

ANSELMO JOSÉ COELHO MENDES

**ANÁLISE DA DEFORMABILIDADE DE SOLOS TROPICAIS DA
MICRORREGIÃO DE VIÇOSA-MG, VISANDO À APLICAÇÃO
EM ESTRUTURAS DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

VIÇOSA
MINAS GERAIS - BRASIL
2017

Ficha catalográfica preparada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Câmpus Viçosa

T

M5381a
2018

Mendes, Anselmo José Coelho, 1989-
Análise da deformabilidade de solos tropicais da
microrregião de Viçosa-MG, visando à aplicação em estruturas
de pavimentos flexíveis / Anselmo José Coelho Mendes. –
Viçosa, MG, 2018.
xv,119f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Inclui anexo.

Orientador: Taciano Oliveira da Silva.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.

Inclui bibliografia.

1. Deformação permanente. 2. Módulo de resiliência.
3. Estrutura de pavimentos. I. Universidade Federal de Viçosa.
Departamento de Engenharia Civil. Mestrado em Engenharia
Civil. II. Título.

CDD 22. ed 625.8


ANSELMO JOSÉ COELHO MENDES


**ANÁLISE DA DEFORMABILIDADE DE SOLOS TROPICAIS DA
MICRORREGIÃO DE VIÇOSA-MG, VISANDO À APLICAÇÃO
EM ESTRUTURAS DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS**

Dissertação apresentada à Universidade
Federal de Viçosa, como parte das
exigências do Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Civil, para obtenção do
título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 11 de dezembro de 2017.


Geraldo Luciano de Oliveira Marques


Heraldo Nunes Pitanga
(Coorientador)


Taciano Oliveira da Silva
(Orientador)

AGRADECIMENTOS

Com enorme satisfação, compartilho a conclusão de mais uma etapa da minha vida, etapa oferecida por Deus, autor da oportunidade única de vivenciar momentos tão especiais e inesquecíveis em Viçosa.

Agradeço a minha mãe, Luzeny Schiavo Coelho, que não mediu esforços para que eu pudesse alcançar os meus objetivos. Muito obrigado por sempre estar ao meu lado e pelo amor incondicional. Agradeço todos os dias por ter você na minha vida.

Ao meu irmão, João Victor Coelho Mendes, pelos momentos de alegria.

À Mariane, por estar sempre do meu lado, pelo incentivo e paciência nos momentos mais difíceis.

Aos professores do Departamento de Engenharia Civil, em especial, Taciano e Heraldo, meu muito obrigado pelos conhecimentos transmitidos.

Aos técnicos de laboratório, Paulo (P3), Dedé e, principalmente, Giovani, pela imensa ajuda nos ensaios de campo e períodos de descontração. À Dona Imaculada, pelas conversas no laboratório. À Maria, auxiliar administrativa, que sempre esteve disposta a me ajudar.

À minha querida Universidade Federal de Viçosa e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, por me proporcionarem a oportunidade de realizar este trabalho.

À CAPES, pela concessão dos 18 meses da bolsa de estudos.

A todos que contribuíram para este trabalho.

BIOGRAFIA

ANSELMO JOSÉ COELHO MENDES, filho de João Mendes de Assis e Luzeny Schiavo Coelho, nasceu em 12 de dezembro de 1989, em Matipó, Minas Gerais. Em dezembro de 2007, concluiu o Ensino Médio, em Viçosa – MG. Em março de 2008, iniciou o curso de Engenharia Civil na Universidade Federal de Viçosa, concluindo-o em setembro de 2013.

Em março de 2014, ingressou no Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Segurança do Trabalho, ao nível de especialização, na Universidade Federal de Viçosa, submetendo-se à defesa de trabalho de conclusão de curso em março de 2016.

Em março de 2015, iniciou o curso de Pós-graduação em Engenharia Civil, área de concentração em Geotecnia, ao nível de mestrado, na Universidade Federal de Viçosa (UFV), Viçosa-MG, submetendo-se à defesa de dissertação em dezembro de 2017.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	vii
LISTA DE TABELAS	ix
RESUMO	xii
ABSTRACT	xiv
1 – INTRODUÇÃO GERAL	1
1.1 – CONSIDERAÇÕES INICIAIS	1
1.2 – JUSTIFICATIVA	4
1.3 – OBJETIVO GERAL.....	5
1.4 – OBJETIVOS ESPECÍFICOS	6
1.5 – ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	6
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	7
2 – CLASSIFICAÇÕES GEOTÉCNICAS DE MATERIAIS VISANDO À APLICAÇÃO EM ESTRUTURAS DE PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS FLEXÍVEIS	10
2.1– INTRODUÇÃO	11
2.1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO PROBLEMA	11
2.2– MATERIAIS E MÉTODOS	14
2.2.1 – SOLOS	14
2.2.2 – MÉTODOS	15
2.2.2.1 – Ensaios de caracterização geotécnica.....	15
2.2.2.2 – Classificação MCT.....	15
2.3 – RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	15
2.3.1 – CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	15
2.3.2 – RESULTADOS DAS CLASSIFICAÇÕES GEOTÉCNICAS USCS E TRB.....	16
2.3.3 – RESULTADOS DA CLASSIFICAÇÃO GEOTÉCNICA DA METODOLOGIA MCT.....	17
2.3.4 – COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS DAS CLASSIFICAÇÕES GEOTÉCNICAS USCS E TRB E DA METODOLOGIA MCT	18
2.4 – CONCLUSÕES.....	18
2.8 – AGRADECIMENTOS	19
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	19
3 – ESTUDO GEOTÉCNICO DE MISTURAS SOLO-LAMA DE CAL VISANDO O EMPREGO EM CAMADAS ESTRUTURAIS DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS.....	23

3.1 – INTRODUÇÃO.....	24
3.2 – REVISÃO DE LITERATURA	26
3.2.1 – PAVIMENTOS FLEXÍVEIS	26
3.2.2 – MECANISMOS DA ESTABILIZAÇÃO QUÍMICA DOS SOLOS	27
3.2.3 – SOLO-CAL	28
3.2.3.1 – Trabalhos envolvendo misturas solo-cal	28
3.2.3.2 – Reações no solo-cal	30
3.3 – MATERIAIS E MÉTODOS	32
3.3.1 – MATERIAIS	32
3.3.1.1 – Solos	32
3.3.1.2 – Lama de cal	33
3.3.2 – MÉTODOS	35
3.3.2.1 – ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA	35
3.3.2.2 – Dosagens da mistura solo-lama de cal e períodos de cura	35
3.3.2.3 – Ensaio de compactação e índice de suporte Califórnia (ISC ou CBR) ..	35
3.3.2.4 - Normas para a utilização de materiais terrosos a serem empregados em camadas de pavimentos rodoviários flexíveis.....	35
3.3.2.5 – Ensaio de resistência à compressão não confinada	36
3.4 – RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	38
3.4.1 – ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA, DE COMPACTAÇÃO E DE ÍNDICE DE SUPORTE CALIFÓRNIA (ISC OU CBR)	38
3.4.2 – ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES NÃO CONFINADA	44
3.5 – CONCLUSÕES.....	47
3.6 – AGRADECIMENTOS	48
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	48
4 – ESTUDO DO COMPORTAMENTO RESILIENTE DE DOIS SOLOS TROPICAIS DA MICRORREGIÃO DE VIÇOSA-MG	54
4.1 – INTRODUÇÃO.....	55
4.2 – MÓDULO DE RESILIÊNCIA: CONCEITO E DETERMINAÇÃO	59
4.2.1 – MÓDULO DE RESILIÊNCIA DOS SOLOS COESIVOS.....	62
4.2.2 – MÓDULO DE RESILIÊNCIA DOS SOLOS GRANULARES	62
4.2.3 – MÓDULO DE RESILIÊNCIA E A COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA	63

4.2.4 – MÓDULO DE RESILIÊNCIA E A UMIDADE	64
4.3 – MATERIAIS E MÉTODOS	64
4.3.1 – CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO E AMOSTRAGEM	64
4.3.2 – MÓDULO DE RESILIÊNCIA	65
4.4 – RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	67
4.5 – CONCLUSÕES.....	74
4.6 – AGRADECIMENTOS	75
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	75
5 – ESTUDO DA DEFORMAÇÃO PERMANENTE DE DOIS SOLOS TROPICAIS DA MICRORREGIÃO DE VIÇOSA-MG.	81
5.1 – INTRODUÇÃO.....	82
5.1.1 – CONTEXTUALIZAÇÃO DO PROBLEMA.....	82
5.2 – REVISÃO DE LITERATURA	85
5.2.1 – DEFORMAÇÃO PERMANENTE	85
5.3 – MATERIAIS E MÉTODOS	88
5.3.1 – CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO E AMOSTRAGEM	88
5.3.2 – DOSAGENS DA MISTURA SOLO-LAMA DE CAL E PERÍODO DE CURA	89
5.3.3 – MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA.....	90
5.3.4 – ENSAIOS TRIAXIAIS DE CARGAS REPETIDAS	90
5.4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES	91
5.5 – CONCLUSÕES.....	93
5.6 – AGRADECIMENTOS	94
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	94
6 – CONCLUSÕES GERAIS	98
7 – RECOMENDAÇÕES PARA PESQUISAS FUTURAS	100
ANEXO A.....	101

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 –Localização das jazidas de empréstimo das amostras de solos analisadas. ...	14
Figura 2 –Local de coleta da amostra de solo proveniente da Jazida de empréstimo “Nô da Silva”	14
Figura 3 –Local de coleta da amostra de solo proveniente da Jazida de empréstimo “Gomide”	15
Figura 4 –Coleta das amostras.....	33
Figura 5 –Resíduo lama de cal.	34
Figura 6 –Molde cilíndrico bipartido utilizado no ensaio de resistência à compressão não confinada.....	37
Figura 7 –Moldagem dos corpos de prova.	37
Figura 8 –Armazenamento dos corpos de prova na câmara úmida.....	37
Figura 9 –Detalhe do ensaio de resistência à compressão não confinada.	38
Figura 10 –Resultados das curvas de compactação na energia Proctor Intermediária para a amostra de solo da jazida Nô da Silva e as misturas solo-lama de cal para este solo.	39
Figura 11 –Resultados das curvas de compactação na energia Proctor Modificada para a amostra de solo da jazida Nô da Silva e as misturas solo-lama de cal para este solo. ...	40
Figura 12 –Resultados das curvas de compactação na energia Proctor Intermediária para a amostra de solo da jazida Gomide e as misturas solo-lama de cal para este solo.	41
Figura 13 –Resultados das curvas de compactação na energia Proctor Modificada para a amostra de solo da jazida Gomide e as misturas solo-lama de cal para este solo.	42
Figura 14 –Evolução da resistência à compressão não confinada com o tempo de cura : solo da jazida Nô da Silva, no estado natural e estabilizados com 5% de lama de cal. .	45
Figura 15 –Evolução da resistência à compressão não confinada com o tempo de cura: solo da jazida Gomide, no estado natural e estabilizados com 5% de lama de cal.	46
Figura 16 –Moldagem dos corpos de prova para o ensaio de módulo de resiliência.....	66
Figura 17 –Célula triaxial empregada no ensaio de módulo de resiliência.	66
Figura 18 –Resultados de MR para modelo σ_3 : amostra jazida Nô da Silva na Energia Intermediária.....	69
Figura 19 – Classificação de afundamentos em 4 categorias [Adaptado de DAWSON e KOLISOJA (2004), e de GUIMARÃES(2009)]	87
Figura 20 –Preparação das misturas solo-lama de cal.....	89

Figura 21 –Equipamento triaxial de cargas repetidas do laboratório de pavimentação da UFJF.	90
Figura 22 –Curva de deformação permanente acumulada (ϵ) versus número de aplicações da tensão desvio para o solo da jazida Nô da Silva em seus estados natural e estabilizado.	91
Figura 23 –Curva de deformação permanente acumulada (ϵ) versus número de aplicações da tensão desvio para o solo da jazida Gomide nos estados natural e estabilizado.	92

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resultados dos ensaios geotécnicos: granulometria, limites de Atterberg, peso específico dos grãos dos solos	16
Tabela 2 - Classificação dos solos segundo USCS e TRB	17
Tabela 3 – Índices classificatórios e classificação das amostras de solos analisadas segundo a Metodologia MCT	17
Tabela 4 – Correlação entre a Metodologia MCT e os Sistemas USCS e TRB, segundo NOGAMI e VILLIBOR (1995)	18
Tabela 5 – Classificações pedológica, USCS, TRB e MCT das amostras de solos analisadas	18
Tabela 6 – Características químicas da lama de cal (peso seco)	34
Tabela 7 – Resultados do ensaio de equivalente de areia	38
Tabela 8 – Parâmetros de compactação na Energia Proctor Intermediária: umidade ótima e peso específico aparente seco máximo	39
Tabela 9 – Parâmetros de compactação na Energia Proctor Modificada: umidade ótima e peso específico aparente seco máximo	40
Tabela 10 – Parâmetros de compactação Energia Proctor Intermediária: umidade ótima e peso específico aparente seco máximo	41
Tabela 11 – Parâmetros de compactação Energia Proctor Modificada: umidade ótima e peso específico aparente seco máximo	42
Tabela 12 – Parâmetros de compactação: umidade ótima e peso específico aparente seco máximo	43
Tabela 13 – CBR e Expansão CBR das amostras analisadas: jazida Nô da Silva	43
Tabela 14 – CBR e Expansão CBR das amostras analisadas: jazida Gomide	43
Tabela 15 – Resultados dos ensaios de resistência à compressão não confinada (RCNC) para a energia Proctor Intermediária:solo da jazida Nô da Silva	44
Tabela 16 – Resultados dos ensaios de resistência à compressão não confinada (RCNC) para a energia Proctor Intermediária:solo da jazida Gomide	45
Tabela 17 – Valores dos parâmetros para os modelos de tensão desvio (σ_d) e de tensão confinante (σ_3), com os respectivos valores de R^2 : solo Nô da Silva	68
Tabela 18 – Valores dos parâmetros para o modelo composto σ_d - σ_3 , com os respectivos valores de R^2 : solo Nô da Silva	68

Tabela 19 – Valores dos parâmetros para os modelos σ_d , σ_3 , com os respectivos valores de R^2 : solo Gomide	70
Tabela 20 – Valores dos parâmetros para o modelo composto σ_d - σ_3 , com os respectivos valores de R^2 : solo Gomide	70
Tabela 21 – Valores dos parâmetros para os modelos σ_d , σ_3 , com os respectivos valores de R^2 : solo Nô da Silva e Gomide	72
Tabela 22 – Valores dos parâmetros para os modelos σ_d , σ_3 , com os respectivos valores de R^2 : solos Nô da Silva e Gomide, energia Proctor Modificada	72
Tabela 23 – Definição do estado de tensões para os ensaios de determinação da deformação permanente previstos na pesquisa	91
Tabela 24 – Parâmetros obtidos através do ensaio de módulo de resiliência para o solo Nô da Silva, compactado na energia Proctor Intermediária – CP1	102
Tabela 25 – Parâmetros obtidos através do ensaio de módulo de resiliência para o solo Nô da Silva, compactado na energia Proctor Intermediária – CP2	103
Tabela 26 – Parâmetros obtidos através do ensaio de módulo de resiliência para o solo Nô da Silva, compactado na energia Proctor Intermediária – CP3	104
Tabela 27 – Parâmetros obtidos através do ensaio de módulo de resiliência para o solo Nô da Silva + 5% lama de cal, compactado na energia Proctor Intermediária, com período de cura de 28 dias – CP1	105
Tabela 28 – Parâmetros obtidos através do ensaio de módulo de resiliência para o solo Nô da Silva + 5% lama de cal, compactado na energia Proctor Intermediária, com período de cura de 28 dias – CP2	106
Tabela 29 – Parâmetros obtidos através do ensaio de módulo de resiliência para o solo Nô da Silva + 5% lama de cal, compactado na energia Proctor Intermediária, com período de cura de 28 dias – CP3	107
Tabela 30 – Parâmetros obtidos através do ensaio de módulo de resiliência para o solo Gomide, compactado na energia Proctor Intermediária – CP1	108
Tabela 31 – Parâmetros obtidos através do ensaio de módulo de resiliência para o solo Gomide, compactado na energia Proctor Intermediária – CP2	109
Tabela 32 – Parâmetros obtidos através do ensaio de módulo de resiliência para o solo Gomide, compactado na energia Proctor Intermediária – CP3	110

Tabela 33 – Parâmetros obtidos através do ensaio de módulo de resiliência para o solo Gomide + 5% lama de cal, compactado na energia Proctor Intermediária, com período de cura de 28 dias – CP1	111
Tabela 34 – Parâmetros obtidos através do ensaio de módulo de resiliência para o solo Gomide + 5% lama de cal, compactado na energia Proctor Intermediária, com período de cura de 28 dias – CP2	112
Tabela 35 – Parâmetros obtidos através do ensaio de módulo de resiliência para o solo Gomide + 5% lama de cal, compactado na energia Proctor Intermediária, com período de cura de 28 dias – CP3	113
Tabela 36 – Parâmetros obtidos através do ensaio de módulo de resiliência para o solo Nô da Silva + 5% lama de cal, compactado na energia Proctor Modificada, com período de cura de 28 dias – CP1	114
Tabela 37 – Parâmetros obtidos através do ensaio de módulo de resiliência para o solo Nô da Silva + 5% lama de cal, compactado na energia Proctor Modificada, com período de cura de 28 dias – CP2	115
Tabela 38 – Parâmetros obtidos através do ensaio de módulo de resiliência para o solo Nô da Silva + 5% lama de cal, compactado na energia Proctor Modificada, com período de cura de 28 dias – CP3	116
Tabela 39 – Parâmetros obtidos através do ensaio de módulo de resiliência para o solo Gomide + 5% lama de cal, compactado na energia Proctor Modificada, com período de cura de 28 dias – CP1	117
Tabela 40 – Parâmetros obtidos através do ensaio de módulo de resiliência para o solo Gomide + 5% lama de cal, compactado na energia Proctor Modificada, com período de cura de 28 dias – CP2	118
Tabela 41 – Parâmetros obtidos através do ensaio de módulo de resiliência para o solo Gomide + 5% lama de cal, compactado na energia Proctor Modificada, com período de cura de 28 dias – CP3	119

RESUMO

MENDES, Anselmo José Coelho, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, dezembro de 2017. **Análise da deformabilidade de solos tropicais da microrregião de Viçosa-MG, visando à aplicação em estruturas de pavimentos flexíveis.** Orientador: Taciano Oliveira da Silva. Coorientadores: Dario Cardoso de Lima e Heraldo Nunes Pitanga.

Esta dissertação apresenta um estudo sobre a deformabilidade de dois solos naturais e estabilizados quimicamente com resíduo industrial lama de cal, para utilização como camadas de sub-base e base de pavimentos flexíveis, analisadas através de ensaios mecânicos de resistência à compressão simples não confinada, módulo de resiliência e deformação permanente. O objetivo desse estudo foi avaliar a potencialidade de dois solos tropicais, provenientes das Jazidas Nô da Silva e Gomide, da microrregião de Viçosa-MG, como material para utilização como base e sub-base de pavimentos rodoviários flexíveis, considerando-se seus parâmetros de deformabilidade. Concomitantemente, avaliou-se a potencialidade técnica de utilização do resíduo lama de cal como estabilizante químico de solos tropicais. Esta pesquisa foi direcionada para o estudo da deformabilidade de dois solos tropicais compactados nas energias do Proctor Intermediário e Modificado, no teor ótimo de umidade e testados sob condições de carga triaxial repetida. Outro tópico abordado, o foi estudo da classificação geotécnica desses solos, empregando os sistemas de classificação geotécnica tradicionais SUCS (*Unified Soil Classification System*) e TRB (*Transportation Research Board System*), e pela metodologia MCT (Miniatura, Compactado, Tropical). Na sequência, foram abordados os seguintes estudos: (i) análise do resíduo lama de cal quanto à potencialidade de suas propriedades químicas para melhoramento dos parâmetros mecânicos das amostras de solos investigadas, principalmente, no teor de lama de cal 5% em relação à massa seca das amostras dos solos analisados; (ii) verificação quanto às melhores respostas mecânicas obtidas nas misturas de resíduo lama de cal com as amostras de solo da jazida Gomide, uma vez que o ganho de resistência à compressão simples não confinada foi de aproximadamente 73% aos 28 dias de cura em relação à amostra desse solo natural; (iii) características resilientes dos solos e de misturas estabilizadas quimicamente, justificado pela necessidade de

conhecer o seu comportamento mecânico sob a ação de cargas repetidas e transientes, quando constituintes das camadas dos pavimentos flexíveis, determinou o módulo de resiliência dos solos, em seu estado natural e quando estabilizado com resíduo lama de cal e; (iv) estudo do comportamento mecânico sob ensaio de deformação permanente, para fins de aplicação em camadas de sub-base e base de pavimentos flexíveis rodoviários, a partir da realização de ensaios triaxiais de cargas repetidas, considerando-se, para tanto, as seguintes condições: (a) solos em seu estado natural e; (b) solos estabilizados com o resíduo lama de cal.

ABSTRACT

MENDES, Anselmo José Coelho, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, December, 2017. **Analysis of the deformability of tropical soils of the micro-region of Viçosa-MG, aiming at the application in structures of flexible pavements.** Advisor: Taciano Oliveira da Silva. Co-Advisors: Dario Cardoso de Lima and Heraldo Nunes Pitanga.

This dissertation presents a study on the deformability of two natural and chemically stabilized soils with sludge industrial lime mud residue, for use as sub-base layers and base of flexible pavements, analyzed by mechanical tests of resistance to uncompressed simple compression, module resilience and permanent deformation. The objective of this study was to evaluate the potential of two tropical soils from the Nô da Silva and Gomide Reservoirs of the Viçosa-MG microregion as material for use as a base and sub-base of flexible road pavements, considering their parameters of deformability. At the same time, the technical potential of using lime sludge as a chemical stabilizer for tropical soils was evaluated. This research was directed to the study of the deformability of two compacted tropical soils in the Intermediate and Modified Proctor energies, in the optimal moisture content and tested under conditions of repeated triaxial load. Another topic addressed was the study of the geotechnical classification of these soils, using the traditional geotechnical classification systems SUCS (Unified Soil Classification System) and TRB (Transportation Research Board System), and the methodology MCT (Miniature, Compressed, Tropical). The following studies were carried out: (i) analysis of the lime sludge residue on the potential of its chemical properties to improve the mechanical parameters of the soil samples investigated, mainly in the lime sludge content 5% in relation to the mass dry soil samples analyzed; (ii) to verify how the best mechanical responses obtained in the sludge slurry mixtures with the soil samples from the Gomide deposit were obtained, since the unconfined simple compression strength gain was approximately 73% at 28 days cure to the sample of this natural soil; (iii) resilient characteristics of soils and of chemically stabilized mixtures, justified by the need to know their mechanical behavior under the action of repeated and transient loads, as constituents of the layers of flexible pavements, determined the soil resilience modulus, in its state natural and when stabilized with lime

mud residue and; (iv) study of the mechanical behavior under permanent deformation test, for the application of sub-base and base layers of flexible road pavements, from triaxial tests of repeated loads, considering, therefore, the following conditions: (a) soils in their natural state and; (b) soils stabilized with the lime mud residue.

1 – INTRODUÇÃO GERAL

1.1 – Considerações iniciais

Apesar do modal rodoviário ser a base para o transporte de bens e pessoas no Brasil, destaca-se o fato de que apenas uma parcela da malha rodoviária encontra-se pavimentada em relação à extensão total. Segundo os dados da Confederação Nacional dos Transportes (CNT, 2017), existem, no país, 1.735.621 km de rodovias, dos quais apenas 212.886 km são pavimentados, isto é, 12,3% da malha viária. Das rodovias pavimentadas, 64.825 km são federais. Destas, apenas 9,8% são de pista dupla (6.351 km) e 2,1% (1.378 km) são vias em fase de duplicação. Os demais 89,1% são de pistas simples.

Essa mesma pesquisa constatou que, dos 212.866 km de rodovias pavimentadas por todo o país, em 61,8% deste montante, foi detectada alguma deficiência no pavimento, na sinalização ou na geometria da via (estados de conservação classificados como regular, ruim ou péssimo) (CNT, 2017).

As estradas são obras de engenharia que diferem das demais devido a sua expressiva dimensão no sentido longitudinal. Ainda que as espessuras de pavimento sejam relativamente pequenas, grandes quantidades de materiais são consumidas para a execução de estradas, resultado da natureza compacta de suas camadas estruturais (REZENDE, 2009).

A utilização de materiais granulares em camadas de sub-base e base é uma prática corriqueira na pavimentação. Sua restrição, geralmente, está associada à escassez do material pétreo na região da obra, ocasionando altos custos no transporte e inviabilizando sua utilização. A partir desta situação, surge a necessidade do aproveitamento de materiais disponíveis na própria região. O solo local pode ser uma alternativa, desde que atenda a critérios de resistência, durabilidade e estabilidade após sua compactação (SANBONSUGE, 2013).

É de conhecimento geral que o solo natural é um material complexo e muito variável e, devido à sua abundância, tem grande emprego na engenharia rodoviária. Porém, nem sempre o solo local satisfaz às especificações técnicas para sua utilização em camadas de base e/ou sub-base de pavimentos rodoviários. Neste caso, deve-se optar por

alternativas, como dimensionar os pavimentos considerando as limitações do solo, substituir o material existente por outro de melhor qualidade ou corrigi-lo, alterando suas propriedades e criando um novo material que atenda às necessidades do projeto. Esta última alternativa é chamada de estabilização de solos (NÚÑEZ, 1991).

Particularmente, o estudo e a análise da deformabilidade de camadas estruturais de pavimentos flexíveis compostas por solos tropicais são importantes para a estruturação de projetos mais aprimorados de engenharia rodoviária, que impliquem, eventualmente, em menor consumo de materiais e, simultaneamente, em desempenho satisfatório durante o período de vida útil da via, além de permitir a necessária previsão do comportamento global do pavimento, visando à definição de intervenções ao longo do tempo de serviço que assegurem um índice adequado de serventia do mesmo pela restrição à deflagração e desenvolvimento de patologias (GUIMARÃES, 2009).

Segundo Zago (2016), dentre as diversas deficiências nas rodovias, destacam-se as deformações causadas pela ação repetitiva das cargas: a deformação resiliente, relacionada à vida de fadiga do revestimento (evidenciada pela presença de trincas na superfície) e a deformação permanente, associada ao afundamento na trilha de roda (ATR).

Dentre os diversos defeitos que afetam as características funcionais do pavimento, a deformação permanente ou afundamento em trilha de roda é um dos mais importantes, pois, além de evidenciar uma degradação da estrutura do pavimento, pode reduzir, consideravelmente, o conforto ao rolamento e a segurança do usuário, e também aumentar os custos operacionais (RIBEIRO, 2013).

Além disso, o acúmulo de água pluvial na trilha formada na superfície do revestimento afeta a segurança, pois aumenta sensivelmente a chance de ocorrência de acidentes, uma vez que reduz o atrito entre pneu e o pavimento, possibilitando a ocorrência de derrapagens e aquaplanagem (ZAGO, 2016).

Ainda segundo Zago (2016), essa retenção hídrica pode afetar a durabilidade do pavimento, uma vez que favorece a infiltração para as camadas subjacentes, com consequente redução da resistência, promovendo um processo contínuo de deterioração.

Estudos em todo o mundo mostram que o principal foco de pesquisas relacionadas aos afundamentos em trilha de roda está voltado para as contribuições da camada de revestimento asfáltico, por se acreditar que esta seja a camada que tem contribuição mais significativa para o afloramento dessa patologia (GUIMARÃES, 2009).

De acordo com o autor supramencionado, em comparação com o comportamento resiliente, por exemplo, poucas pesquisas têm sido elaboradas para a avaliação da deformação permanente em solos constituintes das camadas de base e sub-base de pavimentos, no exterior e também no Brasil. Uma das razões está associada, sem dúvida, ao fato da medida da deformação permanente ser um processo longo e destrutivo.

Medina e Motta (2005) citam resultados da pista experimental da *American Association of State Highway Officials* (AASHO), onde foi possível determinar a porcentagem de contribuição de cada camada do pavimento para o afundamento em trilha de roda. Constatou-se, naquelas condições, que a camada de revestimento foi responsável por 32% desse afundamento, a base de brita por 14%, a sub-base por 45% e o subleito por 9%.

Dentro de uma perspectiva regional, justifica-se, assim, a realização de um programa experimental de pesquisa voltado para o estudo do comportamento mecânico de solos tropicais extraídos de jazidas de empréstimo localizadas no município de Cajuri, Zona da Mata Norte do estado de Minas Gerais, destinados à composição de camadas de estruturas de pavimentos flexíveis.

Esse programa experimental de pesquisa fundamentou-se na análise de parâmetros de deformabilidade dos materiais analisados, baseada em ensaios de resistência à compressão simples, de deformação permanente e de módulo de resiliência. Ainda foram avaliadas as potencialidades e limitações do uso do resíduo industrial lama de cal,

com vistas ao seu emprego em camadas de sub-base e base de pavimentos flexíveis. Em 2010, Silva Júnior avaliou a utilização de lama de cal na construção rodoviária, com teores de 0% a 40% de resíduo e tempos de cura de 0, 2, 7, 28 e 84 dias, e o comportamento mecânico desse material foi avaliado, para a energia Proctor normal, através de ensaios de compressão simples, compressão diametral e triaxial cíclico, onde constatou-se que as exigências do *Transportation Research Board (TRB)* foram atendidas. Nesse estudo não foi avaliado o comportamento à deformação permanente das misturas.

