UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

Gabriéli Pires Chiarello

ESTUDO DO COMPORTAMENTO RESILIENTE DE DUAS MISTURAS DE SOLO AGREGADO

Santa Maria, RS
2019

Gabriéli Pires Chiarello

ESTUDO DO COMPORTAMENTO RESILIENTE DE DUAS MISTURAS DE SOLO AGREGADO

Trabalho apresentado ao curso de Engenharia Civil, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito para a conclusão do curso de graduação.

Orientador: Profº Dr Magnos Baroni

Santa Maria, RS
2019

Gabriéli Pires Chiarello

ESTUDO DO COMPORTAMENTO RESILIENTE DE DUAS MISTURAS DE SOLO AGREGADO

Trabalho apresentado ao curso de Engenharia Civil, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito para a conclusão do curso de graduação.

Aprovado em dezembro de 2019:

_____
Profº Dr Magnos Baroni
(Presidente/Orientador)

_____
Profº Dr Rinaldo José Barbosa Pinheiro (UFSM)

_____
Eng. Civil Paula Taiane Pascoal (UFSM)

Santa Maria, RS
2019

AGRADECIMENTOS

Durante o período de graduação vários obstáculos foram apresentados, e sem o apoio de familiares e amigos não os teria vencido com tanto mérito. Por este motivo, gostaria que os nomes destas pessoas fosse evidenciado nesse espaço, relembrando que este trabalho não teria êxito sem elas.

Primeiramente agradeço aos meus pais, Carlos e Gilsane, por todo o apoio, amor e carinho que me deram durante a vida inteira, fazendo com que toda essa trajetória fosse possível tornando momentos de exaustão em momentos de felicidade. Vocês foram meu porto seguro durante todos esses anos e são o real motivo do meu sucesso.

Aos meus irmãos, Douglas e Diego, pelos ensinamentos que me passaram sobre a vida e pelos exemplos de pessoas e excelentes profissionais que proporcionaram para mim.

Para o Marcelo, meu principal incentivador, sendo o maior exemplo que tenho nesta profissão, por ser meu companheiro nesta aventura estando sempre ao meu lado, sendo o meu apoio nos momentos de dificuldade apresentados nestes anos. Obrigada pela compreensão de todos os momentos de ausência, de exaustão e estresse.

Ao meu orientador, Magnos Baroni, agradeço pela inserção no meio científico e o incentivo para trilhar um caminho dentro do grupo de pesquisa, acreditando sempre na minha capacidade. Obrigada por me apresentar esse mundo que se mostrou tão distante durante os 5 anos de faculdade.

Aos amigos que a vida me presenteou no fim da graduação, Paula, Leonardo e Fernando, por estarem sempre presentes seja me ensinando ou ajudando durante toda a realização da pesquisa. Vocês foram muito significativos para os meus resultados pessoais. Além de prestarem sempre um grande incentivo em relação aos planos futuros.

Ao Laboratório de Materiais de Construção Civil por me proporcionar um ambiente de trabalho sempre agradável por meio da convivência com os colegas, Talis, Pedro, Álvaro, Christopher que me auxiliaram durante toda a pesquisa.

RESUMO

ESTUDO DO COMPORTAMENTO RESILIENTE DE DUAS MISTURAS DE SOLO AGREGADO

AUTOR: Gabriéli Pires Chiarello
ORIENTADOR: Prof Dr. Magnos Baroni

Por meio de um novo método de dimensionamento de pavimentos flexíveis (MeDiNa) começaram a ser consideradas as propriedades mecânicas dos materiais a serem utilizados em camadas estruturais. Assim, iniciaram os estudos sobre os comportamento resiliente de cada material a ser inserido no pavimento, por meio de ensaios triaxiais de cargas repetidas. O presente trabalho objetiva analisar características de duas misturas de solo agregado, moldadas no teor de umidade ótima, compostas por 25% e 35% de solo laterítico e 75% e 65% de agregado descontinuo, denominadas M02 e M03, verificando as variações apresentadas por essas quando são aplicadas modificações na sua composição. Assim, foram dimensionadas e, posteriormente, orçadas estruturas a partir do MeDiNa, para verificação da viabilidade econômica do uso destas misturas. O solo laterítico utilizado e o agregado basáltico, da pedreira São Juneval, são provenientes do município de Cruz Alta-RS. Os ensaios de Módulo de Resiliência apresentaram resultados satisfatórios comprovando a possível utilização deste material na pavimentação, sendo que a mistura que apresenta maior quantidade de brita obteve melhores respostas em relação ao desempenho do que a mistura que apresenta uma maior proporção de solo. As duas misturas foram estudadas em relação aos modelos matemáticos de previsão de comportamento para módulos de resiliência, onde foi possível verificar uma correlação melhor com os modelos de Biarez e Composto pela mistura M02 que apresentou um R^2 de 0,94 enquanto a mistura M03 apresentou R^2 de aproximadamente 0,6 para os dois modelos. As análises e orçamento mostram pequena variação de comportamento e de custo que o pavimento sofre com a inclusão de uma mistura, podem tornar a utilização desta composição viável.

Palavras-chave: Solo agregado. Pavimentação. Módulo de Resiliência.

ABSTRACT

STUDY OF RESILIENT BEHAVIOR IN TWO CRUSHED SOIL MIXTURES

AUTHOR: Gabriéli Pires Chiarello
ADVISOR: Prof Dr. Magnos Baroni

Trough a new flexible paviment desing method (MeDiNa) the mechanical properties of materials to be used in structural layes began to be considered. Thus, studies about the resilient behavior of each material to be inserted in the pavement were initiated by means of load triaxial tests. The presente work aims to study the characteristics of two mixtures of aggregate soil, molded in the optimum moisture content, composed by 25% and 35% of lateritic soil and 75% and 65% of discontinuos aggregate, named M02 and M03, verifying the variations presented by when chenges in their composition are applied. So, structures were desinged from MeDiNa and subsequently budgeted to verify the economic viability of using mixtures. The lateritic soil used and the basaltic aggregate, of the São Juvenal quarry, comes from the city of Cruz Alta-RS. The Resilience Module tests presented satisfactory results proving the possibility of using this material in paving, being that the mixture that presents the largest amount of gravel obtained better responses in relation to the performance of the mixture that presentes a larger proportion of soil. The two mixtures were studied in relation to the prediction mathematical models for resilient behavior, where it was possible to verify a better correlation with the Biarez and Composto models by the M02 that presented na R^2 of 0,94 while the M03 presented R^2 approximately 0,6 for both models. The analysis and budget showed a small variation in behavior and cost the pavement suffers with the inclusion of a mixture, making its use viable in the composition.

Keywords: Aggregate Soil. Pavement. Resilient Modulus.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Camadas de um pavimento e suas tensões solicitantes
Figura 2 – Seção transversal típica de um pavimento econômico
Figura 3 – Ocorrência de solos lateríticos finos arenosos e argilosos, no Brasil
Figura 4 – Perfil da ocorrência de solos ambientes tropicais
Figura 5 – Ábaco de classificação dos solos pela metodologia MCT
Figura 6 – Classificação de agregados
Figura 7 – Tipologias de solo agregado
Figura 8 – Esquema do equipamento triaxial
Figura 9 – Fluxograma de planejamento das atividades
Figura 10 – Localização da cidade de Cruz Alta no estado
Figura 11 – Localização do talude
Figura 12 – Local de coleta do agregado
Figura 13 – Curva granulométrica dos agregados
Figura 14 – Composição da mistura M03
Figura 15 – Preparação do ensaio triaxial
Figura 16 – Curvas granulométricas com e sem defloculante
Figura 17 – Classificação pela metodologia MCT
Figura 18 – Curvas de compactação do solo
Figura 19 – Curva de compactação das misturas SLAD
Figura 20 – Corpo de prova da mistura M02
Figura 21 – Modelo de Biarez M02
Figura 22 – Modelo Composto M02
Figura 23 – Modelo de Biarez M03
Figura 24 – Modelo de Composto M03
Figura 25 – Análise E1 a E3
Figura 26 – Análise E4 a E6
Figura 27 – Análise E7 a E9

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resultados dos ensaios e absorção e massa específica
Tabela 2 – Resultados dos ensaios de índices de forma
Tabela 3 – Proporção das misturas
Tabela 4 – Amostras ensaiadas
Tabela 5 – Condições de compactação em cilindro tripartido
Tabela 6 – Sequência de tensões da etapa de condicionamento
Tabela 7 – Sequência de tensões para determinação do módulo de resiliência
Tabela 8 – Valores de N para nível de tráfego
Tabela 9 – Quadro resumo do ensaio de granulometria
Tabela 10 – Quadro resumo da classificação do solo
Tabela 11 – Índices para a classificação MCT
Tabela 12 – Parâmetros de compactação das misturas SLAD
Tabela 13 – Propriedades de moldagem dos corpos de prova
Tabela 14 – Valores de MR M02
Tabela 15 – Parâmetros dos modelos estatísticos para a M02
Tabela 16 – Valores de MR da M02 modelados
Tabela 17 – Valores de MR M03
Tabela 18 – Parâmetros dos modelos estatísticos para a M03
Tabela 19 – Valores de MR da M03 modelados
Tabela 20 – Valores de MR de Mello (2019)
Tabela 21 – Valores de MR solo CA EM
Tabela 22 – Materiais de revestimento das estruturas
Tabela 23 – Materiais de base e sub-base das estruturas
Tabela 24 – Materiais de subleito
Tabela 25 – Estruturas estudadas
Tabela 26 – Orçamento das estruturas

LISTA ABREVIATURAS E SIGLAS

AASHTO	*American Association of State Highway and Transportation Officials*
ABNT	Associação Nacional de Normas Técnicas
ALA	Argila Laterítica com Areia
ANP	Associação Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
ASTM	*American Society for Testing and Materials*
ATR	Afundamento de Trilhas de Rodas
BDI	Benefícios e Despesas Indiretas
CBUQ	Concreto Betuminoso Usinado a Quente
CNT	Confederação Nacional do Transporte
DAER	Departamento Autônomo de Estradas de Rodagem
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
ESRD	Eixo Simples de Rodas Duplas
EUA	Estados Unidos da América
FEC	Fator de Equivalência de Carga
GEPPASV	Grupo de Estudos e Pesquisas em Pavimentação e Segurança Viária
IG	Índice de Grupo
IP	Índice de Plasticidade
ISC	Índice de Suporte Califórnia
LG’	Solo Argiloso Laterítico
LL	Limite de Liquidez
LMCC	Laboratório de Materiais de Construção Civil
LP	Limite de Plasticidade
LVDT	*Linear Variable Differential Transformer*
MCT	Miniatura, Compactada, Tropical
MCV	*Moisture Condition Value*
MEAS	Massa Específica Aparente Seca
MeDiNa	Método de Dimensionamento Nacional
MR	Módulo de Resiliência
N	Número de Equivalência de Eixos
PPGEC	Programa de Pós Graduação
RS	Rio Grande do Sul

SAFL	Solo Argiloso Fino Laterítico
SICRO	Sistema de Custos Referenciais de Obras
SLAD	Solo Laterítico com Agregado Descontínuo
SUCS	Sistema Unificado de Classificação de Solos
TRB	*Transportation Research Board*
TS	Tratamento Superficial
UFSM	Universidade Federal de Santa Maria
USACE	Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 13
1.1 OBJETIVOS 14
1.2 JUSTIFICATIVA 15
1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO 15
2 REFERENCIAL TEÓRICO 16
2.1 PAVIMENTOS FLEXÍVEIS 16
2.2 PAVIMENTOS ECONÔMICOS 18
2.3 SOLOS 22
2.3.1 Metodologia MCT 23
2.5 AGREGADOS PÉTREOS 25
2.4 MISTURA SOLO AGREGADO 27
2.5 DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS 30
2.5.1 Método de Dimensionamento DNER (1981) 30
2.5.2 Método de Dimensionamento Nacional (MeDiNa) 32
2.6 MÓDULO DE RESILIÊNCIA 33
2.6.1 Modelos de determinação do módulo de resiliência 37
3 METODOLOGIA 39
3.1 ORGANIZAÇÃO DA PESQUISA 39
3.2 MATERIAIS 40
3.2.1 Solo 40
3.2.2 Brita 42
3.3 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DO SOLO 43
3.3.1 Preparo do Solo 44
3.3.2 Ensaios de Granulometria 44
3.3.3 Ensaios Limites de Atterberg 45
3.3.4 Ensaios de Determinação de Massa Específica 45
3.3.5 Ensaio de Compactação 45
3.3.6 Metodologia MCT 46
3.4 CARACTERIZAÇÃO DO AGREGADO 46
3.4.1 Ensaio de Granulometria do Agregado 47
3.4.2 Ensaio de Absorção e Massa Especifica e Massa Unitária 48
3.4.3 Ensaio de Índice de Forma e Lamelaridade 48
3.4.4 Ensaio de Equivalente em Areia 49
3.4.5 Ensaio de Resistência Abrasão Los Angeles 49
3.5 COMPOSIÇÃO SOLO AGREGADO 49
3.5.1 Ensaios de Curva de Compactação **51**
3.5.2 Ensaio Triaxial de Cargas Repetidas 52
3.6 ANÁLISE MECINISTA E ORÇAMENTÁRIA 54
4 RESULTADOS E ANÁLISES 56
4.1 CARACTERIZAÇÃO DO SOLO 56
4.1.1 Classificação do solo por métodos tradicionais 57
4.1.2 Classificação pela metodologia MCT 58
4.1.3 Ensaio de compactação do solo 60

4.2 SOLO LATERÍTICO E AGREGADO DESCONTÍNUO 61
4.2.1 Ensaio de compactação da mistura SLAD 61
4.3 RESULTADOS DOS ENSAIOS TRIAXIAS DAS MISTURAS.....62
4.3.1 Análise do módulo de resiliência da mistura M02 63
4.3.2 Análise do módulo de resiliência da mistura M03 69
4.3.3 Comparação dos resultados entre M01, M02 e M03 73
4.4 ANÁLISE DA ESTRUTURA E ORÇAMENTO 76
4.4.1 Materiais aplicados.....77
4.4.2 Estruturas analisadas.....79
4.4.3 Orçamento.....82
5 CONCLUSÃO.....84
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 87

1 INTRODUÇÃO

Um dos primeiros motivos para construção de uma rodovia é pela necessidade de locomoção diária que a população enfrenta. A pavimentação tem por objetivo proporcionar um conforto do usuário ao trafegar, quando apresenta uma superfície regular e com boa aderência, além de diminuir o tempo de viagem, assim também reduzindo o gasto com combustível e despesas com manutenções que poderiam ocorrer em caso de acidentes (BERNUCCI *et al*., 2010).

O crescimento do tráfego de veículos em demasia no Brasil é um problema que tem atingido a maioria dos usuários das rodovias espalhadas pelo país, por motivos de mobilidade e também de segurança viária. Sejam estas estradas ou rodovias, os problemas decorrentes do elevado número de veículos transportadores de carga pesada têm sido relevantes por apresentarem um efeito destrutivo em relação às camadas do pavimento que foram dimensionadas.

Por estes motivos, tornou-se necessário que o pavimento apresentasse um desempenho melhor e que fosse mais durável em relação aos benefícios que deveriam ser refletidos ao usuário. Para que se tornasse possível que uma rodovia obtivesse este tipo de comportamento, foi necessário um melhor entendimento das camadas que compõem a estrutura, ou seja, manifestou-se uma necessidade de maiores pesquisas sobre cada uma das camadas, e consequentemente, dos materiais usados nessas, em relação aos comportamentos apresentados.

Conforme Santos (2016), para realizar a execução de uma rodovia é necessário o conhecimento de que o pavimento está disposto em camadas sobrepostas de material compactado, onde cada uma apresenta individualidades, estando sujeita a esforços distribuídos horizontalmente e verticalmente. Por isso, a obtenção de parâmetros que caracterizam o comportamento de cada material é imprescindível.

Um dos parâmetros de maior importância quando tratamos de materiais para utilização da infraestrutura de transportes é o módulo de resiliência (MR). Esse avalia, por meio de um ensaio triaxial de cargas repetidas, a capacidade de um componente estrutural do pavimento receber tensões correlacionando com a deformação resultante. Dentre as duas parcelas de deformações, sendo a elástica recuperável após às cargas aplicadas e a plástica (não recuperável), onde os defeitos se sobrepõem ao longo da vida útil do pavimento, o MR obtido em laboratório expressa a parcela elástica da deformação.

A brita graduada tornou-se, desde a década de 60, um material de forte participação no mercado nacional para utilização em bases e sub-bases de pavimentação, apresentando comportamento apropriado para ser utilizado dentre às camadas estruturais da rodovia. A aplicação da brita é feita em larga escala e por este fato, atualmente, criou-se a preocupação da substituição deste material ou redução da escala de utilização diante de fatores que comprometem a sua utilização futura. Empecilhos estes exemplificados pelo custo elevado de produção e distâncias médias de transporte excessivas, além de questões ambientais em função das detonações em rocha necessárias para produção (COUTO, 2009).

Diante do exposto, a utilização e estudo dos solos, juntamente com agregados tornou-se um assunto de valor para pavimentação. A necessidade de um material de comportamento resistente, economicamente mais viável para a utilização, e de maior acesso a todos deu início ao estudo de comportamento de uma mistura de solo agregado, que possa apresentar desempenho satisfatório em relação às deformações simuladas pelo ensaio triaxial de cargas repetidas.

Com base nestes aspectos, o presente trabalho se justifica pela importância de apresentação de um material de melhor acesso para múltiplos locais de todo o país, no que se a trata a distância de transporte e disponibilidade de matéria prima. Neste trabalho serão avaliados os comportamentos de módulo de resiliência do solo agregado, variando as porcentagens de solo para a verificação do comportamento frente essas mudanças.

1.1 OBJETIVOS

O objetivo geral da pesquisa corresponde à análise do comportamento resiliente de duas misturas de solo laterítico e agregado descontínuo a serem utilizados em camadas estruturais de pavimentos. Como objetivos específicos tem-se:

- Verificar a resposta de comportamento resiliente diante da variação das proporções de composição da mistura solo agregado;
- Comparar as misturas propostas nesta pesquisa com a mistura proposta por Mello (2019);
- Analisar as correlações apresentadas frente aos modelos de previsão de comportamento mecânico;

- Analisar o comportamento de estruturas dimensionadas pelo *software* MeDiNa com sub-bases compostas pelas misturas estudadas;
- Verificar a viabilidade de uso das misturas por meio de orçamento das estruturas analisadas no *software* MeDiNa.

1.2 JUSTIFICATIVA

A pesquisa se justifica pelo fato de não existirem normativas que regulamentem, atualmente, a dosagem de uma mistura solo agregado. Por isso, o presente estudo se faz importante de forma a apresentar as variações relevantes de comportamento em relação a modificações feitas na composição de uma mistura solo agregado, variando as proporções de materiais integrantes.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Em síntese, a pesquisa está estruturada em 5 capítulos, contabilizando o capítulo de introdução, descritos a seguir:

- Capítulo 1 – aborda o tema de estudo, apresentando os objetivo e justificativa da escolha desse, além da estrutura do trabalho;
- Capítulo 2 – apresenta o referencial teórico utilizado como embasamento para a realização do estudo, tratando sobre temas relevantes como, um breve histórico atual da pavimentação, pavimentos flexíveis, classificação de solos, metodologia MCT, pavimentos econômicos, módulo de resiliência, ensaios triaxiais, modelos matemáticos de previsão e orçamento.
- Capítulo 3 – apresenta a metodologia, englobando ensaios realizados durante a pesquisa, os materiais que compõem as misturas, as proporções escolhidas para cada uma delas, assim como equipamentos e normas.
- Capítulo 4 – envolve à análise dos resultados de módulo de resiliência obtidos durante a pesquisa, a análise de estruturas pelo MeDiNa e o orçamento dessas.
- Capítulo 5 – consiste na apresentação das conclusões e sugestões de pesquisas futuras.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo serão abordados temas, baseados em literaturas, que são considerados importantes pra o total entendimento e fundamentação da pesquisa em questão. Com uma breve passagem sobre os temas pavimentos flexíveis, pavimentos econômicos e mecânica dos pavimentos.

2.1 PAVIMENTOS FLEXÍVEIS

Segundo Bernucci et al. (2008) o pavimento é estruturado por camadas que possuem espessuras finitas e que estão posicionadas acima de uma superfície de terraplanagem. Existem duas tipologias de pavimentos: rígidos e flexíveis. Esses apresentam diferença diante de como as distribuições de carga são feitas perante às camadas do pavimento.

Os termos rígido e flexível são utilizados para relacionar a resposta dos materiais da estrutura quando considerados isoladamente e, principalmente, quando considerado em sua totalidade (BALBO, 1997).

Para o pavimento ser classificado como flexível, deve ser formado por camadas, onde a superior apresente uma melhor qualidade de material, sendo que a espessura dessa deve ser suficientemente pequena para que o material não se torne rígido (YODER; WITCZAK, 1975). O material utilizado na camada de superfície, revestimento, precisa ter capacidade de distribuição das tensões aplicadas, sendo em sua maioria se utiliza revestimento asfáltico.

O Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) por meio do Manual da Pavimentação afirma que as camadas do pavimento atuam estruturalmente juntas, sendo que essas possuem diferentes propriedades mecânicas, porém quando em contato, e diante de solicitações, apresentam deformações elásticas que são distribuídas pelas camadas (DNIT, 2006).

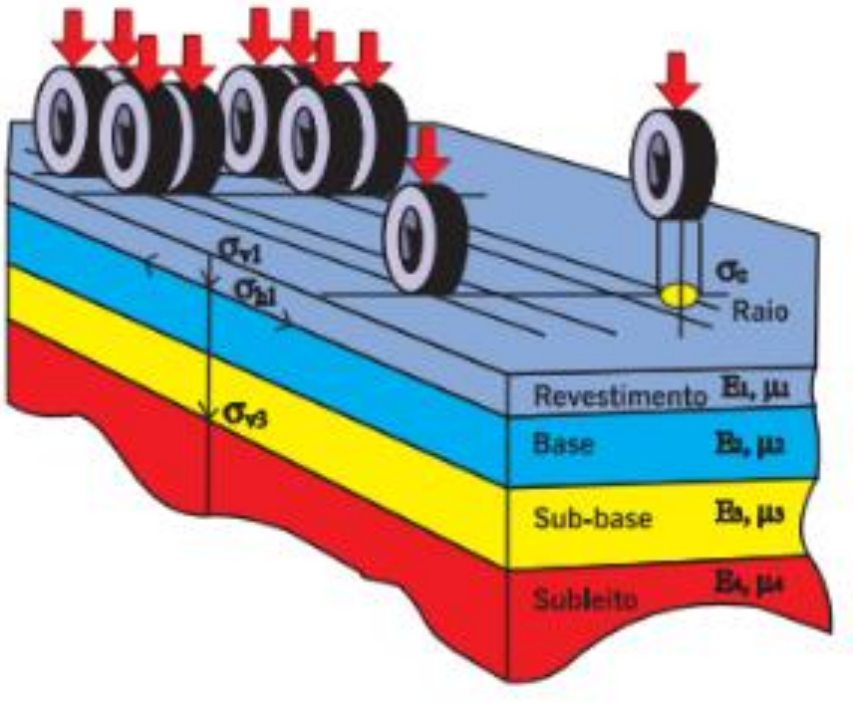
O pavimento tem por finalidade atender as solicitações do tráfego de maneira a continuar proporcionando serventia aos usuários, respeitando a necessidade de manutenções (BALBO, 2007).

