UNIVERSIDADE REGIONAL DO NOROESTE DO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL – UNIJUI

CARINE NORBACK

ESTUDO DA MISTURA IDEAL DE SOLO ARGILOSO LATERÍTICO DO NOROESTE DO RIO GRANDE DO SUL E AREIA PARA USO EM PAVIMENTOS ECONÔMICOS

Ijuí

2015

CARINE NORBACK

ESTUDO DA MISTURA IDEAL DE SOLO ARGILOSO LATERÍTICO DO NOROESTE DO RIO GRANDE DO SUL E AREIA PARA USO EM PAVIMENTOS ECONÔMICOS

Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Civil apresentado como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Civil.

Orientador (a): Me. Carlos Alberto Simões Pires Wayhs

Ijuí

2015

CARINE NORBACK

ESTUDO DA MISTURA IDEAL DE SOLO ARGILOSO LATERÍTICO DO NOROESTE DO RIO GRANDE DO SUL E AREIA PARA USO EM PAVIMENTOS ECONÔMICOS

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para a obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL e aprovado em sua forma final pelo professor orientador e pelo membro da banca examinadora.

Ijuí, 16 de Novembro de 2015

Prof. Me. Carlos Alberto Simões Pires Wayhs

Doutor pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul - Orientador

Prof. Me. Lia Geovana Sala

Coordenador do Curso de Engenharia Civil/UNIJUÍ

Dedico aos meus pais, por que essa conquista é nossa!

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus e ao meu Anjo da Guarda por sempre me protegerem e nunca me desampararem, por me proporcionarem todas as coisas maravilhosas que ocorreram na minha vida e durante a faculdade. Obrigada!

Aos meus pais, Rosane e Idemar, que nunca mediram esforços para me ver feliz. A você mãe, que onde estiver, sei que olha e intercede por mim. Ao meu pai, que pelo destino foi pai e mãe, um exemplo de ser humano, de amor incondicional, de sabedoria e inteligência, meu herói! A minha boadrasta Genciana, mãe de coração, que sempre deu o seu melhor para me ver melhor. Agradeço pelas orações, pelos pensamentos positivos, pelas vezes em que choraram e vibraram comigo, por sempre estarem presentes, não tenho palavras pra lhes agradecer. Eu os amo!

Ao professor, amigo e orientador Mestre Carlos Alberto Simões Pires Wahys, pela orientação ao longo deste trabalho, por atender minhas ligações e responder meus e-mails com a maior rapidez possível, por se mostrar sempre prestativo e disponível para nossas reuniões e conversas, que principalmente, me apresentou ao mundo da Geotecnia. Obrigada, pois sem sua confiança e apoio, não teria conseguido.

Agradeço também a Cândida Bernardi, que sempre atendeu minhas ligações com o maior bom humor, sempre disposta a ajudar compartilhando comigo seu material de pesquisa, seu conhecimento. Obrigada pela confiança e amizade.

Aos funcionários do Laboratório de Engenharia Civil, ao Laboratorista Luiz, pelo apoio, “puxões de orelha”, paciência e disposição em ajudar, mostrando-se prestativo para o que sempre precisei.

A todos os professores do curso, pelos ensinamentos passados, pela amizade e apoio ao longo da graduação. Em especial a professora Cristina Elisa Possobon, por sempre se mostrar amiga, aconselhando e ajudando ao máximo nas horas de dificuldade. Tenho-a como exemplo de mulher e profissional.

As secretárias do curso Cassiana e Rosane, sempre prontas para ajudarem com o maior bom humor e paciência, nunca fazendo corpo mole.

Ao grupo PET, aos voluntários e egressos, pelas ajudas nos ensaios, pelos conselhos, estudos, risadas, abraços sinceros, pelos elos de amizades, enfim, por somarem ao longo dessa caminhada.

Ao grupo de pesquisa de Geotecnia, em especial, aos participantes, Mariana, Lucas e André, por serem amigos irmãos, sempre me ajudando e estendendo a mão amiga, sempre presente, com uma palavra, um abraço ou pelo simples fato de me ouvirem, por fazerem minhas manhãs mais alegres e divertidas. Levo vocês no meu coração!

As minhas amigas, presente da engenharia, Betina e Rayanne, pelas noites estudando a distancia, pelas dúvidas esclarecidas, pelas ligações de madrugada, pelas preocupações divididas, pelas angustias compartilhadas, pelas caronas, pelas festas, por terem paciência, por se mostrarem amigas, por compartilharem comigo os momentos bons e ruins. A vocês desejo tudo de melhor, sempre, eu amo vocês!

A minha família, que sempre me apoiou ao longo do curso. Aos verdadeiros amigos, que não desistiram no primeiro 'Não poderei comparecer, pois estou estudando!', que sempre participaram da minha vida acadêmica, mesmo indiretamente nas conversas e nos encontros de finais de semana. Agradeço enormemente aos amigos que me acolheram em Santa Maria, pelo período que realizei meus ensaios lá. A todos, obrigada de coração!

Por fim, agraço a todos que de alguma forma contribuíram para que chegasse até aqui.

Se não puder voar, corra. Se não puder correr, ande. Se não puder andar, rasteje, mas continue em frente de qualquer jeito.

Martin Luther King

RESUMO

Norback, Carine. **ESTUDO DA MISTURA IDEAL DE SOLO ARGILOSO LATERÍTICO DO NOROESTE DO RIO GRANDE DO SUL E AREIA PARA USO EM PAVIMENTOS ECONÔMICOS**. 2015. Trabalho de Conclusão de Curso. Curso de Engenharia Civil, Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul – UNIJUÍ, Ijuí, 2015.

O Brasil, país que tem a necessidade de investimentos de vulto em infraestrutura, a inserção de conceitos de sustentabilidade e responsabilidade social, e a escassez de recursos financeiros para atendimento das demandas, que certamente serão ampliadas nos próximos anos pela conjuntura econômica e política nacional, são fortes razões para o uso de materiais alternativos locais na execução de construção e manutenção de rodovias. Nesse contexto, o presente trabalho de conclusão de curso tem como objetivo descrever parte da pesquisa que pretende avaliar a mistura ideal de areia e de solo laterítico argiloso proveniente da cidade de Ijuí, em bases e sub-bases para execução de pavimentos mais econômicos. Este solo utilizado localmente como subleito de rodovias pavimentadas e de leito estradal de não pavimentadas, pode ser encontrado facilmente na região, contribuindo para a sua imediata obtenção e complementarmente reduzindo drasticamente o passivo ambiental que a pavimentação de vias provoca. A pesquisa baseia-se predominantemente na metodologia proposta pelos pesquisadores Job Shuji Nogami e Douglas Fadul Villibor para utilização em pavimentos econômicos de misturas ALA, de solos lateríticos e agregados miúdos. Os resultados da pesquisa com algumas misturas de solo e pó de pedra tiveram resultado parcialmente satisfatórios. Já esta pesquisa, que está integrada a projeto de estudo de solo argiloso laterítico regional para uso em pavimentos econômicos, pretende comprovar a possibilidade do emprego de misturas de solo e areia comum utilizada regularmente em obras de construção civil regionais na constituição de bases e sub-bases, respectivamente, de rodovias vicinais e pavimentos urbanos sujeitos a baixo volume de tráfego, além de sinalizar qual seria a proporção ideal destes dois materiais.

PALAVRAS-CHAVE: Solos. Materiais Alternativos. Pavimentação. Argilas Lateríticas. Misturas ALA.

ABSTRACT

NORBACK, Carine. **ESTUDO DA MISTURA IDEAL DE SOLO ARGILOSO LATERÍTICO DO NOROESTE DO RIO GRANDE DO SUL E AREIA PARA USO EM PAVIMENTOS ECONÔMICOS**. 2015. Trabalho de Conclusão de Curso. Curso de Engenharia Civil, Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul – UNIJUÍ, Ijuí, 2015.

In a country like Brazil, which requires large investments in infrastructure, the inclusion of sustainability and social responsibility concepts, and insufficient financial resources to attend the demands are important arguments to the use of local materials in the execution of construction and maintenance of highways. In this context, this study has the objective to describe a part of the research that intend to evaluate the use of lateritic clay soil from the Ijuí city, in bases and subbases for pavement running more economical in nature and mixed with sand and stone powder. This soil eventually used in the region as subgrade of paved and roadbed of unpaved roads, can easily be found in this region, which contributes to its easy obtainment and additionally dramatically reducing environmental liabilities that causes road paving. The research utilizes both traditional methodology, widely recognized as not very suitable for tropical soils as this thin lateritic soil, as well as the MCT methodology, created specifically for these types of soils. The results of this research encouraged continuing studies, since in the current stage of the investigation, it intend to prove the possibility the use of this soil in bases and subbases constitution, respectively, of side roads and pavements subject to urban low traffic volume.

KEY WORDS: Soil, Alternative Materials, Paving, lateritic clays, ALA mixtures.

LISTA DE FIGURAS

Figura 01: Estrutura dos pavimentos 20
Figura 02: Camadas que compõem o pavimento 21
Figura 03: Seção típica de um pavimento econômico 24
Figura 04: Ocorrência de solos finos arenosos e argilosos, de comportamento laterítico no Brasil 25
Figura 05: Ocorrência de argilas lateríticas no Estado do Rio Grande do Sul 26
Figura 06: Perfil resultante da decomposição de rochas 27
Figura 07: Classificação Rodoviária de Solos 36
Figura 08: Foto do talude 39
Figura 09: Areia utilizada na pesquisa 40
Figura 10: Compactação do ensaio Mini-CBR 44
Figura 11: Corpos de Prova moldados e em imersão 45
Figura 12: Corpos de Prova sendo rompidos 46
Figura 13: Realização do Ensaio 47
Figura 14: Equipamento para a realização do ensaio Mini-MCV 49
Figura 15: Ensaio sendo executado 49
Figura 16: Equipamento para ensaio de Perda de Massa por Imersão 51
Figura 17: Corpos de prova sendo ensaiados 51
Figura 18: Ensaio de Sedimentação das Misturas ALA 53
Figura 19: Gráfico das Granulometrias do Solo Natural, da Areia e misturas ALA 54
Figura 20: Curva de Compactação do Solo Natural 57
Figura 21: Curva de Compactação da Mistura ALA 20% 58
Figura 22: Curva de Compactação da Mistura ALA 30% 59
Figura 23: Curva de Compactação da Mistura ALA 40% 60
Figura 24: Reta de tendência w_{ot} x $PEAS_{max}$ 61
Figura 25: Comparação dos resultados de ISC para o solo natural e misturas ALA 62
Figura 26: Curva de compactação ALA 40% 65
Figura 27: Curva de deformabilidade ALA 40% 66

Figura 28: Curva Mini-MCV x Pi da ALA 40% 67
Figura 29: Classificação MCT para todas as amostras 69
Figura 30: Curvas de variação dos Mini-CBR 72

LISTA DE TABELAS

Tabela 01: Comparação de preços com diferentes bases 25
Tabela 02: Conjunto de letras para determinação dos diferentes tipos de solos 29
Tabela 03: Classificação SUCS 30
Tabela 04: Classificação Rodoviária de Solos 33
Tabela 05: Diferentes energias de compactação 42
Tabela 06: Relação dos corpos de prova que serão moldados 52
Tabela 07: Limites de Atterberg do solo natural e das misturas 55
Tabela 08: Resultados do Índice de Grupo do solo natural e das misturas 56
Tabela 09: Umidades ótimas nas diferentes energias de compactação 57
Tabela 10: Umidades ótimas nas diferentes energias de compactação 58
Tabela 11: Diferentes energias de compactação e massa específica da ALA 30% 59
Tabela 12: Diferentes energias de compactação e massa específica da ALA 40% 60
Tabela 13: Expansão no Ensaio ISC do Solo Natural e Misturas 63
Tabela 14: Valores de d' e c' 66
Tabela 15: Resultados para PI 68
Tabela 16: Valores de e' para todas as amostras 68
Tabela 17: Classificação MCT do Solo Natural e Misturas 70
Tabela 18: PEASmax x Wot do solo e das amostras do ensaio M2 71
Tabela 19: Relação RIS 73
Tabela 20: Relação PSI 73

LISTA DE SIGLAS

AASHTO – American Association of State Highway and Transportation Officials

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ALA – Argila Laterítica mais Areia

ALPP – Argila Laterítica mais Pó de Pedra

ASTM – American Association for Testing and Materials

BGS – Brita Graduada Simples

c' – coeficiente angular

CBR – California Bearing Ratio

CBUQ – Concreto Betuminoso Usinado a Quente

d' – coeficiente d'

DNER-ME – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem – Método de Ensaio

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes

e' – índice de laterização

g – Unidade de medida de peso "gramas"

HRB – Highway Research Board

IG – Índice de Grupo

IP – Índice de Plasticidade

ISC – Índice de Suporte Califórnia

LA – Areia laterítica

LA'- Laterítico Arenoso

LEC- Laboratório de Engenharia Civil da UNIJUÍ

LG'- Laterítico Argiloso

LL – Limite de Liquidez

LP – Limite de Plasticidade

MCT – Miniatura Compactação Tropical

MCV – Moisture Condition Value

MEAS – Massa Especifica Aparente Seca

MH – Macadame Hidráulico

MS – Macadame Seco

NA – Areia Não Laterítica

NA' – Não Laterítico Arenoso

NG' – Não Laterítico Argiloso

NS' – Não Laterítico Siltoso

PET- Programa de Educação Tutorial

Pi – Perda de Massa por Imersão

PMF – Pré-misturado a Frio

RS – Rio Grande do Sul

SAL – Solo Argiloso Laterítico

SAFL – Solos Arenosos Finos Lateríticos

SLAD – Solo Laterítico – Agregado Descontinuo

SNV – Sistema Nacional de Viação do DNIT

SUCS – Sistema Unificado de Classificação de Solos

TSD – Tratamento Superficial Duplo

UNIJUÍ – Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 15

1.1 **Contexto** 16

1.2 **Problema** 17

1.2.1 Questões de Pesquisa 17

1.2.2 Objetivos de Pesquisa 17

2 REVISÃO DA LITERATURA 18

2.1 **Pavimentos** 18

2.1.1 Camadas do Pavimento 20

2.1.2 Materiais usados na pavimentação 21

2.1.3 Materiais Pétreos 21

2.1.4 Materiais Terrosos 22

2.1.5 Materiais alternativos 22

2.2 **Pavimentos Econômicos** 23

2.3 **Formação dos Solos** 26

2.3.1 Classificação dos Solos 28

2.3.1.1 Sistema Unificado de Classificação de Solos – SUCS 28

2.3.1.2 Sistema Rodoviário de Classificação - HRB/AASHTO 30

2.3.2 Classificação MCT 33

2.4 **Metodologia MCT (Miniatura Compactada Tropical)** 34

3 METODOLOGIA 38

3.1 **Estratégia de pesquisa** 38

3.2 **Delineamento** 38

3.3 **Materiais** 39

3.3.1 Solo 39
3.3.2 Areia 40
3.3.3 Misturas 40
3.4 **Ensaios Laboratoriais Tradicionais** 41
3.4.1 Preparação das Amostras 41
3.4.2 Análise Granulométrica das Amostras 41
3.4.3 Ensaios para a classificação tradicional dos solos 42
3.4.4 Compactação do Solo 42
3.4.5 Índice de Suporte Califórnia (ISC) 43
3.5 **Ensaios da Sistematica MCT** 43
3.5.1 Ensaio de Mini-CBR (M2) 43
3.5.2 Ensaio de Contração (M3) 46
3.5.3 Ensaio de Compactação Mini-MCV (M5) 48
3.5.4 Ensaio de Perda de Massa por Imersão (M8) 50
4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS 53
4.1 **Análise Granulométrica e Limites de Consistência** 53
4.2 **Classificação do Solo e das Misturas** 55
4.2.1 Sistema Unificado de Classificação de Solo – SUCS 55
4.2.2 Sistema Rodoviário de Classificação (HRB/AASHTO) 56
4.3 **Compactação** 56
4.4 **Índice de Suporte Califórnia (ISC/CBR)** 61
4.5 **Ensaios da Metologiam MCT** 64
4.5.1 Ensaio de Mini-MCV (M5) 64
4.5.2 Ensaio da Perda de Massa por Imersão (M8) 67
4.5.3 Classificação Geotécnica MCT (M9) 68

4.5.4 Ensaio de Contração (M3) 70

4.5.5 Ensaio Mini-CBR (M2)..... 70

5 CONCLUSÃO 75

BIBLIOGRAFIA..... 77

1 INTRODUÇÃO

Ao analisar a malha rodoviária do país, percebe-se que a extensão de rodovias não pavimentadas é de 78,6% da malha existente. De acordo com o SNV – Sistema Nacional de Viação do DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (2014) de 1.700 mil quilômetros de rodovias, apenas cerca de 260 mil são pavimentadas. No estado do Rio Grande do Sul, somente 7% da malha rodoviária é pavimentada, índice menor que a média nacional. Observa-se então, a necessidade de pavimentação e/ou melhorias das estradas não pavimentadas, tendo em vista a relevância destas rodovias para o desenvolvimento das cidades propiciando a melhor qualidade de vida e a ocupação de regiões isoladas, bem como promovendo a ligação entre centros produtores e centros de consumo do país. Sendo assim, com intuito de impulsionar o crescimento econômico do país é necessário aumentar a porcentagem de rodovias pavimentadas. A principal razão para o pequeno número de rodovias pavimentadas está diretamente ligados aos reduzidos recursos públicos bem como aos altos custos dos materiais empregados na pavimentação das estradas.

Baseado nisso, percebemos que existe a necessidade de encontrar alternativas economicamente viáveis para pavimentar rodovia vicinais ou pavimentos de baixo volume de tráfego, podendo-se utilizar materiais alternativos, distintos daqueles mais utilizados nos pavimentos convencionais, e que podem perfeitamente constituir as camadas desse tipo de rodovias.

