadas de pavimentos construídas com solos estabilizados com cal hidratada apresentam menor sensibilidade a variações na umidade de compactação, quando comparadas com as compostas de solos sem cal (NLA, 2004).

2.3.3. Índice de Suporte Califórnia (ICS) ou Califórnia Bearing Ratio (CBR)

O ensaio de CBR tem sido bastante utilizado no meio rodoviário devido à sua extensa difusão. Porém, este procedimento foi desenvolvido para materiais granulares não cimentados e, por tal motivo, não é recomendado para ser empregado nos solos tratados com cal (TRB, 1987). Apesar disso, muitos pesquisadores têm empregado este ensaio para obter alguma noção do incremento da capacidade de suporte dos solos estabilizados com cal. Segundo Leandro (2005), o ensaio de CBR pode ser utilizado para avaliar o efeito imediato da adição de cal aos solos.

Segundo Thompson (1969), Baptista (1976), Lima (1981), Corrêa (1989) e Leandro (2005), o valor de CBR aumenta com a adição de cal, independentemente da cura ou da reatividade dos solos. De modo geral, os solos estabilizados com cal, compactados e imersos logo após a compactação durante 96 horas, apresentam valores de até três vezes maiores que do solo sem cal.

Usualmente, os solos estabilizados com cal apresentam valores elevados de CBR, superiores a 100%, não adequados para o dimensionamento de estruturas de pavimentos, nas metodologias que empregam este parâmetro. Algumas agências recomendam fixar o CBR máximo, para misturas solo cal, em 15% (NAASRA, 2008). Nesse sentido, a AASHTO (1993) recomenda substituir o ensaio de CBR pelo ensaio triaxial cíclico para obtenção do Módulo de Resiliência (MR), para caracterizar os materiais utilizados na construção de pavimentos.

Nos casos em que o ensaio de CBR não é realizado, resulta indispensável a determinação da expansão ou variação volumétrica dos materiais estabilizados

com cal hidratada. A adição de cal a solos expansivos reduz consideravelmente o potencial de variação volumétrica do material. Segundo a *National Lime Association* (NLA, 2004), a estabilização de alguns solos com cal representou a redução de expansões a valores inferiores a 0,1%. Sweeney et al. (1988), por exemplo, reduziram a expansão de solos argilosos muito plásticos de 12% até 0,5%, com adição de apenas 0,5% de cal hidratada.

2.3.4. Resistência à compressão simples

O ensaio de compressão simples é comumente utilizado para obter parâmetros de resistência de solos estabilizados com aditivos cimentantes como cimento Portland e cal hidratada, entre outros. Embora este ensaio não represente da melhor maneira as condições reais de campo, é um dos mais utilizados nos laboratórios rodoviários para quantificar o ganho de resistência à compressão simples (RCS) das misturas do tipo solo cal. Thompson (1966), por exemplo, utilizou a RCS para determinar a reatividade dos solos à adição de cal hidratada. Segundo esse autor, ganhos substanciais neste parâmetro indicam reatividade dos solos à presença de cal hidratada.

Segundo Jung e Bobet (2008), existem três fatores que influenciam diretamente o ganho de resistência à compressão simples das misturas solo cal:

- a) a reatividade do solo;
- b) o teor e o tipo de cal;
- c) o tempo e as condições de cura.

O solo deve ser reativo à presença de cal para aumentar sua resistência, isto é, a alumina e a sílica devem se encontrar em estado livre para reagir com os cátions de cálcio. Também a qualidade e a quantidade de cal utilizada nas misturas influenciam diretamente na ligação entre os grãos do solo. Já o tempo de cura necessário para ativar as reações pozolânicas depende da mineralogia do solo e da presença de outros compostos no solo que possam interferir no processo das reações.

De modo geral, a adição de cal hidratada a solos finos aumenta a resistência à compressão simples. Esse incremento na resistência é atribuído às reações pozolânicas que se sucedem em curto e médio prazos após a compactação, e que podem se estender por longos períodos, inclusive anos. Embora o aumento da resistência aconteça mais lentamente com a cal hidratada do que com o cimento Portland, as misturas de solo cal, após anos, podem alcançar RCS de 7.000 kPa até 10.000 kPa (NLA, 2004).

A experiência mostra que o valor máximo de resistência à compressão simples é obtido para um teor ótimo de cal hidratada determinado em laboratório. Teores superiores ao ótimo não representam ganhos significativos na RCS das misturas e, em alguns casos, reduzem a resistência. Para Molina et al. (2004), são necessárias apenas pequenas quantidades de cal hidratada para estabilizar os finos presentes nos solos, e quantidades superiores podem induzir à redução da resistência da mistura. Já Solanki et al. (2010) explicam que o excesso de cal hidratada, isto é, aquela parte do aditivo que não reage com o solo, tem um comportamento semelhante ao de um filler de baixa resistência, resultando em uma mistura com resistência inferior.

Segundo Locat et al. (1990), a estabilização com cal hidratada aumenta significativamente a coesão dos solos com o tempo de cura, e esse incremento é refletido no ganho de resistência à compressão simples. Esses autores avaliaram a incorporação de 4% de cal hidratada a solos argilosos do Canadá e notaram que após 100 dias de cura, a RCS aumentou até 1.000%, até alcançar valores próximos de 1,0 MPa. Para os autores, o tempo de cura é um fator determinante no incremento da resistência das misturas solo cal.

Também tem sido estudado o envelhecimento dos solos estabilizados com cal hidratada, isto é, o tempo transcorrido entre a mistura dos materiais e a compactação. Christensen (1969) avaliou misturas de solo cal envelhecidas por 24 horas e notou que este tempo é desfavorável para o incremento da resistência. O autor observou que as misturas que foram submetidas a este condicionamento apresentaram RCS inferiores, quando comparadas com os materiais que foram compactados imediatamente após a mistura da cal hidratada com o solo. Contudo,

Sweeney et al. (1988) afirmam que o envelhecimento não é prejudicial na resistência das misturas de solo cal, desde que sejam utilizados teores de cal hidratada inferiores a 2%.

Outro parâmetro que afeta diretamente o aumento da resistência dos solos estabilizados com cal hidratada é a temperatura durante o tempo de cura. Segundo Jung (2008), nos solos considerados de granulometria fina ou solos coesivos, os maiores aumentos da resistência são obtidos nas temperaturas maiores. Já as areias apresentam aumento constante ao longo de todos os intervalos de temperatura. De modo geral, o autor afirma que temperaturas elevadas facilitam as reações entre o solo e a cal hidratada.

O critério de utilização de solos estabilizados com cal na construção de camadas de bases e sub-bases de pavimentos baseia-se, usualmente, na resistência à compressão simples. Os valores mínimos estabelecidos para este parâmetro variam segundo as agências responsáveis pelo projeto e construção de estradas. Por exemplo, o Procedimento Illinois apresentado no *State of the Art 5 - Lime Stabilization* (TRB, 1987), estabelece para camadas de base de pavimentos o valor mínimo de RCS de 1.030 kPa, após 28 dias de cura, e para sub-bases recomenda valores de RCS superiores a 690 kPa. Para a *National Lime Association* (2004), as sub-bases devem apresentar resistência à compressão simples maior que 700 kPa, e as bases devem ter RCS superiores a 1.400 kPa, aos 28 dias de cura.

2.3.5. Resistência à tração por compressão diametral

De maneira geral, as misturas solo cal, constituintes de camadas estruturais de pavimentos, exibem um comportamento típico de placa devido à elevada resistência e rigidez. Dessa forma, as pressões transmitidas pela ação do tráfego são reduzidas, gerando tensões de flexão consideráveis na própria camada estabilizada. Assim, é necessário conhecer o comportamento à tração dos solos estabilizados com cal.

O ensaio de resistência à tração por compressão diametral (RT) é considerado um parâmetro adequado para determinar as tensões de tração de misturas solo cal (*National Lime Association*, 2004). Segundo Thompson (1966), a resistência à

tração por compressão diametral (RT) pode ser relacionada com a resistência à compressão simples (RCS), da seguinte maneira: $RT = 0,13 \times RCS$; por outro lado, o TRB (1987) recomenda a relação: $RT = 0,25 \times RCS$. Vale notar que essas correlações são empíricas e se aplicam apenas a solos desses estudos.

Assim como acontece na RCS, a resistência à tração por compressão diametral (RT) dos solos finos aumenta com a adição de cal. Este incremento é também atribuído às reações pozolânicas que acontecem em curto e longo prazos e são influenciadas pelo tipo de solo, pela quantidade e tipo de aditivo adicionado no solo e pelo tempo de cura da mistura solo cal.

2.3.6. Módulo de Resiliência

A maioria dos estudos utilizam ensaios considerados estáticos para avaliar a resistência das misturas de solo cal, tais como CBR, RCS, RT, entre outros. Contudo, poucos pesquisadores têm investigado as características de solos estabilizados com cal hidratada sob a ação de carregamento cíclico.

As propriedades de rigidez ou resiliência das camadas do pavimento definem a eficiência dos materiais empregados para distribuir as tensões resultantes do carregamento cíclico ou dinâmico no sistema estrutural. Portanto, segundo a AASHTO (2002), o módulo de resiliência deve ser considerado como uma propriedade fundamental no processo de dimensionamento de pavimentos. O módulo de resiliência é determinado em laboratório através do ensaio triaxial cíclico, para materiais rodoviários componentes das bases, sub-bases e subleitos.

Como descrito em itens anteriores, a adição de cal hidratada a solos finos melhora substancialmente a resistência dos solos através das reações pozolânicas, que ocorrem em curtos e longos períodos de tempo. De modo geral, o aumento da resistência acontece em concomitância com o enrijecimento da mistura, mudando sua relação tensão deformação. Segundo Little (1999), as misturas do tipo solo cal apresentam maior resistência à tensão desviatória e são mais resistentes à deformação permanente. Assim, a rigidez dos solos estabilizados com cal é de 10 a 25 vezes maior que a dos solos sem o aditivo.

Usualmente, o comportamento mecânico das camadas de pavimentos pode ser considerado como não linear elástico, dependente do estado de tensões. Assim, para Little (1999), é mais realista e prático caracterizar a camada do pavimento avaliada em termos de Módulo de Resiliência (MR). Vale notar que, em bases, sub-bases e subleitos, este parâmetro é dependente do estado de tensões, da temperatura, do grau de compactação, do teor de umidade e da duração do carregamento.

Segundo Thompson (1966), McDonald (1969) Neubauer e Thompson (1972) e Qubain et al. (2000), a adição de teores de 4% e 6% de cal hidratada aumentam imediatamente o módulo de resiliência dos solos em até 300%, quando comparados com os solos naturais. Já nos casos em que foi avaliado o tempo de cura elevado, a adição de cal hidratada incrementou o módulo até em 1.000%.

Para Achampong et al. (1997), os solos classificados como ML e CL segundo a USCS, são os que apresentam maiores incrementos no valor de módulo de resiliência com a adição de cal hidratada. Esses autores realizaram o ensaio triaxial cíclico em misturas de solos do tipo CL e ML estabilizados com teores de 2 a 6% de cal hidratada. As misturas foram compactadas no equipamento miniatura tipo Harvard, com dimensões de 31,75 mm de diâmetro e 69,85 mm de altura. Os resultados mostraram que, mesmo pequenas quantidades de cal hidratada (2% e 3%), aumentaram consideravelmente os valores de módulo de resiliência. Os autores ainda salientam que o incremento da tensão desvio no ensaio triaxial cíclico reduz o valor do MR.

Little (1999) também utilizou o ensaio triaxial cíclico para obter uma estimativa do valor do módulo de resiliência em laboratório, de misturas estabilizadas com cal hidratada. As misturas apresentaram valores de MR de 210 a 400 MPa, após cinco dias de cura em câmara condicionada a 38° C.

As características mecânicas de um solo laterítico estabilizado com cal foram estudadas por Lovato (2004). Nesse estudo, o autor investigou em laboratório o efeito da adição de cal calcítica e cal dolomítica (em teores crescentes de 3%, 4% e 5%), nas propriedades resilientes do solo laterítico, com o objetivo de utilizar os

materiais resultantes em camadas de pavimentos semi-rígidos. Os valores de MR obtidos com a adição 3% de cal calcítica após 56 dias de cura foram superiores a 5.000 MPa e, com a adição de 3% de cal dolomítica, o MR registrou valores próximos a 1.600 MPa.

Solanki et al. (2010) avaliaram o efeito da incorporação de 3, 6 e 9% de cal hidratada nas propriedades resilientes de quatro solos argilosos com MR próximo de 100 MPa. A adição de 3% de cal aumentou o MR até alcançar valores próximos de 700 MPa, nos quatro solos. Já a adição de 6% e 9% de cal não representou um aumento do módulo de resiliência proporcional ao incremento do aditivo, sendo os valores de MR dessas misturas similares aos obtidos nas misturas com 3% de cal.

Já que o ensaio triaxial cíclico é executado em laboratório, surge o questionamento sobre a representatividade do ensaio em relação às condições de campo. Como alternativa às estimativas realizadas em laboratório, alguns autores recomendam realizar retroanálise nos dados obtidos em ensaios de campo, como o FWD (*Falling Weight Deflectometer*) e o DCP (*Dynamic Cone Penetrometer*), para assim obter valores mais reais de módulo de resiliência. Thompson e Figueroa (1980) e Biczysko (1996), através desses equipamentos, obtiveram valores de MR de 210 até 3.500 MPa em subleitos de estradas estabilizados com cal hidratada, nos Estados Unidos. Para Little (1999), esses valores de MR são considerados efetivos em termos de distribuição de tensões e auxiliam na redução da deformação total do pavimento.

Jung et al. (2008) também utilizaram o FWD para avaliar sete rodovias construídas com bases, sub-bases ou subleitos de solos estabilizados com cal, no Estado de Indiana, Estados Unidos. Os pavimentos avaliados estavam em serviço havia 5 e 10 anos, no momento em que foram estudados por esses pesquisadores. Os resultados da retroanálise mostraram que o módulo de resiliência era de 4 a 11 vezes maior do que o MR dos solos naturais. Os valores de módulo variaram entre 96 MPa e 1.960 MPa, segundo a camada avaliada, desde bases até subleitos. Os autores salientam que se esse incremento na rigidez tivesse sido incluído no dimensionamento dos pavimentos, poderiam ser construídas estruturas com espessuras inferiores.

2.3.7. Durabilidade

A durabilidade de um material pode ser definida como a capacidade de manter sua integridade estrutural sob as condições a que é exposto. Os principais fatores que atuam e afetam a durabilidade dos materiais rodoviários são as condições ambientais, dadas pelas variações de temperatura e umidade, e as solicitações de carga, representadas pelo tráfego veicular.

Os materiais cimentados têm sido testados de diversas maneiras, tanto em laboratório como em campo, com o objetivo de avaliar sua durabilidade em relação aos efeitos do clima. Assim, usualmente no laboratório são utilizados os parâmetros de perda de resistência ou rigidez dos materiais, decorrentes da aplicação de ciclos de molhagem e secagem, ou ciclos de congelamento e degelo.

Para Diamond e Kinter (1962), o tratamento de solos argilosos com pequenos teores de cal hidratada, acompanhado de uma apropriada compactação e tempo de cura necessário, resulta em um material altamente cimentado com excelente capacidade de suporte e resistência à ação deletéria da água. As observações de campo realizadas por Qubain et al. (2000) mostram que os benefícios da estabilização de solos argilosos com cal hidratada podem ser conservados por períodos de 20 a 40 anos.

A avaliação da redução do valor de resistência à compressão simples, pela imersão em água dos corpos de prova, é uma técnica muito utilizada por diversos pesquisadores como parâmetro para aquilatar a durabilidade de materiais cimentados (LITTLE, 1999; BHATTACHARJA e BHATTY, 2003; MOLINA et al. 2004; LEANDRO, 2005). De maneira geral, os resultados destes estudos mostram que a ação deletéria da água nas misturas do tipo solo cal demanda especial atenção. Little (1999), por exemplo, afirma que se os ciclos de molhagem e secagem acontecem depois que as reações pozolânicas ocorreram, a resistência à compressão simples é reduzida apenas em torno de 10%. Entretanto, se a mistura é submetida aos ciclos de molhagem e secagem antes que as reações pozolânicas sejam desenvolvidas, o efeito prejudicial no solo estabilizado com cal pode ser mais significativo, podendo alcançar perdas de até 40% da RCS.

Kennedy et al. (1987) avaliaram a efetividade da cal hidratada e do cimento Portland na estabilização de três argilas no Estado de Texas, Estados Unidos. Os solos foram estabilizados com 4% de cal hidratada e, aos 28 dias de cura apresentaram RCS em torno de 2.500 kPa, e após imersão a resistência foi reduzida para 2.200 kPa. De modo geral, os autores concluíram que nos solos altamente plásticos o emprego de cal hidratada é muito mais efetivo do que o cimento Portland, principalmente em relação à durabilidade das misturas.

A distribuição do tamanho dos grãos também afeta diretamente a conservação da resistência das misturas de solo cal. No estudo realizado por Petry e Wohlgemuth (1989) notou-se que os materiais com granulometrias mais finas são os que apresentam maior resistência à ação deletéria da água.

Outros ensaios também são utilizados para avaliar o efeito prejudicial da água nos materiais rodoviários. Graves et al. (1988), por exemplo, utilizaram o LBR (Limerock Bearing Ratio), uma variação do CBR muito utilizado no Estado da Flórida, para avaliar misturas de areia e calcita estabilizadas com 1% de cal hidratada. Os corpos de prova utilizados neste ensaio foram imersos em água durante 60 dias. Os autores concluem que as misturas com até 60% de areia apresentaram um incremento na capacidade de suporte de até 450%, após imersão durante 60 dias.

2.4. DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS COM CAMADAS DE CAL

Neste item são apresentadas algumas considerações sobre os procedimentos utilizados principalmente no exterior para o dimensionamento de estruturas de pavimentos que incluem camadas de solos estabilizados com cal.

2.4.1. Solo cal como camada estrutural

A estabilização de solos problemáticos com cal é usualmente utilizada para melhorar a trabalhabilidade dos solos e obter uma plataforma de trabalho adequada para construção das camadas superiores de sub-base, base e revestimento. Simultaneamente, o solo estabilizado com cal reduz seu potencial

expansivo e incrementa sua capacidade de suporte devido ao enrijecimento da mistura estabilizada ao longo do tempo.

Geralmente, essa camada de solo cal não é considerada como uma camada estrutural contribuinte para o alívio de tensões e deformações do pavimento. No entanto, diversas pesquisas realizadas em laboratório (Achampong et al., 1997; Little, 1999; Qubain et al., 2000; Yusuf et al., 2001; Lovato, 2004; Solanki et al., 2010; Gutiérrez Klinsky, 2013) e em campo (Thompson e Figueroa, 1980; Bicztsko, 1996; Little, 1999; Jung et al. 2008), comprovaram que os valores de módulo de resiliência obtidos nas misturas de solo cal é suficiente para ser considerado efetivo em termos de distribuição de tensões e auxílio na redução da deformação total do pavimento.

Assim, a camada de solo estabilizada com cal poderia ser incluída no dimensionamento da estrutura do pavimento. Contudo, no Brasil existem poucas referências que orientem para o emprego adequado desse material nos procedimentos de cálculo. O Manual de Pavimentação do DNIT (Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes), por exemplo, faz referência a bases e sub-bases estabilizadas quimicamente com cal, mas não atribui um valor de coeficiente de equivalência estrutural (K) para ser utilizado no método de dimensionamento do antigo DNER (Departamento Nacional de Estradas de Rodagem).

Já o Departamento de Estradas e Rodagem do Estado de São Paulo (DER-SP), na Instrução de Projeto de Pavimentação (IP-DE-P00/001), faz referência da possibilidade de uso de bases e sub-bases estabilizadas com cal. Nesse documento recomenda-se realizar o dimensionamento da estrutura do pavimento pelo método do antigo DNER, seguido de uma verificação mecanicista através do emprego de programa computacional. Para isso, são fornecidos alguns valores recomendados para as propriedades dos materiais de pavimentação (Coeficiente de Poisson e Módulo de Resiliência); contudo, o solo cal não é relacionado nessa lista de materiais.

Assim, constata-se a carência de conhecimento técnico das misturas de solo cal, com relação às suas propriedades mecânicas necessárias para o correto dimensionamento da estrutura do pavimento.

2.4.2. Procedimentos utilizados no exterior

Segundo Little (1999), para considerar os benefícios da contribuição estrutural das camadas de solo cal, o ponto de partida é garantir que o material seja suficientemente modificado para alterar as propriedades de resistência, de rigidez, de deformação permanente e de durabilidade. Assim, a verificação da contribuição estrutural do solo cal deve começar por um programa laboratorial adequado para dosagem das misturas de solo cal, isto é, determinação do teor de cal ideal, em função das propriedades de resistência e rigidez. Esses valores são de necessidade primária para o dimensionamento da estrutura do pavimento.

2.4.2.1. Programa laboratorial para dosagem de solo cal

Existem diversos métodos utilizados para dosagem de misturas de solo cal. Para a *National Lime Association* (NLA, 2006) dos Estados Unidos, o emprego do parâmetro de resistência à compressão simples (RCS) é suficiente para determinar o teor ótimo de cal para estabilizar um solo. De acordo com essa associação, dependendo da estrutura do pavimento, misturas de solo cal com valores de RCS de 700 kPa aos 28 dias de cura podem ser utilizadas como camadas de sub-base e aquelas com RCS superiores a 1.400 kPa poderiam ser usadas com bases de pavimentos.

Já o *Transportation Research Board* (1987) no Procedimento Illinois apresentado no *State of the Art 5 – Lime Stabilization*, estabelece que um solo está suficientemente estabilizado para seu emprego em bases de pavimentos se apresentar em laboratório o valor mínimo de RCS de 1.030 kPa, após 28 dias de cura. Se a mistura de solo cal apresentar valores de RCS superiores a 690 kPa, também pode ser considerada para sua utilização em camadas de sub-base.

Assim, de acordo com os relatórios dessas instituições, a dosagem da mistura de solo cal em laboratório deve ter o objetivo de alcançar esses valores de resistência à compressão simples para considerar o solo estabilizado.

2.4.2.2. Obtenção do módulo de resiliência das misturas de solo cal e coeficiente de Poisson

A determinação da resistência à compressão simples em laboratório não é suficiente para o desenvolvimento dos cálculos de dimensionamento do pavimento. Os programas computacionais utilizados para a verificação mecanicistas têm como um dos parâmetros de entrada o valor do módulo de resiliência (MR) da camada.

Little et al. (1995), recomendam determinar um valor real do MR da mistura de solo cal em laboratório. Diversas pesquisas obtiveram esse parâmetro por meio do ensaio de compressão triaxial cíclica em corpos de prova cilíndricos com dimensões de 100mm de diâmetro e 200mm de altura.

Outros estudos também têm realizado levantamentos com FWD (*Falling Weight Deflectometer*) em rodovias construídas com solo cal para obter bacias de deflexão e, por meio de retroanálise, determinar o módulo de resiliência de campo (LITTLE, 1999).

Nos casos em que não é possível executar o ensaio de compressão triaxial cíclica para obter os valores de MR, é possível utilizar correlações para determinar esse parâmetro a partir de outras propriedades da mistura. Vale notar que essa técnica não é a mais recomendada, mas é utilizada para níveis de projetos preliminares. A resistência à compressão simples (RCS) aos 28 dias de cura é um parâmetro bastante utilizado para estimar o valor de MR, como mostra a Equação 2.1, proposta por Thompson (1966).

$$MR = 0,124(RCS) + 9,98 \quad (\text{Equação 2.1})$$

Onde: MR= Módulo de resiliência em ksi

RCS= Resistência à compressão simples em psi.

O módulo de resiliência de misturas de solo cal também poderia ser estimado por meio da experiência de projetos anteriores com solos similares (JAMESON, 2013). Nesse sentido, diversas agências rodoviárias apresentam uma faixa de valores de MR de misturas de solo cal que poderiam ser utilizadas para estimar o valor desse parâmetro em projetos preliminares de dimensionamento de pavimentos. Na Tabela 2.1 é apresentada uma faixa de valores de MR comumente utilizada por agências rodoviárias em países do estrangeiro.

Outro parâmetro necessário nos programas computacionais para o dimensionamento de pavimentos é o coeficiente de Poisson. As agências citadas na Tabela 1 recomendam valores que oscilam de 0,15 a 0,35.

Tabela 2.1: Valores de MR recomendados por agências rodoviárias internacionais para misturas de solo cal

Agência Rodoviária	MR recomendado (MPa)	Referência Bibliográfica
AASHTO	103-206	AASHTO (2002)
Texas DOT	207-310	Texas DOT (2005)
Florida DOT	< 85	Florida DOT (2008)
AUSTROADS	< 150	Jameson (2013)
Método de Dimensionamento Inglês	< 100	Highways Agency (2006)
Método de Dimensionamento Francês	< 120	LCPC (1997)

2.4.2.3. Características de fadiga e fratura das misturas de solo cal

A estabilização de bases e sub-bases com cimento Portland, cal, cal-cinza ou ligante asfáltico produz uma melhoria considerável da rigidez dos materiais. Concomitantemente, a distribuição das tensões na estrutura do pavimento é modificada e surge o risco de desenvolvimento de fadiga por flexão nessas camadas, devido tanto ao enrijecimento dos materiais subjacentes ao revestimento, como à ação de cargas pesadas.

Sabe-se que nos materiais estabilizados em camadas de pavimentos, as tensões de tração são o principal mecanismo de desenvolvimento da fadiga. Segundo Bernucci et al. (2008), esse fenômeno ocorre por meio de ações mecânicas que não parecem

críticas por si, se comparadas à resistência sob carregamento monotônico, mas na verdade são decisivas para a vida útil do material. Já Little (1999), afirma que seriam necessárias tensões muito elevadas para desenvolver ruptura à tração em uma única aplicação de carga, contudo, aplicações cíclicas de carga podem induzir a níveis de tensões elevados que resultam no início de trincas e sua propagação.

Ensaio relacionados à fadiga não são realizados em misturas de solo cal, já que, usualmente, esse fenômeno é relacionado à resistência tração e à rigidez do material (LITTLE, 1999). Estudos do Departamento de Transportes de Texas (TxDOT) realizados por Little et al. (1999) recomendam estabelecer limites para a resistência à compressão simples, resistência à tração e módulo de resiliência das misturas de solo cal, para poder controlar o trincamento relacionado à fadiga nas misturas de solo cal.

Swanson e Thompson (1967) realizaram estudos de fadiga em vigas de diversas misturas de solo cal submetidas a várias tensões de flexão e estabeleceram uma correlação (Equação 2.2) entre a relação de tensão (S = relação entre a tensão de flexão induzida no material e a resistência a flexão do material) e o número de ciclos de aplicação até a ruptura por fadiga (N).

$$S = 0,923 - 0,058\log(N) \quad (\text{Equação 2.2})$$

Para determinar a resistência à flexão de misturas de solo cal podem ser utilizadas estimativas em função da resistência à compressão simples. O TRB (1987), afirma que a resistência à flexão da mistura de solo cal pode ser estimada como 25% da RCS. Dessa forma, a relação de tensão (S) pode ser calculada pela Equação 2.3 (YUSUF et al. 2001).

$$S = \frac{\sigma_{flexão}}{0,25 \times RCS} \quad (\text{Equação 2.3})$$

Onde $\sigma_{flexão}$ é a tensão máxima de flexão aplicada na camada de solo cal. Dessa forma as equações 2 e 3 podem ser utilizadas para estimar a vida de fadiga, isto é, o início do trincamento das misturas de solo cal.