A funcionalidade do pavimento é verificada quando esse manifesta superfície de rolagem com qualidade suficiente que traga conforto, segurança ao trafegar, e ainda diminuição de gastos para o usuário relativos à manutenção e redução do tempo

de viagem premeditado (BERNUCCI *et al*., 2008). Porém, segundo a CNT (2018), as condições de desempenho em relação a segurança e economia não estão sendo atingidas.

As solicitações provocadas no pavimento asfáltico devem ser distribuídas pelas camadas da estrutura, ilustradas na Figura 1, apresentando deformações relacionadas à capacidade resistente de cada material que compõe essas, sendo que a estrutura não deve apresentar rupturas.

Figura 1 – Camadas de um pavimento e suas tensões solicitantes



Fonte: Bernucci et al. (2008)

A estrutura por completa apresenta camadas compostas por diferentes materiais que são denominadas: revestimento, base, sub-base, reforço do subleito e subleito. A qualidade dos materiais empregados em cada uma das camadas pode ser apontada como um fator importante para definir quais camadas serão necessárias para a composição do pavimento, sendo possível suprimir algumas dessas (BERNUCCI *et al*., 2010).

Balbo (2007) define as camadas do pavimento como:

a) Subleito: é a camada mais profunda e onde os esforços referentes ao carregamento do tráfego são aliviados. Esse é composto por material natural consolidado e compactado;

b) Reforço do Subleito: é a camada que apresenta um solo de melhor qualidade que o utilizado no subleito, tem por objetivo tornar as pressões que chegam no subleito de menor magnitude. Esta camada não apresenta obrigatoriedade dentre as camadas necessárias para execução de pavimentos, e é utilizada por objetivos econômicos quando o subleito apresenta baixa resistência, tornando necessária a utilização de camadas de base e sub-base com maiores espessuras;

c) Sub-base: torna-se necessária somente quando a camada superior, de base, apresentar uma espessura demasiadamente grande, sendo inviável economicamente a sua utilização, e por este motivo a camada de base é dividida e incorporada uma camada inferior de sub-base. Nessa são usados materiais parecidos estruturalmente com os da base, porém de menor custo;

d) Base: com o objetivo de aliviar os esforços para as camadas inferiores, é constituída por materiais como solo estabilizado, misturas de solo, brita graduada e outros;

e) Revestimento: chamada camada de rolamento que está em contato direto com as cargas e deve recebê-las, sem apresentar deformações excessivas ou perda de compactação. Essa deve apresentar uma superfície nivelada para que seja possível oferecer uma boa qualidade de rolamento aos usuários.

2.2 PAVIMENTOS ECONÔMICOS

Segundo Villibor e Nogami (2009) são pavimentos de baixo custo aqueles que:

a) utilizam bases de materiais locais, com custo substancialmente inferiores em relação às tradicionalmente utilizadas;

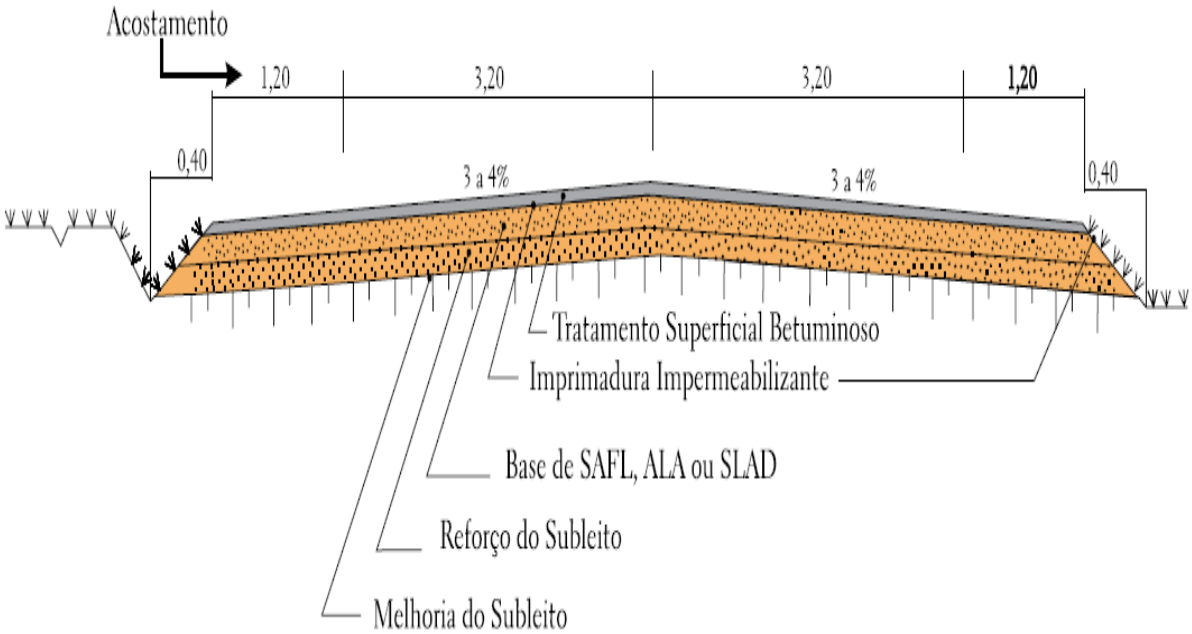
b) utilizam revestimento betuminoso do tipo tratamento superficial (TS) com pequenas espessuras, ordem de 3cm ou concreto betuminoso usinado a quente (CBUQ) de no máximo 3cm de espessura;

c) consideram um tráfego de baixo a médio com número N aproximado à $5x10^6$ solicitações do eixo simples padrão de 80KN.

Além disso, Nogami e Villibor (1995) afirmam que um pavimento é considerado econômico se sua base é constituída de solos lateríticos. Este pode estar apresentado no seu estado natural, sendo este chamado de solo argiloso fino laterítico (SAFL), ou da mistura deste com agregados, formando assim as misturas chamadas de Solo Laterítico com Agregado Descontínuo (SLAD) e Argila Laterítica com Areia (ALA).

Villibor e Nogami (2009) apresentam uma ilustração da seção transversal, Figura 2, de como um pavimento econômico é constituído em relação à composição das camadas, sendo que as demais camadas, que não à base, são apresentadas e têm sua composição e processo executivo de construção feitos de igual forma a um pavimento tradicional, porém respeitando os preceitos indicados anteriormente.

Figura 2 – Seção transversal típica de um pavimento econômico

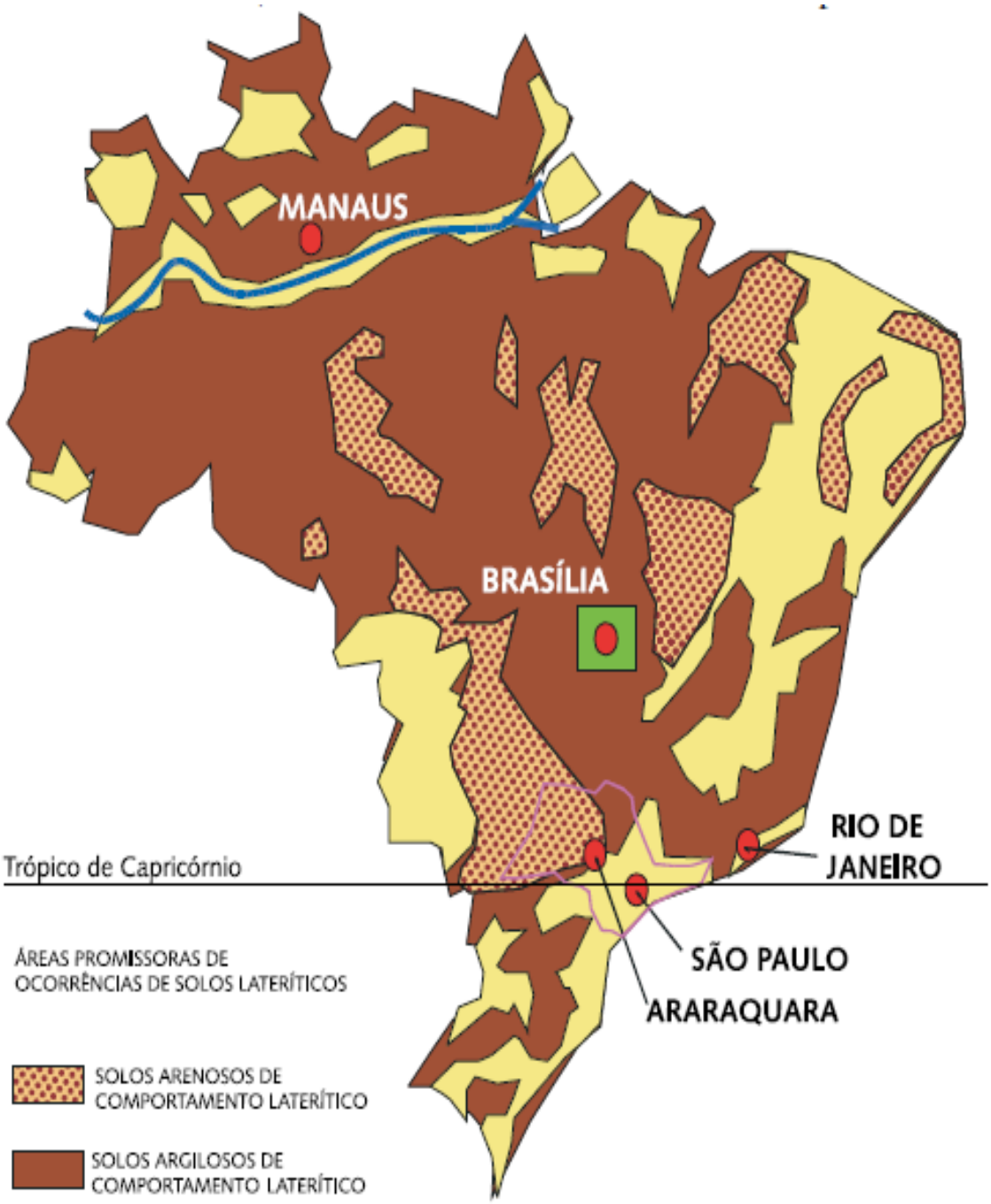


Fonte: Villibor e Nogami (2009)

Diante de estudos feitos sobre os mapas geológicos e pedológicos do território brasileiro, Villibor e Nogami (2009), conseguiram prever as áreas onde existiam, potencialmente, jazidas às quais apresentavam às características esperadas de um SAFL. Com essas informações foi apresentado o mapa do Brasil indicando as áreas

de concentração dos solos estudados que foram estudados nesta pesquisa, Figura 3. Nesta figura é possível visualizar que a maior parte do território brasileiro possui solos com características lateríticas (cerca de 65%) As áreas apresentadas na figura com a cor amarela, são áreas de ocorrência de solo laterítico.

Figura 3 – Ocorrência de solos lateríticos finos arenosos e argilosos, no Brasil



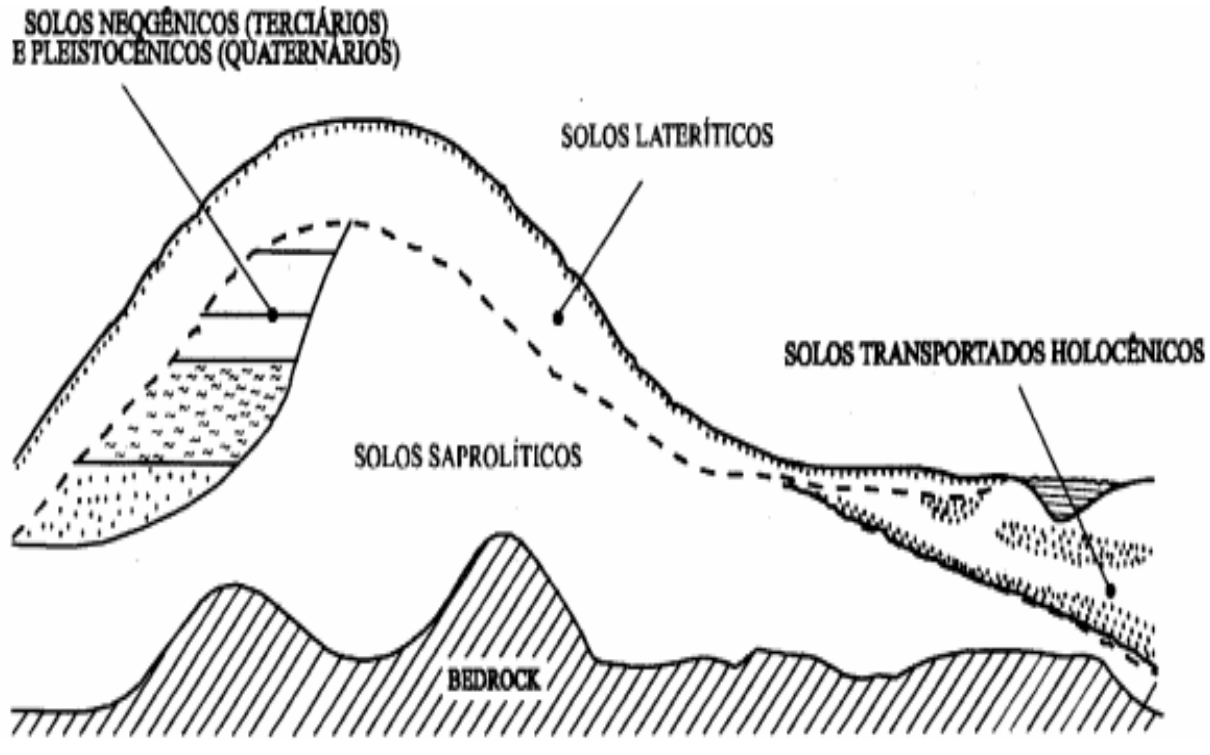
Fonte: Villibor e Nogami. (2009)

Com a criação dos denominados pavimentos econômicos, que têm os solos classificados como lateríticos como principal material, a metodologia que determina a classificação deste solo teve um aumento do seu reconhecimento. Esta metodologia, criada também por Nogami e Villibor (1981) é intitulada de metodologia MCT (Miniatura, Compactada, Tropical).

A metodologia MCT foi desenvolvida devido à necessidade de estudos geotécnicos de solos finos tropicais, por razão de discrepâncias de comportamento desses quando classificados pelas metodologias tradicionais existentes (NOGAMI; VILLIBOR,1995).

Esta sistemática divide os solos em duas categorias: lateríticos e saprolíticos ou não lateríticos. A figura 4 demonstra como esses solos se apresentam em regiões tropicais.

Figura 4 – Perfil da ocorrência de solos ambientes tropicais



Fonte: Villibor e Nogami (2009)

2.3 SOLOS

São chamados de solos os materiais com granulometria fina que resultam da decomposição da rocha mãe por meio de agentes físicos ou químicos do intemperismo. A maior ou menor concentração de cada tipo de partícula que forma este material depende da composição da rocha a qual lhe deu origem (PINTO, 2006).

Segundo Birkland (1974) o solo é um material natural composto por camada ou horizontes minerais com espessuras variadas, diferindo de seu material de origem por propriedade físicas, químicas, mineralógicas e hidrológicas.

Solos são materiais que podem ser escavados com facilidade, utilizando pá, picareta, escavadeira, sem o uso de detonação. Com base na origem, os solos podem ser divididos em duas grandes categorias denominadas solos residuais e solos transportados (DNIT, 2006).

O solo residual é o conjunto de materiais resultantes da intemperização da rocha, deixando de apresentar a resistência mecânica de origem, localizando-se superfície da rocha matriz. Já o solo sedimentar ou transportado são os que possuem suas partículas arrancados por agentes erosivos e depositadas em um local diferente do seu de origem (MACIEL FILHO; NUMMER, 2014).

DNIT (2006) classifica os solos pelo tamanho das suas partículas:

a) Pedregulho: representa a fração do solo passante na 3’’ e retida na peneira de nº 10 (2,0 mm);

b) Areia: representa a fração de solo compreendida entre às peneiras de nº 10 e nº 200 (0,075 mm);

c) Areia grossa: representa a fração granulométrica compreendida entre às peneiras de nº 10 e nº 40 (0,42 mm);

d) Areia fina: representa a fração granulométrica compreendida entre às peneiras de nº 40 e nº 200;

e) Silte: representa a fração granulométrica passante na peneira de nº 200 e retida na peneira de 0,005 mm de abertura;

f) Argila: é a fração granulométrica restante, passante na peneira de 0,005 mm de abertura.

As metodologias tradicionais utilizadas, SUCS e TRB, são classificações criadas em outros países, que possuem características climáticas diferentes, que

influenciam nas propriedades do solo. Estes métodos são baseados em análises granulométricas e plasticidade do material.

Segundo Pinto (2006) os solos são materiais originados da decomposição de rochas por agentes físicos e químicos. Esses ocorrem na natureza de inúmeras formas e assim é utilizado para fundamentos diferentes, por isso o solo é material que necessita ser classificado para ser utilizado da melhor maneira (DNIT, 2006). Atualmente existem duas classificações clássicas para os solos, o Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS) e a Transportation Research Board (TRB), que são classificações criadas em outros países, que possuem características climáticas diferentes, que influenciam nas propriedades do solo. Estes métodos são baseados em análises granulométricas e plasticidade do material. Então, essas não serão abordadas neste estudo por não considerarem as peculiaridades dos solos tropicais.

2.3.1 Metodologia MCT

Esta metodologia foi criada por Nogami e Villibor (1995) com o objetivo de aprimorar a classificação do solo tropical, dividida em duas classes, separando os solos com comportamento laterítico dos solos com comportamento não laterítico, sem necessidade de uma avaliação geológica, ou pedológica do material, apresentando uma caracterização abrangente para finalidades rodoviárias.

O solo classificado como laterítico (L) é um solo superficial pedogenético de locais bem drenados das regiões tropicais que possui uma alta concentração de óxidos e hidratos de ferro e alumínio (BELL, 1989). Já o segundo, solo saprolítico (N), é um solo residual, que se forma a partir da desagregação da rocha mãe, e por isso ainda apresenta um mineralogia mais complexa com minerais ainda em fase de decomposição (VILLIBOR; NOGAMI, 2009).

Esta metodologia é recomendada para estudar solos que passam em sua totalidade ou tem menos de 10% de material retido na peneira de número 10, com abertura de 2 mm, ou seja, para materiais de granulometria fina.

O surgimento desta metodologia foi por meio da adaptação dos procedimentos do ensaio Moisture Condition Value (MCV), introduzido por Parsons (1976). Esta adaptação teve origem devido à rejeição da utilização de solos ocorrentes nos

trópicos, local do estudo, que manifestavam alta qualidade, porém não atendiam os limites anteriormente preconizados, manifestando peculiaridades não inseridas nas classificações existentes (VILLIBOR; NOGAMI, 2009).

Segundo Balbo (2007) a classificação MCT (Miniatura, Compactada, Tropical) está associada a uma série de ensaios para determinação de parâmetros mecânicos e hidráulicos do solos tropicais. Todos os ensaios são realizados com amostras de solos compactadas em moldes cilíndricos, de tamanho reduzido a de 50 mm de diâmetro e altura do corpo de prova controlada na compactação.

Segundo DNIT (2006) para a realização da classificação MCT, é necessário a realização dos ensaios de Ensaio de Compactação Mini-MCV e Ensaio de Perda de Massa por Imersão. Estes possuem normas regentes dos ensaios que são do antigo Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, DNER - ME 256/94 e DNER- ME 258/94 para realização de ensaio de Perda de Massa Por Imersão e Mini-MCV respectivamente.

Após os ensaios, os solos são divididos em L (laterítico) e N (não laterítico) de acordo com seu comportamento e ainda subdivididos de acordo com a sua granulometria típica como a Figura 5.

As subdivisões existentes separam os solos pelos símbolos A, que determina uma areia, A’, que determina um solo com matriz arenosa, S’, como um solo tipicamente siltoso, e G’, como um solo fracamente argiloso. Assim os solos são denominados:

a) LA: areia fina que pode ser empregada em subleitos, reforços de subleitos e eventualmente como base ou sub-base;

b) LA’: solo arenoso fino que pode ser empregado como subleito, reforços, sub-base ou base;

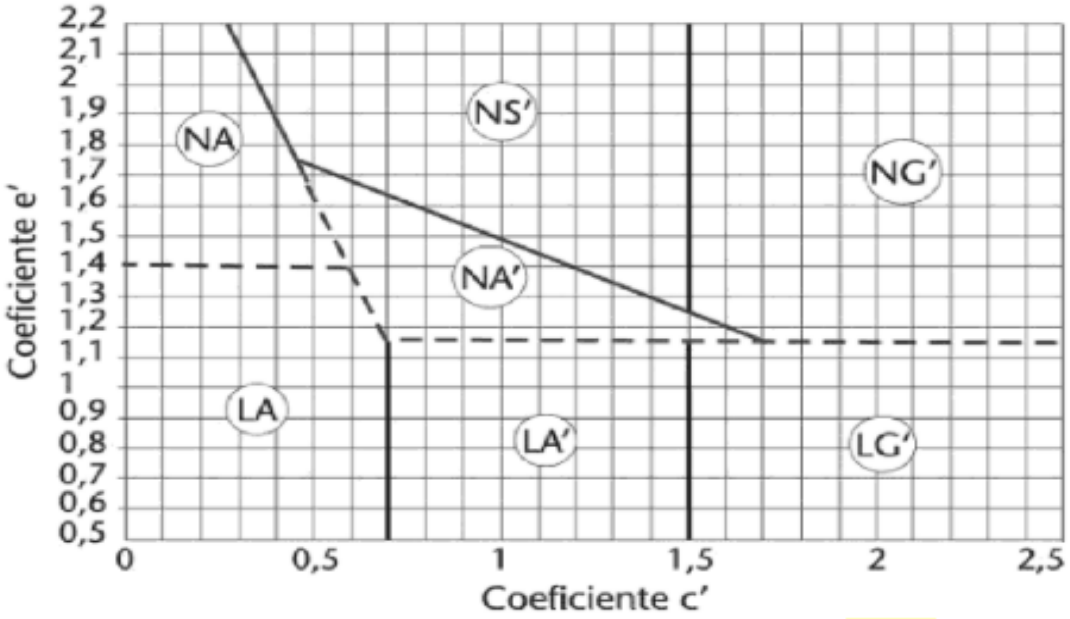
c) LG’: argilas lateríticas utilizadas como subleitos e reforços de subleitos

d) NA’: solo arenoso não laterítico que podem ser empregado como subleito quando não substituíveis;

e) NS’: solo siltoso não laterítico não recomendado porém empregado em subleito quando não substituível;

f) NG’: argila não laterítica utilizada como subleito quando não substituível.