De acordo com Oliveira (2000), os materiais mais usuais na pavimentação de rodovias precisam apresentar características apropriadas para sua utilização, mas isso nem sempre acontece quando se utiliza materiais in natura. Às vezes, é necessária a adição de outros materiais que irão alterar as características do solo ou outro material utilizado na pavimentação, a fim de conferir-lhes as características necessárias.

Oliveira (2000) ainda acrescentou que quando se emprega materiais regionais, que são mais econômicos, torna-se viável a pavimentação de muitas destas rodovias, proporcionando a evolução econômica e integração a muitas áreas rurais que necessitam de desenvolvimento.

Atualmente em nosso país, a elaboração dos projetos de rodovias muitas vezes, seguem orientações determinadas pelas normatizações aplicadas em países como Europa e Estado

Unidos, onde as condições climáticas mais predominantemente de clima temperado, fazem com que as camadas dos pavimentos sejam construídas com matérias pétreos granulares semi-industrializados de alto custo. Baseado nisso, o presente trabalho visa estudar o uso de solo laterítico argiloso proveniente da cidade de Ijuí, em bases e sub-bases de pavimentos econômicos, ou misturados a areia, avaliando seu comportamento baseado especificamente na metodologia MCT, Miniatura Compactada Tropical.

1.1 Contexto

Bernardi *et al*. (2013) ao reforçar a importância dos estudos para utilização de materiais alternativos em pavimentação, argumentaram:

> Os engenheiros Douglas Fadul Villibor e Job Shuji Nogami desenvolveram uma nova sistemática de ensaios de solos que caracteriza melhor os solos tropicais em seu ambiente. Além disso, passados quase 40 anos da dissertação que Villibor (1974) apresentou sob o título "Utilização de solo arenoso fino na execução de bases para pavimento de baixo custo", que causou enorme impacto no meio científico da área, os autores publicaram em 2009 o livro "Pavimentos Econômicos – Tecnologia do uso dos solos finos lateríticos" que vem a coroar toda uma vida no estudo e desenvolvimento da pavimentação econômica. E neste mesmo livro, Villibor e Nogami (2009) no prefácio dissertaram: "Almeja-se que os conceitos apresentados possam contribuir para o surgimento de novos programas de pesquisa na área de pavimentação no meio científico. Espera-se, também, que contribuam para acelerar a implementação de programas de rodovias vicinais com pavimentação de baixo custo para vias urbanas, algo que o Brasil é extremamente carente".

Foi proposto em meados de 2012 o projeto de pesquisa denominado "Estudo de Solo Argiloso Laterítico para Uso em Pavimentos Econômicos" vinculado ao Grupo de Pesquisa institucional da Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul – UNIJUÍ: "Pesquisa em Novos Materiais e Tecnologias para Construção". Fazendo parte deste projeto e sendo sequencia natural da pesquisa tem como objetivo avaliar o uso de solo argiloso, de caráter laterítico de acordo com a metodologia MCT, proveniente da cidade de Ijuí, em bases e sub-bases de pavimentos econômicos, misturado a areia de acordo com a metodologia MCT proposta em Villibor e Nogami (2009).

A autora deste trabalho de conclusão de curso foi selecionada como bolsista PET (Programa de Ensino Tutorial do MEC) do curso de Engenharia Civil, no ano de 2013, integrando a equipe do projeto citado no parágrafo anterior, motivando desta forma a escolha do tema.

1.2 **Problema**

A preocupação com a degradação do meio ambiente e o alto custo tem dificultado a obtenção da rocha sã para utilizá-la na pavimentação das rodovias, com isso, se desperta o interesse e a necessidade pelo uso dos materiais alternativos. Estes materiais são encontrados próximos ou mesmo as margens das rodovias já implantadas, mas não pavimentadas, que podem ser utilizados em sua pavimentação contribuindo com o crescimento econômico das regiões com vistas a minimizar os impactos ambientais.

1.2.1 Questões de Pesquisa

- ✓ O solo laterítico argiloso de Ijuí-RS misturado com areia pode ser utilizado em bases e sub-bases de pavimentos?
- ✓ Qual das misturas de solo e areia é a ideal para uso em bases e sub-bases de pavimentos econômicos?

1.2.2 Objetivos de Pesquisa

O presente trabalho tem como objetivo geral a caracterização, a comparação e a avaliação de misturas de solo laterítico argiloso e areia para uso em bases e sub-bases de pavimentos econômicos. Os objetivos específicos desta pesquisa são:

- ✓ Avaliar a misturas ideal de solo com areia (20%, 30% e 40%) a partir de análise laboratorial;
- ✓ Realização de ensaios tradicionais de caracterização e os ensaios da metodologia MCT;
- ✓ Avaliar a mistura de melhor desempenho para emprego em bases e sub-bases na pavimentação.
- ✓ Comprovar que a utilização de solo/areia para pavimentos realmente é viável.

2 REVISÃO DA LITERATURA

O presente trabalho esta dividido em cinco capítulos. No primeiro, Introdução, refere-se às condições de nossos pavimentos e a importância da utilização de materiais alternativos para uso em pavimentação econômica, já o segundo capítulo, composto pela Revisão da Literatura trata sobre pavimentos, pavimentos flexíveis e rígidos, camadas constituintes dos pavimentos, materiais usados na pavimentação, sobre pavimentos econômicos, formação dos solos, classificações tradicionais de solo e classificação MCT. O terceiro capítulo aborda a Metodologia, fazendo referência aos ensaios em laboratório, as normas técnicas e os procedimentos de ensaios. Sendo assim, o enfoque principal que será abordado ao longo do trabalho é a realização do mesmo embasado na classificação MCT. Posteriormente serão apresentados o quarto capítulo com resultados e análise dos mesmos, fechando com as conclusões finais.

2.1 Pavimentos

Segundo a NBR 7207 (1982, p.2), o pavimento é uma estrutura construída sobre a terraplenagem e destinada tanto economicamente quanto tecnicamente a resistir e distribuir ao subleito os esforços produzidos pelo tráfego, visando melhorar as condições de rolamento quanto ao conforto e segurança, resistindo aos esforços horizontais que nele atuam, tornando a superfície mais durável .

De acordo com Balbo (2007), o pavimento nada mais é do que uma estrutura não perene, construída para atender tanto estrutural quanto operacionalmente ao tráfego, de uma maneira durável e ao mínimo custo e impacto possível. O pavimento é constituído por camadas sobrepostas de diferentes materiais compactados a partir do subleito de um corpo estradal.

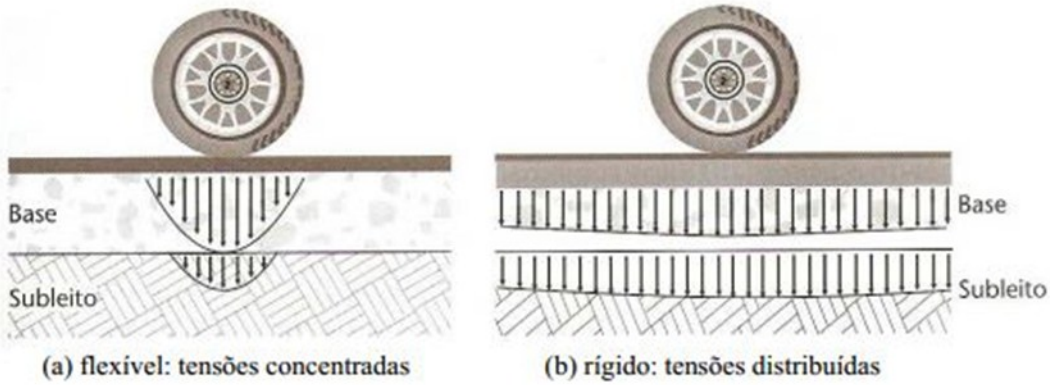
Balbo (2007) especifica que a estrutura de um pavimento é criada para receber e transmitir esforços, suavizando as pressões sobre as camadas interiores, que possuem menores resistências, devido aos materiais com que são construídos. Para que a vida útil do pavimento seja maior, todas as camadas que o compõem devem apresentar deformações compatíveis com sua natureza e capacidade, para que não ocorra ruptura ou danificação de forma prematura nos materiais que constituem suas camadas.

De acordo com Bernucci *et al*. (2008), as cargas aplicadas na superfície do pavimento geram determinada tensões na estrutura, que dependerá do comportamento mecânico de cada uma dessas camadas ou do seu conjunto. Todas as camadas do pavimento possuem uma ou mais funções específicas, que juntas devem proporcionar condições adequadas de rolamento aos veículos em diferentes condições climáticas. Lembrando que as cargas são aplicadas tanto por veículos quanto pelo ambiente, geralmente de modo transitório, cíclicas ou repetitivas.

Segundo Balbo (2007), a principal diferença entre o pavimento flexível e o pavimento rígido é a forma como cada um irá distribuir os esforços no subleito, ou seja, uma dada carga atuante sobre um pavimento flexível impõe nessa estrutura um campo de tensões muito concentrado, nas proximidades do ponto de aplicação da carga. Em pavimentos rígidos, as tensões impostas pela carga são distribuídas em toda a extensão da placa, diminuindo as tensões sobre o subleito. “Pavimentos Rígidos" são pavimentos que apresentam uma camada de revestimento com uma rigidez muito superior à das camadas inferiores, a qual absorve praticamente todas as tensões provenientes da passagem do tráfego.

Ainda segundo o mesmo autor, o pavimento rígido é o pavimento cuja camada superior, absorve grande parte de esforços horizontais solicitantes apresentando baixíssimas deformações, gerando pressões verticais aliviadas e bem distribuídas sobre uma seção transversal típica deste tipo de pavimento. Já um pavimento considera-se flexível quando possuir um revestimento betuminoso sobre a base granular. As camadas que o compõem são: subleito, regularização, reforço do subleito, sub-base, base e revestimento. No pavimento flexível, as cargas atuantes são distribuídas no pavimento de modo concentrado, próximo do ponto de aplicação dessa carga conforme apresentado na Figura 01.

Figura 01: Estrutura dos pavimentos



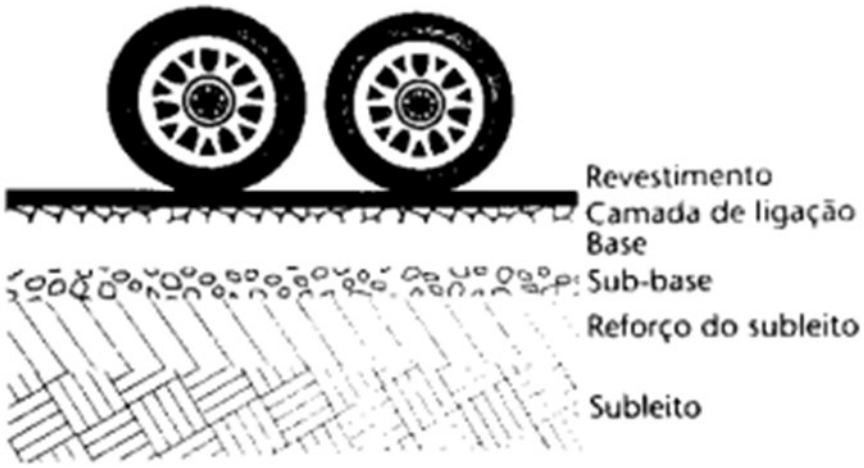
Fonte: Balbo (2007, p.47)

2.1.1 Camadas do Pavimento

Segundo Balbo (2007), os pavimentos flexíveis são constituídos pelas camadas: revestimento, base, sub-base, reforço do subleito e subleito. A Figura 02, mostra como estão apresentadas essas camadas em campo, sendo que elas possuem materiais e dimensões distintas, conforme descritos abaixo:

- ✓ Revestimento asfáltico ou camada de rolamento: Chama-se revestimento, a camada que recebe as cargas, sem sofrer grandes deformações elásticas ou plásticas transmitindo, de forma minimizada para as camadas posteriores. Tem como função garantir segurança e conforto aos usuários.
- ✓ Base: A base é uma camada com função de resistir aos esforços originários do tráfego e distribuí-los ao subleito. Garantindo que as tensões de flexão no revestimento não leve ao trincamento prematuro do pavimento.
- ✓ Sub-base: é a camada com função de complementar à base. Geralmente utilizada quando não existir a probabilidade de executar a base diretamente sobre o subleito regularizado ou sobre o reforço.
- ✓ Reforço do subleito: É uma camada com o objetivo de reduzir a espessura da sub-base, ou quando o subleito (fundação ou terreno natural onde o pavimento será construído) tem uma qualidade inferior, por exemplo, um baixo Índice de Suporte Califórnia (ISC).
- ✓ Subleito: é definido como o terreno de fundação do pavimento, podendo ser a estrada o qual será pavimentada, ou a terraplenagem executada.

Figura 02: Camadas que compõem o pavimento



Fonte: Balbo, 2007

Segundo Bernucci *et al*. (2006), existem vários materiais que podem ser utilizados em bases de pavimentação, são eles: brita graduada simples (BGS), macadame (MS), solo arenoso fino laterítico (SAFL), solo argiloso laterítico (SAL), etc. E para revestimentos, os mais usuais são: concreto betuminoso usinado a quente (CBUQ), tratamento superficial duplo (TSD), pré-misturados a frio (PMF), Lama asfáltica.

2.1.2 Materiais usados na pavimentação

Os materiais mais comumente utilizados em pavimentação podem ser divididos em dois grupos, materiais pétreos e materiais terrosos.

2.1.3 Materiais Pétreos

Segundo DNIT (2006), os materiais pétreos que são usados em pavimentação, são conhecidos genericamente como agregados, podem ser naturais àqueles encontrados diretamente na natureza, ou artificiais que passam por algum tipo de processo para sua adequação. Exemplos, areia, seixo rolado, pedra britada, escória, etc.

De acordo com o DNER (1998), Departamento Nacional de Estradas e Rodagem, os materiais podem ser classificados quanto ao tamanho e quanto à distribuição dos grãos, que são:

- ✓ Pedregulho: é a fração do solo que passa na peneira de 76 mm (3’’) e é retida na peneira de 2,00 mm (nº10);
- ✓ Areia: é a fração do solo que passa na peneira de 2,00 mm (nº10) e é retida na peneira de 0,075 mm (nº200);
- ✓ Areia Grossa: é a fração compreendida entre as peneiras de 2,00 mm (nº10) e 0,42 mm (nº40);
- ✓ Areia Fina: é a fração compreendida entre as peneiras de 0,42 mm (nº40) e 0,075 mm (nº200);
- ✓ Silte: é a fração com o tamanho de grão enre a peneira de 0,075 mm (nº200) e 0,005mm;
- ✓ Argila: é a fração com o tamanho de grão abaixo de 0,005 mm (argila coloidal é a fração com tamanho de grão abaixo de 0,001 mm).

2.1.4 Materiais Terrosos

Os materiais terrosos são originados da decomposição de rochas através da ação de agentes de intemperismo. São muito abundantes na natureza e comumente utilizados em pavimentação, seja no leito estradal, em terraplanagens ou em bases e sub-bases.

Segundo DNIT (2006), considera-se como solo qualquer material que possa ser escavado com pá, picareta, escavadeira, etc., sem necessidade de explosivos, como é o caso.

2.1.5 Materiais alternativos

De acordo com Wayhs (2004), com recursos financeiros escassos, e a necessidade de melhor qualidade e condições das vias, a pavimentação de estradas com a utilização de materiais alternativos, mais abundantes e econômicos, torna-se cada vez mais necessária.

Para o DAER/RS, Departamento Autônomo de Estradas de Rodagem do Rio Grande do Sul, pavimento alternativo é a camada de base ou sub-base que é constituída de materiais não convencionais economicamente mais viáveis por serem encontrados próximos de rodovias implantadas trazendo benefícios ao meio ambiente. Materiais alternativos são materiais não muito usuais, que necessitam de estudos mais aprofundados para o entendimento de seu comportamento estrutural para a aplicação em uma rodovia.

A preocupação com a degradação do meio ambiente e em alguns casos o alto custo do transporte para utilização da brita graduada como camada de base ou sub-base faz com que surja

linha de pesquisa voltada para utilização de materiais alternativos que muitas vezes, pode ser encontrado ao longo da própria rodovia a ser pavimentados.

2.2 Pavimentos econômicos

Segundo Villibor e Nogami (2009), para ser pavimento econômico, na sua base deve ser de material alternativo. Que este pode ser muitas vezes, materiais naturais ou misturados com pequena porcentual de agregados, refletindo diretamente nos custos de execução, que são notoriamente menores em relação às bases tradicionais usualmente utilizadas, como: brita graduada, macadame seco, etc. Sua utilização é destinada a um trafego do tipo baixo a médio.

De acordo com Villibor et al. (2009), o déficit de pavimentos urbanos é grande em praticamente todas as cidades brasileiras, desde vias principais de cidades de grande porte, até vias de circulação de distritos e conjuntos habitacionais. Em outras regiões do país, a situação, quanto ao déficit dos pavimentos urbanos, é ainda pior. Isso demonstra, portanto, a necessidade e a importância do desenvolvimento de uma tecnologia de pavimentação que minimize os custos de implantação de pavimentos urbanos.