Little (1999) recomenda limitar a tensão de flexão na camada de solo cal em 50% da resistência à flexão do material para garantir uma vida de serviço de aproximadamente $N=10^7$ ciclos do eixo padrão, ou para obter uma camada resistente à fadiga. Esse autor ainda considera que se a resistência à flexão da mistura de solo cal é estimada como 25% da RCS, então as tensões desenvolvidas na camada não devem ultrapassar 12,5% da RCS.

2.4.2.4. Deformação permanente em estruturas de pavimentos com camadas de solo cal

Para Little (1999), o emprego de camadas de solo cal nas estruturas de pavimentos permite ao projetista construir sub-bases e bases com boa resistência à ruptura por cisalhamento e à deformação permanente.

Diversos estudos laboratoriais desenvolveram relações e modelos para estimar o surgimento deste defeito. Esses modelos foram desenvolvidos através do próprio ensaio de compressão triaxial cíclico utilizado para determinação do MR. Para isso, Little (1998) recomenda saturar por capilaridade os corpos de prova durante 10 dias ou até equilíbrio da umidade. Após condicionamento dos corpos de prova, o ensaio é executado e forma tradicional e, com os resultados, é possível calcular o nível de deformação permanente acumulado devido à aplicação dos pares de tensão durante o ensaio.

Thompson e Nauman (1993), por exemplo, desenvolveram o modelo da Equação 2.4, para estimar o potencial de deformação permanente das misturas do tipo solo cal.

$$RR = \frac{RD}{N} = \frac{A}{N_d^B} \quad \text{(Equação 2.4)}$$

Onde RR = taxa de evolução da deformação permanente;

RD = afundamento devido à deformação permanente;

N_d = número de ciclos até surgimento da deformação permanente;

A , B e N = constantes de calibração determinados em laboratório ou campo.

De acordo com Yusuf et al. (2001), é possível determinar o potencial de deformação permanente das misturas de solo cal com a relação recomendada pelo Manual de Dimensionamento do Instituto de Asfalto (Equação 2.5).

$$N_d = 1,365 \times 10^{-9} (\epsilon_v)^{-4,477} \quad (\text{Equação 2.5})$$

Onde: N_d = número de ciclos até início de deformação permanente no subleito;

ϵ_v = tensão vertical no topo do subleito

Para Thompsom (1990) e Little (1995), limitar as tensões verticais atuantes na camada de solo cal em 50% da resistência à compressão simples obtida em laboratório, previne o desenvolvimento de deformação permanente. Segundo Yusuf et al. (2001), tensões verticais inferiores a 50% da RCS permitem a recuperação elástica de misturas do tipo solo cal.

2.5. EXECUÇÃO DE CAMADAS DE SOLO CAL

Na continuação serão detalhadas as recomendações da NLA (2004) para a construção e aplicação de cal hidratada na estabilização de subleitos. Os assuntos abordados são relacionados principalmente à qualidade e considerações de controle do produto final.

2.5.1. Transporte e entrega da cal hidratada

Usualmente a cal hidratada é transportada em caminhões, como exemplifica a Figura 2.2. Cada carregamento deve ser acompanhado de um certificado especificando as características químicas da cal e a quantidade de material que está sendo transportada.



Figura 2.2: Exemplo de caminhões utilizados para transporte de cal hidratada.

FONTE: NLA (2004)

2.5.2. Estabilização de subleitos ou sub-bases

Depois de estabelecida a terraplenagem no nível desejado, o subleito pode ser escarificado na profundidade e largura especificada, como mostra a Figura 2.3, e depois é pulverizado parcialmente. É desejável remover os materiais estranhos e as partículas com tamanho superior a 75mm, como por exemplo: raízes, turfas e agregados. A escarificação e pulverização do subleito ajudam na obtenção de uma maior área superficial de contato do solo no momento da adição da cal.



Figura 2.3: Escarificação prévia à adição de cal. Fonte: NLA (2004)

Nos inícios da estabilização de solos com cal era uma prática comum escarificar o subleito previamente ao espalhamento da cal. Na atualidade, a disponibilidade de equipamentos e misturadoras mais sofisticadas, permite realizar a aplicação da cal sem a necessidade de escarificação. Apesar disso, não é recomendável realizar o

espalhamento da cal em superfícies muito lisas já que incrementa-se a possibilidade de perda de cal pelo vento, principalmente se a mistura dos materiais não é iniciada imediatamente. Para evitar perdas de cal nas laterais, podem ser construídas pequenas barreiras de solo nas bordas da plataforma, como mostra a Figura 2.4.



Figura 2.4: Construção de barreiras laterais de solo para evitar perdas de cal.

Fonte: NLA (2004)

2.5.3. Distribuição da cal em campo

A cal hidratada deve ser uniformemente distribuída, na porcentagem determinada em laboratório, com caminhões devidamente equipados, como o apresentado na Figura 2.5. A taxa de aplicação da cal deve ser controlada utilizando uma bandeja metálica com área conhecida, que deve ser situada entre as rodas do caminhão. O peso determinado na bandeja permite calcular a taxa de aplicação da cal em campo.

A distribuição da cal hidratada não deve ser realizada em dias de vento excessivo, devido aos riscos de perda de material. Nos casos em que a obra seja executada próxima a áreas urbanas ou adjacentes à tráfego existente, deve se recorrer ao uso de equipamentos especiais ou ao emprego.



Figura 2.5: Distribuição de cal hidratada. Fonte: NLA (2004)

2.5.4. Mistura e umedecimento preliminar

A mistura preliminar é recomendada para distribuir uniformemente a cal no solo e também para pulverizá-lo e prepará-lo para a posterior adição de água, que é a que iniciará as reações químicas do solo cal. Essa mistura preliminar pode ser realizada através da escarificação com enxada ou com outros equipamentos disponíveis, como os mostrados na Figura 2.6. Nos casos em que seja possível é desejável utilizar equipamentos mais modernos, com misturadores rotativos (Figura 2.7).



Figura 2.6: Escarificação após adição da cal na superfície do solo. Fonte: NLA (2004)



Figura 2.7: Equipamento com misturador rotativo para a mistura preliminar de solo cal. Fonte: NLA (2004)

Os misturadores rotativos podem ser utilizados para garantir a mistura completa do solo, da cal e da água. Esses equipamentos também permitem a adição de água de forma simultânea à mistura do solo com a cal. Este é considerado o método ótimo para realizar a mistura dos três componentes: solo, cal e água.

Independentemente do método utilizado para adicionar água à mistura de solo cal, é essencial adicionar a quantidade suficiente para garantir a completa hidratação da mistura. Recomenda-se utilizar o teor ótimo de umidade determinado em laboratório e acrescentar mais 3% de água previamente à compactação, (Figura 2.8).

Para garantir a estabilização do trecho na espessura desejada, podem ser realizados furos de forma aleatória. A fenolftaleína pode ser usada como indicadora de presença de cal na mistura, já que muda de aparência clara para vermelha com pH variando de 8,3 até 10. Essa mudança de cor indica a profundidade da estabilização do solo com cal. Outros indicadores de pH podem medir valores superiores, caso exista a suspeita de emprego de cales com qualidade inferior à especificada.



Figura 2.8: Adição de água à mistura de solo cal. Fonte: NLA (2004)

Nos casos em que os solos a estabilizar sejam argilas pesadas, usualmente sugere-se realizar a mistura da cal-argila em duas etapas, com intervalos de 24 a 48 horas para permitir a cura da mistura. Durante este período de cura, a argila se torna mais friável, de modo que a pulverização pode ser alcançada mais rapidamente durante a mistura final.

Depois que a mistura está completa, a camada tratada de solo cal deve ser compactada levemente com compactador pé de carneiro seguido de um acabamento da superfície com compactador pneumático.

2.5.5. Tempo de cura

A mistura de solo cal compactada levemente deve curar o suficiente para permitir que as reações químicas produzam as mudanças desejáveis no material. A duração deste período de cura deve ser baseada no julgamento do engenheiro e é dependente do tipo de solo estabilizado. O período de 1 a 7 dias, usualmente é um tempo de cura adequado. Após esse tempo de cura, o solo deve ser misturado novamente antes da compactação final. Nos casos de solos com baixo índice de plasticidade ou nos casos em que o objetivo é apenas secar o solo com cal, o período de cura pode ser omitido.

2.5.6. Mistura final e pulverização

Para conseguir uma completa estabilização, é fundamental pulverizar a mistura adequadamente e garantir uma dispersão uniforme da cal no solo, como se mostra na Figura 2.9. A mistura e a pulverização devem ser realizadas até que 100% das partículas sejam inferiores a 25,4mm e pelo menos 60% do material passe na peneira de No. 4. Para este processo podem ser utilizados misturadores rotativos, similares aos mostrados na Figura 2.7.



Figura 2.9: Aspecto da camada de solo cal após mistura e pulverização. Fonte: NLA (2006)

Previamente à compactação final pode ser necessário acrescentar água na mistura de solo cal para manter a umidade 3% acima da umidade ótima determinada em laboratório.

Vale notar que, os passos de mistura final e pulverização podem ser omitidos nos casos em que na mistura preliminar sejam alcançados os requisitos de pulverização descritos acima.

2.5.7. Compactação

A mistura de solo cal deve ser compactada para alcançar pelo menos 95% da massa específica seca máxima (MES_{max}) obtida no ensaio de compactação Proctor em laboratório. Vale ressaltar que os valores obtidos devem-se basear nas amostras da mistura de solo cal e não apenas do solo puro.

As atividades de compactação do solo cal devem ser realizadas imediatamente após a mistura final. Usualmente, atrasos na compactação de até quatro dias após a mistura não são um problema, se a mistura foi levemente compactada após a mistura e se a umidade foi mantida durante esse período.

O equipamento utilizado na compactação deve estar de acordo com a espessura da camada que se deseja estabilizar. A compactação pode ser realizada em uma única camada utilizando compactadores pneumáticos pesados ou compactadores pé de carneiro (Figura 2.10) ou ainda, uma combinação de compactadores pé de carneiro e compactadores pneumáticos leves. Normalmente, a superfície final é acabada com um compactador de chapa lisa (Figura 2.11).

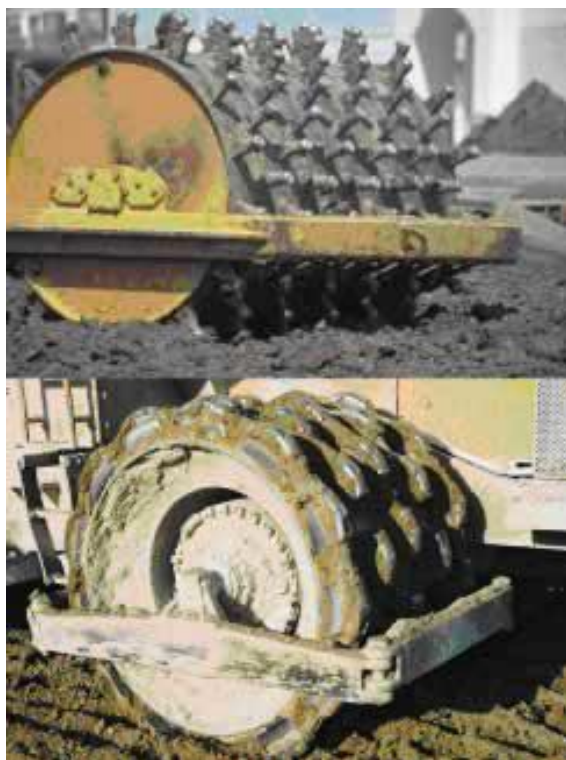


Figura 2.10: Compactadores pé de carneiro. Fonte: NLA (2004)



Figura 2.11: Compactadores de chapa lisa para acabamento da superfície da mistura de solo cal. Fonte: NLA (2004)

2.5.8. Cura final

Antes de se colocar a próxima camada sobre a mistura de solo cal, deve-se permitir o enrijecimento da camada de solo cal até que caminhões carregados possam trafegar na superfície da camada sem provocar deformações ou afundamentos de trilha de roda.

Durante a cura final deve-se manter a mistura de solo cal úmida o suficiente para garantir o ganho de resistência. Este período de cura final pode ser realizado de duas formas:

- a) *Cura úmida*: consiste em manter a superfície úmida utilizando um caminhão pipa leve e aplicando rolagem quando necessário;
- b) *Cura com membrana*: esse método envolve a selagem da camada compactada com uma imprimação de emulsão asfáltica, através de uma ou várias aplicações, como é ilustrado na Figura 2.12. Taxas de 0,45 até 1,10l/m² podem ser utilizadas satisfatoriamente.



Figura 2.12: Membrana de imprimação com emulsão asfáltica. Fonte: NLA (2004)

2.5.9. Considerações adicionais

Tráfego

A solução ideal para evitar o tráfego durante o período de estabilização de camadas de solo cal é desviar os veículos por rotas alternativas. Nos casos em que o tráfego tenha que ser mantido durante o período de cura final e antes da aplicação do revestimento do pavimento, recomenda-se limitar a passagem apenas de veículos mais leves para reduzir as possibilidades de danos à camada estabilizada. A experiência (NLA, 2004) tem comprovado que o tráfego de caminhões de até 25 toneladas não danifica as camadas de solo cal com cura de apenas 24 horas.

Em alguns casos o tráfego de veículos provoca afundamentos e trilhas de roda em pontos específicos, indicando uma inadequada homogeneização da mistura. Nesses casos, podem ser executadas atividades de recomposição da mistura de solo cal para substituir por material estabilizado adequadamente.

Limitações climatológicas

As operações de estabilização com cal demandam certo período de tempo e precisam de clima quente para produzir as reações que induzem aos ganhos de resistência. Como regra geral, a temperatura do ar deve ser de no mínimo 4°C na sombra. Se o objetivo da cal é apenas secar o solo para possibilitar a compactação

do mesmo, podem ser considerados climas mais frios. Em caso algum deve-se realizar a estabilização com cal em solos congelados.

Ação da chuva

As operações de distribuição de cal, mistura dos materiais e compactação da camada de solo cal podem ser realizadas de forma normal inclusive com precipitações leves. Nos casos em que a mistura de solo cal já foi realizada, a chuva pode reduzir a necessidade de adição de água no solo estabilizado.

Depois da compactação, a camada de solo cal é suficientemente impermeável para drenar superficialmente à água de chuva, de forma similar à uma via pavimentada. Assim, de acordo com a NLA (2004), os atrasos são mínimos na estabilização de solos com cal devido às precipitações.

Flexibilidade Construtiva

A flexibilidade durante a construção de camadas de solo cal é muito boa, já que as misturas podem ser re-trabalhadas se alguma contingência ocorre durante a estabilização do solo. Vale notar que, o solo cal pode ser re-trabalhado inclusive após o enrijecimento da mistura, (NLA, 2004).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. MATERIAIS

3.1.1. Cal Hidratada

A cal hidratada utilizada neste estudo tem o nome comercial de Proviacal do tipo CH-I. As principais características deste material estão resumidas na Tabela 3.1. Os teores de cal hidratada de 3%, 5% e 7% foram fixados para serem adicionados aos solos estudados.

Tabela 3.1: Composição Química da Cal Hidratada Proviacal

Parâmetro	Valores (%)
CaOd	63,22
MgO	0,44
SiO ₂ +RI	0,19
PPC	24,65
SiO ₂ +RI	0,31
Al ₂ O ₃	0,23
Fe ₂ O ₃	0,21

3.1.2. Solos

Para selecionar os solos procurou-se identificar o tipo de solos mais frequentes em subleitos da Rodovia Presidente Dutra BR-116. Assim, coletaram-se dois solos de granulometria fina, localizados nas proximidades do Centro de Pesquisas Rodoviárias (CPR) da Concessionária CCRNovaDutra. Um solo foi classificado como A-6 e o outro classificado como A-7-5.

Após coleta dos solos, estes foram homogeneizados (quarteados), secados ao ar livre e logo depois foram destorroados para passar na peneira de 4,76mm de abertura. Terminado este processo, foram conservados em sacos plásticos para homogeneização da umidade, até sua utilização nos ensaios correspondentes. Na

Figura 3.1 são apresentadas imagens deste processo, executado no Laboratório do Centro de Pesquisas Rodoviárias (CPR), da Concessionária CCRNovaDutra.

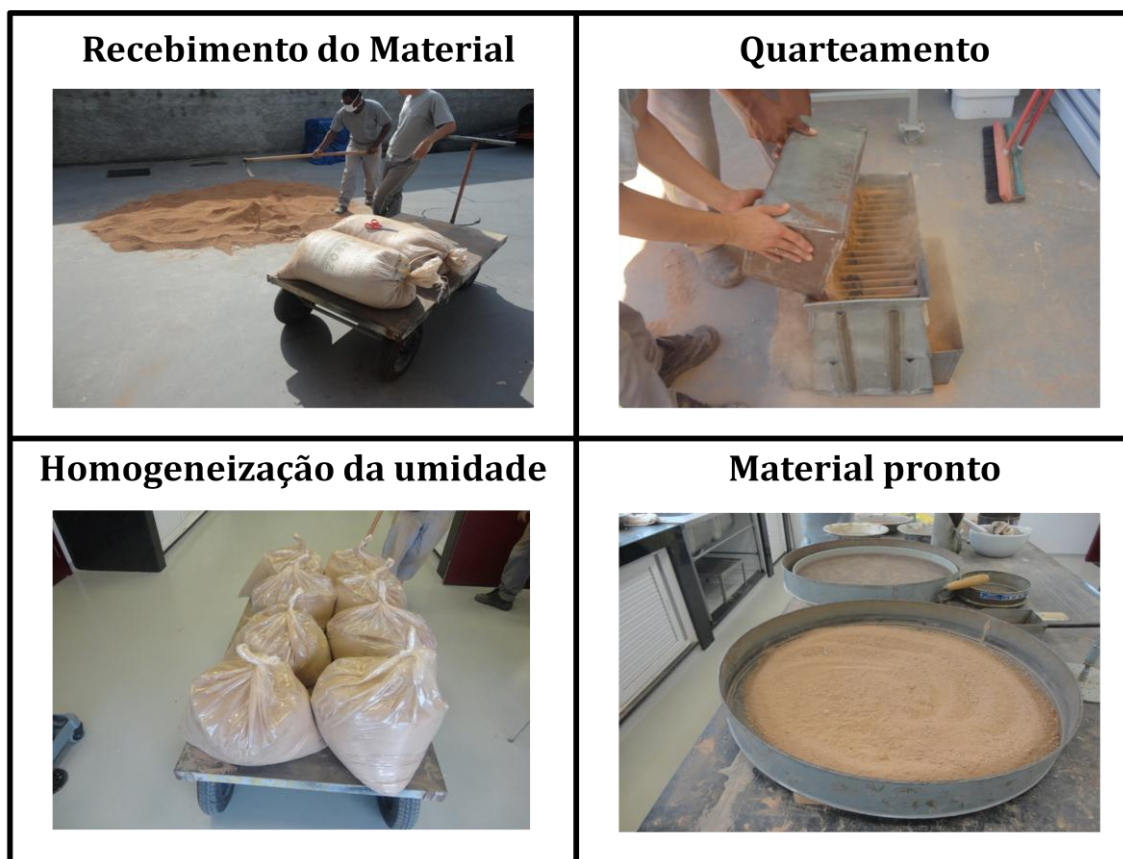


Figura 3.1: Preparação dos solos para posterior execução dos ensaios

Na Figura 3.2 são apresentadas as granulometrias dos dois solos selecionados e na Tabela 3.2 é apresentado um resumo das principais características desses solos. Nota-se na Tabela 3.2, que ambos os solos apresentam características de materiais muito finos, o Solo-1 com 73% de material passando na peneira de 0,074mm de abertura e o Solo-2 com 51% passando nessa peneira. Ambos os solos apresentaram CBR baixo e expansão elevada, o que caracteriza solos de subleitos problemáticos.

Tabela 3.2: Principais características dos Solos escolhidos na pesquisa

ENSAIO	Parâmetro	Solo-S1	Solo-S2
Ensaio de Consistência	Limite de Liquidez (%)	35	44
	Limite de Plasticidade (%)	21	28
	Índice de Plasticidade (%)	14	16
Granulometria	Retido 25,4 mm (%)	0	0
	Retido 9,5 mm (%)	1,4	0,4
	Retido 2,00 mm (%)	3,9	2,1
	Retido 0,42 mm (%)	5,2	24,8
	Retido 0,075 mm (%)	16,4	21
	Total Pedregulho [2,00 a >25,4 mm] (%)	5,3	2,5
	Total Areia [0,075 a 2,00 mm] (%)	21,6	45,9
	Total Silte [0,005 a 0,075 mm] (%)	49,6	36,2
	Total Argila [<0,005 mm] (%)	23,5	15,4
Classificação (AASHTO M-145/91)		A-6 (9)	A-7-6
Compactação (Energia Normal)	Densidade Máxima Seca (g/cm ³)	1,789	1,640
	Umidade Ótima (%)	16,5	15,0
CBR (Energia Normal)	CBR (%)	4,7	4,0
	Expansão (%)	4,6	4,0

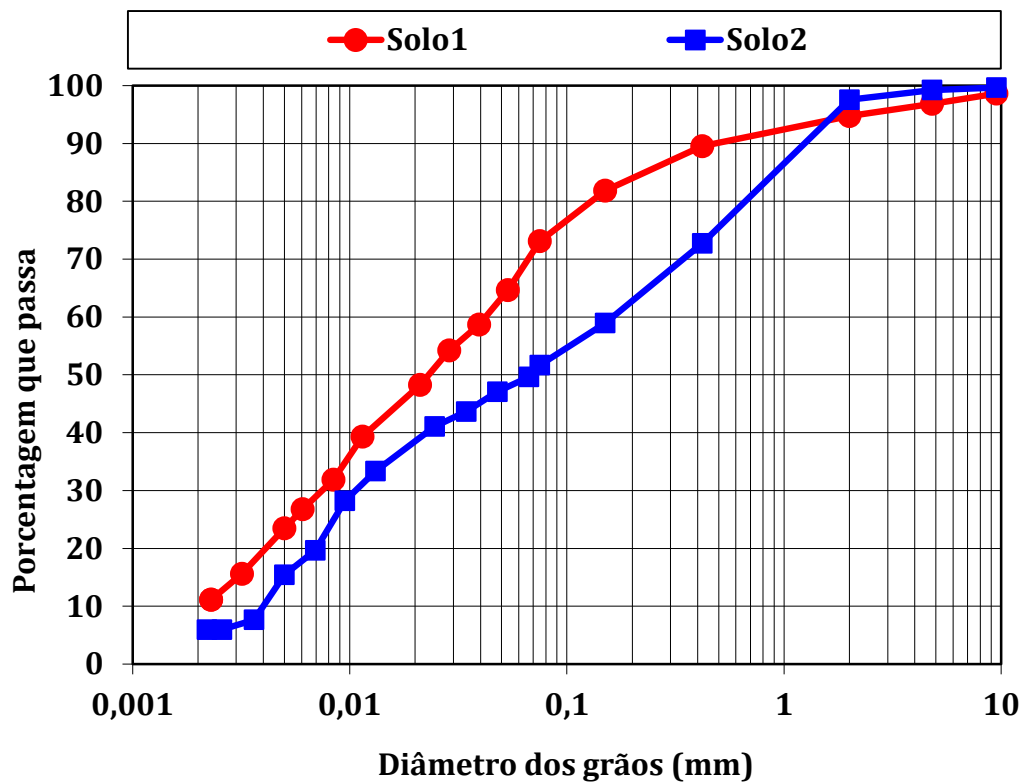


Figura 3.2: Curva granulométrica de um dos solos a ser estudado

3.2. MÉTODOS

3.2.1. Métodos de Ensaio utilizados na pesquisa

Para avaliar as características e propriedades mecânicas dos solos puros e dos solos estabilizados com cal hidratada foram utilizadas as normativas especificadas na Tabela 3.3.

Tabela 3.3: Ensaios que serão realizados nas misturas de solo cal

ENSAIO	PARÂMETRO	NORMA
Ensaios de Consistência	Limite de Liquidez	DNER ME 82/94
	Limite de Plasticidade	DNER ME 122/94
Granulometria	Distribuição do tamanho dos grãos	DNER ME 51/94
Compactação	Densidade Máxima Seca	DNER ME 129/94
	Umidade Ótima	
CBR	Capacidade de Suporte	DNER ME 254/94
	Expansão	
Compressão Simples Estática	Resistência à Compressão Simples (RCS)	DNER ME 180/94
Compressão Diametral Estática	Resistência à Tração por Compressão Diametral (RT)	DNER ME 181/94
Compressão Triaxial Cíclica	Módulo de Resiliência (MR)	DNIT 134/2010

3.2.2. Saturação dos corpos de prova por capilaridade para execução do ensaio de compressão triaxial cíclico

A Associação Nacional de Cal (*NLA – National Lime Association*) dos Estados Unidos da América elaborou no ano de 2006 um Relatório Técnico com uma série de recomendações para dosagem e ensaios laboratoriais de solos estabilizados com cal. Nesse relatório, recomenda-se submeter os corpos de prova de solo cal à ação deletéria da água antes de executar os ensaios de ruptura. Para isso, a saturação do corpo de prova não é realizada por imersão, como é recomendado pelas normas DNER-ME 180/94 e DNER-ME181/94, mas através do método de capilaridade, como mostra a Figura 3.3.



Figura 3.3: Corpos de prova submetidos à ação deletéria da água por capilaridade.

FONTE: NLA, 2006

A NLA (2006) recomenda curar os corpos de prova de solo cal durante 7 dias na temperatura de 40°C, para simular o ganho de resistência obtido aos 28 dias de cura na temperatura de 25°C, como também tem sido relatado por Yusuf et al. (2001). Após esse tempo de cura, os corpos de prova devem ser submetidos à capilaridade durante 24 horas, como ilustra a Figura 3.4.



Figura 3.4: Corpos de prova de solo e de solo cal submetidos à saturação por capilaridade durante 24 horas. FONTE: Yusuf et al. 2001

Yusuf et al. (2001), também executaram a saturação dos corpos de prova de solo cal através do método da capilaridade. Para isso, dentro de um tanque de água colocaram pedras porosas e adicionaram água na quantidade necessária para que o nível da água alcançasse a face superior da pedra porosa (Figura 3.4). Os corpos de prova foram colocados durante 24 horas sobre essas pedras porosas e, após conclusão desse período, foram executados ensaios de módulo de resiliência nos CP assim condicionados e também sem condicionamento.