Portanto, os enfoques deste trabalho estão voltados para estudos de caso que abordam os seguintes temas: (i) análise de parâmetros de deformabilidade de solos granulares provenientes de jazidas de empréstimo e utilizados em camadas de base e sub-base de pavimentos flexíveis, baseada em ensaios mecânicos de resistência à compressão simples, de deformação permanente e de módulo de resiliência, e (ii) reaproveitamento do resíduo de lama de cal em solos que irão constituir camadas em estruturas de pavimentos flexíveis, visando à minimização de custos e de possíveis danos ambientais oriundos de sua disposição final inadequada em aterros ou pelo emprego de processos de incineração.

1.2 – Justificativa

Segundo Silva (2017), o estado de Minas Gerais está entre as unidades da federação brasileira que possuem as maiores malhas rodoviárias. Comumente, construções e intervenções em rodovias demandam grandes quantidades de material que, muitas das vezes, não estão disponíveis em abundância. Em determinadas situações se faz necessária à utilização de materiais não tão nobres. Tendo em vista a necessidade de materiais não ideais para a construção de rodovias e o estudo do uso de resíduos como adições que funcionem como material de melhoramento ou estabilização de solos se faz necessário investimento em pesquisas relacionadas aos temas.

Os danos à estrutura de um pavimento flexível são ocasionados por vários fatores associados ao tráfego ou não, tais como: tensões atuantes, condições ambientais, materiais utilizados e métodos de construção e manutenção. As duas principais

manifestações da ruptura de pavimentos associadas ao tráfego são as trincas por fadiga, com início e desenvolvimento na camada de maior rigidez da estrutura, e a deformação permanente (CERATTI, 1991).

A cal vem sendo empregada pelo homem na estabilização de solos há mais de 2000 anos. Sua utilização em rodovias iniciou-se na década de 20, nos Estados Unidos. Hoje em dia, a utilização de sub-bases e/ou bases de solo-cal aparece como uma solução de baixo custo em rodovias em implantação ou em recuperação de pavimentos existentes (LOVATO, 2004).

Uma solução tecnológica pra o setor rodoviário, de baixo custo, poderá ser a aplicação de resíduos gerados no processo de produção como aditivos químicos, com o intuito de melhorar as características geotécnicas dos solos. Essa técnica é essencial para solucionar a problemática da pavimentação em muitas regiões brasileiras, em geral cobertas por solos de baixa resistência mecânica, bem como garantir a retirada dos resíduos industriais, muitas vezes poluentes, do meio ambiente e utilizá-los em condições ambientalmente toleráveis na estrutura dos pavimentos rodoviários. Um resíduo de grande potencialidade de uso para esse fim é a lama de cal, subproduto da indústria de celulose (OLIVEIRA, 2011).

Dentre as propriedades deformacionais de uma estrutura, destacam-se o módulo de resiliência das camadas de solos em pavimentos rodoviários flexíveis, que é associado às deformações elásticas ou resilientes, e a deformação permanente, ligada às propriedades plásticas ou de deformação permanente desses materiais. Diante do exposto, o foco desta pesquisa foi avaliar o comportamento mecânico de solos naturais de jazidas de empréstimo da microrregião de Viçosa, Minas Gerais, no estado natural e quando estabilizados quimicamente com o resíduo lama de cal gerado no processo de produção da celulose, e visando o emprego em obras de pavimentação.

1.3 – Objetivo geral

A presente pesquisa teve como objetivo geral avaliar a potencialidade de duas amostras de solos tropicais provenientes de jazidas de empréstimo da microrregião de Viçosa-MG, como material a ser utilizado em camadas estruturais de base e sub-base de

pavimentos rodoviários flexíveis, considerando-se suas propriedades mecânicas. Também foi avaliada a potencialidade técnica do resíduo lama de cal como estabilizante químico para melhoria das propriedades mecânicas desses materiais.

1.4 – Objetivos específicos

Os objetivos específicos desta pesquisa, visando ao atendimento do objetivo geral, são os que seguem:

- caracterizar o comportamento resiliente das amostras de solos analisadas através de ensaios triaxiais de carga repetida e definir os correspondentes modelos de comportamentos resilientes em função das variáveis de tensão envolvidas em sua resposta deformacional resiliente;
- determinar as características de deformação permanente das amostras de solos analisadas derivadas de ensaios triaxiais de cargas repetidas;
- avaliar a potencialidade técnica do emprego do resíduo lama de cal como estabilizante químico para as amostras de solos analisadas, visando o emprego em camadas estruturais de sub-base e base de pavimentos rodoviários flexíveis;
- verificar a influência do resíduo lama de cal na resistência mecânica das amostras de solo analisadas, assim como no que tange aos comportamentos resilientes e de deformação permanente das misturas desses materiais em função do período de cura.

1.5 – Organização do Trabalho

Apresenta-se neste item a estrutura geral deste trabalho de pesquisa, com uma síntese do que trata cada capítulo. O trabalho está dividido em sete capítulos, incluindo o Capítulo 1 – Introdução Geral já apresentado.

O Capítulo 2 aborda um estudo comparativo entre as classificações geotécnicas tradicionais de solos, *USCS (Unified Soil Classification System)* e *TRB (Transportation Research Board System)*, e a Metodologia MCT (Miniatura, Compactado, Tropical),

visando à classificação geotécnica de materiais provenientes de jazidas de empréstimo e destinados a compor camadas estruturais de sub-base e base de pavimentos rodoviários flexíveis.

O Capítulo 3 aborda o comportamento mecânico de duas amostras de solo e de misturas solo-lama de cal, com base nos resultados de ensaios de Índice de Suporte Califórnia (ISC ou CBR) e Resistência à Compressão Não Confinada (RCNC), visando analisar a viabilidade técnica do uso desses materiais, em camadas estruturais de sub-base e base de pavimentos rodoviários flexíveis.

O Capítulo 4 aborda um estudo que trata dos ensaios triaxiais de cargas repetidas visando à determinação do módulo de resiliência de solos e de suas misturas com o resíduo industrial lama de cal, visando à aplicabilidade em camadas de sub-base e base de pavimentos rodoviários flexíveis.

O Capítulo 5 aborda um estudo que trata de ensaios triaxiais de cargas repetidas visando à determinação da deformação permanente das amostras de solos analisadas e de suas misturas com o resíduo industrial lama de cal, visando à aplicabilidade em camadas estruturais de sub-base e base de pavimentos rodoviários flexíveis.

O Capítulo 6 apresenta as conclusões finais dos estudos de caso apresentados nessa pesquisa.

O Capítulo 7 apresenta as recomendações para estudos futuros.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CERATTI, J.A.P. **Estudo do comportamento a fadiga de solos estabilizados com cimento para utilização em pavimentos.**1991. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 1991.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE– CNT. **Pesquisa CNT de Rodovias 2017: Relatório Gerencial.** Brasília-DF. 406f. 2017.

GUIMARÃES, A.C.R. **Um Método Empírico para a Previsão da Deformação Permanente em Solos Tropicais Constituintes de Pavimentos.**2009. 352f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.2009.

LOVATO, R.S. **Estudo do comportamento mecânico de um solo laterítico estabilizado com cal, aplicado à pavimentação.**2004. 164f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Rio Grande do Sul. 2004.

MEDINA, J.; MOTTA, L.M.G.**Mecânica dos Pavimentos.**Rio de Janeiro: Editora UFRJ, 2005.

NÚÑEZ, W.P. **Estabilização físico-química de um solo residual de arenito Botucatu, visando seu emprego na pavimentação.** 1991. 150f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) -Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Rio Grande do Sul 1991.

OLIVEIRA, R.F.V. **Análise de Dois Solos Modificados com Cimento para Dimensionamento de Pavimentos.**2011. 148f. Tese (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Minas Gerais. 2011

REZENDE, D.S.V. **Comportamento Mecânico de Alguns Tipos de Solos Através de Ensaio Triaxiais de Cargas Repetidas para Projetos de Pavimentos Rodoviários.**2009. 144f.Tese (Doutorado em Engenharia Civil).Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Minas Gerais.2009.

RIBEIRO, M.M.P.**Contribuição ao Estudo da Deformação Permanente dos Solos de Subleito.**2013. 121f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, São Paulo. 2013.

SANBOSUGE, K.**Estudo Laboratorial e de Campo de Base de solo-cimento.**2013. 135f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Escola Técnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, São Paulo. 2013.

SILVA, M.J. Reforço de solos utilizados em base e sub-base de pavimentos rodoviários com cinza com alto teor de cálcio. 2017. 117f. Tese (Doutorado em Geotecnia) –Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Minas Gerais. 2017.

SILVAJÚNIOR, W.S. Estudo para a utilização de resíduo da fabricação de papel na construção rodoviária.2010. 210f. Tese (Mestrado em Ciências) –Universidade de São Paulo, São Paulo, São Paulo. 2010.

ZAGO, J.P. Estudo da deformação permanente de três solos típicos de subleitos rodoviários de Santa Maria – RS. 2016. 226f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) –Universidade Federal de Santa Maria, Porto Alegre, Rio Grande do Sul. 2016.

2 – CLASSIFICAÇÕES GEOTÉCNICAS DE MATERIAIS VISANDO À APLICAÇÃO EM ESTRUTURAS DE PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS FLEXÍVEIS

Resumo –Este artigo aborda um estudo comparativo entre as classificações geotécnicas de solos *USCS (Unified Soil Classification System)*, *TRB (Transportation Research Board System)* e a Metodologia MCT (Miniatura, Compactado, Tropical), para duas amostras de solo coletadas na microrregião de Viçosa-MG, visando à aplicação como camadas de sub-base e base de pavimentos flexíveis. Os principais objetivos deste estudo são contribuir para a formação de um banco de dados geotécnicos sobre classificações geotécnicas de solos tropicais e analisar o desenvolvimento de correlações entre os sistemas de classificação geotécnica tradicionais e a metodologia MCT. O programa de laboratório envolveu a realização dos seguintes ensaios: (i) granulometria conjunta; (ii) limites de Atterberg (LL e LP); (iii) massa específica dos grãos do solo; (iv) compactação Mini-MCV; e (v) perda de massa do corpo de prova por imersão em água. Os resultados deste estudo possibilitaram verificar que, após a classificação das amostras, várias correlações entre os sistemas de classificações geotécnicas coincidiram com aquelas propostas pela metodologia MCT e, considerando as características pedogenéticas dos solos da região de Viçosa-MG, para o Grupo NA', houve confirmação da classificação do grupo SC do sistema USCS e do grupo A – 2 (0) do sistema TRB.

Palavras-Chave: Classificações geotécnicas de solo, Pavimentos flexíveis.

GEOTECHNICAL CLASSIFICATIONS OF MATERIALS FOR THE APPLICATION OF FLEXIBLE ROAD FLOOR STRUCTURES

Abstract – This article discusses a comparative study between the Geotechnical soil classification *USCS (Unified Soil Classification System)*, *TRB (Transportation Research Board System)* and the Methodology MCT (Miniature, Compacted, Tropical), for two samples of collected micro-region soil of Viçosa-MG, for the application as sub-base and base layers of flexible pavements. The main objectives of this study are to

contribute to the formation of a geotechnical database on classifications of geotechnical tropical soils and analyses of the development of correlations between traditional geotechnical classification systems and MCT methodology. The laboratory program involved the realization of the following tests: (i) joint size; (ii) Atterberg limits (LL and LP); (iii) density of the grains; (iv) compacted Mini-MCV; and (v) loss of mass of the body of evidence by immersion in water. The results of this study made it possible to verify that, after the classification of samples, many correlations between the Geotechnical rating systems coincided with those proposed by the MCT and methodology, considering the pedogenetic characteristics of soils of the region of Viçosa-MG, for the Group NA', there was a confirmation of the SC group of the USCS system and of the group A-2 (0) of the TRB system.

Keywords: Geotechnical soil classification, Flexible pavements.

2.1– Introdução

2.1.1 Contextualização do problema

No Brasil, o setor de infraestrutura de transportes rodoviário tem muito a desenvolver, visto que se apresenta como principal meio de escoamento de produção da nossa matriz modal, correspondendo em grande parte pelo escoamento de pessoas e cargas. Como as rodovias não se apresentam em condições de atender às necessidades do transporte nacional fica prejudicada e vinculada toda a cadeia produtiva, tanto de logística interna e de exportação (DINIZ, 2009).

Em nosso país, as técnicas utilizadas nos estudos geotécnicos que visam à elaboração de projetos rodoviários assim como os métodos aplicados no dimensionamento de pavimentos seguem, na maioria das vezes, as mesmas orientações gerais determinadas pela normalização específica ditada por países da Europa ou dos Estados Unidos. Nestes países, as condições climáticas características de climas temperados fazem com que as diversas camadas do pavimento sejam construídas predominantemente por materiais pétreos granulares semi-industrializados e de alto custo (CASTRO, 2002).

As atividades relacionadas à identificação e classificação de solos são essenciais em quase todos os estudos geotécnicos relacionados à construção de barragens, cortes e

aterros, fundações de grandes estruturas e obras viárias (COZZOLINO;NOGAMI e VILLIBOR, 1993). Para o engenheiro civil, que atua em obras de construção de estradas, esta ação possibilita selecionar segmentos homogêneos de rodovias, conferindo aos mesmos importantes suportes para tomada de decisão, no que diz respeito a projetos de pavimentos (SILVA, 2009).

A diversidade e a enorme diferença de comportamento apresentada pelos solos perante as diferentes finalidades de interesse da engenharia rodoviária levaram a um natural agrupamento desses materiais em conjuntos distintos, aos quais foram atribuídas determinadas propriedades geotécnicas. Foi desta tendência racional de organização da experiência acumulada que surgiram os sistemas de classificação dos solos (PINTO, 2000).

Na engenharia rodoviária, um sistema de classificação pode ser baseado no potencial de um determinado solo para uso em camadas de pavimento, fundações ou como outro material de construção. Devido a sua natureza extremamente variável, é inevitável que em qualquer classificação ocorram casos onde é difícil se enquadrar o solo em uma única categoria, ou seja, sempre vão existir casos em que determinado solo poderá ser classificado como pertencente a dois ou mais grupos. Do mesmo modo, um determinado tipo de solo pode ser inserido em grupos que pareçam radicalmente diferentes, em diferentes sistemas de classificação (REZENDE, 2009).

Os dois sistemas de classificação de solos mais difundidos no meio geotécnico são o *Unified Soil Classification System (USCS)* e o *Transportation Research Board (TRB)*. Estes sistemas, desenvolvidos em países de clima temperado baseiam-se nos Limites de Atterberg (LL e LP) e na granulometria dos solos, sendo denominados classificações tradicionais. Foram criados para atender demandas relacionadas à engenharia viária, devido à necessidade de se construir inúmeras pistas de pouso e decolagem durante a Segunda Guerra Mundial. Porém, estas classificações apresentam limitações quando utilizadas para a previsão de propriedades dos solos tropicais (SANTOS, 2006).

No Brasil, tratando-se de obras de pavimentação rodoviária, podem-se separar os sistemas de classificação de solos em duas grandes vertentes. A primeira, representada

pelas classificações geotécnicas tradicionais de solos, desenvolvidas originalmente em países de clima temperado e, posteriormente, adotadas no Brasil. Uma segunda vertente de classificação geotécnica de solos é representada pela Metodologia MCT (Miniatura, Compactada, Tropical), proposta, inicialmente, em 1980 por Job Shuji Nogami e Douglas Fadul Villibor, professores e pesquisadores da Universidade de São Paulo (USP), com fins de determinação das propriedades físicas dos solos, visando sua aplicação em camadas de pavimentos rodoviários (SOUZA JÚNIOR,2011).

Segundo Nogami e Villibor (1980), a percepção das peculiaridades dos solos tropicais para sua utilização como material de construção rodoviária foi importante para a tomada de decisão de alguns profissionais da área. A caracterização e a identificação de vários solos por meio de metodologias estrangeiras, desenvolvidas em países de climas frio ou temperado, resultaram em determinações inadequadas para a utilização em camadas de pavimentos rodoviários brasileiros, país tipicamente tropical.

Contudo, o sistema de classificação geotécnica MCT apresenta algumas dificuldades, como, por exemplo, número de golpes requerido no ensaio de compactação Mini-MCV, grande quantidade de dados e curvas a serem processados e tempo necessário para a classificação geotécnica de solos em torno de 48 horas. Isto dificulta não apenas o seu emprego, mas também a disseminação deste sistema de classificação para a finalidade em vista. Desta forma, vários pesquisadores, dentre eles Castro (2002), Marson (2004), Medrado (2009), Rezende (2009), Souza Júnior (2011) e Sanbonsuge (2013), estudaram esta classificação a fim de torná-la mais abrangente e menos trabalhosa, com procedimentos simples, visando promover uma classificação que traduza, de fato, as diferenças de comportamento entre diferentes gêneses de solos.

Diante do exposto, buscou-se nessa pesquisa realizar um estudo comparativo entre as classificações geotécnicas tradicionais USCS e TRB e a metodologia MCT aplicadas a materiais de jazidas de empréstimo da microrregião de Viçosa-MG, visando à utilização em estruturas de camadas de sub-base e base de pavimentos rodoviários flexíveis.

2.2– Materiais e Métodos

2.2.1 – Solos

As amostras deformadas de solos utilizadas nesta pesquisa foram provenientes das jazidas de empréstimo denominadas “Nô da Silva”, de coordenadas geográficas de posição 20°46’46,23” de latitude Sul e 42°49’12,68” de longitude Oeste de *Greenwich*, e “Gomide”, de coordenadas 20°47’29,35” de latitude Sul e 42°49’19,23” de longitude Oeste de *Greenwich*, localizadas na zona rural do município de Cajuri - MG. A Figura 1 ilustra a imagem de satélite obtida através da tecnologia *Google Earth*, evidenciando a localização das referidas jazidas de empréstimo.



Figura 1–Localização das jazidas de empréstimo das amostras de solos analisadas.
Fonte: Google Earth, 2017.

As Figuras 2 e 3 definem os respectivos locais onde foram coletados os materiais para realização dos ensaios dentro das jazidas de empréstimo investigadas.



Figura 2–Local de coleta da amostra de solo proveniente da Jazida de empréstimo “Nô da Silva”.
Fonte: O autor, 2017.



Figura 3—Local de coleta da amostra de solo proveniente da Jazida de empréstimo “Gomide”.

Fonte: O autor, 2017.

2.2.2 – Métodos

A coleta das amostras indeformadas de solos das jazidas de empréstimo investigadas atendeu ao procedimento PRO 003 (DNER, 1994a). Inicialmente, as amostras de solos foram secas ao ar, destorroadas, peneiradas e acondicionadas em sacos plásticos e armazenadas, para serem empregadas em vários ensaios geotécnicos.

2.2.2.1 – Ensaios de caracterização geotécnica

Os ensaios geotécnicos para a caracterização física das amostras de solos analisadas foram os que seguem: granulometria conjunta, segundo a NBR 7181 (ABNT, 1984a), limites de Atterberg, segundo a NBR 6459 (ABNT, 1984b) e a NBR 7180 (ABNT, 1984c), e massa específica dos grãos do solo, segundo a NBR 6508 (ABNT, 1984d).

2.2.2.2 – Classificação MCT

As amostras de solos analisadas também foram classificadas geotecnicamente, segundo a Metodologia MCT. Para isto, realizaram-se os ensaios de Perda de massa por imersão, segundo o ME 256 (DNER, 1994b), e de Compactação dinâmica Mini-MCV, segundo o ME 258 (DNER, 1994c), conforme os procedimentos prescritos no método de classificação CLA 259 (DNER, 1996) com necessárias consulta complementar ao método de ensaio ME 228 (DNER, 1994d).

2.3 – Resultados e discussão

2.3.1 – Considerações iniciais

Na Tabela 1, encontram-se informações sobre a distribuição granulométrica, segundo a NBR 6502 (ABNT, 1995), os limites de Atterberg e o peso específico dos grãos das duas amostras de solos estudadas.

Tabela 1 – Resultados dos ensaios geotécnicos: granulometria, limites de Atterberg, peso específico dos grãos dos solos

Propriedades analisadas	Amostras de Solos		
	Nô da Silva	Gomide	
Granulometria ABNT (%)	Argila ($\varphi \leq 0,002\text{mm}$)	15	13
	Silte ($0,002\text{mm} \leq \varphi \leq 0,06\text{mm}$)	11	11
	Areia fina ($0,06\text{mm} \leq \varphi \leq 0,2\text{mm}$)	13	3
	Areia média ($0,2\text{mm} \leq \varphi \leq 0,6\text{mm}$)	23	21
	Areia grossa ($0,6\text{mm} \leq \varphi \leq 2,0\text{mm}$)	24	39
	Pedregulho ($\varphi \leq 2,0\text{mm}$)	14	13
Limites de Consistência	LL (%)	38	38
	LP (%)	23	24
	IP(%)	15	14
Peso Específico dos Sólidos	$\gamma_s(\text{kN/m}^3)$	26,70	26,64

A amostra de solo da jazida de empréstimo denominada Nô da Silva apresenta 60% de areia. A terminologia mais adequada para o solo analisado é areia argilo-siltosa com presença de pedregulho. Já a amostra de solo da jazida de empréstimo denominada Gomide apresenta 63% de areia. A terminologia mais adequada para o solo analisado também é areia argilo-siltosa com presença de pedregulho.

2.3.2 – Resultados das classificações geotécnicas USCS e TRB

A Tabela 2 apresenta os resultados das classificações geotécnicas USCS e TRB, os quais atendem às correlações propostas por DNIT (2006) para as duas amostras de solos analisadas.

Tabela 2- Classificação dos solos segundo USCS e TRB

Classificações Geotécnicas Tradicionais	Designação das Amostras	
	Nô da Silva	Gomide
USCS	SC	SC
TRB	A – 2 – 7 (0)	A – 2 – 6 (0)

Como apresentado na Tabela 2, para o sistema de classificação TRB, os solos investigados foram classificados como pertencentes aos grupos A-2-7(0) (Jazida Nô da Silva) e A-2-6(0) (Jazida Gomide). Esses grupos, respectivamente, são compostos pelas areias siltosas e areias argilosas e não lateríticas, apresentando comportamento que varia de excelente a bom para utilização na camada de subleito. Pelo sistema USCS, os solos foram classificados como SC, em que estão incluídos os solos com cascalho, ou solos arenosos, com finos (mais de 12% passando na peneira #200) cuja plasticidade pode ser baixa ou alta e com mais que metade da fração grosseira passando na peneira n°4.

2.3.3 – Resultados da classificação geotécnica da metodologia MCT

Na Tabela 3, encontram-se os dados relativos à classificação geotécnica das amostras de solos analisadas segundo a metodologia MCT.

Tabela 3– Índices classificatórios e classificação das amostras de solos analisadas segundo a Metodologia MCT

Amostras	Índices classificatórios				Classificação MCT
	c'	d'	Pi(%)	e'	
Nô da Silva	0,90	8,30	79,00	1,47	NA'
Gomide	0,78	17,3	82,00	1,25	NA'

Pela metodologia MCT, as amostras de solos foram classificadas como pertencentes ao grupo NA' (misturas de areias quartzosas, com finos de comportamento não laterítico - solo arenoso), sendo sua utilização recomendada em camadas de pavimentos rodoviários, mas não em caráter prioritário em face de outras classes de solos tropicais. Verificando os resultados apontados na Tabela 3 com o agrupamento proposto por Nogami e Villibor (1995) (Tabela 4), para o grupo NA' em particular, notou-se que os

agrupamentos sem relação aos sistemas de classificação tradicional encontrados nesta pesquisa estão em conformidade com o proposto pelos referidos autores.

Tabela 4 – Correlação entre a Metodologia MCT e os Sistemas USCS e TRB, segundo NOGAMI e VILLIBOR (1995)

Classificações geotécnicas tradicionais	Classificação MCT						
	Não Laterítico				Laterítico		
	NA	NA'	NS'	NG'	LA	LA'	LG'
USCS	SP	MS	SM, CL	MH	SP	SC	MH
	SM	SC	ML, MH	CH	SC		ML
		ML					CH
TRB	A - 2	A - 2	A - 4	A - 6	A - 2	A - 2	A - 6
		A - 4	A - 5	A - 7 - 5		A - 4	A - 7 - 5
		A - 7	A - 7 - 5	A - 7 - 6			

2.3.4 – Comparação entre os resultados das classificações geotécnicas USCS e TRB e da metodologia MCT

A Tabela 5 apresenta os resultados das USCS, TRB e MCT das amostras de solos analisadas.

Tabela 5 – Classificações pedológica, USCS, TRB e MCT das amostras de solos analisadas

Amostras	Classificações geotécnicas tradicionais		Classificação MCT
	USCS	TRB	
Nô da Silva	SC	A - 2 - 7(0)	NA'
Gomide	SC	A - 2 - 6(0)	NA'

Estudos realizados por Nogami e Villibor (1995) e os resultados obtidos nos trabalhos de Castro (2002) e Silva (2009), relatam dificuldades em correlacionar os sistemas de classificação tradicionais, TRB e SUCS, com a metodologia MCT, verificando-se que as diferenças de propriedades que caracterizam os solos lateríticos e saprolíticos, retratados na classificação MCT, não se refletem nas classificações tradicionais.

2.4 – Conclusões

Considerando-se que a Metodologia MCT é a única que permite levar em conta a gênese dos solos, os resultados encontrados nesta pesquisa são uma constatação dos agrupamentos propostos por Nogami e Villibor (1995), visto que o grupo NA' da

classificação MCT corresponde ao SC do sistema USCS e ao grupo A – 2 do sistema TRB. Entretanto, os procedimentos metodológicos para identificação dos solos pelos sistemas de classificações geotécnicas TRB e USCS e metodologia MCT são muito distintos. No entanto, analisando-se as propriedades granulométricas desses grupos de solo, conclui-se que é possível correlacioná-los.

A classificação geotécnica obtida pela metodologia MCT para as amostras de solos analisadas, NA', caracteriza os comportamentos mecânico e hidráulico das amostras de solo como típicos de materiais não laterítico. A elevada perda de massa ($P_i(\%)$), constatada nos corpos de prova imersos em água foi o fator determinante para esta classificação. Segundo Nogami e Villibor (1995) solos desta natureza apresentam dificuldades para alcançar grau de compactação de 100% na pista e podem apresentar desagregação nas bordas precocemente. Portanto, tais solos exigem cuidados especiais durante a execução das camadas estruturais do pavimento.

Contudo, destaca-se que prever o comportamento mecânico de solos tropicais através dos sistemas de classificações geotécnicas USCS e TRB é uma prática que tem suscitado críticas nos meios geotécnicos e rodoviários brasileiro, haja vista que os mesmos baseiam-se apenas nas propriedades físicas (granulometria e limites de Atterberg), enquanto que, na metodologia MCT, são investigadas as propriedades mecânicas e hidráulicas dos solos.

2.8 – Agradecimentos

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de pesquisa ao primeiro autor, e à Universidade Federal de Viçosa (UFV), através do Departamento de Engenharia Civil, pelo suporte na coleta das amostras deformadas de solos e nos ensaios geotécnicos de laboratório.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS-ABNT. **NBR 7181/84:** Análise Granulométrica, Solos, Método de Ensaio, Rio de Janeiro, 1984a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 6459/84**:solo: determinação do limite de liquidez.Rio de Janeiro,1984b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS-ABNT. **NBR 6502/95**: Rochas e solos: terminologia. Rio de Janeiro, 1995.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT.**NBR 6508/84**: Solo: determinação da massa específica aparente.Rio de Janeiro,1984d.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT.**NBR 7180/84**:solo: determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro,1984c.

CASTRO, B.A.C. de **Caracterização Geotécnica de Solos da Região Central de Minas Gerais para Aplicação em Obras Rodoviárias**.2002. 244f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro.2002.

COZZOLINO, V.M.N.; NOGAMI, J.S.; VILLIBOR, D.F. **Classificação Geotécnica MCT para Solos Tropicais**. Solos e Rochas, 16, (2): 77-91, agosto, São Paulo, 1993.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM - DNER. **PRO 003/94** Coleta de amostras deformadas de solos. Rio de Janeiro: Instituto de Pesquisas Rodoviárias. 1994a.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM - DNER. **ME 256/94**. Solos compactados com equipamento miniatura - determinação da perda de massa por imersão, solos, método de ensaio. Rio de Janeiro: Instituto de Pesquisas Rodoviárias.1994b.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM - DNER.**ME 258/94**. Solos compactados em equipamento miniatura – Mini-MCV, solos, métodos de ensaio.Rio de Janeiro: Instituto de Pesquisas Rodoviárias. 1994c.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM – DNER. **ME 228/94**. Compactação em equipamento miniatura, solos, método de ensaio. Rio de Janeiro: Instituto de Pesquisas Rodoviárias. 1994d.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM - DNER. **CLA 259/96**. Classificação de solos tropicais para finalidades rodoviárias utilizando corposdeprova compactados em equipamento miniatura. Rio de Janeiro. Instituto de Pesquisas Rodoviárias, 1996.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES - DNIT. **Manual de Pavimentação**. 3ª Ed. Rio de Janeiro: Instituto de Pesquisas Rodoviárias. 274 p. 2006.

DINIZ, D. H. **A Influência dos finos de escória de aciaria como estabilizante parauso em pavimentos**. 2009. 121f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. Minas Gerais. 2009.

GOOGLE. **Google Earth**. Disponível em: <http://earth.google.com>. Acessado em: 21/08/2017, 2017.

MARSON, M. **Análise crítica da classificação MCT para solos tropicais**. 2004. 216f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos – SP, 2004.

MEDRADO, W.A. **Caracterização Geotécnica de Solo da Região Norte de Minas Gerais para Aplicação em Obras Rodoviárias**2009. 141f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Minas Gerais. 2009

NOGAMI, J.S.; VILLIBOR, D.F. **Caracterização e Classificação de Solos para Pavimentação: Limitações do Método Tradicional, Apresentação de uma Nova Sistemática**. In: 15ª REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, Belo Horizonte, MG, Agosto, p.01-38. 1980.