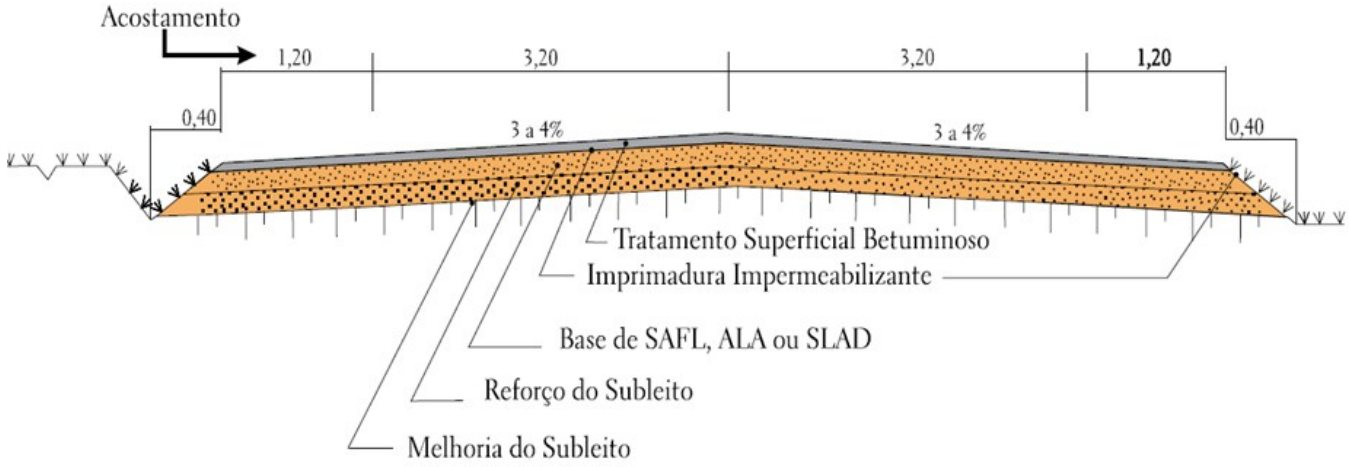
Ainda de acordo com Villibor e Nogami (2009), bases de baixo custo apresentam vantagens ambientais, além de benefícios econômicos, pois as jazidas de extração dos materiais alternativos utilizados, que são de ocorrências naturais, permite uma fácil obtenção além da recuperação de áreas exploradas, diminuindo consequentemente os danos ambientais, além de substituir os materiais utilizados em bases tradicionais, como agregados britados e cimento, que tem alto custo de exploração e degradação das áreas exploradas.

Villibor e Nogami (2009) citam como tipos de bases de baixo custo utilizados para pavimentos econômicos, os seguintes:

- ✓ Bases de SAFL (Solos Arenosos Finos Lateríticos), material de ocorrência natural;
- ✓ Bases de Solo Laterítico-Agregado:
- ✓ ALA (Argila Laterítica - Areia): graduação fina, cujo material é constituído de mistura de argila laterítica com areia.

- ✓ SLAD (Solo Laterítico – Agregado Descontinuo): graduação grossa, cujo material é constituído de mistura de solo laterítico com baixa porcentagem de agregado (brita, pedregulho ou laterita).

Figura 03: Seção típica de um pavimento econômico



Fonte: Villibor e Nogami (2009, p.201)

Villibor e Nogami (2009) ainda apresentam uma comparação de custos e vantagens ambientais entre a execução de pavimentos econômicos e pavimentos que usam bases tradicionais. Conforme apresentado na Tabela 01.

Observa-se que na Tabela 01 são apresentados diferentes tipos de bases que podem ser utilizadas para pavimentação econômica, onde a base de Solo Argiloso Fino Laterítico (SAFL), possui relação Custo Benefício melhor, sendo que também apresenta Custo e Preço Total bem mais baixo quando comparada com as outas bases que são apresentadas na mesma tabela.

Tabela 01: Comparação de preços com diferentes bases

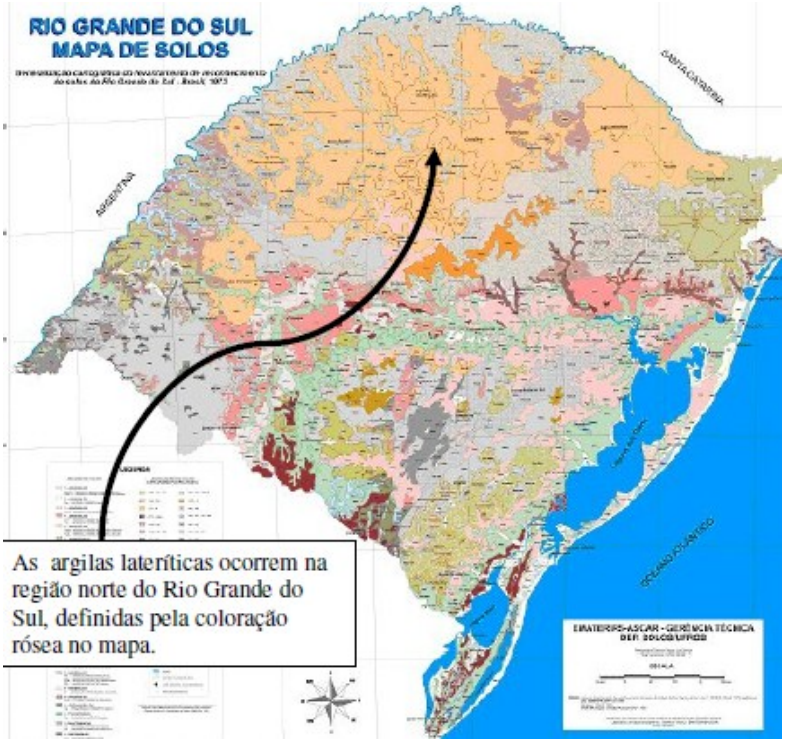
TIPO DE BASE	BASE	E	PT	RC
	R$/m²			(%)
SAFL	3,95	14,13	18,08	100
Solo Brita	13,59	14,13	27,72	153
Solo Cimento	13,73	14,13	27,87	154
Brita Graduada	20,38	14,13	34,51	191

E= Preço de Execução dos Serviços da Tabela A-I
PT= Preço Total dos Pavimentos (Referência: Preço Unitário DER-SP (Dez/08)
RC= Relação de Custo em Porcentagem (Referência Base de SAFL= 100%)

Fonte: Villibor e Nogami (2009, p. 202).

Com base na Figura 04, percebe-se a localização de solos finos arenosos e argilosos no estado do Rio Grande do Sul.

Figura 04: Ocorrência de solos finos arenosos e argilosos, de comportamento laterítico no Brasil



Fonte: Streck et al. (2008, p.149)

A Figura 05 apresentada por Villibor e Nogami (2009), ilustra áreas de ocorrência de solos laterítico arenosos (LA e LA') e argilosos (LG').Totalizando 65% do território brasileiro.

Figura 05: Ocorrência de argilas lateríticas no Estado do Rio Grande do Sul

Fonte: Villibor e Nogami (2009, p.206)

2.3 Formação dos solos

Segundo Oliveira e Brito (1998), os solos evidenciam que sua origem e evolução deve-se a influência de certos fatores, como:

- ✓ Clima, principalmente pela função da água da chuva e da temperatura;
- ✓ Materiais de origem, de composição e conteúdo mineral;
- ✓ Organismos, vegetais e animais, intervindo no microclima;
- ✓ Relevo, principalmente nos processos de erosão e sedimentação do solo;
- ✓ Tempo, que surgido sob os efeitos dos demais fatores.

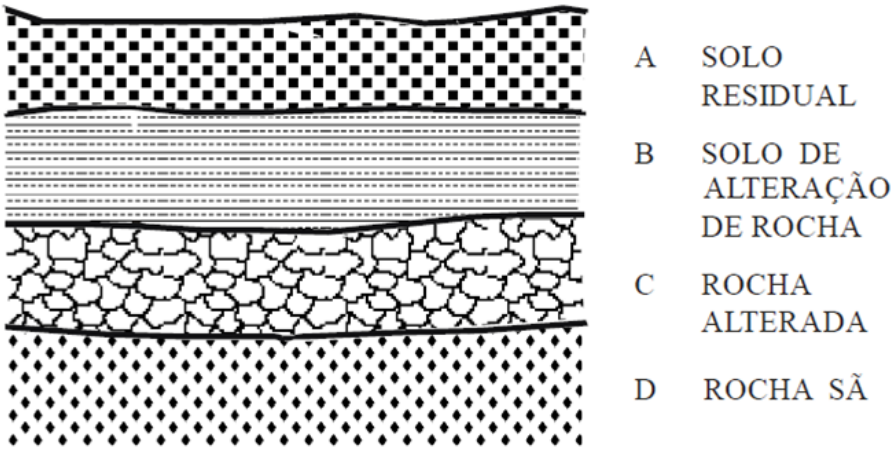
De acordo com Pinto (2006), os solos atuais são originados das rochas que compuseram a crosta terrestre, onde a decomposição delas é consequência da ação do conjunto de fatores citados acima. São mais atuantes em climas quentes do que em climas frios, por isso leva-se a formação

dos solos.

Conforme DNIT (2006), os solos são classificados dependendo da origem dos materiais que os compõe, podendo ser dividido em dois grandes grupos: solos residuais e solos transportados. Solos residuais são produtos da decomposição rochosa que permanecem no local da transformação, já solo transportado, como o próprio nome diz, é quando o produto da alteração é transportado para um local diferente da sua origem.

Ainda segundo DNIT (2006), não existe um limite definido entre o solo e a rocha que o originou. A passagem entre ele é gradativa e permite a separação de pelo menos duas faixas distintas; aquela abaixo do solo, chamada de solo de alteração de rocha, e uma acima da rocha, chamada de rocha decomposta. Na Figura 06, são representadas as camadas de decomposição das rochas.

Figura 06: Perfil resultante da decomposição de rochas



Fonte: Manual de Pavimentação (2006, p. 18)

O solo residual é subdividido em maduro e jovem, segundo o grau de decomposição dos minerais. É um material que não mostra nenhuma relação com a rocha que o originou. Não se consegue observar tanto os restos da estrutura da rocha nem quanto de seus minerais.

Conforme Villibor *et al*. (2009), os solos transportados formam depósitos mais inconsolidados e fofos em relação aos solos residuais, e com profundidade variável. Nos solos transportados, distingue-se uma variedade especial que é o solo orgânico, no qual o material transportado está misturado com quantidades variáveis de matéria orgânica decomposta. De

modo geral, o solo residual é mais homogêneo do que o solo transportado na forma de ocorrer, principalmente se a rocha matriz for homogênea. Os solos transportados podem ser divididos em:

- ✓ Solos coluviais: são aqueles cujo transporte deve-se exclusivamente à ação da gravidade, encontrados ao pé de elevações e encostas;
- ✓ Solos eólicos: grandes depósitos ao longo do litoral, onde formam as dunas;
- ✓ Solos de aluvião: solos arrastados pelas águas e depositados nos momentos em que a corrente sofre uma diminuição na sua velocidade;
- ✓ Solos orgânicos: ocorrem em áreas de bacias e depressões continentais, nas baixadas marginais de rios e nas baixadas litorâneas.

2.3.1 Classificação dos Solos

Segundo CASAGRANDE (1947), inicialmente as classificações de solos eram baseadas apenas em granulometria, sendo os solos argilosos considerados inadequados, uma vez que suas características geotécnicas se mostravam relacionadas mais com as propriedades plásticas do que com as propriedades granulares.

De acordo com Pinto (2006), são diversas formas de se classificar os solos, como sua origem, sua evolução, presença ou não de matéria orgânica, tanto pela estrutura, quanto pelo preenchimento dos vazios.

As classificações mais tradicionais e usuais são: Sistema Unificado de Classificação de Solos – SUCS e o Sistema Rodoviário de Classificação - HRB/AASHTO. Existe também a classificação não tradicional utilizada nesse trabalho, conhecida por Classificação MCT.

2.3.1.1 Sistema Unificado de Classificação de Solos – SUCS

Pinto (2006), explica que a classificação SUCS (Sistema Unificado de Classificação de Solos) ou USCS (Unified Soil Classification System) foi desenvolvida pelo professor Arthur Casagrande, na Universidade de Harvard, EUA, entre 1942 e 1944, visando à aplicação na seleção de materiais para projetos de pavimentos de aeroportos, sendo conhecida também como Sistema de Classificação de Aeroportos.

Segundo DNIT (2006), o SUCS baseia-se na identificação dos solos de acordo com as suas qualidades de texturas e plasticidade, agrupando-os conforme seu comportamento quando utilizados em estradas, aeroportos, aterros e fundações.

Ainda de acordo com PINTO (2006), a porcentagem de finos do solo é o primeiro aspecto considerado nesta classificação, sendo considerado material fino aquele que passar na peneira nº 200 (0,075 mm). Quando a porcentagem passante for inferior a 50%, o solo será considerado de granulação grosseira, determinação G ou S. Se a porcentagem passante for superior a 50%, o solo será de granulação fina, determinado por M, C ou O.

Conforme a classificação SUCS, os diferentes tipos de solos são representados pelo conjunto de duas letras conforme tabela abaixo, a primeira letra indica o tipo principal e a segunda à descrição complementar.

Tabela 02: Conjunto de letras para determinação dos diferentes tipos de solos

G = pedregulho	W = bem graduado
S = areia	P = mal graduado
M = silte	H = alta compressibilidade
C = argila	L = baixa compressibilidade
O = solo orgânico	
Pt= turfa	

Fonte: Autoria própria

Segundo publicação da ASTM 1990, para a versão SUCS, o principal parâmetro considerado é a distribuição e a forma da curva granulométrica, o limite de liquidez, o índice de plasticidade e a compressibilidade dos solos. Os solos são agrupados em duas diferentes classes, em função da porcentagem de material retido na peneira n.º 200: solos de graduação grossa e solos de graduação fina, subdivididas em 15 grupos diferentes, e os solos altamente orgânicos. Através da Tabela 03, é possível fazer a correta classificação dos solos.

Tabela 03: Classificação SUCS

Critérios para estabelecer símbolos de grupos e nomes de grupos usando ensaios de laboratório [A]				Classificação do solo	
				Grupo	Nome do grupo [B]
Solos de granulometria grossa Mais de 50% do solo retido na peneira nº 200	Pedregulhos Mais de 50% de fração grossa retidos na peneira nº4	Pedregulhos limpos Menos de 5% de finos [C]	Cu ≥ 4 e 1 ≤ Cc ≤ 3 [E]	GW	Pedregulho bem graduado [F]
			Cu < 4 e/ou 1 > Cc > 3 [E]	GP	Pedregulho mal graduado [F]
		Pedregulhos com finos Mais de 12% de finos [C]	Finos classificam-se como ML ou MH	GM	Pedregulho siltoso [F, G, H]
			Finos classificam-se como CL ou CH	GC	Pedregulho argiloso [F, G, H]
	Areias 50% ou mais da fração grossa passam pela peneira nº4	Areias limpas Menos de 5% de finos [D]	Cu ≥ 6 e 1 ≤ Cc ≤ 3 [E]	SW	Areia bem graduada [I]
			Cu < 6 e/ou 1 > Cc > 3 [E]	SP	Areia mal graduada [I]
		Areias com finos Mais de 12% de finos [D]	Finos classificam-se como ML ou MH	SM	Areia siltosa [G, H, I]
			Finos classificam-se como CL ou CH	SC	Areia argilosa [G, H, I]
Solos de granulometria fina 50% do solo ou mais passando na peneira nº 200	Siltes e Argilas Limite de liquidez menor que 50	Inorgânicos	IP >7 e sobre ou acima da linha "A" [J]	CL	Argila pouco plástica [K, L, M]
			IP < 4 e abaixo da linha "A" [J]	ML	Silte
		Orgânicos	$\frac{L.L.(\text{seco em estufa})}{L.L.(\text{não seco em estufa})} < 0,75$	OL	Argila orgânica [K, L, M, N]
					Silte orgânico [K, L, M, O]
	Siltes e Argilas Limite de liquidez maior ou igual a 50	Inorgânicos	IP sobre ou acima da linha "A"	CH	Argila muito plástica [K, L, M]
			IP abaixo da linha "A"	MH	Silte elástico [K, L, M]
		Orgânicos	$\frac{L.L.(\text{seco em estufa})}{L.L.(\text{não seco em estufa})} < 0,75$	OH	Argila orgânica [K, L, M P]
					Silte orgânico [K, L, M Q]
Solos altamente orgânicos	Principalmente matéria orgânica, escura na cor e com odor orgânico			PT	Turfa

Fonte: ASTM, 1990

2.3.1.2 Sistema Rodoviário de Classificação - HRB/AASHTO

DNIT (2006), o Sistema Rodoviário de Classificação HRB/AASHTO, não leva em consideração o tipo de solo (como areias, argilas, etc.), mas divide-os em sete grupos principais.

Embora esse sistema divida o solo em material granular e material silto-argiloso, a distinção é menos clara do que a existente no sistema de Casagrande. Não há uma distinção clara entre siltes e argilas e, a2lém disso, solos orgânicos não são incluídos na classificação. Entretanto o sistema deve ser julgado com base em seus objetivos, que são especificamente avaliar a adequação dos solos para uso como subleito de pavimento.

Baseado nisso o sistema de classificação é mais restrito e mais interpretativo comparado ao sistema unificado, não apenas classificando solos em grupos com propriedades similares mas em relação a qualidade dos solos em cada grupo. O referencial mais utilizado nesse tipo de classificação é o índice de grupo avaliando em relação a qualidade do subleito.

Para a realização do cálculo do Índice de Grupo (IG), utiliza-se a Equação 1:

$$IG = 0{,}2 \times a + 0{,}005 \times a \times c + 0{,}01 \times b \times d \qquad (1)$$

onde:

a = % do material que passa na peneira de no 200, menos 35; caso esta % for >75, adota-se a = 40; caso esta % seja < 35, adota-se a = 0;

b = % do material que passa na peneira de no 200, menos 15; caso esta % for >55, adota-se b = 40; caso esta % seja < 15, adota-se b = 0;

c = valor de limite de liquidez (LL) menos 40; caso o LL > 60%, adota-se c = 20; se o LL < 40%, adota-se c = 0;

d = valor de índice de plasticidade (IP) menos 10; caso o IP > 30%, adota-se d = 20; se o IP< 10%, adota-se d = 0;

PINTO (2006), a classificação por esse método, inicia-se pela porcentagem de material passante na peneira nº 200, sendo considerados solos de granulação grosseira aqueles com menos de 35% passante nesta peneira, e não com o parâmetro de 50% como na classificação SUCS. Esses são solos dos grupos A-1, A-2 e A-3. Os solos com mais de 35% passante na peneira nº 200 formam os grupos A-4, A-5, A-6 e A-7.