Neste estudo procurou-se adaptar esse procedimento para, assim, poder avaliar o grau de deterioração das misturas de solo cal devido à ação deletéria da água, como mostra a Figura 3.5. Para isso, empregaram-se os corpos de prova utilizados no ensaio de compressão triaxial cíclica.



Figura 3.5: Adaptação realizada no Centro de Pesquisas Rodoviárias da Concessionária CCRNovaDutra para Saturação dos corpos de prova por capilaridade

Vale notar que o condicionamento por capilaridade foi aplicado apenas nos corpos de prova utilizados para determinar o módulo de resiliência das misturas de solo

cal. Este condicionamento é um complemento do estudo, já que não foi estabelecido no projeto de pesquisa.

3.2.3. Estruturação dos ensaios

Inicialmente foram realizados os ensaios tradicionais de caracterização: limites de consistência e granulometria mostrados na Tabela 3.3. A seguir, nas misturas de solo cal foram executados os ensaios de compactação Proctor na energia intermediária. Diversos estudos encontrados na bibliografia consultada (Little 1995; Little 1999; Jung 2008) recomendam essa energia para estabilização de solos com cal.

A pesar do ensaio de CBR não ser o mais adequado para avaliar materiais cimentados, como é o caso do solo cal, esse ensaio foi realizado nas misturas de solo cal para obter uma ideia do incremento da capacidade de suporte dos materiais.

Finalmente, com os resultados de densidade seca máxima e umidade ótima obtidos no ensaio de compactação, foram compactados três corpos de prova para execução dos ensaios de: compressão simples estática, compressão diametral estática e compressão triaxial cíclica. Os resultados obtidos nesses ensaios foram utilizados para avaliar as propriedades mecânicas dos solos estudados estabilizados com cal hidratada. Vale notar que estes ensaios foram realizados aos 3, 7, 28 e 84 dias de cura para avaliar esse fator na resistência e na rigidez das misturas. Na Tabela 4 é apresentada a estruturação das composições de solo cal estudados para os dois solos selecionados neste estudo.

Tabela 3.4: Organização dos ensaios executados na pesquisa

SOLO	Teor de Cal (%)	RCS (MPa)	RT (MPa)	MR (MPa)	Tempo de Cura (dias)
Solo-1 (S-1)	0	x			3
	3	x	x	x	3, 7, 28
	5	x	x	x	3, 7, 28
	7	x	x	x	3, 7, 28
Solo-2 (S-2)	0	x			3
	3	x	x	x	3, 7, 28
	5	x	x	x	3, 7, 28
	7	x	x	x	3, 7, 28

4. RESULTADOS

4.1. ENSAIOS DE CONSISTÊNCIA

Na Tabela 4.1 é apresentado um resumo dos resultados obtidos nas misturas de solo cal com a adição de 3, 5 e 7% de cal hidratada em peso no Solo S-1 e S-2. Na Figura 4.1 são ilustrados esses resultados e, nota-se que, a adição de cal hidratada, tanto no solo S-1 como no S-2, não produziu mudanças consideráveis nos limites de consistência.

Tabela 4.1: Limites de consistência nas misturas de solo cal com o Solo S-1 e S-2

Solo	Parâmetro	TEOR DE CAL (%)			
		0	3	5	7
S-1	Limite de Liquidez (%)	35	37	39	37
	Limite de Plasticidade (%)	21	22	21	22
	Índice de Plasticidade (%)	14	15	18	15
S-2	Limite de Liquidez (%)	44	43	45	42
	Limite de Plasticidade (%)	28	28	27	24
	Índice de Plasticidade (%)	16	15	18	18

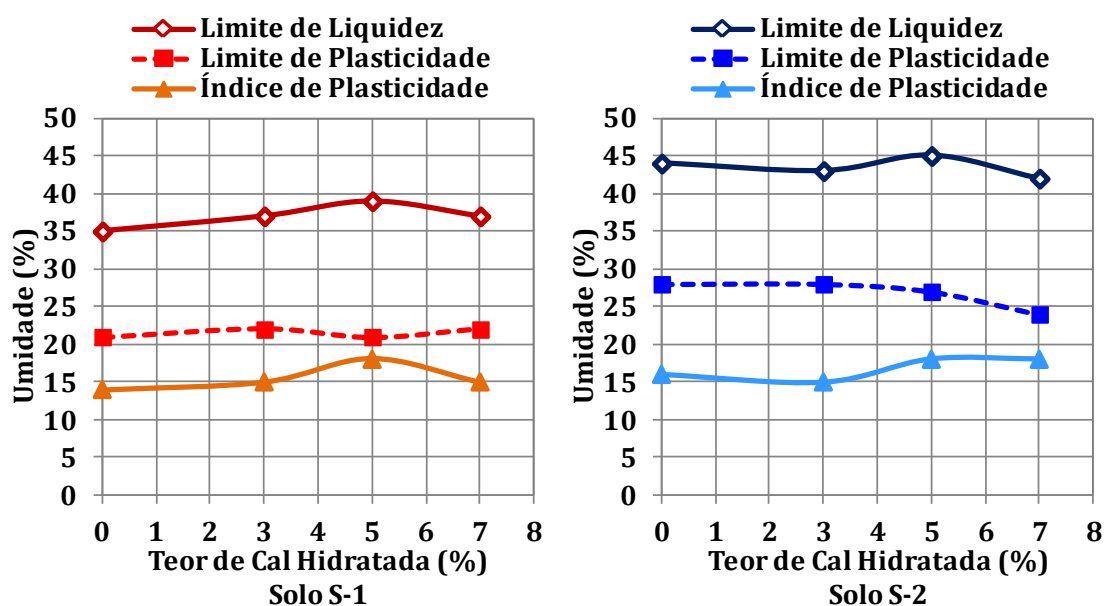


Figura 4.1: Limites de consistência das misturas de solo cal com o Solo-S1

Usualmente, a bibliografia afirma que a adição de cal hidratada reduz o Índice de Plasticidade (IP) devido aos efeitos físico químicos produzidos pela alteração do conteúdo de água nas misturas. Segundo Baptista (1976) a redução do IP é atribuída ao aumento do limite de plasticidade (LP) e à diminuição do limite de liquidez (LL). Contudo, nos dois solos avaliados neste estudo não foi constatada essa tendência.

4.2. GRANULOMETRIA DAS MISTURAS DE SOLO CAL

As partículas de cal hidratada adicionadas no solo reagem principalmente com os argilo-minerais. Nesta etapa do processo de estabilização, os solos mudam de textura devido à aglutinação das partículas tornando o material mais friável e granular. Essa aglutinação, de acordo com Jung (2008) produz mudanças na granulometria dos solos estabilizados com cal.

Na Figura 4.2 é apresentado um resumo dos resultados de granulometria obtida no solo S-1 e S-2. Nessa figura apresenta-se apenas a porcentagem de material retido nas peneiras de 0,42mm e 0,075mm de abertura, isto devido a que a mudança de granulometria dos solos foi verificada a seco nessas peneiras após 24 horas de adição de cal hidratada. No caso do Solo S-1 nota-se que o incremento do teor de cal hidratada incrementou a porcentagem de partículas retidas nas peneiras de 0,42mm e 0,075mm. No entanto, no solo S-2 não foi notada uma tendência muito clara, como a observada no Solo S-1.

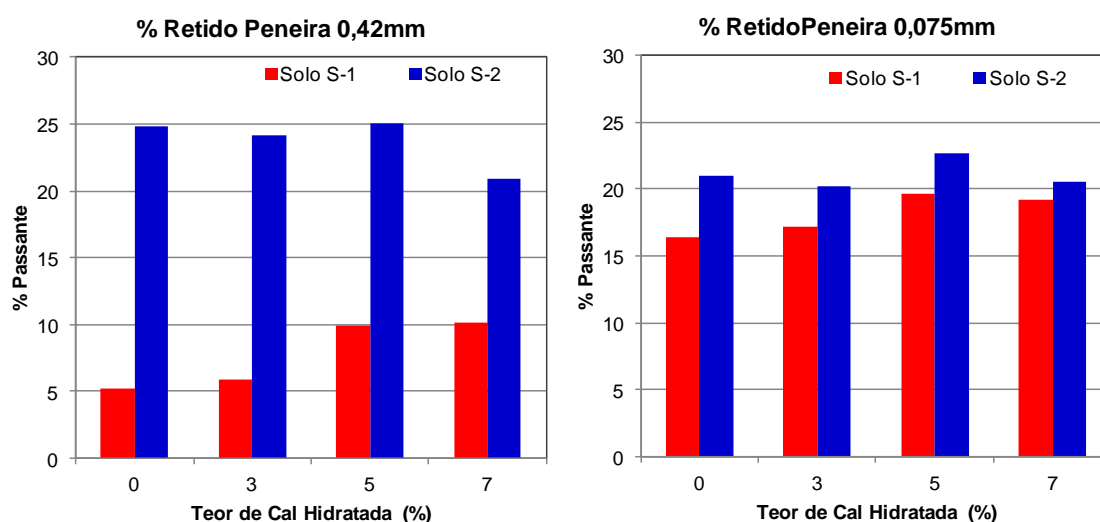


Figura 4.2: Porcentagem de partículas retidas nas peneiras de 0,42mm e 0,075mm

4.3. COMPACTAÇÃO DAS MISTURAS DE SOLO CAL

Os resultados de compactação das misturas de solo cal são apresentados na Tabela 4.2 e na Figura 4.3. Nota-se que o incremento do teor de cal reduziu a massa específica seca máxima (MES_{MAX}) do Solo S-1 e S-2 como era esperado de acordo com a bibliografia consultada (THOMPSON, 1966; TRB, 1987; JUNG, 2008).

Tabela 4.2: Resultados da compactação na energia intermediária das misturas de solo cal com os Solos S-1 e S-2

Solo	Teor de Cal Hidratada (%)	0	3	5	7
S-1	Massa Específica Seca Máxima (g/cm^3)	1,789	1,737	1,713	1,708
	Umidade Ótima (%)	16,5	16,8	18,2	16,8
S-2	Massa Específica Seca Máxima (g/cm^3)	1,695	1,655	1,645	1,63
	Umidade Ótima (%)	15,0	16,5	16,2	17,3

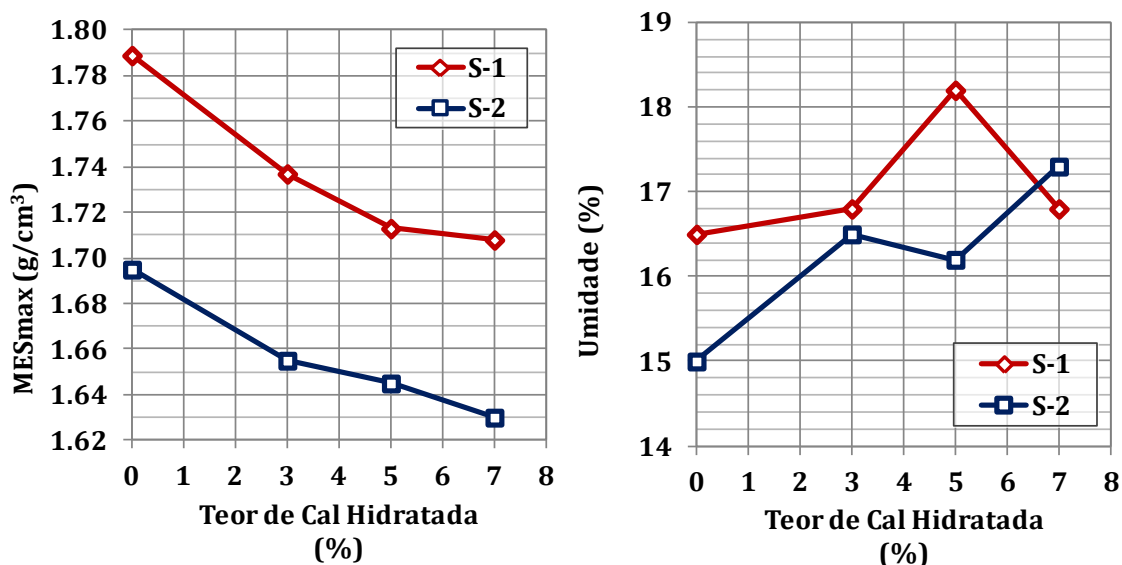


Figura 4.3: Resultados de compactação na energia intermediária das misturas de solo cal com os Solos S-1 e S-2

Com relação à umidade ótima das misturas, notou-se um incremento conforme aumenta o conteúdo de cal hidratada nas misturas. O comportamento foi concordante com a bibliografia que afirma que a demanda de maior quantidade de água pelos íons de cálcio presentes na cal hidratada, se traduz no aumento da umidade ótima da mistura de solo cal.

4.4. ENSAIO DE CBR

Se bem o ensaio de CBR não é o mais apropriado para avaliar os benefícios da estabilização de solos com cal hidratada, o ensaio ainda é o mais conhecido no meio rodoviário, mas apenas fornece uma ideia comparativa da capacidade de suporte dos solos.

Na Tabela 4.3 e na Figura 4.4 são apresentados os resultados do ensaio de CBR nas misturas de solo cal com os Solos S-1 e S-2. Nota-se que a adição de apenas 3% de cal hidratada nos solos produziu um notável incremento do valor de CBR. Já a expansão também foi reduzida significativamente com apenas 3% de cal hidratada. Contudo, o incremento do teor de cal hidratada de 3% para 5% e para 7% não produziu ganhos no valor de CBR nem reduções consideráveis na expansão, principalmente no solo S-1.

Tabela 4.3: Resultados do ensaio de CBR nas misturas de solo cal com os Solos S-1 e S-2

Solo	Teor de Cal Hidratada (%)	0	3	5	7
S-1	CBR (%)	4,7	45	45,3	45,9
	Expansão (%)	4,6	0,4	0,4	0,4
S-2	CBR (%)	5,3	52,5	67,7	34,7
	Expansão (%)	4,5	0,7	0,7	0,9

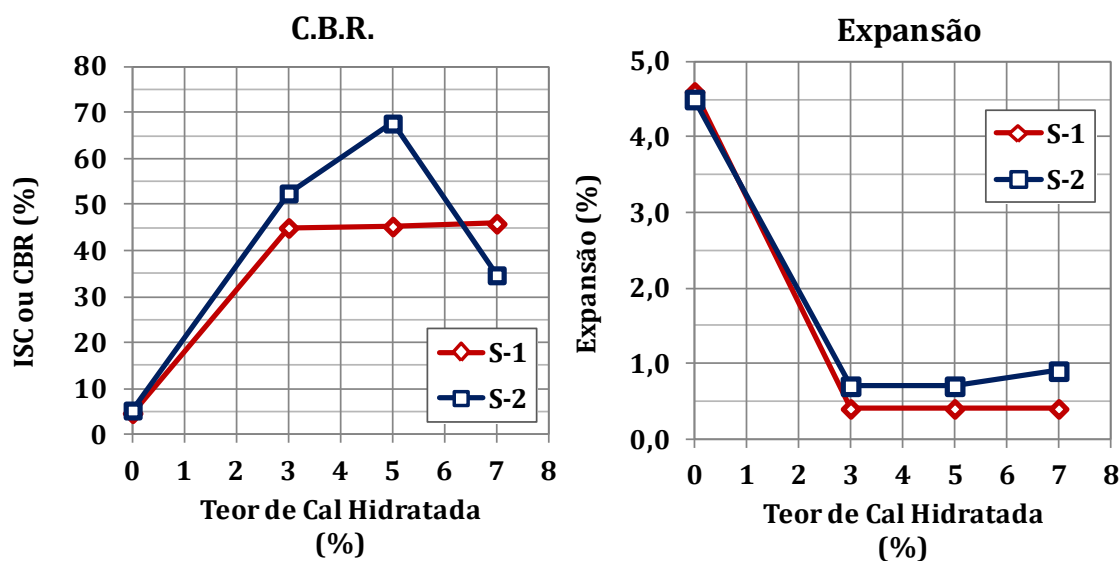


Figura 4.4: Resultados do ensaio de CBR nas misturas de solo cal com os Solos S-1 e S-2

Apesar de terem se obtido valores elevados de CBR, vale notar que esses valores podem ser falseados devido à cimentação que a cal hidratada produz no solo e, portanto, os valores de CBR obtidos não devem ser utilizados livremente em projetos de estruturas de pavimentos. O método de dimensionamento Inglês e Australiano, por exemplo, recomendam utilizar o valor de CBR máximo de 15% para o dimensionamento de estruturas de pavimentos, caso em laboratório sejam obtidos valores superiores (JAMESON, 2013).

4.5. ENSAIO DE COMPRESSÃO SIMPLES

O ensaio de compressão simples estático foi executado para determinar a resistência à compressão simples (RCS) das misturas de solo cal. A Figura 4.5 ilustra a execução de um ensaio de compressão simples estático no laboratório do Centro de Pesquisas Rodoviárias (CPR) da Concessionária CCRNovaDutra.

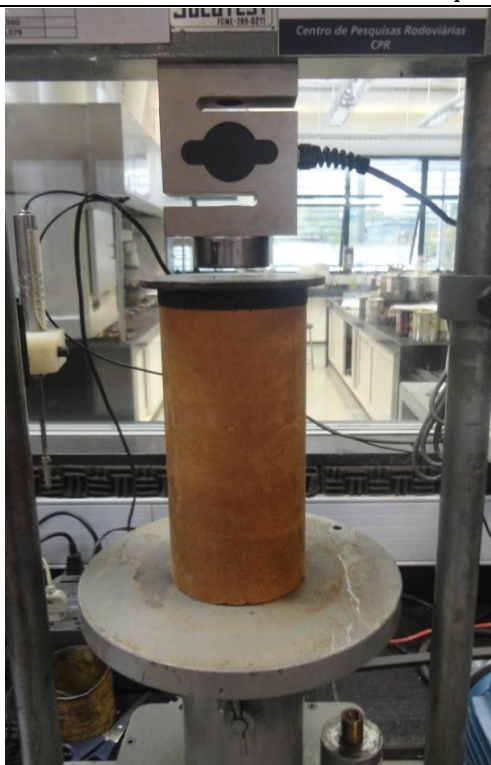


Figura 4.5: Ilustração do ensaio de compressão simples em misturas de solo cal

Os corpos de prova (CP) utilizados neste ensaio foram compactados dinamicamente com o soquete utilizado no ensaio de Proctor na energia intermediária, na umidade ótima ($W_{ot} \pm 0,30\%$) para atingir a massa específica máxima ($98\% \leq GC \leq 102\%$) determinados na energia intermediária. As dimensões dos CP utilizados foram de 100mm de diâmetro e 200mm de altura. Depois de compactados, os corpos de prova foram envolvidos com papel plástico e conservados em câmara úmida até a ruptura nos tempos de cura de 3, 7 e 28 dias. Vale notar que para cada condição avaliada foram utilizados no mínimo três corpos de prova.

A norma DNER-ME 180/94 recomenda executar o ensaio de compressão simples nos corpos de prova após imersão em água durante 24 horas. Contudo, neste estudo, os corpos de prova se desintegraram após poucas horas de imersão, como mostra a Figura 4.6. Considera-se que esse condicionamento não é o mais adequado para avaliar o efeito deletério da água nas misturas de solo cal e tampouco representa as condições de campo. Assim, os resultados apresentados na continuação deste relatório referem-se ao valor de RCS seco ou sem imersão.



Figura 4.6: Desintegração dos corpos de prova de solo cal poucas horas após imersão em água

Na Tabela 4.4 e na Figura 4.7 são apresentados os resultados do ensaio de compressão simples realizado nas misturas de solo cal após 3, 7 e 28 dias de cura em câmara úmida. Nota-se que, aos 3 dias de cura, a adição de apenas 3% de cal hidratada no solo S-1 aumentou o valor de RCS em aproximadamente 50%, enquanto que no solo S-2 esse incremento foi em torno de 80%. De acordo com a bibliografia consultada neste estudo, incrementos maiores da resistência à compressão simples indicam maior reatividade do solo à adição de cal hidratada. Dessa forma, pode-se afirmar que o solo S-2, classificado como A-7-5, é mais reativo que o solo S-1, classificado como A-6.

A adição de 5% e 7% de cal no solo S-1 produziu ganhos de resistência ainda maiores, de aproximadamente 75% e até 100%. Contudo, no solo S-2, o emprego de teores superiores a 3% de cal hidratada não representaram ganhos de resistência e os valores de RCS se mantiveram praticamente em um patamar, como mostra a Figura 4.7.

Com relação ao tempo de cura, nota-se na Figura 4.7 que, as misturas com solo S-1 não apresentaram ganhos de resistência consideráveis após 7 e 28 dias de cura, quando comparados com os valores de RCS obtidos aos 3 dias de cura. Já nas misturas com solo S-2 foram obtidos valores de RCS superiores conforme foi incrementado o tempo de cura das misturas. Diversos autores afirmam que os ganhos reais de resistência devidos à estabilização de solos com cal hidratada são observados em longos tempos de cura, inclusive anos (Little, 1995; Jung, 2008).

Contudo, neste estudo fixou-se 28 dias como o maior tempo de cura, já que diversos métodos de dimensionamento, como o MEPDG, os métodos Inglês, Francês e Australiano, recomendam considerar a resistência da mistura de solo cal aos 28 dias de cura, (LCPC, 1997; Snethen et al. 2008; Mallella et al. 2004; JAMESON, 2013).

Tabela 4.4: Resultados de resistência à compressão simples das misturas de solo-cal

Solo	Teor de Cal Hidratada (%)	0	3	5	7
S-1	RCS [3 Dias] (kPa)	343	540	605	726
	RCS [7 Dias] (kPa)	358	560	615	710
	RCS [28 Dias] (kPa)	366	640	689	735
S-2	RCS [3 Dias] (kPa)	394	717	732	727
	RCS [7 Dias] (kPa)	437	829	810	822
	RCS [28 Dias] (kPa)	440	979	1034	947

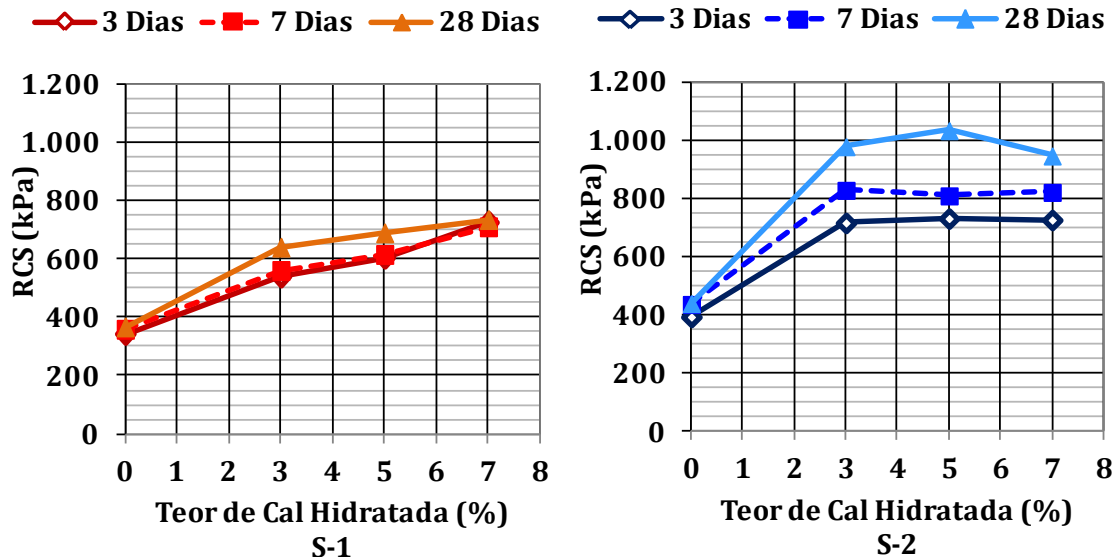


Figura 4.7: Resultados de RCS das misturas de solo cal para 3, 7 e 28 dias de cura

Segundo o Procedimento Illinois apresentado no *State of the Art 5 - Lime Stabilization* (TRB, 1987), misturas de solo cal podem ser utilizadas como bases de pavimentos desde que apresentem valores mínimos de resistência de 1.030 kPa aos 28 dias de cura em laboratório, ou poderiam ser empregadas como sub-bases

caso apresentem RCS mínima de 690 kPa também aos 28 dias de cura. Assim, observa-se na Tabela 4.4 que, a mistura do solo S-1 com 7% de cal hidratada atenderia os requerimentos para ser empregada como sub-base e a mistura S-1 com 5% de cal hidratada praticamente também se enquadraria nesta recomendação. Com relação às misturas com solo S-2, nota-se que todas as misturas poderiam ser utilizadas como sub-bases, inclusive a mistura com menor teor de cal hidratada (3%).

4.6. ENSAIO DE COMPRESSÃO DIAMETRAL

O ensaio de compressão diametral foi executado para determinar a resistência à tração por compressão diametral (RT) das misturas de solo cal. Na Figura 4.8 é apresentada a ilustração do ensaio de compressão diametral realizado no laboratório do CPR da Concessionária CCRNovaDutra.



Figura 4.8: Ilustração do ensaio de RT, de acordo com a recomendação da norma DNER-ME 181/94

Para avaliar as misturas de solo cal foram utilizados três corpos de prova para cada condição, compactados dinamicamente com o soquete utilizado no ensaio de Proctor, na umidade ótima ($W_{ot} \pm 0,30\%$) para atingir a massa específica máxima ($98\% \leq G_c \leq 102\%$) determinados na energia intermediária. As dimensões dos CP utilizados foram de 100mm de diâmetro e 200mm de altura, como recomendado pela DNER-ME-181/94 e foram compactados em 5 camadas com 20 golpes cada uma delas. Depois de compactados, os corpos de prova foram envolvidos com papel plástico e conservados em câmara úmida até a ruptura nos tempos de cura de 3, 7 e 28 dias.

Vale notar que a norma DNER-ME 181/94 recomenda executar o ensaio de compressão diametral nos corpos de prova após imersão em água durante 24 horas. Contudo, nesta pesquisa, os CPs conservados para este ensaio se desintegraram após poucas horas de imersão, assim como aconteceu com os corpos de prova utilizados na compressão simples. Assim, os resultados apresentados na continuação deste relatório referem-se ao valor de RT seco ou sem imersão.

Na Tabela 4.5 e Figura 4.9 são apresentados os resultados de RT das misturas de solo cal aos 3, 7 e 28 dias de cura. Nota-se que os solos S-1 e S-2 puros apresentaram resistência à tração em torno de 50kPa e a adição de 3%, 5% e 7% de cal hidratada incrementou esse valor. Contudo, a tendência da RT relacionada ao tempo de cura não foi muito clara no solo S-1, como se observa na Figura 4.9, já as misturas com o solo S-2 mostraram incrementos de RT aos 28 dias de cura em torno de 100% quando comparados com os valores de resistência obtidos aos 3 dias de cura. Essa tendência, assim como observado nos resultados de resistência à compressão simples, indica a maior reatividade do Solo S-2 à estabilização com cal hidratada, do que o solo S-1.