Figura 5 – Ábaco de classificação dos solos pela metodologia MCT



Fonte: Balbo (2006)

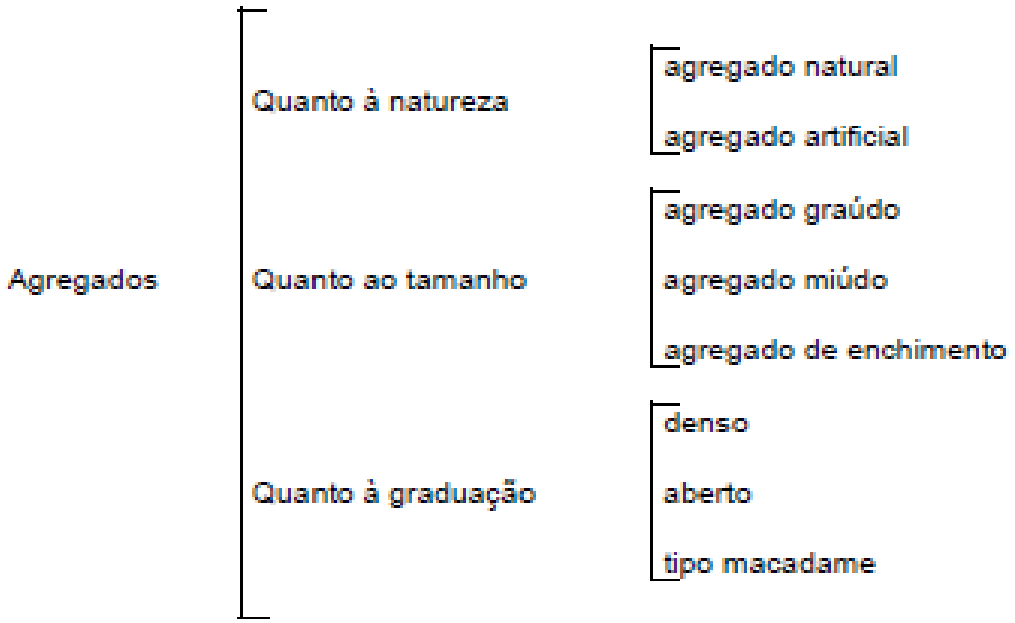
2.5 AGREGADOS PÉTREOS

Os materiais pétreos granulares, mais conhecidos como agregados, podem ser utilizados no seu estado natural ou por meios de formação artificial. O agregado natural é o material encontrado na natureza como pedregulho, seixo rolado. Já o segundo representa um material que necessita de uma transformação física e química para poder ser utilizado (DNIT, 2006).

Segundo Senço (2001) agregados são materiais inertes, com dimensão e forma definidas pelo processo de britagem, detentores de propriedades mecânicas satisfatórias para compor camadas estruturais do pavimento ou também ser utilizado em misturas betuminosas para a utilização nas camadas de revestimento. A sua qualidade em relação à resistência e durabilidade depende das propriedades apresentadas pela rocha mãe. Ainda é ressaltado que, geralmente, quando utilizado em misturas, o material pétreo representa a maior proporção em relação aos outros componentes.

Este tipo de material pode ser classificado em relação a variados parâmetros, sendo assim, separados em classes diferentes de agregados, que são apresentadas na Figura 6.

Figura 6 – Classificação de agregados



Fonte: DNIT (2006)

Os parâmetros utilizados para a divisão desse material são quanto à natureza, quanto ao tamanho das partículas, e quando à graduação.

Quanto à natureza dos agregados o DNIT (2006) classifica-os como:

a) Agregados naturais: são partículas provenientes da alteração de rochas por processos de intemperização ou produzidos por meio de um processo de britagem, como pedregulhos, britas e areias;

b) Agregados artificiais: são produtos do processo industrial que passam por uma modificação da propriedades físicas e químicas como escória de alto forno e argila expandida.

Já quanto ao tamanho do das partículas podem ser denominados:

a) Agregado graúdo: britas, cascalhos e seixos que se encontram retidos na peneira de nº 10;

b) Agregado miúdo: pó de pedra e areias que possuem granulometria compreendida entre as peneira de nº 10 e a nº 200;

c) Agregado de enchimento: cal extinta, cimento Portland entre outros que são materiais com mais de 65% de sua fração passante na peneira de nº 200.

E por fim existe à classificação quanto à graduação dos grãos podendo, pelas características encontradas, ser denominados:

a) Agregado de graduação densa: é o material que apresenta uma curva representante de sua granulometria de forma continua, sendo considerada um material bem graduado, possuindo variadas dimensões na mesma amostra;

b) Agregado de graduação aberta: é um material semelhante ao anterior, porém não apresenta material fino para o preenchimento dos vazios;

c) Agregado tipo macadame: é o material que possui partículas de uma mesma granulometria ou tamanho, sendo considerado material de granulometria uniforme.

2.4 MISTURA SOLO AGREGADO

As camadas de base e sub-base do pavimento usualmente são constituídas de materiais granulares, sendo estes solos estabilizados, misturas solo agregado, brita graduada simples (BGS), brita graduada tratada com cimento (BGTC), solo estabilizado quimicamente, entre outros, sendo escolhido um material que seja mais economicamente viável para a região de emprego (BALBO, 2006).

Por este motivo, as misturas de solo e brita vêm sendo empregadas nos mais variados locais do país. Estas misturas podem ser naturais ou obtidas artificialmente. As misturas podem ser empregadas como material de camada de base ou sub-base em vias urbanas, ou até vias de tráfego de médio a pesado. São apresentadas, geralmente, nas proporções de 80% a 70% de material pétreo complementado com solos (BERNUCCI *et al*., 2010).

Segundo Bernucci *et al*. (2010) solos agregados são misturas naturais ou artificiais de britas, pedregulhos ou areia em maior proporção juntamente com solos de granulometria fina, como silte ou argila, que são materiais passantes na peneira de nº 200.

Yoder (1975) comenta em seus estudos, que à estabilidade de uma mistura de solo agregado depende, em sua maior parcela, da granulometria, da forma dos grãos, da densidade relativa, do atrito interno entre as partículas e da coesão.

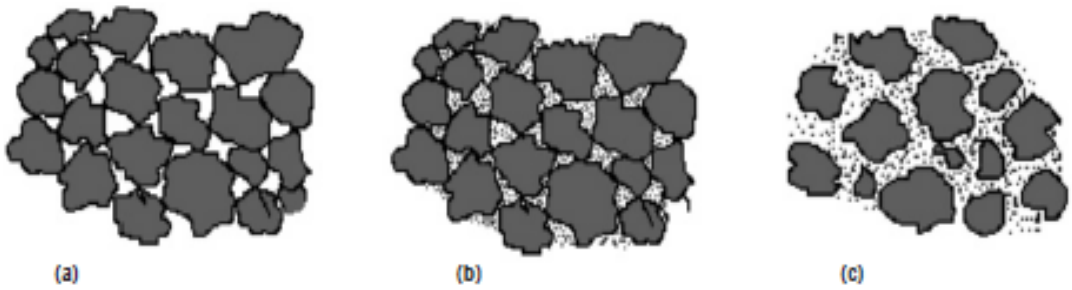
O pesquisador ainda classificou as misturas dividindo-as em três categorias, descritas abaixo e ilustradas na Figura 7, segundo a densidade e estabilidade destas:

a) Solo agregado sem a presença de finos: a mistura apresenta em sua composição uma parcela muito pequena ou inexistente de finos. A estabilidade se dá pelo contato entre as partículas. Essa apresenta difícil compactação já que não possui coesão;

b) Solo agregado com finos: a quantidade de finos é suficiente para preencher os vazios deixados pelos agregados. Possui uma resistência maior devido ao contato entre às partículas. Apresenta uma densidade maior e permeabilidade inferior ao primeiro. A compactação ainda é dificultosa, devido à baixa deformabilidade, porém apresenta uma maior resistência após este procedimento;

c) Solo agregado com muitos finos: não apresenta contatos entre os agregados, pois estes estão envolvidos por finos. Menor densidade e pouca a nenhuma permeabilidade dependendo da natureza dos finos a serem utilizados na mistura. Apresenta maior facilidade na compactação e é suscetível a variações de umidade aplicadas.

Figura 7 – Tipologias de solo agregado



Fonte: Yoder e Witczak (1975)

Para a utilização como material de camada de base, são usados em maior proporção às misturas (a) e (b) apresentadas na Figura 7 para que seja possível o contato entre os grãos de agregado. Porém, é possível visualizar um aumento na utilização das misturas do tipo (c), devido ao sucesso em campo. As misturas ilustradas como (b) e (c) são denominadas solo brita ou solo areia. A mistura tipo (c) também pode ser chamada de solo brita descontinua, onde não é possível visualizar uma só faixa granulométrica na sua composição (BERNUCCI *et a*l., 2010).

Segundo Bernucci *et al.* (2010) a natureza do solo utilizado nas misturas admite uma importância enorme frente ao comportamento mecânico dessa. Nogami e Villibor (1995) abordavam sobre o ótimo comportamento mecânico e hidráulico dos solos lateríticos argilosos quando utilizados como finos, devido à coesão, boa drenagem, baixa expansibilidade entre outras características deste solo.

Silveira (2000) estudou misturas de solo agregado variando às porcentagens de solo entre 20% e 40% da mistura, adotando agregados de granulometrias variando de 1'' até 3/8''. Com este estudo ele obteve resultados satisfatórios para a utilização em camadas estruturais do pavimento. Ainda verificou que a utilização do solo laterítico proporciona melhores resultados em relação às características resilientes.

Segundo Nogami e Villibor (1983) os ensaios mais realizados na época para a verificação do comportamento de misturas estabilizadas mecanicamente eram ensaios de Índice de Suporte Califórina (ISC). Porém, neste período já se tinha a noção de que este ensaio não fornecia dados completos e muitas vezes nem coerentes, já que solos com um elevado ISC podem não revelar um comportamento bom em campo, ressaltando o fato de que os módulos de resiliência dos solos tropicais encontrados em laboratório, não se correlacionam bem com os valores de ISC.

Norback (2018) afirma que misturas de solos agregado onde o solo utilizado é arenoso, apresentam melhor comportamento em relação ao CBR, porém quando analisados os resultados referentes ao comportamento analisado em ensaios triaxias, este fato se modifica e verifica-se um melhor comportamento em misturas com solos argilosos.

Couto (2009) apresenta a utilização de uma mistura solo agregado, construída na RS 118 entre os municípios de Lami e Itapõa, proporcionou uma diminuição do custo da camada de 20% até 30%, referentes a distancias de transporte, porém apenas com o monitoramento do trecho e verificação da durabilidade deste pode-se concluir se a economia foi válida.

Nesta pesquisa também foi verificado maiores valores de módulos de resiliência do material estabilizado mecanicamente em relação a camadas feitas exclusivamente com brita graduada simples (BGS), mostrando uma possível melhora no comportamento em relação à deformação permanente quando implantados em locais de cargas mais altas.

Mello (2019) estudou o comportamento resiliente de uma mistura de solo brita com 70% da sua composição formada por brita descontínua buscando variar a

umidade dos corpos de prova para analisar a influência nos resultados de módulo de resiliência. Concluiu-se que as misturas não possuem um comportamento satisfatório quando submetidas a umidades superiores à ótima.

As normas relativas a este tipo de mistura utilizam como referência de desempenho o ensaio ISC, não reportando à importância de ensaios de módulo de resiliência e deformação permanente para esse. Ainda verifica-se a falta uma normativa que verifique um melhor método de compactação e homogeneização da mistura já que se utilizam materiais com propriedades tão diferentes na sua composição (NORBACK, 2018).

2.5 DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS

Atualmente o Brasil vem passando por uma mudança em seu método de dimensionamento, onde tem-se o método vigente o DNER (1981) e como futuro método, em fase final de desenvolvimento, o Método de Dimensionamento Nacional (MeDiNa).

Segundo Motta (1991), o método vigente apresenta um empirismo grande, ou seja, o método é baseado em observações e pode ser aplicado apenas em certas condições de ambiente, material e carregamento (HUANG, 2004).

Bezerra Neto (2004) afirma que os métodos empíricos apresentam grande facilidade em relação a sua empregabilidade por não necessitarem de demasiada sofisticação. Porém, essas metodologias não permitem uma generalização para as regiões, pois apresentam condições de contorno como limitação para o emprego.

Por isso, houve a necessidade de desenvolver um método que apresentasse uma base em relação ao comportamento mecânico dos materiais utilizados nas estruturas de pavimentos, tendo assim previsões de desempenho frente às solicitações. Estas previsões são viáveis pelos ensaios realizados nos materiais que compõem à estrutura (HUANG, 2004).

2.5.1 Método de Dimensionamento DNER (1981)

O método de dimensionamento em vigor no Brasil é o método do DNER, que foi adaptado para o país em 1966 pelo engenheiro Murillo Lopes de Souza e

atualizado em 1981. Este método é baseado no método do Corpo de Engenheiros Americanos (USACE) e de conclusões retidas das pistas experimentais da American Association of State Highway and Transportation (AASHTO).

A metodologia considera um tráfego calculado a partir do Número de Equivalência de Eixos (N), com base no eixo padrão (ESRD) de 8,2 tf e Fator de Equivalência de Carga (FEC) do Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos.

A metodologia prega à proteção da camada de subleito do pavimento para que não ocorra ruptura por cisalhamento, sendo que a estrutura acima é dimensionada para este propósito (COUTINHO, 2011).

Segundo DNIT (2006) os materiais a serem utilizados têm coeficientes estruturais de equivalência, compatíveis com camada de seu emprego na estrutura, retirados da pista experimental da AASHTO para a realização do dimensionamento.

A metodologia utiliza informações de capacidade de suporte do subleito obtidas a partir do ensaio de ISC de corpos de prova indeformados ou moldados em laboratório, como normatizado pelo DNER. Para que seja validada a utilização de uma material para subleito, esse deve apresentar expansão menor ou igual a 2% e ISC maior ou igual a 2% (DNIT, 2006).

Após obtenção dos valores de tráfego solicitante à estrutura e valores de ISC do subleito é calculada uma espessura total de pavimento em termos de material granular que é posteriormente separada em camadas utilizando os coeficientes estruturais de equivalência a partir da escolha do material a ser usado para a composição.

Como critérios de ruptura da estrutura são considerados o cisalhamento das camadas granulares e solos e a deformação excessiva em trilhas de roda. Porém, neste método não são consideradas rupturas por fadiga, que pode ser apresentada devido às repetições dadas pela ação do tráfego (PINTO, 1991).

Este método, apesar de ter cumprido seu propósito por muitos anos, possui uma base experimental referente às características climáticas e dos solos dos EUA, assim não levando em consideração as características peculiares dos solos e clima brasileiro (DNIT, 2006).

2.5.2 Método de Dimensionamento Nacional (MeDiNa)

Segundo Carvalho (1997) quando se estuda comportamento frente à deformação de materiais, existem elementos a serem compreendidos como cargas do tráfego, velocidade na qual estão aplicadas, tipos de materiais utilizados na estrutura, influências climáticas, espessura das camadas, entre outras.

Por este motivo tornou-se necessário para o emprego em pavimentação um melhor entendimento do comportamento dos materiais e das camadas, sendo assim, fundamental à inserção de ensaios laboratoriais para controle e verificação do comportamento de cada uma das camadas.

Assim, inevitavelmente, às metodologias empíricas passaram a ter limitações para uso pela falta de dados que incluíssem parâmetros de deformação quanto às tensões constantemente aplicadas nas estruturas a serem dimensionadas, não podendo considerar fielmente às propriedades dos materiais.

Diante das necessidades apontadas, iniciou-se um estudo para a implantação de uma metodologia mecanística-empírica para o Brasil que incluísse critérios de dimensionamento parametrizados por características avaliadas em laboratório, tanto para as camadas granulares quanto estudos de revestimentos asfálticos.

O Método de Dimensionamento Nacional, proposto por Franco (2007) por meio do *software* inicialmente chamado SisPav, é resultado de um trabalho conjunto de universidades e centros de pesquisa brasileiros, do DNIT, da Rede Temática de Asfalto e da ANP/Petrobras. O *software* que já apresenta uma evolução desde 2007, atualmente se chama MeDiNa, já na versão 1.1.3.0 de setembro de 2019, e leva em consideração à metodologia mecanística-empírica.

Segundo Franco (2007) o *software* utiliza como parâmetros para o dimensionamento ensaios de laboratório, características do clima e dos materiais e o tráfego. Além destes, ainda estão incluídos analises do tráfego para os diversos eixos, variação sazonal do tráfego, materiais de comportamento elástico linear e não linear, modelos de previsão de danos a partir do banco de dados brasileiro, parâmetros dos materiais, bacias de deformação e análise de confiabilidade.

Para critérios de avaliação da ruptura, os danos considerados nesta metodologia são a deformação permanente, deflexão máxima na superfície e dano de fadiga da camada de revestimento (FRANCO, 2007).

Devido ao crescimento e a importância da ruptura por fadiga, frente a cargas cíclicas aplicadas pela passagem rápida de cargas de rodas, iniciaram-se pesquisas em relação aos deslocamentos, denominados deflexões, apresentados no pavimento. Assim, percebeu-se por meio de aparelhos que quando cessada a aplicação de carga da roda na estrutura a deflexão é recuperada rapidamente, apresentando uma parcela resiliente, porém apresentou-se também um deslocamento não recuperável, assim considerado permanente denominando deformação (BERNUCCI *et al*., 2010).

O MeDiNa também inseriu ensaios triaxiais de cargas repetidas, normatizados pelo DNIT, que se estabeleceram como de suma importância para o dimensionamento, relacionados às deformações apresentadas pelas camadas da estrutura.

Foram acrescidos nas etapas de laboratório, provenientes do estudo da mecânica dos pavimentos, ensaios para os solos de Módulo de Resiliência, que é regido segundo à norma do DNIT 134/2018, e ensaios de Deformação Permanente, regidos segundo à norma DNIT 179/2018, além dos ensaios já instituídos de classificação e caracterização dos materiais. Ainda, foram inseridas informações do revestimento que se tornaram essenciais para o dimensionamento como coeficiente de Poisson, teor de asfalto, ensaios de Flow Number para a deformação permanente do material asfáltico, e ensaio de compressão diametral para obter a curva de fadiga deste material (MEDINA e MOTTA, 2015).

2.6 MÓDULO DE RESILIÊNCIA

Na mecânica dos pavimentos, o módulo de resiliência é apresentado como a relação dada entre a aplicação de uma carga cíclica e a deflexão, ou parcela recuperável da deformação. Este é uma parcela importante do comportamento de solos, britas e materiais granulares, frente a um carregamento repetido representado pelas ações dos veículos sobre o pavimento, que pode ser simulado em laboratório (MEDINA e MOTTA, 2015).

Segundo Bernucci *et al.* (2010), em 1986 o método de dimensionamento de pavimentos dos EUA, da AASHTO, substituiu o parâmetro do ISC pelo módulo de resiliência do material de subleito e também considerou este novo parâmetro nos cálculos dos coeficientes estruturais dos materiais asfálticos, assim consagrando a

importância e o conhecimento desta propriedade. Seed *et al.* (1955) mostra que solos com o mesmo ISC podem apresentar comportamentos diferentes frente à ação de cargas repetidas, evidenciando que o parâmetro caracteriza um comportamento aproximado do material.

Santos (2016) conceitua o módulo de resiliência como o parâmetro reconhecido pelo desempenho elástico das camadas frente a carregamentos cíclicos, que apresenta grande relevância quanto ao comportamento estrutural e mecânico das camadas do pavimento.

O MR é definido pela Equação 01 representada pela relação da tensão desvio σd, que é a diferença entra as tensões σ_1 e σ_3, pela deformação resultante considerada recuperável:

$$MR = \frac{\sigma_d}{\varepsilon_r}$$

Onde:

MR é o modulo de resiliência (MPa);

σ_d: (σ_1- σ_3) é a tensão desvio aplicada;

σ_1 é a tensão principal maior;

σ_3 é a tensão de confinamento ou tensão principal menor;

$\varepsilon_r = \frac{\Delta h}{h_0}$ é a deformação especifica axial resiliente (mm/mm);

Δh é o deslocamento máximo vertical (mm);

h_o é o comprimento inicial de referência do corpo de prova cilíndrico.

O parâmetro de MR, caracteriza variados materiais a serem usados em camadas estruturais, sendo essas de revestimento, base, sub-base ou subleito, a partir da simulação do tráfego recebido em campo, prevendo seu comportamento mecânico frente às tensões aplicadas (SANTOS, 2016).

Segundo os autores Seed et al. (1967), Medina e Preussler (1980), Svenson (1980) e Li e Seling (1994) alguns fatores podem influenciar no comportamento resiliente dos materiais, sendo estes: razão das tensões principais; intensidade das tensões aplicadas; histórico de tensões; quantidade de repetições da tensão desvio; duração e frequência de aplicação da tensão desvio; tipo de agregado; porcentagem

de material que passa na peneira de nº 200; densidade e umidade de compactação; grau de saturação e método de compactação.

Algumas correlações também foram apontadas em diversos estudos verificando que para solos coesivos a deformação resiliente depende principalmente da tensão desvio aplicada, já para solos não coesivos (areias e pedregulhos) o módulo aumenta com a tensão de confinamento variando minimamente com a tensão desvio. Foi verificado ainda que para altos valores de tensão-desvio e baixos de tensões de confinamento, a deformação permanente passa a ser excessiva (BERNUCCI *et al.*, 2010).