De acordo com DNIT (2006), cada grupo é caracterizado como:

- ✓ Grupo A-1: enquadram-se os materiais constituídos de mistura bem graduada de fragmentos de pedra ou pedregulho, areia grossa, areia fina, entre outros.
- ✓ Grupo A-2: este grupo abrange os materiais tais como pedregulho e areia grossa, em que o teor de silte e o índice de plasticidade ultrapassam os limites estabelecidos para o Grupo A-1, e ainda areia fina com silte não plástico excedendo os limites do Grupo A-3.
- ✓ Grupo A-3: material típico para este grupo é a areia fina de praia ou de deserto, sem silte ou argila. Também inclui misturas de areia fina mal graduada e quantidades limitadas de areia grossa e pedregulho depositado pelas correntes.
- ✓ Grupo A-4: o solo característico deste grupo é siltoso não plástico, ou moderadamente plástico, possuindo, geralmente, 5% ou mais passando na peneira nº200. Incluem também misturas de solo fino siltoso com até 64% de areia e pedregulho retidos na peneira nº200.
- ✓ Grupo A-5: solo típico deste grupo é semelhante ao que foi descrito no A-4, exceto que ele é altamente elástico, conforme indica seu elevado limite de liquidez.
- ✓ Grupo A-6: são solos argilosos e plásticos, tendo geralmente 75% ou mais de material passando na peneira nº 200. O grupo também inclui misturas de solos finos argilosos, podendo conter até 64% de areia e pedregulho retidos na peneira nº200.
- ✓ Grupo A-7: são parecidos aos descritos no grupo A-6, com a diferença que possui as características de alto limite de liquidez, podendo ainda ser elástico e estar sujeito à elevada mudança de volume.

Através da Tabela 04, é possível classificar o solo em relação a Classificação ASSHTO, onde é necessário os dados de granulometria, de índice de plasticidade, índice de grupo e por fim, limite de liquidez.

Tabela 04: Classificação Rodoviária de Solos

CLASSIFICAÇÃO GERAL	MATERIAIS GRANULARES 35% (ou menos) passando na peneira Nº 200							MATERIAIS SILTO - ARGILOSOS			
CLASSIFICAÇÃO EM GRUPOS	A - 1		A - 3	A - 2				A - 4	A - 5	A - 6	A - 7 A - 7 - 5 A - 7 - 6
	A - 1 - A	A - 1 - B		A - 2 - 4	A - 2 - 5	A - 2 - 6	A - 2 - 7				
Granulometria - % passando na peneira											
Nº 10	50 máx.										
Nº 40	30 máx.	30 máx.	51 min.								
Nº 200	15 máx.	25 máx.	10 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	36 min.	36 min.	36 min.	36 min.
Características da fração passando na peneira Nº 40:											
Limite de Liquidez				40 máx.	41 min.	40 máx.	41 min.	40 máx.	41 min.	40 máx.	41 min.
Índice de Plasticidade	6 máx.	6 máx.	NP	10 máx.	10 máx.	11 min.	11 min.	10 máx.	10 máx.	11 min.	11 min.*
Índice de Grupo	0	0	0	0	0	4 máx.	4 max.	8 máx.	12 máx.	16 máx.	20 máx.
Materiais constituintes	Fragmentos de pedras, pedregulho fino e areia			Pedregulho ou areias siltosos ou argilosos				Solos siltosos		Solos argilosos	
Comportamento como subleito	Excelente a bom							Sofrível a mau			

* O IP do grupo A - 7 - 5 é igual ou menor do que o LL menos 30.

Fonte: Manual de Pavimentação - DNIT, 2006 (p.58.)

2.3.2 Classificação MCT

A partir das limitações nas classificações de solos convencionais em relação aos solos tropicais, Nogami e Villibor (1981) propuseram uma nova classificação denominada MCT, para determinação das propriedades mecânicas e hidráulicas dos solos tropicais compactados para uso em obras viárias.

Segundo os mesmos autores, essa metodologia de classificação envolve, ensaios de compactação com corpos-de-prova em miniatura, com 50 mm de diâmetro e cerca de 130 mm de altura. A classificação divide os solos em duas grandes classes de comportamento, os lateríticos e os saprolíticos, compreendendo sete grupos. De acordo com os ensaios de caracterização, é possível compreender sete grupos, podendo-se com isso prever suas propriedades mecânicas e hidráulicas quando compactados para fins de obras viárias.

Segundo Fonseca (1996), os solos saprolíticos são formados a partir da decomposição ou desagregação da rocha matriz através da ação de intempéries. Já solos laterítico, são solos considerados superficiais, formados a partir de transformação da parte superior do subsolopela ação do intemperismo

2.4 METODOLOGIA MCT (MINIATURA COMPACTADA TROPICAL)

Classificação MCT foi assim denominada pelo fato de se utilizar "corpos de prova Miniatura, compactados e proposto para solos tropicais", segundo Nogami e Villibor (1995). É ustilizada apenas para materiais de granulação fina, ou seja, solos que passam integralmente na peneira nº 10 (2,00 mm) foi desenvolvida a partir do estudo de aproximadamente cinquenta amostras de solos tropicais (laterítico e saprolítico) coletadas no estado de São Paulo.

Segundo Villibor e Nogami (2009), a cada uma das regiões apresentada na Figura 07, foi associado um símbolo de duas letras, onde a primeira sendo "N" indica o comportamento não laterítico e sendo "L" indica o comportamento laterítico. Já a segunda letra, representada por A, A', G', S' completam a classificação.

De acordo com Pinto (2000), no processo de laterização há um enriquecimento no solo de óxidos hidratados de ferro e/ou alumínio e a permanência da caulinita como argilo-mineral predominante e quase exclusivo, conferindo a estes solos uma coloração típica: vermelho, amarelo, marrom e alaranjado.

Conforme a Metodologia MCT, os solos são classificados em sete grupos, que serão citados e explicados a seguir. Toda classificação descrita é baseada em Villibor e Nogami (2009).

Grupo NA: <u>Areia não laterítica</u>

Os solos deste grupo são areias, siltes e misturas de areias e siltes. Representados, em sua maioria, por solos saprolíticos, associados a rochas sedimentares ou metamórficas. Possuindo pequena capacidade de suporte, quando compactados e, geralmente, muito erodíveis.

Grupo NA': <u>Solo não laterítico arenoso</u>

Os solos deste grupo são granulometricamente, misturas de areias quartzosas com finos passando na peneira nº 200 (0,075 mm). Geneticamente, representados por solos saprolíticos.. Quando a areia for considerada bem graduada ela poderá ser usada como base de pavimentos.

Grupo NS': Solo não laterítico siltoso

Os solos deste grupo compreendem, sobretudo solos saprolíticos silto-arenosos peculiares, Caracteristicamente quando compactados na umidade ótima e massa específica aparente máxima na energia normal, apresentam baixa capacidade de suporte quando imersos em água; baixo módulo de resiliência; elevada erodibilidade.

Grupo NG': Solo não laterítico argiloso

Solos saprolíticos argilosos originados de rochas sedimentares argilosas (folhelhos, argilitos, siltitos) ou cristalinas. Quando são compactados em condições de umidade ótima e massa específica aparente máxima da energia normal, apresentam características de argilas tradicionais muito plásticas e expansivas.

Grupo LA : Areias lateríticas

Incluem-se neste grupo, sobretudo areias quartzosas com poucos finos. A porcentagem de finos lateríticos dos solos do grupo LA é muito baixa, de maneira que, mesmo quando devidamente compactados, podem ser relativamente permeáveis, pouco coesivos e pouco contráteis quando secos.

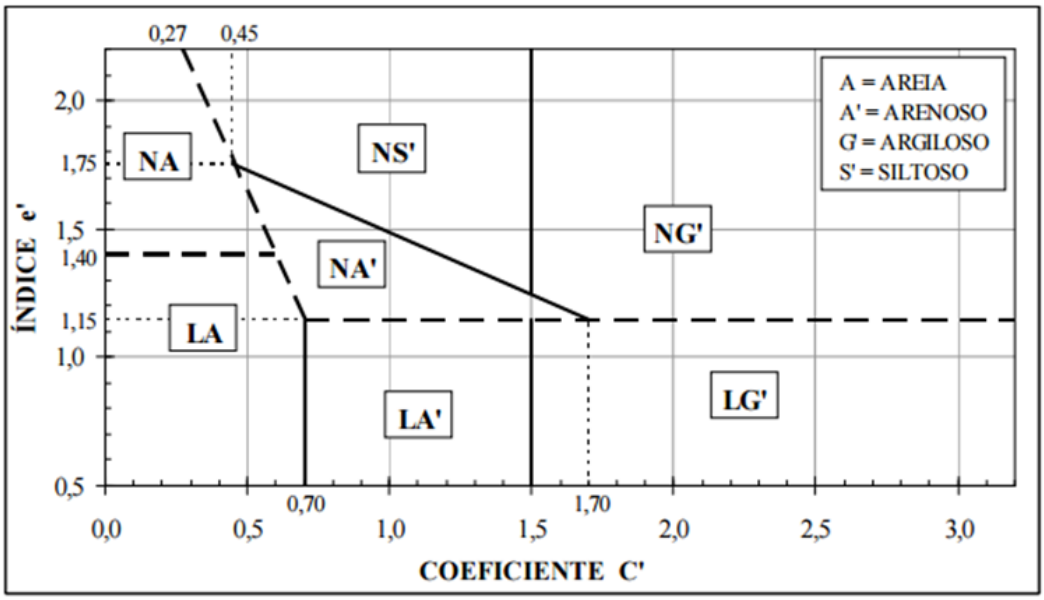
Grupo LA': Solo laterítico arenoso

Os solos deste grupo são tipicamente arenosos e constituintes do horizonte B dos solos conhecidos como latossolos arenosos e argissolos. Quando devidamente compactados, adquirem elevada capacidade de suporte, podendo ser utilizados em bases e sub-bases de pavimentos.

Grupo LG': Solo laterítico argiloso

Os integrantes mais frequentes deste grupo têm sido as argilas e as argilas arenosas, que constituem o horizonte B dos solos conhecidos pedologicamente por latossolos e argissolos. Apresentam propriedades similares às do solo LA' quando possuem porcentagem elevada de grãos de areia.

Figura 07: Classificação Rodoviária de Solos



FFonte: Villibor e Nogami (2009, p.101)

Os ensaios que fazem parte desta sistemática, segundo Villibor e Nogami (2009), são:

- ✓ M1 – Ensaio de Compactação Mini-Proctor;
- ✓ M2 – Ensaio Mini-CBR e Expansão;
- ✓ M3 – Ensaio de Contração;
- ✓ M4 – Ensaios de Infiltrabilidade e Permeabilidade;
- ✓ M5 – Ensaio de Compactação Mini-MCV;
- ✓ M6 – Ensaio de Penetração da Imprimadura Betuminosa;
- ✓ M7 – Ensaio Mini-CBR de Campo – Procedimento Dinâmico;
- ✓ M8 – Ensaio da Perda de Massa por Imersão;
- ✓ M9 – Classificação Geotécnica MCT.
- ✓ M8 – Ensaio da Perda de Massa por Imersão;
- ✓ M9 – Classificação Geotécnica MCT.

Sendo que os critérios para que as amostras ALA sejam aprovadas no ensaio de Mini-CBR (M2) para utilização em bases de pavimentos econômicos, são:

- ✓ Mini-CBR sem imersão ≥ 40%;

- ✓ Perda de Suporte por Imersão (PSI) inferior a 50%;
- ✓ Expansão com sobrecarga padrão ≤ 0,3%;
- ✓ Pertencerem aos grupos LA, LA' e LG' da classificação MCT;
- ✓ Contração entre 0,1% e 0,5%.

3 METODOLOGIA

Neste capítulo abordará-se a estratégia e delineamento da pesquisa, e a apresentação dos materiais e misturas utilizadas nos ensaios tradicionais de solos, como de caracterização, compactação e índice de suporte Califórnia e por fim dos ensaios da sistemática ou metodologia MCT descritas no item 2.3.2.

3.1 Estratégia de Pesquisa

Esta pesquisa do ponto de vista da sua natureza é uma pesquisa aplicada, pois objetiva gerar conhecimentos dirigidas à solução de problemas específicos como uso de materiais alternativos mais econômicos e sustentáveis em pavimentação. Se classificarmos do ponto de vista da forma de abordagem a pesquisa pode ser classificada como quantitativa, quanto aos objetivos explicativa e quanto aos procedimentos técnicos bibliográfica e experimental

3.2 Delineamento

A pesquisa segue a ordem expressa na Tabela 04:

Tabela 04: Delineamento da Pesquisa

PESQUISA BIBLIOGRÁFICA
ESCOLHA DAS MISTURAS DE SOLO E AREIA
ENSAIOS TRADICIONAIS DAS MISTURAS ALA
ENSAIOS DA METODOLOGIA MCT DAS MISTURAS ALA
ANÁLISE DOS RESULTADOS
CONSIDERAÇÕES FINAIS

Fonte: Autoria própria (2015)

3.3 **Materiais**

3.3.1 Solo

A argila laterítica utilizada para a realização deste trabalho foi retirada de talude próximo ao Hospital Veterinário, do campus Ijuí da UNIJUÍ, por expor características visuais semelhantes aos subleitos da malha viária das estradas vicinais de Ijuí e região, como pode ser observado ao fundo da Figura 08, enquadrando-se no horizonte B do latossolo. De acordo com Wayhs (2004) "a argila vermelha utilizada no estudo foi escolhida por ter as características visuais semelhantes dos subleitos dos milhares de quilômetros das estradas vicinais de Ijuí e região".

Segundo Ferreira (1988), os latossolos em geral são classificados como solos muito permeáveis em função da textura e da própria mineralogia. Os latossolos apresentam a maior representação geográfica no Brasil em relação aos demais tipos de solos.

Figura 08: Foto do talude

Fonte: Autoria própria (2015)

O solo foi coletado e seco em estufa por 24 horas a temperatura de 110º, conforme as condições prescritas na norma NBR 6457/86, sendo logo após, destorroado e passado na peneira nº 4 (4,8 mm) para a realização dos ensaios tradicionais, e passados na peneira de nº 10 (2,00 mm) para ensaios da metodologia MCT. Após isso, estocado em sacos para que a umidade higroscópica fosse preservada (ABNT, 1986).

3.3.2 Areia

A areia que foi utilizada para as misturas é uma areia aluvial de graduação média a fina de procedência da cidade de Santa Maria, utilizada normalmente nas obras de construção civil da região. Esta areia foi escolhida por ser aquela com mais baixo preço de aquisição na região. A Figura 09 mostra a baia onde a areia estava depositada, junto ao prédio do LEC, (Laboratório de Engenharia Civil do Campus Ijuí da UNIJUÍ).

Figura 09: Areia utilizada na pesquisa

Fonte: Autoria própria (2015)

3.3.3 Misturas

As misturas de solo natural e areia, denominadas de ALA, foram escolhidas seguindo a orientação de Nogami e Villibor (2009) conforme apresentou-se no item 2.1. Foram

utilizadas as seguintes proporções, antecedidas pela denominação utilizada neste trabalho para cada tipo de mistura:

- ✓ ALA 20%: 80% de solo natural e 20% de areia;
- ✓ ALA 30%: 70% de solo natural e 30% de areia;
- ✓ ALA 40%: 60% de solo natural e 40% de areia;
- ✓

3.4 Ensaios Laboratoriais Tradicionais

3.4.1 Preparação das Amostras

O preparo das amostras foi feito segundo as especificações da NBR 6457/86 - Preparação das amostras de solos e/ou misturas para os ensaios de compactação e caracterização (análise granulométrica, determinação dos limites de consistência, massa específica aparente) (ABNT, 1986).

3.4.2 Análise Granulométrica das Amostras

Para realizar a análise granulométrica de acordo com a NBR 7181/84, a amostra de solo e das misturas foi preparada de acordo com a NBR 6457/86, passado na peneira nº 10 (2,00 mm) todo o material. O material retido nessa peneira, deve ser lavado na peneira nº 200 (0,075 mm), para que só fique compreendido nela, o material grosso. Após isso, a amostra é levada para secar em estufa, a fim de ser utilizado no peneiramento grosso (ABNT, 1984 versão corrigida 1988).

Para o ensaio de sedimentação, utiliza-se o material passante na peneira nº 10 (2,00 mm), sendo que para solos arenosos, separa-se cerca de 120 g e para solos siltosos e argilosos cerca de 70 g. Em seguida, o material separado é colocado em um béquer e misturado com o defloculante, de solução de hexametafosfato de sódio, ficando em repouso por cerca de 16 horas. Posteriormente, mistura-se no aparelho dispersor, e coloca-se em um béquer para que se possa realizar leituras através do densímetro. Terminada as leituras, esse material do béquer é lavado na peneira nº 200, depois levado a estufa, e após de seco realiza-se o peneiramento fino. Com o resultado desses procedimentos, monta-se a curva de granulometria do material ensaiado.

3.4.3 Ensaios para a classificação tradicional dos solos

Segundo Ortigão 2007, os limites definidos pelo agrônomo sueco Atterberg foram os de contração (LC), plasticidade (LP) e liquidez (LL), correspondentes à transição entre os estados sólido, em que não há mais variação de volume, plástico, em que o volume varia com a umidade, e líquido. Neste trabalho e para a classificação de solos SUCS e HRB AASHTO apresentados nos itens 2.3.11 e 2.3.1.2 interessam apenas o LL e o LP.

O IP é a diferença entre o LL e LP de acordo com a Equação 2:

$$IP = LL - LP \quad (2)$$

Especificado pela NBR 6459/84, o ensaio de limite de liquidez é realizado através do equipamento de Casagrande, com uma amostra de solo passante na peneira nº 42 (0,42 mm) (ABNT, 1984). Já para a realização do ensaio de limite de plasticidade, segue-se o preconizado na NBR 7180/84 (ABNT, 1984).

3.4.4 Compactação do Solo

Os ensaios de compactação foram realizados de acordo com a NBR 7182/86 nas energias de compactação apresentadas na Tabela 05. Através desse ensaio, podemos traçar a curva de umidade versos massa específica aparente seca objetivando determinar os pontos de umidades ótimas e massas específicas aparentes secas máximas para as diferentes energias (ABNT, 1986).