NOGAMI, J. S. e VILLIBOR, D. F. **Pavimentação de baixo custo com solos lateríticos.** São Paulo: Villibor, 240p, 1995.

PARSONS, A.W. **The Rapid Measurement of the Moisture Condition of Earthwork Material.**1976. 29p. Crowthorne, Berkshire (TRRL – Transport and Road Research Laboratory – Report) 1976.

PINTO, C.S. **Curso básico de mecânica dos solos.** Editora Oficina de Textos. 247p. 2000.

REZENDE, D.S.V. **Comportamento Mecânico de Alguns Tipos de Solos Através de Ensaio Triaxiais de Cargas Repetidas para Projetos de Pavimentos Rodoviários.** 2009. 144f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – DEC, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Minas Gerais. 2009.

SANBONSUGE, K.**Estudo Laboratorial e de Campo de Base de solo-cimento.**2013. 135f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Escola Técnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, São Paulo. 2013.

SANTOS, E.F. dos **Estudo comparativo de diferentes sistemas de classificação geotécnica aplicada aos solos tropicais.**2006. 145f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) –Universidade de São Carlos, São Paulo. 2006.

SILVA, T.O. **Estudos de estradas não pavimentadas da malha rodoviária do município de Viçosa-MG.**2009. 131f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Minas Gerais. 2009.

SOUZAJUNIOR, T.A.T. **Respostas Estruturais em Pavimentos Flexíveis Via Utilização de Equações de Módulos de Resiliência de Solos de Subleito e da Camada de Reforço.** 2011. 102f. Tese (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Minas Gerais. 2011.

3 – ESTUDO GEOTÉCNICO DE MISTURAS SOLO-LAMA DE CAL VISANDO O EMPREGO EM CAMADAS ESTRUTURAIS DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS.

Resumo –Este artigo aborda o comportamento geotécnico de duas amostras de solo e de misturas desses solos com o resíduo industrial lama de cal, com base nos resultados de ensaios de caracterização geotécnica e mecânicos, visando avaliar a eventual viabilidade técnica do uso de misturas de solos residuais e do resíduo industrial, empregado como estabilizante químico, em camadas de sub-base e base de pavimentos flexíveis. Para este propósito, consideraram-se amostras deformadas de solos coletadas na microrregião de Viçosa-MG. Os ensaios mecânicos realizados corresponderam ao Índice de Suporte Califórnia (ISC ou CBR) e à Resistência à Compressão Não Confinada (RCNC), e a caracterização geotécnica envolveu a realização dos seguintes ensaios: (i) granulometria conjunta; (ii) limites de Atterberg (LL e LP); (iii) massa específica dos grãos do solo; (iv) compactação Mini-MCV; (v) perda de massa do corpo de prova por imersão em água; e (vi) compactação realizada nas energias do Proctor intermediário e modificado. Para a lama de cal, foi considerada uma percentagem de 5% em massa relativamente à massa seca da mistura. Os solos pesquisados foram identificados como de comportamento não laterítico, enquadrados no grupo NA' da classificação MCT (Miniatura, Compactado, Tropical). Mesmo apresentando valores de limite de liquidez e índice de plasticidade elevados, quando compactados na energia do Proctor intermediário e posteriormente imersos em água, tais solos não apresentaram expansão significativa no ensaio de CBR, porém não atenderam todas as especificações técnicas do DER de São Paulo com código ET-DE-P00/005 acredita-se que seja viável a utilização desses solos, como camada de sub-base e base em pavimentos rodoviários flexíveis. A utilização da lama de cal elevou significativamente a resistência à compressão não confinada dos solos estudados.

Palavras-Chave: Solos residuais; Lama de cal; Ensaios mecânicos; Sub-base e base de pavimentos rodoviários.

GEOTECHNICAL STUDY OF LIME SOIL MIXTURES FOR THE USE OF STRUCTURAL LAYERS OF FLEXIBLE PAVEMENTS.

Abstract This paper deals with the geotechnical behavior of two soil samples and mixtures of these soils with the lime mud industrial waste, based on the results of geotechnical and mechanical characterization tests, in order to evaluate the possible technical feasibility of the use of mixtures of residual and of industrial waste, used as chemical stabilizer, in sub-base layers and base of flexible pavements. For this purpose, deformed samples of soils collected in the Viçosa-MG micro-region were considered. The mechanical tests performed corresponding to the California Support Index (CSI or CBR) and Unconfined Compression Resistance (UCR), and the geotechnical characterization involved the following tests: (i) joint granulometry; (ii) Atterberg boundaries (LL and LP); (iii) specific mass of the soil grains; (iv) Mini-MCV compaction; (v) loss of body mass due to immersion in water; and (vi) compaction performed on the energies of the intermediate and modified Proctor. For lime mud, a percentage of 5% of mass was considered relative to the dry mass of the mixture. The soils surveyed were identified as non - lateritic behavior, grouped into the NA 'group of the MCT classification (Miniature, Compressed, Tropical). Even when they presented high values of liquidity limit and plasticity index, when compacted in the energy of the intermediate Proctor and later immersed in water, these soils did not show significant expansion in the CBR test, but they did not meet all the technical specifications of the DER of São Paulo with code ET-DE-P00 / 005 it is believed that the use of such soils as sub-base layer and base on flexible road pavements is feasible. The use of lime mud significantly increased the unconfined compressive strength of the studied soils.

Keywords: Residual soils; Lime mud; Mechanical tests; Sub-base and base of road pavements.

3.1 – Introdução

Em muitas situações, um solo no estado natural não apresenta propriedades geotécnicas adequadas para emprego em camadas de pavimentos rodoviários, o que ressalta a importância do estudo da estabilização química de solos no sentido de adequar os

parâmetros geotécnicos dos mesmos, em conformidade com as exigências contidas nas especificações técnicas dos órgãos rodoviários.

A crescente cobrança quanto à necessidade de promover a preservação dos recursos naturais, principalmente quanto aos impactos ambientais decorrentes das obras de engenharia, faz com que se busquem novas soluções que sejam incorporadas aos projetos elaborados, visando evitar ou minimizar danos ao meio ambiente (BEJA, 2011).

Segundo John (2000), o aumento na geração de resíduos sólidos tem motivado reflexões a respeito da sustentabilidade, frente aos graves problemas urbanos, ambientais e a um gerenciamento oneroso e complexo. Uma das formas de minimizar estes problemas é a reciclagem de resíduos, em que a construção civil tem um grande potencial de utilização, podendo consumir até 75% de recursos naturais.

As ideias que circundam os aspectos relacionados à sustentabilidade ambiental têm levado grandes empresas a investir em pesquisa e desenvolvimento no sentido de encontrar maneiras sustentáveis e econômicas de reaproveitar os resíduos gerados pelas atividades produtivas de suas plantas industriais (PEIXOTO et al., 2010).

A dificuldade em encontrar jazidas com materiais de boa qualidade para a execução das camadas de base e sub-base em rodovias, principalmente quando se trata de materiais que não atendem às especificações para estabilização granulométrica de camadas do pavimento, pode ser solucionada através da mistura de solos granulometricamente distintos ou da adição a esses de materiais residuais com potencial de melhorá-los física e/ou quimicamente. Verifica-se, por exemplo, que a incorporação de lama de cal ao solo utilizado nas camadas estruturais do pavimento pode melhorar a qualidade da mistura. Essas evidências estão apresentadas em trabalhos como Pereira (2005), Silva Júnior (2010) e Amaral (2016).

Nesse contexto, o propósito deste estudo foi analisar, em laboratório, o comportamento de engenharia de misturas solo-lama de cal com vistas à aplicação em obras rodoviárias,

com base nos resultados de ensaios de caracterização geotécnica e de caracterização mecânica dos mesmos.

3.2 – Revisão de literatura

3.2.1 – Pavimentos flexíveis

De acordo com a NBR 7207 (ABNT, 1982), o pavimento é uma estrutura construída após a terraplenagem e destinada economicamente e simultaneamente em seu conjunto a: resistir e distribuir ao subleito os esforços verticais produzidos pelo tráfego; melhorar as condições de rolamento quanto à comodidade e segurança; e resistir aos esforços horizontais que nele atuam, tornando mais durável a superfície de rolamento.

De uma forma geral, os pavimentos podem ser classificados em rígidos e flexíveis (SENÇO, 1997). Os pavimentos flexíveis, em geral associados aos pavimentos asfálticos, são compostos por camada superficial asfáltica (revestimento), apoiada sobre camadas de base, sub-base e reforço do subleito, estas últimas constituídas por materiais granulares, solos ou misturas. Os pavimentos rígidos são compostos por uma camada superficial de concreto de cimento *Portland* (em geral placas, armadas ou não), apoiada geralmente sobre uma camada de material granular ou de material estabilizado com cimento (chamada sub-base), assentada sobre o subleito ou sobre um reforço do subleito quando necessário (BEJA, 2011).

Segundo a NBR 7207(ABNT, 1982), os pavimentos flexíveis são constituídos por camadas que não trabalham à tração, exceção feita ao revestimento que pode ou não suportar esse tipo de esforço. Normalmente, são constituídos de revestimento betuminoso delgado sobre camadas puramente granulares. A capacidade de suporte é função das características de distribuição de cargas por um sistema de camadas superpostas, onde as mais resistentes encontram-se na parte superior da estrutura. Segundo Senço (1997), em pavimentos flexíveis, o material constituinte da sub-base deverá ter características tecnológicas superiores ao material de reforço do subleito. O material de base, por sua vez, deverá ter melhor qualidade que o material da sub-base.

A base e a sub-base de pavimentos flexíveis possuem influência direta na qualidade e durabilidade dos pavimentos rodoviários. Frente à repetição de cargas e à intensidade

das solicitações a que são expostas, as camadas de base e sub-base exigem, na sua composição, materiais que apresentem boas características mecânicas, capazes de resistir à ação do tráfego sem apresentar deformações consideráveis que prejudiquem a utilização da rodovia (SILVA JÚNIOR, 2010).

Os materiais utilizados nas camadas estruturais do pavimento são usualmente constituídos por agregados, solos e, eventualmente, aditivos, como cimento, cal, emulsão asfáltica, entre outros, podendo ser classificados, segundo o seu comportamento frente aos esforços, em granulares e solos, estabilizados quimicamente ou cimentados e materiais asfálticos (BERNUCCI et al., 2007).

3.2.2 – Mecanismos da estabilização química dos solos

Na área da pavimentação rodoviária, especificamente, a racionalização do uso dos materiais locais pode melhorar a qualidade de rolamento das rodovias, resultando em soluções mais econômicas do que as convencionais. Contudo, nem sempre é possível encontrar solos naturais que atendam às exigências das especificações vigentes. Nestas situações, algumas decisões podem ser tomadas em relação à solução mais indicada para cada caso e, possivelmente, irão contemplar uma das seguintes hipóteses (FERRAZ, 1994):

- a) aceitar o material local e adaptar o projeto às restrições impostas por ele;
- b) descartar o material, removendo-o de seu local de origem e substituindo-o por outro de qualidade superior, ou;
- c) aceitar o material local e alterar suas propriedades, de modo a torná-lo capaz de responder às necessidades das tarefas previstas.

Atualmente, a inserção de aditivos químicos em solos considerados não aptos à pavimentação vem sendo bastante estudada no Brasil e em muitos outros países, podendo citar como referências Ingles e Metcalf (1973), ABCP (1986), Lima et al. (1993), Trindade et al. (2003), Pereira (2005), Azevêdo (2010), Oliveira (2010) e Amaral (2016).

Segundo França (2010), em alguns países como África do Sul, Itália e Portugal, essa técnica tem sido empregada com bastante êxito, aumentando a resistência das camadas de base, sub-base e subleito de pavimentos. O *International Focus Group on Rural Road Engineering* (IFG, 2005) relata que o processo de estabilização química envolve a adição de um agente estabilizante ao solo, fazendo com que este atinja uma umidade ótima adequada, uma compactação eficiente e uma cura final que assegure a obtenção de uma resistência potencial satisfatória. O IFG (2005) destaca ainda o uso da cal e do cimento na melhoria de solos naturais instáveis, a fim de possibilitar o uso destes em camadas de base e sub-base de pavimentos rodoviários.

GUIMARÃES (2002) comenta que a opção por um ou outro método de estabilização, seja ela mecânica ou com a inserção de aditivos químicos, como a cal e o cimento, é influenciada por uma série de fatores, entre os quais se destacam os econômicos, a própria finalidade da obra, as características dos materiais e as propriedades do solo que devem ser corrigidas. Além disso, o autor relata que os solos das regiões tropicais úmidas, particularmente, recebem tratamentos deficientes sobre seus problemas devido às significativas diferenças entre suas propriedades e comportamentos, exigindo um número maior de estudos e pesquisas para se chegar aos procedimentos mais apropriados.

3.2.3 – Solo-cal

3.2.3.1 – Trabalhos envolvendo misturas solo-cal

O emprego da cal na estabilização dos solos é uma das mais antigas técnicas utilizadas pelo homem para obter a melhoria de suas características mecânicas. Há exemplos dessa utilização na via Ápia (sul da Itália) construída em 312 a.C. e em trechos da Muralha da China, datado de 2280 a.C. (GUIMARÃES, 2002).

A utilização da estabilização em grande escala ocorreu em *Missouri* (EUA), em 1924, e na antiga União Soviética, em 1926. Apesar do relativo sucesso obtido nas construções rodoviárias pioneiras de estabilização solo-cal, seu uso foi pouco empregado até o início da Segunda Guerra Mundial. Houve um grande avanço tecnológico a partir de 1945

com o desenvolvimento de pesquisas de laboratório e de campo, realizadas pelo *Texas Highway Department* (LIMA et al., 1993).

No Brasil, vários trabalhos foram desenvolvidos com a utilização da técnica solo-cal e muitos apresentaram resultados bastante satisfatórios. Algumas obras importantes realizadas com a utilização desse método nas últimas décadas e que obtiveram sucesso foram (LOVATO, 2004):

- a) Aeroporto de Congonhas (em São Paulo): base de solo-cal construída na área (1000 m²) de hangares da antiga Varig. O solo utilizado nesta obra foi classificado de acordo com a HRB como A-7-5 (argiloso) e possuía um IP (Índice de Plasticidade) igual a 12. Após a estabilização com um teor de 6% de cal, o solo apresentou uma resistência à compressão não confinada igual a 1,5 MPa aos 28 dias;
- b) Rodovia Brasília-Fortaleza próxima ao município de Sobradinho/DF: foram executados dois trechos de 150 m. Nestes trechos, foram realizadas camadas de base com 1% e 3% de cal e de sub-base em solo laterítico. Os solos utilizados nesta obra apresentavam LL = 41% e IP = 11%;
- c) Avenida Sernabetiba (Rio de Janeiro, Guanabara): foram executados 18 km de trecho com camadas de base de solo-cal com 3% e 4% de estabilizante.

No Brasil, há muitos estudos sobre solo-cal, possuindo algumas obras experimentais com o emprego da mistura solo-cal, datadas entre os anos de 1970 e 2000, das quais podem ser citadas a duplicação da rodovia BR-040, trecho Belo Horizonte – Sete Lagoas, e a adição de cal ao subleito da rodovia BR-381, entre Nepomuceno/MG e Três Corações/MG (AZEVEDO, 2010).

No estado do Ceará, especificamente, segundo relatos de Loiola e Nobre Júnior (2001), a primeira experiência utilizando mistura de solo-cal em camadas de base e sub-base foi executada pelo Departamento de Edificações Rodoviárias e Transporte do Estado (DERT-CE), no ano 2000. Esse segmento possui a extensão de 117 km e faz parte do trecho de 8,72 km que liga o município de Limoeiro do Norte ao distrito de Flores, situado no município de Russas (região do Médio Jaguaribe). O trecho foi executado na

época a partir do uso de uma técnica de mistura no local com o espalhamento manual de sacos da cal.

Ainda no estado do Ceará, valem destacar, também, os trabalhos de Barroso e Santos (2006) e Loiola e Barroso (2007), que mostraram os resultados do estudo realizado em laboratório e o processo construtivo de uma rodovia de 40 km de extensão (Rodovia do Melão) empregando a técnica de solo-cal. Em 2009, Araújo realizou um estudo da técnica solo-cal para dois solos da Região do Baixo Jaguaribe/CE, para o emprego em camadas nobres de rodovias, analisando-se diferentes processos de mistura do estabilizante ao solo, a saber, cal em pó e em pasta.

3.2.3.2 – Reações no solo-cal

O solo-cal é uma mistura de solo, cal e água em proporções determinadas por ensaios de laboratório, sendo o seu produto capaz de ser usado em qualquer das camadas não asfálticas do pavimento. Denomina-se Solo Melhorado com Cal, quando se busca somente melhorar algumas propriedades dos solos consideradas prejudiciais, que, em se tratando de pavimentação, são a expansibilidade, a umidade excessiva e a plasticidade elevada. Quando a necessidade é basicamente estrutural, a exemplo do uso em bases de pavimento ou em revestimento de taludes, denomina-se a mistura como Solo Estabilizado com Cal. Após a compactação e cura, a camada assim estabilizada suporta as cargas geradas pelo trânsito (AZEVEDO, 2010).

A restrição feita às camadas asfálticas se deve porque, nesse caso, não há o solo, e então o uso da cal passa a ser apenas um melhorador de adesividade ou um produto extremamente fino para corrigir a granulometria da mistura asfáltica (AZEVEDO, 2010).

A adição de cal a um solo provoca mudanças em várias de suas propriedades, verificando-se, geralmente, um aumento na sua resistência, uma redução de sua plasticidade e uma melhoria em sua trabalhabilidade (CARVALHO, 1988).

Segundo Guimarães (2002), adicionando-se cal a qualquer tipo de solo, desde que o mesmo contenha minerais argilosos em qualquer proporção, ocorrerão as seguintes

reações em presença de um teor adequado de umidade: troca de íons e floculação, reações cimentantes pozolânicas e carbonatação.

As trocas de íons e a floculação, que são interdependentes, ocorrem imediatamente após a mistura, causando uma diminuição na plasticidade do solo, pelo aumento do limite de plasticidade e/ou diminuição do limite de liquidez. A contração e a expansão do solo diminuem, fazendo com que o solo apresente-se mais estável face às variações da umidade (GUIMARÃES, 2002).

Quimicamente, ocorre uma troca de bases, e os cátions derivados da cal, de carga mais forte, substituem íons de carga mais fraca, como os de sódio, magnésio e hidrogênio, existentes na superfície das partículas de argila. Como podem já existir cátions de cálcio na superfície da partícula argilosa, devido à sua formação geológica, ocorrerá uma preponderância destes. A ligação entre duas partículas de argila depende da carga e tamanho dos íons na interface, e então irá ocorrer uma atração de maior magnitude e, portanto, uma floculação das partículas (MITCHELL; HOOPER, 1961).

Desta forma, haverá um agrupamento destas partículas devido ao aumento desta atração entre elas, resultante da concentração de cátions de cálcio, e então se pode considerar que o efeito físico desta floculação entre partículas de argila e cal seja semelhante a um aumento do diâmetro das partículas, com o consequente acréscimo de resistência por atrito entre as mesmas (AZEVEDO et al., 1998).

A cimentação pozolânica, por sua vez, deve-se à reação química entre a cal, a água e os assim chamados elementos pozolânicos do solo, dando origem a compostos de silicatos e aluminatos de cálcio hidratados, semelhantes ao produto obtido pela hidratação do cimento *Portland* no concreto e no solo-cimento (AZEVEDO et al., 1998).

Este efeito cimentante gera um aumento da capacidade de suporte do solo, medido, por exemplo, pelo Índice de Suporte Califórnia (ISC) ou pela resistência à compressão não confinada, pois os conjuntos de partículas do solo, floculados após o contato com a cal, têm tendência a formar os compostos já citados, ao longo do tempo (AZEVEDO, 2010). Ainda segundo esse autor, outro efeito importante causado pela cimentação pozolânica é

o aumento da resistência contra a ação da água, seja esta gerada por gravidade (resultante de chuvas) ou por capilaridade (infiltração a partir das camadas subjacentes do solo), pois o solo, estando mais coeso, sofrerá menos o efeito erosivo da água. Apenas deve-se considerar que solo-cal não é um solo impermeável, mas sim um solo que sofre menos com o efeito erosivo da água, pois a passagem dela por entre os poros do solo, após a ocorrência deste fenômeno, se dá de forma lenta.

Outra reação que pode ocorrer durante a estabilização de um solo com a adição da cal é a carbonatação. De acordo com Guimarães (2002), esta reação apresenta origem diferente das anteriores. Contudo, também tem características de ação imediata e é de alta importância para a ocorrência ou não dos objetivos da estabilização. A carbonatação é uma reação entre a cal e o dióxido de carbono do ar, formando um agente cimentante, relativamente frágil, de carbonato de cálcio e magnésio. Esta reação química pode prejudicar a reação pozolânica e então deve ser diminuída ao máximo possível pela proteção adequada (imprimação da camada, por exemplo) da camada estabilizada. O resultado dessa reação fragiliza a mistura solo-cal, porque retira cátions de cálcio da superfície das partículas de argila floculadas, para gerar a reação com o dióxido de carbono do ar, formando um composto muito menos resistente que os compostos de silicatos e aluminatos gerados pela cimentação pozolânica (CARVALHO, 1988).

É importante salientar que o efeito desta reação não foi considerado neste estudo, pois os corpos de prova não ficaram em contato com o ar ambiente por tempo considerável para que estas reações ocorressem, visto que eles foram moldados e embalados em papel filme para não perder umidade e acondicionados numa câmara úmida.

3.3 – Materiais e métodos

3.3.1 – Materiais

3.3.1.1 – Solos

As amostras deformadas de solos utilizadas neste trabalho foram provenientes das jazidas de empréstimos denominadas “Nô da Silva”, de coordenadas geográficas de posição 20°46’46,23” de latitude Sul e 42°49’12,68” de longitude Oeste de *Greenwich*,

e “Gomide”, de coordenadas 20°47’29,35” de latitude Sul e 42°49’19,23” de longitude Oeste de Greenwich, localizadas na zona rural do município de Cajuri– MG, microrregião de Viçosa, Zona da Mata de Minas Gerais.

Ambos os solos têm comportamento não laterítico, segundo o sistema de classificação adotado na Metodologia MCT (NOGAMI; VILLIBOR, 1995), conforme capítulo anterior. A amostra proveniente da jazida “Nô da Silva”, classificação A-2-7(0) segundo o sistema adotado pelo *Transportation Research Board* (TRB), apresenta uma textura de areia argilo-siltosa com presença de pedregulho, conforme capítulo anterior. A segunda amostra, proveniente da jazida “Gomide”, é classificada como A-2-6(0) e também apresenta uma textura de areia argilo-siltosa com presença de pedregulho, conforme capítulo anterior.

A escolha desses materiais se deveu aos volumes significativos de suas ocorrências na Zona da Mata de Minas Gerais. As amostras foram coletadas no campo, acondicionadas em embalagens plásticas Figura 4 e destinadas ao Laboratório de Engenharia Civil da Universidade Federal de Viçosa (LEC/UFV), para destorroamento, secagem ao ar e armazenamento em tambores para posterior utilização.



Figura 4–Coleta das amostras.
Fonte: O autor, 2017.

3.3.1.2 – Lama de cal

O Brasil apresenta destacado lugar na produção mundial de papel e celulose e com potencial ainda maior de desenvolvimento nessa área, com crescimento médio anual de 7,1%. Por consequência, é gerada uma grande quantidade de resíduo, aproximadamente 13,4 milhões de toneladas, dentre eles o de lama de cal (IBÁ, 2015).

A indústria da celulose brasileira gera em média 283 mil toneladas de resíduo de lama de cal (SIQUEIRA, 2013).

O resíduo industrial lama de cal, gerado no processo de produção de celulose, foi coletado no pátio da empresa CENIBRA, na unidade de Ipatinga-MG. Esse resíduo sólido, friável, de granulometria fina e de coloração acinzentada é classificado pela NBR10004 (ABNT, 1987) como resíduo classe II, ou seja, trata-se de um material não inerte. Após a coleta, o material foi submetido ao Laboratório de Engenharia Civil (LEC/UFV) e estocado em tambores plásticos que foram hermeticamente vedados, evitando, assim, a exposição do resíduo às intempéries, para posterior utilização nos ensaios geotécnicos.



Figura 5–Resíduo lama de cal.

Fonte: O autor, 2017.

Tabela 6– Características químicas da lama de cal (peso seco)

Componentes	%
CaO	95,522
SiO ₂	2,825
SO ₃	1,013
SrO	0,616
CuO	0,024

Esse resíduo, de acordo com a caracterização química realizada no Laboratório de Solos do Departamento de Solos da Universidade Federal de Viçosa, segundo a metodologia da Embrapa (2011), apresenta, em sua composição química (Tabela 6), 97,06% de

cálcio, dos quais 95,52% se encontram na forma de óxido de cálcio (CaO), que é um componente de significativo interesse para o sucesso dos processos de estabilização de solos.

3.3.2 – Métodos

3.3.2.1 – Ensaio de caracterização geotécnica

Os ensaios geotécnicos para a caracterização tradicional das amostras de solos analisadas foram os que seguem: granulometria conjunta, segundo a NBR 7181 (ABNT, 1984a), limites de Atterberg, segundo a NBR 6459 (ABNT, 1984b) e a NBR 7180 (ABNT, 1984c), massa específica dos grãos do solo, segundo a NBR 6508 (ABNT, 1984d), e equivalente de areia, conforme o método de ensaio ME 054 (DNER, 1997).

3.3.2.2 – Dosagens da mistura solo-lama de cal e períodos de cura

As dosagens preliminares de lama de cal utilizadas nos estudos de laboratório, em relação à massa seca da mistura solo-lama cal, foram de 2%, 5% e 10%, as quais foram escolhidas com base nas experiências de estabilização química de solos da microrregião de Viçosa-MG e nos estudos de Lovato (2004), Pereira (2005) e Araújo (2009). Os períodos de cura foram definidos em 1 dia, 3 dias, 14 dias e 28 dias.

3.3.2.3 – Ensaio de compactação e índice de suporte Califórnia (ISC ou CBR)

Os ensaios de compactação foram realizados nas energias dos ensaios Proctor Intermediário e Modificado, segundo a metodologia descrita na norma NBR 7182 (ABNT, 1986), para fins de determinação do peso específico aparente seco máximo ($\gamma_{dm\acute{a}x}$) e da umidade ótima ($w_{ót}$) em solos no estado natural e para as misturas solo-lama de cal. Definidos os parâmetros ótimos de compactação, determinaram-se os valores dos parâmetros índice CBR e expansão CBR das amostras de solo analisadas e das amostras de misturas solo-lama de cal, de acordo com a norma ME 049 (DNER, 1994).

3.3.2.4 - Normas para a utilização de materiais terrosos a serem empregados em camadas de pavimentos rodoviários flexíveis

Para serem empregados corretamente em camadas de base e sub-base de pavimentos flexíveis, os solos precisam estar de acordo com as normas contidas em DNIT (2006). A seguir, as exigências das normas citadas anteriormente:

- Materiais para base devem apresentar:
 - ✓ $\text{CBR} \geq 60\%$ para $N < 5 \times 10^6$
 - ✓ $\text{CBR} \geq 80\%$ para $N > 5 \times 10^6$
 - ✓ Expansão $\leq 0,5\%$ (medida com sobrecarga de 10 lb.),
 - ✓ Limite de liquidez (LL) $\leq 25\%$
 - ✓ Índice de plasticidade (IP) $\leq 6\%$, sendo que, se o equivalente de areia for superior a 30%, o LL e o IP não precisam satisfazer as condições.

- Materiais para sub-base devem apresentar:
 - ✓ $\text{CBR} \geq 20\%$,
 - ✓ $\text{IG} = 0$
 - ✓ Expansão $\leq 1\%$ (medida com sobrecarga de 10 lb.).

3.3.2.5 – Ensaios de resistência à compressão não confinada

Neste trabalho, a resistência à compressão não confinada das amostras de solos naturais e das misturas solo-lama de cal foi determinada conforme o regulamentado pela norma NBR 12025 (ABNT, 1990). Na moldagem dos corpos-de-prova, foi utilizado um molde cilíndrico bipartido (Figura 6), com 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura, obedecendo-se à relação de 2:1.

A moldagem foi realizada manualmente, em 10 camadas, na energia Proctor Intermediária, sendo aplicados 12 golpes por camada, e na energia Proctor Modificada, sendo aplicados 24 golpes por camada. Depois de compactados, os corpos de prova foram retirados do molde cilíndrico, pesados e medidos com uma precisão de 0,01 g e 0,01 cm, respectivamente. Foram aceitos os corpos de prova com $20,0 \pm 0,2$ cm de altura e $10,0 \pm 0,2$ cm de diâmetro. Em seguida, as amostras compactadas, identificadas e deixadas em cura, à temperatura ambiente, por 1, 3, 14 e 28 dias (Figuras 7 e 8).

As amostras foram moldadas em triplicata e o valor da resistência à compressão não confinada foi determinado através do valor da média aritmética dos 3 resultados obtidos, sendo admitidos os valores de tensão de ruptura de $\pm 10\%$ da média. Para as misturas solo-lama de cal, essa determinação foi feita para cada teor de lama de cal

especificado e para cada período de cura analisado. Ressalta-se que essas misturas foram moldadas com a utilização de lama de cal em pó.



Figura 6—Molde cilíndrico bipartido utilizado no ensaio de resistência à compressão não confinada.



Figura 7—Moldagem dos corpos de prova.



Figura 8—Armazenamento dos corpos de prova na câmara úmida.

Nesses ensaios, os corpos de prova de solo e de misturas solo-lama de cal foram ensaiados em uma prensa de compressão não confinada automática (Figura 9), utilizando-se um modo de deformação controlada com velocidade de 1,25 mm/min.



Figura 9–Detalhe do ensaio de resistência à compressão não confinada.