Tabela 4.5: Resultados de resistência à tração por compressão diametral das misturas de solo-cal

Solo	Teor de Cal Hidratada (%)	0	3	5	7
S-1	RT [3 Dias] (kPa)	48,5	58	55	61
	RT [7 Dias] (kPa)	50	55	48	63
	RT [28 Dias] (kPa)	51	59	63	72
S-2	RT [3 Dias] (kPa)	50	58	59	60
	RT [7 Dias] (kPa)	45	78	65	82
	RT [28 Dias] (kPa)	47	97	111	109

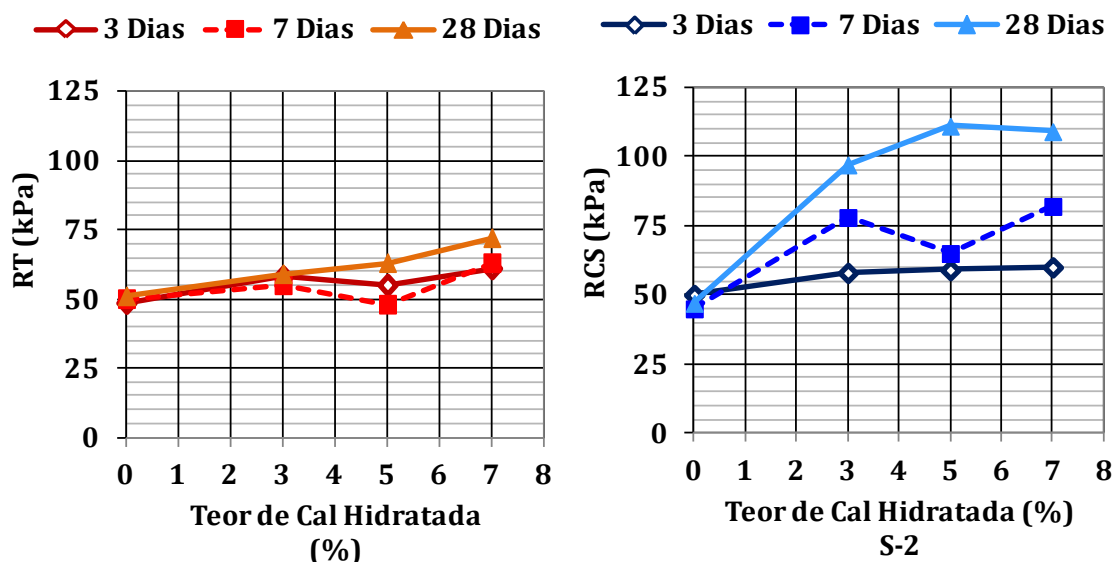


Figura 4.9: Resultados de RT das misturas de solo cal para 3, 7 e 28 dias de cura

4.7. ENSAIO DE COMPRESSÃO TRIAXIAL CÍCLICA

4.7.1. Descrição do ensaio

O ensaio de compressão triaxial cíclico foi utilizado para determinar o módulo de resiliência (MR) das misturas de solo cal, de acordo com as recomendações da norma “Pavimentos Flexíveis – Solos – Determinação do módulo de resiliência – Método de ensaio” DNIT 134/2010. Essa norma recomenda utilizar uma sequência de três pares de tensão para condicionamento dos corpos de prova, apresentados na Tabela 4.6, seguido da aplicação de 18 pares de tensão para determinação do módulo de resiliência, como mostra a Tabela 4.7.

Tabela 4.6: Sequência de tensões para fase de condicionamento dos corpos de prova utilizados no ensaio de compressão triaxial cíclica (DNIT 134/2010)

Tensão Confinante σ_3 (kPa)	Tensão Desvio σ_d (kPa)	Razão de Tensões σ_1/σ_3
20,7	20,7	2
68,9	68,9	2
102,9	309	4

Tabela 4.7: Sequência de tensões para determinação do módulo de resiliência (DNIT 134/2010)

Tensão Confinante σ_3 (kPa)	Tensão Desvio σ_d (kPa)	Razão de Tensões σ_1/σ_3
20,7	20,7	2
	41,4	3
	62,1	4
34,5	34,5	2
	68,9	3
	102,9	4
50,4	50,4	2
	102,9	3
	155,2	4
68,9	68,9	2
	137,9	3
	206,8	4
102,9	102,9	2
	206,8	3
	309,0	4
137,9	137,9	2
	274,7	3
	412,0	4

Os corpos de prova foram compactados da mesma forma que descrito nos ensaios de RCS e RT, com dimensões de 100mm de diâmetro e 200mm de altura. O ensaio foi realizado em uma prensa universal com nome comercial UTM-25 de fabricação

australiana da marca IPC-Global. Na Figura 4.10 é apresentada uma ilustração desse equipamento no laboratório do CPR da Concessionária CCRNovaDutra.



Figura 4.10: Ilustração da prensa universal (UTM-25) utilizada no ensaio de compressão triaxial cíclica

Os tempos de cura de execução do ensaio de compressão triaxial cíclica foram os mesmos dos utilizados nos ensaios de compressão simples e diametral, 3, 7 e 28 dias. Para cada condição avaliada nas misturas de solo cal, foram ensaiados no mínimo três corpos de prova.

4.7.2. Modelos de módulo de resiliência

Sabe-se que o módulo de resiliência dos solos é dependente do estado de tensões, motivo pelo qual é utilizado o ensaio de compressão triaxial cíclica para aplicar uma sequência de tensões típicas nas estruturas dos pavimentos. Assim, durante o

ensaio, para cada par de tensões aplicado no corpo de prova é obtido um valor de módulo de resiliência. Esses resultados fornecem os dados necessários para estimar o módulo de resiliência através de modelos matemáticos constitutivos. Na Tabela 4.8 são apresentados os três modelos selecionados nesta pesquisa para representar os valores de MR em função das tensões.

Tabela 4.8: Modelos selecionados para estimar o valor de módulo de resiliência (MR) das misturas de solo cal

Modelo	Nome	Equação
I	Modelo em Função da Tensão Desvio	$M_R = k_1 \sigma_d^{k_2}$
II	Modelo em Função da Tensão Confinante	$M_R = k_1 \sigma_d^{k_2}$
III	Modelo Composto	$M_R = k_1 \sigma_3^{k_2} \sigma_d^{k_3}$

O modelo (I) em função da tensão confinante (σ_3) foi proposto por Dunlap (1963) e é mais adequado a materiais que apresentam forte dependência da tensão de confinamento, como os granulares. Moosazadeh e Witczak (1981) propuseram o modelo (II), que considera apenas a tensão desvio (σ_d) na representação do MR; para esses autores este modelo apresenta um desempenho regular nos solos de granulometria fina e com alto conteúdo de argila.

Já o modelo (III), comumente conhecido no Brasil como “Modelo Composto”, é recomendado pela NCHRP 1-28 (1997). Macêdo (1996), Ferreira (2002), Medina e Motta (2005), Kinsky e Fabbri (2009) Solaki et al. (2010), entre outros autores, que afirmam que este modelo, que inclui tanto a tensão desvio como a tensão confinante, apresenta um bom ajuste na representação do módulo de resiliência, independentemente da granulometria do material estudado.

4.7.3. Resultados de módulo de resiliência

Os resultados do ensaio de compressão triaxial cíclica para os 18 pares de tensão recomendados pela norma DNIT 134/2010 estão apresentados integralmente para cada corpo de prova no ANEXO C-3 deste relatório. Na continuação são apresentados e discutidos os resultados de MR que constituem as médias da

execução do ensaio em pelo menos três corpos de prova para cada condição avaliada das misturas de solo cal. Nas Tabelas 4.9 e 4.10 são apresentados os modelos resultantes dos ensaios de compressão triaxial cíclica das misturas de solo cal com solo S-1 e S-2, respectivamente.

Tabela 4.9: Resultados dos modelos de MR das misturas de solo cal com o solo S-1

Tempo de Cura (Dias)	Teor de Cal (%)	Modelo Tensão Confinante			Modelo Tensão Desvio			Modelo Composto			
		k1	k2	R2	k1	k2	R2	k1	k2	k3	R2
3	0	56,8	0,074	0,10	87,0	-0,028	0,02	62,4	0,310	-0,228	0,59
3	3	137,9	0,014	0,01	186,9	-0,054	0,16	149,2	0,211	-0,190	0,67
	5	104,8	0,099	0,22	159,3	-0,004	0,00	114,0	0,312	-0,206	0,73
	7	150,6	0,066	0,11	216,6	-0,020	0,02	163,0	0,266	-0,192	0,60
7	3	101,9	0,118	0,34	150,3	0,020	0,02	109,4	0,297	-0,172	0,73
	5	108,9	0,052	0,10	149,2	-0,022	0,03	116,8	0,229	-0,170	0,68
	7	80,2	0,149	0,64	108,5	0,066	0,20	83,4	0,246	-0,093	0,78
28	3	122,1	0,090	0,25	172,7	0,003	0,00	130,6	0,261	-0,165	0,70
	5	147,8	0,078	0,16	211,2	-0,009	0,00	159,1	0,264	-0,179	0,61
	7	144,3	0,115	0,32	201,8	0,028	0,03	152,8	0,260	-0,139	0,58

Tabela 5.10: Resultados dos modelos de MR das misturas de solo cal com o solo S-2

Tempo de Cura (Dias)	Teor de Cal (%)	Modelo Tensão Confinante			Modelo Tensão Desvio			Modelo Composto			
		k1	k2	R2	k1	k2	R2	k1	k2	k3	R2
3	0	75,1	0,031	0,02	70,2	0,042	0,05	58,2	0,270	-0,188	0,64
3	3	96,9	0,126	0,37	140,5	0,030	0,03	103,3	0,287	-0,155	0,66
	5	70,0	0,182	0,72	85,2	0,117	0,48	70,1	0,183	-0,001	0,72
	7	93,9	0,127	0,47	134,1	0,034	0,05	99,7	0,277	-0,145	0,79
7	3	131,9	0,133	0,44	185,9	0,042	0,07	139,2	0,270	-0,132	0,68
	5	138,3	0,087	0,34	185,1	0,013	0,01	146,0	0,222	-0,130	0,74
	7	95,9	0,179	0,77	130,9	0,089	0,31	99,1	0,260	-0,079	0,85
28	3	144,2	0,114	0,91	164,6	0,071	0,57	144,6	0,121	-0,007	0,91
	5	62,6	0,262	0,72	65,7	0,219	0,81	58,8	0,104	0,152	0,85
	7	123,1	0,156	0,87	154,2	0,088	0,44	125,1	0,196	-0,038	0,89

Nas Figuras 4.11 e 4.12 ilustra-se uma contagem do número de ensaios em função do valor do coeficiente de determinação (R^2) para cada tipo de modelo utilizado, para o solo S-1 e S-2, respectivamente. Valores elevados de R^2 indicam um bom ajuste do modelo de MR aos dados obtidos em laboratório e valores baixos de R^2 indicam ajustes pobres.

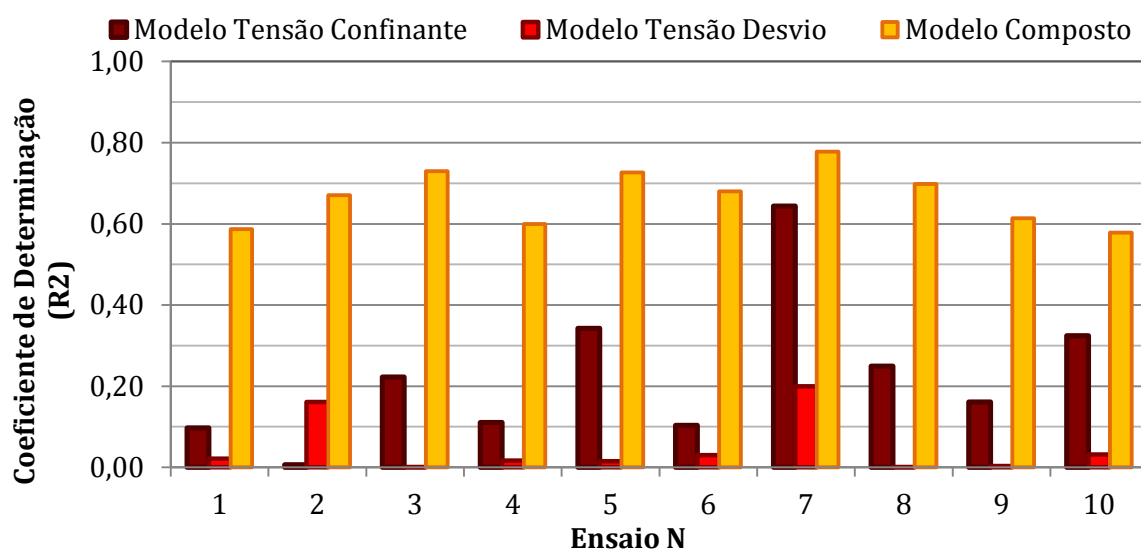


Figura 4.11: Valores de coeficientes de determinação para os diferentes modelos de módulo de resiliência utilizados, para as misturas com Solo S-1

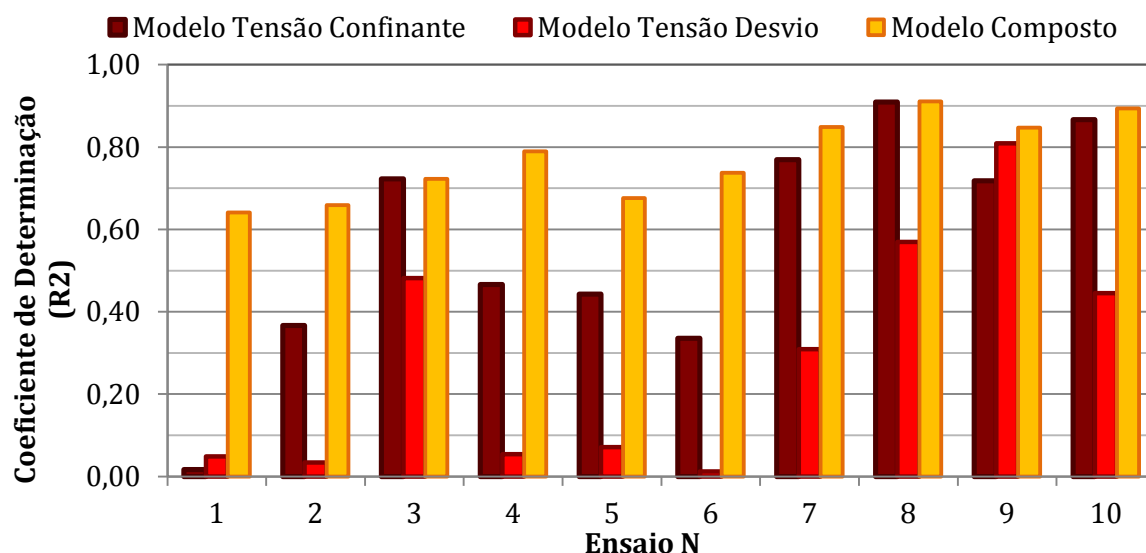


Figura 4.12: Valores de coeficientes de determinação para os diferentes modelos de módulo de resiliência utilizados, para as misturas com Solo S-2

Assim, das Figuras 4.11 e 4.12 pode se afirmar que o modelo composto foi o que apresentou melhor ajuste, seguido pelo modelo em função da tensão confinante. Já no modelo em função da tensão desvio foram obtidos coeficientes de determinação muito baixos, indicando o ajuste ruim desse modelo para os dados obtidos no ensaio de compressão triaxial cíclica. Observa-se também que, de modo geral, os modelos apresentaram melhor ajuste nas misturas constituídas pelo Solo S-2.

Nas Tabelas 4.11 e 4.12 são apresentados os máximos e mínimos valores de MR obtidos no ensaio para as 18 sequências utilizadas no ensaio de compressão triaxial cíclica nas misturas de solo cal com os solos S-1 e S-2, respectivamente. Nessas tabelas também é apresentado o valor do módulo de resiliência calculado com o modelo composto das Tabelas 4.9 e 4.10, considerando as tensões de $\sigma_d=41,34$ kPa e $\sigma_3=13,78$ kPa. Segundo Little (2000) e Solanki et al. (2010), essas tensões são comumente alcançadas em subleitos de rodovias.

Tabela 4.11: Valores de MR máximo e mínimo obtidos no ensaio triaxial mínimo e valor de MR calculado com o modelo composto para $\sigma_d=41,34$ kPa e $\sigma_3=13,78$ kPa, para as misturas com Solo S-1

Teor de Cal (%)	Cura (Dias)	MR de Ensaio (MPa)		MR calculado (MPa)
		Máximo	Mínimo	
0	3	98	59	60
3	3	217	115	119
5		210	130	121
7		252	161	161
3	7	220	136	126
5		167	115	113
7		188	113	113
3	28	231	149	140
5		263	168	163
7		275	175	153

Tabela 4.12: Valores de MR máximo e mínimo obtidos no ensaio triaxial mínimo e valor de MR calculado com o modelo composto para $\sigma_d=41,34$ kPa e $\sigma_3=13,78$ kPa, para as misturas com Solo S-1

Teor de Cal (%)	Cura (Dias)	MR de Ensaio (MPa)		MR calculado (MPa)
		Máximo	Mínimo	
0	3	91	59	59
3	3	213	124	123
5		184	100	113
7		206	135	120
3	7	288	168	173
5		237	171	161
7		257	150	146
3	28	261	205	193
5		273	140	136
7		283	187	181

Para facilitar a avaliação da influência do tempo de cura e do teor de cal hidratada utilizado nas misturas de solo cal, os valores máximos e mínimos de MR apresentados nas Tabelas 4.11 e 4.12 foram utilizados na construção de faixas de valores de MR apresentados nas Figuras 4.13 e 4.14, para as misturas de solo cal com o Solo S-1 e S-2, respectivamente. Na Figura 4.13 pode se observar que o Solo S-1 puro apresenta um valor de módulo de resiliência que oscila de 60MPa a 100MPa. Aos 3 dias de cura das misturas, a adição de 3% e 5% de cal hidratada no solo S-1 aumentou os valores de MR oscilando de 100MPa até 200MPa, aproximadamente. Já as misturas com 7% de cal hidratada apresentaram, também aos 3 dias de cura, valores de MR de 150MPa até 250MPa.

Aos 7 dias de cura os valores de MR foram muito próximos aos obtidos aos 3 dias de cura. As misturas de solo cal com solo S-1 apresentaram um incremento do valor do MR aos 28 dias de cura. De modo geral, nesse tempo de cura, as misturas com 3%, 5% e 7% de cal hidratada apresentaram valores de MR variando de 150MPa até 250MPa.

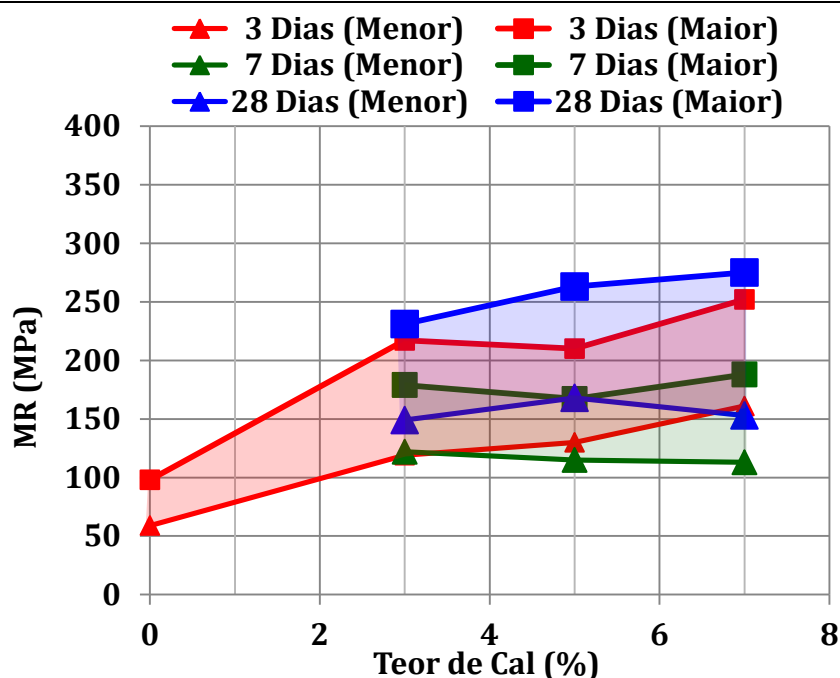


Figura 4.13: Faixa de valores de MR obtidos no ensaio de compressão triaxial cíclica nas misturas de solo cal com solo S-1

Na Figura 4.14 são apresentados os valores máximos e mínimos de MR obtidos nas misturas de solo cal com o solo S-2. Verifica-se uma tendência muito parecida com a observada no solo S-1; contudo, nota-se que a cura dos CPs durante 7 e 28 dias teve maior influência no enrijecimento das misturas, do que a observada nas misturas com o solo S-1. De modo geral, os valores de Módulo de Resiliência das misturas com solo S-2 foram levemente superiores quando comparados com os valores de MR obtidos nas misturas com o solo S-1.

Na Figura 4.15 são ilustrados os valores de MR calculado com o modelo composto da Tabela 4.11 e considerando as tensões de $\sigma_d=41,34$ kPa e $\sigma_3=13,78$ kPa, para as misturas com Solo S-1. O Solo S-1 puro apresentou um valor de módulo de resiliência de 60 MPa, sendo que a adição de 3% de cal hidratada duplicou esse valor aos 3 dias de cura. Também é notado nessa figura que a mistura com 3% de cal hidratada apresentou maiores valores de MR conforme aumentou o tempo de cura de 3 para 28 dias.

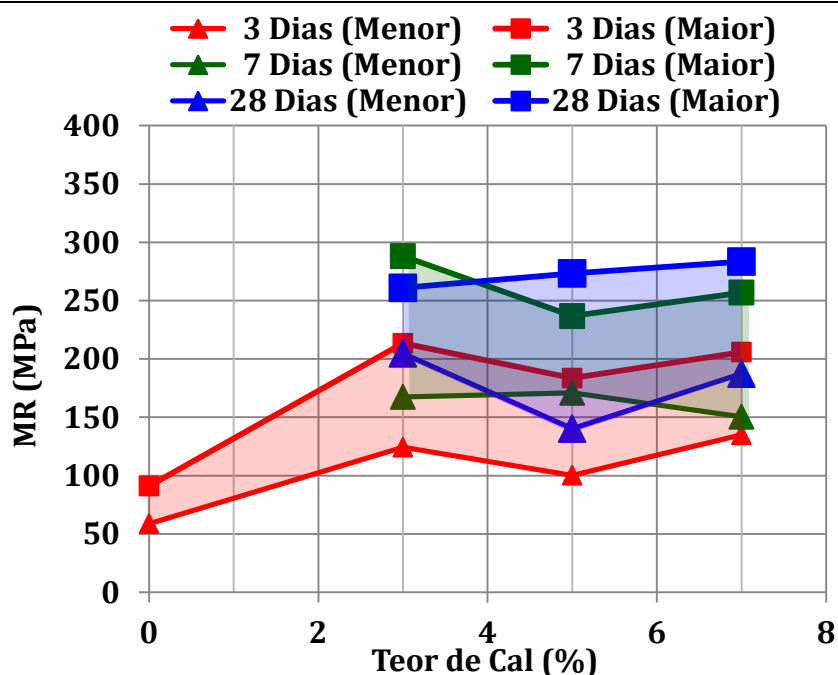


Figura 4.14: Faixa de valores de MR obtidos no ensaio de compressão triaxial cíclica nas misturas de solo cal com solo S-2

As misturas de solo cal com Solo S-1 e com 5% e 7% de cal hidratada na sua composição, também apresentaram valores maiores de MR com relação ao módulo do Solo S-1 puro. Contudo, não mostraram ganhos muito importantes com relação à mistura com 3% de cal hidratada.

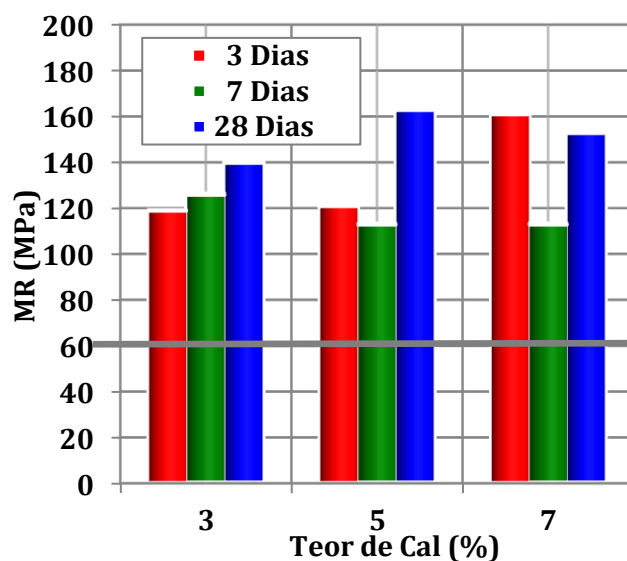


Figura 4.15: Valores de MR das misturas de solo cal com solo S-1, calculado com o modelo composto e as tensões de $\sigma_d=41,34$ kPa e $\sigma_3=13,78$ kPa

Na Figura 4.16 apresenta-se o valor de MR calculado para as misturas de solo cal com Solo S-2. Esse solo sem a adição de cal hidratada apresentou um valor de MR em torno de 60MPa e a adição de apenas 3% de cal hidratada duplicou esse valor aos 3 dias de cura da mistura. Após cura dos corpos de prova durante 7 e 28 dias, o módulo de resiliência aumentou até valores próximos a 200MPa. Já as misturas com 5 e 7% de cal hidratada apresentaram uma tendência similar, contudo a mistura com 5% de cal aos 28 dias de cura apresentou um decréscimo do MR, possivelmente por alguma deficiência na compactação dos CPs.

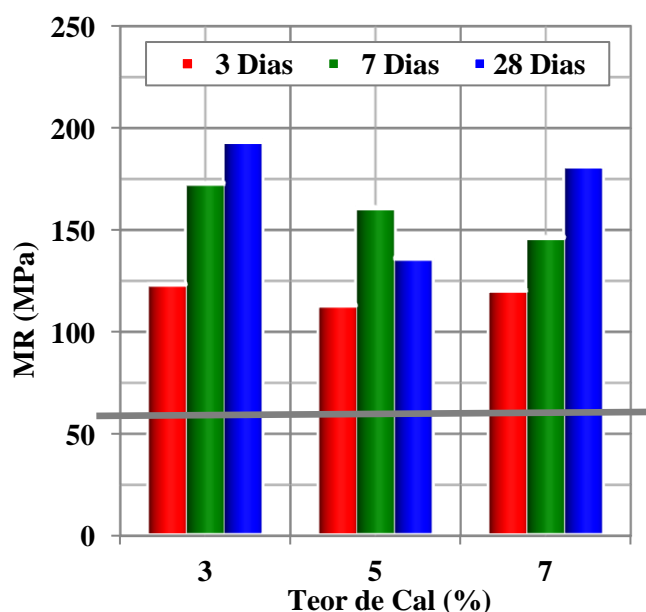


Figura 4.16: Valores de MR das misturas de solo cal com solo S-1, calculado com o modelo composto e as tensões de $\sigma_d=41,34$ kPa e $\sigma_3=13,78$ kPa

4.7.4. Determinação do valor do Módulo de Resiliência em amostras submetidas à capilaridade

4.7.4.1. Testes com o Solo S-1

Os ensaios de CBR, RCS, RT e MR mostraram a tendência que a adição de 3% de cal hidratada é suficiente para estabilizar o Solo-S1. Assim, fixou-se esse teor de cal hidratada para avaliar a ação deletéria da água no parâmetro de módulo de resiliência para esse solo. Para efeitos de comparação, corpos de prova do Solo S-1 puro sem adição de cal hidratada foram testados com este procedimento. Já para as misturas com o solo S-2 foi realizada a bateria completa, isto é, com 3, 5 e 7%.