Tabela 05: Diferentes energias de compactação

Cilindro	Caract. p/ cada energia	ENERGIA		
		Normal	Intermediária	Modificada
Pequeno (4")	Soquete	2500g	4536g	4536g
	N° de camadas	3	3	5
	Golpes por camada	26	21	27
Grande (6")	Soquete	4536g	4536g	4536g
	N° de camadas	5	5	5
	Golpes por camada	12	26	55
	Altura do disco espaçador (mm)	63,5	63,5	63,5

Fonte: NBR 7182/86

3.4.5 Índice de Suporte Califórnia (ISC)

O Índice de Suporte Califórnia (ISC) nada mais é que a capacidade de suporte que um solo possui em relação à sua resistência à penetração, considerando como padrão a penetração em uma mistura de brita graduada (ISC = 100%)., segundo Pinto (2000).

A realização deste ensaio baseia-se na NBR 9895/87, sendo necessário o uso do cilindro e do soquete grande, podendo ser ensaiadas nas três diferentes energias: normal (12 golpes) intermediaria (26 golpes) e modificada (55 golpes), em cinco camadas. Para isso, utiliza-se a umidade ótima encontrada na curva dos ensaios de compactação (ABNT, 1987).

3.5 **Ensaios da Sistemática MCT**

Para a realização deste trabalho de conclusão de curso, foram realizados os seguintes ensaios citados no item 2.4:

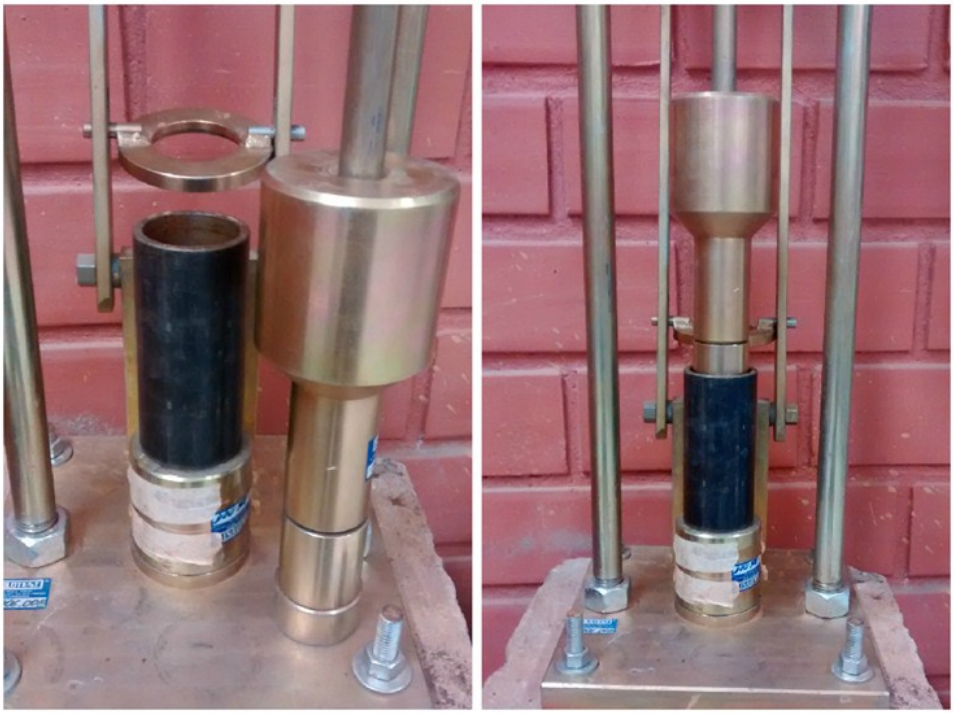
- ✓ M2 – Ensaio Mini-CBR.
1. M3 – Ensaio de Contração
- ✓ M5 – Ensaio de Compactação Mini-MCV;
- ✓ M8 – Perda de Massa por Imersão

3.5.1 Ensaio de Mini-CBR (M2)

O ensaio de Mini-CBR apresenta a capacidade de suporte que poderá ser utilizado no dimensionamento de pavimentos e na escolha do material, como solos e solos-agregados para base, reforço e sub-base e também para caracterização de solos do subleito.

Segundo Villibor e Nogami (2009), os procedimentos do ensaio são basicamente os mesmos adotados para o ensaio de ISC citado anteriormente, porém, requer mais cuidado, pois como são realizados em amostras miniatura, são mais sensíveis. Os corpos de prova são obtidos conforme o método de compactação. Esta pode variar dependo do tipo de soquete que se tem disponível, soquete pequeno, adota-se 12 golpes de cada lado do corpo de prova e soquete grande, 6 golpes de cada lado do corpo de prova. É necessário que o corpo de prova tenha altura de 50 mm mais ou menos 1 mm. Então a massa a ser colocada dentro do cilindro, varia em função da altura de compactação. Na Figura 10 apresenta-se um corpo de prova sendo moldado e compactado com o soquete grande.

Figura 10: Compactação do ensaio Mini-CBR



Fonte: Autoria própria (2015)

Para a realização do ensaio, seguiu-se o preconizado no método de ensaio DNER-ME 254/97. Utiliza-se a moldagem de corpos de prova imersos por um tempo determinado, assim como de corpo de prova não imerso, possibilitando com os resultados traçar uma curva. Nos corpos de prova imersos, que ficam submergidos por cerca de 20 horas, é efetuado o seu rompimento uma hora depois da retirada do reservatório de imersão, a fim de não haja excesso de água nele, assim como é feito no ISC tradicional. Já para os corpos de prova não imersos, executa-se o rompimento após 1 hora do término da moldagem (DNIT, 2006). Observa-se na Figura 11, os corpos de prova sendo colocados em imersão.

Figura 11: Corpos de Prova moldados e em imersão

Fonte: Autoria própria (2015)

Segundo as especificações da norma DNER-ME 254/97 para o rompimento, ajusta-se o dinamômetro para que o cursor parta do zero no deslocamento. Realiza-se leitura a cada 0,15 minutos, ou seja, o extensômetro dará 1,25 voltas/min. Como pode ser notada na Figura 12.

Figura 12: Corpos de Prova sendo rompidos

Fonte: Autoria própria (2015)

3.5.2 Ensaio de Contração (M3)

Segundo Villibor e Nogami (2009), o ensaio de contração é considerado o mais importante para determinar o melhor aproveitamento de solos tropicais utilizados em pavimentação, principalmente para aqueles com granulometria fina, como é o caso, que geralmente são utilizados em áreas com tráfego de baixo volume e de baixo custo.

Ainda sobre os mesmos autores, os corpos de prova são preparados segundo o procedimento Mini- CBR, dando-se 6 ou 12 golpes, como de cada lado do corpo de prova, dependendo do tipo de soquete que será utilizado.

Eles afirmam ainda que, inicialmente molda-se o corpo de prova, mede sua altura inicial e em seguida coloca-os em repulso por cerca de 24 horas, evitando a exposição excessiva ao sol, ou variação de secagem através do ar. Após esse período, mede-se novamente a altura dos corpos de prova para saber o quanto o contraiu ou expandiu.

Para traçar a curva, é necessário dos valores das umidades de moldagem do corpo de prova e dos valores da contração final, que é expressa pela equação nº 3:

$$Ct = \frac{Li - Lf}{Hi} * 100 \quad (3)$$

Onde:

Ct = Contração final do solo (%)

Li = Leitura inicial do corpo de prova

Lf = Leitura final do corpo de prova após 24 horas

A seguir, é apresenta-se a Figura 13, onde observa-se a realização do ensaio.

Figura 13: Realização do Ensaio

Fonte: Autoria própria (2015)

3.5.3 Ensaio de Compactação Mini-MCV (M5)

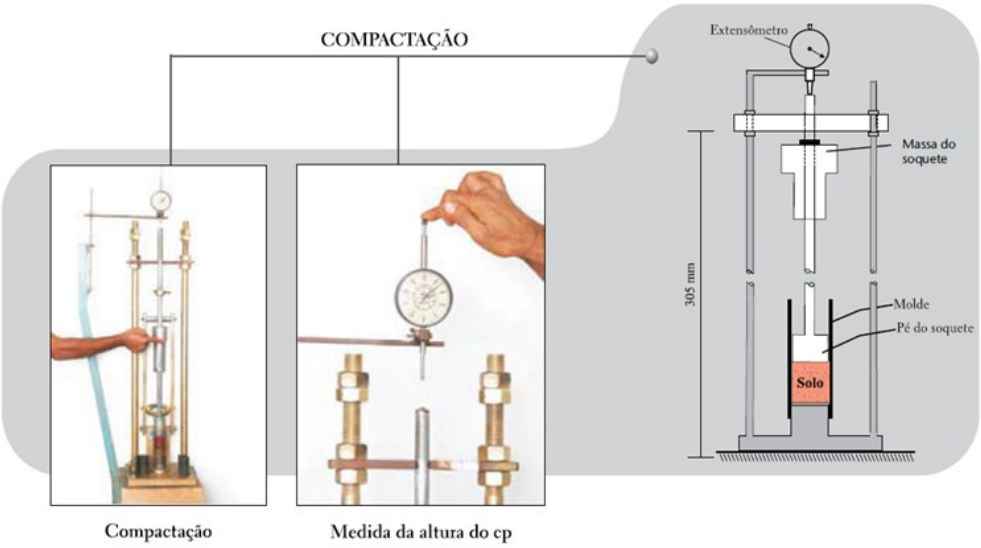
Para a realizado da compactação Mini-MCV, utiliza-se os valores da umidade ótima da energia normal de compactação tradicional. Durante a execução do ensaio conforme a aplicação dos golpes é medida a altura do corpo de prova. O ensaio baseia-se na norma DNER-ME 258/94, onde especifica que deve ser preparado 5 amostras de solo passante na peneira nº10 (2,00 mm) e misturado de acordo com a umidade ótima de compactação tradicional, sempre dois pontos acima e dois pontos abaixo dessa umidade. O valor da variação dos pontos de umidade é estipulado segundo o tipo se solo, pois para solos arenosos, varia-se de 1,5% a 2%de água, e para solos argilosos de 3% a 4% de água. Dispõem-se para cada amostra de 500 gramas de material devidamente homogeneizado por cerca de 24 horas. Ocupa-se 200 gramas dessa amostra para moldagem, sendo que do restante, deve ser retirada as cápsulas para determinação da umidade.

Ainda segundo a norma, acondiciona-se sempre a mesma quantidade de solo úmido (200 g) no cilindro posicionado no equipamento de compactação. Depois de aplicado o golpe inicial de um peso padrão caindo de uma altura uniformizada, mede-se a altura **Ai** (altura inicial) do corpo de prova. Em seguida aplica-se uma série crescente de golpes, padronizado pela norma, com a seguinte sequência: 2, 3, 4, 6, 8, 12, 16, 24, 32, 48, 64, 96, 128, 192 e 256, fazendo as leitura das alturas Af (altura final) ao final de cada série de golpes. Quando a diferença de altura entre duas séries de golpes sucessivas for menor do que 0,2 mm, ou número de golpes atingirem 256, acaba-se o ensaio. Esse procedimento é realizado em cada amostra com o teor de umidade diferente.

Através disso, consegue-se traçar a curva de compactação do Mini-MCV, que nada mais é do que a massa específica aparente seca máxima em função da umidade, para diferentes teores de umidades com uma série de diferentes golpes aplicados.

Na figura a seguir, é representado o equipamento específico onde é realizado o ensaio de compactação Mini-MCV. Nota-se também como é a posição do soquete em relação ao cilindro.

Figura 14: Equipamento para a realização do ensaio Mini-MCV



Fonte: Villibor e Nogami (2009, p.43)

Figura 15: Ensaio sendo executado

Fonte: Autoria própria (2015)

3.5.4 Ensaio de Perda de Massa por Imersão (M8)

Para a realização deste ensaio, ocupa-se os corpo de prova já moldados pela compactação Mini-MCV, extraindo cerca de 1 cm de dentro do cilindro e deixando submerso horizontalmente dentro do reservatório com água.

Segundo a norma DNER-ME 256/94, após um tempo mínimo de 20 horas, retira-se cuidadosamente do reservatório o cilindro com o material desprendido em função da imersão e depois desse material seco em estuda, determina-se sua massa em relação a massa total. Lembrando que é importante a consideração do aspecto em que o material desprendido se encontra. Através disso, pode-se calcular então a perda de característica do solo para cada teor de umidade através da seguinte equação 4:

$$\mathrm{PI} = 100\,\frac{\mathrm{Mi}\times\mathrm{Lcp}}{\mathrm{Ms}\times\mathrm{Lf}}\,\mathrm{Fc}\ [\%] \qquad (4)$$

Onde:

Mi = Massa seca desprendida;

Ms = Massa seca do corpo de prova, logo após a sua compactação;

Lcp = Altura final do corpo de prova, logo após a compactação;

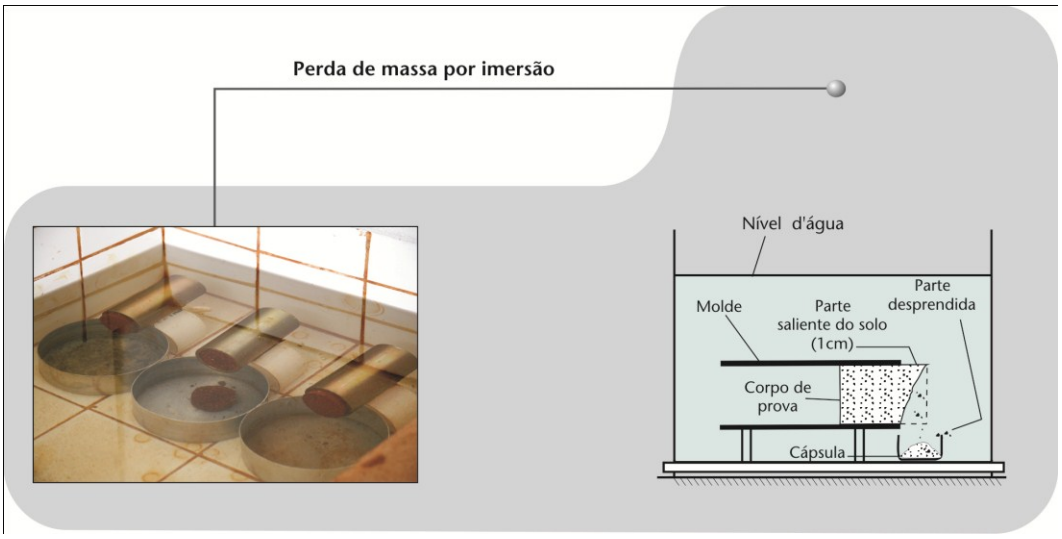
Lf = 10cm, altura do corpo de prova, para molde;

Fc = 1,0 quando ocorre um desprendimento normal;

Fc = 0,5 quando a parte desprendida é um monobloco.

As Figuras 16 e 17 mostram os corpos de prova em imersão durante a realização do ensaio, e também como é a forma mais característica do desprendimento do material.

Figura 16: Equipamento para ensaio de Perda de Massa por Imersão



Fonte: Villibor e Nogami (2009, p.51)

Figura 17: Corpos de prova sendo ensaiados

Fonte: Autoria própria (2015)

Por fim, é apresentado a quantidade corpos de prova que serão utilizados para poder ser feias as análises laboratoriais e posteriormente apresentação dos resultados.

Tabela 06: Relação dos corpos de prova que serão moldados

ENSAIOS	ALA 20%	ALA 30%	ALA 40%	SOLO NATURAL
Compactação	5	5	5	5
ISC	1	1	1	1
M2	10	10	10	10
M3	5	5	5	5
M5	5	5	5	5
M8	5	5	5	5

Fonte: Autoria própria (2015)

4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Durante a seção anterior abordou-se as metodologias para a realização dos ensaios laboratoriais deste trabalho. Já nesse capítulo apresentam-se os resultados dos ensaios e realizar-se-ão análises visando o uso das misturas em bases e sub-bases de pavimentos. Salienta-se que foram utilizados resultados de ensaios anteriores realizados pelo Grupo de Pesquisa em Novos Materiais e Tecnologias para a Construção no projeto de pesquisa institucional "Estudo do Solo Argiloso Laterítico para Uso em Pavimentos Econômicos", que estão contidos no TCC da egressa Cândida Bernardi, sendo devidamente referenciados (BERNARDI, 2013).

4.1 Análise Granulométrica e Limites de Consistência

Foi realizado a análise granulométrica de acordo com o explanado no item 3.4.2, sendo separado a fração grossa para o peneiramento, e a da fração fina inicialmente realizou-se a sedimentação e após o peneiramento fino resultante. A Figura 18 apresenta o ensaio de sedimentação em execução, percebendo-se o ensaio das misturas ALA 20%, 30% e 40%.