3.4 – Resultados e discussão

3.4.1 – Ensaio de caracterização geotécnica, de compactação e de índice de suporte Califórnia (ISC ou CBR)

Os resultados dos ensaios de caracterização geotécnica foram apresentados no Capítulo 2 dessa pesquisa. A Tabela 7 apresenta os resultados do ensaio de equivalente de areia para as amostras de solo das jazidas Nô da Silva e Gomide.

Tabela 7 – Resultados do ensaio de equivalente de areia

Ensaio de Equivalente de Areia				
Amostras	Primeira repetição (%)	Segunda repetição (%)	Terceira repetição (%)	Média Final (%)
Nô da Silva	43,00	32,00	34,00	33,00
Gomide	34,0	27,00	38,00	36,00

De acordo com os procedimentos técnicos contidos em DNIT (2006), para sub-bases e bases de pavimentos flexíveis, os valores de LL precisam ser inferiores ou iguais a 25% e o IP inferior ou igual a 6%. Quando esses limites forem ultrapassados, o equivalente de areia deverá ser maior que 30%. A partir desses dados, apesar dos valores de LL e IP estarem acima do valor recomendado, esses solos podem ser utilizados em obras rodoviárias, visto que apresentam valores médios de equivalente de areia superiores a 30%.

As curvas de compactação, para a energia Proctor Intermediária, obtidas para as amostras de solo da jazida Nô da Silva e das misturas solo-lama de cal para este solo são

apresentadas na Figura 10. Os respectivos valores de peso específico aparente seco máximo e umidade ótima estão apresentados na Tabela 8.

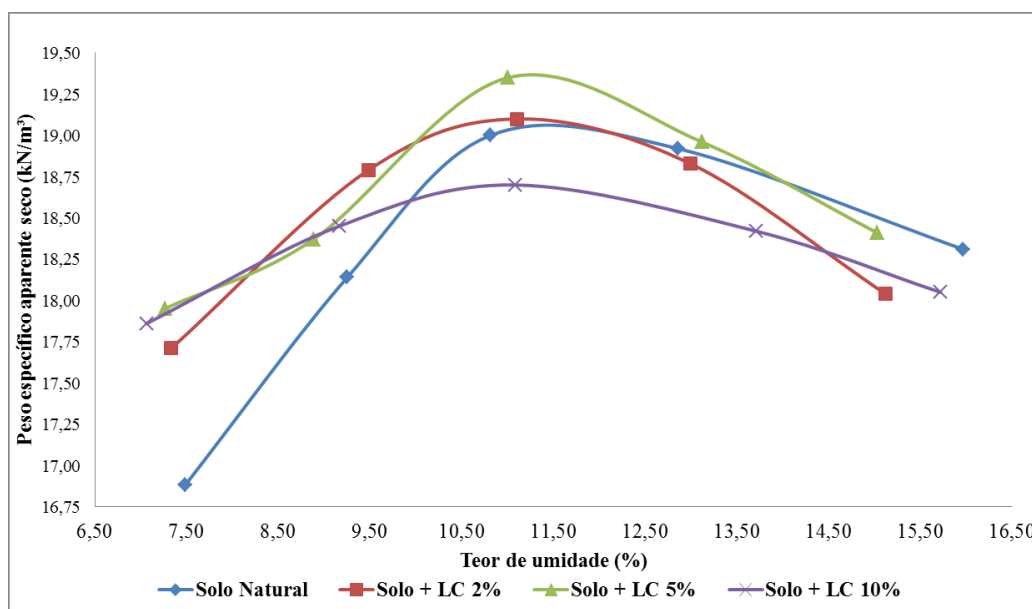


Figura 10—Resultados das curvas de compactação na energia Proctor Intermediária para a amostra de solo da jazida Nô da Silva e as misturas solo-lama de cal para este solo.

Tabela 8 – Parâmetros de compactação na Energia Proctor Intermediária: umidade ótima e peso específico aparente seco máximo

Nô da Silva	wót (%)	$\gamma_{dm\acute{a}x}$ (kN/m ³)
Solo Natural	11,60	19,15
Solo + LC 2%	11,10	19,10
Solo + LC 5%	11,00	19,35
Solo + LC 10%	11,10	18,70

Para a amostra de solo da jazida Nô da Silva, os valores de peso específico aparente seco máximo e umidade ótima, para a energia Proctor Intermediária, respectivamente são: $\gamma_{dm\acute{a}x} = 19,15\text{kN/m}^3$ e $w_{\acute{o}t} = 11,60\%$. Os melhores resultados de mistura solo-lama de cal foram obtidos com a mistura de 5% de lama de cal em relação ao peso seco da mistura.

As curvas de compactação obtidas para a amostra de solo da jazida Nô da Silva e as misturas solo-lama de cal, para energia Proctor Modificada são apresentadas na Figura

11. Os correspondentes valores de peso específico aparente seco máximo e umidade ótima, estão apresentados na Tabela 9.

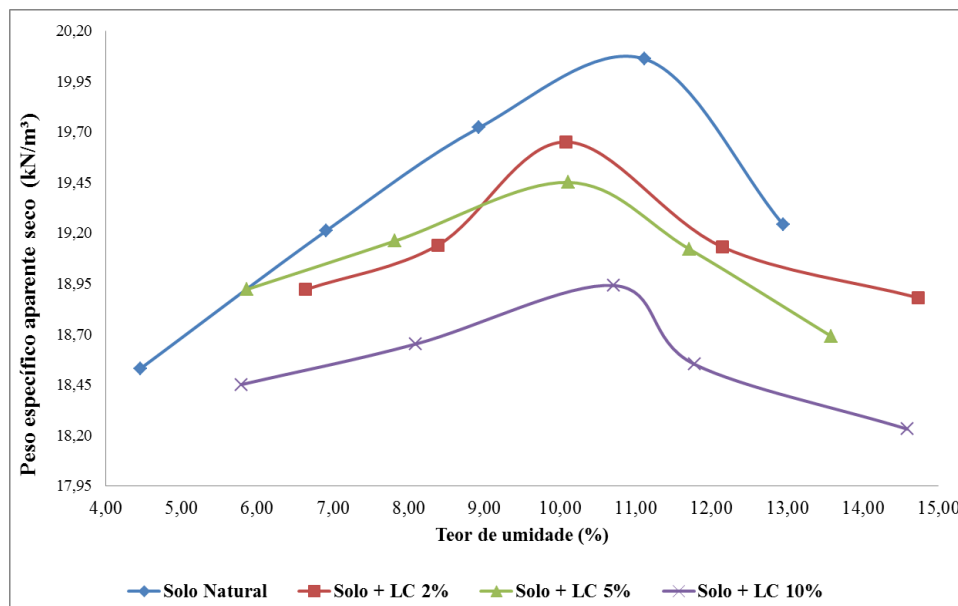


Figura 11—Resultados das curvas de compactação na energia Proctor Modificada para a amostra de solo da jazida Nô da Silva e as misturas solo-lama de cal para este solo.

Tabela 9 – Parâmetros de compactação na Energia Proctor Modificada: umidade ótima e peso específico aparente seco máximo

Nô da Silva	w _{ót} (%)	$\gamma_{dm\acute{a}x}$ (kN/m ³)
Solo Natural	10,60	20,15
Solo + LC 2%	10,08	19,65
Solo + LC 5%	10,15	19,45
Solo + LC 10%	10,50	18,95

Para a amostra de solo da jazida Nô da Silva, os valores de peso específico aparente seco máximo e umidade ótima, para a energia Proctor Modificada, respectivamente são: $\gamma_{dm\acute{a}x} = 20,15\text{kN/m}^3$ e $w_{\acute{o}t} = 10,60\%$. Em todas as misturas houve redução no $\gamma_{d\acute{m}\acute{a}x}$.

As curvas de compactação, obtidas para a amostra de solo da jazida Gomide e as misturas solo-lama de cal, para a energia Proctor Intermediária, são apresentadas na Figura 12. Os valores de peso específico aparente seco máximo e umidade ótima, estão apresentados na Tabela 10.

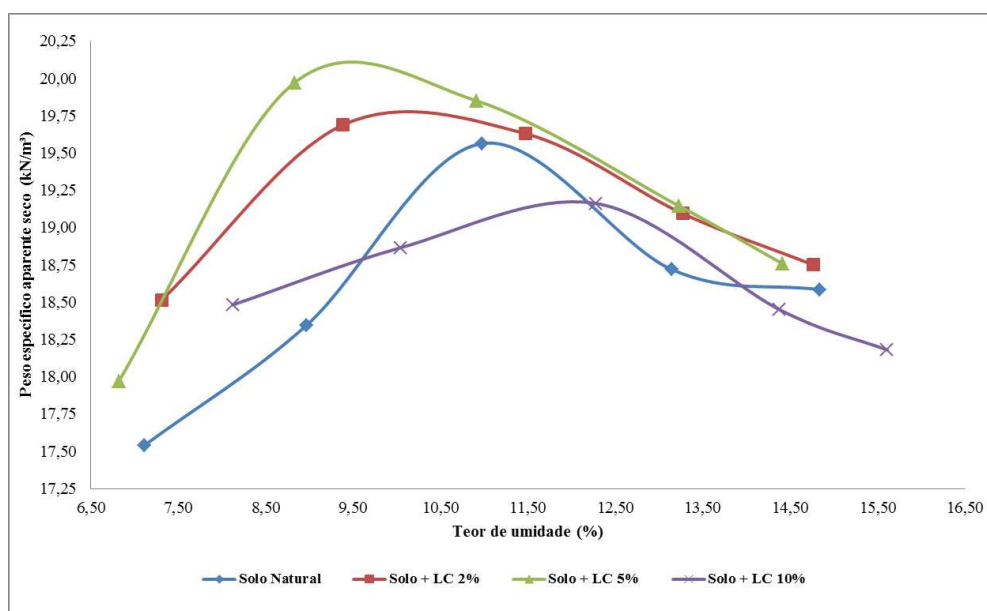


Figura 12—Resultados das curvas de compactação na energia Proctor Intermediária para a amostra de solo da jazida Gomide e as misturas solo-lama de cal para este solo.

Tabela 10 – Parâmetros de compactação Energia Proctor Intermediária: umidade ótima e peso específico aparente seco máximo

Gomide	w _{ót} (%)	γ _{dmáx} (kN/m ³)
Solo Natural	11,60	19,60
Solo + LC 2%	10,20	19,79
Solo + LC 5%	9,50	20,15
Solo + LC 10%	12,00	19,20

Para a amostra de solo da jazida Gomide, os valores de peso específico aparente seco máximo e umidade ótima, para a energia Proctor Intermediária, respectivamente são: $\gamma_{dmáx} = 19,60 \text{ kN/m}^3$ e $w_{ót} = 11,60\%$. Os melhores resultados de mistura solo-lama de cal foram obtidos com a mistura de 5% de lama de cal em relação ao peso seco da mistura.

As curvas obtidas para a amostra de solo da jazida Gomide e as misturas solo-lama de cal, para a energia Proctor Modificada, são apresentadas na Figura 13. Os valores de peso específico aparente seco máximo e umidade ótima, estão apresentados na Tabela 11.

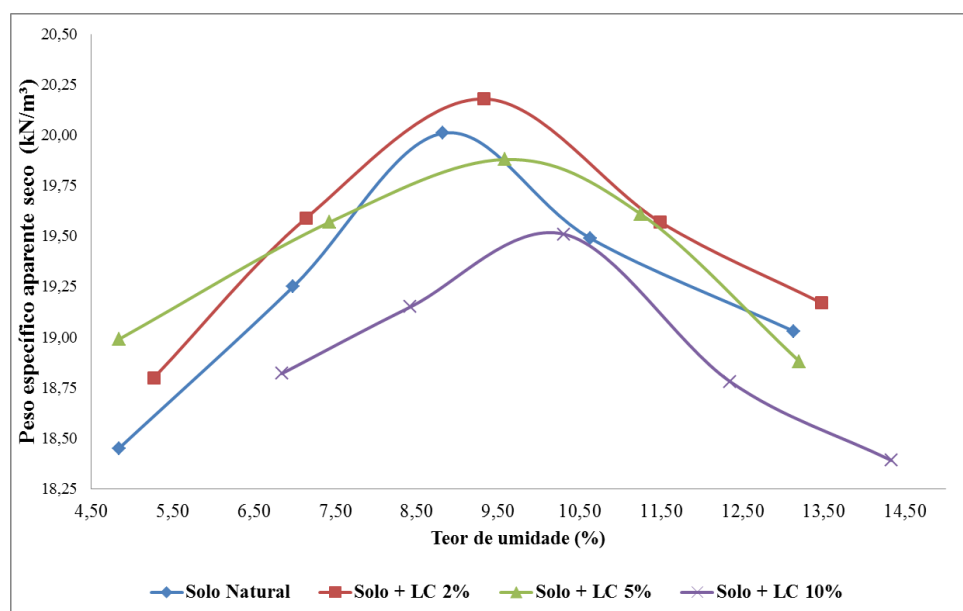


Figura 13—Resultados das curvas de compactação na energia Proctor Modificada para a amostra de solo da jazida Gomide e as misturas solo-lama de cal para este solo.

Tabela 11 – Parâmetros de compactação Energia Proctor Modificada: umidade ótima e peso específico aparente seco máximo

Gomide	wót (%)	$\gamma_{dm\acute{a}x}(kN/m^3)$
Solo Natural	8,85	20,00
Solo + LC 2%	9,25	20,20
Solo + LC 5%	9,65	19,9
Solo + LC 10%	10,31	19,51

Para a amostra de solo da jazida Gomide, os valores de peso específico aparente seco máximo e umidade ótima, para a energia Proctor Modificada, respectivamente são: $\gamma_{dm\acute{a}x} = 20,00kN/m^3$ e $w\acute{o}t = 8,85\%$. Os melhores resultados de mistura solo-lama de cal foram obtidos com a mistura de 2% de lama de cal em relação ao peso seco da mistura.

A despeito das alterações nos parâmetros de ótimo identificadas nas misturas solo-lama de cal comparativamente aos solos não estabilizados, verificou-se que o melhor resultado apresenta na mistura solo-lama de cal com 5% de lama de cal em relação ao peso seco da mistura, apresentou melhores resultados em relação a teor de umidade ótimo e peso específico aparente seco máximo, assim adotou-se para a sequência da pesquisa a mistura solo-lama de cal 5%.

As Tabelas 12 e 13 introduzem, respectivamente, os resultados dos ensaios de compactação para os solos naturais, misturas solo-lama de cal 5% e CBR das referidas amostras de solo natural (SN) e misturas com 5% de lama de cal (LC), nas energias Proctor intermediária e modificada.

Tabela 12 – Parâmetros de compactação: umidade ótima e peso específico aparente seco máximo

Amostras	Proctor Intermediária		Proctor Modificada	
	wót (%)	$\gamma_{dm\acute{a}x}(kN/m^3)$	wót (%)	$\gamma_{dm\acute{a}x}(kN/m^3)$
Nô da Silva	11,60	19,15	10,60	20,15
Nô da Silva + LC5%	11,00	19,35	10,15	19,45
Gomide	11,00	19,60	8,85	20,05
Gomide + LC5%	9,50	20,15	9,65	19,51

Tabela 13 – CBR e Expansão CBR das amostras analisadas: jazida Nô da Silva

Nô da Silva	Proctor Intermediária		Proctor Modificada	
	CBR (%)	Expansão CBR (%)	CBR (%)	Expansão CBR (%)
Solo Natural	37	0,14	85	0,07
SN+LC5%	45	0,10	95	0,10

Tabela 14 – CBR e Expansão CBR das amostras analisadas: jazida Gomide

Gomide	Proctor Intermediária		Proctor Modificada	
	CBR (%)	Expansão CBR (%)	CBR (%)	Expansão CBR (%)
Solo Natural	56	0,16	94	0,28
SN + LC5%	52	0,12	98	0,20

As amostras dos solos das jazidas Nô da Silva e Gomide (solo natural e mistura solo-lama de cal), ensaiadas na energia de compactação Proctor Intermediária, apresentaram os respectivos valores de CBR inferiores a 60%, portanto não atendendo às exigências técnicas para serem empregadas como camada de base em pavimentos rodoviários flexíveis.

Em relação ao emprego como camada de sub-base, com os valores de CBR e de Expansão-CBR apresentados, esses materiais, trabalhados em pelo menos 100% da energia de compactação Proctor Intermediária, poderão ser utilizados nessa camada, uma vez que atingiram um CBR superior a 20% (DNIT, 2006).

Na energia de compactação Proctor Modificada, as amostras de solo da jazida Nô da Silva e Gomide (solo natural e mistura solo-lama de cal) atenderam às exigências técnicas para serem empregadas como camadas de sub-base e base em pavimentos rodoviários flexíveis, uma vez que os seus valores de CBR foram superiores a 80%. Os seus valores de Expansão-CBR também atendem à exigência da Norma, por ser inferior a 0,5% (DNIT, 2006).

Esses materiais poderão ser empregados também para tráfego que, durante o período de projeto, ultrapassar o valor de $N = 5 \times 10^6$ passagens do eixo padrão de 8,2 toneladas.

3.4.2 – Ensaio de resistência à compressão simples não confinada

Foram realizados ensaios de resistência à compressão não confinada (RCNC) em corpos de prova das amostras de solos naturais e de solos estabilizados quimicamente pela lama de cal, em teores pré-determinados de 5% da lama de cal em relação ao peso seco da mistura, visto que esse teor de mistura foi o que apresentou melhores resultados para o teor de umidade ótimo e peso específico aparente seco máximo para as misturas com os dois solos estudados, na energia Proctor Intermediária. Na Tabela 15 e na Figura 14, são apresentados, para corpos de prova moldados na energia Proctor Intermediária, os resultados dos ensaios de RCNC feitos com amostras de solo natural da jazida Nô da Silva e após adição de 5% de lama de cal, considerando-se os tempos de cura de 1, 3, 14 e 28 dias para a ruptura.

Tabela 15 – Resultados dos ensaios de resistência à compressão não confinada (RCNC) para a energia Proctor Intermediária: solo da jazida Nô da Silva

Amostra/Período de cura	Resistência à compressão não confinada (kPa)
Nô da Silva	202,1
Nô da Silva + 5% Lama de Cal/1 dia	178,1
Nô da Silva + 5% Lama de Cal/3 dias	211,1
Nô da Silva + 5% Lama de Cal /14 dias	240,5
Nô da Silva + 5% Lama de Cal/28 dias	304,0

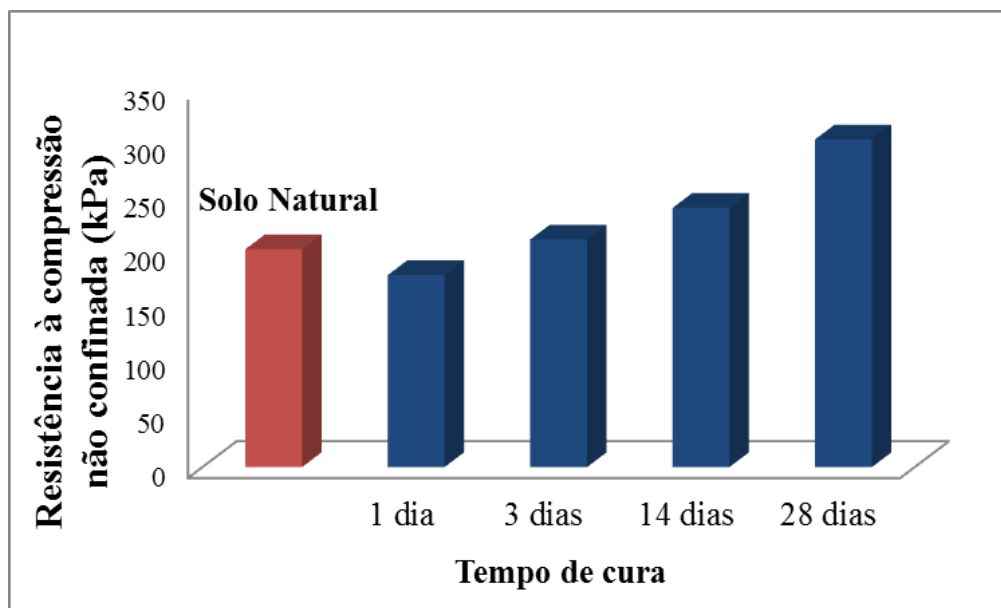


Figura 14—Evolução da resistência à compressão não confinada com o tempo de cura : solo da jazida Nô da Silva, no estado natural e estabilizados com 5% de lama de cal.

Na Tabela 16 e na Figura 15, para corpos de prova moldados na energia Proctor Intermediária, são apresentados os resultados dos ensaios de RCNC feitos com amostras de solo natural da jazida Gomide e após adição de 5% de lama de cal, considerando-se os tempos de cura de 1, 3, 14 e 28 dias para a ruptura.

Tabela 16 – Resultados dos ensaios de resistência à compressão não confinada (RCNC) para a energia Proctor Intermediária:solo da jazida Gomide

Amostra/Período de cura	Resistência à compressão não confinada (kPa)
Gomide	261,5
Gomide + 5% Lama de Cal/1 dia	234,5
Gomide + 5% Lama de Cal/3 dias	275,7
Gomide + 5% Lama de Cal /14 dias	303,6
Gomide + 5% Lama de Cal/28 dias	451,4

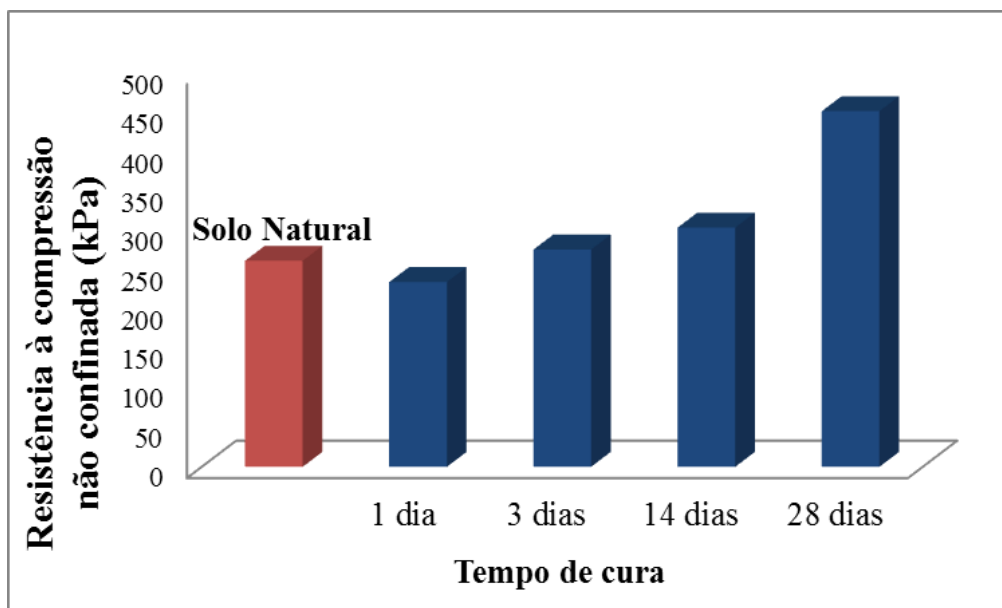


Figura 15–Evolução da resistência à compressão não confinada com o tempo de cura: solo da jazida Gomide, no estado natural e estabilizados com 5% de lama de cal.

A partir dos resultados apresentados nas Tabelas 15 e 16 e nas Figura14 e 15, nota-se que:

- a) A perda de resistência à compressão não confinada dos corpos de prova ensaiados após 1 dia da moldagem foi de aproximadamente 12% para ambos solos, resultado semelhante ao observado por AZEVÊDO (2010);
- b) Com base nos resultados de RCNC apresentados nas Tabelas 15 e 16, observou-se que as amostras de solo tratadas com a lama de cal apresentaram, de um modo geral, ganhos de resistência com o aumento do período de cura. Destaca-se o ganho de resistência em torno de 50% para o solo da Jazida Nô da Silva e 73% para o solo da jazida Gomide, verificado no período de 28 dias de cura. Esses ganhos de resistência são esperados e também foram observados por Araújo (2009) em pesquisas solo-cal, nas quais as amostras tratadas com 5% de cal apresentaram incrementos nos valores de RCNC para as misturas ensaiadas até 28 dias após a moldagem dos corpos de prova;
- c) Contudo, verifica-se que as misturas alcançaram o maior valor de resistência aos 28 dias dentre os períodos de cura analisados de cura Jazida Nô da Silva (304,0 kPa) e Jazida Gomide (451,4 kPa). O comportamento apresentado por essas misturas permitiu supor que as reações pozolânicas foram iniciadas para as

mesmas entre o período de 1 a 28 dias, uma vez que a resistência teve um aumento gradual até o rompimento aos 28 dias. Segundo Azevêdo (2010), a cimentação resultante das reações pozolânicas é um processo progressivo e lento que leva meses (ou até anos) para se concluir.

3.5 – Conclusões

As seguintes conclusões podem ser extraídas do presente artigo: (i) o resíduo lama de cal alterou as propriedades mecânicas das amostras dos solos em estudo, mostrando o potencial para a estabilização de solos, principalmente no teor de lama de cal estudado de 5% em relação à massa seca da mistura; (ii) as melhores respostas mecânicas foram obtidas nas misturas das amostras da jazida Gomide, uma vez que o ganho de resistência à compressão não confinada foi de, aproximadamente, 73% aos 28 dias de cura em relação à amostra desse solo na condição natural, não estabilizada, considerando-se a energia do Proctor Intermediário.

Apesar de o DNIT impor restrições ao uso dos solos estudados para camadas de sub-base e base de pavimentos flexíveis, acredita-se que seja viável a utilização de adições de lama de cal em camadas de pavimentação para estes solos, principalmente devido ao aumento da resistência das misturas ao longo do tempo.

A Especificação Técnica do DER de São Paulo com código ET-DE-P00/005. Esta norma visa definir critérios que orientam a execução, aceitação e medição do serviço de sub-base ou base solo cal para obras rodoviárias no estado de SP. E uma das exigências é que o solo empregado seja do grupo LG' da Classificação MCT, os solos estudados nessa pesquisa são do grupo NA' da Classificação MCT, porém mesmo não atendendo a exigência do DER de São Paulo acredita-se que seja viável a utilização desses solos, uma vez que verificou-se que tanto os solos no estado natural e estabilizados quimicamente com o resíduo lama de cal atenderam as demais exigências da referida especificação técnica. O valor máximo atingido para a amostra da jazida Nô da Silva foi de 304,0 kPa e para a amostra da jazida Gomide foi de 451,4 kPa, ambas com 5% de lama de cal.

Os solos, ensaiados na energia Proctor Intermediária nas condições natural e estabilizada pela lama de cal, não se adéquam ao uso para a utilização como material de base de pavimentos flexíveis, visto que apresentaram $ISC < 60\%$. Sendo assim, não podem ser utilizados como camada de base em pavimentos rodoviários flexíveis na energia ensaiada. Os mesmos materiais, ensaiados na energia Proctor Modificada, atenderam às exigências técnicas para ser empregados como material de base de pavimentos rodoviários flexíveis. Apesar dos limites de consistência serem superiores aos exigidos, o equivalente de areia foi superior a 30%. Para a camada de sub-base, os solos, ensaiados nas duas energias de compactação, atenderam a todas as exigências técnicas presentes em DNIT (2006).

3.6 – Agradecimentos

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de pesquisa ao primeiro autor, e à Universidade Federal de Viçosa (UFV), através do Departamento de Engenharia Civil, pelo Suporte na coleta das amostras deformadas de solos e nos ensaios geotécnicos de laboratório.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMARAL, M.C. **Avaliação dos efeitos da incorporação de resíduo lama de cal nas propriedades e microestrutura de uma mistura solo-cimento**. 2016. 100f. Tese (Doutorado em Engenharia e Ciências dos Materiais) – Universidade Estadual do Norte Fluminense, Rio de Janeiro. 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND – ABCP. **Dosagem das Misturas de Solo-Cimento**; Normas de Dosagem. 3ª. ed. rev. atual. São Paulo, 51p. 1986.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS-ABNT. **NBR 7207/82**: Terminologia e classificação de Pavimentação. Rio de Janeiro, 1982.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT.**NBR 7181/84**:análise granulométrica, solos, método de ensaio. Rio de Janeiro,1984a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 6459/84**: solo: determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 1984b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 7180/84**: solo, determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 1984c.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 6508/84**: Solo, determinação da massa específica aparente. Rio de Janeiro, 1984d.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS –ABNT. **NBR 7182/86**. Ensaio de Compactação – Procedimento. Rio de Janeiro, 1986.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS-ABNT. **NBR-10004/87**: Classificação de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS –ABNT. **NBR 12025/90**. Solo-cimento: Ensaio de Compressão Simples de Corpos de Prova Cilíndricos. Rio de Janeiro, 1990.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS –ABNT. **NBR 6502/95**. Rochas e Solos: Terminologia. Rio de Janeiro, 1995.

ARAÚJO, A.F. **Avaliação de misturas de solos estabilizados com cal, em pó e em pasta, para aplicação em rodovias do estado do Ceará**. 2009. 175f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes), Centro de Tecnologia -Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Ceará.2009.

AZEVEDO, A. L. C., OLIVEIRA, A. JR., PEDROSA, R. A. e RAMALHO, R. W. **Estabilização de solos com adição de cal**. Dissertação de pós graduação. IPC/PUC. 78p. Belo Horizonte, 1998.

AZEVÊDO, A.L.C. **Estabilização de solos com adição de cal: um estudo a respeito da reversibilidade das reações que acontecem após a adição de cal**. Dissertação

(Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 114p. 2010.

BARROSO, S. H. A.; SANTOS, R. M. **Estudo de Misturas de Solo-Cal dos Solos da Região Metropolitana de Fortaleza para Aplicação na Engenharia Rodoviária.** In: XIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica. Curitiba, Paraná. 2006.

