



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**

**CAMPUS RUSSAS**

**CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

**THAYSSA VIEIRA DE LIMA**

**ESTUDO COMPARATIVO ENTRE O COMPORTAMENTO MECÂNICO DE  
MISTURAS SOLO-BRITA COM CALCÁRIO E GRANITO PARA USO EM  
PAVIMENTAÇÃO**

**RUSSAS**

**2019**

THAYSSA VIEIRA DE LIMA

ESTUDO COMPARATIVO ENTRE O COMPORTAMENTO MECÂNICO DE  
MISTURAS SOLO-BRITA COM CALCÁRIO E GRANITO PARA USO EM  
PAVIMENTAÇÃO

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Civil do Campus Russas da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientadora: Prof<sup>ª</sup>. Msc. Camila Lima Maia.

RUSSAS

2019

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Biblioteca Universitária  
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

- L711e Lima, Thayssa Vieira de.  
Estudo comparativo entre o comportamento mecânico de misturas solo-brita com calcário e granito para uso em pavimentação / Thayssa Vieira de Lima. – 2019.  
90 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Campus de Russas, Curso de Curso de Engenharia Civil, Russas, 2019.  
Orientação: Profa. Ma. Camila Lima Maia.
1. Estabilização Granulométrica. 2. Comportamento Mecânico. 3. Brita Calcária. 4. Pavimentação. I. Título.

CDD 620

---

THAYSSA VIEIRA DE LIMA

ESTUDO COMPARATIVO ENTRE O COMPORTAMENTO MECÂNICO DE  
MISTURAS SOLO-BRITA COM CALCÁRIO E GRANITO PARA USO EM  
PAVIMENTAÇÃO

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Civil do Campus Russas da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Aprovada em: \_\_\_\_/\_\_\_\_/\_\_\_\_\_

BANCA EXAMINADORA

---

Prof<sup>a</sup>. Msc. Camila Lima Maia (Orientadora)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. Esequiel Fernandes Teixeira Mesquita  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof<sup>a</sup>. Msc. Dianne Fernandes Diógenes  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Dedico este trabalho a Deus por todo conforto e fortaleza espiritual;

Aos meus pais, Eliane e Vieira, por todo incentivo, apoio, inspiração, conforto e ensinamento;

Ao meu irmão, Hallyson, por toda oração e palavra de apoio;

Aos meus avós, José e Socorro (*in memorian*), por sempre me apoiar e torcer por mim.

## AGRADECIMENTOS

Deixo aqui meus sinceros agradecimentos, em primeiro lugar, à Deus, pelas bênçãos derramadas sobre mim ao longo de toda a jornada e por toda força que me foi dada e confiada para superar todos os desafios.

À minha família: Eliane, Vieira, Hallyson e José Aldemir, além de todos os parentes que têm grandes lutas diárias, me servindo como exemplo dia após dia, pessoas guerreiras que me ensinaram o poder de manter a motivação perante os obstáculos e que me incentivaram e dedicaram a mim toda a sua confiança. Em especial, sou grata à minha avó, Socorro, que foi exemplo de esperança, tendo que nos deixar, infelizmente, durante o percurso, deixando, no entanto, a certeza de que hoje intercede por mim junto ao Pai.

Aos meus amigos de jornada e de infância, os quais os nomes não cabem aqui, por todos esses anos de amizade incondicional, cooperativismo constante e por tanto apoio, a mim oferecido, nesse final de caminhada.

Ao meu namorado, Ronildo, por todo o companheirismo e por não me deixar desanimar, sendo meu ombro amigo nos momentos difíceis, sempre acreditando em mim quando nem mesmo eu acreditei e por ficar feliz até por minhas menores conquistas.

À minha orientadora, Profa. Camila Lima, por toda a dedicação e atenção para comigo, tendo abdicado até mesmo de suas férias para tornar possível a concretização deste trabalho, me acompanhando do início ao fim nessa caminhada, uma verdadeira luz no fim do túnel.

Aos Professores Esequiel Mesquita e Daianne Diógenes por aceitarem fazer parte da banca avaliadora.

À equipe do Laboratório de Solos do CT Asfalto, Assis e Ricardo, por todo o suporte prestado na execução dos ensaios.

À Carbomil Química, por doar a matéria prima necessária à realização do trabalho, em especial a profissional do setor de qualidade, Geni, por toda atenção e disponibilidade em ajudar na obtenção do material.