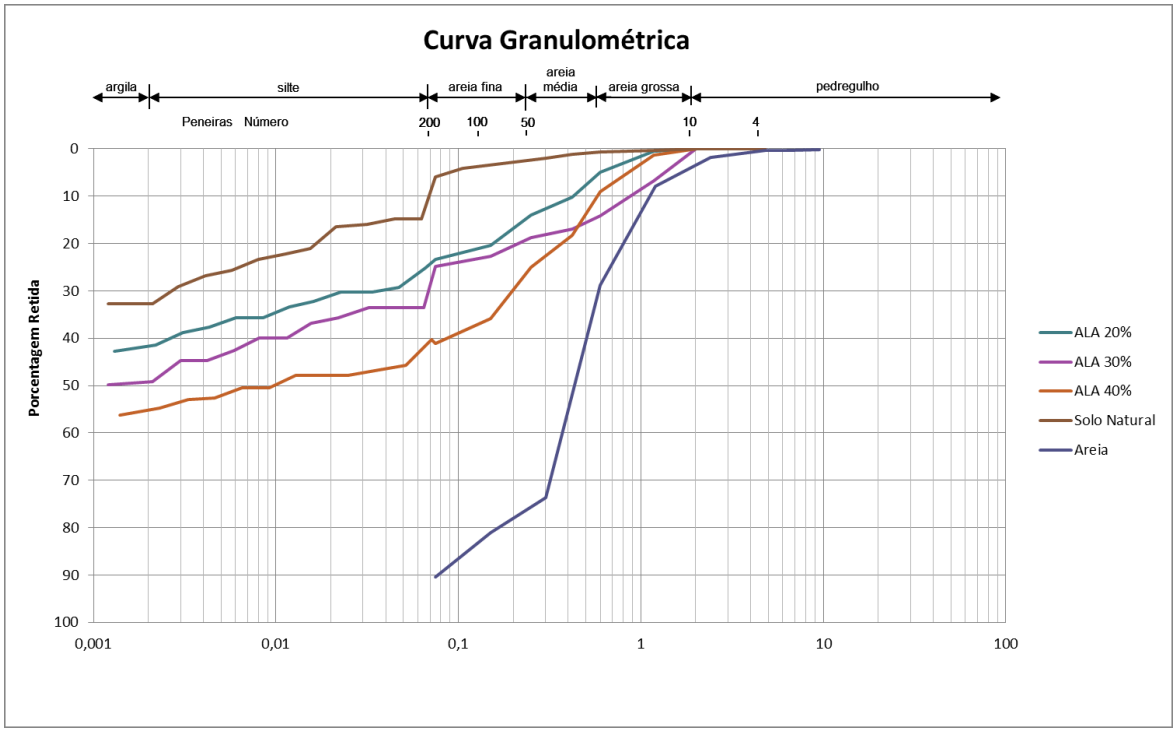
.

Figura 18: Ensaio de Sedimentação das Misturas ALA

Fonte: Autoria própria (2015)

Na Figura 19 são apresentadas as curvas granulométricas do solo natural, da areia e das misturas ALA. Baseados nesses dados pode-se afirmar que a granulometria da areia encontra-se entre as peneiras nº 4 e nº 200. O solo natural em estudo possui porcentagem de aproximadamente 95% de material passante na peneira nº 200, considerando-o com granulometria extremamente fina. Por fim, as misturas ALA por apresentarem maior quantidade de solo natural do que areia em sua composição tiveram suas curvas granulometricamente semelhantes ao do solo natural, porém, percebe-se que quando a um aumento na porcentagem de areia na mistura, consequentemente há um decréscimo da curva.

Figura 19: Gráfico das Granulometrias do Solo Natural, da Areia e misturas ALA



Fonte: Autoria própria (2015)

Na Tabela 07, são apresentados os valores obtidos dos ensaios de limite de plasticidade e de liquidez, de acordo com o exposto no item 3.4.3 da Metodologia.

Tabela 07: Limites de Atterberg do solo natural e das misturas

Amostra	IG	LP (%)	IP
Solo Natural	18	39	26
ALA 20%	9	37	11
ALA 30%	9	39	10
ALA 40%	4	35	8

Fonte: Bernardi C. (2013)

A norma DNIT-ES 141/2010 especifica que para utilização de materiais em base estabilizadas granulometricamente de pavimentos, o limite de liquidez deve apresentar valores inferiores ou iguais a 25% e índice de plasticidade valores inferiores ou iguais a 6%. Sendo assim, nenhuma mistura ALA se enquadra. Já de acordo com a norma DNIT-ES 098/2007, tratando de solo laterítico para utilização em bases estabilizadas, o material deve apresentar limite de liquidez inferior ou igual a 40% e índice de plasticidade inferior ou igual a 15%, baseado nisso, o solo em estudo não segue tal especificação. Ressalta-se que são especificações tradicionais que não consideram as especificidades dos solos tropicais.

4.2 **Classificação do Solo e das Misturas**

4.2.1 Sistema Unificado de Classificação de Solo – SUCS

Segundo o Sistema Unificado de Classificação de Solos – SUCS apresentado no item 2.2.1.1 da revisão, o solo em estudo é, classificado como MH, considerado um silte de alta plasticidade, por que apresentou um alto limite de liquidez, cerca de 65%, acima de 50% e portanto acima da Linha A do Gráfico de Plasticidade de Casagrande. Já as misturas ALA se enquadram como ML, representando um silte de baixa plasticidade, por apresentaram limite de liquidez abaixo do especificado pelo SUCS que é 50%, ou seja, abaixo da Linha A do Gráfico de Plasticidade de Casagrande.

4.2.2 Sistema Rodoviário de Classificação (HRB/AASHTO)

Para a classificação pelo Sistema Rodoviário (HRB/AASHTO) onde sua metodologia foi especificada através do item 2.2.1.2, foi necessário calcular o Índice de Grupo (IG) do solo natural e de todas as misturas. Os resultados então descritos na Tabela 08 a seguir:

Tabela 08: Resultados do Índice de Grupo do solo natural e das misturas

Amostra	IG
Solo Natural	18
ALA 20%	9
ALA 30%	9
ALA 40%	4

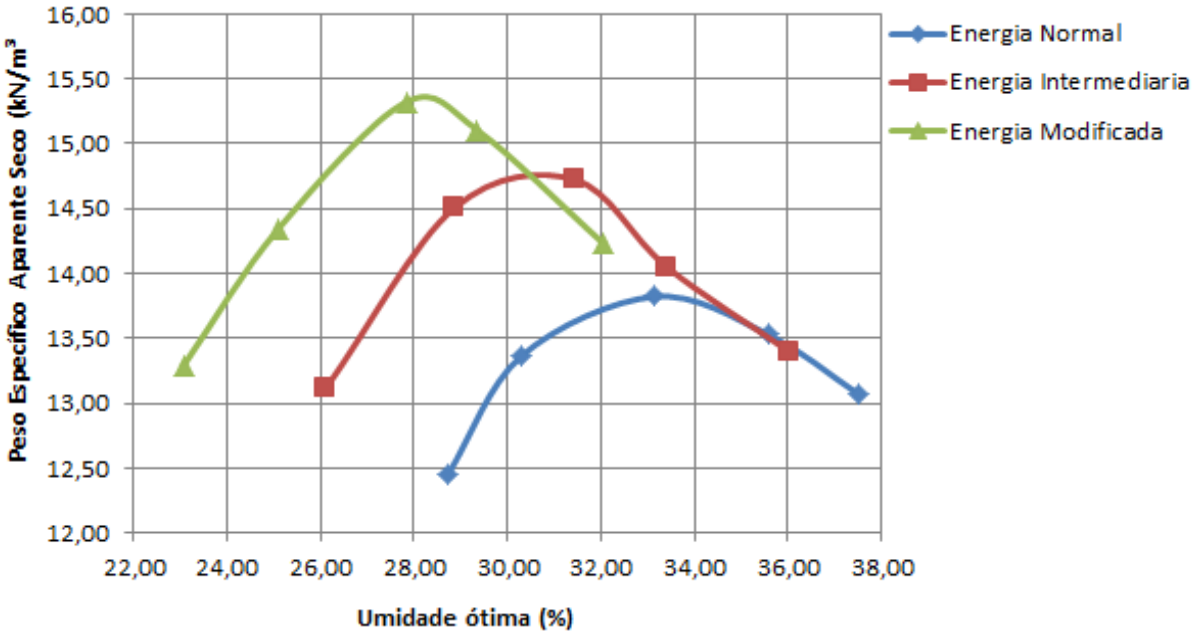
Fonte: Bernardi (2013)

Baseado nos dados obtidos através da granulometria, dos limites de Atterberg e do índice de grupo, classificou-se o solo natural e as misturas ALA. Segundo interpretação de Bernardi (2013), através da classificação HRB/AASHTO, o solo natural e a mistura ALA 20% enquadram-se como um A-7-5 (solos argilosos), já as misturas ALA 30% e ALA 40% foram classificadas como A-5 (solos siltosos). DNIT (2006) cita que solos dos grupos A-5 e A-7-5 podem ser altamente elásticos e sujeitos a elevadas mudanças de volume, e com comportamento de caracterização para subleito considerado sofrível a mau, fato que se sabe não corresponde a realidade, uma vez que pelo menos como subleito estes solos são excepcionais.

4.3 **Compactação**

Os ensaios de compactação do solo natural e das misturas ALA foram realizados de acordo com a descrição do item 3.4.4, descrito na seção anterior. Utilizaram-se três energias de compactação, energia normal, intermediaria e modificada. Os resultados de umidade ótima e peso específico aparente seco máximo respectivamente para o solo natural são observadas na Tabela 09, retirados do gráfico da Figura 20, e das mistura ALA 20% da Tabela 10 e Gráfico 21, ALA 30% da Tabela 11 e Gráfico 22 e ALA 40 % da Tabela 12 e Gráfico 23.

Figura 20: Curva de Compactação do Solo Natural



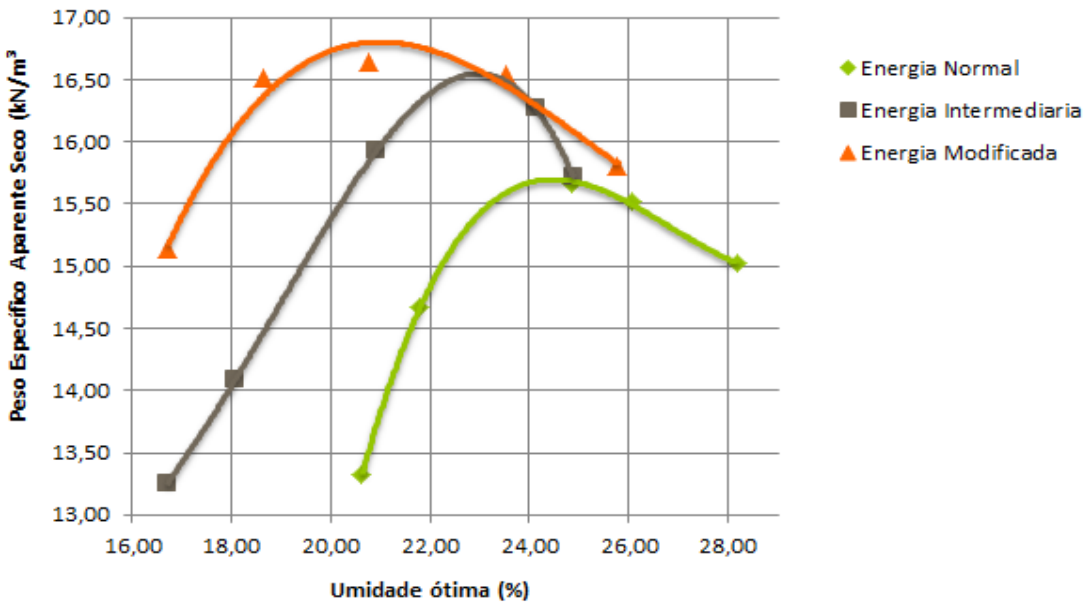
Fonte: Bernadi (2013)

Tabela 09: Umidades ótimas nas diferentes energias de compactação

ω	28,72	30,3	33,15	35,57	37,5	Energia Normal
γ_d	12,45	13,37	13,82	13,53	13,07	
ω	26,11	28,87	31,44	33,41	36	Energia Intermediária
γ_d	13,12	14,51	14,72	15,05	13,4	
ω	23,07	25,1	27,83	29,35	32,06	Energia Modificada
γ_d	13,29	14,35	15,32	15,11	14,23	

Fonte: Bernadi (2013)

Figura 21: Curva de Compactação da Mistura ALA 20%



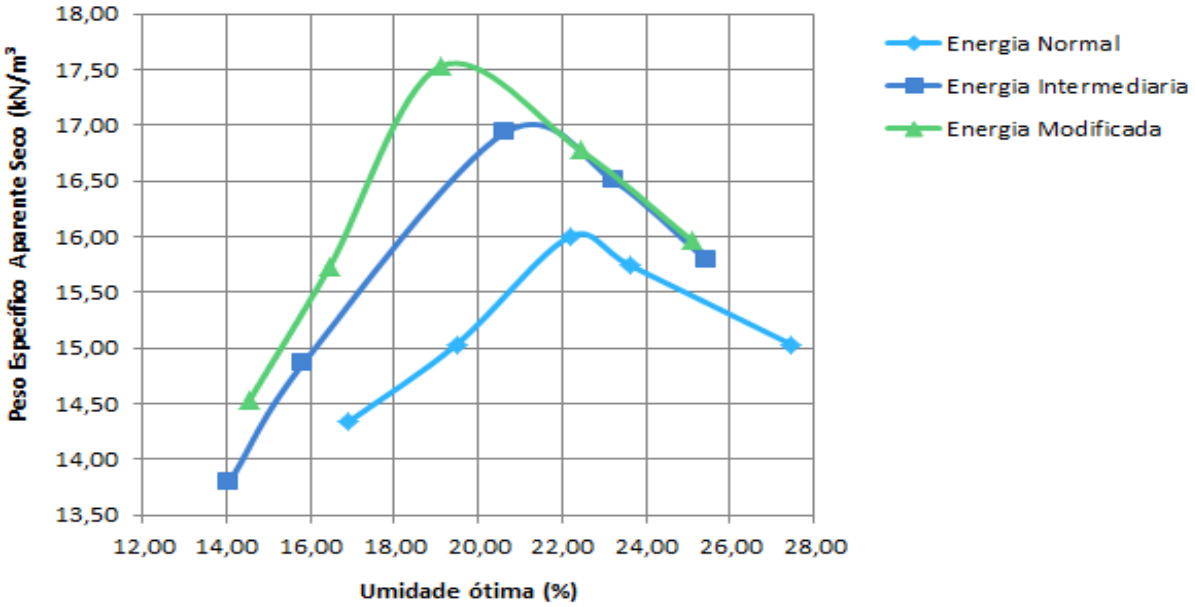
Fonte: Bernadi (2013)

Tabela 10: Umidades ótimas nas diferentes energias de compactação

ω	20,62	21,77	24,86	26,07	28,17	Energia Normal
γ_d	13,32	14,67	15,67	15,52	15,03	
ω	16,69	18,07	20,92	24,13	24,89	Energia Intermediária
γ_d	13,25	14,09	15,93	16,27	15,72	
ω	16,72	18,66	20,77	23,5	25,76	Energia Modificada
γ_d	15,14	16,51	16,65	16,54	15,8	

Fonte:Bernadi (2013)

Figura 22: Curva de Compactação da Mistura ALA 30%



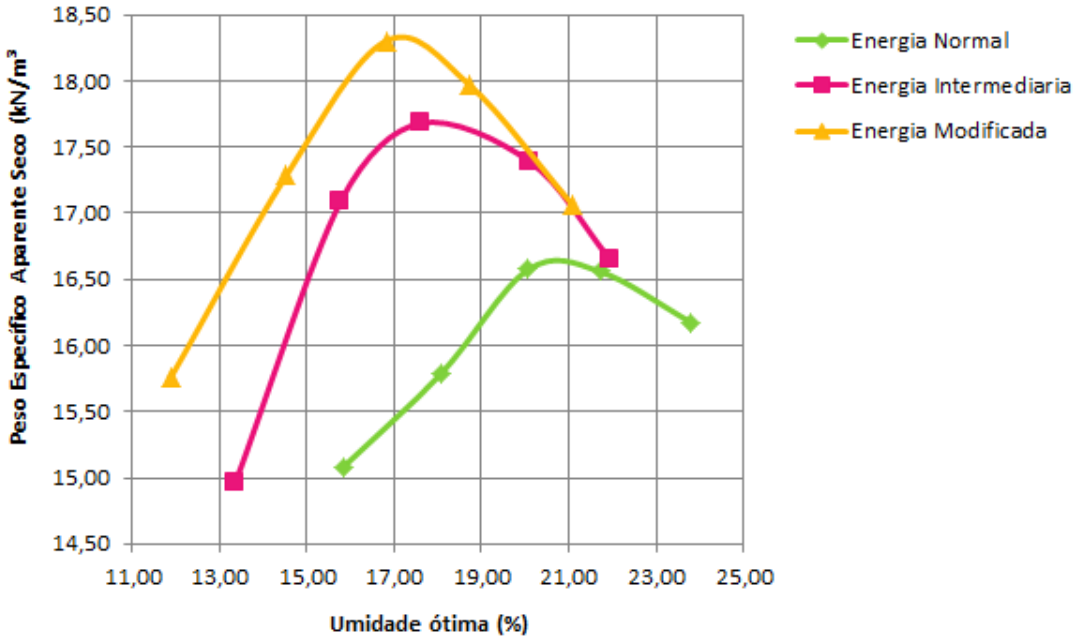
Fonte: Bernadi (2013)

Tabela 11: Diferentes energias de compactação e massa específica da ALA 30%

ω	16,91	19,48	22,21	23,62	27,47	Energia Normal
γ_d	14,34	15,04	16,01	15,74	15,03	
ω	14,07	15,84	20,64	23,22	25,42	Energia Intermediária
γ_d	13,8	14,87	16,94	16,5	15,79	
ω	14,54	16,44	19,09	22,42	25,08	Energia Modificada
γ_d	14,53	15,72	17,53	16,78	15,97	

Fonte: Bernadi (2013)

Figura 23: Curva de Compactação da Mistura ALA 40%



Fonte: Bernadi (2013)

Tabela 12: Diferentes energias de compactação e massa específica da ALA 40%

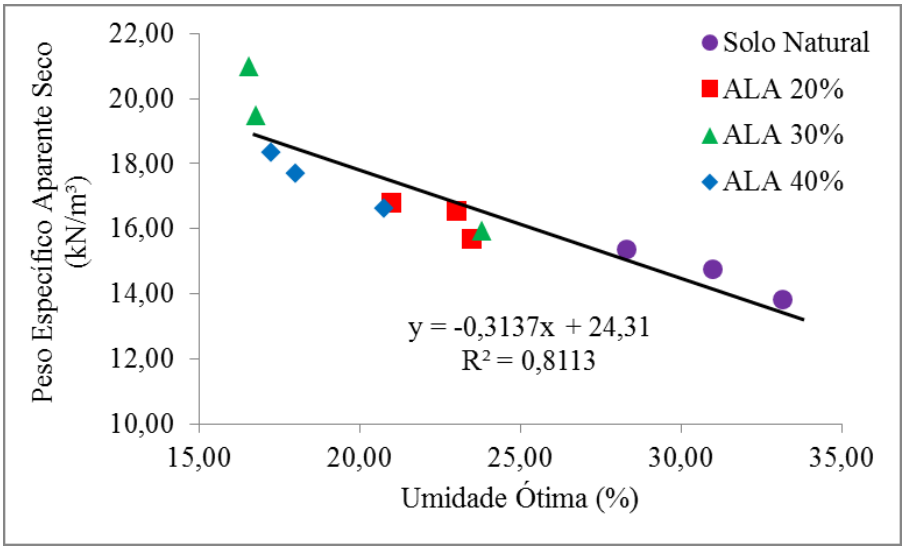
ω	15,83	18,07	20,07	21,71	23,81	Energia Normal
γ_d	15,08	1579	16,58	16,56	16,17	
ω	13,36	15,77	17,59	20,11	21,93	Energia Intermediária
γ_d	14,96	17,09	17,68	17,39	1666	
ω	11,9	14,53	16,82	18,73	21,08	Energia Modificada
γ_d	15,77	17,29	18,3	17,97	17,06	

Fonte: Bernardi (2013)

Analisando os gráficos de compactação do solo natural e misturas ALA percebe-se uma tendência clara de aumento do PEAS máximo e diminuição da umidade ótima com o aumento da energia de compactação e com o aumento do teor de areia na mistura, comportamento que era esperado.