BEJA, I.A. **Utilização de material fresado para aplicação em camadas estabilizadas de base e sub-bases de pavimentos rodoviários.** 2011. 129f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande. 2011.

BERNUCCI, L. B; MOTTA, L. M. G; CERATI, J. A. P; SOARES, J. B. **Pavimentação asfáltica.** Rio de Janeiro, 2007.

CARVALHO, J.B.Q. **Propriedade e Comportamento de Solos Lateríticos Estabilizados com Cal.** 1988. 689-706f. 22ª Reunião Anual de Pavimentação, ABVp, Florianópolis, SC, 1988.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM DE SÃO PAULO. DER/SP ET-DE-P00/005: sub-base ou base de solo cal. São Paulo, 20p. 2006.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES DNIT. ME 049: solos: determinação do índice de suporte Califórnia utilizando amostras não trabalhadas. Rio de Janeiro: 12p.1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES DNIT. ME 054: Equivalente de areia. Rio de Janeiro: 10p.1997.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES - DNIT. **Manual de Pavimentação.** 3ª Ed. Rio de Janeiro: Instituto de Pesquisas Rodoviárias. 274 p. 2006.

EMBRAPA. **Manual de métodos de análise de solo. Centro Nacional de Pesquisa de Solos.** 2. ed. rev. atual. – Rio de Janeiro, 230p. 2011.

FRANÇA, F.C.; **Estabilização química de solos para fins rodoviários: estudo de caso com o produto “RBI GRADE 81”**.2010. 129f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Minas Gerais. 2010.

FERRAZ, R.L. **Contribuição ao estudo da estabilização de solos para fins rodoviários e habitacionais**. 1994. 174f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Minas Gerais. 1994.

GUIMARÃES, J. E. P. **Estabilização de Solos com Cal**. ABPC, São Paulo, SP, Boletim n° 5, 68p.1971.

GUIMARÃES, J. E. P. **A Cal – Fundamentos e Aplicações na Engenharia Civil**. 2ª ed. São Paulo: PINI. 2002.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES – IBÁ (2015). Relatório Anual. 64 p. Disponível em: http://iba.org/images/shared/iba_2015.pdf. Acesso em: 20 out. 2015.

INGLES, O.G; METCALF, J.B. *Soll Stabillization Principies and Practic.*, New York, E.U.A., Swikey e Sans, 374p. 1973.

INTERNATIONAL FOCUS GROUP ON RURAL ROAD ENGINEERING (2005).*Cement and Lime Stabilisation*.Net, fev.; 2005. Disponível em: http://www.ifgworld.org/browse/all_pdf_files.asp. Acesso em: 10 agosto. 2017.

JOHN, V.M. **Reciclagem de Resíduos na Construção Civil – Contribuição à Metodologia de Pesquisa e Desenvolvimento**. 2000. 102f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil)Escola Politécnica - Universidade de São Paulo, São Paulo.2000.

LIMA, D.C.; BUENO, B. S., FONTES, M.P.F.; **Estabilização de Solos II – Técnicas de Aplicação a Solos da Microrregião de Viçosa-MG**. Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais, 32p. 1993.

LOIOLA, P. R. R.; BARROSO, S. H. A. **Aplicação da Técnica de Solo Cal na Construção da Rodovia do Melão no Estado do Ceará.** Anais da 37ª Reunião Anual de Pavimentação. Goiânia, GO. 2007.

LOIOLA, P. R.R; NOBRE JÚNIOR, E. F. **Trecho Experimental Utilizando Mistura de Solo-Cal no Município de Limoeiro do Norte-Ceará.** In: VI ENCONTRO NACIONAL DE CONSERVAÇÃO RODOVIÁRIA. Brasília, Distrito Federal. 2001.

LOVATO, R.S. **Estudo do comportamento mecânico de um solo laterítico estabilizado com cal, aplicado à pavimentação.**2004. 164f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRS, Porto Alegre. 2004.

MITCHELL, J.K. e HOOPER, D.R. *Influence of time between mixing and compaction on properties of a lime stabilized expansive clays.* Highway Research Board, bulletin nº 304, p. 14-31. 1961.

NOGAMI, J. S.; VILLIBOR, D. F. **Pavimentação de baixo custo com soloslateríticos.**São Paulo: Villibor, 240p, 1995.

OLIVEIRA, E. **Emprego da cal na estabilização de solos finos de baixa resistência e alta expansão: estudo de caso no município de Ribeirão das Neves/MG.** 2010. 171f Tese (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Santa Catarina. 2010.

PEIXOTO, R. A. F.; OLIVEIRA, J. R.; PADULA, F. R. G.; MARTINS, C. J.; GOMES, V. ; OLIVEIRA, T. N. (2010). **Analysis for Application of Steel Slag in the Production of Concrete Block Paving.**In: 54th IFHP World Congress, Porto Alegre - RS. 54th IFHP. 2010.

PEREIRA, R.S. **Viabilidade técnica do emprego de resíduo da indústria de celulose para construção de estradas florestais.** 2005. 329f Tese (Doutorado em Ciência Florestal), Universidade Federal de Viçosa, 2005.

SILVAJUNIOR, W.S. **Estudo para a utilização de resíduo da fabricação de papel na construção rodoviária.** 2010. 210f. Dissertação (Mestrado em Ciências – Engenharia de Transportes) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

SIQUEIRA, F. B. (2013) **Avaliação da incorporação de resíduo grits nas propriedades e microestrutura de tijolo solo-cimento.** Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciências dos Materiais) - Campos dos Goytacazes-RJ, Universidade Estadual do Norte Fluminense-UENF, 121 p.

SENÇO, W. **Manual de Técnicas de Pavimentação.** 1ªed. São Paulo, v.1, p.746,1997.

TRINDADE, T. P.; CARVALHO, C. A. B.; LIMA, D. C.; BARBOSA, P. S. A.; SILVA, C. H. C.; MACHADO, C. C. **Compactação dos solos – Fundamentos teóricos e práticos.** Viçosa: Editora UFV, 95p. 2003.

4 – ESTUDO DO COMPORTAMENTO RESILIENTE DE DOIS SOLOS TROPICAIS DA MICRORREGIÃO DE VIÇOSA-MG

Resumo – Os pavimentos devem ser construídos a baixos custos e, ao mesmo tempo, apresentar também desempenho satisfatório quando submetidos às ações do tráfego e do clima. Sempre que possível, é preferível a utilização de materiais naturais disponíveis na região de entorno da obra, condicionada à viabilidade técnica, econômica e ambiental de sua aplicação. Neste artigo, é apresentada a importância do estudo das características resilientes de solos e de misturas estabilizadas quimicamente, justificado pela necessidade de conhecer o seu comportamento mecânico sob a ação de cargas repetidas e transientes, quando constituintes das camadas dos pavimentos flexíveis. Assim, buscou-se com este trabalho determinar o módulo de resiliência de dois solos arenosos comuns na região de Viçosa-MG, em seu estado natural e quando estabilizados com resíduo lama de cal. São apresentados os valores para os parâmetros dos modelos σ_3 (tensão confinante), σ_d (tensão desvio) e composto ($\sigma_3 - \sigma_d$), com seus respectivos R^2 . Os valores obtidos podem ser oportunos para estudos preliminares ou de ante-projeto, face à verificação dos seus resultados para dois solos da microrregião de Viçosa-MG. Neste estudo, são avaliados os efeitos da adição de 5% do resíduo lama de cal aos dois solos arenosos, ambos de comportamento não-laterítico (NA'), à luz dos valores do módulo de resiliência (MR), obtidos de ensaios triaxiais cíclicos para o tempo de cura de 28 dias. Concluiu-se que a adição do resíduo aumentou os valores dos módulos resilientes das misturas.

Palavras-Chave: Pavimentos flexíveis; ensaio triaxial de cargas repetidas; módulo de resiliência; resíduo lama de cal.

STUDY OF RESILIENT BEHAVIOR OF TWO TROPICAL SOILS OF MICRORREGIÃO DE VIÇOSA-MG

Abstract – Pavements should be built at a low costs and at the same time, also perform satisfactorily when subjected to traffic and climate actions. Whenever possible, it is preferable to use natural materials available in the region surrounding the site, subject to

the technical, economic and environmental feasibility of its application. In this paper, it is presented the importance of the study of the resilient characteristics of soils and chemically stabilized mixtures, justified by the need to know their mechanical behavior under the action of repeated and transient loads, when constituents of the layers of flexible pavements. Thus, the aim of this work was to determine the resilience modulus of two common sandy soils in the region of Viçosa-MG, in its natural state and when stabilized with lime mud residue. The values for the parameters σ_3 (confining tension), σ_d (voltage deviation) and compound ($\sigma_3 - \sigma_d$), with their respective R^2 , are presented. The obtained values may be opportune for preliminary or ante-project studies, due to the verification of their results for two soils of the Viçosa-MG microregion. In this study, the effects of the addition of 5% of the lime mud residue to the two sandy soils, both of non-laterite behavior (NA'), were evaluated in light of the values of the resilience modulus (MR) obtained from cyclic triaxial tests for the cure time of 28 days. It was concluded that the addition of the residue increased the values of the resilient modules of the mixtures.

Keywords: Flexible floors; triaxial test of repeated loads; modulus of resilience and lime sludge residue.

4.1 – Introdução

De acordo com Balbo (2007), a estrutura do pavimento é concebida, em seu sentido estrutural, para receber e transmitir esforços de maneira a aliviar tensões sobre as camadas inferiores.-Com o crescente aumento do volume de tráfego de veículos pesados nas estradas brasileiras, tanto em valores de carga por eixo como em número absoluto de veículos, faz-se necessário um conhecimento mais aprofundado das características dos materiais utilizados nas camadas estruturais dos pavimentos flexíveis. Seguindo a tendência de outros países mais desenvolvidos na área de pavimentação, as normas brasileiras já apontam para um método mais racional de dimensionamento de pavimentos. Neste sentido, buscaram-se parâmetros que tenham uma melhor representatividade do comportamento real do material no pavimento (BONZANINI, 2011).

Ensaio que medem a resistência estática dos materiais tendem a ser substituídos por ensaios cíclicos, pois estes têm melhor representatividade do comportamento do material em campo. Os primeiros medem a resistência dos materiais, ou seja, sua capacidade de resistir a uma força aplicada sobre eles. Já os ensaios cíclicos estão relacionados com a rigidez dos materiais, ou seja, à capacidade do material resistir à deformação (BONZANINI, 2011).

Levando-se em consideração que o tipo de solo é de grande significância na avaliação da reatividade solo-estabilizante, cresce o interesse em se desenvolver estudos de caráter regional para análise das propriedades dinâmicas de misturas estabilizadas quimicamente, particularmente em se considerando as aplicações no campo de pavimentos rodoviários. Os materiais que compõem os pavimentos rodoviários flexíveis estão submetidos a cargas dinâmicas e transientes, tornando indispensável que se proceda aos seus estudos em laboratório, também sob condições dinâmicas, tentando reproduzir, tanto quanto possível, as condições de campo (SANT'ANNA et al., 2000).

Os métodos para dimensionamento de pavimentos flexíveis, propostos por Motta e Medina (1991), pelo *Guide for Design of Pavements Structures* da AASHTO (1993) e pelo *Guide For Mechanistic – Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures* (NCHRP 1-37a, 2004), recomendam que os materiais das camadas do pavimento e subleito sejam caracterizados mecanicamente, considerando o módulo de resiliência (MR).

Como já divulgado no meio científico nacional, com destaque para os trabalhos de Motta (1991), Franco (2007) e Soares et al (2009), o método de dimensionamento de pavimentos asfálticos oficialmente adotado pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) não mais se adequa às características atuais das vias nacionais, apresentando restrições relevantes. Dentre elas, não levar em consideração o aumento significativo das solicitações de carga, volume e magnitude do tráfego, nem a inserção de parâmetros importantes que considerem fatores climáticos e novas possibilidades de materiais de pavimentação. Além dessas, não se considera a resposta estrutural por meio de análise de tensões e deformações nos pavimentos.

Franco (2007) reforça essa inadequação, quando reporta que há uma contínua evolução nas pesquisas em pavimentação, contudo, na prática, as técnicas utilizadas permanecem tradicionais.

Essa condição levou à necessidade de concepção de um novo método de dimensionamento de pavimentos asfálticos para o Brasil, o que culminou com a formação da Rede Temática de Asfalto (RTA). Esse método, financiado pela Petrobras, conta ainda com a participação de centros de pesquisas em pavimentação de universidades nacionais e cooperação do DNIT. Uma das primeiras ações da RTA foi promover o acompanhamento padronizado de trechos experimentais, concebidos em parceria com órgãos e concessionárias, e monitorados por universidades (REDE TEMÁTICA DE ASFALTO, 2012). O objetivo é coletar dados sistematizados de comportamento dos pavimentos nacionais, a principal lacuna para construção de um método de dimensionamento mais moderno. Assim, desde 2009, vêm sendo feitos levantamentos sistemáticos de dados de desempenho funcional e estrutural de pavimentos nacionais típicos nos vários trechos monitorados pela RTA no Brasil e a partir desses monitoramentos desenvolveu-se o método.

Além do mais, é possível observar, através de um programa computacional de elementos finitos, considerando-se as camadas do pavimento rodoviário flexível como sendo elásticas, que o módulo de resiliência (MR) de uma camada influencia na deformação de uma outra. Portanto, o módulo de resiliência dos materiais é importante para a análise estrutural dos pavimentos rodoviários (VIANA, 2007).

Outros trabalhos destacam a importância do módulo de resiliência como parâmetro para dimensionamento de um pavimento. Li *et al.* (2012) estudaram as estruturas dos pavimentos quanto às variações das propriedades dos materiais granulares (espessura da camada, módulo de resiliência, índice de plasticidade, limite de liquidez), constituintes de base e subleito. Os autores constataram que o módulo de resiliência da base e do subleito e a espessura da base são as propriedades que apresentam maior influência na previsão de desempenho em todos os critérios, independente do volume de tráfego.

A utilização de métodos mais modernos de dimensionamento, que fazem uso da resposta estrutural do pavimento, já possui um histórico na literatura nacional (MOTTA, 1991; FRANCO, 2007; SOARES *et al.*, 2009; MEDINA e MOTTA, 2015).

Takeda (2006), com base na análise e interpretação de mapas pedológicos, selecionou em seu estudo um total de 91 amostras de solos oriundas de subleitos de rodovias do interior paulista. Dentre suas inúmeras análises, o autor verificou que a influência da granulometria é predominante sobre o módulo de resiliência se comparada à influência da gênese. Observou-se ainda a relação do módulo de resiliência com determinadas propriedades físicas dos solos, a partir de possíveis correlações entre tais características e os parâmetros K_1 , K_2 e K_3 do modelo composto (MACEDO, 1996). As propriedades físicas dos solos selecionadas para a análise desta correlação foram: porcentagem do solo que passa na peneira n°200, porcentagem de silte, porcentagem de argila, limite de liquidez, limite de plasticidade, índice de plasticidade, teor ótimo de umidade e peso específico aparente seco máximo.

Rezende (2009) investigou em seu trabalho cinco ocorrências de solo da microrregião de Viçosa-MG e verificou o comportamento resiliente desses materiais, bem como a deformação permanente dos mesmos sob efeitos de cargas repetidas. Para análise do comportamento resiliente desses solos, empregaram-se as energias de compactação do Proctor normal e intermediário, com três teores de umidade, quais sejam, teor ótimo e teor ótimo $\pm 2\%$. Pela análise dos testes estatísticos aplicados ao modelo composto, verificou-se que as tensões de confinamento influenciaram os resultados de módulo de resiliência em grande parte das situações estudadas, considerando os níveis de tensão previstos na metodologia (ASHTO, 1999).

Souza Júnior (2011) analisou em sua pesquisa o comportamento resiliente de três solos típicos da microrregião de Viçosa-MG, quando supostamente empregados no subleito e na camada de reforço de um pavimento flexível hipotético, concluindo que os mesmos atenderam aos esforços nas camadas de reforço do subleito.

Ribas (2014), em sua pesquisa, objetivou estruturar um banco de dados com materiais e parâmetros elásticos típicos de pavimentos flexíveis do estado do Rio Grande do Sul,

através do processo de retroanálise, por meio de diferentes combinações entre módulos resilientes e espessuras de camadas comumente utilizadas naquela região, determinando as melhores opções estruturais com vistas à relação custo-benefício, facilitando o trabalho de engenheiros em projetos de pavimentos flexíveis.

Segundo Klinsky (2008), a adição de cal hidratada a solos reativos melhora substancialmente a resistência dos solos através das reações pozolânicas, que sucedem em longos períodos de tempo. Geralmente, esse incremento na resistência acontece em concomitância com um enrijecimento do material, mudando sua relação tensão-deformação.

De acordo com Little (1999), as misturas solo-cal apresentam maior resistência às tensões desvio e, por outra parte, exibem menores deformações. Como resultado, a rigidez de solos estabilizados com cal hidratada é de 10 a 25 vezes maior que a dos solos naturais. Conseqüentemente, esses materiais auxiliam na redução da deformação total do pavimento onde forem utilizados.

Diante do exposto, o objetivo deste estudo foi determinar o comportamento resiliente de duas amostras de solos da microrregião de Viçosa-MG, oriundos de jazidas de empréstimo, em seu estado natural e estabilizados com lama de cal, para fins de pavimentação rodoviária, visando o seu emprego como material em camadas de sub-base e base de pavimentos rodoviários flexíveis.

4.2 – Módulo de resiliência: conceito e determinação

O módulo de resiliência (MR) de um solo é um parâmetro que expressa a sua rigidez no regime elástico. Também pode ser definido como o módulo de elasticidade do solo obtido através de cargas repetidas. Esse parâmetro é utilizado para se estudar as características de deformabilidade dos materiais que compõem as estruturas dos pavimentos rodoviários, em condições dinâmicas e no regime elástico não linear (REZENDE, 2009).

O termo resiliência significa que a energia armazenada em um corpo deformado é devolvida quando cessa a tensão causadora da deformação elástica (FERREIRA, 2004).

A determinação desse parâmetro, sob as condições do ensaio triaxial de cargas repetidas, pode ser feita pelo emprego da Equação 1. A referida equação mostra que o valor do módulo de resiliência (MR) varia inversamente com a deformação resiliente ou elástica (ϵ_R). Assim, quanto mais deformável elasticamente for o material, menor será o valor do seu módulo de resiliência.

$$MR = \frac{\sigma_d}{\epsilon_R} \quad (1)$$

Em que:

MR: módulo de resiliência (kPa ou kgf/cm²);

σ_d : tensão desvio (kPa ou kgf/cm²);

ϵ_R : deformação resiliente, determinada pela Equação 2:

$$\epsilon_R = \frac{\Delta h}{h} \quad (2)$$

Em que:

Δh : deslocamento axial elástico ou resiliente (mm);

h: altura do corpo de prova (mm).

O ensaio utilizado para obtenção do módulo de resiliência do solo é o triaxial de carga repetida, entretanto alguns autores apontam dificuldades para determinação do módulo de resiliência através deste ensaio. No Brasil, o número de agências equipadas para realizar o ensaio de módulo de resiliência, numa rotina básica, é limitado.

Quando os solos são submetidos à aplicação de carregamentos de qualquer natureza, ocorrem processos bastante complexos. Suas respostas a esses carregamentos dependem de um conjunto de fatores relacionados à mecânica, gênese e física dos solos. Dentre esses fatores, podem-se citar: as condições de carregamento e estado de tensão; fatores de formação do solo, relacionados à origem, composição e estrutura; o estado físico do solo, definido pelo teor de umidade e massa específica seca; além das condições ambientais e paleoambientais que influenciaram no seu desenvolvimento ao longo dos anos geológico-pedológicos (RIBEIRO, 2016).

Em comparação aos ensaios tradicionalmente executados para projetos de pavimentação, o ensaio triaxial cíclico para determinação do MR é de execução mais complexa, tanto no que se refere aos recursos humanos quanto ao equipamento

utilizado. Enquanto os ensaios ditos tradicionais podem ser executados em laboratórios simples, dotados apenas de equipamentos básicos e instalados em regiões remotas, as câmaras destinadas ao ensaio triaxial de cargas repetidas consistem de um aparato relativamente sofisticado, o que dificulta, ou mesmo inviabiliza, o seu deslocamento e a sua utilização fora de locais devidamente adaptados. A isto se somam os problemas relativos aos custos, da ordem de R\$ 450.000,00, com preços de 2016, para aquisição do equipamento triaxial. No Brasil, existe um número relativamente pequeno de equipamentos triaxiais de carga repetida, sendo que a maior parte está disponível apenas nas universidades e centros de pesquisas (RIBEIRO, 2016).

Devido ao exposto, existem diversas relações para avaliar o módulo de resiliência, nas quais se utilizam: os limites de consistência (LL e LP), o índice CBR, o módulo tangente inicial, os parâmetros de ruptura do solo (ângulo de atrito e coesão) e as tensões atuantes no solo. Todavia, até então, as relações desenvolvidas ou são restritivas, por não considerarem os solos das regiões tropicais de comportamento laterítico e não laterítico apresentados pela classificação geotécnica da metodologia MCT, ou são de baixa eficiência (VIANA, 2007).

O módulo de resiliência do solo é representado por diversos modelos descritos nos trabalhos de Hicks e Monismith (1971), Uzan (1985) e Tutumluer et. al (1996), e que, geralmente, são baseados nas tensões atuantes no solo. Entretanto, existe a necessidade de saber quais os modelos mais apropriados para apresentar o comportamento do módulo de resiliência para que as análises estruturais de pavimentos sejam mais precisas.

Segundo Viana (2007), vários fatores influenciam o comportamento de resiliência do solo, dentre os quais podem citar-se: o nível de tensões, a composição granulométrica, a umidade, a densidade e a energia de compactação. O conhecimento do comportamento resiliente, em relação a estes fatores, coopera eficazmente para a tomada de decisões na direção do êxito dos projetos de pavimentos. Muitos trabalhos tratam dos fatores que influenciam o módulo de resiliência (RADA e WITCZAK, 1981; BARKSDALE e ITANI, 1989; MOHAMMAD et al 1995; RODRIGUES, 1997). Contudo, poucos trabalhos tiveram como matriz os solos do interior do Estado de Minas Gerais, mais

especificamente da microrregião de Viçosa (SANTA'ANNA, 2006; REZENDE, 2009; SOUZA JÚNIOR, 2011).

4.2.1 – Módulo de resiliência dos solos coesivos

Lee *et al.* (1997), investigando o módulo de resiliência dos solos coesivos, destacou que este parâmetro é função da tensão desvio aplicada, do método de compactação empregado na preparação das amostras (amostras compactadas por meio estático podem apresentar módulos maiores do que aquelas compactadas por meio dinâmico), dos parâmetros de compactação (amostras compactadas no ramo úmido apresentam, em geral, módulos menores que amostras compactadas no ramo seco), de efeitos tixotrópicos nas amostras (sendo mais marcantes nas amostras compactadas no ramo úmido), bem como advogam uma relação linear entre o módulo de resiliência e a sucção matricial de um solo.

Svenson (1980) propôs um modelo simplificado para o comportamento resiliente dos solos coesivos, apresentado pela Equação 3:

$$MR = K_1 \sigma_d^{k_2} \quad (3)$$

Em que:

MR: módulo de resiliência (kPa ou kgf/cm²);

σ_d : tensão desvio (kPa ou kgf/cm²);

K_1 e K_2 : constantes experimentais.

4.2.2 – Módulo de resiliência dos solos granulares

O comportamento de materiais granulares em camadas de pavimentos rodoviários, sob carregamento dinâmico, é predominantemente elástico não linear (MOTTA, 1991). Duncan *et al.* (1968) constataram que o módulo de resiliência para materiais granulares empregados em base e sub-base de pavimentos rodoviários varia em função da amplitude da tensão confinante, e o mesmo pode ser obtido através da Equação 4:

$$MR = K_1 \sigma_3^{k_2} \quad (4)$$

Em que:

MR: módulo de resiliência (kPa ou kgf/cm²);

σ_3 : tensão confinante (kPa ou kgf/cm²);

K_1 e K_2 : constantes experimentais.

Como o modelo apresentado estima o módulo resiliente dos solos a partir somente da tensão confinante, o mesmo foi fortemente criticado. Entretanto, pelo fato de se obter os parâmetros de forma simples, ele continua sendo bastante empregado (MATUELLA, 2017).

Um modelo proposto por Macedo em 1996 (MEDINA e MOTTA, 2015), denominado de composto, conforme equação 5, é capaz de eliminar a dificuldade de definição prévia do comportamento resiliente dos solos em função de sua granulometria, já que leva em consideração a influência simultânea das tensões confinante e desvio, para todos os tipos de material.

$$MR = K_1 \sigma_3^{k_2} \sigma_d^{k_3} \quad (5)$$

Em que:

MR: módulo de resiliência (kPa ou kgf/cm²);

σ_d : tensão desvio (kPa ou kgf/cm²);

σ_3 : tensão confinante (kPa ou kgf/cm²);

K_1 , K_2 e K_3 : constantes experimentais.

A consideração conjunta de σ_3 e σ_d é importante na determinação do MR, e os coeficientes de correlação R^2 obtidos para este modelo atingem valores acima de 0,90, bastante superiores àqueles auferidos para os demais modelos considerados (FERREIRA, 2002). A partir da análise de um banco de dados de mais de 500 ensaios, conclui Ferreira (2002) que “é incontestável a supremacia do modelo composto sobre os demais. Este modelo, além da óbvia vantagem de poder ser utilizado para qualquer tipo de material não tratado quimicamente, demonstrou ser capaz de determinar o valor do módulo de resiliência com precisão muito superior aos outros, tornando-os totalmente obsoletos”.

4.2.3 – Módulo de resiliência e a composição granulométrica

Hicks e Monismith (1971) relatam que o módulo de resiliência é influenciado pela porcentagem de material que passa na peneira de número 200. Segundo Visser et al.(1994), certas areias naturais têm o módulo de resiliência consideravelmente mais elevado do que os solos argilosos. Rodrigues (1997) concluiu que, na umidade ótima e em diferentes níveis de tensão desvio, sempre o solo mais arenoso (A-2-6) apresentava módulos de resiliência mais elevados do que um solo mais argiloso (A-4). A diferença entre os módulos de resiliência dos dois materiais considerados chegou a 100%

Barksdale e Itani (1989) estudaram cinco tipos de materiais (gnaisse-granítico, cascalho, folhelho, quartzito e calcário) quanto ao comportamento para base de pavimentos. Foram consideradas três faixas granulométricas, a saber, grossa, média e fina. Verificou-se que, para o solo tipo gnaisse-granítico, o módulo de resiliência diminuiu cerca de 60% quando a composição granulométrica se tornou mais fina, aumentando a quantidade de finos de 0% para 10%.

4.2.4 – Módulo de resiliência e a umidade

A influência da água sob o valor do módulo de resiliência dos materiais da base, sub-base e subleito é de grande relevância, uma vez que a diminuição dos módulos de resiliência dessas camadas contribui para o surgimento de deformações excessivas de tração, na parte inferior do revestimento asfáltico, resultando no aparecimento de trincas de fadiga (VIANA, 2007).

Conforme Weber (2013), sabe-se que não são somente os estados de tensões que afetam o MR, mas também as variações ambientais, caracterizadas pela sucção. Essas variações ambientais, como precipitações pluviométricas, temperatura, vegetação e vento, alteram a umidade do subleito dos pavimentos, o que pode influenciar na magnitude da deformabilidade elástica dos materiais quanto à determinação do módulo de resiliência.

4.3 – Materiais e Métodos

4.3.1 – Caracterização da área de estudo e amostragem

Foram utilizados dois solos saprolíticos de ocorrência no relevo da microrregião de Viçosa-MG. Estes solos, denominados de jazida Nô da Silva e jazida Gomide, de textura arenosa, compõem o manto saprolítico, horizonte C, dos solos da região.

Apresentam, ainda, coloração rósea, com textura correspondente a uma areia argilo-siltosa com presença de pedregulho. O solo da jazida Nô da Silva apresenta 14% de pedregulho, 60% de areia, 11% de silte e 15% de argila, e o solo da jazida Gomide apresenta 13% de pedregulho, 63% de areia, 11% de silte e 13% de argila. Quanto à sua classificação, segundo o sistema TRB, o solo da jazida Nô da Silva é um solo do grupo A-2-7(0), e o solo da jazida Gomide é um solo A-2-6 (0). Segundo o sistema de classificação MCT, ambos são NA'.

As amostras utilizadas no estudo foram coletadas em dois taludes de corte, localizados em terrenos pertencentes ao município de Cajuri-MG, situado na microrregião de Viçosa-MG. O resíduo industrial lama de cal, gerado no processo de produção de celulose, foi coletado no pátio da empresa CENIBRA, na unidade de Ipatinga-MG. Esse resíduo sólido, friável, de granulometria fina e de coloração acinzentada é classificado pela NBR10004 (ABNT, 1987) como resíduo classe II, ou seja, trata-se de um material não inerte. Após a coleta, o resíduo foi transportado ao Laboratório de Engenharia Civil da UFV e estocado em tambores plásticos que foram hermeticamente vedados, evitando, assim, a sua exposição às intempéries, para posterior utilização nos ensaios geotécnicos.

Esse resíduo, de acordo com a caracterização química apresentados na Tabela 8 do Capítulo 3, apresenta em sua composição química 97,06% de cálcio, dos quais 95,52% se encontram na forma de óxido de cálcio (CaO).

4.3.2 – Módulo de resiliência

Os módulos de resiliência dos solos e das misturas de solo-lama de cal foram determinados segundo a norma DNER-ME 131/94 (DNER, 1994), a partir dos resultados dos ensaios triaxiais de cargas repetidas, com instrumentação interna à câmara triaxial.