Os ensaios iniciais não foram bem sucedidos, principalmente nos corpos de prova moldados com o Solo S-1 puro, já que as tensões dos últimos pares de tensão recomendados pela norma DNIT 134/2010 são muito elevadas e deformaram excessivamente os CPs. Vale notar que a norma DNIT 134/2010 recomenda a sequência de 18 pares de tensões de maneira geral para solos de pavimentos flexíveis.

Assim, optou-se por utilizar a norma da AASHTO T307-99, *“Standard Method of Test for determining the Resilient Modulus of Soils and Aggregate Materials”*. Nessa norma é diferenciado o material constituinte das camadas de bases e sub-bases de pavimentos do material do subleito, para a aplicação de pares de tensões. A sequência de tensões selecionada, para avaliação do efeito da capilaridade no solo cal, foi aquela recomendada para materiais de subleito, apresentada na Tabela 4.13.

Tabela 4.13: Sequência de pares de tensões recomendada para materiais de subleito pela AASHTO T307-99

Tensão Confinante σ_3 (kPa)	Tensão Desvio σ_d (kPa)	Sequência No.
41,4	24,8	0
41,4	12,4	1
	24,8	2
	37,3	3
	49,7	4
	62,0	5
27,6	12,4	6
	24,8	7
	37,3	8
	49,7	9
	62,0	10
13,8	12,4	11
	24,8	12
	37,3	13
	49,7	14
	62,0	15

O procedimento utilizado para avaliar o efeito da saturação por capilaridade nos corpos de prova está esquematizado na Figura 4.17 e é detalhado na continuação:

- a) Após o tempo de cura especificado, o corpo de prova foi ensaiado normalmente no ensaio de compressão triaxial cíclica. O módulo de resiliência assim obtido foi denominado de MR-seco.
- b) Concluído o ensaio, a face plana “B” do corpo de prova foi colocada na pedra porosa, embebida em água, para saturar por 24 horas por capilaridade (ver Figuras 4.17A, 4.17B, 4.17C, 4.17D);
- c) Após as 24 horas de capilaridade, o corpo de prova foi virado e apoiado em uma bancada na sua face plana “A” durante 30 minutos (ver Figura 4.17E). Logo após esse período, o ensaio de compressão triaxial cíclica foi executado; vale notar que o CP foi disposto no equipamento de modo que a face que foi saturada “B” fique na parte inferior (ver Figura 4.17F). O módulo de resiliência assim obtido foi chamado de MR-24h.
- d) Depois de realizado o ensaio, o corpo de prova foi submetido novamente à saturação por capilaridade durante 24 horas, apoiando a face “A” na pedra porosa (ver Figuras 4.17G e 4.17H). Após esse tempo o corpo de prova foi apoiado em uma bancada na sua face “B” durante 30 minutos (ver Figura 4.17I). Após esse período foi executado novamente o ensaio de compressão triaxial cíclica; vale notar que o CP foi disposto no equipamento de modo que a face que foi saturada por último “A” fique na parte inferior (ver Figura 4.17J). O módulo de resiliência assim obtido foi chamado de MR-48h.

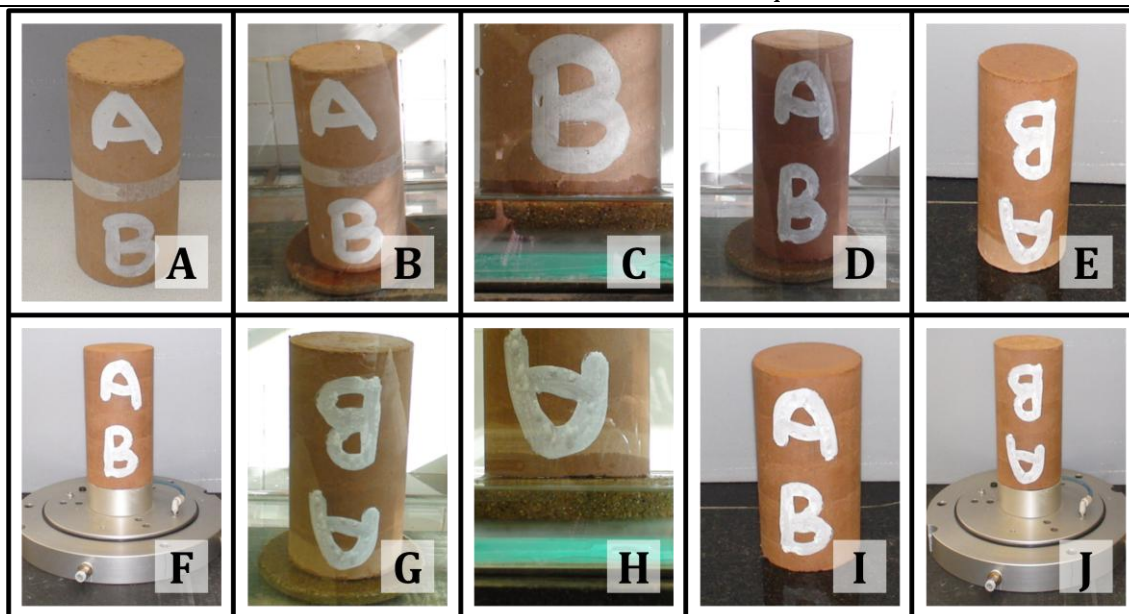


Figura 4.17: Sequência de execução do ensaio de compressão triaxial cíclica no corpo de prova seco e após 24 e 48 de saturação por capilaridade

Na Tabela 4.14 são apresentados os resultados de MR obtidos no Solo S-1 e na mistura de solo cal com 3% de cal hidratada, após cura dos corpos de prova durante 3 dias. Na Figura 4.18 foram construídas faixas de valores de MR com os valores máximos e mínimos obtidos durante o ensaio de compressão triaxial cíclica. Vale notar que os resultados apresentados são médias de pelo menos 3 corpos de prova testados.

Tabela 4.14: Valores de MR obtidos nos corpos de prova secos e após 24 e 48 horas de saturação por capilaridade, após 3 dias de cura

Dias de Cura	Teor de Cal (%)	Capilaridade (horas)	MR mínimo (MPa)	MR máximo (MPa)
3	0	0	59	98
		24	11	19
		48	8	15
	3	0	119	217
		24	32	54
		48	36	63

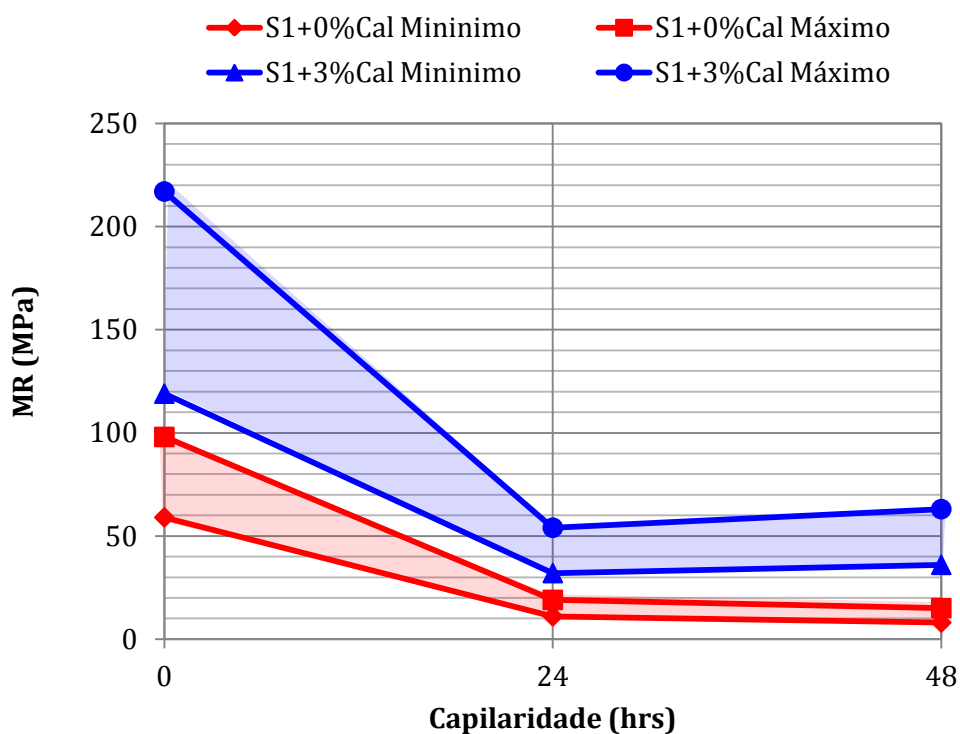


Figura 4.18: Faixa de valores de MR obtidos no ensaio de compressão triaxial cíclica, nos corpos de prova secos e após 24 e 48 horas de saturação por capilaridade, após 3 dias de cura, para o solo S-1

Nota-se na Figura 4.18 que o Solo-S1 puro teve um MR na condição seca de 60 a 100MPa e, após 24 horas de capilaridade, esse valor foi reduzido a uma faixa de 11 a 19MPa, isto é, o módulo de resiliência foi reduzido em aproximadamente 80%. Após mais 24 horas de saturação, totalizando 48 horas de capilaridade, o MR teve ainda uma redução de 85% com relação aos valores de MR na condição seca.

Vale notar que foram realizadas várias tentativas para poder executar o ensaio de compressão triaxial cíclica nos corpos de prova que foram submetidos à saturação por capilaridade. Essa dificuldade pode ser atribuída ao elevado poder expansivo do Solo S-1 e à sua baixa capacidade de suporte, aliados ao fato de que esse condicionamento foi idealizado para misturas de solo cal e não para solos sem estabilizar.

Com relação à mistura de solo cal com 3% de cal hidratada, o MR na condição seca oscilou de 100 até 200Mpa aproximadamente, mas, após 24h de saturação por capilaridade do CP, o valor do MR foi reduzido até a faixa de 30 a 50MPa, isto é, uma redução de aproximadamente 70%. Os valores de MR obtidos após 48h de saturação por capilaridade foram muito próximos aos obtidos após 24h.

Ainda na Figura 4.18 pode se notar que os valores de MR da mistura de solo cal foi superior em todas as condições: seca, após 24h horas de capilaridade e após 48h de capilaridade. Dessa forma, verificou-se que a mistura de solo cal tem resistência maior à ação deletéria da água, quando comparada com o Solo S-1 puro.

4.7.4.2. Testes com o Solo S-2

Após os testes iniciais de capilaridade com as misturas compostas pelo Solo S-1, executou-se o mesmo procedimento com a bateria completa de misturas compostas pelo Solo S-2. Nas Tabelas 5.15 e 5.16 são apresentados os modelos de Módulo de Resiliência obtidos para as misturas de solo cal com o solo S-2, após saturação por capilaridade durante 24 e 48 horas respectivamente. Vale salientar que no solo S-2 puro não foi possível executar o ensaio de compressão triaxial cíclica após capilaridade, já que os corpos de prova não resistiram esse condicionamento. Também alguns corpos de prova de misturas com cal hidratada

curados durante 3 dias, não resistiram a manipulação durante o ensaio de compressão triaxial cíclica.

Tabela 4.15: Resultados dos modelos de MR das misturas de solo cal com o solo S-2 após 24 horas de capilaridade

Tempo de Cura (Dias)	Teor de Cal (%)	Modelo Tensão Confinante			Modelo Tensão Desvio			Modelo Composto			
		k1	k2	R2	k1	k2	R2	k1	k2	k3	R2
3	0	0,0	0,000	0,00	0,0	0,000	0,00	0,0	0,000	0,000	0,00
3	3	16,5	0,322	0,72	29,2	0,284	0,28	17,6	0,474	-0,147	0,80
	5	16,1	0,327	0,82	26,4	0,396	0,40	16,7	0,427	-0,097	0,86
	7	16,3	0,355	0,80	28,0	0,381	0,38	17,0	0,466	-0,107	0,83
7	3	49,4	0,224	0,80	72,8	0,112	0,33	51,4	0,325	-0,098	0,89
	5	35,5	0,305	0,90	53,6	0,179	0,49	36,4	0,363	-0,056	0,91
	7	41,3	0,311	0,93	59,6	0,193	0,58	41,7	0,334	-0,023	0,93
28	3	55,7	0,243	0,86	63,9	0,183	0,79	53,9	0,159	0,081	0,91
	5	109,5	0,187	0,57	110,0	0,163	0,69	103,9	0,054	0,128	0,71
	7	83,5	0,244	0,95	105,8	0,163	0,68	82,9	0,227	0,017	0,96

Tabela 4.16: Resultados dos modelos de MR das misturas de solo cal com o solo S-2 após 48 horas de capilaridade

Tempo de Cura (Dias)	Teor de Cal (%)	Modelo Tensão Confinante			Modelo Tensão Desvio			Modelo Composto			
		k1	k2	R2	k1	k2	R2	k1	k2	k3	R2
3	0	0,0	0,000	0,00	0,0	0,000	0,00	0,0	0,000	0,000	0,00
3	3	16,0	0,268	0,66	22,2	0,401	0,40	16,2	0,296	-0,027	0,67
	5	11,4	0,348	0,80	18,7	0,415	0,42	11,8	0,432	-0,080	0,82
	7	12,1	0,370	0,81	20,8	0,411	0,41	86,8	0,193	0,045	0,96
7	3	35,4	0,262	0,87	51,9	0,146	0,44	36,4	0,332	-0,068	0,90
	5	24,4	0,338	0,90	35,8	0,213	0,57	24,5	0,353	-0,015	0,90
	7	26,1	0,352	0,91	41,1	0,211	0,53	26,7	0,404	-0,050	0,92
28	3	186,0	0,046	0,27	198,3	0,027	0,14	186,7	0,056	-0,009	0,27
	5	55,0	0,258	0,68	57,7	0,216	0,77	51,7	0,103	0,150	0,80
	7	88,4	0,241	0,94	106,7	0,170	0,76	126,8	0,309	-0,167	0,83

Com relação à precisão dos modelos, nota-se nas Figuras 4.19 e 4.20 que a maioria dos ensaios originou modelos que apresentaram coeficientes de regressão (R^2) superiores a 0,80. Nota-se que o modelo composto apresenta os maiores valores de R^2 , seguido de perto pelo modelo em função da tensão confinante, assim como foi observado nos ensaios executados nos CPs sem saturação.

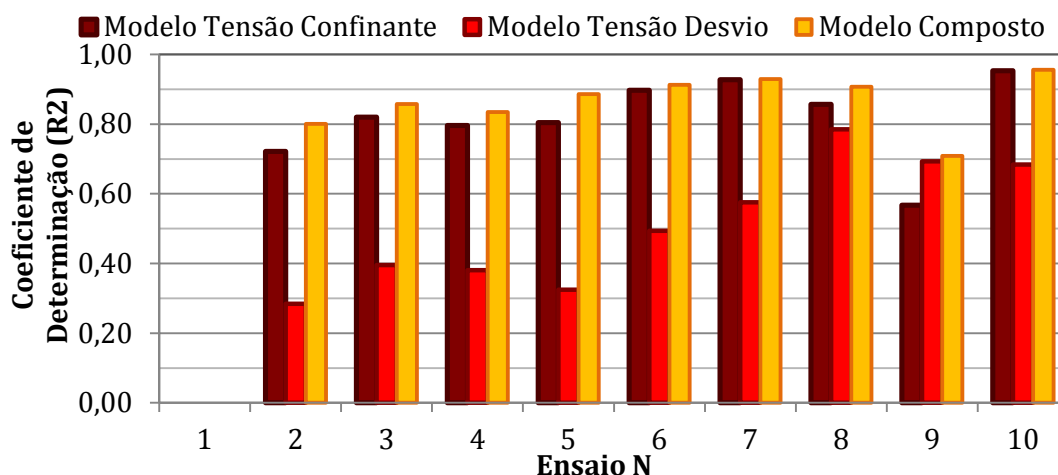


Figura 4.19: Valores de coeficientes de determinação para os diferentes modelos de módulo de resiliência utilizados, para as misturas com Solo S-2 após 24 horas de capilaridade

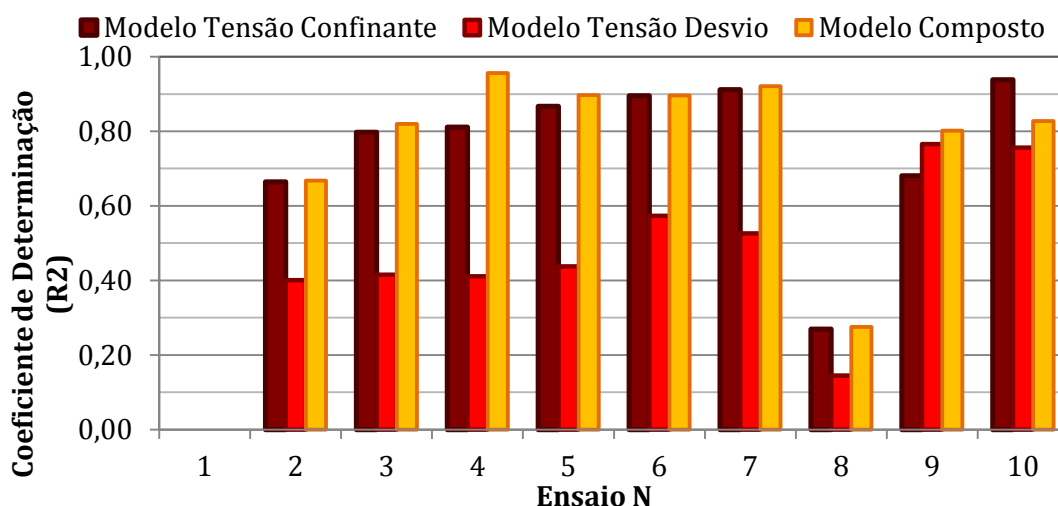


Figura 4.20: Valores de coeficientes de determinação para os diferentes modelos de módulo de resiliência utilizados, para as misturas com Solo S-2 após 48 horas de capilaridade

As Tabelas 4.17 e 4.18 apresentam os valores máximos e mínimos de MR obtidos durante o ensaio de compressão triaxial cíclico nos corpos de prova após 24 e 48 horas de saturação por capilaridade, respectivamente. Nessas tabelas também é apresentado o valor do módulo de resiliência calculado com o modelo composto das Tabelas 16 e 17, considerando as tensões de $\sigma_d=41,34$ kPa e $\sigma_3=13,78$ kPa.

Tabela 4.17: Valores de MR máximo e mínimo obtidos no ensaio triaxial mínimo e valor de MR calculado com o modelo composto para $\sigma_d=41,34$ kPa e $\sigma_3=13,78$ kPa, para as misturas com Solo S-2 após 24 horas de capilaridade

Teor de Cal (%)	Cura (Dias)	MR de Ensaio (MPa)		MR calculado (MPa)
		Máximo	Mínimo	
0	3	0	0	0
3	3	94	43	35
5		92	44	36
7		111	49	39
3	7	163	98	84
5		173	94	77
7		207	98	92
3	28	206	121	110
5		299	166	193
7		292	173	160

Tabela 4.18: Valores de MR máximo e mínimo obtidos no ensaio triaxial mínimo e valor de MR calculado com o modelo composto para $\sigma_d=41,34$ kPa e $\sigma_3=13,78$ kPa, para as misturas com Solo S-2 após 48 horas de capilaridade

Teor de Cal (%)	Cura (Dias)	MR de Ensaio (MPa)		MR calculado (MPa)
		Máximo	Mínimo	
0	3	0	0	0
3	3	71	34	32
5		73	33	27
7		87	38	70
3	7	139	80	68
5		145	71	59
7		164	79	64
3	28	246	204	209
5		243	125	118
7		310	181	153

Na Tabela 4.19 é apresentada a perda de rigidez dos corpos de prova de solo cal após 24 e 48 horas de saturação por capilaridade, com relação ao módulo de resiliência obtido na condição seca. Essa tabela mostra que as maiores reduções do módulo de resiliência acontecem nos menores tempos de cura, isto é, 3 e 7 dias. Na Figura 4.21 são apresentadas as faixas de valores de MR obtidos no ensaio de compressão triaxial cíclica, nos corpos de prova secos e após 24 e 48 horas de saturação por capilaridade, após cura de 3, 7 e 28 dias, para as misturas de solo cal com o solo S-2. Nota-se nessa figura e na Tabela 4.19 que, os corpos de prova curados durante 3 e 7 dias foram os que apresentaram maior redução do módulo de resiliência, enquanto que os CPs curados durante 28 dias, praticamente mantiveram os valores de MR.

Tabela 4.19: Perda de rigidez dos corpos de prova de solo cal após 24 e 48 horas de saturação por capilaridade

Teor de Cal (%)	Cura (Dias)	MR seco (MPa)	MR após 24h Capilaridade (MPa)	Perda de Rigidez após 24h Capilaridade (%)	MR após 48h Capilaridade (MPa)	Perda de Rigidez após 48h Capilaridade (%)
0	3	59	0	100	0	100
3	3	123	35	71	32	74
5		113	36	68	27	76
7		120	39	68	70	42
3	7	173	84	51	68	61
5		161	77	52	59	64
7		146	92	37	64	56
3	28	193	110	43	209	-8
5		136	193	-42	118	13
7		181	160	12	153	16

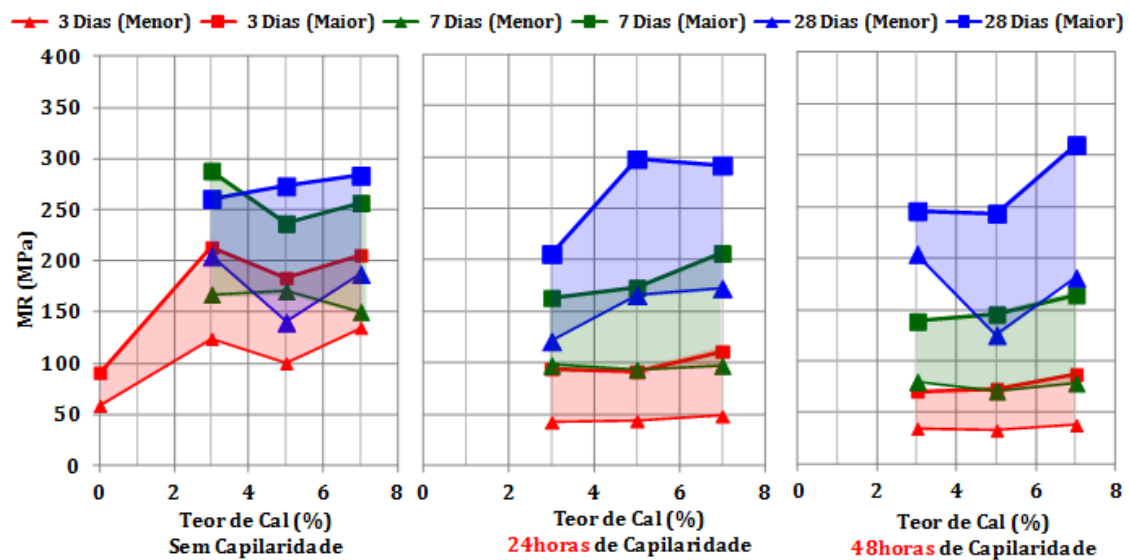


Figura 4.21: Faixa de valores de MR obtidos no ensaio de compressão triaxial cíclica, nos corpos de prova secos e após 24 e 48 horas de saturação por capilaridade, após 3, 7 e 28 dias de cura, para o solo S-2

A maior redução do MR nos corpos de prova com menor tempo de cura indica que durante o período inicial de cura é importante manter as misturas de solo cal bem drenadas e livres de contato com a água, na medida do possível. Também pode se afirmar que o efeito deletério da água em misturas de solo cal é mínimo após 28 dias de cura, em vista que os CPs curados por mais tempo, apresentaram menor redução do módulo de resiliência.

5. CONCLUSÕES

Nesta pesquisa estudou-se a estabilização de solos problemáticos (expansivos e com baixa capacidade de suporte) com a incorporação de cal hidratada do tipo CH-1. Para isso, desenvolveu-se um programa laboratorial para avaliar principalmente as características mecânicas à luz dos ensaios de resistência à compressão simples, resistência à tração e módulo de resiliência por compressão triaxial.

Os solos estudados foram dois solos argilosos (A-6 e A-7-5) característicos na faixa de domínio da Rodovia Presidente Dutra, identificados como S-1 e S-2, respectivamente. Fixaram-se os teores de cal hidratada CH-1 de 3%, 5% e 7%, em peso, para serem adicionados aos solos selecionados.

Inicialmente foram realizados os ensaios tradicionais de Limites de Atterberg e granulometria nas misturas com cal hidratada. Nesses ensaios verificou-se que a adição de cal hidratada não modificou notoriamente o Limite de Liquidez (LL) e o Índice de Plasticidade (IP) dos solos, contudo, a incorporação deste aditivo produziu solos mais friáveis e graúdos devido à aglutinação das partículas, principalmente no solo mais argiloso (A-7-5).

No ensaio de compactação Proctor na energia intermediária indicou-se que o incremento de cal hidratada aumenta o teor ótimo de umidade e reduz a massa específica seca máxima dos solos.

Se bem o ensaio de CBR não é o mais apropriado para avaliar os benefícios da estabilização de solos com cal hidratada, foi executado nas misturas de solo cal para obter uma ideia da capacidade de suporte dos solos estabilizados. Notou-se que a adição de apenas 3% de cal hidratada incrementou consideravelmente esse índice e reduziu expressivamente a expansão dos solos estudados. Contudo, vale salientar que, nas camadas de solo cal componentes de estruturas de pavimentos não devem ser considerados valores de CBR superiores a 15% no dimensionamento.

O ensaio de compressão simples foi executado apenas na condição seca, já que os corpos de prova imersos durante 24 horas, conforme indicação da DNER ME 180/94, não resistiram à imersão. Considera-se que esse tipo de condicionamento é excessivo e não representa adequadamente às condições de campo. Os resultados de resistência à compressão simples (RCS) obtidos na condição seca mostraram que os maiores ganhos de resistência foram obtidos nas misturas com 7% de cal hidratada. Contudo, a incorporação de 3% parece ser suficiente para obter resistência adequada para o emprego do solo cal como reforço de subleito, principalmente no solo A-7-5.