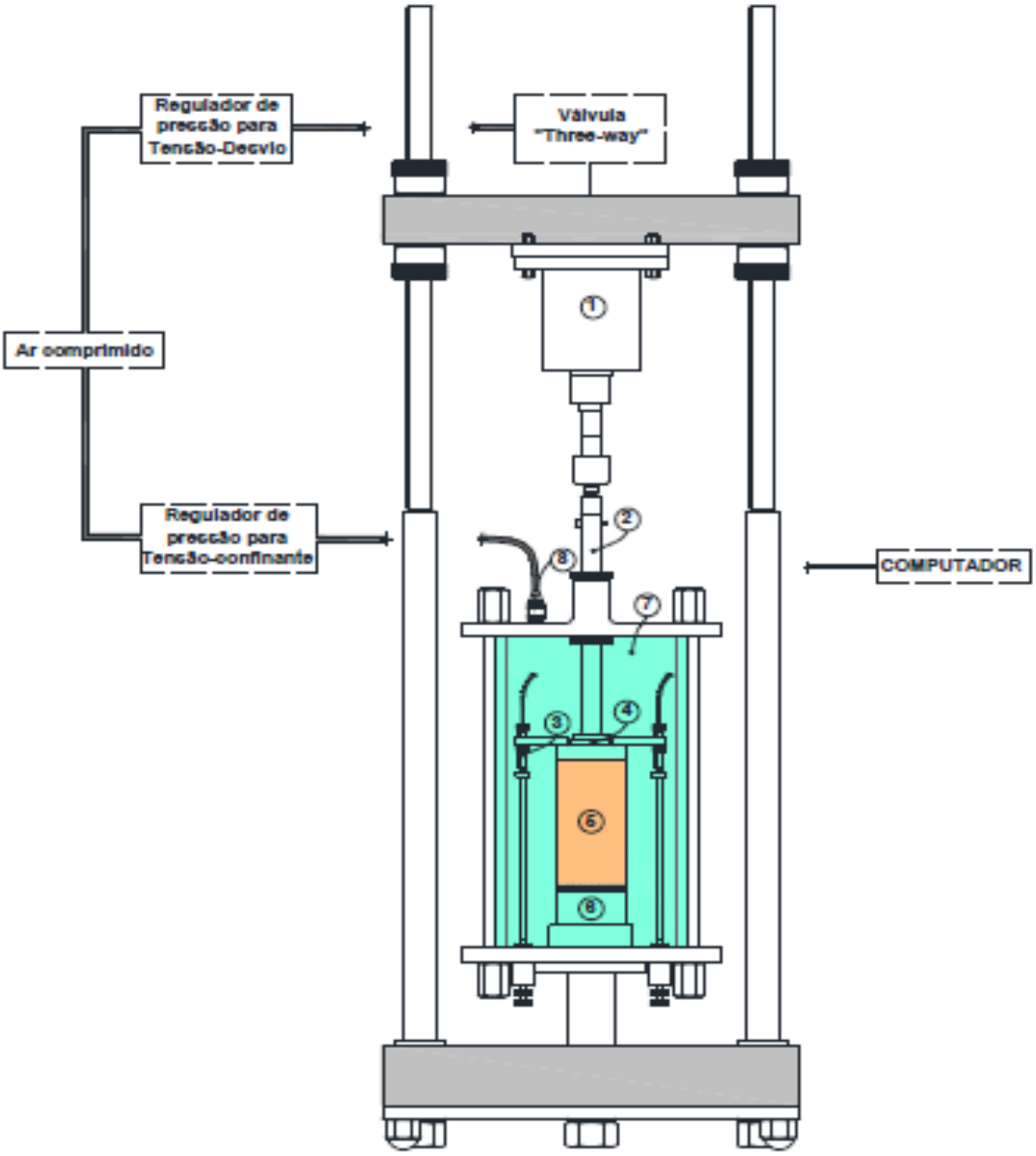
Segundo Franco (2007) o módulo de resiliência não é um parâmetro constante ou fixo para a maioria dos materiais de pavimentação. A anisotropia ou não homogeneidade do material pode impor uma variação pontual deste parâmetro dentro de um material especifico (FONSECA,1995).

Assim, pode-se saber que cada material possui um MR e comportamento particular, por isso tornou-se necessária a realização da caracterização mecânica dos materiais por meio do ensaio triaxial de cargas repetidas efetuado em laboratório (FRANCO, 2007).

O equipamento utilizado para a realização dos ensaios triaxiais de cargas repetidas funciona de forma a impor um esforço atuante no sentido vertical acarretado pela aplicação de uma tensão principal em um período de 0,1 de carregamento ativo e 0,9 segundo de repouso, repetindo até atingir uma quantidade estabelecida previamente. São utilizadas variadas tensões de confinamento, dada pela pressão de ar imposta dentro da célula e tensões solicitantes aplicadas pela célula de carga. As tensões são baseadas na normativa do DNIT (2018) e no Procedimento Rede 04 (2010).

A Figura 8 mostra como o equipamento é esquematizado sendo composto por uma prensa pneumática que se localiza estruturada em um suporte, a câmara triaxial, composta por um cilindro de policarbonato (número 7), cilindro de pressão (número 1) a ar comprimido com pistão de carga (número 2), sistema de medição dos deslocamentos por meio do Linear Variable Differential Transformer (LVDT) (número 3) e um transdutor de carga axial para o monitoramento (DNIT, 2018).

Figura 8 – Esquema do equipamento triaxial



Fonte: DNIT (2018)

As válvulas reguladoras da pressão do ar comprimido, que aplicam a tensão desvio e tensão confinante, válvulas de três vias de carga vertical que regulam pressão do ar em tempo e frequências de carregamento, além de um temporizador eletrônico para controle da abertura da válvula e frequência do carregamento, compõem o sistema pneumático de carregamento.

O nível de precisão dado pelos LVDT deve ser de $1x10^{-3}$ mm, tendo uma faixa de leitura com variação máxima de 5mm. Por meio destes, o computador é capaz de

medir e registrar os descolamentos compatíveis provenientes da aplicação de cargas cíclicas através do *software* Seepav.

Observou-se que diversos pesquisadores tiveram uma tendência a tentar estimar valores de módulo de resiliência a partir de ensaios mais simples. Bernucci *et al.* (2010) desaconselha a utilização de correlações feitas por meio dos valores de ISC para determinação de um valor de MR, sendo que essa não existe diante dos fatores considerados em cada ensaio.

2.6.1 Modelos de determinação do módulo de resiliência

Considerando os parâmetros citados como constantes, diversos pesquisadores criaram diferentes modelos para uma correlação válida entre módulo resiliente e às tensões atuantes, tendo como base, normalmente, à composição granulométrica apresentada pelo material, obtendo então constantes de determinação (R^2).

Um destes modelos foi proposto por Biarez (1962) que teve por objetivo averiguar o comportamento referente ao MR de solos granulares, por isso a modelo leva em consideração a influência da tensão confinante. A Equação 02 apresenta o modelo proposto.

$$MR = k_1 . {\sigma_3}^{k2}$$

Onde:

MR é o módulo de resiliência (MPa);

σ_3 é a tensão confinante ou tensão principal menor (MPa);

k_1 e k_2 são parâmetros de resiliência.

Já o modelo proposto por Hicks (1970) e simplificado por Svenson (1980) teve por objetivo verificar as correlações para módulo de resiliência frente a solos de comportamento coesivos. Por este fato, a Equação 03 leva em consideração à tensão desvio aplicada.

$$MR = k_1 . {\sigma_d}^{k2}$$

Onde:

MR é o módulo de resiliência;

σ_d é a tensão desvio (MPa);
k_1 e k_2 são parâmetros de resiliência.

Já o modelo conhecido como Invariante de tensões ou K-θ, leva em conta o somatório das tensões principais aplicadas ao corpo de prova durante o ensaio, considerando o 1º invariante de tensões visualizado na Equação 04.

$$MR = k_1 . \theta^{k2}$$

Onde:
MR é o módulo de resiliência;
$\theta = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$ é Primeiro invariante de tensão;
k_1 e k_2 são parâmetros de resiliência.

Por fim, o modelo introduzido no Brasil por Macêdo (1996) tem por objetivo tentar obter por meio de uma regressão linear, apresentada na Equação 05, o módulo de resiliência para qualquer tipo de material, considerando as tensões confinante e desvio para o cálculo. Este modelo ficou conhecido como Modelo Composto.

$$MR = k_1 . {\sigma_3}^{k2} . {\sigma_d}^{k3}$$

Onde:
MR é o módulo de resiliência;
σ_3 é a tensão confinante ou tensão principal menor (MPa);
σ_d é a tensão desvio (MPa);
k_1, k_2 e k_3 são parâmetros de resiliência.

3 METODOLOGIA

Neste capítulo será apresentada a estruturação da pesquisa juntamente com o planejamento inicial do trabalho, que aborda primeiramente a escolha da jazida, juntamente com o processo envolvendo a coleta dos materiais. Em seguida, estruturam-se os métodos laboratoriais utilizados que subdividam-se entre classificação e caracterização dos materiais selecionados, em conjunto com ensaios triaxiais, que resultam na obtenção das propriedades resilientes dos materiais. Por fim, com os parâmetros obtidos é realizado o dimensionamento e análise empírico-mecanicista de um pavimento típico, além de uma comparação entre o investimento feito nas estruturas dimensionadas, verificando viabilidade de emprego das misturas em campo.

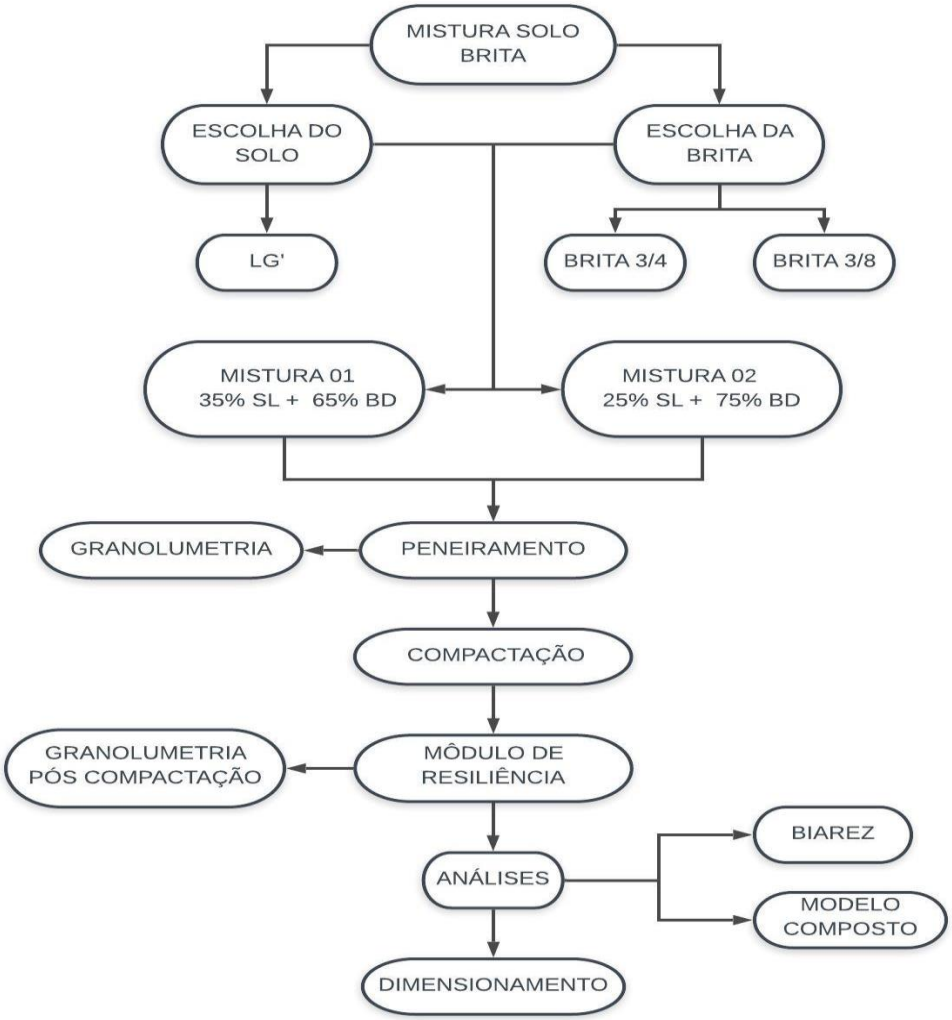
3.1 ORGANIZAÇÃO DA PESQUISA

A escolha dos traços das misturas propostas se baseou no trabalho de Norback (2018), que estudou o comportamento de três misturas solo-brita e também a partir de Mello (2019), que estudou o comportamento de uma mistura solo-brita. O solo a ser utilizado durante a pesquisa foi selecionado a partir do trabalho de Pascoal (2020), que caracterizou e classificou o comportamento de um solo laterítico de Cruz Alta (RS). E por fim, o agregado utilizado foi coletado na pedreira São Juvenal em Cruz Alta (RS), que teve suas propriedades e classificação apresentadas no trabalho de Back (2018).

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC), sendo que a caracterização do solo foi realizada em conjunto com Pascoal (2020), ao passo que o agregado teve suas características retiradas da pesquisa de Back (2018).

Tendo embasamento nestes trabalhos foram previamente selecionados o solo e brita utilizados e logo após foram definidas duas misturas em proporções diferentes desses dois materiais para serem estudadas, tendo por fim uma primeira mistura com 35% solo laterítico e 65% agregado descontínua e uma segunda mistura com 25% solo laterítico e 75% agregado descontínua. Na Figura 9, o fluxograma apresentado resumo todos os processos realizados.

Figura 9 – Fluxograma de planejamento das atividades



Fonte: Autor

3.2 MATERIAIS

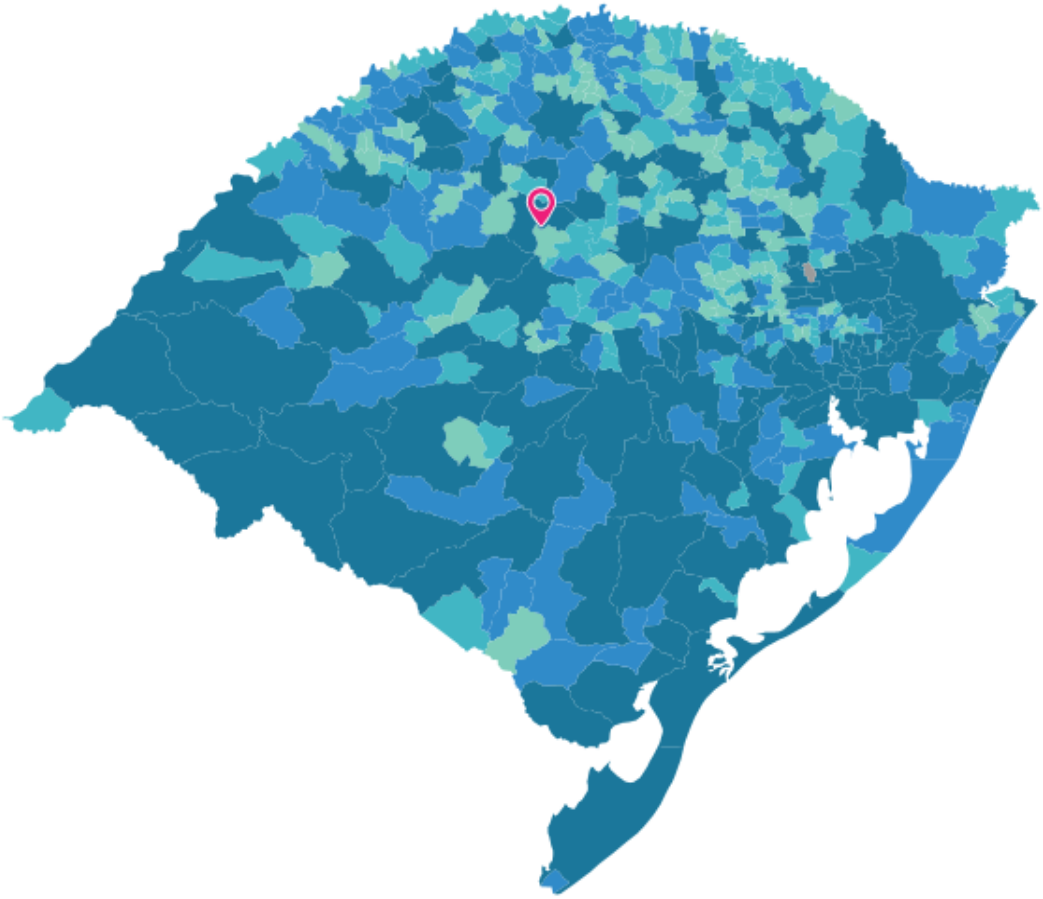
Nesta seção serão discorridos os materiais que foram utilizados para compor a pesquisa como um tudo, o motivo pelo qual eles foram escolhidos e a metodologia utilizada para classifica-los a fim de fazer uso destes de forma apropriada.

3.2.1 Solo

Para esta pesquisa foi utilizado o solo estudado na dissertação de mestrado da aluna do Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil (PPGEC) da Universidade

Federal de Santa Maria (UFSM) Paula Taiane Pascoal (Pascoal, 2020). Este solo é proveniente da cidade de Cruz Alta, localizada na região noroeste do Rio Grande do Sul, como é possível visualizar na Figura 10, situada em região de clima Subtropical.

Figura 10 – Localização da cidade de Cruz Alta no estado



Fonte: Adaptada do IBGE (2019)

A coleta dos materiais foi feita na jazida que está locada nas coordenadas de 28º37’39.20’’ sul e 53º37’31.50’’ oeste. Neste local se encontra a jazida utilizada em um trecho da RS 342, apresentada na Figura 11.

Foram coletados amostras dos horizontes A, B e C. Para este trabalho foi escolhido para a utilização o horizonte B, devido ao comportamento mais uniforme que este demonstrou durante a caracterização, em conjunto com menor teor de matéria orgânica em comparação com o horizonte A e menor identidade com a rocha como o horizonte C.

Figura 11 – Localização do talude

Fonte: Pascoal (2020)

Após coletado, o material foi seco ao ar, destorroado e posteriormente foram separados os grãos passantes na peneira de 4,75 mm para que fosse possível serem realizados os ensaios de caracterização. Após estes ensaios, o solo foi classificado como LG’ demonstrando assim, possuir comportamento laterítico pela metodologia MCT.

3.2.2 Brita

Neste trabalho foi utilizada uma única fonte de agregado, proveniente também do município de Cruz Alta, originário da Pedreira São Juvenal que se encontra nas coordenadas 28º37’30.99’’ sul e 53º35’10.80’’ oeste. O material provindo da pedreira em questão, apresentada na Figura 12, é um material basáltico que possui cores cinza escuro com algumas frações avermelhadas e esverdeadas (Back, 2018).

A classificação deste foi feita na dissertação de metrado da aluna do PPGEC da UFSM Ana Helena Back (Back, 2018).

Figura 12 – Local de coleta do agregado

Fonte: Autor

Como o agregado foi coletado em pilhas na pedreira, após a coleta ser realizada, ao chegar no Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC) este material foi novamente peneirado para que existissem somente as porções de interesse a pesquisa, que eram brita 3/4 ‘’ e brita 3/8”, e posteriormente estas foram estocadas separadamente.

Para a realização da pesquisa das duas misturas em questão foram obtidos através do peneiramento de 50kg de brita 3/4'' - passante na peneira 19mm e retido na peneira 9,5mm- e 40kg de brita 3/8’’ – passante na peneira 9,5mm e retido na peneira 4,75mm.

3.3 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DO SOLO

O solo aparece na natureza de variadas formas e com inúmeras características, então para viabilizar o uso deste foram propostas classificações dos materiais granulares.

Nesta seção serão abordados os ensaios de caracterização do solo que foram realizados para que fosse possível a escolha de um solo laterítico para as misturas. Os ensaios aconteceram no LMCC e foram executados em conjunto com Pascoal (2020).

Para a classificação do solo foram utilizados as metodologias SUCS e TRB sendo também necessário a realização da classificação MCT. Foram realizados ensaios de análise granulométrica por sedimentação com e sem uso de agente defloculante (hexametafosfato de sódio) e por peneiramento, determinação de limites liquidez e plasticidade, massa específica dos grãos, ensaios de compactação nas três energias, compactação mini- mcv e perda de massa por imersão.

Foi indispensável também a classificação MCT, pois esta envolve os solos de clima tropicais, que são encontrados no Brasil. Diante desta metodologia foram feitos ensaio determinados pela norma DNER-CLA 259/96 sendo realizados por fim ensaios que avaliam propriedades como contração, permeabilidade, expansão em corpos de prova em miniatura.

3.3.1 Preparo do Solo

Primeiramente foi realizada a preparação do solo para os ensaios. Esta foi dada conforme a norma NBR 6457/16 (ABNT, 2016), tendo como primeiro passo a secagem prévia deste material ao ar, até ser considerado seco à umidade higroscópica, assim iniciando-se o processo de destorroamento do grãos com a devida homogeneização da amostra a ser utilizada. Em seguida foram verificados as necessidades de cada ensaio e separadas as quantidades precisas para estes.

3.3.2 Ensaios de Granulometria

Tendo como princípio a análise granulométrica do material foi tomado como base a NBR 7181/17 (ABNT, 2017) que discorre o acontecimento do ensaio. Com as amostras já separadas foi realizado o ensaio que tem por objetivo tornar conhecida a dimensão dos grãos que compõem o solo tendo assim uma aproximado diâmetro equivalente destes por meio de sedimentação, para partículas mais finas do solo, e peneiramento.

Após o ensaio, é feita uma curva granulométrica que representa as porcentagens de frações de dimensões diferentes do solo, tendo cada fração uma

nomenclatura. Segundo Pinto (2002) com essas denominações das frações será possível prever o comportamento que o solo irá apresentar, sendo assim classificado pelas frações que são apresentadas por final.

3.3.3 Ensaios Limites de Atterberg

Os ensaios de limites de Atterberg que são ensaios de limite de liquidez e plasticidade ajudam estimar o comportamento do solo apresentando um maior conhecimento sobre os finos presentes no material em questão. As porções de argila presentes no material variam suas propriedades conforme a quantidade de água presente. Assim, existe um limite úmido o qual precisa de 25 golpes no aparelho de Casagrande para fechar uma ranhura na concha e este se chama limite de liquidez e é padronizado pela NBR 6459/17 (ABNT, 2017). Ainda existe um limite de mínima umidade onde o solo ainda não está quebradiço, podendo ainda formar um cilindro de 3mm de diâmetro e comprimento de aproximadamente 100mm sem se fragmentar. Este procedimento é padronizado pela NBR 7180/16 (ABNT, 2016). Ainda foi determinado o valor de diferença entre o limite de liquidez e plasticidade que se denomina índice de plasticidade do material.