Para realização dos ensaios de módulo de resiliência, foram moldados corpos-de-prova (CPs) dos solos das jazidas Nô da Silva e Gomide, no estado natural, compactados nas energias dos ensaios Proctor Intermediária e Modificada, e estabilizados com lama de cal, compactados na energia do ensaio Proctor Intermediária. Foram moldados por

processo dinâmico em 10 camadas iguais (Figura 16), considerando os seguintes limites fixados na preparação das amostras: altura, $20 \pm 0,2$ cm; diâmetro, $10 \pm 0,2$ cm; teor ótimo de umidade, $\pm 0,5\%$; grau de compactação, $100 \pm 0,5\%$. Os corpos de prova dos solos no estado natural foram ensaiados logo após sua moldagem, e, para os corpos de prova obtidos das misturas estabilizadas quimicamente com 5% de lama de cal, foi obedecido o tempo de cura de 28 dias.



Figura 16—Moldagem dos corpos de prova para o ensaio de módulo de resiliência.

Moldados os CPs, estes foram submetidos ao ensaio triaxial no setor de Ensaaios Dinâmicos do Laboratório de Pavimentação da UFJF (Figura 17).



Figura 17—Célula triaxial empregada no ensaio de módulo de resiliência.

As equações matemáticas foram obtidos através de linearização das Equações 3, 4 e 5, para representação do módulo de resiliência dos solos naturais e das misturas. Depois de

linearizadas, foram feitas regressões lineares simples e múltiplas, utilizando o método dos múltiplos quadrados.

4.4 – Resultados e discussão

O trabalho experimental resultou na caracterização do material e no total de 18 ensaios, 3 corpos de prova na energia Proctor Intermediária para cada solo (Nô da Silva e Gomide), 3 corpos de prova na energia Proctor Intermediária para a mistura (Nô da Silva + LC 5%), 3 corpos de prova na energia Proctor Intermediária para a mistura (Gomide + LC 5%) e 3 corpos de prova na energia Proctor Modificada para cada solo (Nô da Silva e Gomide), de módulo de resiliência no equipamento triaxial de cargas repetidas para análise dos solos naturais e estabilizados quimicamente com 5% de lama de cal. No Anexo A, são apresentados as tabelas que ilustram os parâmetros de modelos ou equações de previsão do comportamento resiliente dos solos Nô da Silva e Gomide, objeto de estudo deste trabalho, no estado natural e estabilizados quimicamente com o resíduo lama de cal. Esses parâmetros foram obtidos experimentalmente, em laboratório, através da realização dos ensaios de módulo de resiliência no setor de Ensaios Dinâmicos do Laboratório de Pavimentação da UFJF. No capítulo 3, foram apresentados os dados dos corpos de provas com teor de umidade, peso específico aparente seco máximo, nas energias Proctor intermediária e modificada.

Na Tabela 17, são apresentados os parâmetros dos modelos para a estimativa do módulo de resiliência a partir da tensão desvio (σ_d) e da tensão confinante (σ_3) para o solo da jazida Nô da Silva e para a mistura solo-resíduo com 5% de lama de cal, compactados na energia Proctor Intermediária.

Na Tabela 18, são apresentados os parâmetros do modelo para a estimativa do módulo de resiliência a partir do modelo composto ($\sigma_d - \sigma_3$) para o solo da jazida Nô da Silva e para a mistura solo-resíduo com 5% de lama de cal, compactados na energia Proctor Intermediária.

Tabela 17 – Valores dos parâmetros para os modelos de tensão desvio (σ_d) e de tensão confinante (σ_3), com os respectivos valores de R^2 : solo Nô da Silva

Ensaio de Módulo de Resiliência - Nô da Silva (Proctor Intermediário)						
Modelo	$M_R = K_1 \sigma_3^{K_2}$			$M_R = K_1 \sigma_d^{K_2}$		
	k₁	k₂	R²	k₁	k₂	R²
Nô da Silva	99,60	-0,706	0,672	149,10	-0,386	0,162
Nô da Silva+ 5% lama de cal (28 dias)	134,60	-0,605	0,783	135,10	-0,460	0,353

Tabela 18 – Valores dos parâmetros para o modelo composto σ_d - σ_3 , com os respectivos valores de R^2 : solo Nô da Silva

Ensaio de Módulo de Resiliência - Nô da Silva (Proctor Intermediário)				
Modelo	$M_R = K_1 \sigma_d^{K_2} \sigma_3^{K_3}$			
	k₁	k₂	k₃	R²
Nô da Silva	680,35	-0,995	0,546	0,722
Nô da Silva + 5% lama de cal (28 dias)	599,75	-0,675	0,008	0,901

A análise mostra que, nas amostras estudadas, o modelo em função da tensão confinante e o modelo composto (Tabelas 17 e 18, respectivamente), produziram valores mais altos de coeficiente de determinação linear (R^2).

O modelo utilizado para ajustar os resultados do módulo de resiliência foi o modelo da tensão confinante (σ_3). Este modelo é normalmente utilizado para materiais granulares. Na Figura 18, são mostrados os ajustes do modelo tensão confinante para a média dos corpos de prova ensaiados na energia Proctor Intermediária.

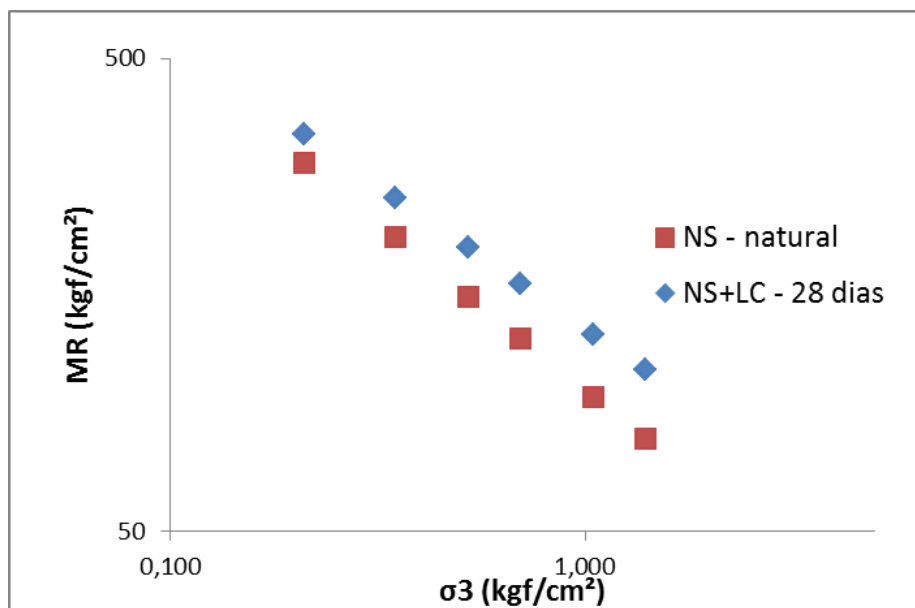


Figura 18—Resultados de MR para modelo σ_3 : amostra jazida Nô da Silva na Energia Intermediária.

De acordo com os resultados obtidos, é possível verificar que houve um aumento no valor do módulo de resiliência em função da adição de resíduo lama de cal ao solo da jazida Nô da Silva e, para o período de cura aplicado. O módulo de resiliência para o solo natural variou de 300MPa a 800MPa, de acordo com o nível de tensões aplicado. Para as amostras com resíduo lama de cal, o módulo de resiliência ficou entre 250MPa a 1050MPa, de acordo com o nível de tensões aplicado, mostrando uma redução na deformabilidade com o resíduo lama de cal em torno de 31%.

Na Tabela 19, são apresentados os parâmetros dos modelos para a estimativa do módulo de resiliência a partir da tensão desvio (σ_d) e da tensão confinante (σ_3) para o solo da jazida Gomide e para a mistura solo-resíduo com 5% de lama de cal, compactados na Energia Proctor Intermediária.

Na Tabela 20, são apresentados os parâmetros do modelo para a estimativa do módulo de resiliência a partir do modelo composto ($\sigma_d - \sigma_3$) para o solo da jazida Gomide e para a mistura solo-resíduo com 5% de lama de cal, compactados na Energia Proctor Intermediária.

A análise mostra que, nas amostras estudadas, o modelo em função da tensão confinante e o modelo composto (Tabelas 19 e 20, respectivamente), produziram valores mais altos de coeficiente de determinação linear (R^2).

Tabela 19 – Valores dos parâmetros para os modelos σ_d , σ_3 , com os respectivos valores de R^2 : solo Gomide

Ensaio de Módulo de Resiliência - Gomide (Proctor Intermediário)						
Modelo	$M_R = K_1 \sigma_3^{K_2}$			$M_R = K_1 \sigma_d^{K_2}$		
	k1	k2	R²	k1	k2	R²
Gomide	120,00	-0,639	0,765	153,73	-0,400	0,242
Gomide + 5% lama de cal (28 dias)	162,80	-0,475	0,738	182,00	-0,326	0,250

Tabela 20 – Valores dos parâmetros para o modelo composto σ_d - σ_3 , com os respectivos valores de R^2 : solo Gomide

Ensaio de Módulo de Resiliência - Gomide (Proctor Intermediário)				
Modelo	$M_R = K_1 \sigma_d^{K_2} \sigma_3^{K_3}$			
	k1	k2	k3	R²
Gomide	633,80	-0,877	0,343	0,874
Gomide + 5% lama de cal (28 dias)	556,67	-0,648	0,291	0,874

O modelo utilizado para ajustar os resultados do módulo de resiliência foi o modelo da tensão confinante (σ_3). Este modelo é normalmente utilizado para materiais granulares. Na Figura 19, são mostrados os ajustes do modelo tensão confinante para a média dos corpos de prova ensaiados na energia intermediária.

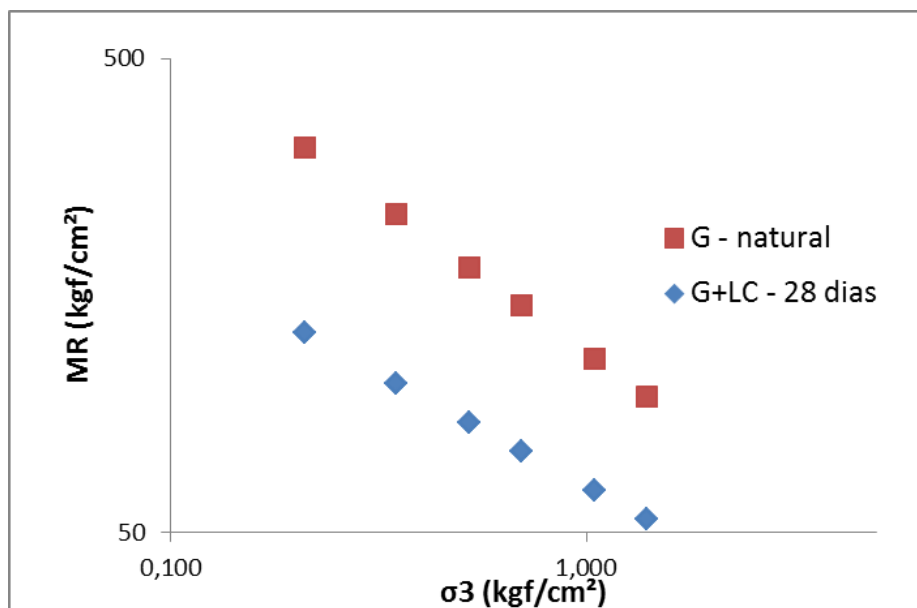


Figura 19—Resultados de MR modelo confinante: amostra jazida Gomide na Energia Intermediária.

De acordo com os resultados obtidos, é possível verificar que houve um aumento no valor do módulo de resiliência em função da adição de resíduo lama de cal ao solo da jazida Gomide e, para o período de cura aplicado. O módulo de resiliência para o solo natural variou de 300MPa a 650MPa, de acordo com o nível de tensões aplicado. Para as amostras com resíduo lama de cal, o módulo de resiliência ficou entre 250MPa a 870MPa, de acordo com o nível de tensões aplicado, mostrando uma redução na deformabilidade com o resíduo lama de cal em torno de 33%.

Embora o modelo composto tenha apresentado maiores valores de coeficiente de correlação, a inclusão das tensões de confinamento (σ_3) em modelos para estimativa do módulo de resiliência de solos de sub-base e base (solo granular) é discutível, devido ao baixo valor de R^2 apresentado. Percebe-se que as tensões de confinamento tiveram efetiva contribuição nos resultados do módulo de resiliência na quase totalidade das situações estudadas.

Nas Tabelas 21 e 22, estão apresentados os resultados para estimativa de resiliência para os solos compactados na Energia Proctor Modificada. Salienta-se que os solos não foram compactados com lama de cal na Energia Proctor Modificada, uma vez que, no Capítulo 2, os solos estudados tiveram ganho representativo em suas propriedades

geotécnicas quando estabilizados quimicamente e compactados na Energia Proctor Intermediária.

Tabela 21 – Valores dos parâmetros para os modelos σ_d , σ_3 , com os respectivos valores de R^2 : solo Nô da Silva e Gomide

Modelo	$M_R = K_1 \sigma_3^{K_3}$			$M_R = K_1 \sigma_d^{K_2}$			
	CP	k1	k2	R ²	k1	k2	R ²
Nô da Silva		148,60	-0,496	0,645	200,45	-0,272	0,149
Gomide		178,30	-0,470	0,798	183,70	-0,370	0,345

Tabela 22 – Valores dos parâmetros para os modelos σ_d , σ_3 , com os respectivos valores de R^2 : solos Nô da Silva e Gomide, energia Proctor Modificada

Modelo	$M_R = K_1 \sigma_d^{K_2} \sigma_3^{K_3}$				
	CP	k1	k2	k3	R ²
Nô da Silva		750,87	-0,723	0,343	0,897
Gomide		596,10	-0,636	0,251	0,908

A análise mostra que, nas amostras estudadas, os modelos em função da tensão confinante e o modelo composto (Tabelas 19 e 20 respectivamente) apresentaram bons ajustes aos dados experimentais, produzindo valores mais altos de coeficiente de determinação linear (R^2).

O modelo utilizado para ajustar os resultados do módulo de resiliência foi o modelo da tensão confinante (σ_3). Este modelo é normalmente utilizado para materiais granulares. Na Figura 20 são mostrados os ajustes do modelo tensão confinante para a média dos corpos de prova das amostras naturais ensaiados na energia intermediária e modificada.

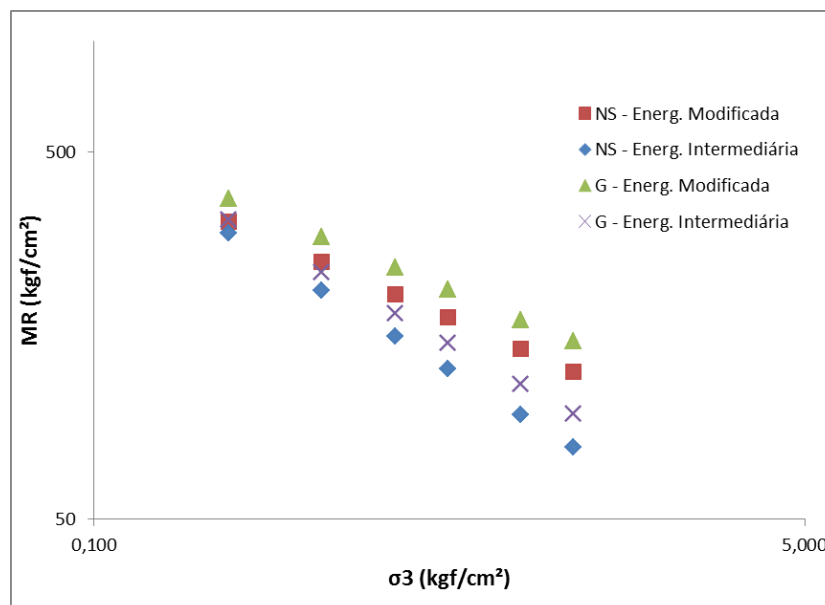


Figura 20—Resultados de MR modelo confinante: amostras jazidas Nô da Silva e Gomide na Energia Intermediária e Modificada.

De acordo com os resultados obtidos, é possível verificar que houve um aumento no valor do módulo de resiliência em função da energia de compactação aplicada. O módulo de resiliência para o solo da jazida Nô da Silva na energia intermediária variou de 300MPa a 800MPa, de acordo com o nível de tensões aplicado. Para as amostras Na energia modificada variou de 400MPa a 860MPa, de acordo com o nível de tensões aplicado, mostrando uma redução na deformabilidade com o aumento da energia de compactação de 7,5%. O módulo de resiliência para o solo da jazida Nô da Silva na energia intermediária variou de 300MPa a 650MPa, de acordo com o nível de tensões aplicado. Para as amostras na energia modificada variou de 300MPa a 720MPa, de acordo com o nível de tensões aplicado, mostrando uma redução na deformabilidade com o aumento da energia de compactação de 10,8%.

Com base no modelo composto $\sigma_d - \sigma_3$, de um modo geral tem-se:

- Os parâmetros K1 do solo Nô da Silva foram superiores ao do solo Gomide;
- O parâmetro K2 no modelo mostra a influência da tensão confinante, nenhum dos casos apresentou valor negativo;
- O parâmetro K3 no modelo composto reflete a influência da tensão desvio. Para todos os ensaios o parâmetro resultou negativo, mostrando que, quando depende

apenas da tensão desvio, os módulos tendem a diminuir quanto maior for a tensão aplicada verticalmente sobre os corpos de prova;

Com base nos resultados apresentados, observou-se que o comportamento resiliente dos solos é influenciado pelo teor de resíduo químico (lama de cal) adicionado e pelo período de cura.

4.5 – Conclusões

Este artigo estudou a influência no módulo de resiliência da adição do resíduo lama de cal em solos da microrregião de Viçosa-MG. Também foram avaliadas três equações matemáticas utilizadas para modelar os valores do MR desses materiais obtidos dos ensaios triaxiais cíclicos. Indubitavelmente, o número de solos e misturas ensaiados no presente trabalho é pequeno para que se estabeleçam conclusões definitivas, motivo pelo qual se recomenda, utilizando-se a mesma metodologia deste trabalho, pesquisar um maior número de solos e outros agentes químicos de estabilização. Contudo, numa fase preliminar, e com base nos resultados obtidos neste trabalho, são apresentadas as seguintes considerações:

- a) De uma forma geral, as amostras apresentam comportamento resiliente com baixa sensibilidade à tensão desvio (σ_d) e boa sensibilidade à tensão confinante (σ_3), comportamento típico de solos granulares;
- b) Analisando-se os valores dos coeficientes de regressão (R^2) e tomando-se estes valores como medidas de adaptação dos modelos para representar a variação do módulo de resiliência em função do estado de tensão para ambas solo e misturas solo-resíduo, observou-se, de uma maneira geral, que o modelo composto σ_d - σ_3 , mostra-se mais satisfatório para a representação do módulo de resiliência;
- c) Para o solo Nô da Silva o módulo de resiliência teve uma redução na deformabilidade com o resíduo lama de cal em torno de 31%;
- d) Para o solo Gomide o módulo de resiliência teve uma redução na deformabilidade com o resíduo lama de cal em torno de 33%;
- e) Verificou-se, a influência da energia de compactação nos resultados de M_R ;

- f) Com base nos resultados, observou-se que o comportamento resiliente dos solos é influenciado pelo teor de lama de cal adicionado e pelo período de cura, aumento sua potencialidade, parece indicar para a viabilidade de proceder a estudos mais aprofundados com relação às características de cada solo bem como do teor ótimo das misturas do estabilizante utilizado, já que utilizou-se somente 5% de lama de cal em relação ao peso seco da amostra;

4.6 – Agradecimentos

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de pesquisa ao primeiro autor, e à Universidade Federal de Viçosa (UFV), através do Departamento de Engenharia Civil, pelo suporte na coleta das amostras deformadas de solos e nos ensaios geotécnicos de laboratório. Agradeço também à Universidade Federal de Juiz de Fora – UFJF, ao professor Geraldo Luciano e ao técnico de laboratório Vitor, pela ajuda na realização dos ensaios.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS-ASSHTO. *Guide for design of pavements structures 1993*. American Association of Stage Highway and Transportation Officials. Washington, D.C, 1993.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS-ASSHTO. *Standard method of test for determining the resilient modulus of soils and aggregate materials*. 1999. American Association of Stage Highway and Transportation Officials. Designation T. 307-99, p.1084-1109, 1999.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS-ABNT. **NBR 10004/87**: Classificação de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 1987.

BARKSDALE, R.D.; ITANI, S.Y. **Influence of Aggregate Shape on Base Behavior**. Transportation Research Record, [S.I.], n. 1227, p. 173-182. 1989.

BALBO, J.T. **Pavimentação asfáltica: materiais, projetos e restauração**. São Paulo, Oficina de Textos, 558p, 2007.

BONZANINI, J.A.F. **Estudo dos efeitos do tamanho de corpo de prova no módulo de resiliência de quatro solos**. 2011. 135f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2011

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM - DNER. **ME 131/94.Solos -Determinação do Módulo de Resiliência**. Rio de Janeiro: Instituto de Pesquisas Rodoviárias. 1994.

DUCAN, J.M; MONISMITH, C.L.; WILSON, E.L. **Finite Element Analyses of Pavements**. Highway Research record, Washington, D.C., n228, p. 18-33. 1968.

ELLIOT, R.P. *Selection of subgrade modulus for ASSHTO flexible pavement design*. **Transportation Research Record**, [S.I], n.1354, p.39-44, 1992.

FRANCO, F.A.C.P. **Método de dimensionamento mecânico-empírico de pavimentos asfálticos – SISPAV**. 2007. 315f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro/RJ. 2007.

FERREIRA, J. G, H, M. **Elaboração e Análise da Base de Dados de Ensaios Triaxiais Dinâmicos da COPPE/UFRJ**. 2002. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro/RJ. 2002.

FERREIRA, A.B.H. **Novo Dicionário da Aurélio da Língua Portuguesa**.3 ed. Re. E atual. Curitiba: Positivo. 2004.

HICKS, R.G. e MONISMITH, C.L. **Factors Influencing the Resilient Properties of Granular materials**. Hwy. Res. Rec. 345, p. 15–31.1971.

KLINSKY, L. M. G. **Proposta de Reaproveitamento de areia de fundição em sub-bases e bases de pavimentos flexíveis, através de sua incorporação a solos argilosos**. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo. São Paulo. 2008.

LI, R; SCHWARTZ, C.W.; KIM, S; CEYLAN, H. **Local sensitivity of mechanistic empirical flexible pavement performance predictions to unbound material property inputs.** Proc. Geo Congress 2012: State of the art and practice in geotechnical engineering, 2012.

LITTLE, N.D. **Evaluation of structural properties of lime stabilized soils and aggregates.** Volume 1: Summary of findings. National Lime Association. Estados Unidos da América. 1999.

LEE, W. et al. Resilient Modulus of Cohesive Soils. ASCE. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 123, n. 2, p. 131-136, 1997.

MACEDO, J. A. G. **Interpretação de Ensaio Deflectométrico para Avaliação Estrutural de Pavimentos Flexíveis – A Experiência com FWD no Brasil.** 1996. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 1996.

MATUELLA, M.F. **Efeito da composição de resíduos de construção e demolição em seu comportamento mecânico para utilização em pavimentação.** 2017. 172 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2017.

MEDINA, J.; MOTTA, L. M. G. **Mecânica dos pavimentos.** Rio de Janeiro: Ed. UFRJ, 3ªed., 2015.

MOHAMMAD, L.D; PUPPALA, J.A.; ALAVILLI, P. Resilient properties of laboratory compacted subgrade soils. **Transportation Research Record**, [S.I], n.1504, p.87-102, 1995.

MOTTA, L.M.G; MEDINA, J. **Um método de dimensionamento de pavimentos flexíveis desenvolvido no Brasil.** In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 25., 1991, São Paulo, SP. Anais. São Paulo, SP: ABPv (Associação Brasileira de Pavimentação), p.1117-1206. 1991.

NCHRP 1-37A. **Guide for mechanical-empirical of new rehabilitated pavement structures**. National Cooperative Highway Research Program. Transportation Research Board. Illinois, 2004.

RADA, G.; WITCZAK, M.W. Comprehensive evaluation of laboratory resilient moduli results for granular materials. **Transportation Research Record**, [S.I], n.810, p.23-33, 1981.

REDE TEMÁTICA DE ASFALTO. **Manual de execução de trechos monitorados**. Rio de Janeiro: Petrobras. 2012.

REZENDE, D.S.V. **Comportamento Mecânico de Alguns Tipos de Solos Através de Ensaio Triaxiais de Cargas Repetidas para Projetos de Pavimentos Rodoviários**. 2009. 144 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais, 2009.

RIBAS, J. **Parâmetros Elásticos Típicos de Materiais de Pavimentos Flexíveis do Rio Grande do Sul e Sua Aplicação em Análise Custo/Benefício**. 2014. 190 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria. 2014.

RIBEIRO, A.J.A. **Um modelo de previsão do módulo de resiliência dos solos no estado do Ceará para fins de pavimentação**. 2016. 151 f. Tese (Doutorado em Engenharia dos Transportes) - Universidade Federal do Ceará. Fortaleza. 2016.

RODRIGUES, M. R., **Influência da sucção no módulo de resiliência de solos típicos de subleito de pavimentos do Rio Grande do Sul**. 1997. 105 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1997.

SANT'ANNA, G.L. *et al.* **Módulo de resiliência de solos e misturas estabilizadas quimicamente**. Porto Seguro. Anais. Porto Seguro: FOREST 2000. P.411-413, 2000.

SANT'ANNA, G.L. **Estradas florestais: caracterização geotécnica e comportamento mecânico de solos e misturas solo-grits, cargas de tráfego e efeitos**.

2006. 146 f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, Minas Gerais. 2006.

SOARES, J.B.; MORENO, A.M.; MOTTA, L.M.G. **Aspectos gerais de métodos de dimensionamento de pavimentos asfálticos de vários países e a relação com um novo método brasileiro.** Revista de Pavimentação, v.XVII, p.0/0. 2009.

SOUZA JÚNIOR, T.A.T. **Respostas Estruturais em Pavimentos Flexíveis Via Utilização de Equações de Módulos de Resiliência de Solos de Subleito e da Camada de Reforço.**2011. 102f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – DEC, Universidade Federal de Viçosa, 2011.

SVENSON, M. **Ensaio Triaxiais Dinâmicos em Solos Argilosos.**1980. 135f.Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro,1980.

TAKEDA, M.C.A. **A influência da variação de umidade pós-compactação no comportamento mecânico de solos de rodovias do interior paulista.** 2006. 276f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

TUTUMLUER, E.; MEIER, W.R. *Attempt at resilient modulus modeling using artificial neural networks.**Transportations Research Record*, [S.I], n'1540, p.1-6, 1996.

UZAN, J. **Characterization of Granular Material.**Transportation Research Record, Washington, D. C., n. 1022, p.52-59.1985.

VIANA, H.M.F. **Estudo do comportamento resiliente dos solos tropicais grossos do interior de São Paulo.**2007. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.2007.

VISSER, A.T.; QUEIROZ, C.; HUDSON, W.R.**A Study of Resilient Characteristics of Tropical Soils for use in Low-Volume Pavement Design.** In: Symposium on

Pavement Management Systems, Belo Horizonte, Brasil. Proceedings... Belo Horizonte, Brasil: D.E.R. Minas Gerais, p, 1-25. 1994.

WEBER, R. C. Avaliação das trajetórias de umedecimento e secagem na deformabilidade elástica de solos compactados. 2013. 140 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

5 – ESTUDO DA DEFORMAÇÃO PERMANENTE DE DOIS SOLOS TROPICAIS DA MICRORREGIÃO DE VIÇOSA-MG.

Resumo – Este artigo é direcionado ao estudo do comportamento mecânico sob ensaio de deformação permanente de dois solos típicos da microrregião de Viçosa, Minas Gerais, para fins de aplicação em camadas de sub-base e base de pavimentos flexíveis rodoviários, a partir da realização de ensaios triaxiais de cargas repetidas, considerando-se, para tanto, as seguintes condições: (a) solos em seu estado natural e; (b) solos estabilizados com o resíduo lama de cal. O programa de ensaios de laboratório envolveu: (i) teor de lama de cal de 5% calculado em relação à massa seca da mistura solo-lama de cal; (ii) corpos de prova compactados por método dinâmico, no teor de umidade ótimo ($w_{ót}$) da energia de compactação Proctor Intermediário e Modificado, e; (iii) período de cura de 28 dias das misturas solo-lama de cal compactadas, em câmara úmida. Os resultados do programa de ensaio indicaram que para: (i) para o solo da jazida Nô da Silva, as amostras de solo natural foram as que apresentaram maiores valores de deformação permanente, ao passo que as amostras estabilizadas com lama de cal apresentaram os menores valores e; (ii) para o solo da jazida Gomide, as amostras de solo natural compactadas na Energia Proctor Intermediário foram as que apresentaram maiores variações de deformação permanente, ao passo que as amostras estabilizadas com lama de cal apresentaram valores superiores. Já as amostras de solo natural compactadas na Energia Proctor Modificada apresentaram os menores valores. Por fim, os solos estudados nesta pesquisa apresentaram resultados baixos de deformações permanentes acumuladas, se estimada uma espessura de 20 cm total deste material, comparados ao valor admissível de 12,5 mm de afundamento de trilha de roda (ATR) geralmente considerado em projetos de rodovias de alto volume de tráfego.

Palavras-Chave: Pavimentos flexíveis; ensaio triaxial de cargas repetidas; deformação permanente e resíduo lama de cal.

STUDY OF THE PERMANENT DEFORMATION OF TWO TROPICAL SOILS OF THE MICROREGION VIÇOSA-MG.