## RESUMO

A escassez de material natural adequado para utilização em camadas do pavimento torna necessário o uso de técnicas a fim de fornecer resistência e estabilidade. Tendo em vista essa problemática, propõe-se a incorporação de agregado calcário ao solo natural da Região do Vale do Jaguaribe através da técnica de estabilização granulométrica em comparação com agregado granítico, convencionalmente utilizado em pavimentação. Os agregados oriundos de rochas calcárias além de possuírem bom desempenho mecânico, encontram-se em abundância na região sendo uma alternativa econômica e tecnicamente viável. Foram realizados ensaios normatizados a fim de caracterizar o solo coletado em Morada Nova, o agregado calcário proveniente da companhia de mineração Carbomil e o agregado granítico proveniente de pedreira da Região Metropolitana de Fortaleza. Os ensaios de Módulo de Resiliência (MR) e Deformação Permanente (DP) foram realizados com as misturas solo-brita calcária e solo-brita granítica, com composição de 50% de cada material, a fim de verificar a resistência mecânica dos materiais. Os resultados comprovam que o material estabilizado com agregado calcário é tecnicamente satisfatório para uso em camadas de base de pavimentos flexíveis, apresentando menores deformações permanentes e maiores valores de módulo de resiliência se comparado a brita granítica.

**Palavras-chave:** Estabilização Granulométrica. Comportamento Mecânico. Brita Calcária. Pavimentação.

## **ABSTRACT**

The scarcity of adequate natural material the layered use of the pavement makes it necessary to use techniques in order to provide resistance and stability to the material. In view of this problem, it is proposed the incorporation of limestone aggregate into the natural soil of the Jaguaribe Valley Region through the granulometric stabilization technique compared to granite aggregate, conventionally used in paving. Households from limestone rocks besides having good mechanical performance are in abundance in the region being an economical and technically viable alternative. Standardized tests were carried out to characterize the soil collected in Morada Nova, the limestone aggregate from the mining company Carbomil and the granite aggregate from the quarry of the Metropolitan Region of Fortaleza. Mr and PD assays were performed with calcitary soil-gravel and granitic gravel mixtures, with composition of 50% of each material, in order to verify the mechanical strength of the materials. The results prove that the material stabilized with limestone aggregate is technically satisfactory for use in flexible floor base layers, presenting lower Permanent Deformations and higher resilience module values when compared to granitic gravel.

**Keywords:** Granulometric Stabilization. Mechanical Behavior. Limestone Gravel. Paving.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Estrutura do pavimento. ....	18
Figura 2 - Tipos de pavimento.....	22
Figura 3 - Classificação de Solos AASHTO. ....	26
Figura 4 - Mapa geológico do Ceará. ....	31
Figura 5 - Fluxograma metodológico. ....	35
Figura 6 - Localização da Companhia de Mineração Carbomil em relação ao <i>campus</i> de Russas. .....	36
Figura 7 - Montante selecionado. ....	37
Figura 8 - Britador mecânico e produtos da britagem. ....	37
Figura 9 - Repartidor de amostra.....	38
Figura 10 - Localização da pedreira em relação ao <i>campus</i> de Russas. ....	39
Figura 11 - Localização da jazida de Morada Nova em relação ao <i>campus</i> de Russas.....	40
Figura 12 - Forma de coleta e aspecto visual do solo coletado. ....	41
Figura 13 - Fluxograma experimental. ....	42
Figura 14 - Agitador mecânico.....	45
Figura 15 - Ensaio de absorção e densidade aparente. ....	46
Figura 16 - Aggregate Image Measurement System (AIMS2).....	47
Figura 17 - Propriedades de forma. ....	48
Figura 18 - Quantidade mínima de partículas por fração. ....	48
Figura 19 - Três dimensões de uma partícula para o cálculo da esfericidade. ....	50
Figura 20 - Ângulos de orientação dos pontos do contorno da partícula para cálculo da angularidade.....	50
Figura 21 - Valores limites de classificação (IBIAPINA, 2018).....	51
Figura 22 - Determinação da graduação do material após análise granulométrica. ....	52
Figura 23 - Equipamento utilizado para ensaio de Abrasão "Los Angeles". ....	54
Figura 24 - Uniformização manual da mistura.....	56
Figura 25 - Extração do corpo de prova no ensaio de compactação. ....	57
Figura 26 - Ensaio triaxial de carga repetida.....	58
Figura 27 - Corpos de prova do ensaio de MR.....	59
Figura 28 - Aspecto do solo após ensaios de LL e LP. ....	63
Figura 29 - Composição granulométrica da brita granítica. ....	65