No ensaio de resistência à tração foi observado um comportamento similar ao notado no ensaio de compressão simples. A adição de 3% de cal hidratada nos solos produziu os maiores ganhos proporcionais de resistência à tração (RT) com relação à resistência do solo natural.

Os ensaios de compressão triaxial cíclica mostraram que o modelo composto se ajustou melhor aos dados experimentais obtidos. De modo geral, a adição de 3% de cal hidratada nos solos incrementou aproximadamente em 100% o módulo de resiliência (MR), alcançando valores próximos a 150MPa.

A saturação dos corpos de prova por capilaridade previamente à execução do ensaio de compressão triaxial cíclico, executado de forma complementar neste estudo, mostrou que os solos estabilizados com cal hidratada do tipo CH-1 apresentam boa resistência à ação deletéria da água, quando comparados com os resultados obtidos no solo puro.

Com relação ao tempo de cura, notou-se nos três parâmetros estudados, (RCS, RT, MR) que conforme se incrementa a cura do solo cal a resistência e a rigidez tendem a aumentar. Vale salientar que neste estudo se estudou até o tempo de cura de 28 dias, mas outros estudos mostram que o ganho de resistência do solo cal pode continuar por anos.

O solo cal curado durante 28 dias e saturado por capilaridade foi o que apresentou menores perdas de rigidez, quando comparado com os outros tempos de cura. Esse

comportamento indica a importância de conservar o solo cal bem drenado na sua cura inicial.

Finalmente, conclui-se que a estabilização de solos problemáticos com cal é uma técnica que incrementou a rigidez e a resistência dos solos estudados e, ao mesmo tempo, melhorou a suscetibilidade à ação deletéria da água.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACHAMPONG F.; USMEN, M.; KAGAWA, T. (1997). Evaluation of resilient modulus for lime and cement stabilized synthetic cohesive soils. Em: Transportation Research Record, No. 1589, pp. 70-75. Washington D. C. Estados Unidos da América.
- American Association of State Highway and Transportation Officials. (1993). AASHTO Guide for design of pavement structure. Washington, Estados Unidos da América.
- American Association of State Highway and Transportation Officials (2002). AASHTO Guide for Mechanistic-Empirical Design of new and rehabilitated pavement structures.
- American Association of State Highways Officials. (1999). AASHTO T 307-99. Standard Method of Test for determining the resilient Modulus of Soils and Aggregate Materials. Washington, D. C., Estados Unidos da América.
- BAPTISTA, C. F. N. (1976). Pavimentação, Compactação dos solos no Campo, Camadas de Base, Estabilização dos Solos. Livro. Tomo II. Editora Globo. Porto Alegre, RS.
- BASMA, A.A.; TUNCER, E.R. (1990). Effect on Lime on Volume Change and Compressibility of Expansive Clays. Em: Transportation Research Record 1295, TRB, National Research Council, Washington D.C. Estados Unidos da América.
- BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G. DA; CERTATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. (2008). Pavimentação asfáltica. Livro. PETROBRAS: ABEDA. Rio de Janeiro, RJ.
- BHATTACHARJA, S.; BHATTY, J. I. (2003). Comparative Performance of Portland Cement and Lime Stabilization of Moderate to High Plasticity Clay Soils. Bulletin. Portland Cement Association. Illinois. Estados Unidos da América.
- BICZYSKO, S. J. (1996). Long-Term Performance of Lime Stabilized Road Subgrade. Em: Lime Stabilization. Thomas Telford Publisher. pp. 62-71. Londres, Inglaterra.
- CHRISTENSEN, A. P. (1969). Cement Modification of Clay Soils. Em: Research Development Bulletin. Portland Cement Association. pp. 14. Estados Unidos de America.
- CORRÊA, F.C. (1989). Contribuição à estabilização do Latossolo Roxo. Tese de Doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo. São Carlos, SP.
- Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de São Paulo. (2006). Projeto de Pavimentação. Instrução de Projeto. DER-SP. IP-DE-P00/001.. São Paulo, SP.
- Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. DNER ME 122/94. Solos – determinação do limite de liquidez – método de referência e método expedito. Rio de Janeiro, RJ.
- Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. DNER ME 129/94. Solos – compactação utilizando amostras não trabalhadas. Rio de Janeiro, RJ.
- Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. DNER ME 134/94. Pavimentação – Solos – Determinação do módulo de resiliência – Método de Ensaio. Rio de Janeiro, RJ.

- Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. DNER ME 180/94. Solos estabilizados com cinza volante e cal hidratada – Determinação da resistência à compressão simples. Rio de Janeiro, RJ.
- Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. DNER ME 181/94. Solos estabilizados com cinza volante e cal hidratada – Determinação da resistência à tração por compressão diametral. Rio de Janeiro, RJ.
- Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. DNER ME 254/94. Método de Ensaio. Solos compactados em equipamento miniatura – mini-CBR e expansão. Rio de Janeiro, RJ.
- Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. DNER ME 49/94. Solos – Determinação do Índice de Suporte Califórnia utilizando amostras não trabalhadas. Rio de Janeiro, RJ.
- Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. DNER ME 51/94. Método de Ensaio. Solos – Análise Granulométrica. Rio de Janeiro, RJ.
- Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. DNER ME 82/94. Método de Ensaio. Solos – Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, RJ.
- Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. (2006). Manual de Pavimentação. Publicação IPR-719. Rio de Janeiro. RJ.
- DIAMOND, S.; KINTER, E.B. (1965). Mechanisms of Soil-Lime Stabilization: An Interpretive Review. Em: Highway Research Record 92, pp 33-103, TRB, National Research Council, Washington D.C. Estados Unidos da América.
- DUNLAP, W. S. (1963). A report on a mathematical model describing the deformation characteristics of granular materials. Technical Report 1, Project 2-8-62-27, TTI, Texas A & M University. Texas, Estados Unidos da América.
- FERREIRA, J. G. H. M. (2002). Elaboração e análise da base de dados de ensaios triaxiais dinâmicos da COPPE/UFRJ. Dissertação de Mestrado. PEC, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ.
- Florida Department of Transportation. (2008). Flexible pavement design manual, Florida DoT. Tallahassee, Florida, Estados Unidos da América.
- GRAVES, R.; EADES, J. L., e SMITH, L. L. (1988). Strength Developed from Carbonate Cementation of Silica-Carbonate Base Course Materials. Em: Transportation Research Record No. 1190. Washington D. C., Estados Unidos da América.
- GUNEY, Y., AYDILEK A.H., DEMIRKAN, M.M. (2006). Geoenvironmental behavior of foundry sand amended mixtures for highway subbases. Em: *Waste Management Journal*, Vol. 26, pp. 932-945.
- GUTIERREZ KLINSKY, L.M. (2013). Avaliação do reaproveitamento de areia de fundição residual em camadas de pavimentos. Tese de Doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos. São Paulo, SP.
- HERRIN, M.; MITCHELL, H. (1967). “Misturas Solo-Cal”. Tradução da Eng. Elda Nelis de Castro. Laboratório Nacional de Engenharia Civil. Tradução No. 1, pp. 74. Lisboa, Portugal.

- Highways Agency. (2009). Design guidance for road pavement foundations. Draft HD25. Interim advice note 73/06 revision 1. The Highways Agency. Londres, Reino Unido.
- INGLES, O. G.; METCALF, J. B. (1972). Soil Stabilization, Principles and Practice. Livro. Ed. Butterworths. Sidney. Australia.
- ISMAIEL, H. A. H. (2006). Treatment and improvement of the geotechnical properties of different soft fine-grained soils using chemical stabilization. Tese de Doutorado. Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg. Alemanha.
- JAMESON, G. (2013). Proposed Procedures of the Design of Pavements on Selected Subgrade and Lime-stabilised Subgrade Materials. 49 pp. Publicado pelo AUSTRROADS, Sidney, Australia.
- JUNG, C. (2008). Post-Construction Evaluation of Lime-Treated Soils. Publication FHWA/IN/JTRP-2005/25. Joint Transportation Research Program, Indiana Department of Transportation and Purdue University, West Lafayette, IN, Estados Unidos da América.
- JUNG, C.; BOBET, A.; SIDDIKI, N. Z.; KIM, D. (2008). Long-Term performance of chemically modified subgrade soils in Indiana. Em: Transportation Research Record, No. 2059, pp. 63-71. Washington D. C. Estados Unidos de América.
- KENNEDY, T. W.; SMITH, R.; HOLMGREEN JR. R. J.; TAHMORESSI, M. (1987). An evaluation of lime and cement stabilization. Em: Transportation Research Record, No. 1119, pp. 11-25. Washington D. C., Estados Unidos de América.
- KLINSKY, L. M. G.; FABBRI, G. T. P. (2009). Reaproveitamento de Areia de Fundação como material de base e sub-base de pavimentos. Em: Revista Transportes. V. 17. N. 2. Rio de Janeiro, RJ.
- LCPC. (1997). French design for pavement structures, [tradução ao inglês]. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées. Paris, França.
- LEANDRO, R. P. (2005). Estudo laboratorial acerca da possibilidade de aproveitamento da cinza pesada de termelétrica em bases e sub-bases de pavimentos flexíveis. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, SP.
- LIMA, D.C. (1981). Algumas considerações relativas a aspectos da estabilização dos solos, em particular à estabilização solo-cal. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, SP.
- LITTLE, D. N. (1995). Stabilization of Pavement Subgrades and Base Courses with Lime. Sponsored by the National Lime Association. Kendall/Hunt Publishing Company. Estados Unidos da América.
- LITTLE, D. N. (1999). Evaluation of Structural Properties of Lime Stabilized Soils and Aggregates, Volume 1: Summary of Findings. Report prepared for National Lime Association, Arlington, VA, Estados Unidos da América.
- LITTLE, D. N. (2000). Evaluation of structural properties of lime stabilized soils and aggregates. Volume 3: Mixture Design and Testing Protocol for Lime Stabilized Soils, National Lime Association. Disponível em: <http://www.lime.org>

- LITTLE, D. N., SCULLION, T., KOTA, P. V., BHUIYAN, J. (1995). Guidelines for mixture design and thickness design for stabilized bases and subgrades. Report No. 128703F, Texas. Transportation Institute. Estados Unidos.
- LITTLE, D.N. (1995). Handbook for stabilization of pavement subgrades and bases courses with lime. Livro preparado e patrocinado pela Associação Nacional de Cal dos Estados Unidos. Kendall/Hunt Publishing Company.
- LITTLE, D.N. (1998). Unpublished analysis of deflection data from FWD measurements on selected pavements containing lime stabilized subgrades in Mississippi. Estados Unidos.
- LOCAT, J.; BERUBE, M. A.; COQUETTE, M. (1990). Laboratory investigations on the lime stabilization of sensitive clays: shear strength development. Em: 40th Canadian Geotechnical Conference, Regina, Saskatchewan. 40th Canadian Geotechnical Conference, Regina, Saskatchewan, Canada.
- LOVATO, R. S. (2004). Estudo do Comportamento Mecânico de um Solo Laterítico Estabilizado com Cal, Aplicado à Pavimentação. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, RS.
- MACÊDO, J. A. G. (1996). Interpretação de Ensaios Deflectométricos para Avaliação Estrutural de Pavimentos Flexíveis – A experiência com FWD no Brasil. Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ.
- MALLELLA, J., QUINTUS, H.V.P.E., SMITH, K. L. (2004). Consideration of Lime-Stabilized Layers in Mechanistic-Empirical Pavement Design. Documento submetido à National Lime Association. 38 pp. Champaign, Illinois, Estados Unidos de América.
- MCDONALD, E. B. (1969). Lime Research Study—South Dakota Interstate Routes (Sixteen Projects). South Dakota Department of Highways. Estados Unidos da América.
- MEDINA, J. DE; MOTTA, L. M. G. DA. (2005). Mecânica dos Pavimentos. Livro, 2a Edição. Rio de Janeiro, RJ.
- MOLINA, C. E.; PARREIRA, A. B.; FERNANDES, J. L. Jr. (2004). Comportamento mecânico de misturas de resíduo da fabricação de papel e solo para utilização na construção rodoviária. Em: Anais do XVIII Congresso da Associação Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes. Florianópolis, SC.
- MOOSAZADEH, J. M.; WITCZAK, W. (1981). Prediction of subgrade moduli for soil that exhibits nonlinear behavior. Transportation Research Record. Transportation Research Board, National Research Council Washington, D.C., Estados Unidos da América.
- National Association of Australian State Road Authorities. (2008). NAASRA: Technical Basis of Austroads Guide to Pavement Technology, Part 2: Pavement Structural Design. Austroroads Technical Report. Sidney – Austrália.
- National Cooperative Highway Research Program. (1997). NCHRP: Laboratory determination of resilient modulus for flexible pavement design. NCHRP Web Document 14 for Project 1-28. Transportation Research Board, Washington, D.C., Estados Unidos da América.
- National Lime Association (NLA). (2006). Mixture Design and Testing Procedures for Lime Stabilized Soil. Relatório Técnico. Disponível em: http://www.lime.org/documents/publications/free_downloads/tech-brief-2006.pdf

- National Lime Association. (2004). NLA: Lime-treated soil, construction manual. Lime stabilization and lime modification. Estados Unidos da América. Disponível em: www.lime.org. Acessado em: 13/02/2009.
- NEUBAUER, C. H. JR.; THOMPSON, M. R. (1972). Stability Properties of Uncured Lime-Treated Fine-Grained Soils. Em: HRB Highway Research Record 381, pp. 20-26. National Research Council, Washington, D.C., Estados Unidos da América.
- PETRY, T. M.; ANDWOHLGEMUTH, S. K. (1989). The effects of pulverization on the strength and durability of highly active clay soils stabilized with lime and portland cement. Em: TRR 1190, pp. 38-45. Transportation Research Board, Washington, D.C., Estados Unidos da América.
- QUBAIN, B. S.; SEKSINSKY, E. J.; LI, J. (2000). Incorporating subgrade lime stabilization into pavement design. Em: Transportation Research Record 1546. Washington D. C., Estados Unidos da América.
- SIVAPULLAIAH, P. V.; PRASHANTH, J. P.; SRIDHARAN, A. (1998). Delay in compaction and importance of the lime fixation point on the strength and compaction characteristics of soil. Em: Ground Improvement, N.2, pp.27-32.
- SNETHEN, D. R., MILLER, G.A. E CERATO, A.B. (2008). Evaluation and Field Verification of Strength and Structural Improvement of Chemically Stabilized Subgrade Soil. Oklahoma Department of Transportation. ODOT Report. Reference Number 2195. Estados Unidos.
- SOLANKI, P.; ZAMAN, M. M.; DEAN, J. (2010) Resilient Modulus of Clay Subgrades Stabilized with Lime, Class C Fly Ash and Cement Kiln Dust for Pavement Design. Em: Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 2186. Washington, D.C., Estados Unidos da América.
- SWANSON, T. E. E THOMPSON, M. R. (1967). Flexural Fatigue Strength of Lime-Soil Mixtures. Highway Research Record No. 198. Highway Research Board, Washington D.C. Estados Unidos.
- SWEENEY, D. A.; WONG, D. K. H.; FREDLUND, D. G. (1988). Effect of lime on highly plastic clay with special emphasis on aging. Em: Transportation Research Record, No. 1190, pp. 13-23. Washington D. C. Estados Unidos de América.
- Texas Department of Transportation. (2005). Guidelines for modification and stabilization of soils and base for use in pavement structures. Tx DoT 09/205, Texas DoT. Austin, Texas, Estados Unidos da América.
- THOMPSON, M. R. (1966). Lime-Reactivity of Illinois Soils. Journal of Soil Mechanics and Foundation Division. Em ASCE Journal, V. 92, SM5 September.
- Thompson, M. R. e Nauman, D. (1993). Rutting Rate Analyses of the AASHTO Road Test Flexible Pavements. Transportation Research Record No. 1384. Washington D.C., Estados Unidos.
- THOMPSON, M. R.; FIGUEROA, J. L. (1980). Mechanistic Thickness-Design Procedure for Soil-Lime Layers. Em: Transportation Research Record 754, pp. 32-36. TRB, National Research Council, Washington, D.C., Estados Unidos da América.
- THOMPSON, M.R. (1969). Engineering Properties of Lime-Soil Mixtures. Em: Journal of Materials, ASTM, Vol.4.

THOMSPON, M. R. E SMITH, (1990). Repeated Triaxial characterization fo granular bases. Transportation Research Record No. 1278. Washington D.C., Estados Unidos.

Transportation Research Board. (1987). TRB: State of the Art Report 5 – Lime Stabilization. Transportation Research Board. (www.trb.org). Estados Unidos da América.

YUSUF, F.A.M.S.; LITTLE, N.D.; SARKAR, S.L. (2001). Evaluation of Structural Constribution of Lime Stabilization of Subgrade Soils in Mississippi. Transportation Research Record 1757. Washington D. C., Estados Unidos da América.

ANEXO C-1: RESULTADOS DO ENSAIO DE COMPRESSÃO TRIAXIAL CÍCLICA NAS MISTURAS DE SOLO CAL

C-1.1. RESULTADOS DO ENSAIO DE COMPRESSÃO TRIAXIAL CÍCLICA NAS MISTURAS DE SOLO CAL COM O SOLO S-1

Tabela C-1-1: Sequência de tensões e valores de módulo de resiliência obtidos no Solo S-1 puro, aos 3 dias de cura

ENSAIO DE COMPRESSÃO TRIAXIAL CÍCLICA					
Solo =			S1		
Teor de Cal Hidratada =			0%		
Dias de Cura =			3		
Corpo de Prova			118	119	120
Sequência	Confinante (s3) (kPa)	Desvio (sd) (kPa)	MR (MPa)	MR (MPa)	MR (MPa)
1	20,7	20,7	67,2	65,7	71,6
2	20,7	41,4	78,7	78,8	83,7
3	20,7	62,1	69,5	70,0	74,8
4	34,5	34,5	92,4	93,3	99,3
5	34,5	38,9	73,2	73,4	78,7
6	34,5	102,9	62,4	62,5	66,5
7	50,4	50,4	89,3	89,1	94,7
8	50,4	102,9	68,0	68,2	72,3
9	50,4	155,2	58,4	58,2	61,0
10	68,9	68,9	88,7	88,8	93,1
11	68,9	137,9	66,4	66,1	69,2
12	68,9	206,8	60,9	60,4	62,6
13	102,9	102,9	91,0	90,3	94,2
14	102,9	206,8	71,9	71,1	73,4
15	102,9	309	74,5	72,8	75,0
16	137,9	137,9	97,7	96,9	100,2
17	137,9	274,7	83,9	82,2	84,4
18	137,9	412	84,5	81,8	84,4

Tabela C-1-2: Sequência de tensões e valores de módulo de resiliência obtidos no Solo S-1 com 3% de cal hidratada, aos 3 dias de cura

ENSAIO DE COMPRESSÃO TRIAXIAL CÍCLICA					
Solo =			S1		
Teor de Cal Hidratada =			3%		
Dias de Cura =			3		
Corpo de Prova			157	158	159
Sequência	Confinante (s3) (kPa)	Desvio (sd) (kPa)	MR (MPa)	MR (MPa)	MR (MPa)
1	20,7	20,7	123,4	109,1	125,4
2	20,7	41,4	156,1	129,5	145,1
3	20,7	62,1	152,1	130,1	139,6
4	34,5	34,5	181,8	151,3	162,3
5	34,5	38,9	163,0	138,7	146,6
6	34,5	102,9	147,2	130,7	133,4
7	50,4	50,4	192,6	163,0	173,6
8	50,4	102,9	160,9	140,3	146,4
9	50,4	155,2	142,5	130,1	131,5
10	68,9	68,9	203,9	174,9	183,9
11	68,9	137,9	161,5	146,0	149,3
12	68,9	206,8	143,7	134,1	135,7
13	102,9	102,9	211,6	184,7	197,1
14	102,9	206,8	165,8	158,6	158,5
15	102,9	309	158,3	153,7	153,3
16	137,9	137,9	224,4	211,9	215,2
17	137,9	274,7	179,4	174,4	174,0
18	137,9	412	166,3	163,3	162,2

Tabela C-1-3: Sequência de tensões e valores de módulo de resiliência obtidos no Solo S-1 com 3% de cal hidratada, aos 7 dias de cura

ENSAIO DE COMPRESSÃO TRIAXIAL CÍCLICA					
Solo =			S1		
Teor de Cal Hidratada =			3%		
Dias de Cura =			7		
Corpo de Prova			58	59	60
Sequência	Confinante (s3) (kPa)	Desvio (sd) (kPa)	MR (MPa)	MR (MPa)	MR (MPa)
1	20,7	20,7	144,0	135,8	146,3
2	20,7	41,4	153,7	152,2	151,0
3	20,7	62,1	144,8	146,1	140,1
4	34,5	34,5	170,0	168,9	166,5
5	34,5	38,9	148,6	150,8	143,2
6	34,5	102,9	133,8	136,8	128,9
7	50,4	50,4	169,7	169,2	161,5
8	50,4	102,9	139,9	141,9	133,2
9	50,4	155,2	125,0	127,0	119,9
10	68,9	68,9	171,0	168,5	157,8
11	68,9	137,9	134,2	135,4	126,7
12	68,9	206,8	123,1	124,7	118,6
13	102,9	102,9	170,2	173,6	161,2
14	102,9	206,8	133,0	139,8	132,1
15	102,9	309	133,3	138,5	132,9
16	137,9	137,9	169,7	188,6	178,5
17	137,9	274,7	138,8	154,1	147,5
18	137,9	412	136,6	146,9	142,1

Tabela C-1-4: Sequência de tensões e valores de módulo de resiliência obtidos no Solo S-1 com 3% de cal hidratada, aos 28 dias de cura

ENSAIO DE COMPRESSÃO TRIAXIAL CÍCLICA					
Solo =			S1		
Teor de Cal Hidratada =			3%		
Dias de Cura =			28		
Corpo de Prova			61	62	63
Sequência	Confinante (s3) (kPa)	Desvio (sd) (kPa)	MR (MPa)	MR (MPa)	MR (MPa)
1	20,7	20,7	144,9	84,3	173,3
2	20,7	41,4	149,6	75,1	194,3
3	20,7	62,1	142,0	62,5	187,8
4	34,5	34,5	164,0	92,1	210,3
5	34,5	38,9	146,4	66,0	192,0
6	34,5	102,9	135,6	56,6	175,4
7	50,4	50,4	164,0	88,2	217,7
8	50,4	102,9	139,9	62,3	186,6
9	50,4	155,2	130,1	59,4	167,1
10	68,9	68,9	163,1	86,6	227,0
11	68,9	137,9	136,7	64,5	186,6
12	68,9	206,8	130,7	66,9	170,0
13	102,9	102,9	184,8	90,2	240,5
14	102,9	206,8	151,7	75,3	194,9
15	102,9	309	152,6	85,1	189,3
16	137,9	137,9	203,6	103,0	258,2
17	137,9	274,7	170,2	90,2	211,7
18	137,9	412	163,9	98,0	198,5

Tabela C-1-5: Sequência de tensões e valores de módulo de resiliência obtidos no Solo S-1 com 5% de cal hidratada, aos 3 dias de cura

ENSAIO DE COMPRESSÃO TRIAXIAL CÍCLICA					
Solo =			S1		
Teor de Cal Hidratada =			5%		
Dias de Cura =			3		
Corpo de Prova			70	71	72
Sequência	Confinante (s3) (kPa)	Desvio (sd) (kPa)	MR (MPa)	MR (MPa)	MR (MPa)
1	20,7	20,7	122,0	168,6	117,9
2	20,7	41,4	149,1	158,5	147,1
3	20,7	62,1	143,6	148,2	140,9
4	34,5	34,5	166,6	174,8	170,9
5	34,5	38,9	147,7	152,2	149,8
6	34,5	102,9	133,1	136,3	135,2
7	50,4	50,4	175,2	182,6	180,5
8	50,4	102,9	145,7	146,8	149,6
9	50,4	155,2	128,4	128,2	132,0
10	68,9	68,9	185,0	184,9	192,2
11	68,9	137,9	146,6	142,0	151,0
12	68,9	206,8	131,2	128,7	135,0
13	102,9	102,9	193,8	189,6	201,2
14	102,9	206,8	153,5	147,7	157,9
15	102,9	309	149,1	143,6	153,0
16	137,9	137,9	210,0	202,7	216,6
17	137,9	274,7	170,3	160,1	174,7
18	137,9	412	160,2	150,8	164,2

Tabela C-1-6: Sequência de tensões e valores de módulo de resiliência obtidos no Solo S-1 com 5% de cal hidratada, aos 7 dias de cura

ENSAIO DE COMPRESSÃO TRIAXIAL CÍCLICA					
Solo =			S1		
Teor de Cal Hidratada =			5%		
Dias de Cura =			7		
Corpo de Prova			79	80	81
Sequência	Confinante (s3) (kPa)	Desvio (sd) (kPa)	MR (MPa)	MR (MPa)	MR (MPa)
1	20,7	20,7	146,3	120,6	109,3
2	20,7	41,4	151,0	133,2	121,6
3	20,7	62,1	140,1	124,7	118,5
4	34,5	34,5	166,5	151,8	135,0
5	34,5	38,9	143,2	130,8	124,2
6	34,5	102,9	128,9	117,0	117,3
7	50,4	50,4	161,5	152,8	140,2
8	50,4	102,9	133,2	124,8	123,7
9	50,4	155,2	119,9	110,6	114,6
10	68,9	68,9	157,8	156,0	145,0
11	68,9	137,9	126,8	121,5	123,0
12	68,9	206,8	118,6	111,7	116,4
13	102,9	102,9	161,2	157,5	150,6
14	102,9	206,8	132,1	124,0	127,1
15	102,9	309	132,9	125,6	130,5
16	137,9	137,9	178,5	163,1	159,6
17	137,9	274,7	147,9	134,3	137,6
18	137,9	412	142,1	131,1	136,6

Tabela C-1-7: Sequência de tensões e valores de módulo de resiliência obtidos no Solo S-1 com 5% de cal hidratada, aos 28 dias de cura

ENSAIO DE COMPRESSÃO TRIAXIAL CÍCLICA					
Solo =			S1		
Teor de Cal Hidratada =			5%		
Dias de Cura =			28		
Corpo de Prova			88	89	90
Sequência	Confinante (s3) (kPa)	Desvio (sd) (kPa)	MR (MPa)	MR (MPa)	MR (MPa)
1	20,7	20,7	83,2	168,4	103,9
2	20,7	41,4	79,4	197,7	114,9
3	20,7	62,1	67,0	195,4	108,2
4	34,5	34,5	97,9	212,3	130,6
5	34,5	38,9	70,7	201,8	113,8
6	34,5	102,9	60,3	185,2	105,4
7	50,4	50,4	93,5	230,4	132,1
8	50,4	102,9	66,1	197,5	113,1
9	50,4	155,2	62,6	173,6	107,7
10	68,9	68,9	91,8	245,0	143,1
11	68,9	137,9	67,7	194,4	119,8
12	68,9	206,8	70,3	171,2	117,8
13	102,9	102,9	94,3	252,0	152,8
14	102,9	206,8	79,1	194,4	137,9
15	102,9	309	89,9	187,7	146,2
16	137,9	137,9	108,1	263,0	175,7
17	137,9	274,7	95,6	210,2	163,0
18	137,9	412	102,7	197,7	162,7