3.3.4 Ensaios de Determinação de Massa Específica

Utilizando a NBR 6458/16 (ABNT, 2016), a qual rege os procedimentos para a determinação da massa especifica do material, foi feito o ensaio para definir este índice. O ensaio baseia-se em determinar o peso do sólidos relaciona ao seu volume total e é feito com auxílio de um picnômetro. Este índice é importante para a realização de outros ensaios.

3.3.5 Ensaio de Compactação

Ainda foram feitas curvas de compactação nas três energias, normal, intermediária e modificada, sendo guiadas pela NBR 7182/16, as quais foram essenciais para a determinação da umidade ótima de compactação do material, onde temos a maior densidade seca com a menor umidade. O ensaios foram feitos obtendo-se cinco pontos na curva, dois no ramo seco, com baixar umidades, mais dois no ramo

úmido e um intermediário. Os pontos tem variação de aproximadamente 2% de umidade.

3.3.6 Metodologia MCT

Além dos citados acima, também foram feitos ensaios para a realização da classificação MCT (Miniatura Compactada Tropical). Esta metodologia busca classificar solos por meio da realização de ensaios com corpos de prova em dimensões reduzidas possuindo 50mm de diâmetro. Foram realizados ensaios de compactação Mini-MCV e perda de massa por imersão em água de acordo com as normas vigentes.

O ensaio de compactação Mini-MCV, realizado com base na norma DNER-ME 258/94, é realizado por meio da compactação em miniatura de amostras de solos com umidades variáveis, tendo para cada amostra a utilização de energias crescentes até que seja observado por meio de um extensômetro a densidade máxima da amostra.

Em seguida, com as amostras já compactadas, é realizado o ensaio de perda por imersão, normatizado a partir DNER- ME 256/94. Nesta os corpos de prova são posicionados dentro de um recipiente cheio de água onde ocorre a perda de massa dos corpos de prova. Após 20h de imersão, a massa perdida que foi posicionada dentro de uma cubeta é seca em estufa e pesada para a determinação da massa.

A partir destes ensaios, é possível a retirada de informações para realização das curvas de deformação e angularidade no trecho seco da curva de compactação. Tendo por fim resultados para a conclusão se o solo apresenta características lateríticas e pode ser utilizado para fins rodoviários.

3.4 CARACTERIZAÇÃO DO AGREGADO

A realização da caracterização do agregado foi feita por Back (2018) que verificou as propriedades e características do material em questão. Foram realizados todos os ensaios para caracterizar o material, porém, nesta pesquisa serão discorridos unicamente os de interesse para o trabalho.

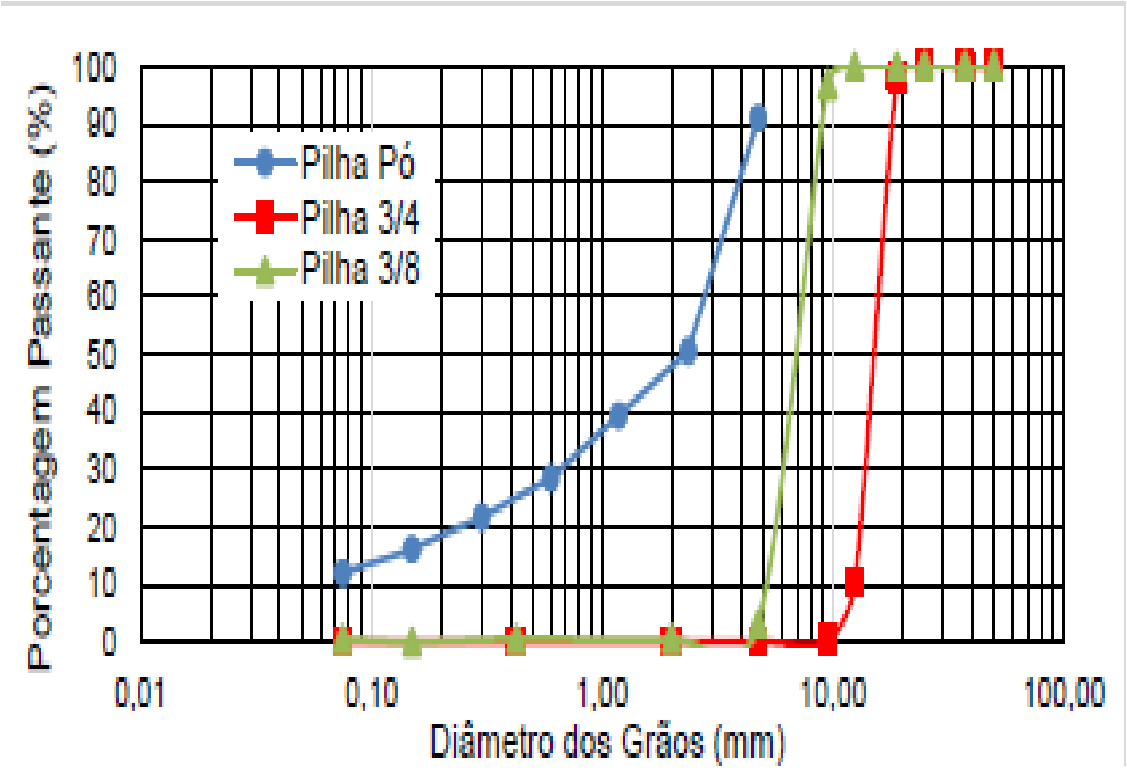
Serão apresentados aqui os resultados dos ensaios de granulometria, determinação da absorção e da massa específica, índice de forma e lamelaridade do

agregado graúdo, massa unitária, equivalente em areia, resistência a abrasão Los Angeles.

3.4.1 Ensaio de Granulometria do Agregado

Inicialmente foram feitos ensaios de granulometria por peneiramento para que fosse possível a separação das frações necessárias para a pesquisa. Este ensaio é regido pela norma DNER-ME 83/98. Em decorrência do peneiramento realizado torna-se possível a elaboração de uma curva granulométrica das partículas, a qual, para este agregado, foi proposta por Back (2018) e está apresentada abaixo na Figura 13. Segundo DNIT (2006) a distribuição granulométrica apresentada pelo agregado é uma das características que proporcionam estabilidade ao pavimento, sendo assim um ensaio de grande importância.

Figura 13 – Curva granulométrica dos agregados



Fonte: Back (2018)

3.4.2 Ensaio de Absorção e Massa Especifica e Massa Unitária

Para o ensaio de absorção e massa específica foi utilizada a norma DNER-ME 195/97. Foram apresentados resultados de absorção e massa específica para as granulometrias ensaiadas na Tabela 1.

A massa unitária no estado solto é normatizada pela DNER-ME 152/95, e considera o material vindo da pilha da pedreira em sua totalidade, contendo assim porções misturadas do agregado.

Tabela 1 – Resultados dos ensaios e absorção e massa específica

Tamanho do agregado	3/4''	3/8''	Pó de pedra
Absorção (%)	1,19	1,78	-
Massa Específica Real (g/cm³)	2,969	3,010	2,691
Massa Unitária no Estado Solto (g/cm³)	1,62	1,55	1,83

Fonte: Adaptado de Back (2018)

3.4.3 Ensaio de Índice de Forma e Lamelaridade

O índice de forma das partículas foi feito seguindo as normas NBR 7809/08 onde é feita a determinação por meio de um paquímetro digital e DNER-ME 86/94 que utiliza o método dos crivos redutores. O índice de lamelaridade das partículas é normatizado por DAER-EL 108/01 e ASTM d 4791/15 que utiliza o Paquímetro Calíper. Os valore de índices definidos apresentam-se na Tabela 2.

Tabela 2 – Resultados dos ensaios de índices de forma

Tamanho do agregado	3/4''	3/8''
Índice de Forma – Paquímetro Digital	1,87	2,69
Índice de Forma-Crivos Redutores	0,88	0,59
Índice de Lamelaridade – Placa DAER/RS (%)	20,24	65,71

Fonte: Adaptado de Back (2018)

3.4.4 Ensaio de Equivalente em Areia

O ensaio de equivalente em areia tem por norma vigente a DNER-ME 54/97. Este é realizado para verificar a presença de outros materiais que possam estar presente juntamente as partículas do agregado e determina o volume destes materiais, que são considerados impróprios para utilização em pavimentação, em relação ao volume de areia apresentado.

Os resultados alcançados referentes ao ensaio acima, apresentam 74% de equivalente em areia, assim validando a utilização do material perante as normas vigentes apresentadas pelo órgãos reguladores.

3.4.5 Ensaio de Resistência Abrasão Los Angeles

O ensaio de Abrasão Los Angeles tem por finalidade apresentar a resistência mecânica do agregado contra choques de esferas de aço que estão dispostas dentro de um tambor. O ensaio é regido pela norma DNER-ME 35/98. O ensaio de Abrasão “LA” realizado resultou em 12,53% de abrasão, apresentando então aprovação em relação as especificações vigentes do DNIT e DAER para a pavimentação que limitam a abrasão em 50% e 40%, respectivamente.

3.5 COMPOSIÇÃO SOLO AGREGADO

Com os materiais constituintes das misturas devidamente classificados e caracterizados, foram propostas duas misturas. Estas misturas foram escolhidas para analisar a variação do comportamento da mistura solo agregado que é apresentada perante diferentes proporções destes.

Mello (2019) analisou o comportamento de uma mistura solo agregado composta por 70% agregado descontínuo e 30% solo laterítico, que neste trabalho foi considerada como Mistura 01. Por este motivo, tornou-se de interesse comum a variação das proporções com a utilização do mesmo material proveniente do LMCC, assim criando misturas preparadas com proporções maiores e menores de material pétreo.

Para esta pesquisa foram definidas duas misturas, denominadas Mistura 02 (25% solo laterítico e 75% agregado descontinuo) e Mistura 03 (35% solo laterítico e 65% agregado descontinuo), apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3 – Proporção das misturas

Mistura	Solo Laterítico (kg)	3/4'' (kg)	3/8'' (kg)
Mistura 02	1,25	2,25	1,5
Mistura 03	1,75	1,75	1,5

Fonte: Autor

As misturas foram separadas em 10 amostras cada, como evidenciado na Figura 14, e estas foram utilizadas para a realização de ensaios, descritos na Tabela 4, para determinação da curva de compactação, ensaios triaxiais para determinação de MR e ensaios de compactação para determinação da quebra dos agregados.

Figura 14 – Composição da mistura M03

Fonte: Autor

Tabela 4 – Amostras ensaiadas

Mistura	Total de Amostras	Curva de Compactação	Ensaio de MR
Mistura 02	9	5 CP	4 CP
Mistura 03	9	5 CP	4 CP

Fonte: Autor

3.5.1 Ensaios de Curva de Compactação

Os ensaios de compactação, foram realizados para obtenção da curva que indica a umidade ótima do material e moldagem de corpos de prova para análise granulométrica e ensaios triaxiais. Os ensaios seguiram as diretrizes do Procedimento Rede 04 (PETROBRÁS, 2010) e do DNIT 134/18 (DNIT, 2018), e por isso não foi utilizado o Proctor, já que a Rede levanta que é necessário compactar da mesma forma que os corpos de prova serão moldados para ensaios.

Então, foi utilizado o molde tripartido de 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura. O processo foi realizado na energia modificada utilizando uma altura de queda de 30,5 cm, com um soquete de peso 2,5 kgf, aplicando 56 golpes a camada de material, contabilizando 10 camadas no total. Estão apresentadas na Tabela 5 os parâmetros de moldagem, dados pelo norma do DNIT (2012), utilizados.

Tabela 5 – Condições de compactação em cilindro tripartido

Diâmetro (cm)	**Altura (cm)**	**Volume (cm³)**	**Energia (kgf.cm/cm³)**	**Nº de camadas**	**Altura de queda (cm)**	**Peso do soquete (kgf)**	**Nº de golpes por camada**
10	20	1570,8	Normal (6)	10	30,5	2,5	12
					45,7	4,53	5
					30,5	4,53	7
					45,7	2,5	8
10	20	1570,8	Intermediária (13)	10	30,5	2,5	27
					45,7	4,53	10
					30,5	4,53	15
					45,7	2,5	18
10	**20**	**1570,8**	**Modificada (27,3)**	**10**	**30,5**	**2,5**	**56**
					45,7	4,53	21
					30,5	4,53	31
					45,7	2,5	38

Fonte: Adaptação do DNIT (2018, p. 12)

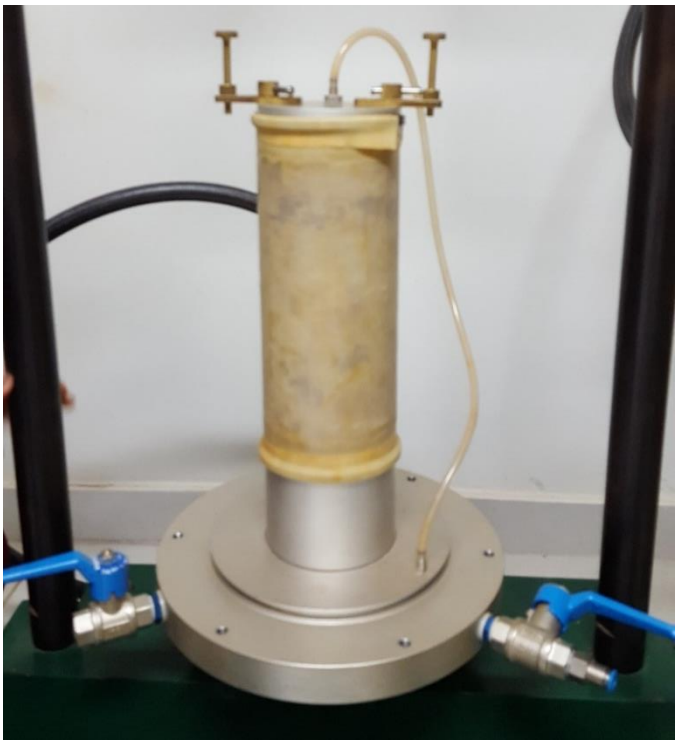
Foram moldados 5 CPs em umidades crescentes para determinação da curva de compactação que indica a MEAS máxima e a umidade ótima da mistura. Foram retiradas umidades da amostra logo após a inserção da água e posterior ao processo de compactação para a verificação da umidade de compactação.

As outras três amostras foram moldadas na umidade ótima, que foi obtida pela curva de compactação e foram separadas para realização do ensaio de módulo de resiliência, sendo moldadas e submetidas ao ensaio em sequência. A última amostra seria moldada caso necessidade por motivos de erros em ensaios.

3.5.2 Ensaio Triaxial de Cargas Repetidas

Para a realização deste ensaio foram utilizadas as diretrizes do DNIT 134/18 (DNIT, 2018) que regulamenta o processo de determinação do módulo de resiliência de um material. O ensaio, que tem sua preparação visível na Figura 15, e é capaz de determinar previsões para o desempenho estrutural do material sendo caracterizado pela aplicação de uma tensão de desvio, σ_d, aplicada repetidamente que tem como resultado uma deformação elástica recuperável correspondente (DNIT, 2018).

Figura 15 – Preparação do ensaio triaxial



Fonte: Autor

O processo de moldagem foi mencionado no item 3.3.1. Em sequência, a amostra foi diretamente levada para ensaio inserindo-a na câmara triaxial, sendo envolvida por uma membrana de látex na sequência, como apresentado na Figura 15.

Após o fechamento da câmara, o ensaio é separado em duas etapas. A primeira etapa é chamada de condicionamento, onde ocorre uma aplicação de 500 repetições de cada par de tensão da Tabela 6, a fim de eliminar as possíveis deformações iniciais. Se a deformação inicial superar 5% da altura do corpo de prova, a amostra deve ser desconsiderada, e o ensaio deve começar de novo com outra amostra até que se obtenham 3 amostras válidas.

Tabela 6 – Sequência de tensões da etapa de condicionamento

Nº repetições	**Tensão Confinante σ_3 (Mpa)**	**Tensão de Desvio σ_d (Mpa)**	**Razão de Tensões σ_1/σ_3**
500	0,070	0,070	2
500	0,070	0,210	4
500	0,105	0,315	4

Fonte: Adaptação do DNIT (2018, p. 6)

A segunda etapa é de determinação do módulo, que consiste em uma aplicação de 18 pares de tensões, apresentados na Tabela 7, com 100 ciclos de carga que resultarão em deformações específicas

Os resultados de módulo obtidos pelo equipamento, chamados de MR bruto, foram avaliados por meio de modelos matemáticos de previsão de comportamento elástico não linear, para uma tentativa de obter um modelo de regressão que melhor representasse o comportamento do material. Estes modelos foram melhor explorados com a ajuda do *software* Statistica que realiza a análise dos dados por meio de regressões múltiplas não lineares.

Tabela 7 – Sequência de tensões para determinação do módulo de resiliência

σ_3 (Mpa)	σ_d (Mpa)	σ_1/σ_3
0,020	0,020	2
	0,040	3
	0,060	4
0,035	0,035	2
	0,070	3
	0,105	4
0,050	0,050	2
	0,100	3
	0,150	4
0,070	0,070	2
	0,140	3
	0,210	4
0,105	0,105	2
	0,210	3
	0,315	4
0,140	0,140	2
	0,280	3
	0,420	4

Fonte: Adaptação do DNIT (2018, p. 7)

3.6 ANÁLISE MECINISTA E ORÇAMENTÁRIA

Após a realização dos ensaios de MR, os resultados obtidos foram inseridos no *software* MeDiNa, versão 1.1.3.0, para dimensionadar a partir de sua rotina de cálculo. Nesta etapa foram dimensionadas 9 estruturas utilizando as misturas estudadas M02 e M03 como sub-base, e o subleito composto pelo de Pascoal (2020).

As estruturam foram dimensionadas a partir de um carregamento de tráfego que foi imposto pela variação do número N utilizado no roteiro de cálculo. Além disso,

foram variados os materiais que compõem a camada de sub-base, sendo utilizado além das misturas uma sub-base de brita graduada.

Foram verificadas estruturas para um tráfego leve, médio e alto, especificados na Tabela 8.

Tabela 8 – Valores de N para nível de tráfego

Nível de tráfego	**Valor de tráfego**
Alto	$1x10^7$
Médio	$5x10^6$
Leve	$1x10^6$

Fonte: Autor

Além disso, por meio de uma planilha automatiza, baseada nos custos do SICRO de outubro de 2018, foi possível realizar o orçamentos das estruturas dimensionadas pelo MeDiNa, e verificar a viabilidade econômica de construção destas, em relação ao tráfego e aos materiais aplicados na estrutura.

4 RESULTADOS E ANÁLISES

Neste capítulo serão apresentados os resultados dos ensaios de caracterização física e mecânica de materiais, realizados durante a pesquisa e descritos no capítulo anterior. A partir dos resultados alcançados serão formalizadas análises sobre o tema em questão comparando com dados retirados de outras pesquisas.

4.1 CARACTERIZAÇÃO DO SOLO

O solo utilizado para esta pesquisa teve os ensaios de caracterização realizados em conjunto com Pascoal (2020) sendo escolhido o horizonte B para realização dos ensaios. A sequência de ensaios foi mencionada no capítulo anterior, ressaltando que foram feitos ensaios de granulometria, massa específica, limites de Atterberg, ensaios da metodologia MCT e ensaios de compactação.

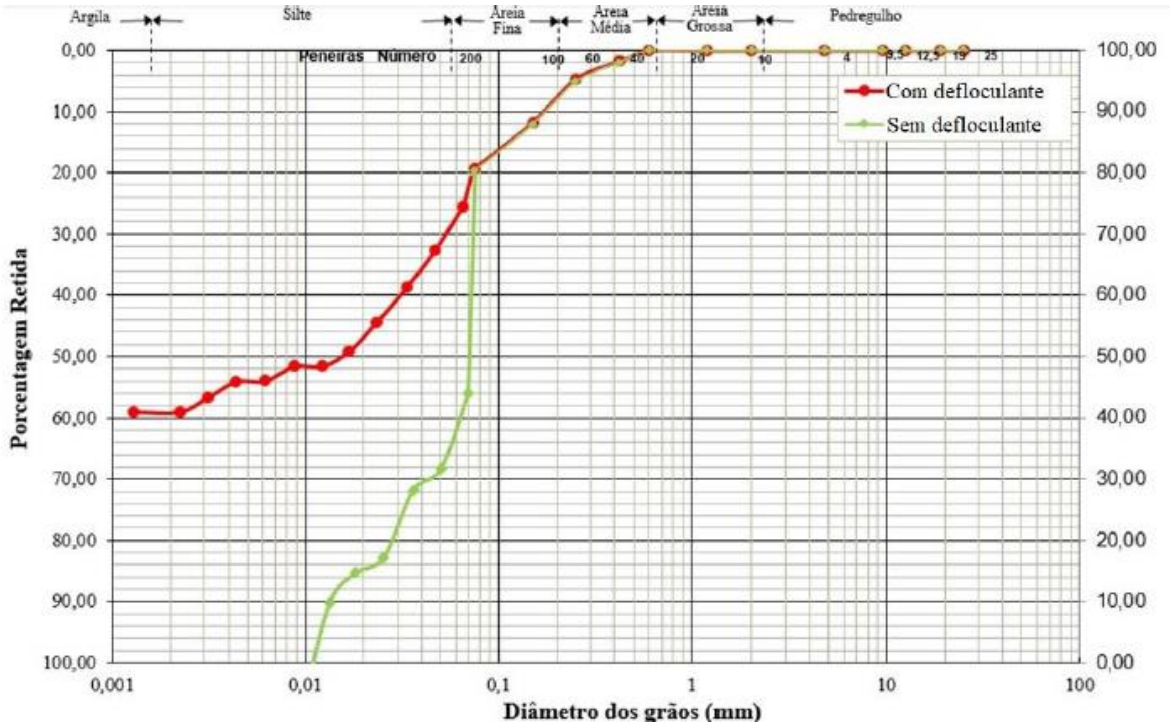
Os resultados do ensaio de granulometria e massa especifica, realizados para o solo de Cruz Alta, estão apresentados, em resumo, na Tabela 9. Na sequência, fica evidenciada a curva granulométrica na Figura 16. Os ensaios foram realizados pelo menos com três repetições para que se tornasse possível uma validação dos resultados encontrados, sendo que a granulometria foi feita com e sem a utilização defloculante.