Reforçando esta tendência, na Figura 24 apresenta-se a reta de tendência da relação umidade ótima x peso especifico aparente seco máximo, das misturas ALA e do solo natural nas diferentes energias de compactação. Com o aumento de porcentagem da areia, há um aumento na densidade e uma diminuição da umidade ótima. Percebe-se também, que o valor R^2 encontrado é 0,8113, significando uma boa relação matemática.

Figura 24: Reta de tendência w_{ot} x $PEAS_{max}$



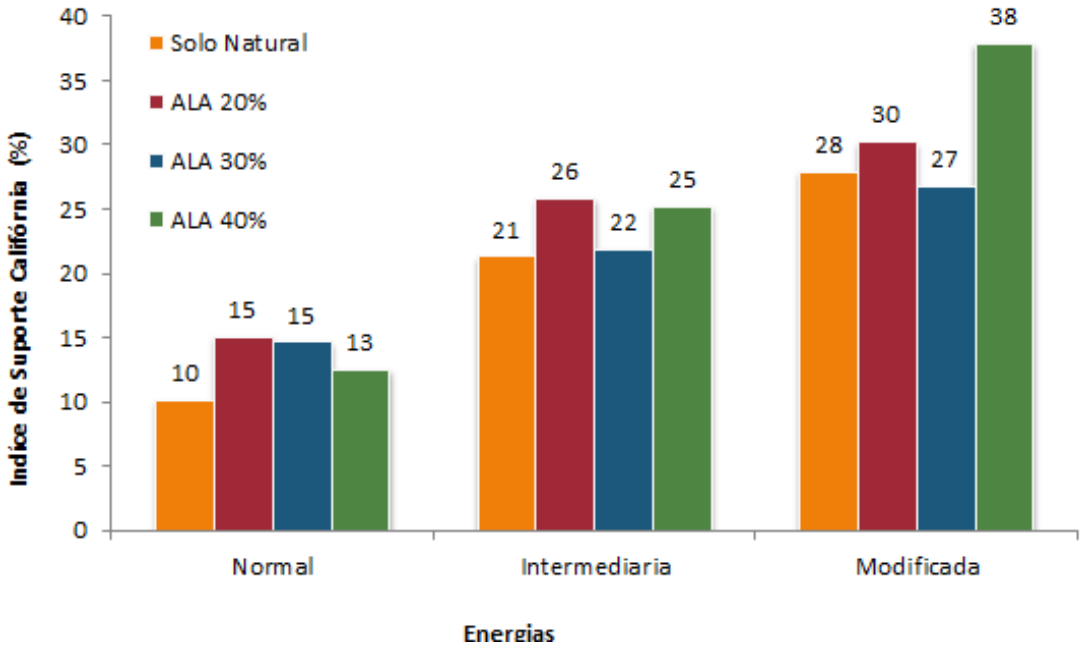
Fonte: Autoria própria (2015)

4.4 Índice de Suporte Califórnia (ISC/CBR)

A Figura 25 apresenta os valores em porcentagem dos resultados obtidos com o ensaio de ISC do solo natural e das misturas ALA. Para um melhor comparativo, as amostras foram moldadas nas diferentes energias especificadas em norma, como foram descritas no item 3.4.5 do capítulo anterior. Bernardi (2013) descreve que a resistência aumenta conforme adiciona-se areia,

por ser um material mais resistente que o solo. Percebe-se também, que há uma variação ao longo dos resultados, pois como sabemos, o ISC não é um ensaio que caracteriza bem os solos finos, por terem muita sensibilidade à imersão.

Figura 25: Comparação dos resultados de ISC para o solo natural e misturas ALA



Fonte: Bernardi (2013)

A expansão é a relação entre o aumento do corpo de prova em relação a sua altura inicial, essa medida é expressa em porcentagem. Como podemos perceber na Tabela 13, a uma variação entre 0,16 e 0,54, valores considerados baixos.

Tabela 13: Expansão no Ensaio ISC do Solo Natural e Misturas

CBR		Expanção(%)
Solo Natural	Normal	0,22
	Intermediária	0,3
	Modificada	0,54
ALA 20%	Normal	0,24
	Intermediária	0,41
	Modificada	0,46
ALA 30%	Normal	0,16
	Intermediária	0,21
	Modificada	0,25
ALA 40%	Normal	0,25
	Intermediária	0,17
	Modificada	0,33

Fonte: Bernardi (2013)

Segundo DNIT (2006), para utilização de materiais em subleito, a expansão deve ser menor ou igual a 2% e apresentar ISC≥2%. Baseado nos dados da Tabela percebe-se que na energia normal, que é a energia recomendada para subleito, tanto os resultados do solo natural como o das misturas satisfazem as recomendações. Já para uso em sub-base, DNIT (2006) recomenda que tanto os materiais quanto o solo apresentem ISC≥20%, IG=0 e expansão ≤1%. Com isso, os resultados obtidos na energia intermediaria atendem parcialmente a recomendação, pois apresentam ISC≥20% e expansão≤1%, porém o IG≠0, não satisfaz a especificação.

Já de acordo com a norma DNIT-ES 098/2007 que indica para uso de solo em base de solo laterítico estabilizada granulometricamente, o ISC deve satisfazer os seguintes critérios relacionados ao tráfego traduzido no número N de passagens do eixo padrão de 8,2t, para o período de projeto: ISC ≥ 60% para $N \leq 5 \times 10^6$ e ISC ≥ 80% para $N > 5 \times 10^6$. Através disso, observa-se pelos resultados da Figura 25 que nenhuma das amostras atende a estas especificações.

4.5 Ensaios da Metodologia MCT

Os ensaios de Mini-CBR (M2) das misturas ALA, foram realizados em parceria com a Universidade Federal de Santa - UFSM, com a colaboração do Professor Dr. Rinaldo José Barbosa Pinheiro.

Sobre os demais ensaios da metodologia MCT, como o M5, M8 e M9, foram realizados na Universidade Regional do Noroeste do Rio Grande do Sul, UNIJUÍ, no Laboratório de Engenharia Civil, LEC, onde seus resultados serão apresentados posteriormente.

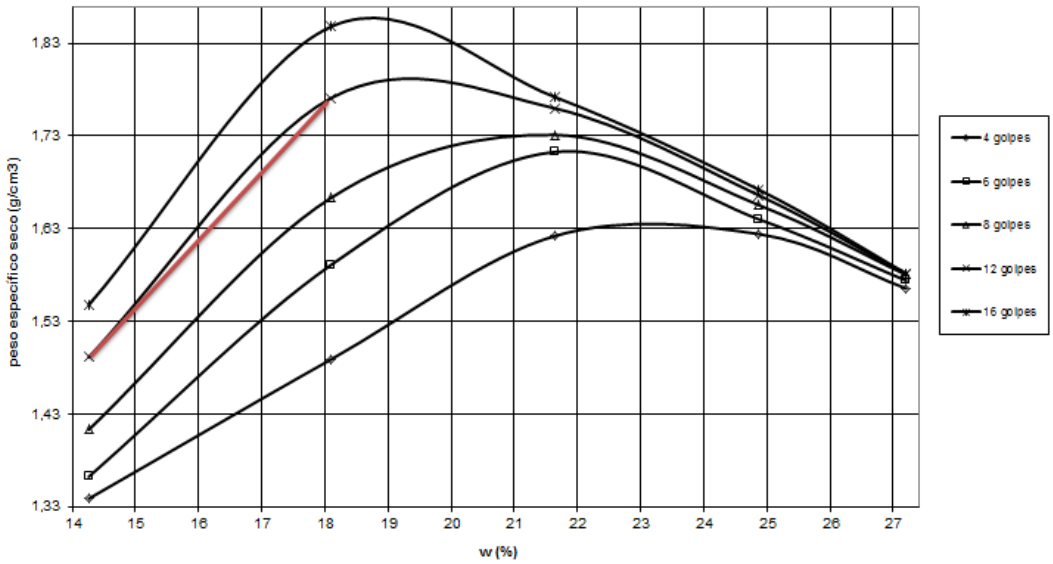
As amostras dos ensaios descritos no paragrafo anterior foram preparadas conforme especificações de Nogami e Villibor (2009). Após a coleta e secagem por 24 horas em estufa as amostras de areia e solo natural foram passadas na peneira nº 10, e posteriormente separadas para realização desses ensaios.

4.5.1 Ensaio de Mini-MCV (M5)

O ensaio seguiu as orientações da norma DNER-ME 258/94. Para a realização são preparados cinco corpos de prova e moldados em umidades diferentes (umidade especificada em norma é na energia intermediária da compactação tradicional). Segue-se o mesmo procedimento, utilizando dois pontos acima e abaixo da umidade ótima, aplicando-se um número de golpes que já foi mencionado na metodologia do ensaio, descrito no item 3.5.3.

Como exemplo, toma-se a Figura 26 que mostra a curva de compactação do Mini-MCV da mistura ALA 40%. Através dela é possível obter o coeficiente d' utilizando-se curva referente a 12 golpes, que é a inclinação da reta vermelha do gráfico.

Figura 26: Curva de compactação ALA 40%



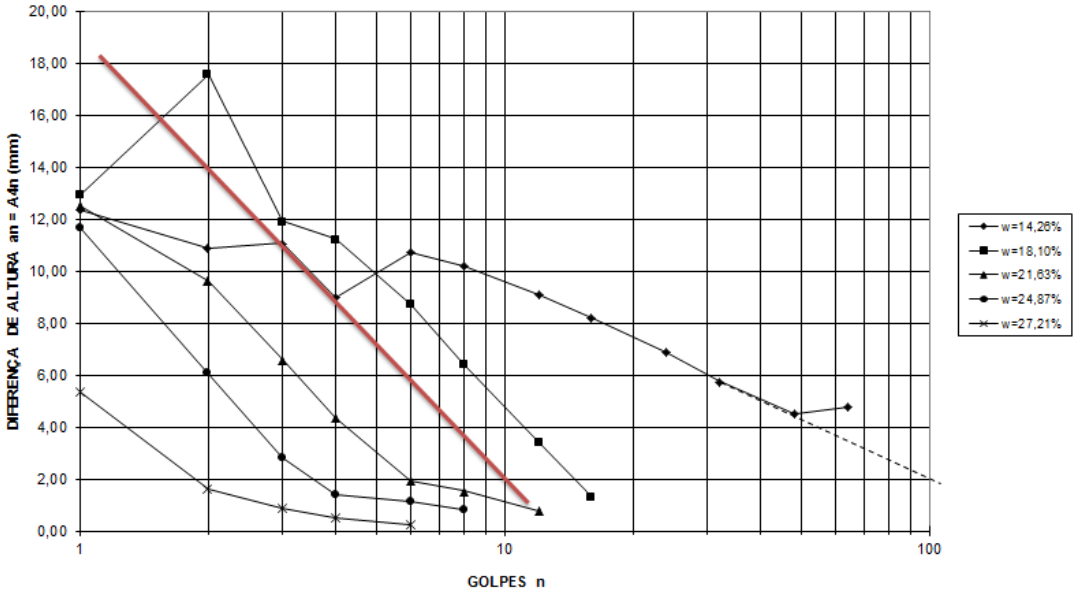
Fonte: Autoria própria (2015)

O coeficiente d' é calculado através da formula expressa pela Equação nº 5:

$$d' = \frac{\Delta MEAS\ (\frac{g}{cm^3})}{\Delta Hc\ (\%)} = \frac{1{,}7710 - 1{,}4915}{18{,}10 - 14{,}26} * 1000 = 72{,}80 \tag{5}$$

Já para o cálculo do coeficiente c', tomemos como exemplo a Figura 27, que mostra as curvas de deformabilidade da amostra ALA 40%.

Figura 27: Curva de deformabilidade ALA 40%



Fonte: Autoria própria (2013)

O coeficiente c' é calculado através da formula expressa pela Equação nº 6:

(6)

$$c' = \frac{12 - 2}{10 * (log10 - log2)} = 1{,}72$$

Na Tabela 14 são apresentados os resultados obtidos para os coeficientes d' e c' de todas as amostras ensaiadas. Através destes, observa-se que o coeficiente c' tem correspondência inequívoca com a granulometria, assim, quanto mais fino o material, maior o coeficiente.

Tabela 14: Valores de d' e c'

	d'	c'
Solo Natural	41,5	2,86
ALA 20%	136,87	2
ALA 30%	81,7	1,91
ALA 40%	72,8	1,72

Fonte: Autoria própria (2015)

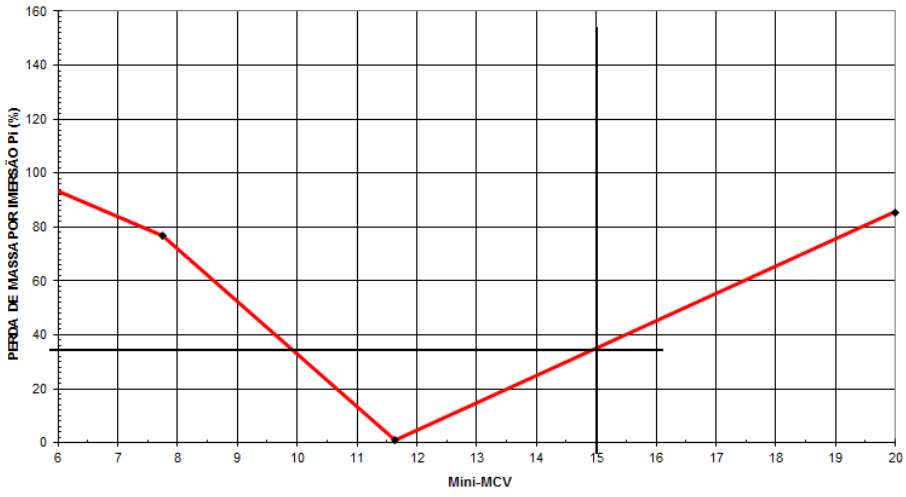
4.5.2 Ensaio da Perda de Massa por Imersão (M8)

Como citado no item 3.5.4, os ensaios seguiram as especificações das DNER-ME 256/94, ensaiados com umidades diferente (dois pontos acima e dois pontos abaixo da umidade ótima), totalizando cinco corpos de prova para cada mistura e posteriormente colocados em imersão por 16 horas.

Após serem calculados os respectivos teores de umidade para cada ponto, traça-se a curva Mini-MCV x Pi, onde nela, será encontrado o valor de Pi. Para os valores de Mini-MCV, iguais a 10 ou 15, dependendo quando a massa específica aparente for considerada baixa ou alta. Para que os valores de MEAS sejam considerados baixos, apresentar valor 10, o corpo de prova com 200 gramas deve atingir uma altura final superior a 48 mm, já para que os valores de MEAS sejam considerados altos, o corpo de prova deve apresentar altura inferior a 48mm.

Na Figura 28 apresenta-se a curva de Mini-MCV x Pi para a mistura ALA 40%, onde o valor encontrado para o Mini-MCV foi de 15, considerado baixo, pois o Pi encontrado é de 35%. Na Tabela 15 apresentam-se os valores de Pi para o solo e cada mistura.

Figura 28: Curva Mini-MCV x Pi da ALA 40%



Fonte: Autoria própria

A seguir, na tabela tal, são apresentados os valores de Pi para cada mistura. São eles:

Tabela 15: Resultados para PI

Amostra	Pi
Solo Natural	0
ALA 20%	32
ALA 30%	25
ALA 40%	35

Fonte: Autoria própria (2013)

4.5.3 Classificação Geotécnica MCT (M9)

Através dos valores obtidos de Pi e d', pode-se calcular o coeficiente e', que é o índice de laterização, de acordo com a equação nº 7:

$$e' = \sqrt[3]{\left(\frac{Pi}{100}\right) + \left(\frac{20}{d'}\right)} \quad (7)$$

Após o cálculo, tem-se todos os dados necessários para fazer o enquadramento no ábaco da Classificação MCT. Na Tabela 07, são apresentados os valores de e' obtidos do solo natural e das misturas ALA.