Tabela C-1-8: Sequência de tensões e valores de módulo de resiliência obtidos no Solo S-1 com 7% de cal hidratada, aos 3 dias de cura

ENSAIO DE COMPRESSÃO TRIAXIAL CÍCLICA					
Solo =			S1		
Teor de Cal Hidratada =			7%		
Dias de Cura =			3		
Corpo de Prova			97	98	99
Sequência	Confinante (s3) (kPa)	Desvio (sd) (kPa)	MR (MPa)	MR (MPa)	MR (MPa)
1	20,7	20,7	120,3	148,1	214,8
2	20,7	41,4	154,9	192,6	248,5
3	20,7	62,1	153,3	182,5	229,3
4	34,5	34,5	182,0	222,8	270,3
5	34,5	38,9	168,9	193,4	231,6
6	34,5	102,9	155,1	172,6	201,8
7	50,4	50,4	199,3	226,1	263,3
8	50,4	102,9	170,8	187,1	211,2
9	50,4	155,2	152,8	164,8	181,9
10	68,9	68,9	211,6	233,2	255,4
11	68,9	137,9	172,9	186,3	200,4
12	68,9	206,8	156,0	165,5	177,0
13	102,9	102,9	224,1	240,1	252,4
14	102,9	206,8	180,3	190,5	198,3
15	102,9	309	173,6	182,3	188,5
16	137,9	137,9	241,4	254,1	260,9
17	137,9	274,7	196,7	206,3	210,8
18	137,9	412	184,7	192,9	195,7

Tabela C-1-9: Sequência de tensões e valores de módulo de resiliência obtidos no Solo S-1 com 7% de cal hidratada, aos 7 dias de cura

ENSAIO DE COMPRESSÃO TRIAXIAL CÍCLICA					
Solo =			S1		
Teor de Cal Hidratada =			7%		
Dias de Cura =			7		
Corpo de Prova			106	107	108
Sequência	Confinante (s3) (kPa)	Desvio (sd) (kPa)	MR (MPa)	MR (MPa)	MR (MPa)
1	20,7	20,7	103,0	118,5	117,1
2	20,7	41,4	132,0	146,2	125,7
3	20,7	62,1	131,3	141,4	122,7
4	34,5	34,5	145,3	159,9	135,5
5	34,5	38,9	142,4	149,0	127,0
6	34,5	102,9	136,3	140,0	119,9
7	50,4	50,4	158,7	167,9	135,3
8	50,4	102,9	147,3	150,9	124,0
9	50,4	155,2	137,2	139,9	117,5
10	68,9	68,9	172,2	174,8	147,2
11	68,9	137,9	151,1	154,4	129,7
12	68,9	206,8	140,8	143,4	122,9
13	102,9	102,9	182,7	185,2	161,9
14	102,9	206,8	158,0	160,6	140,0
15	102,9	309	155,3	157,3	139,1
16	137,9	137,9	194,5	195,2	173,8
17	137,9	274,7	171,0	172,7	152,1
18	137,9	412	164,2	165,6	148,2

Tabela C-1-10: Sequência de tensões e valores de módulo de resiliência obtidos no Solo S-1 com 7% de cal hidratada, aos 28 dias de cura

ENSAIO DE COMPRESSÃO TRIAXIAL CÍCLICA					
Solo =			S1		
Teor de Cal Hidratada =			7%		
Dias de Cura =			28		
Corpo de Prova			115	116	117
Sequência	Confinante (s3) (kPa)	Desvio (sd) (kPa)	MR (MPa)	MR (MPa)	MR (MPa)
1	20,7	20,7	177,6	202,1	153,0
2	20,7	41,4	188,6	191,3	185,8
3	20,7	62,1	179,9	179,8	179,9
4	34,5	34,5	217,2	221,4	212,9
5	34,5	38,9	192,3	192,1	192,5
6	34,5	102,9	175,8	173,9	177,6
7	50,4	50,4	223,3	223,7	222,9
8	50,4	102,9	191,2	187,2	195,1
9	50,4	155,2	175,1	169,8	180,4
10	68,9	68,9	233,7	228,1	239,3
11	68,9	137,9	195,1	187,1	203,1
12	68,9	206,8	180,7	172,7	188,6
13	102,9	102,9	253,1	245,0	261,2
14	102,9	206,8	208,6	199,1	218,1
15	102,9	309	205,2	195,8	214,6
16	137,9	137,9	274,8	264,8	284,7
17	137,9	274,7	229,5	218,1	240,9
18	137,9	412	217,7	207,0	228,4

C-1.2. RESULTADOS DO ENSAIO DE COMPRESSÃO TRIAXIAL CÍCLICA NAS MISTURAS DE SOLO CAL COM O SOLO S-2

Tabela C-1-11: Sequência de tensões e valores de módulo de resiliência obtidos no solo S-2 puro, aos 3 dias de cura

ENSAIO DE COMPRESSÃO TRIAXIAL CÍCLICA					
Solo =			S-2		
Teor de Cal Hidratada =			0%		
Dias de Cura =			3		
Corpo de Prova			88	89	90
Sequência	Confinante (s3) (kPa)	Desvio (sd) (kPa)	MR (MPa)	MR (MPa)	MR (MPa)
1	20,7	20,7	69,9	70,4	69,4
2	20,7	41,4	87,4	74,1	86,2
3	20,7	62,1	79,5	66,7	78,1
4	34,5	34,5	103,5	82,0	100,1
5	34,5	38,9	84,9	67,6	82,2
6	34,5	102,9	74,0	59,4	71,5
7	50,4	50,4	101,6	78,4	97,6
8	50,4	102,9	74,0	63,4	77,8
9	50,4	155,2	101,6	56,5	67,8
10	68,9	68,9	80,1	81,1	98,2
11	68,9	137,9	69,2	63,3	76,4
12	68,9	206,8	102,6	59,2	69,4
13	102,9	102,9	77,4	85,3	100,8
14	102,9	206,8	69,7	69,0	80,6
15	102,9	309	103,7	70,9	81,3
16	137,9	137,9	80,1	92,0	106,9
17	137,9	274,7	80,7	78,6	90,6
18	137,9	412	108,0	80,0	92,4

Tabela C-1-12: Sequência de tensões e valores de módulo de resiliência obtidos no solo S-2 com 3% de cal hidratada, aos 3 dias de cura

ENSAIO DE COMPRESSÃO TRIAXIAL CÍCLICA					
Solo =			S-2		
Teor de Cal Hidratada =			3%		
Dias de Cura =			3		
Corpo de Prova			91	92	93
Sequência	Confinante (s3) (kPa)	Desvio (sd) (kPa)	MR (MPa)	MR (MPa)	MR (MPa)
1	20,7	20,7	132,9	115,8	124,4
2	20,7	41,4	163,1	149,0	156,1
3	20,7	62,1	153,0	142,0	147,5
4	34,5	34,5	188,0	165,0	176,5
5	34,5	38,9	161,3	151,6	156,5
6	34,5	102,9	143,5	139,6	141,6
7	50,4	50,4	191,1	168,6	179,9
8	50,4	102,9	156,6	149,8	153,2
9	50,4	155,2	137,5	137,1	137,3
10	68,9	68,9	199,2	176,9	188,1
11	68,9	137,9	155,1	152,9	154,0
12	68,9	206,8	139,5	141,0	140,3
13	102,9	102,9	205,3	189,2	197,3
14	102,9	206,8	161,0	162,5	161,8
15	102,9	309	157,0	160,5	158,8
16	137,9	137,9	218,0	208,8	213,4
17	137,9	274,7	176,0	179,9	178,0
18	137,9	412	170,0	174,3	172,2

Tabela C-1-13: Sequência de tensões e valores de módulo de resiliência obtidos no solo S-2 com 3% de cal hidratada, aos 7 dias de cura

ENSAIO DE COMPRESSÃO TRIAXIAL CÍCLICA					
Solo =			S-2		
Teor de Cal Hidratada =			3%		
Dias de Cura =			7		
Corpo de Prova			64	65	66
Sequência	Confinante (s3) (kPa)	Desvio (sd) (kPa)	MR (MPa)	MR (MPa)	MR (MPa)
1	20,7	20,7	174,1	160,9	167,5
2	20,7	41,4	218,8	198,5	208,7
3	20,7	62,1	210,2	196,2	203,2
4	34,5	34,5	247,7	232,3	240,0
5	34,5	38,9	223,5	216,2	219,9
6	34,5	102,9	203,6	202,9	203,3
7	50,4	50,4	253,3	250,6	252,0
8	50,4	102,9	218,2	219,6	218,9
9	50,4	155,2	197,8	200,6	199,2
10	68,9	68,9	262,4	265,2	263,8
11	68,9	137,9	218,8	222,4	220,6
12	68,9	206,8	200,5	204,2	202,4
13	102,9	102,9	270,8	275,5	273,2
14	102,9	206,8	227,5	230,1	228,8
15	102,9	309	221,9	224,5	223,2
16	137,9	137,9	286,3	290,0	288,2
17	137,9	274,7	246,4	249,0	247,7
18	137,9	412	232,1	236,9	234,5

Tabela C-1-14: Sequência de tensões e valores de módulo de resiliência obtidos no solo S-2 com 3% de cal hidratada, aos 28 dias de cura

ENSAIO DE COMPRESSÃO TRIAXIAL CÍCLICA					
Solo =			S-2		
Teor de Cal Hidratada =			3%		
Dias de Cura =			28		
Corpo de Prova			1	2	3
Sequência	Confinante (s3) (kPa)	Desvio (sd) (kPa)	MR (MPa)	MR (MPa)	MR (MPa)
1	20,7	20,7	197,0	285,2	132,0
2	20,7	41,4	198,9	295,7	128,1
3	20,7	62,1	199,5	297,3	130,9
4	34,5	34,5	212,1	315,3	128,1
5	34,5	38,9	205,3	306,5	130,9
6	34,5	102,9	204,3	294,8	136,7
7	50,4	50,4	217,3	326,2	143,2
8	50,4	102,9	208,8	305,3	145,4
9	50,4	155,2	209,7	285,3	149,4
10	68,9	68,9	224,3	332,3	154,4
11	68,9	137,9	212,3	299,1	165,0
12	68,9	206,8	215,9	281,3	185,0
13	102,9	102,9	230,4	339,1	155,7
14	102,9	206,8	222,5	299,1	199,8
15	102,9	309	237,3	286,5	226,4
16	137,9	137,9	222,5	347,6	187,1
17	137,9	274,7	237,3	303,7	236,4
18	137,9	412	238,3	294,1	250,4

Tabela C-1-15: Sequência de tensões e valores de módulo de resiliência obtidos no solo S-2 com 5% de cal hidratada, aos 3 dias de cura

ENSAIO DE COMPRESSÃO TRIAXIAL CÍCLICA					
Solo =			S-2		
Teor de Cal Hidratada =			5%		
Dias de Cura =			3		
Corpo de Prova			92	93	94
Sequência	Confinante (s3) (kPa)	Desvio (sd) (kPa)	MR (MPa)	MR (MPa)	MR (MPa)
1	20,7	20,7	89,3	111,3	100,3
2	20,7	41,4	133,3	140,0	136,7
3	20,7	62,1	131,3	139,1	135,2
4	34,5	34,5	113,0	157,7	135,4
5	34,5	38,9	126,7	152,2	139,5
6	34,5	102,9	130,8	144,8	137,8
7	50,4	50,4	126,7	165,9	146,3
8	50,4	102,9	130,8	156,0	143,4
9	50,4	155,2	113,0	146,9	130,0
10	68,9	68,9	129,3	176,4	152,9
11	68,9	137,9	134,3	162,2	148,3
12	68,9	206,8	121,2	153,7	137,5
13	102,9	102,9	136,0	191,7	163,9
14	102,9	206,8	142,6	175,5	159,1
15	102,9	309	139,0	174,7	156,9
16	137,9	137,9	154,0	213,2	183,6
17	137,9	274,7	168,0	193,9	181,0
18	137,9	412	161,9	188,6	175,3

Tabela C-1-16: Sequência de tensões e valores de módulo de resiliência obtidos no solo S-2 com 5% de cal hidratada, aos 7 dias de cura

ENSAIO DE COMPRESSÃO TRIAXIAL CÍCLICA					
Solo =			S-2		
Teor de Cal Hidratada =			5%		
Dias de Cura =			7		
Corpo de Prova			67	68	69
Sequência	Confinante (s3) (kPa)	Desvio (sd) (kPa)	MR (MPa)	MR (MPa)	MR (MPa)
1	20,7	20,7	150,4	176,6	185,9
2	20,7	41,4	191,4	177,8	189,2
3	20,7	62,1	186,0	175,8	183,2
4	34,5	34,5	218,6	205,7	202,3
5	34,5	38,9	200,7	188,9	186,1
6	34,5	102,9	185,4	176,3	173,2
7	50,4	50,4	232,0	215,3	207,4
8	50,4	102,9	200,6	187,7	182,2
9	50,4	155,2	183,0	173,3	168,3
10	68,9	68,9	242,7	221,7	211,9
11	68,9	137,9	203,3	185,6	179,8
12	68,9	206,8	188,6	173,5	169,2
13	102,9	102,9	254,7	222,4	216,4
14	102,9	206,8	214,6	187,0	182,5
15	102,9	309	212,0	187,3	181,9
16	137,9	137,9	270,6	221,3	218,3
17	137,9	274,7	235,5	194,0	189,8
18	137,9	412	226,7	191,6	189,9

Tabela C-1-17: Sequência de tensões e valores de módulo de resiliência obtidos no solo S-2 com 5% de cal hidratada, aos 28 dias de cura

ENSAIO DE COMPRESSÃO TRIAXIAL CÍCLICA					
Solo =			S-2		
Teor de Cal Hidratada =			5%		
Dias de Cura =			28		
Corpo de Prova			10	11	12
Sequência	Confinante (s3) (kPa)	Desvio (sd) (kPa)	MR (MPa)	MR (MPa)	MR (MPa)
1	20,7	20,7	138,2	158,2	148,2
2	20,7	41,4	136,2	162,0	149,1
3	20,7	62,1	140,2	162,1	140,2
4	34,5	34,5	145,2	165,3	155,3
5	34,5	38,9	148,2	167,7	158,0
6	34,5	102,9	155,8	169,3	162,6
7	50,4	50,4	124,2	176,6	150,4
8	50,4	102,9	155,2	175,0	165,1
9	50,4	155,2	178,9	186,7	182,8
10	68,9	68,9	130,8	184,7	157,8
11	68,9	137,9	168,8	187,0	177,9
12	68,9	206,8	199,5	206,7	203,1
13	102,9	102,9	154,8	192,7	173,8
14	102,9	206,8	203,1	228,4	215,8
15	102,9	309	244,9	251,7	248,3
16	137,9	137,9	188,2	229,2	208,7
17	137,9	274,7	240,0	265,0	252,5
18	137,9	412	273,6	273,0	273,3

Tabela C-1-18: Sequência de tensões e valores de módulo de resiliência obtidos no solo S-2 com 7% de cal hidratada, aos 3 dias de cura

ENSAIO DE COMPRESSÃO TRIAXIAL CÍCLICA					
Solo =			S-2		
Teor de Cal Hidratada =			7%		
Dias de Cura =			3		
Corpo de Prova			94	95	96
Sequência	Confinante (s3) (kPa)	Desvio (sd) (kPa)	MR (MPa)	MR (MPa)	MR (MPa)
1	20,7	20,7	154,1	122,8	138,5
2	20,7	41,4	158,6	137,8	148,2
3	20,7	62,1	148,8	134,1	141,5
4	34,5	34,5	172,8	148,0	160,4
5	34,5	38,9	152,0	137,5	144,8
6	34,5	102,9	140,2	130,8	135,5
7	50,4	50,4	172,2	159,0	165,6
8	50,4	102,9	147,7	144,1	145,9
9	50,4	155,2	134,9	134,9	134,9
10	68,9	68,9	183,4	174,9	179,2
11	68,9	137,9	149,7	151,8	150,8
12	68,9	206,8	137,7	142,2	140,0
13	102,9	102,9	192,0	194,8	193,4
14	102,9	206,8	154,5	165,3	159,9
15	102,9	309	152,3	163,3	157,8
16	137,9	137,9	197,2	214,6	205,9
17	137,9	274,7	163,2	182,8	173,0
18	137,9	412	158,6	177,2	167,9

Tabela C-1-19: Sequência de tensões e valores de módulo de resiliência obtidos no solo S-2 com 7% de cal hidratada, aos 7 dias de cura

ENSAIO DE COMPRESSÃO TRIAXIAL CÍCLICA					
Solo =			S-2		
Teor de Cal Hidratada =			7%		
Dias de Cura =			7		
Corpo de Prova			70	71	72
Sequência	Confinante (s3) (kPa)	Desvio (sd) (kPa)	MR (MPa)	MR (MPa)	MR (MPa)
1	20,7	20,7	150,8	125,2	175,4
2	20,7	41,4	182,0	153,2	190,9
3	20,7	62,1	176,4	152,7	188,8
4	34,5	34,5	195,5	180,7	202,0
5	34,5	38,9	191,5	171,8	193,5
6	34,5	102,9	180,4	163,3	181,5
7	50,4	50,4	200,7	198,3	218,0
8	50,4	102,9	191,9	180,7	194,0
9	50,4	155,2	180,5	171,3	178,0
10	68,9	68,9	208,9	215,5	228,0
11	68,9	137,9	196,9	191,0	194,9
12	68,9	206,8	187,4	181,5	182,0
13	102,9	102,9	222,6	239,1	241,0
14	102,9	206,8	213,0	210,0	207,0
15	102,9	309	214,6	209,0	205,4
16	137,9	137,9	248,6	264,3	257,9
17	137,9	274,7	238,0	233,1	226,1
18	137,9	412	231,6	225,0	219,7

Tabela C-1-20: Sequência de tensões e valores de módulo de resiliência obtidos no solo S-2 com 7% de cal hidratada, aos 28 dias de cura

ENSAIO DE COMPRESSÃO TRIAXIAL CÍCLICA					
Solo =			S-2		
Teor de Cal Hidratada =			7%		
Dias de Cura =			28		
Corpo de Prova			19	20	21
Sequência	Confinante (s3) (kPa)	Desvio (sd) (kPa)	MR (MPa)	MR (MPa)	MR (MPa)
1	20,7	20,7	151,6	219,7	155,0
2	20,7	41,4	170,0	245,0	168,3
3	20,7	62,1	182,3	247,7	165,5
4	34,5	34,5	178,4	258,0	185,4
5	34,5	38,9	193,4	255,0	176,4
6	34,5	102,9	203,9	250,0	171,1
7	50,4	50,4	197,7	267,0	200,3
8	50,4	102,9	211,2	257,4	185,3
9	50,4	155,2	216,9	248,8	180,3
10	68,9	68,9	218,8	275,8	218,7
11	68,9	137,9	223,9	259,1	195,5
12	68,9	206,8	229,3	254,7	193,1
13	102,9	102,9	247,0	289,1	238,4
14	102,9	206,8	246,9	271,7	217,8
15	102,9	309	262,9	281,3	226,5
16	137,9	137,9	273,0	305,6	261,3
17	137,9	274,7	270,7	291,0	241,7
18	137,9	412	269,0	285,7	243,6

C-1.3. RESULTADOS DO ENSAIO DE COMPRESSÃO TRIAXIAL CÍCLICA NAS MISTURAS DE SOLO CAL COM O SOLO S-2 APÓS 24 HORAS DE SATURAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA POR CAPILARIDADE

Tabela C-1-21: Sequência de tensões e valores de módulo de resiliência obtidos no solo S-2 com 3% de cal hidratada, aos 3 dias de cura e após 24 horas de saturação dos CPs por capilaridade

ENSAIO DE COMPRESSÃO TRIAXIAL CÍCLICA					
Solo =			S-2		
Teor de Cal Hidratada =			3%		
Dias de Cura =			3+24 horas saturado por capil.		
Corpo de Prova			91	92	93
Sequência	Confinante (s3) (kPa)	Desvio (sd) (kPa)	MR (MPa)	MR (MPa)	MR (MPa)
1	20,7	20,7	53,1	67,3	60,2
2	20,7	41,4	49,4	44,2	46,8
3	20,7	62,1	44,8	40,5	42,7
4	34,5	34,5	61,0	54,2	57,6
5	34,5	38,9	48,4	43,8	46,1
6	34,5	102,9	45,9	42,3	44,1
7	50,4	50,4	62,7	56,4	59,6
8	50,4	102,9	50,8	47,2	49,0
9	50,4	155,2	52,1	48,1	50,1
10	68,9	68,9	68,3	64,4	66,4
11	68,9	137,9	56,1	53,4	54,8
12	68,9	206,8	60,5	56,2	58,4
13	102,9	102,9	83,8	77,9	80,9
14	102,9	206,8	70,8	67,3	69,1
15	102,9	309	79,1	73,7	76,4
16	137,9	137,9	97,3	91,5	94,4
17	137,9	274,7	85,3	81,5	83,4
18	137,9	412	90,0	85,3	87,7

Tabela C-1-22: Sequência de tensões e valores de módulo de resiliência obtidos no solo S-2 com 3% de cal hidratada, aos 7 dias de cura e após 24 horas de saturação dos CPs por capilaridade

ENSAIO DE COMPRESSÃO TRIAXIAL CÍCLICA					
Solo =			S-2		
Teor de Cal Hidratada =			3%		
Dias de Cura =			7+24 horas saturado por capil.		
Corpo de Prova			64	65	66
Sequência	Confinante (s3) (kPa)	Desvio (sd) (kPa)	MR (MPa)	MR (MPa)	MR (MPa)
1	20,7	20,7	112,0	102,0	107,0
2	20,7	41,4	107,9	99,9	103,9
3	20,7	62,1	97,9	97,7	97,8
4	34,5	34,5	121,5	113,7	117,6
5	34,5	38,9	103,6	104,4	104,0
6	34,5	102,9	97,3	101,6	99,5
7	50,4	50,4	125,4	122,9	124,2
8	50,4	102,9	106,8	111,2	109,0
9	50,4	155,2	103,1	109,2	106,2
10	68,9	68,9	137,5	132,9	135,2
11	68,9	137,9	115,6	117,2	116,4
12	68,9	206,8	113,9	117,7	115,8
13	102,9	102,9	154,6	143,2	148,9
14	102,9	206,8	134,4	131,1	132,8
15	102,9	309	140,3	139,5	139,9
16	137,9	137,9	173,1	153,6	163,4
17	137,9	274,7	154,7	145,4	150,1
18	137,9	412	158,3	150,9	154,6

Tabela C-1-23: Sequência de tensões e valores de módulo de resiliência obtidos no solo S-2 com 3% de cal hidratada, aos 28 dias de cura e após 24 horas de saturação dos CPs por capilaridade

ENSAIO DE COMPRESSÃO TRIAXIAL CÍCLICA					
Solo =			S-2		
Teor de Cal Hidratada =			3%		
Dias de Cura =			28+24 horas saturado por capil.		
Corpo de Prova			1	2	3
Sequência	Confinante (s3) (kPa)	Desvio (sd) (kPa)	MR (MPa)	MR (MPa)	MR (MPa)
1	20,7	20,7	103,6	124,5	139,1
2	20,7	41,4	99,9	123,6	140,3
3	20,7	62,1	101,8	123,3	144,8
4	34,5	34,5	107,4	133,3	149,6
5	34,5	38,9	106,1	127,5	150,4
6	34,5	102,9	113,6	132,4	156,1
7	50,4	50,4	106,1	134,8	154,9
8	50,4	102,9	113,6	136,2	159,4
9	50,4	155,2	112,8	144,6	171,0
10	68,9	68,9	118,5	144,6	163,9
11	68,9	137,9	128,6	147,9	170,8
12	68,9	206,8	121,6	158,9	186,7
13	102,9	102,9	130,9	154,6	175,3
14	102,9	206,8	144,7	176,7	206,8
15	102,9	309	136,0	198,2	219,8
16	137,9	137,9	154,3	175,2	203,9
17	137,9	274,7	176,6	206,6	227,8
18	137,9	412	152,0	228,3	238,5

Tabela C-1-24: Sequência de tensões e valores de módulo de resiliência obtidos no solo S-2 com 5% de cal hidratada, aos 3 dias de cura e após 24 horas de saturação dos CPs por capilaridade

ENSAIO DE COMPRESSÃO TRIAXIAL CÍCLICA					
Solo =			S-2		
Teor de Cal Hidratada =			5%		
Dias de Cura =			3+24 horas saturado por capil.		
Corpo de Prova			94	95	96
Sequência	Confinante (s3) (kPa)	Desvio (sd) (kPa)	MR (MPa)	MR (MPa)	MR (MPa)
1	20,7	20,7	49,9	51,8	50,9
2	20,7	41,4	46,4	49,8	48,1
3	20,7	62,1	42,8	44,9	43,9
4	34,5	34,5	55,6	58,4	57,0
5	34,5	38,9	46,3	48,4	47,4
6	34,5	102,9	44,4	45,9	45,2
7	50,4	50,4	57,2	60,1	58,7
8	50,4	102,9	48,4	50,6	49,5
9	50,4	155,2	50,3	51,6	51,0
10	68,9	68,9	62,1	67,0	64,6
11	68,9	137,9	53,7	56,0	56,0
12	68,9	206,8	58,0	59,2	58,6
13	102,9	102,9	74,6	80,5	77,6
14	102,9	206,8	67,0	70,5	68,8
15	102,9	309	74,5	77,6	76,1
16	137,9	137,9	88,4	95,3	91,9
17	137,9	274,7	80,4	85,5	83,0
18	137,9	412	85,3	90,6	88,0

Tabela C-1-25: Sequência de tensões e valores de módulo de resiliência obtidos no solo S-2 com 5% de cal hidratada, aos 7 dias de cura e após 24 horas de saturação dos CPs por capilaridade

ENSAIO DE COMPRESSÃO TRIAXIAL CÍCLICA					
Solo =			S-2		
Teor de Cal Hidratada =			5%		
Dias de Cura =			7+24 horas saturado por capil.		
Corpo de Prova			67	68	69
Sequência	Confinante (s3) (kPa)	Desvio (sd) (kPa)	MR (MPa)	MR (MPa)	MR (MPa)
1	20,7	20,7	82,2	98,3	92,0
2	20,7	41,4	88,0	115,3	92,0
3	20,7	62,1	85,1	108,9	86,7
4	34,5	34,5	99,6	134,0	104,1
5	34,5	38,9	90,3	119,8	92,4
6	34,5	102,9	87,4	112,9	89,0
7	50,4	50,4	106,0	141,2	108,5
8	50,4	102,9	98,9	126,9	96,1
9	50,4	155,2	98,4	121,8	96,1
10	68,9	68,9	121,2	154,9	117,1
11	68,9	137,9	111,1	138,1	104,6
12	68,9	206,8	113,8	136,3	107,8
13	102,9	102,9	137,1	176,1	137,9
14	102,9	206,8	136,3	162,0	126,6
15	102,9	309	146,7	168,5	136,1
16	137,9	137,9	160,5	203,7	155,9
17	137,9	274,7	164,2	189,8	146,7
18	137,9	412	169,7	190,9	152,2