Tabela 9 – Quadro resumo do ensaio de granulometria

Amostras de solo do Horizonte B	
% pedregulho (>2,0 mm)	0
% areia grossa (0,6 – 2,0 mm)	0
% areia média (0,2 – 0,6 mm)	8
% areia fina (0,06 – 0,2 mm))	25
% silte (2 μm – 0,06 mm)	26
% argila (%<2 μm)	41
Peso Específico (kN/m³)	27,80

Fonte: Adaptado Pascoal (2020)

Figura 16 – Curvas granulométricas com e sem defloculante



Fonte: Adaptado Pascoal (2020)

Fica evidenciado por meio das análises granulométricas e por peneiramento que o solo em questão é composto, em sua maior parte, por grãos de diâmetros pequenos, sendo considerado um material fino, sendo que, como apresentado nos ensaios, mais de 80% de sua fração granulométrica foi determinada como passante na peneira de nº 200.

A variação apresentada nas curvas granulométricas extraídas do ensaio de granulometria por sedimentação é coerente devido ao fato do uso de defloculante (hexametafosfato de sódio), que age de forma a separar totalmente os materiais finos que possam ficar aderidos à grãos maiores, o que gera uma curva com uma melhor distribuição granulométrica dos finos.

4.1.1 Classificação do solo por métodos tradicionais

Os ensaios realizados para a classificação do horizonte B do solo utilizado na pesquisa por meios dos métodos tradicionais da SUCS e TRB estão apresentados na Tabela 10.

Para a primeira metodologia o solo foi classificado com um silte de alta plasticidade pelo fato de possuir uma limite de liquidez maior do que 50, sendo caracterizado por apresentar pequena rigidez e baixa resistência a seco. Já pela classificação TRB este solo integra o grupo A-7-6, que possui um comportamento considerado de sofrível a ruim para a utilização em subleitos rodoviários.

Diante das duas análises é possível verificar a baixa credibilidade que este solo apresenta em quanto as classificações tradicionais, não sendo recomendado para utilização rodoviária.

Tabela 10 – Quadro resumo da classificação do solo

Amostras de solo do Horizonte B		
Propriedades (%)	LL	55
	IP	11
Classificação	SUCS	MH
	TRB	A-7-6

Fonte: Adaptado Pascoal (2020)

4.1.2 Classificação pela metodologia MCT

Como a área de interesse da pesquisa é a pavimentação, fez-se necessário a verificação do comportamento do solo frente a ensaios específicos para os materiais de clima tropical e úmido. Estes ensaios verificam as características do solo compactado em relação a propriedades mecânicas e hidráulicas que este desenvolve depois da compactação.

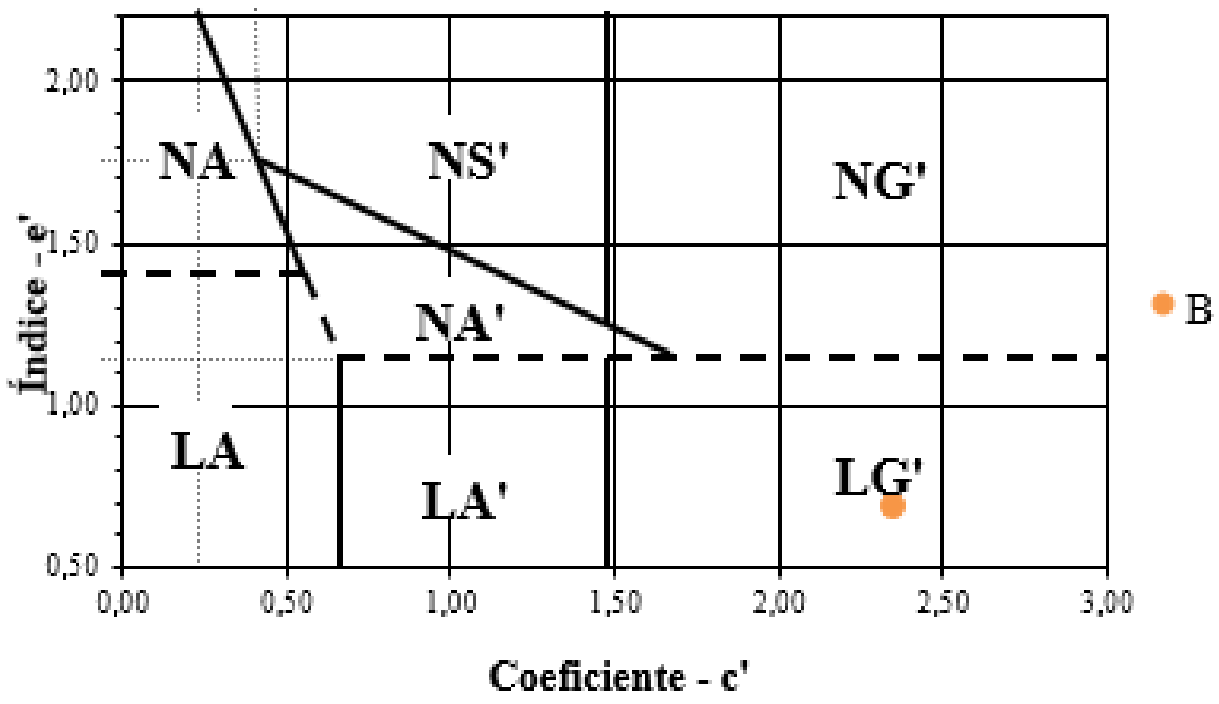
Foram realizados os ensaios necessários para a classificação sendo eles ensaios de Mini-MCV e Perda de Massa por Imersão. Estão apresentados, na Tabela 11, os parâmetros c’, d’, e e’ que foram extraídos dos resultados de ensaio e na Figura 17 se encontra a classificação do solo, pela metodologia em questão, por meio dos parâmetros descobertos.

Tabela 11 – Índices para a classificação MCT

Amostras de solo do Horizonte B		
Índices classificatórios MCT	c’	2,35
	d’	67,33
	e’	0,69
	Pi’	0,03

Fonte: Adaptado Pascoal (2020)

Figura 17 – Classificação pela metodologia MCT



Fonte: Adaptado Pascoal (2020)

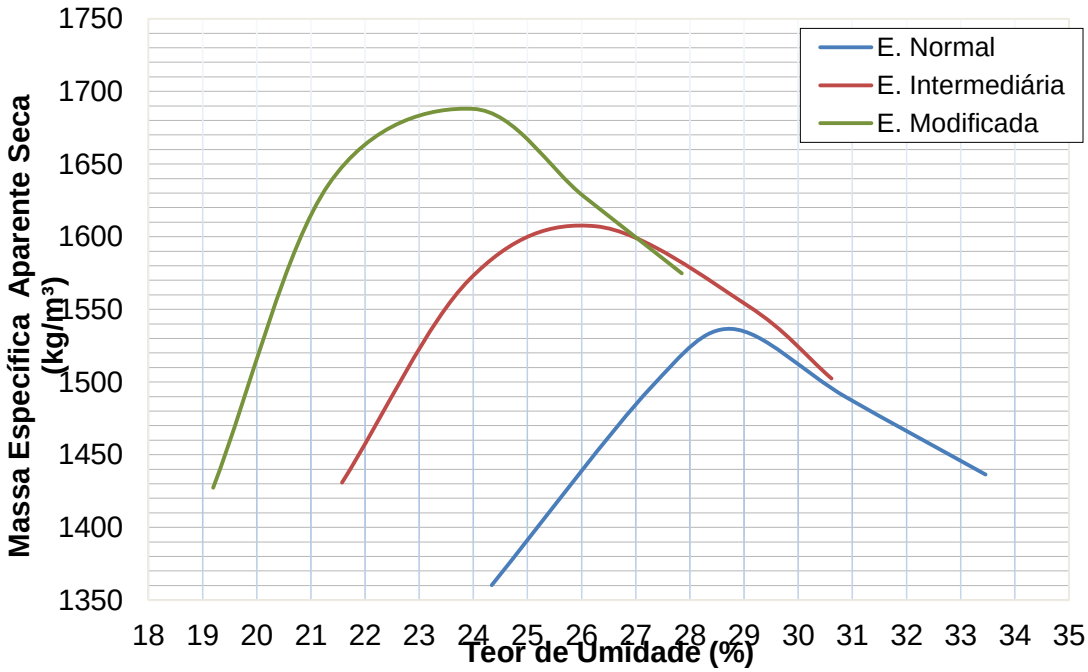
Diante da classificação realizada é possível observar que o solo utilizado apresenta-se no grupo LG’ sendo classificado como solo laterítico de comportamento argiloso em relação as propriedades avaliadas.

4.1.3 Ensaio de compactação do solo

Por meio do ensaio de compactação tornou-se possível elaborar a curva de compactação do solo, onde é ficam visíveis os parâmetros de umidade ótima é massa especifica aparente seca máxima (MEAS) do material. Este ensaio foi realizado nas energias de compactação normal, intermediária, e modificada.

Na energia normal o solo apresentou umidade ótima de aproximadamente 28,9% tendo sua MEAS em torno de 1550,0 kg/m³. Pinto (2006) afirma sobre a influência causada pela energia de compactação nos parâmetros de umidade de MEAS, com base nisto, tem-se o conhecimento de que quanto maior a energia de compactação aplicada ao material menor será a sua umidade e maior sua massa específica aparente seca máxima. Diante disto, a compactação realizada na energia intermediária teve um valor de umidade ótima de 25,6%, sendo que sua MEAS foi determinada em 1630,0 kg/m³. Já na energia modificada esse fato se corrobora quando são verificados valores de umidade ótima e MEAS, respectivamente, de 22,60% e 1650,0 kg/m³. As curvas de compactação, nas três energias, está apresentada na Figura 18.

Figura 18 – Curvas de compactação do solo



Fonte: Pascoal (2020)

Observando a Figura 19, o fato comentado anteriormente fica claro, mostrado que a compactação na energia modificada apresenta valores de MEAS maiores que nas outras duas energias, deslocando a curva mais para cima e para a esquerda.

4.2 SOLO LATERÍTICO E AGREGADO DESCONTÍNUO

Neste item serão apresentados os resultados provenientes do estudo sobre o comportamento mecânico e resiliente de duas misturas de solo laterítico com comportamento argiloso, descrito no item anterior, e agregados de granulometria descontínua.

As misturas denominadas M02 e M03 foram determinadas para análise do comportamento em relação a variação da porcentagem de agregados escolhida por Mello (2019), aplicadas na mistura M01, sendo M02 a mistura composta por 25% solo laterítico e 75% agregado descontinuo e M03 a mistura composta por 35% solo laterítico e 65% agregado descontinuo.

4.2.1 Ensaio de compactação da mistura SLAD

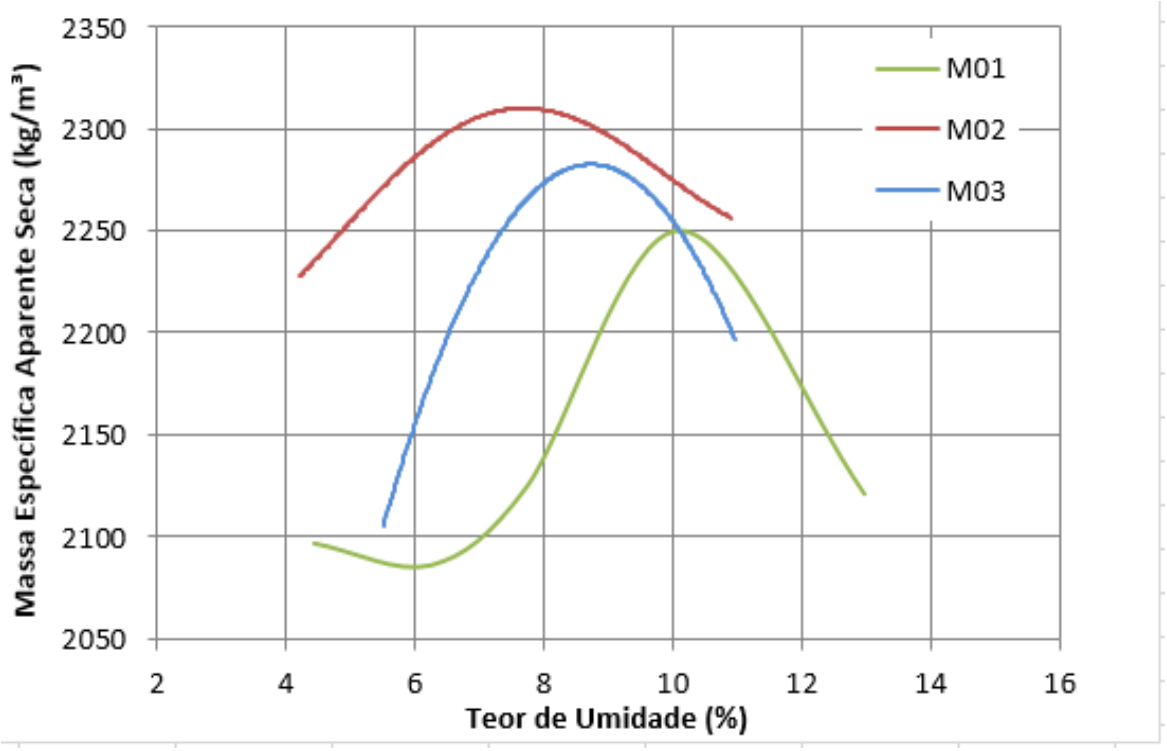
As misturas M02 e M03 foram compactadas para a investigação das umidades ótimas e MEAS de cada uma. A compactação foi efetuada apenas na energia modificada, devido ao fato das misturas estudadas serem de interesse para inserção em camadas de sub-base de pavimentos. A Figura 19, mostra as curvas de compactação das misturas, juntamente com a mistura M01 de Mello (2019) e seus respectivos parâmetros extraídos do ensaio estão evidenciados na Tabela 12.

Tabela 12 – Parâmetros de compactação das misturas SLAD

Parâmetros - EM	M01	**M02**	**M03**
	30%SL 70%AD	**25%SL 75%AD**	**35%SL 65%AD**
Umidade Ótima (%)	10,2	7,7	8,7
MEAS (kg/m³)	2250	2310	2284

Fonte: Autor

Figura 19 – Curva de compactação das misturas SLAD



Fonte: Autor

4.3 RESULTADOS DOS ENSAIOS TRIAXIAS DAS MISTURAS

Com o objetivo de investigar o comportamento mecânico das misturas estudadas, foram executados ensaios triaxiais de cargas repetidas. Por meio destes ensaios tornou-se viável a verificação do módulo de resiliência das misturas M02 e M03. Para a preparação deste ensaio foi necessária efetuar a compactação das misturas na umidade ótima estimada com os procedimentos supracitados. O ensaio foi feito em três amostras para cada mistura proposta. As propriedades de compactação dos corpos de prova moldados para o ensaio triaxial estão apresentadas na Tabela 13.

Conforme DNIT ME 134/2018 o teor de umidade apresentado pelo corpo de prova, para a validação do ensaio de MR em uma condição de umidade ótima, pode variar no máximo em 1% do valor definido pelo ensaio de compactação para este parâmetro.

Tabela 13 – Propriedades de moldagem dos corpos de prova

Mistura	Amostra	W (%)	γ_d (kg/m³)
	AM01	7,3	2335,2
M02	AM02	7,8	2316
	AM03	7,5	2316,7
	AM01	8,0	2267
M03	AM02	8,4	2270,4
	AM03	7,8	2265

Fonte: Autor

Pelo fato das misturas em questão serem compostas por granulometrias variadas, e por isso, apresentarem características diferentes em relação ao conjunto, optou-se por verificar os valores de módulo de resiliência por meio de quatro modelos de análise que foram citados no referencial bibliográfico.

O corpos de prova foram analisados seguindo a verificação de influência da tensão confinante, onde o modelo de Biarez foi aplicado, da tensão de desvio, pela aplicação do modelo de Svenson, do somatório das tensões principais, pelo modelo das Tensões Principais e por último pelo modelo que considera influência das tensões de desvio e confinante, utilizando o modelo Composto.

4.3.1 Análise do módulo de resiliência da mistura M02

As amostras foram separadas, moldadas na umidade ótima e colocadas em seguida na câmara de triaxial. Os três primeiros corpos de prova são referentes a mistura M02 e os três restantes a M03. Na Figura 20, esta apresentado um dos corpos de prova da mistura M02.

Após a moldagem dos CPs foi retirada uma umidade de mistura homogeneizada para a verificação da umidade pós compactação após o ensaio de MR este processo se repetiu. Foi observada um rápida perda de umidade da mistura se não isolada do meio externo.

Figura 20 – Corpo de prova da mistura M02

Fonte: Autor

Os resultados obtidos para a mistura M02, foram analisados para cada amostra, para verificar a validação do ensaio, e estão resumidos na Tabela 14. Após, os dados foram inseridos no *software* Statistica Version 10.0 onde foram gerados os coeficientes usados como parâmetros de cálculo para a determinação do MR pelos modelos, em relação as três amostras ensaiadas.

Tabela 14 – Valores de MR M02

σ_3 (Mpa)	σ_d (Mpa)	θ	MR (MPa)		
			AM 01	AM 02	AM03
0,020	0,020	0,0080	185,636	168,478	183,358
	0,040	0,040	166,453	155,450	159,151
	0,060	0,060	154,623	158,143	150,572
0,035	0,035	0,140	184,249	184,070	190,534
	0,070	0,070	176,998	185,950	184,440
	0,105	0,105	175,883	196,232	178,038
0,050	0,050	0,200	213,067	213,893	237,315
	0,100	0,100	203,816	229,926	223,280
	0,150	0,150	210,341	249,016	230,018
0,070	0,070	0,280	245,084	266,986	293,09
	0,140	0,140	240,426	276,341	280,763
	0,210	0,210	261,659	307,743	296,795
0,105	0,105	0,420	347,064	373,631	413,875
	0,210	0,210	347,141	386,869	404,306
	0,315	0,315	374,225	382,442	415,403
0,140	0,140	0,560	464,824	440,836	526,895
	0,280	0,280	440,079	442,593	502,217
	0,420	0,420	448,164	425,234	504,003

Fonte: Autor

Então, em posse dos valores de MR verificados pelo equipamento triaxial pra cada amostra, estes foram inseridos no *software* e analisados a partir dos modelos de regressão apontados anteriormente. A Tabela 15 resume os resultados obtidos.

A análise por meio do software foi feita de forma a incluir os resultados das três amostras juntamente, assim obtendo valores médios, tendo então parâmetros estatísticos referentes ao conjunto ensaiado.

Tabela 15 – Parâmetros dos modelos estatísticos para a M02

Modelo	**k1**	**k2**	**k3**	**R²**
Biarez	1590,65	0,63		0,941
Svenson	657,88	0,40		0,607
Invariante de tensões	541,64	0,58		0,868
Composto	1593	0,64	-0,02	0,941

Fonte: Autor

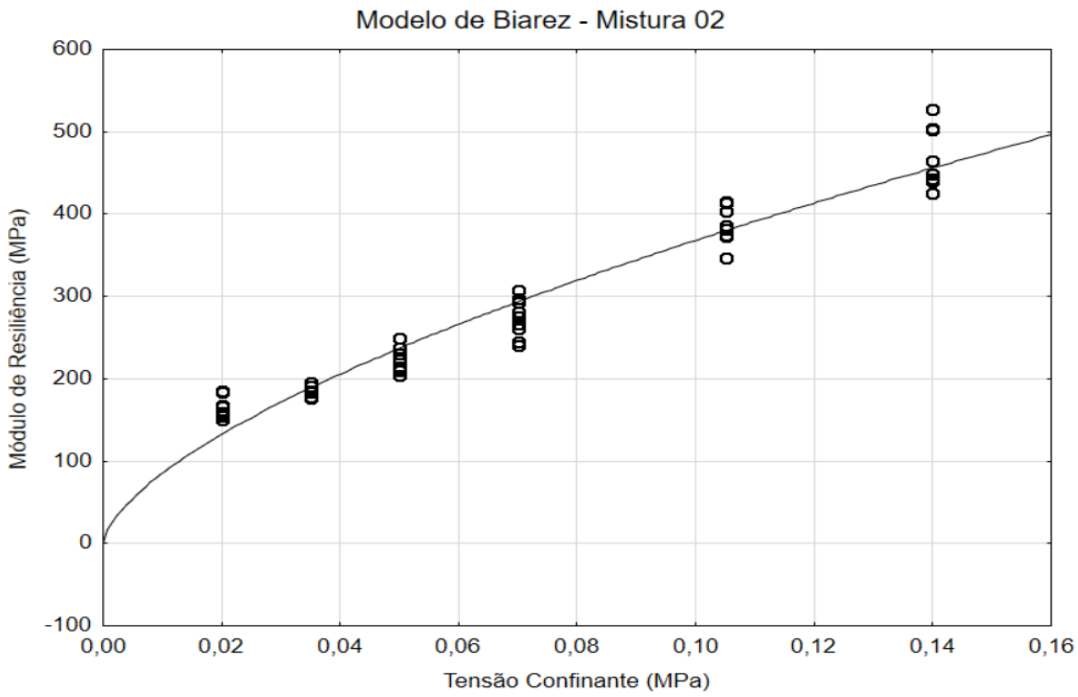
Diante dos valores apresentados na Tabela 15, pode-se perceber que o R^2 apresentado para o modelo de Biarez e para o modelo Composto foram superiores a 0,94. O primeiro leva em consideração a influência apenas da tensão confinante, representando bem solos granulares e o segundo leva em consideração todas as tensões, sendo que assim representa materiais de todas as granulometrias.

Os gráficos dos modelos que apresentaram maior relevância em relação ao R^2 de análise, estão apresentados nas Figuras 21 e 22. Foi possível visualizar o crescimento do MR em relação ao aumento da tensão confinante aplicada durante a realização do ensaio.

Para o modelo Composto, foi possível verificar que a mistura M02 tem o seu MR dependente tanto das tensões confinantes, quanto das tensões desvio. A mistura teve seu comportamento bem representado por meio deste modelo, verificando que com o aumento das tensões de confinamento e das tensões desvio o módulo de resiliência apresentou o mesmo comportamento mostrando um crescimento.