Abstract – This article is directed to the study of the mechanical behavior under the test of permanent deformation of two typical soils of the micro-region of Viçosa, Minas Gerais, for the application of sub-base layers and base of flexible road pavements, from triaxial tests of repeated loads, considering, therefore, the following conditions: (a) soils in their natural state and; (b) soils stabilized with the lime mud residue. The laboratory test program involved: (i) lime mud content of 5% calculated on the dry mass of the lime-mud mixture; (ii) test specimens compacted by dynamic method in the optimum moisture content (wt) of the Compressor Intermediate and Modified compaction energy; (iii) 28-day cure period of the compacted soil-mud mixtures in a humid chamber. The results of the test program indicated that for: (i) for the soil of the Nô da Silva deposit, the natural soil samples were those with the highest values of permanent deformation, while the samples stabilized with lime mud presented the lowest values and; (ii) for the soil of the Gomide deposit, the natural soil samples compacted in the Intermediate Proctor Energy were the ones that presented the greatest variation of permanent deformation, while the samples stabilized with lime mud presented higher values. However, the natural soil samples compacted in the Modified Energy Proctor presented the lowest values. Finally, the soils studied in this research presented low results of accumulated permanent deformations, if estimated a 20 cm total thickness of this material, compared to the admissible value of 12.5 mm wheel-track sinking (ATR) generally considered in projects of high-traffic highways.

Keywords: flexible pavements; triaxial test of repeated loads; permanent deformations and lime mud residue.

5.1 – Introdução

5.1.1 – Contextualização do problema

O pavimento é uma estrutura de múltiplas camadas finitas destinadas a resistir às intempéries e solicitações de cargas dos veículos. No Brasil, a grande extensão tanto da malha pavimentada como da não pavimentada e o uso intenso de materiais pétreos e solos na construção e manutenção dos pavimentos rodoviários justificam as pesquisas realizadas em busca de entendimento e previsão do comportamento dos pavimentos rodoviários e seus componentes (LIMA, 2016).

Os danos da estrutura de um pavimento são ocasionados por vários fatores associados ao tráfego ou não, tais como: tensões atuantes, condições ambientais, materiais utilizados e métodos de construção e manutenção. As duas principais manifestações da ruptura de pavimentos associadas ao tráfego são as trincas por fadiga, com início e desenvolvimento na camada de maior rigidez da estrutura (mistura asfáltica ou solo cimentado), e a deformação permanente (CERATTI, 1991).

Para propiciar os objetivos técnicos de um pavimento asfáltico, é essencial também o estudo de seleção granulométrica para as camadas do pavimento, principalmente quando se refere a danos por deformação permanente. Estudos anteriores, como, por exemplo, Werkmeister (2003), Pérez et al. (2006), Tutumluer e Pan (2008), Guimarães (2009), Acikgoz e Rauf (2010), Lima(2016) e Kern (2017), mencionam que o desempenho de camadas granulares está relacionado com as características dos seus agregados e que, conseqüentemente, sua distribuição granulométrica vem a afetar propriedades importantes da estrutura do pavimento. Para Castelo Branco et al. (2006), as dimensões, formas, angularidade e textura superficial das partículas dos solos e britas influenciam na construção do pavimento como um todo e na sua vida útil.

Um dos defeitos resultantes da passagem de veículos é o Afundamento de Trilha de Roda (ATR), um tipo de defeito estrutural que pode ser derivado da contribuição acumulativa da deformação permanente de uma ou mais camadas do pavimento e do subleito, e que, quando excessiva ou brusca, resulta em ruptura plástica, sendo um dos principais mecanismos de ruptura de pavimentos (LIMA, 2016).

Segundo Marangon e Motta (2006), uma questão particular em obras de pavimentação refere-se à natureza do carregamento cíclico na estrutura e, conseqüentemente, à necessidade de se verificar a deformação permanente após um determinado número de aplicações de carga, no sentido de determinar se tais deformações permanentes podem conduzir à ruptura ou se tendem à estabilização.

Estudos e discussões detalhadas sobre a deformação permanente de solos, britas e lateritas podem ser vistos, por exemplo, em Guimarães (2009), que também discute a

questão da acomodação destas deformações com os ciclos de carga, fenômeno que acontece com muitos solos tropicais, mesmo os finos, quando laterizados.

Os mecanismos de degradação, oriundos principalmente das solicitações do tráfego e condições climáticas locais, reduzem seu desempenho funcional e estrutural em função de uma contínua degradação que ocorre no pavimento durante a sua vida útil (KERN, 2017).

Esses mecanismos de degradação devem ser considerados para estabelecer a vida útil do pavimento. Em relação à condição funcional, considera-se o estado da superfície (serventia, defeitos e irregularidade) e a aderência pneu-pavimento. Já para a condição estrutural do pavimento, enfatizam-se a deformação permanente e o trincamento por fadiga (KERN, 2017).

Inúmeros métodos de análise das condições estruturais de um pavimento flexível fundamentam-se, quando do estudo do comportamento tensão “versus” deformação de seus materiais constituintes, em ensaios sem repetição de carga, isto é, o carregamento é feito somente uma vez. Na realidade, as camadas de pavimentos flexíveis são solicitadas dinamicamente pelas cargas transientes dos veículos e sob diferentes influências climáticas. Como consequência, surgem deformações recuperáveis e permanentes ao longo de toda a estrutura da estrada (REZENDE, 2009).

Segundo Bernucci et al. (2010), os defeitos estruturais são vinculados às deformações elásticas ou recuperáveis e às plásticas ou permanentes. As deformações plásticas são aquelas acumuladas durante a vida do pavimento, que resultam em defeitos do tipo afundamento, que pode ser localizado ou em grande extensão, este também é conhecido como afundamento de trilha de roda (ATR).

Segundo Medina e Motta (2005), é corrente a observação de que o efeito mais frequente nos pavimentos flexíveis, no Brasil, é o trincamento da camada superior de concreto asfáltico pela flexão alternada da camada superficial apoiada em camadas granulares, geralmente bastante deformáveis elasticamente. Motta (1991) relata que, para as condições brasileiras, os defeitos causados pelas deformações permanentes não são

expressivos, principalmente devido às condições de dimensionamento tradicionalmente adotadas (Método CBR com imersão em água por 4 dias) e às baixas umidades de equilíbrio.

Esta constatação fez com que a maioria das pesquisas na linha de Mecânica dos Pavimentos realizadas nos últimos anos concentrasse esforços na determinação do comportamento resiliente dos solos, o que culminou com a adoção do módulo de resiliência como parâmetro de projeto no método de dimensionamento de pavimentos flexíveis da AASHTO (AASHTO, 1993). Por outro lado, segundo Rezende (2009), poucas pesquisas foram conduzidas com o foco na investigação das deformações permanentes e o seu impacto no desempenho estrutural do pavimento. Resultando, em pouco conhecimento sobre este parâmetro gerado e sua incorporação como critério de projeto de pavimentos.

No Brasil, ainda não há um padrão nacional para este tipo de estudo da deformação permanente no equipamento triaxial de cargas repetidas, mas apenas protocolos de grupos de pesquisa. Muitos trabalhos encontrados na literatura fazem uso de análise da deformação permanente por ensaios de multi-estágios (LIMA, 2016).

A experiência indica a grande importância de bases e sub-bases estáveis e resistentes na vida útil de pavimentos flexíveis. Desta forma, decidiu-se avaliar em laboratório a resistência à deformação permanente de duas amostras de solos da microrregião de Viçosa-MG.

5.2 – Revisão de literatura

5.2.1 – Deformação permanente

Existem dois tipos de deformação permanente em um pavimento: a referente às misturas asfálticas e a referente aos acúmulos de deformações nas camadas abaixo do revestimento, que é o objetivo desta pesquisa e que será estudada durante toda ela. A deformação permanente é diretamente relacionada à história de tensões e tem origem, de acordo com a mecânica dos pavimentos, na fadiga e pela compressão do tráfego que geram uma deformação total na estrutura, desmembrada em duas parcelas: deformação elástica ou resiliente e deformação plástica ou permanente.

A deformação permanente ocorre no material devido à ação de uma carga externa, não sendo recuperável quando a mesma for removida. No caso rodoviário, à medida que o pavimento sofre o efeito das cargas transientes do tráfego, todas as camadas do pavimento podem apresentar acúmulo de deformações permanentes, que se manifestam na superfície das rodovias sob a forma de afundamentos plásticos, comumente chamados de trilhas de roda (REZENDE, 2009).

Apesar dos materiais estarem compactados nas camadas e em parte do subleito, pode existir uma deformação volumétrica que provoca a variação da espessura da camada, formando assim o defeito de afundamento de trilha de roda (ATR). Esta denominação vem do fato de que comumente ocorre numa região determinada da faixa de tráfego que recebe a maior concentração de aplicação do carregamento. Por analogia às ferrovias, esta região, menos concentrada do que o trilho, recebeu a denominação de trilha de rodas e, de fato, corresponde a uma área próxima do eixo da pista e outra próxima da borda (acostamento), correspondente às regiões onde passam as duas rodas dos veículos, uma de cada lado. Nestas, há a tendência de ocorrer deformação permanente quando o material é submetido às solicitações repetidas de tráfego de veículos, resultante de sobre compactação ou mesmo cisalhamento (LIMA, 2016).

O afundamento de trilha de roda é altamente indesejável em uma estrutura de pavimento por diversos motivos, como: acúmulo de água ao longo da trilha de roda, o que traz risco de derrapagem dos veículos, possibilidade de saturação das camadas subjacentes do pavimento, dificuldade de ultrapassagens de veículos ao longo da via e acréscimo no consumo de combustíveis (GUIMARÃES, 2009).

Segundo Werkmeister et al. (2004), o projeto de um pavimento destina-se a encontrar a mais econômica combinação de espessura das camadas e tipos de materiais para compor a estrutura, tendo em conta as propriedades do solo do subleito e o tráfego previsto para atuar durante a vida de serviço. Um pré-requisito para o sucesso da análise de um pavimento é a caracterização comportamental da deformação permanente dos materiais constituintes das camadas de base e sub-base, tipicamente, entre outros aspectos.

É possível classificar os afundamentos de trilha-de-roda de várias formas, sendo uma delas pela proposta de Dawson e Kolisoja (2004) representada na Figura 19, que se refere a camadas granulares sem revestimento ou com revestimentos pouco espessos.

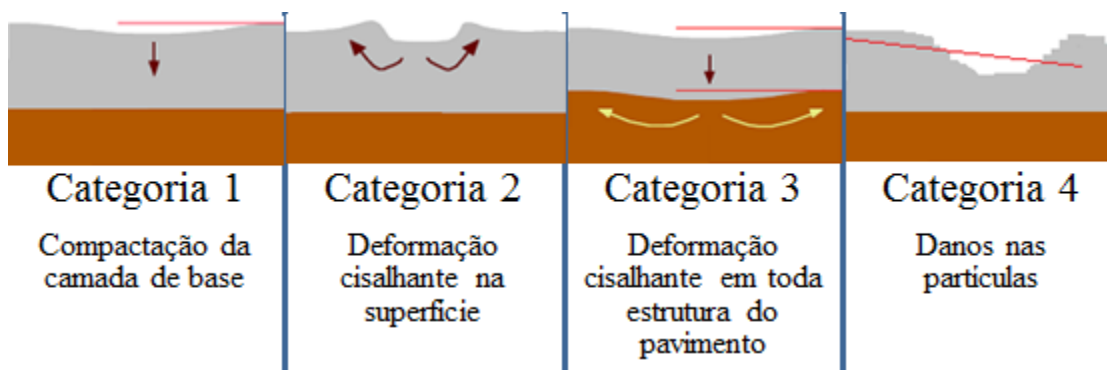


Figura 19– Classificação de afundamentos em 4 categorias [Adaptado de DAWSON e KOLISOJA (2004), e de GUIMARÃES(2009)]

A categoria 1 é a consequência de a camada de base granular tornar-se mais densificada após a compactação da estrutura do pavimento com a passagem do tráfego, na qual há certa mudança volumétrica dessa camada que eventualmente melhora a sua condição estrutural ao aumentar sua densidade e rigidez. O material é principalmente afetado perto da roda e é reconhecido por uma depressão bem pequena em relação à superfície original. Nesse tipo de afundamento, não há grandes deformações, e uma boa compactação durante a construção minimizaria o surgimento deste tipo (LIMA, 2016).

A categoria 2 é gerada por esforços cisalhantes na camada granular de base quando este material é fraco, de pouca resistência ao cisalhamento, ou no revestimento asfáltico por conta de uma dosagem inadequada. A única solução para esse tipo de defeito na base granular é melhorar o agregado em vários aspectos ou reduzir as tensões impostas pelos pneus, pois, tratando o subleito, não ocorrerá efeito positivo algum (GUIMARÃES, 2009).

A categoria 3 é devido aos esforços solicitantes, como na categoria 2, porém englobando toda a estrutura do pavimento, ou seja, todas as suas camadas, inclusive o subleito, tendo, assim, afundamento de todo o pavimento. Vale salientar que caso somente o subleito sofra deformação plástica, as camadas acima afundarão da mesma forma, mas em menor proporção (LIMA, 2016).

A categoria 4 pode ser consequência de algum dano devido à duas propriedades básicas do agregado graúdo: atrito e abrasão. Esse tipo de afundamento é observado por abertura de trincheira no local onde foi detectado o defeito (GUIMARÃES, 2009).

Segundo Lekarp et al. (2000), os diversos fatores que influenciam o comportamento de materiais granulares à deformação permanente são: o estado de tensões, o número de aplicações de carga, a umidade do material, a história de tensões, o tipo de agregado e a sua granulometria.

Resumindo, os principais fatores que causam a deformação permanente são: tensão cisalhante, carregamento repetido, umidade e características do agregado em si (geologia, textura, forma, etc).

5.3 – Materiais e Métodos

5.3.1 – Caracterização da área de estudo e amostragem

Foram utilizados dois solos saprolíticos de ocorrência no relevo da microrregião de Viçosa-MG. Estes solos, denominados de jazida Nô da Silva e jazida Gomide, de textura arenosa, compõem o manto saprolítico, horizonte C, dos solos da região. Apresentam, ainda, coloração rósea, com granulometria de uma areia argilo-siltosa com presença de pedregulho. O solo da jazida Nô da Silva apresenta 14% de pedregulho, 60% de areia, 11% de silte e 15% de argila, e o solo da jazida Gomide apresenta 13% de pedregulho, 63% de areia, 11% de silte e 13% de argila. Quanto à sua classificação, segundo o sistema TRB, o solo da jazida Nô da Silva é um solo do grupo A-2-7(0), e o solo da jazida Gomide é um solo A-2-6 (0). Segundo o sistema de classificação MCT, ambos são NA'.

As amostras utilizadas no estudo foram coletadas em dois taludes de corte, localizados em terrenos pertencentes ao município de Cajuri-MG, situado na microrregião de Viçosa-MG. Também foi empregado na pesquisa o resíduo industrial lama de cal, gerado no processo de produção de celulose, o qual foi coletado no pátio da empresa CENIBRA, na unidade de Ipatinga-MG. Esse resíduo sólido, friável, de granulometria fina e de coloração acinzentada é classificado pela NBR10004 (ABNT, 1987) como resíduo classe II, ou seja, trata-se de um material não inerte. Após a coleta, o resíduo foi

transportado ao Laboratório de Engenharia Civil da UFV e estocado em tambores plásticos que foram hermeticamente vedados, evitando, assim, a sua exposição às intempéries, para posterior utilização nos ensaios geotécnicos.

Esse resíduo, de acordo com a caracterização química apresentada na Tabela 8 no Capítulo 3, apresenta em sua composição química 97,06% de cálcio, dos quais 95,52% se encontram na forma de óxido de cálcio (CaO).

5.3.2 – Dosagens da mistura solo-lama de cal e período de cura

A dosagem de lama de cal utilizada nos estudos de laboratório resultou em um teor de 5% de resíduo em termos de massa seca da mistura solo-lama de cal, o qual foi determinado com base nas experiências de estabilização química de solos da microrregião de Viçosa-MG, nos estudos de Lovato (2004), Pereira (2005), Araújo (2009) e nos resultados obtidos nos Capítulos 3 e 4. O período de cura das misturas solo-lama de cal investigadas foi definido em 28 dias.

As misturas solo-lama de cal foram preparadas, em laboratório Figura 20, da seguinte forma: (i) secagem do resíduo lama de cal em estufa; (ii) adição de resíduo no quantitativo pré-determinado aos solos; (iii) processamento da mistura em peneira de abertura nominal 4,8mm para homogeneização; (iv) adição de água à mistura, seguida por nova homogeneização e empacotamento em sacolas plásticas; e (iv) descanso da mistura por período de 2 horas antes da execução dos ensaios de laboratório, tempo esse representativo da molhagem das misturas e compactação no campo.



Figura 20—Preparação das misturas solo-lama de cal

5.3.3 – Moldagem dos corpos de prova

A moldagem dos corpos de prova foi realizada manualmente, na energia Proctor Intermediária, para os solos no estado natural e para a mistura solo-lama de cal. Para a energia Proctor Modificada, somente foram moldados corpos de prova dos solos no estado natural. Foi compactado um corpo de prova em cada energia, e, depois de compactados, os corpos de prova foram retirados do molde cilíndrico, pesados e medidos com uma precisão de 0,01 g e 0,01 cm, respectivamente. Foram aceitos os corpos de prova com $20 \pm 0,2$ cm de altura e $10,0 \pm 0,2$ cm de diâmetro.

Para as misturas solo-lama de cal, as amostras compactadas na energia Proctor Intermediária foram enroladas por papel filme, identificadas e deixadas em cura na câmara úmida, à temperatura ambiente, por 28 dias.

5.3.4 – Ensaios triaxiais de cargas repetidas

Após a etapa de compactação, os corpos de prova solo-lama de cal e solo natural foram armazenados e, após 28 dias de cura, foram submetidos aos ensaios triaxiais de cargas repetidas (Figura 21) para medição da deformação permanente.



Figura 21–Equipamento triaxial de cargas repetidas do laboratório de pavimentação da UFJF.

Foram, então, utilizados os pares de tensões da Tabela 23 para os 6 ensaios, permanecendo constante ao longo do ensaio para cada corpo de prova. A escolha do estado de tensões foi feita tomando como base os estados de tensões realizados para

análise das deformações permanentes, utilizando como referência os resultados da tese de GUIMARÃES (2009). A quantidade mínima de ciclos de aplicação de carga utilizada foi de 100.000 golpes, com frequência de 1Hz.

Tabela 23 – Definição do estado de tensões para os ensaios de determinação da deformação permanente previstos na pesquisa

Energia Proctor	σ_d (kPa)	σ_3 (kPa)
Intermediário e Modificado	80	40

5.4 – Resultados e discussões

Os gráficos da evolução das deformações plásticas específicas ao longo das solicitações das cargas (N), nos corpos de prova submetidos ao ensaio de deformação permanente, para todas as amostras ensaiadas, estão apresentados nas Figuras 21 e 22.

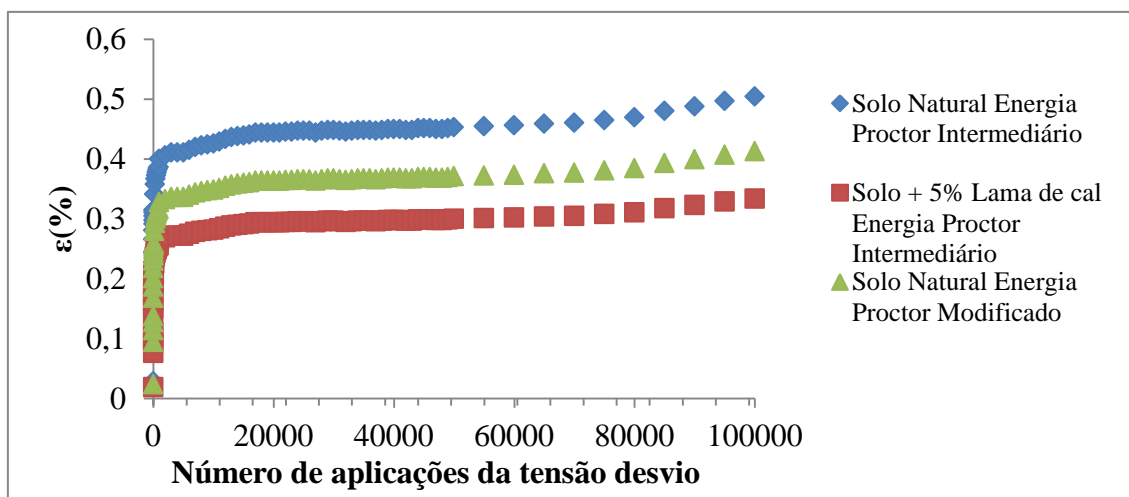


Figura 22–Curva de deformação permanente acumulada (ϵ) versus número de aplicações da tensão desvio para o solo da jazida Nô da Silva em seus estados natural e estabilizado.

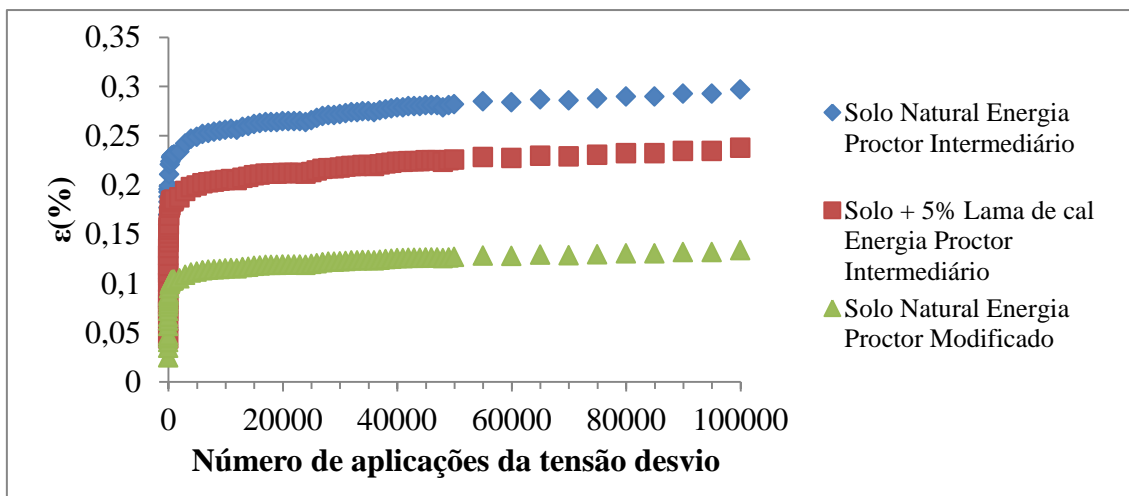


Figura 23—Curva de deformação permanente acumulada (ϵ) versus número de aplicações da tensão desvio para o solo da jazida Gomide nos estados natural e estabilizado.

Com base nas Figuras 22 e 23, verifica-se que houve um crescimento bastante acentuado da deformação permanente acumulada até os primeiros 500 ciclos de tensão, para todos os materiais ensaiados. A partir deste limite, observa-se um crescimento bem menos acentuado e mais uniforme, com o aumento no número de aplicações da tensão desvio, mesmo comportamento observado por Guimarães (2009) e Lima (2016), os quais observaram que as deformações permanentes foram acumuladas mais rapidamente nos primeiros ciclos, variando esse acréscimo na taxa de crescimento de acordo com a aplicação de carga de cada ensaio.

Posteriormente, a taxa de crescimento de deformação permanente diminuiu consideravelmente. Segundo Guimarães (2009) e Lima (2016), todas as curvas em seus estudos descreveram elevada taxa de crescimento nos ciclos iniciais para deformações permanentes acumuladas e, da mesma forma, apresentaram uma taxa bem menor de crescimento após determinado número de ciclos.

Outro comentário que pode ser feito é sobre a variação das deformações permanentes terem tendência a ser nula após certa quantidade de aplicações de carga. Em alguns ensaios, houve tendência da taxa ser nula com o acréscimo dos ciclos de carregamento, porém, como também observou Guimarães (2009) e Lima (2016), a taxa de acréscimo pode não chegar a se tornar nula apesar de diminuir bastante. Essa variação sugere a necessidade de se considerar o condicionamento das amostras no estudo da

deformabilidade permanente dos materiais, quando submetidos a carregamentos repetidos.

Com relação aos solos estudados, observou-se que, para o solo Nô da Silva, as amostras de solo natural, compactadas na energia Proctor Intermediário, foram as que apresentaram maiores valores de deformação permanente. Já as amostras estabilizadas com lama de cal apresentaram os menores valores. Os resultados e análises obtidos dos experimentos realizados indicam a possibilidade de utilização do resíduo lama de cal proveniente das operações da indústria de papel e celulose em base e sub-base de pavimentos flexíveis. O resíduo, quando incorporado a uma matriz de areia argilo-siltosa com presença de pedregulho, em uma porcentagem adequada, pode reduzir os valores de deformação permanente e contribuir na melhoria das propriedades geotécnicas desta, principalmente mecânica. Além disso, a pesquisa configura uma ação mitigadora de impactos ao meio ambiente, uma vez que se procura encontrar um destino para o resíduo descartado em aterro sanitário.

Para o solo Gomide, observou-se que as amostras de solo natural compactadas na Energia Proctor Intermediário foram as que apresentaram maiores valores de deformação permanente. Já as amostras de solo natural compactadas na Energia Proctor Modificada apresentaram os menores valores. Os resultados encontrados também possibilitam a utilização do solo Gomide com o resíduo lama de cal para aplicação em base e sub-base de pavimentos flexíveis.

Considerando o ATR típico de 12,5 mm usual para deformações permanentes em projetos de rodovias de alto volume de tráfego, segundo GUIMARÃES (2009), os valores para os solos estudados são baixos, embora se refiram à contribuição desta camada somente, e considerando uma espessura de 20 cm total deste material.

5.5 – Conclusões

A partir das ideias que justificaram estudar a incorporação do resíduo lama de cal aos solos com porcentagens pré-definidas, os objetivos da pesquisa foram alcançados e, com base no que foi exposto, chega-se às seguintes constatações:

- a) Para os solos e suas misturas analisadas, verificou-se que o resíduo lama de cal exerceu influência bastante significativa na relação entre as deformações permanentes e o número de aplicações de tensão desvio;
- b) De um modo geral, o solo da jazida Gomide foi o que apresentou melhores resultados, uma vez que obteve menores valores de deformação permanente para o mesmo número de aplicações de tensão desvio.

5.6 – Agradecimentos

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior(CAPES), pela concessão da bolsa de pesquisa ao primeiro autor, e à Universidade Federal de Viçosa (UFV), através do Departamento de Engenharia Civil, pelo Suporte na coleta das amostras deformadas de solos e nos ensaios geotécnicos de laboratório. Agradeço também à Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF), ao professor Geraldo Luciano e ao técnico de laboratório Vitor, pela ajuda na realização dos ensaios.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACIKGÖZ, O. e RAUF, R., **Analysis of Parameters Affecting Permanent Deformation in Road Pavement**.2010. Dissertação de Mestrado. Chalmers University of Technology.Göteborg, Sweden. 2010.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS-ASSHTO.**Guide for design of pavements structures 1993**.American Association of State Highway and Transportation Officials. Washington, D.C, 1993.

ARAÚJO, A.F. **Avaliação de misturas de solos estabilizados com cal, em pó e em pasta, para aplicação em rodovias do estado do Ceará**.2009. 175f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes), Centro de Tecnologia -Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Ceará.2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS-ABNT. **NBR 10004/87**: Classificação de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 1987.

BERNUCCI, L. B., MOTTA, L. M. G., CERATTI, J. A. P., et al., **Pavimentação Asfáltica: formação básica para engenheiros**. 4. ed., v.1, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro: Petrobras, ABEDA. 2010.

CASTELO BRANCO, V.T.F., MASAD, E., LITTLE, D.N., et al., “**Caracterização de Forma, Angularidade e Textura de Agregado de Brita Granítica e Escórias de Aciaria Usando o Aggregate Imaging Measurement System (AIMS)**”. XX Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, ANPET, Brasília, DF. 2006.

CERATTI, J.A.P. **Estudo do comportamento a fadiga de solos estabilizados com cimento para utilização em pavimentos**. 1991. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 1991.

DAWSON, A. e KOLISOJA, P., 2004, “**Permanent Deformation**”. ROADDEX II, Northern Periphery. 2004.

GUIMARÃES, A. C. R., **Um Método Mecânico-Empírico para a Previsão da Deformação Permanente em Solos Tropicais Constituintes de Pavimentos**.2009. 367f.Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 2009.

KERN, C. **Análise de desempenho de pavimentos da rede temática de asfalto no Rio Grande do Sul : a avaliação de um pavimento submetido à oscilação do lençol freático**. 2017. 166 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Porto Alegre, BR-RS, 2017.

LEKARP, F; ISACSSON, U; DAWSON, A.; **State of the art. II:permanent strain response of unboun aggregates**. Journal of Transportation Engineering ASCE, Vol. 126(1), Jan/Feb, pp.76-83. 2004

LIMA, C.D. A; **Estudo da Deformação Permanente de Duas Britas Graduadas para Uso em Camadas de Pavimentos**. 2016. 268f.Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro/RJ. 2016.

LOVATO, R.S. **Estudo do comportamento mecânico de um solo laterítico estabilizado com cal, aplicado à pavimentação.**2004. 164f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Rio Grande do Sul. 2004.

MARANGON, M; **Proposição de Estruturas Típicas de Pavimentos de Região de Minas Gerais Utilizando Solos Locais a partir da Pedologia, Metodologia MCT e Resiliência.** 2004. 477f. Tese(Doutorado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro/RJ. 2004.

MARANGON, M. e MOTTA, L. M. G. (2006). **Estudo da deformação permanente de alguns solos argilosos lateríticos visando o uso em pavimentos de baixo volume de tráfego.** In: II SIMPOÓSIO BRASILEIRO DE JOVENS GEOTÉCNICOS, 2., Anais... Nova Friburgo/RJ : ABMS ; UERJ.2006.