Tabela C-1-26: Sequência de tensões e valores de módulo de resiliência obtidos no solo S-2 com 5% de cal hidratada, aos 28 dias de cura e após 24 horas de saturação dos CPs por capilaridade

ENSAIO DE COMPRESSÃO TRIAXIAL CÍCLICA					
Solo =			S-2		
Teor de Cal Hidratada =			5%		
Dias de Cura =			28+24 horas saturado por capil.		
Corpo de Prova			10	11	12
Sequência	Confinante (s3) (kPa)	Desvio (sd) (kPa)	MR (MPa)	MR (MPa)	MR (MPa)
1	20,7	20,7	227,2	155,3	191,3
2	20,7	41,4	242,2	164,1	203,2
3	20,7	62,1	244,6	164,4	204,5
4	34,5	34,5	260,9	171,4	216,2
5	34,5	38,9	256,6	169,1	212,9
6	34,5	102,9	249,6	173,0	211,3
7	50,4	50,4	273,8	162,4	218,1
8	50,4	102,9	261,0	184,1	222,6
9	50,4	155,2	287,0	201,1	244,1
10	68,9	68,9	265,5	166,1	166,1
11	68,9	137,9	258,8	202,2	230,5
12	68,9	206,8	301,9	227,0	264,5
13	102,9	102,9	279,8	205,0	242,4
14	102,9	206,8	283,0	246,3	264,7
15	102,9	309	317,0	275,6	296,3
16	137,9	137,9	297,0	255,4	276,2
17	137,9	274,7	295,0	289,6	292,3
18	137,9	412	293,7	303,6	298,7

Tabela C-1-27: Sequência de tensões e valores de módulo de resiliência obtidos no solo S-2 com 7% de cal hidratada, aos 3 dias de cura e após 24 horas de saturação dos CPs por capilaridade

ENSAIO DE COMPRESSÃO TRIAXIAL CÍCLICA					
Solo =			S-2		
Teor de Cal Hidratada =			7%		
Dias de Cura =			3+24 horas saturado por capil.		
Corpo de Prova			95	96	97
Sequência	Confinante (s3) (kPa)	Desvio (sd) (kPa)	MR (MPa)	MR (MPa)	MR (MPa)
1	20,7	20,7	56,7	56,7	-
2	20,7	41,4	53,9	53,9	-
3	20,7	62,1	48,6	48,6	-
4	34,5	34,5	65,9	65,9	-
5	34,5	38,9	52,8	52,8	-
6	34,5	102,9	50,1	50,1	-
7	50,4	50,4	67,3	67,3	-
8	50,4	102,9	55,2	55,2	-
9	50,4	155,2	56,2	56,2	-
10	68,9	68,9	72,4	72,4	-
11	68,9	137,9	61,3	61,3	-
12	68,9	206,8	66,1	66,1	-
13	102,9	102,9	86,6	86,6	-
14	102,9	206,8	78,0	78,0	-
15	102,9	309	87,9	87,9	-
16	137,9	137,9	111,4	111,4	-
17	137,9	274,7	99,3	99,3	-
18	137,9	412	104,4	104,4	-

- Não foi possível executar o ensaio no CP

Tabela C-1-28: Sequência de tensões e valores de módulo de resiliência obtidos no solo S-2 com 7% de cal hidratada, aos 7 dias de cura e após 24 horas de saturação dos CPs por capilaridade

ENSAIO DE COMPRESSÃO TRIAXIAL CÍCLICA					
Solo =			S-2		
Teor de Cal Hidratada =			7%		
Dias de Cura =			7+24 horas saturado por capil.		
Corpo de Prova			70	71	72
Sequência	Confinante (s3) (kPa)	Desvio (sd) (kPa)	MR (MPa)	MR (MPa)	MR (MPa)
1	20,7	20,7	94,5	100,8	97,7
2	20,7	41,4	120,1	115,2	117,7
3	20,7	62,1	122,0	108,4	115,2
4	34,5	34,5	123,7	135,4	129,6
5	34,5	38,9	127,8	119,5	123,7
6	34,5	102,9	126,1	112,3	119,2
7	50,4	50,4	133,7	144,5	139,1
8	50,4	102,9	136,1	128,7	132,4
9	50,4	155,2	135,5	124,0	129,8
10	68,9	68,9	150,6	162,2	156,4
11	68,9	137,9	147,3	141,6	144,5
12	68,9	206,8	148,4	138,3	143,4
13	102,9	102,9	172,8	185,7	179,3
14	102,9	206,8	171,0	164,7	167,9
15	102,9	309	179,2	169,5	174,4
16	137,9	137,9	200,9	212,8	206,9
17	137,9	274,7	200,8	191,0	195,9
18	137,9	412	201,3	192,4	196,9

Tabela C-1-29: Sequência de tensões e valores de módulo de resiliência obtidos no solo S-2 com 7% de cal hidratada, aos 28 dias de cura e após 24 horas de saturação dos CPs por capilaridade

ENSAIO DE COMPRESSÃO TRIAXIAL CÍCLICA					
Solo =			S-2		
Teor de Cal Hidratada =			7%		
Dias de Cura =			28+24 horas saturado por capil.		
Corpo de Prova			19	20	21
Sequência	Confinante (s3) (kPa)	Desvio (sd) (kPa)	MR (MPa)	MR (MPa)	MR (MPa)
1	20,7	20,7	142,2	203,3	172,8
2	20,7	41,4	144,5	226,3	185,4
3	20,7	62,1	145,2	230,2	187,7
4	34,5	34,5	151,1	245,3	198,2
5	34,5	38,9	150,3	239,2	196,3
6	34,5	102,9	155,3	234,6	195,3
7	50,4	50,4	157,2	274,7	206,3
8	50,4	102,9	160,6	255,7	208,7
9	50,4	155,2	174,5	243,6	211,7
10	68,9	68,9	167,3	297,7	231,6
11	68,9	137,9	175,3	267,0	225,6
12	68,9	206,8	196,0	257,0	230,1
13	102,9	102,9	183,0	329,0	260,6
14	102,9	206,8	206,0	291,0	255,0
15	102,9	309	240,0	287,0	266,8
16	137,9	137,9	204,2	358,3	289,3
17	137,9	274,7	239,0	314,0	282,1
18	137,9	412	270,0	310,0	292,3

C-1.4. RESULTADOS DO ENSAIO DE COMPRESSÃO TRIAXIAL CÍCLICA NAS MISTURAS DE SOLO CAL COM O SOLO S-2 APÓS 48 HORAS DE SATURAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA POR CAPILARIDADE

Tabela C-1-30: Sequência de tensões e valores de módulo de resiliência obtidos no solo S-2 com 3% de cal hidratada, aos 3 dias de cura e após 48 horas de saturação dos CPs por capilaridade

ENSAIO DE COMPRESSÃO TRIAXIAL CÍCLICA					
Solo =			S-2		
Teor de Cal Hidratada =			3%		
Dias de Cura =			3+48 horas saturado por capil.		
Corpo de Prova			91	92	93
Sequência	Confinante (s3) (kPa)	Desvio (sd) (kPa)	MR (MPa)	MR (MPa)	MR (MPa)
1	20,7	20,7	44,2	44,2	-
2	20,7	41,4	37,2	37,2	-
3	20,7	62,1	34,4	34,4	-
4	34,5	34,5	47,2	47,2	-
5	34,5	38,9	37,2	37,2	-
6	34,5	102,9	35,9	35,9	-
7	50,4	50,4	49,0	49,0	-
8	50,4	102,9	39,9	39,9	-
9	50,4	155,2	41,6	41,6	-
10	68,9	68,9	55,0	55,0	-
11	68,9	137,9	45,2	45,2	-
12	68,9	206,8	49,6	49,6	-
13	102,9	102,9	45,2	45,2	-
14	102,9	206,8	49,6	49,6	-
15	102,9	309	66,1	66,1	-
16	137,9	137,9	57,5	57,5	-
17	137,9	274,7	66,2	66,2	-
18	137,9	412	70,5	70,5	-

- Não foi possível executar o ensaio no CP

Tabela C-1-30: Sequência de tensões e valores de módulo de resiliência obtidos no solo S-2 com 3% de cal hidratada, aos 7 dias de cura e após 48 horas de saturação dos CPs por capilaridade

ENSAIO DE COMPRESSÃO TRIAXIAL CÍCLICA					
Solo =			S-2		
Teor de Cal Hidratada =			3%		
Dias de Cura =			7+48 horas saturado por capil.		
Corpo de Prova			64	65	66
Sequência	Confinante (s3) (kPa)	Desvio (sd) (kPa)	MR (MPa)	MR (MPa)	MR (MPa)
1	20,7	20,7	84,0	86,6	85,3
2	20,7	41,4	81,4	86,1	83,8
3	20,7	62,1	76,8	83,0	79,9
4	34,5	34,5	94,8	97,5	96,2
5	34,5	38,9	82,9	88,7	85,8
6	34,5	102,9	80,1	86,2	83,2
7	50,4	50,4	97,9	101,3	99,6
8	50,4	102,9	86,3	92,2	89,3
9	50,4	155,2	86,5	92,6	89,6
10	68,9	68,9	108,7	112,0	110,4
11	68,9	137,9	93,7	100,4	97,1
12	68,9	206,8	96,3	102,4	99,4
13	102,9	102,9	123,8	129,4	126,6
14	102,9	206,8	110,1	118,1	114,1
15	102,9	309	119,0	126,7	122,9
16	137,9	137,9	134,0	143,0	138,5
17	137,9	274,7	124,6	134,3	129,5
18	137,9	412	132,4	142,0	137,2

Tabela C-1-31: Sequência de tensões e valores de módulo de resiliência obtidos no solo S-2 com 3% de cal hidratada, aos 28 dias de cura e após 48 horas de saturação dos CPs por capilaridade

ENSAIO DE COMPRESSÃO TRIAXIAL CÍCLICA					
Solo =			S-2		
Teor de Cal Hidratada =			3%		
Dias de Cura =			28+48 horas saturado por capil.		
Corpo de Prova			1	2	3
Sequência	Confinante (s3) (kPa)	Desvio (sd) (kPa)	MR (MPa)	MR (MPa)	MR (MPa)
1	20,7	20,7	167,2	262,0	253,1
2	20,7	41,4	164,1	266,3	244,6
3	20,7	62,1	159,0	245,5	228,4
4	34,5	34,5	179,0	287,5	261,4
5	34,5	38,9	164,3	223,1	230,4
6	34,5	102,9	160,7	272,2	214,2
7	50,4	50,4	167,0	231,8	260,0
8	50,4	102,9	170,0	214,6	227,6
9	50,4	155,2	167,9	268,3	212,6
10	68,9	68,9	197,2	231,1	212,1
11	68,9	137,9	178,7	221,7	251,9
12	68,9	206,8	177,9	267,4	226,0
13	102,9	102,9	212,2	244,7	218,0
14	102,9	206,8	194,6	249,9	236,0
15	102,9	309	202,3	280,2	234,1
16	137,9	137,9	223,7	268,3	241,6
17	137,9	274,7	209,6	271,9	245,6
18	137,9	412	218,6	269,3	249,8

Tabela C-1-32: Sequência de tensões e valores de módulo de resiliência obtidos no solo S-2 com 5% de cal hidratada, aos 3 dias de cura e após 48 horas de saturação dos CPs por capilaridade

ENSAIO DE COMPRESSÃO TRIAXIAL CÍCLICA					
Solo =			S-2		
Teor de Cal Hidratada =			5%		
Dias de Cura =			3+48 horas saturado por capil.		
Corpo de Prova			94	95	96
Sequência	Confinante (s3) (kPa)	Desvio (sd) (kPa)	MR (MPa)	MR (MPa)	MR (MPa)
1	20,7	20,7	41,8	41,8	-
2	20,7	41,4	35,4	35,4	-
3	20,7	62,1	32,7	32,7	-
4	34,5	34,5	44,2	44,2	-
5	34,5	38,9	35,2	35,2	-
6	34,5	102,9	34,2	34,2	-
7	50,4	50,4	44,7	44,7	-
8	50,4	102,9	37,2	37,2	-
9	50,4	155,2	39,7	39,7	-
10	68,9	68,9	49,1	49,1	-
11	68,9	137,9	42,5	42,5	-
12	68,9	206,8	47,1	47,1	-
13	102,9	102,9	59,0	59,0	-
14	102,9	206,8	53,7	53,7	-
15	102,9	309	62,2	62,2	-
16	137,9	137,9	69,9	69,9	-
17	137,9	274,7	65,6	65,6	-
18	137,9	412	72,9	72,9	-

- Não foi possível executar o ensaio no CP

Tabela C-1-33: Sequência de tensões e valores de módulo de resiliência obtidos no solo S-2 com 5% de cal hidratada, aos 7 dias de cura e após 48 horas de saturação dos CPs por capilaridade

ENSAIO DE COMPRESSÃO TRIAXIAL CÍCLICA					
Solo =			S-2		
Teor de Cal Hidratada =			5%		
Dias de Cura =			7+48 horas saturado por capil.		
Corpo de Prova			67	68	69
Sequência	Confinante (s3) (kPa)	Desvio (sd) (kPa)	MR (MPa)	MR (MPa)	MR (MPa)
1	20,7	20,7	70,5	87,7	69,1
2	20,7	41,4	67,3	85,7	69,5
3	20,7	62,1	64,1	80,4	67,1
4	34,5	34,5	79,5	98,6	78,1
5	34,5	38,9	70,3	86,4	71,2
6	34,5	102,9	69,6	83,3	71,7
7	50,4	50,4	84,2	102,1	81,5
8	50,4	102,9	76,2	90,4	77,6
9	50,4	155,2	78,8	90,9	81,3
10	68,9	68,9	91,8	108,6	94,1
11	68,9	137,9	84,1	97,0	92,9
12	68,9	206,8	90,2	101,6	97,8
13	102,9	102,9	111,5	128,3	106,1
14	102,9	206,8	105,1	118,3	118,5
15	102,9	309	117,2	129,5	131,3
16	137,9	137,9	127,3	144,9	128,9
17	137,9	274,7	123,7	137,8	145,1
18	137,9	412	133,5	146,6	155,5

Tabela C-1-34: Sequência de tensões e valores de módulo de resiliência obtidos no solo S-2 com 5% de cal hidratada, aos 28 dias de cura e após 48 horas de saturação dos CPs por capilaridade

ENSAIO DE COMPRESSÃO TRIAXIAL CÍCLICA					
Solo =			S-2		
Teor de Cal Hidratada =			5%		
Dias de Cura =			28+48 horas saturado por capil.		
Corpo de Prova			10	11	12
Sequência	Confinante (s3) (kPa)	Desvio (sd) (kPa)	MR (MPa)	MR (MPa)	MR (MPa)
1	20,7	20,7	112,5	139,9	126,2
2	20,7	41,4	115,0	145,7	130,4
3	20,7	62,1	118,4	145,3	131,9
4	34,5	34,5	123,4	135,5	129,5
5	34,5	38,9	123,6	153,6	138,6
6	34,5	102,9	129,9	155,5	142,7
7	50,4	50,4	131,8	118,7	125,3
8	50,4	102,9	136,5	152,2	144,4
9	50,4	155,2	147,5	170,6	159,1
10	68,9	68,9	143,4	120,8	132,1
11	68,9	137,9	150,9	157,3	154,1
12	68,9	206,8	166,6	181,5	174,1
13	102,9	102,9	165,8	133,0	149,4
14	102,9	206,8	181,0	180,7	180,9
15	102,9	309	206,0	157,3	181,7
16	137,9	137,9	189,7	212,2	201,0
17	137,9	274,7	211,1	253,2	232,2
18	137,9	412	238,3	248,4	243,4

Tabela C-1-35: Sequência de tensões e valores de módulo de resiliência obtidos no solo S-2 com 7% de cal hidratada, aos 3 dias de cura e após 48 horas de saturação dos CPs por capilaridade

ENSAIO DE COMPRESSÃO TRIAXIAL CÍCLICA					
Solo =			S-2		
Teor de Cal Hidratada =			7%		
Dias de Cura =			3+48 horas saturado por capil.		
Corpo de Prova			95	96	97
Sequência	Confinante (s3) (kPa)	Desvio (sd) (kPa)	MR (MPa)	MR (MPa)	MR (MPa)
1	20,7	20,7	45,4	45,4	-
2	20,7	41,4	41,8	41,8	-
3	20,7	62,1	37,8	37,8	-
4	34,5	34,5	51,2	51,2	-
5	34,5	38,9	41,0	41,0	-
6	34,5	102,9	39,4	39,4	-
7	50,4	50,4	52,0	52,0	-
8	50,4	102,9	43,4	43,4	-
9	50,4	155,2	45,2	45,2	-
10	68,9	68,9	56,4	56,4	-
11	68,9	137,9	48,6	48,6	-
12	68,9	206,8	53,0	53,0	-
13	102,9	102,9	70,5	70,5	-
14	102,9	206,8	63,0	63,0	-
15	102,9	309	71,0	71,0	-
16	137,9	137,9	87,0	87,0	-
17	137,9	274,7	79,0	79,0	-
18	137,9	412	85,0	85,0	-

- Não foi possível executar o ensaio no CP

Tabela C-1-36: Sequência de tensões e valores de módulo de resiliência obtidos no solo S-2 com 7% de cal hidratada, aos 7 dias de cura e após 48 horas de saturação dos CPs por capilaridade

ENSAIO DE COMPRESSÃO TRIAXIAL CÍCLICA					
Solo =			S-2		
Teor de Cal Hidratada =			7%		
Dias de Cura =			7+48 horas saturado por capil.		
Corpo de Prova			70	71	72
Sequência	Confinante (s3) (kPa)	Desvio (sd) (kPa)	MR (MPa)	MR (MPa)	MR (MPa)
1	20,7	20,7	70,2	87,0	78,6
2	20,7	41,4	71,3	96,2	83,8
3	20,7	62,1	69,3	88,5	78,9
4	34,5	34,5	85,0	115,5	100,3
5	34,5	38,9	75,7	97,2	86,5
6	34,5	102,9	75,0	90,4	82,7
7	50,4	50,4	91,1	122,6	106,9
8	50,4	102,9	83,6	105,1	94,4
9	50,4	155,2	85,3	102,1	93,7
10	68,9	68,9	103,2	140,2	121,7
11	68,9	137,9	97,5	118,8	108,2
12	68,9	206,8	101,2	117,9	109,6
13	102,9	102,9	97,5	165,9	131,7
14	102,9	206,8	101,2	145,3	123,3
15	102,9	309	123,3	151,2	137,3
16	137,9	137,9	121,9	196,3	159,1
17	137,9	274,7	133,1	173,6	153,4
18	137,9	412	149,3	178,9	164,1

Tabela C-1-37: Sequência de tensões e valores de módulo de resiliência obtidos no solo S-2 com 7% de cal hidratada, aos 28 dias de cura e após 48 horas de saturação dos CPs por capilaridade

ENSAIO DE COMPRESSÃO TRIAXIAL CÍCLICA					
Solo =			S-2		
Teor de Cal Hidratada =			7%		
Dias de Cura =			28+48 horas saturado por capil.		
Corpo de Prova			19	20	21
Sequência	Confinante (s3) (kPa)	Desvio (sd) (kPa)	MR (MPa)	MR (MPa)	MR (MPa)
1	20,7	20,7	159,6	177,6	205,9
2	20,7	41,4	169,3	183,6	227,4
3	20,7	62,1	171,6	185,6	231,5
4	34,5	34,5	184,4	193,6	244,6
5	34,5	38,9	179,0	191,5	238,9
6	34,5	102,9	184,0	195,6	231,8
7	50,4	50,4	197,0	190,4	265,4
8	50,4	102,9	200,3	210,0	247,5
9	50,4	155,2	211,0	226,4	239,5
10	68,9	68,9	214,9	186,1	282,2
11	68,9	137,9	225,5	223,5	258,0
12	68,9	206,8	235,5	247,7	249,0
13	102,9	102,9	250,1	222,3	305,0
14	102,9	206,8	265,2	264,4	276,0
15	102,9	309	279,9	294,3	275,0
16	137,9	137,9	288,9	266,4	327,0
17	137,9	274,7	296,9	302,3	293,6
18	137,9	412	308,5	326,3	295,0

ANEXO C-2: ANÁLISE DE ESTRUTURAS HIPOTÉTICAS DE PAVIMENTOS

Foram avaliadas duas estruturas de pavimentos (Figura C.2.1) para verificar a contribuição da introdução do subleito melhorado com cal. Na estrutura “A” foi considerado um revestimento de CBUQ (Concreto Betuminoso Usinado a Quente), uma base graduada simples (BGS) e um subleito constituído pelo solo utilizado neste estudo, com $MR=60$ MPa. Já na estrutura “B”, o revestimento e a base foram similares às usadas na estrutura “A” e foi introduzida uma camada final de terraplenagem (CFT) considerando a estabilização do solo local com cal. O módulo de resiliência considerado para essa camada foi de 120 MPa, correspondente a um valor de MR aproximado aos valores observados neste estudo nos solos S1 e S2 com a incorporação de 3% de cal hidratada.

O carregamento utilizado na simulação foram duas rodas de 20 kN distanciadas 300 mm e com pressão dos pneus de 560 kPa. O software mePADS (Mechanistic-Empirical Pavement Design and Analysis Software, 2012) foi utilizado para avaliar as tensões nos pavimentos. Esse software realiza análise de camadas múltiplas lineares e é utilizado no dimensionamento de pavimentos na República da África do Sul.

Os parâmetros avaliados na estrutura do pavimento foram a tensão de tração na fibra inferior do revestimento (σ_t) e a tensão de compressão no topo do subleito (σ_c). Já que a profundidade do topo do subleito foi diferente na estrutura “A” e “B”, fixaram-se as profundidades de $z=35$ cm (topo do subleito da estrutura “A”) e $z=65$ cm (topo do subleito da estrutura “B”), para avaliar a tensão de compressão.

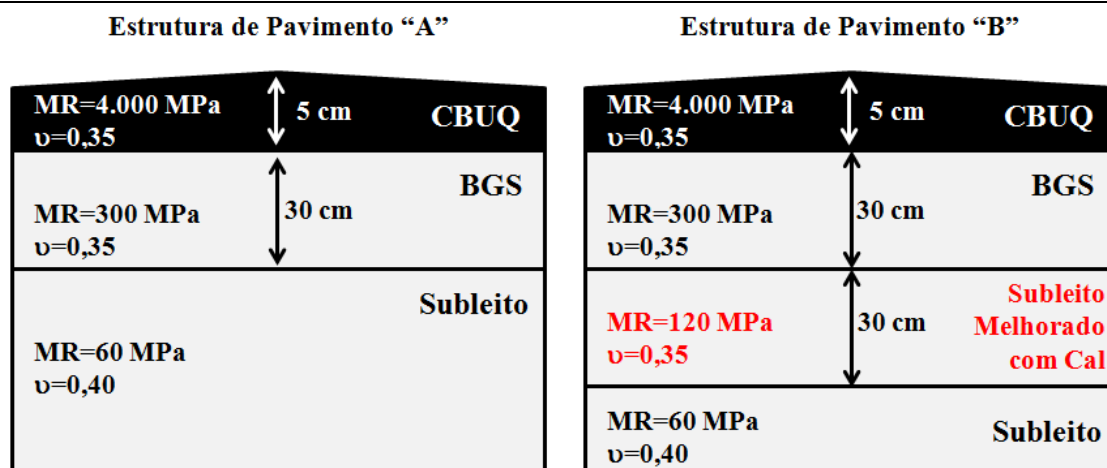


Figura C.2.1: Estruturas de pavimento hipotéticas avaliadas no mePADS

Nota-se na Tabela C.2.1, que a incorporação de uma camada final de terraplenagem melhorada com cal de 30cm de espessura na estrutura do pavimento reduziu a tensão de tração do revestimento (σ_t). Nessa tabela também é apresentada a estimativa de vida de fadiga do revestimento (N_f), determinada pelo software mePADS. Verifica-se que o revestimento da estrutura “B”, com subleito melhorado com cal, tem uma vida de fadiga superior à estrutura “A”.

Tabela 3: Avaliação de tensões nas estruturas de pavimentos

Parâmetro	Estrutura de Pavimento	
	A	B
σ_t (z= 5cm) (kPa)	1292,3	1274,5
σ_c (z=35cm) (kPa)	41,87	51,65
σ_c (z=65cm) (kPa)	21,56	19,75
N_f (ciclos)	$2,805 \times 10^5$	$2,970 \times 10^5$

Com relação às tensões de compressão, ainda na Tabela 3 observa-se que na profundidade de 35 cm, que corresponde ao topo do subleito da estrutura “A”, a σ_c foi maior na estrutura “B”. Contudo, na profundidade de 65 cm esse

comportamento foi invertido e a tensão de compressão foi menor na estrutura “B”, o que indica uma melhor distribuição das tensões no subleito melhorado com cal.

Assim, a avaliação hipotética dessas estruturas de pavimentos mostra que o emprego de subleitos melhorados com cal ou camadas finais de terraplenagens (CFT) tratadas com esse aditivo poderiam estender a vida útil do revestimento asfáltico. Também se verificou que esse material é superior em termos de distribuição de tensões decorrentes do tráfego veicular e reduziriam os níveis de tensão atuantes em camadas menos resistentes, como o subleito.

Vale notar que, para que o subleito melhorado com cal seja considerado como uma camada estrutural, deve se garantir uma boa execução com equipamentos que permitam uma distribuição homogênea do produto no solo e que a resistência e rigidez sejam conservadas ao longo do tempo com o auxílio de sistemas de drenagem adequados.

ANEXO C-3: EXECUÇÃO DE ATIVIDADES

Esta pesquisa foi aprovada mediante Ofício No. 727/2013/SUINF e o seu cronograma foi modificado e aprovado mediante Ofício No. 1604/2013/SUINF.

No projeto de pesquisa foi estabelecido que para desenvolvimento deste estudo seriam executadas as seguintes atividades:

- a) Pesquisas bibliográficas
- b) Seleção de materiais
- c) Ensaios laboratoriais
- d) Análise de dados
- e) Elaboração do relatório

Neste relatório final abrange-se o desenvolvimento completo dessas atividades. Na Tabela C-4.1 é apresentado um resumo que indica a localização de cada atividade nos cinco capítulos deste relatório.

Tabela C-2.1: Atividades desenvolvidas durante a pesquisa e apresentadas neste relatório final

ATIVIDADE	CAP. 1	CAP. 2	CAP. 3	CAP. 4	CAP. 5
a) Pesquisas bibliográficas		X			
b) Seleção de materiais			X		
c) Ensaios laboratoriais				X	
d) Análise de dados				X	X
e) Elaboração do relatório	X	X	X	X	X