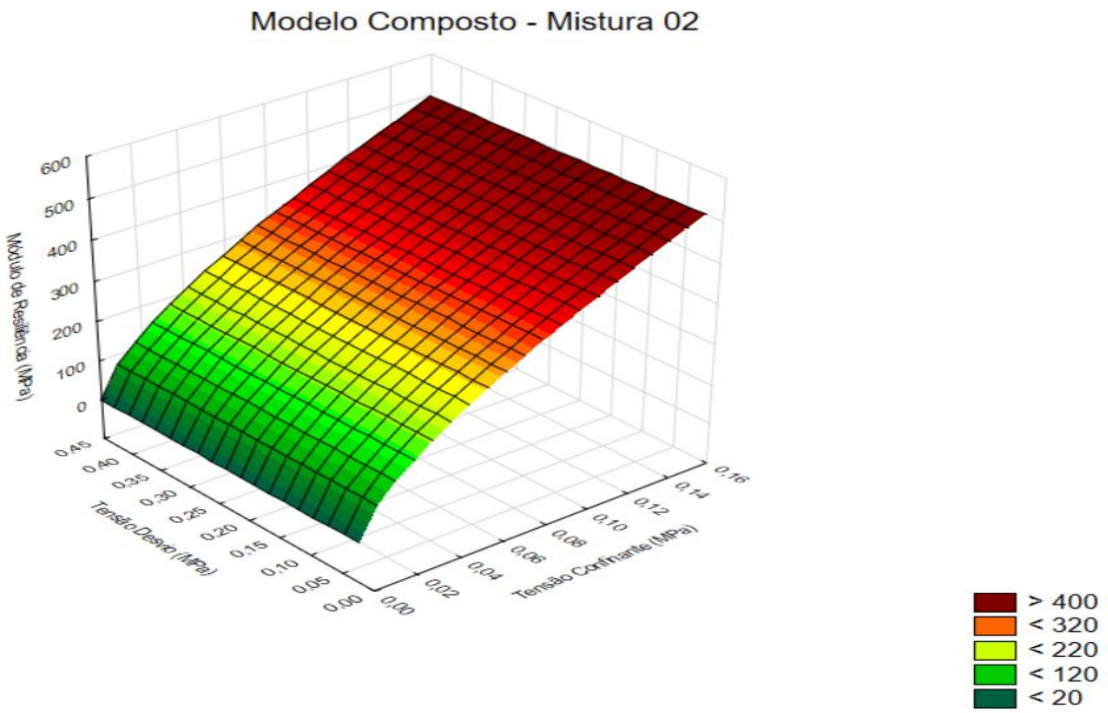
.

Figura 21 – Modelo de Biarez M02



Fonte: Autor

Figura 22 – Modelo Composto M02



Fonte: Autor

Ainda se mostrou importante evidenciar os valores de MR obtidos por meio da equação do modelo Composto, apresentados na Tabela 16, por este ser o modelo utilizado no roteiro do *software* MeDiNa e também por ser uma dos modelos que apresentou melhor confiabilidade em relação aos resultados para a mistura de solo agregado.

Tabela 16 – Valores de MR da M02 modelados

σ_3 (Mpa)	σ_d (Mpa)	MR (MPa)
0,020	0,020	140,88
	0,040	138,94
	0,060	137,82
0,035	0,035	199,31
	0,070	196,57
	0,105	194,98
0,050	0,050	248,64
	0,100	245,22
	0,150	243,24
0,070	0,070	306,32
	0,140	302,10
	0,210	299,66
0,105	0,105	393,87
	0,210	388,45
	0,315	385,31
0,140	0,140	470,78
	0,280	464,30
	0,420	460,55

Fonte: Autor

4.3.2 Análise do módulo de resiliência da mistura M03

O procedimento que foi realizado para a mistura M02, realizou-se da mesma forma para a mistura M03, composta por 35% solo e 65% de agregado.

As amostras foram verificadas também para validação do ensaio, em relação a umidade de ensaio, retirada antes e depois deste e a deformação obtida posterior a aplicação de cargas dada pelo equipamento. A partir dos resultados gerados, estão apresentados na Tabelas 17, os valores brutos de MR, retirados do equipamento triaxial, para cada amostra ensaiada.

Tabela 17 – Valores de MR M03

σ_3 (Mpa)	σ_d (Mpa)	θ	MR (MPa)		
			AM 01	AM 02	AM 03
0,020	0,020	0,0080	254,402	207,476	200,216
	0,040	0,040	256,421	174,345	168,062
	0,060	0,060	246,059	148,857	142,145
0,035	0,035	0,140	295,536	199,732	195,315
	0,070	0,070	288,314	183,763	165,470
	0,105	0,105	275,540	161,817	153,601
0,050	0,050	0,200	339,225	226,787	230,095
	0,100	0,100	330,633	220,624	182,899
	0,150	0,150	315,328	186,727	183,712
0,070	0,070	0,280	367,06	290,033	233,588
	0,140	0,140	370,338	239,561	219,765
	0,210	0,210	360,194	221,941	233,576
0,105	0,105	0,420	463,921	363,370	325,106
	0,210	0,210	435,524	300,473	307,300
	0,315	0,315	444,516	303,306	311,525
0,140	0,140	0,560	594,801	417,313	459,335
	0,280	0,280	548,103	374,217	407,88
	0,420	0,420	500,897	345,976	379,155

Fonte: Autor

Foi possível verificar, que os valores de MR tiveram um pequeno decréscimo, em relação a mistura M02, que possui uma porcentagem maior de agregado 3/4'' e menor de solo. A proporção de agregado 3/8'' não foi variada.

De posse dos valores de MR, foi novamente utilizado o *software* Statistica para a verificação dos parâmetros de regressão para inserção nas equações proporcionadas por cada modelo. Os parâmetros referentes aos modelos adaptados para a mistura M03 estão apresentados na Tabela 18.

Tabela 18 – Parâmetros dos modelos estatísticos para a M03

Modelo	**k1**	**k2**	**k3**	**R²**
Biarez	1099,27	0,48		0,634
Svenson	512,60	0,26		0,298
Invariante de tensões	472,4	0,41		0,522
Composto	1184,18	0,61	-0,13	0,662

Fonte: Autor

Como ficou evidente na Tabela 18, novamente os modelos que mais se aproximam do comportamento do material são os modelos de Biarez e o modelo Composto, reafirmando o comportamento apresentado pela mistura M02, já que trata do mesmo material com apenas uma variação de proporções nas misturas.

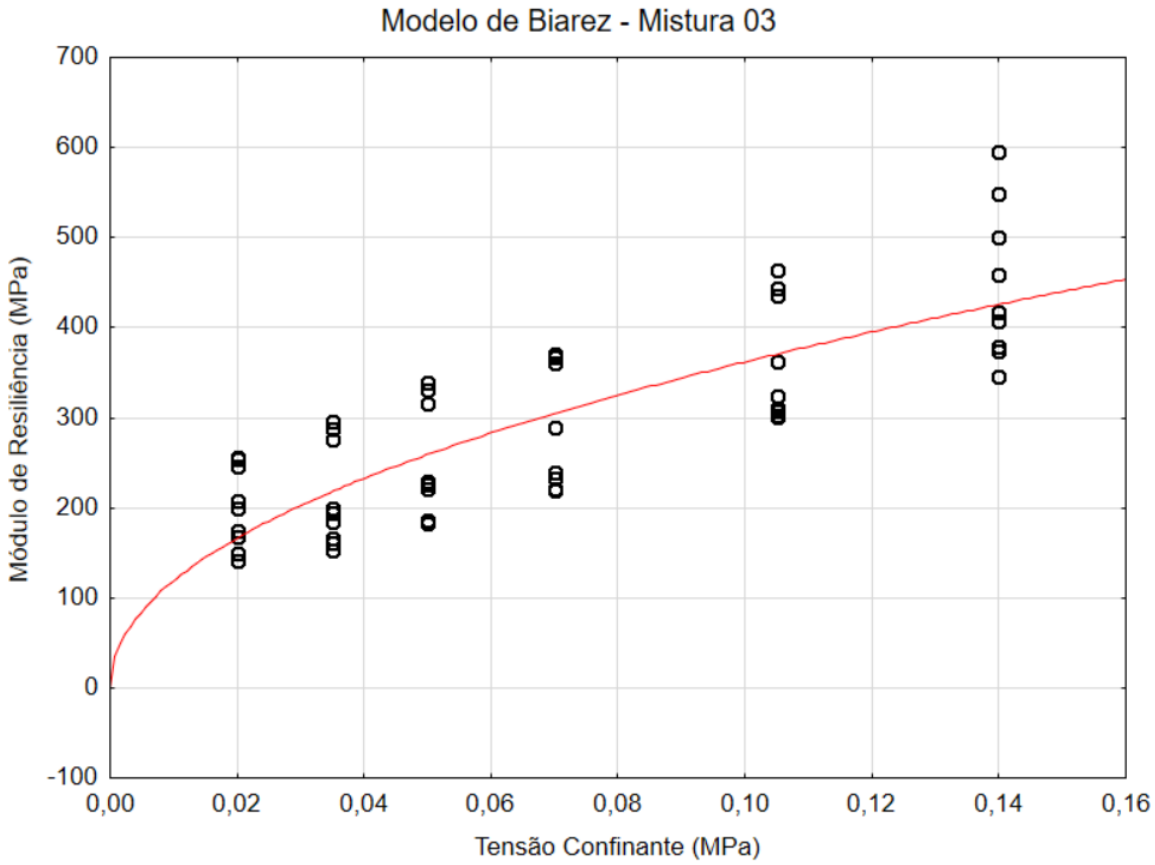
A confiabilidade nos dois modelos apresentou uma diminuição em relação a mistura M02, mostrando que com o aumento da proporção de solo chegando mais próximo, em peso, de uma igualdade na composição dos materiais, e com a diminuição apenas do agregado de maior dimensão, talvez os modelos não tem uma representatividade muito alta.

Os gráficos serão apresentados apenas para os modelos de correlação que mostrando maior relevância para o estudo, apresentando valores de R^2 que proporcionaram confiabilidade para a correlações. Portanto as Figuras 23 e 24 são referentes aos modelos de Biarez e modelo Composto, e foram plotados por meio dos

valores referentes as três amostras juntas, retirados do *software* de análise das modelagens.

Em relação ao modelo de Biarez, que possui valores apresentados abaixo, é possível visualizar o crescimento do módulo de resiliência com o aumento da tensão confinante aplicada, se comportando de forma semelhante a mistura M02 estudada no item 4.3.1.

Figura 23 – Modelo de Biarez M03



Fonte: Autor

Em relação ao modelo Composto, também se observou um comportamento satisfatório em relação ao este modelo, mostrando que assim como na mistura M02 o comportamento do material está sob influência das tensões confinantes e das tensões desvio. Ao observar a Figura 24 é possível visualizar o comportamento apresentado conforme o MR aumenta enquanto as tensões crescem.

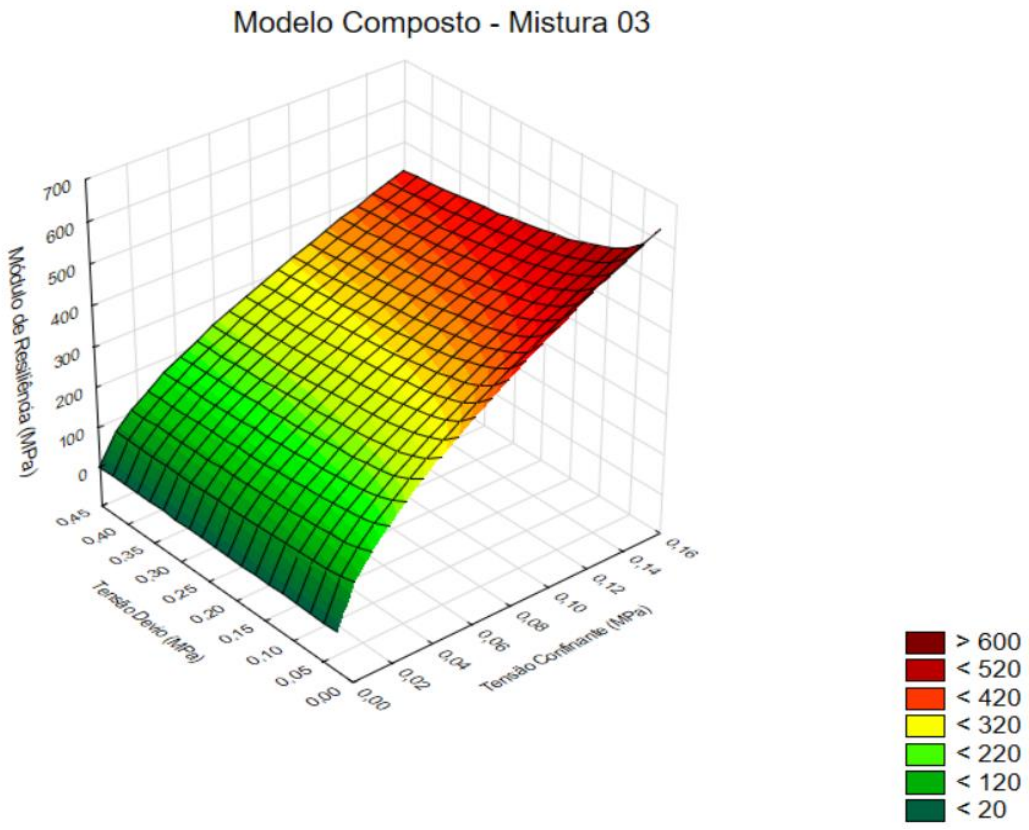
Pela importância dada ao modelo Composto devido a utilização no sistema do software de dimensionamento, criado para o novo método de dimensionamento no país, MeDiNa, a Tabela 19 apresenta o valores de MR modelados, ou seja, valores alcançados por meio da equação do modelo Composto, que se mostrou ser um dos métodos com melhor correlação quanto as misturas de solo agregado estudadas.

Tabela 19 – Valores de MR da M03 modelados

σ_3 (Mpa)	σ_d (Mpa)	MR (MPa)
0,020	0,020	181,10
	0,040	165,49
	0,060	157,00
0,035	0,035	236,90
	0,070	216,49
	0,105	205,37
0,050	0,050	281,14
	0,100	256,91
	0,150	243,72
0,070	0,070	330,42
	0,140	301,95
	0,210	286,44
0,105	0,105	401,41
	0,210	366,82
	0,315	347,99
0,140	0,140	460,85
	0,280	421,14
	0,420	399,52

Fonte: Autor

Figura 24 – Modelo de Composto M03



Fonte: Autor

4.3.3 Comparação dos resultados entre M01, M02 e M03

Com relação a comparação feita entre as misturas relatadas nessa pesquisa e a mistura proposta por Mello (2019), este item tem por objetivo avaliar as variações de comportamento que foram verificadas entre as misturas de SLAD M01, M02 e M03.

Os resultados de Mello (2019) para uma mistura de 30% solo laterítico e 70% agregado descontínuo apresentaram um melhor comportamento em relação a módulos de resiliência, o que se deve talvez a um melhor acomodamento das partículas de tamanhos diferentes dentro da mistura, sendo que o solo laterítico por ser um solo de granulometria fina, pode proporcionar um preenchimento dos vazios entre os diferentes tamanhos de agregado.

Os valores de MR, das amostras 1 e 2 na umidade ótima, apresentados por Mello (2019) estão evidenciados na Tabela 20.

Tabela 20 – Valores de MR de Mello (2019)

σ_3 (Mpa)	σ_d (Mpa)	MR (MPa)	
		AM01	AM02
0,020	0,020	214,967	263,245
	0,040	201,273	248,467
	0,060	195,914	238,572
0,035	0,035	216,681	294,276
	0,070	232,198	272,834
	0,105	235,874	264,754
0,050	0,050	273,276	345,005
	0,100	288,247	316,390
	0,150	288,348	298,514
0,070	0,070	355,66	382,557
	0,140	351,841	476,617
	0,210	333,739	345,987
0,105	0,105	521,408	484,626
	0,210	440,353	444,918
	0,315	406,581	428,836
0,140	0,140	627,518	637,31
	0,280	490,39	535,356
	0,420	429,701	479,359

Fonte: Adaptada Mello (2019)

Por meio desta tabela é possível verificar que o melhor comportamento em relação a resiliência foi observado para a mistura M01 seguido da mistura M02, que apresenta um proporção menor de solo laterítico, e por conseguinte maior de agregado.

Com isso, pode-se verificar que a mistura proposta por Nogami e Villibor como possuidora do melhor desemprenho (30% solo e 70% brita) nesta analise apresenta veracidade.

Ao analisar este resultados pode-se também indagar se com a variação do agregado 3/8'' em proporções iguais a variação do agregado 3/4'', realizadas para as misturas M02 e M03 também não apresentariam um comportamento melhor, já que o acomodamento proporcionada poderia ser maior. Possivelmente o aumento unicamente do agregado de maior dimensão possa proporcionar a mistura uma compactação menos homogênea.

Outro quesito, não verificado nesta pesquisa, é que a quebra dos agregados de maior tamanho durante a compactação pode, também, ter causado uma interferência na análise, aumentando a proporção de agregados de menor dimensão ainda mais.

Foi observado ainda que a correlações apresentadas por Mello (2019) tiveram valores de R^2 de aproximadamente 0,96 para os modelos de Biarez e Composto, enquanto na M02 foram obtidos valores satisfatórios e na mistura M03 os valores apresentam uma correlação com valores bem inferiores. Ou seja, a mistura com a maior porcentagem de solo na composição apresentou um comportamento inesperado não verificando previsão pelos modelos.

Além disso, foi realizada uma comparação entre os valores de módulo apresentados pelo solo natural, obtidos por Pascoal (2020). A Tabela 21 apresenta os valores de MR obtidos no ensaio triaxial do solo laterítico CA, compactado na energia modificada que foi utilizado na composição das misturas aqui estudadas.

DNIT 134/2018 apresenta uma variação do ensaio triaxial para solos de subleitos, que possui um quantidade inferior de pares de tensões a serem aplicados, tanto para o condicionamento quanto para a determinação do módulo, assim terminando o ensaio em um período menor.

Tabela 21 – Valores de MR solo CA EM

σ_3 (Mpa)	σ_d (Mpa)	θ	MR (MPa)		
			AM 01	AM 02	AM 03
0,020	0,020	0,0080	188,76	191,03	195,84
	0,040	0,040	190,96	193,10	195,72
	0,060	0,060	195,19	197,59	202,58
0,035	0,035	0,140	207,97	209,42	208,12
	0,070	0,070	224,26	233,03	225,87
	0,105	0,105	243,52	243,94	246,89
0,050	0,050	0,200	260,82	279,46	256,33
	0,100	0,100	277,02	280,16	279,96
	0,150	0,150	275,99	263,20	265,61
0,070	0,070	0,280	305,46	311,78	308,92
	0,140	0,140	300,18	303,88	297,74
	0,210	0,210	287,28	270,59	264,36

Fonte: Adaptada Pascoal (2020)

Ao realizar um comparativo com o MR das misturas apresentadas, pode-se observar que os valores de módulo do solo natural apresentam-se inferiores aos obtidos no ensaio das misturas, como já esperado. Assim, é verificado que a inserção do agregado no corpo de prova juntamente com o solo aumenta os valores de módulo de resiliência.

4.4 ANÁLISE DA ESTRUTURA E ORÇAMENTO

A partir da análise dos resultados dos ensaios triaxiais, foi realizado o dimensionamento de estruturas de pavimento pelo *software* MeDiNa. Foram utilizados três carregamentos de tráfego diferentes, compondo um tráfego leve, médio e alto. As duas misturas estudadas foram incluídas nas análises, para que assim fosse possível verificar o desempenho frente ao tráfego em relação à uma estrutura comum com sub-base de macadame seco, material utilizado no sul do Brasil.

4.4.1 Materiais aplicados

As nove estruturas propostas são compostas de uma camada de revestimento, base, sub-base e subleito. Para que se apresentasse com mais facilidade, estas foram denominadas E1, E2, E3, E4, E5, E6, E7, E8 e E9. Para cada carregamento de tráfego foram dimensionadas três estruturas, sendo aplicada uma variação no material que compõe a sub-base do pavimento, utilizando um material mais comumente utilizado, como macadame seco, e para as outras duas estruturas as duas misturas estudadas.

Os materiais de base e subleito não foram variados, sendo a camada de fundação composta pelo solo estudado por Pascoal (2020), compactado na energia normal, como base um material originário do *default* do *software.* Para que a estrutura suportasse um tráfego alto, foi necessário a introdução de um revestimento modificado nas ultimas três estruturas avaliadas. Os parâmetros e propriedades de cada material utilizado como camada de revestimento, base e subleito estão evidenciados nas Tabelas 22 a 24. Os valores de resultados apresentados para as misturas M02 e M03 foram inseridos no *software*, criando um material com propriedades resilientes não lineares.

Tabela 22 – Materiais de revestimento das estruturas

Material	Propriedades	Modelos
CA-Classe 1	Tipo de CAP = Convencional Massa especifica (g/cm³) = 2,4 Norma ou Especificação = DNIT ES 31 Comentários = Este material deve ser obtido em laboratório antes da obra e os resultados requerem uma nova análise no MeDiNa.	Ensaio de fadiga -Modelo: **k1 .(et ^ k2)** -Coeficiente de Regressão (k1): **≥ 5,496e-11** -Coeficiente de Regressão (k2): **≥ -3,253** -Classe de Fadiga: **≥ 1** -FFM (100µ a 250µ): **≥ 0,84** Flow Number Mínimo - Condição de Tráfego Normal: **≥ 104** ciclos - Condição de Tráfego Severa: **≥ 300** ciclos
CA-Classe 4	Tipo de CAP = Modificado Massa especifica (g/cm³) = 2,4 Norma ou Especificação = DNIT ES 31 Comentários = Este material deve ser obtido em laboratório antes da obra e os resultados requerem uma nova análise no MeDiNa.	Ensaio de fadiga -Modelo: **k1 .(et ^ k2)** -Coeficiente de Regressão (k1): **≥ 1,91e-5** -Coeficiente de Regressão (k2): **≥ -1,9** -Classe de Fadiga: **≥ 4** -FFM (100µ a 250µ): **≥ 1,00** Flow Number Mínimo - Condição de Tráfego Normal: **≥ 283** ciclos - Condição de Tráfego Severa: **≥ 766** ciclos

Fonte: Autor

Tabela 23 – Materiais de base e sub-base das estruturas

Material	Propriedades	Modelos
Brita Graduada - Gnaisse C5	Descrição do Material = Brita Graduada Massa especifica (g/cm³) = 2,223 Umidade Ótima (%) = 5,0 Energia de Compactação = Modificada Abrasão Los Angeles (%) = 43,0 Norma ou Especificação = DNIT ES 141	Ensaio de Deformação Permanente Modelo: ep = psi1.(s3^psi2).(sd ^psi3).(N^psi4) Coeficiente de Regressão (k1 ou psi1): 0,0868 Coeficiente de Regressão (k2 ou psi2): -0,2801 Coeficiente de Regressão (k3 ou psi3): 0,8929 Coeficiente de Regressão (k4 ou psi4): 0,0961
Brita Graduada - Gnaisse C2	Descrição do Material = Brita Graduada Massa especifica (g/cm³) = 2,228 Umidade Ótima (%) = 4,9 Energia de Compactação = Modificada Abrasão Los Angeles (%) = 41,0 Norma ou Especificação = DNIT ES 141	Ensaio de Deformação Permanente Modelo: ep = psi1.(s3^psi2).(sd ^psi3).(N^psi4) Coeficiente de Regressão (k1 ou psi1): 0,0968 Coeficiente de Regressão (k2 ou psi2): -0,1685 Coeficiente de Regressão (k3 ou psi3): 0,7326 Coeficiente de Regressão (k4 ou psi4): 0,0863

Fonte: Autor

Tabela 24 – Material de subleito

Material	Propriedades	Modelos
Subleito – CA-EN	Descrição do Material =Cruz Alta Grupo MCT = LG' MCT - coeficiente c' = 2,35 MCT - Índice e' = 0,69 Massa especifica (g/cm³) = 1,55 Umidade Ótima (%) = 28,9 Energia de Compactação = Normal Norma ou Especificação = DNIT ES 137	Ensaio de Deformação Permanente Modelo: ep = psi1.(s3^psi2).(sd ^psi3).(N^psi4) Coeficiente de Regressão (k1 ou psi1): 0,0895 Coeficiente de Regressão (k2 ou psi2): 0,2249 Coeficiente de Regressão (k3 ou psi3): 2,1607 Coeficiente de Regressão (k4 ou psi4): 0,0951

Fonte: Autor

4.4.2 Estruturas analisadas

As estruturas propostas foram idealizadas para a verificação do comportamento das misturas comparado ao comportamento de um pavimento típico, utilizando macadame como sub-base. As estruturas de um a nove tem sua composição apresentada na Tabela 25. Os resultados de MR do modelo Composto, apresentados para as misturas M02 e M03, foram inseridos no *software*, criando um material com propriedades resilientes não lineares.