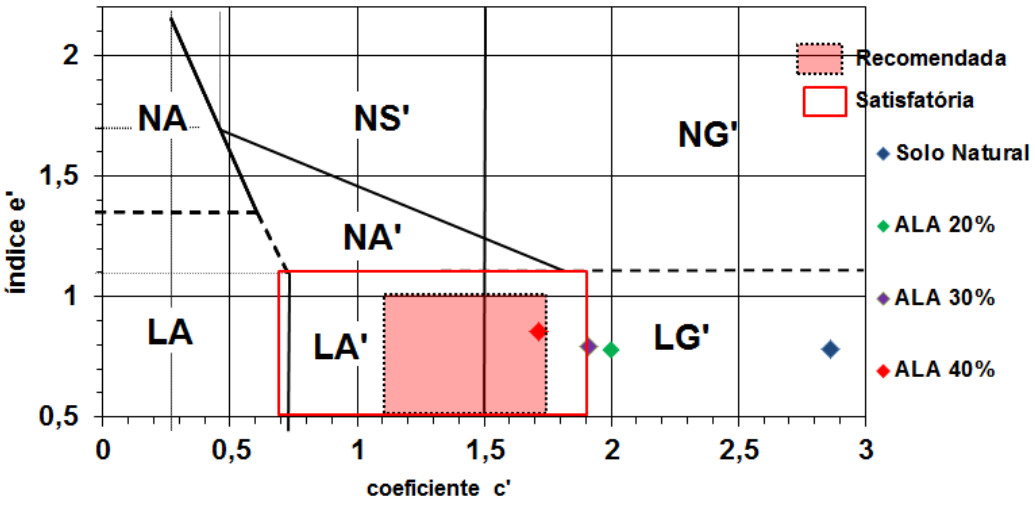
Tabela 16: Valores de e' para todas as amostras

Amostra	e'
Solo Natural	0,78
ALA 20%	0,78
ALA 30%	0,79
ALA 40%	0,85

Fonte: Autoria própria

Através do índice e' e o coeficiente c' verifica-se no gráfico da classificação o enquadramento do solo e misturas, conforme observa-se na Figura 29. Destacam-se as regiões recomendadas e satisfatórias que os pesquisadores Villibor e Nogami para uso de solos em bases e sub-bases de pavimentos (VILLIBOR E NOGAMI, 2009).

Figura 29: Classificação MCT para todas as amostras



Fonte: Autoria própria

Como podem ser percebidas, todas as amostras ensaiadas ficaram classificadas na região LG', sendo consideradas **solos lateríticos argilosos**. Observa-se também, que todas as misturas ficaram posicionadas mais ao centro do gráfico por apresentarem um coeficiente c' menor, comparando-se com o valor para o solo natural, situado bem a direita do gráfico por ser bem mais fino. Percebe-se também que as misturas ALA 20% e ALA 30% localizaram-se na região satisfatória e a ALA 40% na região recomendável, ou seja, essas misturas tem potencial forte de atender as especificações de Nogami e Villibor para uso em pavimentos, diferente da classificação do solo natural, que não se enquadra em nenhuma dessas regiões.

4.5.4 Ensaio de Contração (M3)

O ensaio de Contração é uma das especificações que o Mini-CBR deve atender, sendo que o resultado de contração deve estar compreendido entra 0,1% e 0,5%. Na Tabela 10 apresentam-se os valores de contração para as misturas ALA.

Tabela 17: Classificação MCT do Solo Natural e Misturas

	Contração (%)
ALA 20%	0,48
ALA 30%	0,65
ALA 40%	0,49

Fonte: Autoria própria (2015)

Baseado nesses dados, somente a ALA 20% e 40% atendem a especificação, com valores abaixo de 0,5%. Já a ALA 30% como podemos perceber não se enquadra.

4.5.5 Ensaio Mini-CBR (M2)

O ensaio de Mini-CBR foi realizado de acordo com o item 3.5.1. A Tabela 09 apresenta os pesos específicos aparentes secos máximos e as umidades ótimas teóricas e obtidas das amostras compactadas para os ensaios de Mini-CBR, tanto para amostras imersas quanto para as não imersas.

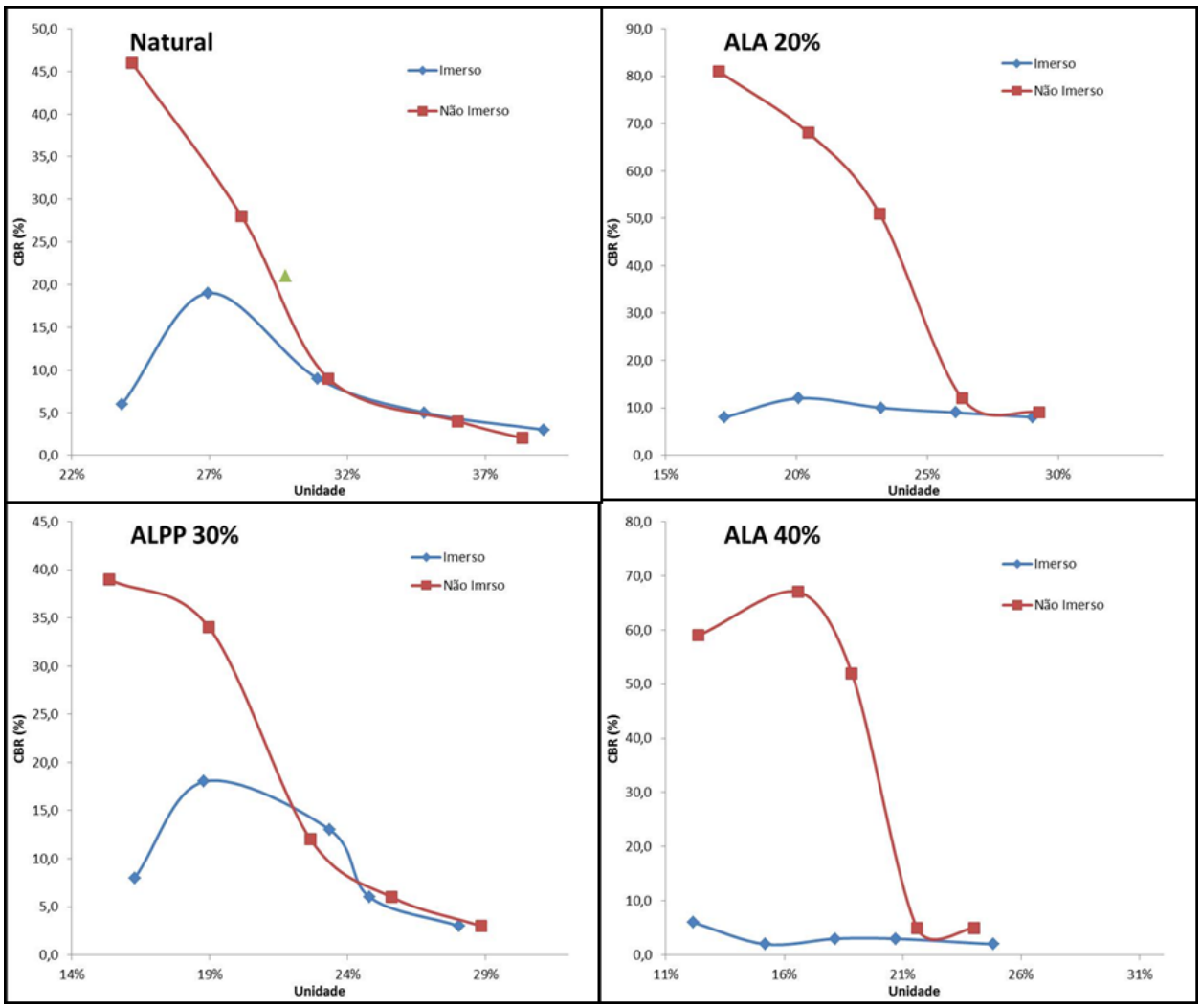
Tabela 18: PEASmax x Wot do solo e das amostras do ensaio M2

Umidade			Não Imerso		Imerso	
Material	Teor	TEORICA	γ_d (kN/m³)	ω	γ_d (kN/m³)	ω
ALA	20%	18%	14,5	17,03%	14,83	17,26%
		21%	15,11	20,46%	15,19	20,08%
		24%	16,51	23,17%	16	23,23%
		27%	15,82	26,33%	15,86	26,09%
		30%	15,33	29,28%	15,33	29,04%
	30%	16%	15,33	15,35%	15	16,28%
		19%	17,1	18,97%	16,44	18,79%
		22%	16,48	22,65%	16,44	23,35%
		25%	16,17	25,60%	16,29	24,80%
		28%	15,58	28,84%	15,32	28,05%
	40%	15%	15,9	12,38%	16,76	12,16%
		18%	17,03	16,58%	18,44	15,20%
		21%	16,81	18,85%	17,88	18,14%
		24%	17,16	21,60%	17,2	20,70%
		27%	16,34	24,00%	16,29	24,81%
Solo Natural		22%	13,81	24,18%	13,22	23,82%
		26%	15,46	28,16%	15,53	26,93%
		30%	14,56	31,30%	14,67	30,92%
		34%	13,84	36,00%	14,20	34,79%
		38%	12,74	38,34%	13,54	39,11%

Fonte: Autoria própria (2015)

Já a Figura 30 apresenta as curvas de variação dos Mini-CBR da umidade em função do CBR.

Figura 30: Curvas de variação dos Mini-CBR



Fonte: Autoria própria (2015)

Segundo critérios que a norma do DER/SP, ET-DE-P00-015 especifica, para execução correta e aceitação de construção em obras rodoviárias de bases e sub-bases de solos arenosos finos de comportamento laterítico, SAFL, algumas exigências que estes materiais devem satisfazer quando em obras rodoviárias, sendo os seguintes quando compactados na energia intermediaria:

- ✓ Mini-CBR sem imersão ≥ 40%;
- ✓ Perda de Suporte por Imersão (PSI) inferior a 50%, que pode ser expressa pela equação 8:

$$RIS = \frac{Mini-CBR\ com\ imersão}{Mini-CBr\ sem\ imersão} x100 \quad (8)$$

- ✓ Expansão com sobrecarga padrão ≤ 0,3%;
- ✓ Pertencerem aos grupos LA, LA' e LG' da classificação MCT;
- ✓ Contração entre 0,1% e 0,5%.

Na Tabela 21 apresenta-se a relação RIS e a Tabela 22 a relação PSI, sendo relações complementares, pois PSI é a diferença de 100% pela relação RIS

Tabela 19: Relação RIS

	RIS (%)
Solo Natural	67,7
ALA 20%	19,6
ALA 30%	108,33
ALA 40%	50

Fonte: Autoria própria (2015)

Tabela 20: Relação PSI

	PSI
Solo Natural	<50
ALA 20%	>50
ALA 30%	>50
ALA 40%	<50

Fonte: Autoria própria (2015)

Observando-se as tabelas 19 e 20, e tendo como base os pontos na umidade ótima, apenas a ALA 30% não apresentou relação RIS acima de 50%. Já para a relação de Mini-CBR sem imersão acima de 40%, apenas a mistura ALA 40% apresentou valores que atendem o especificado pela norma paulista. Baseado nas relações RIS e PSI, tanto o solo natural quanto a mistura ALA 40% atendem as especificações, porém, baseado nos valores de contração, apenas a ALA 40% obteve contração menor que 0,5%. Com isso, somente a mistura ALA 40% contempla todas as especificações, sendo considerada a mistura ideal.

4 CONCLUSÃO

Baseado em todos os dados obtidos com essa pesquisa, sendo que um dos objetivos além do principal que é caracterizar, comparar e avaliar as misturas ALA com areia é também indicar qual das misturas propostas é a ideal para uso em bases e sub-bases de pavimentos econômicos. Dessa forma, são apresentadas as conclusões através das análises dos resultados dos ensaios realizados, que são:

- ✓ Em relação ao Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS) o solo natural é classificado como um solo MH e as misturas ALA classificadas como solo ML;
- ✓ Segundo a Classificação Rodoviária (ASHTO-HRB) o solo natural e a mistura ALA 20% enquadram-se na classificação A-7-5, já as misturas ALA 30% e ALA 40% são consideradas solo A-5;
- ✓ Para o ensaio de compactação, pose-se afirmar que com o aumento do teor de agregado miúdo e da energia de compactação aplicada, há um aumento do peso especifico aparente seco máximo e uma diminuição da umidade ótima, comportamento esperado, já que o material que é adicionado ao solo tem características como maior rigidez e textura;
- ✓ Já para o ensaio de ISC, percebe-se que o aumento na resistência das amostras ensaiadas em laboratório aconteceu devido à adição gradativa de mistura, observa-se também que há uma variabilidade entre os resultados, pois o ensaio de ISC não caracteriza muito bem os solos finos tropicais laterítico;
- ✓ De acordo com especificações do DNIT, as amostras de solo e as misturas podem ser utilizadas para subleito e sub-base, porém não podem ser utilizadas para base, pois não atenderam aos limites estabelecidos quando ao valor do ISC.
- ✓ Os resultados encontrados na classificação MCT, indicam que tanto o solo natural, quanto as misturas ALA são considerados como solos LG' –solos de comportamento laterítico argiloso;
- ✓ No gráfico de classificação MCT, o solo encontra-se muito a direita, fora da região satisfatória, já as misturas ALA encontram-se na região satisfatória, sendo que apenas a mistura ALA 40% localiza-se na região recomendável;

- ✓ Como o valor do índice “e’” encontrado das misturas e do solo natural foi menor que 1,15, afirma-se que os solos e as misturas são considerados lateríticos com variação de granulometria.

Por fim, é possível afirmar que a mistura ALA 40% apresentou melhor desempenho, sendo considerada a mistura ideal pela metodologia MCT para utilização em bases de pavimentos econômicos.

Sugestão para a continuidade dos estudos, indicam-se:

- Realização de ensaios de módulo de resiliência;
- Realização dos demais ensaios da metodologia MCT, especialmente os ensaios de Infiltrabilidade e de Permeabilidade e o Penetração da Imprimadura Betuminosa;
- Execução de trechos experimentais para avaliação do desempenho da mistura ALA 40%.

BIBLIOGRAFIA

ABGE. **Geologia de Engenharia**. OLIVEIRA, A. M. S.; BRITO, S. N. A. (editores). São Paulo: ABGE, 1998, 576p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6457**: amostras de solo – preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 1986. 9p.

_____. **NBR 6459:** solo – determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 1984. 6p.

_____. **NBR 7180:** solo – determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 1984. 3p.

_____. **NBR 7181:** solo – análise granulométrica. Rio de Janeiro, 1984. 13p.

_____. **NBR 7182:** solo – ensaio de compactação. Rio de Janeiro, 1986. 10p.

_____. **NBR 9895:** solo – índice de suporte califórnia. Rio de Janeiro, 1987. 14p.

BALBO, José Tadeu. **Pavimentação asfáltica:** materiais, projeto e restauração. São Paulo: Oficina de texto, 2007. 558 p.

BERNARDI Cândida et al. **Estudo de Solo Argiloso Laterítico do Noroeste do Rio Grande do Sul para Uso em Pavimentos Econômicos – Misturas ALA**. In: Reunião Anual de Pavimentação, Grmado. Anais... Gramado: Centro de Eventos da UFRGS, 2013. Disponível em: <http://www.rapv.org.br>. Acesso em: 29 abr 2015.

BERNARDI, Cândida. **Estudo de Solo Argiloso Laterítico do Noroeste do Rio Grande do Sul para Uso em Pavimentos Econômicos**. 2013. 68 f. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí, 2013.

BERNUCCI, Liedi Bariani et al. **Pavimentação Asfáltica:** formação básica para engenheiros. Rio de Janeiro: PETROBRAS; ABEDA, 2006. 504 p. il.

BRASIL. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. **DNER-ME 254/97**: solos compactados em equipamentos miniatura – Mini-CBR. Rio de Janeiro, 1994, 14 f.

_____. **DNER-ME 256/94:** solos compactados com equipamento miniatura – determinação da perda de massa por imersão. Rio de Janeiro, 1994, 6p.

_____. **DNER-ME 258/94:** solos compactados com equipamento miniatura – Mini-MCV. Rio de Janeiro, 1994, 6p.

CASTRO, Bruno Almeida de. **Caracterização geotécnica de solos da região central de Minas Gerais para aplicação em obras rodoviárias.** 2002. 224p. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro – COPPE, Rio de Janeiro, 2002.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Manual de Pavimentação**. 3. ed. Rio de Janeiro, 2006. 247p.

_____. **DNIT-ES 098/2007**: pavimentação – base estabilizada granulometricamente com utilização de solo laterítico. Rio de Janeiro, 2007, 7p.

_____. **DNIT-ES 141/2010**: pavimentação – base estabilizada granulometricamente. Rio de Janeiro, 2010, 9p.

FERREIRA, H. N.; et al. – **Engineering Properties of a Saprolitic Soil From Granite. Second International Conference of Geomechanics in Lateritic and Saprolitic Soils.**Vol.1 Singapore. Dez. 1988.

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

NOGAMI, J,S.; VILLIBOR, D.F (1981). **Uma nova classificação de solos para finalidades rodoviárias.** SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SOLOS TROPICAIS EM ENGENHARIA COPPE/UFRJ; CNPQ; ABMS, p30-41 Rio de Janeiro, RJ.

OLIVEIRA, R.F.V. de. **Análise de dois solos modificados com cimento para dimensionamento de pavimentos**. 2011.148f. Dissertação (Mestrado em Geotécnica)– Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2011.

PINTO, Carlos de Sousa. **Curso Básico de Mecânica dos Solos**: em 16 aulas. São Paulo: Oficina de Textos, 2000. 247p.

SENÇO, W. de. **Manual de técnicas de pavimentação** – Volume I. 1. ed.São Paulo: Pini, 1997. 746p.

VILLIBOR, Douglas Fadul; NOGAMI, Job Shuji. **Pavimentos econômicos:** tecnologia do uso dos solos finos lateríticos. São Paulo: Arte & Ciência, 2009. 292 p. il.

WAYHS, Carlos A. S. P. **Estudo de materiais alternativos utilizados em pavimentação de baixo custo na região noroeste do Rio Grande do Sul**. 2004. 104 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004. Disponível em: <http://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/6591>. Acesso em: 25 setem. 2015.