MEDINA, J.; MOTTA, L.M.G. **Mecânica dos Pavimentos.** Rio de Janeiro: Editora UFRJ, 2005.

MOTTA, L. M. G; **Método de Dimensionamento de Pavimentos Flexíveis; Critério de Confiabilidade e Ensaio de Cargas Repetidas.** Tese de Doutorado. Programa de Engenharia Civil. COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro/RJ. 1991.

PEREIRA, R.S. **Viabilidade técnica do emprego de resíduo da indústria de celulose para construção de estradas florestais.** 2005. 329f Tese (Doutorado em Ciência Florestal), Universidade Federal de Viçosa, 2005.

PÉREZ, I., MEDINA, L., ROMANA, M.G., **“Permanent Deformation Models for a Granular Material used in Road Pavements”**, Construction and Building Materials v. 20, pp. 790–800. 2006.

REZENDE, D.S.V. **Comportamento Mecânico de Alguns Tipos de Solos Através de Ensaio Triaxiais de Cargas Repetidas para Projetos de Pavimentos Rodoviários.**2009. 144f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – DEC, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Minas Gerais. 2009.

TUTUMLUER, E. e PAN, T., ,**“Aggregate Morphology Affecting Strength and Permanent Deformation Behavior of Unbound Aggregate Materials”**. Journal of Materials in Civil Engineering, v. 20, n. 9, (September), pp. 617-627. 2008

WERKMEISTER, S; DAWSON, A.R.; WELLNER, F. **Permanent deformation of granular materials and the shakedown concept**. Transportation Research Record, Washington, n.757, p.75-81,2001

WERKMEISTER, S., **Permanent Deformation Behavior of Unbound Granular Materials in Pavement Constructions**. Tese de Doutorado. Universidade Técnica de Dresden. 2003.

WERKMEISTER, S., DAWSON, A. R., WELLNER, F., **“Pavement Design for Unbound Granular Materials”**. Journal of Transportation Engineering. 2004.

6 – CONCLUSÕES GERAIS

O objetivo principal desta pesquisa foi estudar o comportamento resiliente de dois solos amostrados da região de Viçosa-MG, visando ao seu emprego nas camadas de sub-base e base de pavimentos flexíveis. Este estudo teve como bases a caracterização geotécnica, os ensaios de resistência à compressão não confinada e a determinação do módulo de resiliência e da deformação permanente, envolvendo os solos mencionados e suas misturas com o resíduo lama de cal, nas energias Proctor Intermediário e Modificado e nas condições ótimas de compactação. A seguir, são apresentadas as principais conclusões obtidas:

- a) O resíduo lama de cal alterou as propriedades mecânicas das amostras dos solos em estudo, mostrando o potencial para a estabilização dos solos, principalmente no teor de lama de cal de 5%;
- b) O acréscimo de lama de cal à granulometria dos solos elevou, em algumas misturas, o peso específico aparente seco máximo e reduziu a umidade ótima, consequência das reações solo-cal;
- c) As melhores respostas mecânicas foram obtidas nas misturas das amostras da jazida Gomide, uma vez que o ganho de resistência à compressão não confinada foi de aproximadamente 73% aos 28 dias de cura em relação à amostra desse solo não estabilizado;
- d) O modelo composto apresentou os melhores resultados para a modelagem do módulo de resiliência, seguido do modelo σ_3 , por se tratar de solos predominantemente arenosos;
- e) Para os solos e suas misturas analisadas, verificou-se que o resíduo lama de cal exerceu influência bastante significativa na relação entre as deformações permanentes e o número de aplicações de tensão desvio. De um modo geral, o solo da jazida Nô da Silva foi o que apresentou melhores resultados;
- f) Atualmente, o emprego de camadas granulares ainda é avaliado pelo ensaio de CBR, entretanto a caracterização adequada dos materiais é de suma importância. A combinação dos resultados obtidos neste estudo mostra a importância de realizar não somente os ensaios típicos exigidos por norma para caracterização

do material antes da aplicação na camada, mas também a análise de sua granulometria e aplicação de ensaios triaxiais de cargas repetidas de longa duração com o propósito de prever o surgimento de deformação permanente;

- g) Por fim, os solos estudados nesta pesquisa apresentaram resultados baixos de deformações permanentes acumuladas, se estimada uma espessura de 20 cm total deste material, comparados ao valor admissível de 12,5 mm de ATR geralmente considerado em projetos de rodovias de alto volume de tráfego.

7 – RECOMENDAÇÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

Como sugestões para trabalhos futuros, citam-se as seguintes:

- ✓ Implantar trechos experimentais, utilizando os solos estudados nesta pesquisa ou misturados com lama de cal nas camadas de sub-base e base de pavimentos flexíveis, com o objetivo de avaliar, sob o tráfego, o fator campo-laboratório.
- ✓ Realizar uma maior amostragem para estudo do comportamento resiliente de solos para verificar as diferenças encontradas nesta pesquisa;
- ✓ Realização de ensaios triaxiais de cargas repetidas para determinação das deformações permanentes com outras razões de tensões, níveis mais elevados de tensões verticais e maiores números de ciclos de aplicação de carga, a fim de comparar os valores obtidos nesta pesquisa e concluir sobre o número mínimo de solicitações de carga necessário para uma avaliação satisfatória das deformações permanentes;
- ✓ Avaliar a resistência à compressão não confinada com tempos mais prolongados de cura para as misturas solo-lama de cal;
- ✓ Avaliar a viabilidade econômica do uso do resíduo lama de cal no melhoramento do solo e o impacto que esta técnica pode trazer ao ambiente, com emprego de camadas de pavimentos.

ANEXO A

Neste anexo são apresentadas as tabelas que ilustram os parâmetros de modelos ou equações de previsão do comportamento resiliente dos solos Nô da Silva e Gomide, objeto de estudo deste trabalho, no estado natural e estabilizados quimicamente com o resíduo lama de cal. Esses parâmetros foram obtidos experimentalmente, em laboratório, através da realização dos ensaios de módulo de resiliência no setor de Ensaios Dinâmicos do Laboratório de Pavimentação da UFJF.

Tabela 24 – Parâmetros obtidos através do ensaio de módulo de resiliência para o solo Nô da Silva, compactado na energia Proctor Intermediária – CPI

ϵ_R (%)	σ_3 (kgf/cm ²)	σ_d (kgf/cm ²)	MR (kgf/cm ²)	Modelo $M_R = K_1 \sigma_3^{K_2}$	Modelo $M_R = K_1 \sigma_d^{K_2}$
0,000016	0,210	0,210	13040	K1 = 113,6 K2 = -0,4999 R ² = 0,65	K1 = 134,6 K2 = -0,3353 R ² = 0,194
0,000088	0,210	0,420	4700		
0,000169	0,210	0,630	3660		
0,000045	0,350	0,350	7640		
0,000206	0,350	0,700	3330		
0,004620	0,350	1,050	2230		
0,000090	0,525	0,525	5670		
0,000414	0,525	1,050	2490		
0,000797	0,525	1,575	1940		
0,000140	0,700	0,700	4900		
0,000579	0,700	1,400	2370		
0,001007	0,700	2,100	2040		
0,000261	1,050	1,050	3940		
0,000805	1,050	2,100	2560		
0,001240	1,050	3,150	2490		
0,000348	1,400	1,400	3950		
0,000922	1,400	2,800	2980		
0,001539	1,400	4,200	2680		

Tabela 25 – Parâmetros obtidos através do ensaio de módulo de resiliência para o solo Nô da Silva, compactado na energia Proctor Intermediária – CP2

ϵ_R (%)	σ_3 (kgf/cm ²)	σ_d (kgf/cm ²)	MR (kgf/cm ²)	Modelo $M_R = K_1 \sigma_3^{K_2}$	Modelo $M_R = K_1 \sigma_d^{K_2}$
0,000052	0,210	0,210	7900	K1 = 108,3 K2 = -0,6341 R ² = 0,68	K1 = 158,8 K2 = -0,3540 R ² = 0,16
0,000124	0,210	0,420	7900		
0,000169	0,210	0,630	4970		
0,000023	0,350	0,350	14940		
0,000150	0,350	0,700	4580		
0,000361	0,350	1,050	2850		
0,000046	0,525	0,525	11070		
0,000315	0,525	1,050	3270		
0,000676	0,525	1,575	2290		
0,000097	0,700	0,700	7070		
0,000483	0,700	1,400	2840		
0,000879	0,700	2,100	2340		
0,000205	1,050	1,050	5020		
0,000700	1,050	2,100	2940		
0,001162	1,050	3,150	2660		
0,000271	1,400	1,400	5060		
0,000854	1,400	2,800	3220		
0,001449	1,400	4,200	2850		

Tabela 26 – Parâmetros obtidos através do ensaio de módulo de resiliência para o solo Nô da Silva, compactado na energia Proctor Intermediária – CP3

ϵ_R (%)	σ_3 (kgf/cm ²)	σ_d (kgf/cm ²)	MR (kgf/cm ²)	Modelo $M_R = K_1 \sigma_3^{K_2}$	Modelo $M_R = K_1 \sigma_d^{K_2}$
0,000016	0,210	0,210	12520	K1 = 77,0 K2 = -0,969 R ² = 0,69	K1 = 153,8 K2 = -0,470 R ² = 0,135
0,000048	0,210	0,420	10240		
0,000060	0,210	0,630	10240		
0,000045	0,350	0,350	10240		
0,000076	0,350	0,700	9070		
0,000267	0,350	1,050	3860		
0,000016	0,525	0,525	32520		
0,000233	0,525	1,050	4430		
0,000522	0,525	1,575	2970		
0,000041	0,700	0,700	16640		
0,000379	0,700	1,400	3630		
0,000746	0,700	2,100	2760		
0,000150	1,050	1,050	6870		
0,000619	1,050	2,100	3330		
0,001054	1,050	3,150	2930		
0,000226	1,400	1,400	6060		
0,000722	1,400	2,800	3550		
0,001385	1,400	4,200	2970		

Tabela 27 – Parâmetros obtidos através do ensaio de módulo de resiliência para o solo Nô da Silva + 5% lama de cal, compactado na energia Proctor Intermediária, com período de cura de 28 dias – CP1

ϵ_R (%)	σ_3 (kgf/cm ²)	σ_d (kgf/cm ²)	MR (kgf/cm ²)	Modelo $M_R = K_1 \sigma_3^{K_2}$	Modelo $M_R = K_1 \sigma_d^{K_2}$
0,000023	0,210	0,210	8930	K1 = 154,0 K2 = -0,4204 R ² = 0,73	K1 = 153,1 K2 = -0,3346 R ² = 0,31
0,000066	0,210	0,420	6200		
0,000148	0,210	0,630	4180		
0,000035	0,350	0,350	9820		
0,000176	0,350	0,700	3900		
0,000342	0,350	1,050	3010		
0,000086	0,525	0,525	5960		
0,000326	0,525	1,050	3160		
0,000589	0,525	1,575	2630		
0,000151	0,700	0,700	4540		
0,000473	0,700	1,400	2900		
0,000789	0,700	2,100	2610		
0,000262	1,050	1,050	3930		
0,000673	1,050	2,100	3060		
0,001037	1,050	3,150	2980		
0,000352	1,400	1,400	3900		
0,000824	1,400	2,800	3330		
0,001349	1,400	4,200	3050		

Tabela 28 – Parâmetros obtidos através do ensaio de módulo de resiliência para o solo Nô da Silva + 5% lama de cal, compactado na energia Proctor Intermediária, com período de cura de 28 dias – CP2

ϵ_R (%)	σ_3 (kgf/cm ²)	σ_d (kgf/cm ²)	MR (kgf/cm ²)	Modelo $M_R = K_1 \sigma_3^{K_2}$	Modelo $M_R = K_1 \sigma_d^{K_2}$
0,000023	0,210	0,210	9060	K1 = 135,4 K2 = -0,4654 R ² = 0,82	K1 = 140,0 K2 = -0,3565 R ² = 0,32
0,000074	0,210	0,420	5550		
0,000154	0,210	0,630	4010		
0,000040	0,350	0,350	8600		
0,000168	0,350	0,700	4080		
0,000360	0,350	1,050	2860		
0,000083	0,525	0,525	6130		
0,000325	0,525	1,050	3170		
0,000587	0,525	1,575	2640		
0,000132	0,700	0,700	5220		
0,000464	0,700	1,400	2960		
0,000770	0,700	2,100	2670		
0,000244	1,050	1,050	4230		
0,000665	1,050	2,100	3100		
0,001024	1,050	3,150	3020		
0,000323	1,400	1,400	4250		
0,001111	1,400	2,800	2470		
0,001844	1,400	4,200	2230		

Tabela 29 – Parâmetros obtidos através do ensaio de módulo de resiliência para o solo Nô da Silva + 5% lama de cal, compactado na energia Proctor Intermediária, com período de cura de 28 dias – CP3

ϵ_R (%)	σ_3 (kgf/cm ²)	σ_d (kgf/cm ²)	MR (kgf/cm ²)	Modelo $M_R = K_1 \sigma_3^{K_2}$	Modelo $M_R = K_1 \sigma_d^{K_2}$
0,000013	0,210	0,210	35830	K1 = 114,4 K2 = -0,9304 R ² = 0,80	K1 = 111,5 K2 = -0,6891 R ² = 0,4375
0,000018	0,210	0,420	25830		
0,000024	0,210	0,630	25830		
0,000040	0,350	0,350	23000		
0,000042	0,350	0,700	16270		
0,000140	0,350	1,050	7350		
0,000083	0,525	0,525	8300		
0,000138	0,525	1,050	7490		
0,000332	0,525	1,575	4670		
0,000041	0,700	0,700	16740		
0,000269	0,700	1,400	5100		
0,000522	0,700	2,100	3950		
0,000120	1,050	1,050	8580		
0,000455	1,050	2,100	4520		
0,000777	1,050	3,150	3970		
0,000192	1,400	1,400	7170		
0,000607	1,400	2,800	4520		
0,001068	1,400	4,200	3860		

Tabela 30 – Parâmetros obtidos através do ensaio de módulo de resiliência para o solo Gomide, compactado na energia Proctor Intermediária – CP1

ϵ_R (%)	σ_3 (kgf/cm ²)	σ_d (kgf/cm ²)	MR (kgf/cm ²)	Modelo $M_R = K_1 \sigma_3^{K_2}$	Modelo $M_R = K_1 \sigma_d^{K_2}$
0,000023	0,210	0,210	13040	K1 = 120,4 K2 = -0,5867 R ² = 0,84	K1 = 139,0 K2 = -0,4029 R ² = 0,30
0,000054	0,210	0,420	7680		
0,000117	0,210	0,630	5260		
0,000026	0,350	0,350	13070		
0,000137	0,350	0,700	5000		
0,000305	0,350	1,050	3380		
0,000069	0,525	0,525	7380		
0,000279	0,525	1,050	3690		
0,000537	0,525	1,575	2890		
0,000105	0,700	0,700	6520		
0,000405	0,700	1,400	3390		
0,000756	0,700	2,100	2720		
0,000210	1,050	1,050	4910		
0,000639	1,050	2,100	3220		
0,001229	1,050	3,150	2510		
0,000305	1,400	1,400	4500		
0,000892	1,400	2,800	3080		
0,001670	1,400	4,200	2470		

Tabela 31 – Parâmetros obtidos através do ensaio de módulo de resiliência para o solo Gomide, compactado na energia Proctor Intermediária – CP2

ϵ_R (%)	σ_3 (kgf/cm ²)	σ_d (kgf/cm ²)	MR (kgf/cm ²)	Modelo $M_R = K_1 \sigma_3^{K_2}$	Modelo $M_R = K_1 \sigma_d^{K_2}$
0,000023	0,210	0,210	9900	K1 = 83,4 K2 = -0,7555 R ² = 0,62	K1 = 80,7 K2 = -0,5966 R ² = 0,29
0,000074	0,210	0,420	7900		
0,000090	0,210	0,630	6880		
0,000040	0,350	0,350	14940		
0,000105	0,350	0,700	6530		
0,000292	0,350	1,050	3530		
0,000040	0,525	0,525	12610		
0,000264	0,525	1,050	3910		
0,000536	0,525	1,575	2890		
0,000080	0,700	0,700	8550		
0,000404	0,700	1,400	3400		
0,000766	0,700	2,100	2690		
0,000191	1,050	1,050	5400		
0,000645	1,050	2,100	3190		
0,001061	1,050	3,150	2910		
0,000265	1,400	1,400	5190		
0,000803	1,400	2,800	3420		
0,001373	1,400	4,200	3000		

Tabela 32 – Parâmetros obtidos através do ensaio de módulo de resiliência para o solo Gomide, compactado na energia Proctor Intermediária – CP3

ϵ_R (%)	σ_3 (kgf/cm ²)	σ_d (kgf/cm ²)	MR (kgf/cm ²)	Modelo $M_R = K_1 \sigma_3^{K_2}$	Modelo $M_R = K_1 \sigma_d^{K_2}$
0,000013	0,210	0,210	20250	K1 = 112,90 K2 = -0,6716 R ² = 0,75	K1 = 121,8 K2 = -0,4928 R ² = 0,30
0,000036	0,210	0,420	11300		
0,000092	0,210	0,630	6740		
0,000016	0,350	0,350	20880		
0,000121	0,350	0,700	5700		
0,000302	0,350	1,050	3410		
0,000059	0,525	0,525	8710		
0,000276	0,525	1,050	3730		
0,000548	0,525	1,575	2830		
0,000111	0,700	0,700	6190		
0,000412	0,700	1,400	3330		
0,000749	0,700	2,100	2750		
0,000201	1,050	1,050	5110		
0,000630	1,050	2,100	3270		
0,001038	1,050	3,150	2980		
0,000271	1,400	1,400	5070		
0,000770	1,400	2,800	3570		
0,001359	1,400	4,200	3030		

Tabela 33 – Parâmetros obtidos através do ensaio de módulo de resiliência para o solo Gomide + 5% lama de cal, compactado na energia Proctor Intermediária, com período de cura de 28 dias – CP1

ϵ_R (%)	σ_3 (kgf/cm ²)	σ_d (kgf/cm ²)	MR (kgf/cm ²)	Modelo $M_R = K_1 \sigma_3^{K_2}$	Modelo $M_R = K_1 \sigma_d^{K_2}$
0,000023	0,210	0,210	8930	K1 = 180,4 K2 = -0,4099 R ² = 0,74	K1 = 202,6 K2 = -0,2759 R ² = 0,25
0,000061	0,210	0,420	6700		
0,000119	0,210	0,630	5200		
0,000032	0,350	0,350	4000		
0,000133	0,350	0,700	5160		
0,000290	0,350	1,050	3550		
0,000076	0,525	0,525	6670		
0,000282	0,525	1,050	3650		
0,000498	0,525	1,575	3110		
0,000125	0,700	0,700	5500		
0,000403	0,700	1,400	3410		
0,000698	0,700	2,100	2950		
0,000213	1,050	1,050	4840		
0,000602	1,050	2,100	3420		
0,000960	1,050	3,150	3220		
0,000303	1,400	1,400	4540		
0,000757	1,400	2,800	3630		
0,001219	1,400	4,200	3380		

Tabela 34 – Parâmetros obtidos através do ensaio de módulo de resiliência para o solo Gomide + 5% lama de cal, compactado na energia Proctor Intermediária, com período de cura de 28 dias – CP2

ϵ_R (%)	σ_3 (kgf/cm ²)	σ_d (kgf/cm ²)	MR (kgf/cm ²)	Modelo $M_R = K_1 \sigma_3^{K_2}$	Modelo $M_R = K_1 \sigma_d^{K_2}$
0,000023	0,210	0,210	8870	K1 = 193,6 K2 = -0,3523 R ² = 0,73	K1 = 210,7 K2 = -0,2491 R ² = 0,24
0,000076	0,210	0,420	5410		
0,000128	0,210	0,630	4820		
0,000043	0,350	0,350	8010		
0,000165	0,350	0,700	4170		
0,000302	0,350	1,050	3410		
0,000084	0,525	0,525	6040		
0,000298	0,525	1,050	3460		
0,000526	0,525	1,575	2950		
0,000133	0,700	0,700	5170		
0,000418	0,700	1,400	3290		
0,000715	0,700	2,100	2880		
0,000207	1,050	1,050	4980		
0,000618	1,050	2,100	3330		
0,000972	1,050	3,150	3180		
0,000284	1,400	1,400	4840		
0,000759	1,400	2,800	3620		
0,000122	1,400	4,200	3380		

Tabela 35 – Parâmetros obtidos através do ensaio de módulo de resiliência para o solo Gomide + 5% lama de cal, compactado na energia Proctor Intermediária, com período de cura de 28 dias – CP3

ϵ_R (%)	σ_3 (kgf/cm ²)	σ_d (kgf/cm ²)	MR (kgf/cm ²)	Modelo $M_R = K_1 \sigma_3^{K_2}$	Modelo $M_R = K_1 \sigma_d^{K_2}$
0,000013	0,210	0,210	10830	K1 = 111,5 K2 = -0,6616 R ² = 0,75	K1 = 132,0 K2 = -0,4519 R ² = 0,26
0,000044	0,210	0,420	9330		
0,000106	0,210	0,630	5860		
0,000017	0,350	0,350	20010		
0,000128	0,350	0,700	5380		
0,000298	0,350	1,050	3450		
0,000055	0,525	0,525	9280		
0,000287	0,525	1,050	3590		
0,000551	0,525	1,575	2810		
0,000101	0,700	0,700	6810		
0,000428	0,700	1,400	3200		
0,000774	0,700	2,100	2660		
0,000195	1,050	1,050	5270		
0,000663	1,050	2,100	3110		
0,001081	1,050	3,150	2860		
0,000289	1,400	1,400	4750		
0,000883	1,400	2,800	3300		
0,001361	1,400	4,200	3030		

Tabela 36 – Parâmetros obtidos através do ensaio de módulo de resiliência para o solo Nô da Silva + 5% lama de cal, compactado na energia Proctor Modificada, com período de cura de 28 dias – CP1

ϵ_R (%)	σ_3 (kgf/cm ²)	σ_d (kgf/cm ²)	MR (kgf/cm ²)	Modelo $M_R = K_1 \sigma_3^{K_2}$	Modelo $M_R = K_1 \sigma_d^{K_2}$
0,000023	0,210	0,210	13040	K1 = 123,8 K2 = -0,6463 R ² = 0,66	K1 = 187,4 K2 = -0,3308 R ² = 0,14
0,000046	0,210	0,420	10700		
0,000078	0,210	0,630	7960		
0,000035	0,350	0,350	9000		
0,000091	0,350	0,700	7520		
0,000288	0,350	1,050	3580		
0,000036	0,525	0,525	14340		
0,000270	0,525	1,050	3810		
0,000576	0,525	1,575	2690		
0,000081	0,700	0,700	8510		
0,000419	0,700	1,400	3280		
0,000766	0,700	2,100	2690		
0,000189	1,050	1,050	5460		
0,000626	1,050	2,100	3290		
0,001006	1,050	3,150	3070		
0,000273	1,400	1,400	5030		
0,000751	1,400	2,800	3660		
0,001273	1,400	4,200	3230		

Tabela 37 – Parâmetros obtidos através do ensaio de módulo de resiliência para o solo Nô da Silva + 5% lama de cal, compactado na energia Proctor Modificada, com período de cura de 28 dias – CP2

ϵ_R (%)	σ_3 (kgf/cm ²)	σ_d (kgf/cm ²)	MR (kgf/cm ²)	Modelo $M_R = K_1 \sigma_3^{K_2}$	Modelo $M_R = K_1 \sigma_d^{K_2}$
0,000023	0,210	0,210	7900	K1 = 166,4 K2 = -0,4171 R ² = 0,65	K1 = 215,9 K2 = -0,2298 R ² = 0,15
0,000062	0,210	0,420	6610		
0,000130	0,210	0,630	4740		
0,000035	0,350	0,350	9770		
0,000153	0,350	0,700	4480		
0,000338	0,350	1,050	3050		
0,000081	0,525	0,525	6280		
0,000304	0,525	1,050	3390		
0,000599	0,525	1,575	2590		
0,000119	0,700	0,700	5760		
0,000451	0,700	1,400	3050		
0,000796	0,700	2,100	2590		
0,000212	1,050	1,050	4850		
0,000664	1,050	2,100	3100		
0,001038	1,050	3,150	2980		
0,000277	1,400	1,400	4950		
0,000779	1,400	2,800	3530		
0,001246	1,400	4,200	3300		

Tabela 38 – Parâmetros obtidos através do ensaio de módulo de resiliência para o solo Nô da Silva + 5% lama de cal, compactado na energia Proctor Modificada, com período de cura de 28 dias – CP3

ϵ_R (%)	σ_3 (kgf/cm ²)	σ_d (kgf/cm ²)	MR (kgf/cm ²)	Modelo $M_R = K_1 \sigma_3^{K_2}$	Modelo $M_R = K_1 \sigma_d^{K_2}$
0,000023	0,210	0,210	9920	K1 = 155,6 K2 = -0,4291 R ² = 0,63	K1 = 198,0 K2 = -0,2462 R ² = 0,16
0,000055	0,210	0,420	7430		
0,000133	0,210	0,630	4660		
0,000039	0,350	0,350	8870		
0,000165	0,350	0,700	4170		
0,000362	0,350	1,050	2840		
0,000086	0,525	0,525	5930		
0,000328	0,525	1,050	3140		
0,000641	0,525	1,575	2420		
0,000120	0,700	0,700	5700		
0,000475	0,700	1,400	2890		
0,000841	0,700	2,100	2450		
0,000221	1,050	1,050	4660		
0,000684	1,050	2,100	3010		
0,001079	1,050	3,150	2860		
0,000289	1,400	1,400	4750		
0,000803	1,400	2,800	3420		
0,001307	1,400	4,200	3150		

Tabela 39 – Parâmetros obtidos através do ensaio de módulo de resiliência para o solo Gomide + 5% lama de cal, compactado na energia Proctor Modificada, com período de cura de 28 dias – CP1

ϵ_R (%)	σ_3 (kgf/cm ²)	σ_d (kgf/cm ²)	MR (kgf/cm ²)	Modelo $M_R = K_1 \sigma_3^{K_2}$	Modelo $M_R = K_1 \sigma_d^{K_2}$
0,000023	0,210	0,210	13040	K1 =115,7 K2 = -0,5771 R ² = 0,90	K1 = 99,7 K2 = -0,5002 R ² = 0,50
0,000056	0,210	0,420	7350		
0,000101	0,210	0,630	6140		
0,000033	0,350	0,350	10540		
0,000121	0,350	0,700	5670		
0,000279	0,350	1,050	3690		
0,000074	0,525	0,525	6880		
0,000283	0,525	1,050	3640		
0,000542	0,525	1,575	2860		
0,000129	0,700	0,700	5300		
0,000447	0,700	1,400	3070		
0,000794	0,700	2,100	2590		
0,000248	1,050	1,050	4150		
0,000765	1,050	2,100	2690		
0,001193	1,050	3,150	2590		
0,000397	1,400	1,400	3460		
0,001031	1,400	2,800	2660		
0,001593	1,400	4,200	2590		

Tabela 40 – Parâmetros obtidos através do ensaio de módulo de resiliência para o solo Gomide + 5% lama de cal, compactado na energia Proctor Modificada, com período de cura de 28 dias – CP2

ϵ_R (%)	σ_3 (kgf/cm ²)	σ_d (kgf/cm ²)	MR (kgf/cm ²)	Modelo $M_R = K_1 \sigma_3^{K_2}$	Modelo $M_R = K_1 \sigma_d^{K_2}$
0,000023	0,210	0,210	11920	K1 = 234,7 K2 = -0,3771 R ² = 0,70	K1 = 261,9 K2 = -0,2600 R ² = 0,22
0,000050	0,210	0,420	8230		
0,000120	0,210	0,630	5130		
0,000032	0,350	0,350	10850		
0,000134	0,350	0,700	5110		
0,000255	0,350	1,050	4030		
0,000057	0,525	0,525	8930		
0,000236	0,525	1,050	4370		
0,000415	0,525	1,575	3740		
0,000106	0,700	0,700	6460		
0,000320	0,700	1,400	4290		
0,000541	0,700	2,100	3810		
0,000170	1,050	1,050	6040		
0,000477	1,050	2,100	4310		
0,000758	1,050	3,150	4080		
0,000230	1,400	1,400	5970		
0,000594	1,400	2,800	4620		
0,000961	1,400	4,200	4280		

Tabela 41 – Parâmetros obtidos através do ensaio de módulo de resiliência para o solo Gomide + 5% lama de cal, compactado na energia Proctor Modificada, com período de cura de 28 dias – CP3

ϵ_R (%)	σ_3 (kgf/cm ²)	σ_d (kgf/cm ²)	MR (kgf/cm ²)	Modelo $M_R = K_1 \sigma_3^{K_2}$	Modelo $M_R = K_1 \sigma_d^{K_2}$
0,000015	0,210	0,210	13450	K1 = 184,5 K2 = -0,4545 R ² = 0,80	K1 = 189,3 K2 = -0,3506 R ² = 0,31
0,000056	0,210	0,420	7290		
0,000107	0,210	0,630	5760		
0,000032	0,350	0,350	10620		
0,000129	0,350	0,700	5310		
0,000266	0,350	1,050	3870		
0,000065	0,525	0,525	7890		
0,000247	0,525	1,050	4170		
0,000464	0,525	1,575	3340		
0,000103	0,700	0,700	6690		
0,000359	0,700	1,400	3830		
0,000633	0,700	2,100	3250		
0,000187	1,050	1,050	5510		
0,000550	1,050	2,100	3740		
0,000877	1,050	3,150	3520		
0,000252	1,400	1,400	5450		
0,000676	1,400	2,800	4060		
0,001119	1,400	4,200	3680		