Tabela 25 – Estruturas estudadas

Estrutura	Tráfego	Revestimento	Base	Sub-base	Subleito
E1	$1x10^6$	Classe 1	BG - Gnaisse C5	BG - Gnaisse C2	Solo CA - EN
E2				M02	
E3				M03	
E4	$5x10^6$	Classe 1		BG - Gnaisse C2	
E5				M02	
E6				M03	
E7	$1x10^7$	Classe 4		BG - Gnaisse C2	
E8				M02	
E9				M03	

Fonte: Autor

As alterações aplicadas no revestimento foram necessárias mediante ao tráfego escolhido como atuante para as estruturas de sete a nove, assim sendo possível avaliar estas igualmente, verificando quase que apenas as diferenças de comportamento apresentadas pela modificação da sub-base.

O desempenho da estrutura foi analisado em relação a ATR e área trincada referentes ao 1º, 2º, 5º e 10º ano, verificando o comportamento nos primeiros anos, sendo este o mais crítico, e o atendimento dos critérios de dimensionamento no último ano.

Os dimensionamentos foram realizados considerando um tipo de via de sistema arterial principal, que pelo software apresenta uma confiabilidade de 95% para o dimensionamento, que tem como critério de para uma área trincada de 30% e um ATR de 5,0 mm. Além disso, o período de projeto considerado foi de 10 anos para as nove estruturas.

As estruturas analisadas para um carregamento leve tem seus resultados apresentados na Figura 25.

Figura 25 – Análise E1 a E3

Estrutura	Tipo	e (cm)	1º ano			2º ano			5º ano			10º ano		
			Neq	ATR (mm)	A trincada (%)	Neq	ATR (mm)	A trincada (%)	Neq	ATR (mm)	A trincada (%)	Neq	ATR (mm)	A trincada (%)
E1	Classe 1	5	1,00E+05	3,82	3,14	2,00E+05	4,08	4,15	5,00E+05	4,44	6,47	1,00E+06	4,74	10,10
	Brita graduada - C5	15												
	Brita graduada - C2	15												
	CA EN - Pascoal	-												
E2	Classe 1	7,5	1,00E+05	4,12	2,99	2,00E+05	4,35	3,93	5,00E+05	4,67	6,03	1,00E+06	4,94	9,19
	Brita graduada - C5	15												
	Mistura 02	15												
	CA EN - Pascoal	-												
E3	Classe 1	7,5	1,00E+05	4,14	2,98	2,00E+05	4,38	3,92	5,00E+05	4,7	6,01	1,00E+06	4,97	9,15
	Brita graduada - C5	15												
	Mistura 03	15												
	CA EN - Pascoal	-												

Fonte: Autor

Por meio desta análise pode-se verificar que as estruturas possuem uma variação muito pequena em relação a espessuras de camadas, sendo a E1 composta por BG – C5, que possui menor espessura de revestimento, apresentou resultados menores durante todo o período de análise. Porém, as duas misturas ainda mostram resultados satisfatórios para utilização em camadas estruturais, suportando o tráfego durante toda a vida de serviço.

A segunda simulação foi realizada com um tráfego superior, o que acarretou no aumento da espessura das camadas, tanto de revestimento quanto camadas de base e sub-base. Nesta análise, foi possível verificar que com o aumento do tráfego ainda

se mostrou viável a utilização das misturas como camadas de base e sub-base, pois a diferença ficou apenas em 0,6 cm de espessura de revestimento, como está apresentado na Figura 26.

Figura 26 – Análise E4 a E6

Estrutura	Tipo	e (cm)	1º ano			2º ano			5º ano			10º ano		
			Neq	ATR (mm)	A trincada (%)	Neq	ATR (mm)	A trincada (%)	Neq	ATR (mm)	A trincada (%)	Neq	ATR (mm)	A trincada (%)
E4	Classe 1	10,4	5,00E+05	3,45	4,87	1,00E+06	3,67	6,98	2,50E+06	4	13,61	5,00E+06	4,26	29,5
	Brita graduada - C5	20												
	Brita graduada - C2	20												
	CA EN - Pascoal	-												
E5	Classe 1	11	5,00E+05	3,6	4,89	1,00E+06	3,8	7,01	2,50E+06	4,09	13,7	5,00E+06	4,33	29,78
	Brita graduada - C5	20												
	Mistura 02	20												
	CA EN - Pascoal	-												
E6	Classe 1	11	5,00E+06	3,66	4,86	1,00E+06	3,87	6,96	2,50E+06	4,17	13,55	5,00E+06	4,41	29,33
	Brita graduada - C5	20												
	Mistura 03	20												
	CA EN - Pascoal	-												

Fonte: Autor

Nas últimas três estruturas, para que houvesse um análise perante os critérios estabelecidos foi indispensável a modificação do revestimento convencional classe 1 para um modificado, classe 4. E corroborando com o fato verificado nas 6 primeiras estruturas, as misturas tiveram um desempenho adequado e similar à estrutura típica. A Figura 27 apresenta o resultado das análises.

Figura 27 – Análise E7 a E9

Estrutura	Tipo	e (cm)	1º ano			2º ano			5º ano			10º ano		
			Neq	ATR (mm)	A trincada (%)	Neq	ATR (mm)	A trincada (%)	Neq	ATR (mm)	A trincada (%)	Neq	ATR (mm)	A trincada (%)
E7	Classe 4	10,4	1,00E+06	3,09	4,89	2,00E+06	3,3	7,02	5,00E+06	3,59	13,83	1,00E+07	3,83	29,86
	Brita graduada - C5	20												
	Brita graduada - C2	20												
	CA EN - Pascoal	-												
E8	Classe 4	11	1,00E+06	2,98	4,89	2,00E+06	3,15	7,01	5,00E+06	3,39	13,71	1,00E+07	3,59	29,8
	Brita graduada - C5	20												
	Mistura 02	20												
	CA EN - Pascoal	-												
E9	Classe 4	11	1,00E+06	3,05	4,87	2,00E+06	3,23	6,98	5,00E+06	3,47	13,61	1,00E+07	3,68	29,49
	Brita graduada - C5	20												
	Mistura 03	20												
	CA EN - Pascoal	-												

Fonte: Autor

4.4.3 Orçamento

A partir das estruturas analisadas com espessuras definidas, foi verificado o montante representativo necessário para construir 1 quilometro de uma rodovia, com geometria de 7,2 m de pista mais o acostamento. Os valores foram calculados considerando exclusivamente custos direto, sem estimar custos de Benefícios e Despesas Indiretas (BDI) ou canteiro do obras.

A planilha foi montada com base no Sistema de Custos Referenciais de Obra (SICRO) de outubro de 2018, do DNIT, e valores de revestimento asfáltico retirados da Associação Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP).

Foram feitas algumas adaptações para possibilitar o orçamento de solo-brita na planilha, sendo necessário avaliar uma camadas formada inteiramente de solo e outra inteiramente de brita, respeitando os valores de proporção discutidos para cada mistura. O valor, apresentado como orçamento na Tabela 26, é apenas uma estimativa de custos.

Tabela 26 – Orçamento das estruturas

Estrutura	Material da Sub-base	Orçamento
E1	MS	R$ 1.146.337,93
E2	M02	R$ 1.315.316,80
E3	M03	R$ 1.296.986,40
E4	MS	R$ 1.771.376,85
E5	M02	R$ 1.760.023,86
E6	M03	R$ 1.735.583,37
E7	MS	R$ 1.914.702,89
E8	M02	R$ 1.913.647,76
E9	M03	R$ 1.889.207,27

Fonte: Autor

Como a estimativa apresenta, a mistura M03 foi mais barata em todas as análises, isso se deu pelo fato desta ter uma porcentagem maior de solo na composição, que apresenta um valor estimativo menor.

A partir desta análise é possível visualizar que os custos referentes às estruturas compostas com misturas só se tornam mais viáveis quando se apresenta um tráfego mais intenso, sendo que para tráfegos leves, como o primeiro, esta solução se torna mais onerosa. Os melhores resultados foram apresentados em estruturas com um carregamento médio.

Porém, quando se fala em ações mais intensas pode-se verificar o diminuição do custo em relação a estrutura típica, que apesar de se apresentar como uma redução pequena, mostra a viabilidade da utilização de misturas.

Isto se mostra interessante, em locais onde existem problemas com a distância de transporte para receber material britado em obra, sendo que quando se utiliza uma mistura, o momento de transporte é diminuído e assim o custo de carregamento também.

5 CONCLUSÃO

Este estudo buscou verificar o comportamento resiliente de duas misturas de solo laterítico e agregado descontínuo em relação a variação da proporção dos componentes que formam a mistura. Nesta pesquisa, foi utilizada a variação do agregado 3/4'' e do solo laterítico. Ainda comparou-se os valores alcançados durante o estudo com os resultados do estudo de Mello (2019).

O objetivo principal foi observar como o comportamento resiliente se modifica em misturas que apresentam mais solo ou mais agregado, ou seja, diferentes proporções de mistura. Foram realizados estudos em relação as misturas de SLAD denominadas M02 e M03 que apresentam com 25% e 35% de solo laterítico e 75% e 65% de agregado descontínuo, respectivamente, enquanto na pesquisa de Mello (2019) foi utilizada uma mistura de 30% solo laterítico e 70% agregado descontínuo.

O solo utilizado na pesquisa, pelas classificações tradicionais (SUCS e TRB) apresentou-se como inadequado para utilização rodoviária, pelo fato destas não representarem as peculiaridades dos solos tropicais encontrados no Brasil. Sendo assim, foi utilizada para a classificação do solo a metodologia MCT, onde o solo foi classificado como laterítico de comportamento argiloso, que apresenta propriedades boas quando compactado sendo buscado para a aplicação em pavimentos.

Além disso, durante a realização deste trabalho foram apresentadas as características de materiais que possuem resultados apresentados em pesquisas anteriores, como o agregado que foi utilizado para compor as misturas pesquisadas. O agregado, proveniente da Pedreira São Juvenal, caracterizado por Back (2018) apresentou todas as suas propriedades dentro dos parâmetros regulamentados para utilização.

Em relação à utilização destes dois materiais juntos, atualmente já se tem consolidado o fato que estes apresentam um bom desempenho para utilização em camadas estruturais de pavimentos e que, desde que bem dosada, esta mistura representa uma economia grande em relação a constituição das camadas com alguns materiais utilizados em sua totalidade.

Durante este estudo, as misturas formadas por SLAD apresentaram um desempenho satisfatório em relação ao comportamento resiliente, o qual foi a proposta da pesquisa desde o início. O comportamente resiliente foi estudado

unicamente no teor de umidade ótima, obtido por meio da curva compactação da mistura.

Perceberam-se algumas dificuldades durante os ensaios realizados com as misturas em relação a homogeneização desta quando umedecida, já que ainda não há uma normatização que regulamente o processo em si. Além disso, pode-se perceber por meio da verificação da umidade pós ensaio que esta se modifica rapidamente.

Em relação a quebra dos agregados durante a compactação, não foram realizados ensaios para verificar este acontecimento, porém foi observado durante a experimentação que este fato realmente possui relevância a medida que durante a compactação alguns finos de agregado aparecem na mistura, sinalizando a quebra do material pétreo.

Tornou-se possível obter por meio de ensaios triaxiais obter os valores de MR em relação a cada mistura, verificando o comportamento de tensão x deformação de um corpo de prova isolado. Assim, os objetivos foram alcançados ao passo que pode-se realizar uma análise em relação ao comportamento. Ficou evidente que o comportamento da mistura M02 foi mais estável, apresentando valores mais similares entre os ensaios e este também apresentou um resultado moderadamente superior às amostras da mistura M03 que foram ensaiadas.

As análises e correlações a respeito do módulo de resiliência com base nos modelos matemáticos de previsão se mostraram satisfatórios. Quando observada cada mistura, pode-se concluir que a mistura M02 apresentou um modelo de comportamento bem similar aos propostos pelo modelo de Biarez e modelo Composto, ambos apresentando R^2 0,941 evidenciando uma correlação adequada. Já para a mistura M03, que apresenta mais solo laterítico em sua composição, os modelos utilizados na pesquisa não se mostraram tão adequados em relação a previsão do comportamento esperado para a mistura.

Além disso, por meio dos valores relativos a MR e correlações obteve-se uma comparação entre os materiais das misturas M01, M02 e M03, onde foi possível observar que o comportamento apresentado pela amostra M01, proposta por Mello (2019) foi mais satisfatório do que os demais, verificando que possivelmente exista uma proporção ideal, em relação a comportamento, de mistura de SLAD.

Por meio da análise mecanicista foi possível observar o quanto o desempenho das misturas M02 e M03 se mostram satisfatórios, apresentando comportamento

muito semelhante a estrutura típica dimensionada para cada valor de carregamento utilizado. Ainda, com o orçamento verificou-se que as misturas de solo brita são viáveis economicamente, em relação ao pavimento típico utilizado, a partir de um nível de tráfego médio, ou quando a distância de transporte de agregados é demasiadamente grande, o que diminui de transporte causando diminuição de custo de fatores indiretos.

Além disso, foi observado que a mistura M03 apresentou custos menores em relação as outras por apresentar uma parcela maior de solo na sua composição, que é um material mais barato.

Pelos fatores aqui citados é possível verificar que os objetivos estabelecidos no início da pesquisa foram alcançados. Porém, tendo em mente os resultados atingidos e observações realizados, sugere-se alguns pontos para a elaboração de novas pesquisas sobre o tema:

- Verificar por meio de granulometria a variação da quebra dos agregados em relação a misturas de composição diferente em relação ao tamanho dos agregados;
- Estudar parâmetros de deformação permanente em relação a misturas com composição variada e utilização de solos com comportamento diferente;
- Estudar as misturas solo-agregado em diferentes energias de compactação verificando o efeito da variação de índice de vazios apresentado;
- Construção de um trecho experimental para observar se o comportamento em campo é similar ao observado em laboratório.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS **NBR 6457:** Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS **NBR 6459:** Solo - Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS **NBR 7180:** Solo – Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS **NBR 7181:** Solo - Análise granulométrica. Rio de Janeiro, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS **NBR 7182:** Solo – Ensaio de compactação. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS **NBR 7809:** Agregado graúdo – Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro. Rio de Janeiro, 2008.

BACK, A. H. **Avaliação das propriedades químicas e geomecânicas de agregados oriundos de jazidas de rochas de diferentes litologias do estado do RS.** 2018. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2018.

BALBO, J. T. **Pavimentação asfáltica: materiais, projeto e restauração.** São Paulo: Ed. Oficina de texto, 2007.

BERNUCCI, et al. **Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros.** Rio de Janeiro: Ed. Abeda, 2010.

BEZERRA NETO, R. S. **Análise comparativa de pavimentos dimensionados através dos métodos empírico do DNER e mecanístico e proposta de um catálogo simplificado de pavimentos para a região de Campo Grande (MS)**. 2004. Dissertação de Mestrado - Escola de Engenharia de São Carlos, São Paulo, SP, 2004.

BIRKLAND, P. W. **Pedology, weathering, and geomorphological research.** New York: Pub. Oxford University Press.,1974.

CARVALHO, C. A. B. **Estudo de contribuição das deformações permanentes de solo na formação das trilhas de roda num pavimento flexível.** 1997. Tese de Doutorado – Escola de Engenharia de São Carlos, São Paulo, SP, 1997.

COUTINHO, J. C. P. C. **Dimensionamento de pavimento asfáltico:** Comparação do método do DNER com um método mecanístico-empírico aplicada a um trecho. 2011. Dissertação de Mestrado – Universidade de Ouro Preto, Ouro Preto, MG, 2011.

COUTO, J. B. **Estudo de Misturas de Solo-Agregado em Bases e Sub-Bases Rodoviárias do Rio Grande do Sul***:* Caracterização de Laboratório e Execução de Trecho Experimental. 2009. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2009.

DEPARTAMENTO AUTÔNOMO DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DAER – EL 108/01:** Determinação do índice de lamelaridade. Rio Grande do Sul, Porto Alegre 1991.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **Método de projeto de pavimentos flexíveis.** DNER, Rio de Janeiro, 1981.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER – ME 035:** Agregados – Determinação da abrasão “Los Angeles”. Rio de Janeiro, 1998.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER – ME 054:** Equivalente de areia. Rio de Janeiro, 1997.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER – ME 083:** Agregados – Análise granulométrica. Rio de Janeiro, 1998.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER – ME 086:** Agregados - Determinação do índice de forma. Rio de Janeiro, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER – ME 152:** Agregado em estado solto - Determinação da massa unitária. Rio de Janeiro, 1995.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER – ME 195:** Agregados – Determinação da absorção e da massa específica de agregado graúdo. Rio de Janeiro, 1997.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER ME – 256:** Solos compactados com equipamento miniatura – determinação da perda de massa por imersão. Rio de Janeiro, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER ME – 258:** Solos compactados com equipamento miniatura – Mini-MCV. Rio de Janeiro, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER CLA – 259:** Classificação de solos tropicais para finalidades rodoviárias utilizando corpos-de prova compactados em equipamento miniatura. Rio de Janeiro, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA E TRANSPORTES. **Manual de pavimentação**. DNIT, Rio de Janeiro, 2006.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA E TRANSPORTES. **DNIT ME 134:** Pavimentação - Solos - Determinação do módulo de resiliência -Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2010.

FRANCO, F. A. C. P. **Método de dimensionamento mecanístico empírico de pavimentos asfálticos – SisPav.** 2007. Tese de doutorado - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2007.

HICKS, R. G. **Factors influencing the resilient properties of granular materials.** 1970. PhD Dissertation - University of California, Berkeley, CA, 1970.

HUANG, Y. H. **Pavement Analysis and Design.** New Jersey: Pub. Pearson Education Inc., 2004.

MELLO, L. B. **Estudo do módulo de resiliência de mistura de latossolo argiloso e brita para emprego em bases de pavimentos flexíveis.** 2019. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí, RS, 2019.

SANTOS, T. A. **Avaliação da resistência e da deformabilidade de quatro solos empregados em subleitos rodoviários no estado do Rio Grande do Sul.** 2006. Dissertação de mestrado - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2006.

PINTO, S. **Estudo do comportamento à fadiga de misturas betuminosas e aplicação na avaliação estrutural de pavimentos.** 1991. Tese de Doutorado - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 1991.

PETROBRAS (2010) *Rede temática de asfalto – Manual de execução de trechos monitorados*. Petróleo Brasileiro AS. Rio de Janeiro.

MACÊDO, J. A. G. **Interpretação de ensaios deflectométricos para avaliação estrutural de pavimentos flexíveis:** A Experiência com FWD no Brasil. 1996. Tese de Doutorado – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 1996.

MEDINA, J., MOTTA, L. M. G., **Mecânica dos Pavimentos**. Rio de Janeiro: Ed. UFRJ, 2015.

MEDINA, J., PREUSSLER, E. S. **Características resilientes de solos em estudos de pavimentos.** Solos e Rochas. Associação Brasileira de Mecânica dos Solos, Rio de Janeiro, RJ. vol 3, n 1, p. 3-26, 1980.

MOTTA. L. M. G. **Método de dimensionamento de pavimentos flexíveis***:* Critério de Confiabilidade e Ensaios de Cargas Repetidas. 1991. Tese de Doutorado – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 1991.

NOGAMI, J. S.; VILLIBOR, D.F. **Uma nova classificação de solos para finalidades rodoviárias.** 1981. Simpósio brasileiro de solos tropicais em engenharia. Rio de Janeiro.

NOGAMI, J. S.; VILLIBOR, D.F. **Os solos tropicais lateríticos e saprolíticos e a pavimentação.** 1983. 18ª Reunião anual de pavimentação. Porto Alegre, RS.

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

PASCOAL, P. T. **Avaliação do comportamento resiliente e deformação permanente do solo empregado no pavimento rodoviário da RS 342.** 2020. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2020. (A publicar)

PINTO, C. S. **Curso básico de mecânica dos solos.** 3. ed. São Paulo: Ed. Oficina de Textos, 2006.

SILVEIRA, J., 2000, **Metodologia para projeto de pavimentos flexíveis em vias urbanas da região metropolitana de Porto Alegre.** 2000. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2000.

SENÇO, W. **Manual de técnicas de pavimentação**. São Paulo: Ed. Pini LTDA., 2001.

SVENSON, M., 1980**, Ensaios triaxiais dinâmicos de solos argilosos.** 1980. Tese de Mestrado – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 1980.

VILLIBOR, D. F.; NOGAMI, J. S. **Pavimentos econômicos:** tecnologia do uso dos solos finos lateríticos. São Paulo: Ed. Arte & Ciência, 2009.

YODER, E. J., WITCZAK, M. W. **Principles of pavements design**. New York: Pub. Wiley, 1975.