Figura 30 - Composição granulométrica da brita calcária.....	65
Figura 31 - Comparativo das superfícies das curvas de MR para o caso do modelo composto. .....	73
Figura 32 - Modelos de comportamento à deformação permanente. ....	76
Figura 33 - Estruturas teóricas propostas neste trabalho. ....	79

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Curva granulométrica do solo natural.....	63
Gráfico 2 - Curvas granulométricas dos agregados graúdos. ....	66
Gráfico 3 - Curva de compactação da mistura solo-brita granítica. ....	71
Gráfico 4 - Curva de compactação da mistura solo-brita calcária.....	71
Gráfico 5 - Comparativo das deformações acumuladas totais. ....	76
Gráfico 6 - Deformação Permanente total para M1. ....	77
Gráfico 7 - Deformação Permanente total para M2. ....	78
Gráfico 8 - Comparativo dos preços das camadas das estruturas propostas. ....	82

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição das misturas. ....	41
Tabela 2 - Normas empregadas para os ensaios realizados no solo. ....	43
Tabela 3 - Normas empregadas para os ensaios realizados nos agregados graúdos. ....	44
Tabela 4 - Normas empregadas para os ensaios realizados nas misturas solo-brita.....	55
Tabela 5 - Modelos que descrevem comportamentos resilientes. ....	60
Tabela 6 - Relação dos pares de tensões utilizados no ensaio de Deformação Permanente. ...	61
Tabela 7 - Valores para LL, LP e IP.....	62
Tabela 8 - Médias e desvios-padrão dos resultados obtidos.....	68
Tabela 9 - Classificação dos agregados.....	68
Tabela 10 – Resumo dos resultados dos ensaios de compactação das misturas ensaiadas. ....	72
Tabela 11 - Resumo de valores de parâmetro de modelagem e coeficientes de correlação para as misturas. ....	73
Tabela 12 - Valores de módulo de resiliência médios.....	74
Tabela 13 - Deformação Permanente Total da mistura solo-brita granítica e suas relações de acúmulo. ....	74
Tabela 14 - Deformação Permanente Total da mistura solo-brita calcária e suas relações de acúmulo. ....	75
Tabela 15 - Custos para construção das camadas de revestimento e de base da EST1.....	81
Tabela 16 - Custos para construção das camadas de revestimento e de base da EST2.....	81
Tabela 17 - Comparativo dos preços de construção das camadas.....	82

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AASHTO	<i>American Association of State Highways and Transportation Officials</i>
AIMS2	<i>Aggregate Image Measurement System</i>
AMB	Anuário Mineral Brasileiro
ANP	Agência Nacional do Petróleo
COPPE	Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia
CP	Corpo de Prova
CV	Coefficiente de Variação
DET	Departamento de Engenharia de Transportes
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
DNPM	Departamento Nacional de Produção Mineral
DP	Deformação Permanente
IBRAM	Instituto Brasileiro de Mineração
IP	Índice de Plasticidade
LL	Limite de Liquidez
LP	Limite de Plasticidade
MCT	Miniatura, Compactado, Tropical
MR	Módulo de Resiliência
PDI	Processamento Digital de Imagens
PIB	Produto Interno Bruto
RMF	Região Metropolitana de Fortaleza
RVJ	Região do Vale do Jaguaribe

SEINFRA	Secretaria da Infraestrutura do Ceará
UFC	Universidade Federal do Ceará
UFRJ	Universidade Federal do Rio de Janeiro

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\text{CaCO}_3$	Carbonato de Cálcio
$\sigma_d$	Tensão Desvio
$\sigma_3$	Tensão Confinante
$\epsilon_r$	Deformação Resiliente
$R^2$	Coefficiente de Correlação
$N$	Número de Ciclos
$h_{ót}$	Umidade Ótima
$\gamma_{máx}$	Massa Específica Aparente Seca Máxima
$K$	Parâmetro de Modelagem
$\epsilon^1$	Deformação Permanente Total após a Primeira Carga
$\epsilon^{5000}$	Deformação Acumulada com 5.000 Ciclos
$\epsilon^{10000}$	Deformação Acumulada com 10.000 Ciclos
$\epsilon^{5000/10000}$	Percentual de Afundamento Acumulado em 50% do Ciclo de Aplicação de Carga
$\nu$	Coefficiente de Poisson
$N$	Número Equivalente de Repetições do Eixo

## SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	18
1.1 Problema .....	19
1.2 Justificativa .....	20
1.3 Objetivos.....	20
1.3.1 Objetivo Geral.....	20
1.3.2 Objetivos Específicos.....	20
2 REFERENCIAL TEÓRICO.....	22
2.1 Estrutura do pavimento .....	22
2.2 Estabilização granulométrica .....	23
2.3 Solo .....	24
2.3.1 Classificação do solo.....	24
2.4 Agregados .....	26
2.4.1 Classificação dos agregados.....	27
2.4.1.1 Quanto ao tamanho .....	28
2.4.1.2 Quanto à distribuição dos grãos.....	28
2.4.1.3 Quanto à natureza .....	28
2.5 Calcário.....	29
2.6 Comportamento mecânico .....	32
2.6.1 Módulo de Resiliência.....	32
2.6.2 Deformação Permanente .....	33
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	34
3.1 Considerações iniciais.....	34
3.2 Materiais empregados .....	36
3.2.1 Brita calcária .....	36
3.2.2 Brita granítica.....	38

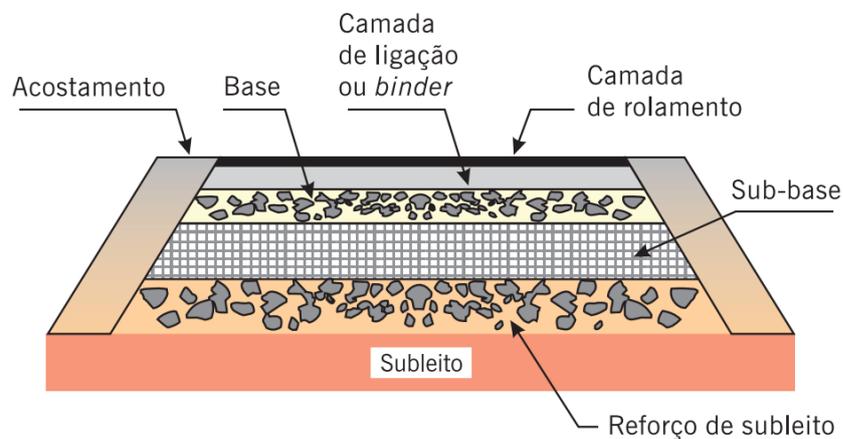
3.2.3 Solo.....	39
3.2.4 Mistura solo-brita .....	41
3.3 Programa experimental .....	42
3.3.1 Ensaio realizado no solo natural .....	43
3.3.2 Ensaio realizado nos agregados .....	44
3.3.2.1 Granulometria por peneiramento – Agregado graúdo .....	45
3.3.2.2 Absorção e densidade aparente.....	46
3.3.2.3 Análise da esfericidade, angularidade e textura superficial utilizando o AIMS2 e técnicas de Processamento Digital de Imagens (PDI) .....	47
3.3.2.4 Índice de forma.....	52
3.3.2.5 Abrasão “Los Angeles” .....	53
3.3.3 Ensaio realizado nas misturas solo-brita.....	54
3.3.3.1 Preparação das misturas.....	55
3.3.3.2 Ensaio de compactação.....	56
3.3.3.3 Ensaio de Módulo de Resiliência .....	57
3.3.3.4 Ensaio de Deformação Permanente.....	60
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	62
4.1 Resultados dos ensaios realizados no solo natural.....	62
4.1.1 Limites de Atterberg.....	62
4.1.2 Análise granulométrica do solo.....	63
4.1.3 Classificação AASHTO .....	64
4.2 Análise comparativa entre a brita calcária e a brita granítica .....	64
4.2.1 Análise granulométrica das britas .....	64
4.2.2 Absorção de água e densidade aparente .....	66
4.2.3 Análise dos agregados através do uso do PDI (AIMS2).....	67
4.2.4 Índice de forma.....	69
4.2.5 Abrasão “Los Angeles” .....	69

4.3 Análise comparativa entre as misturas solo-brita .....	70
4.3.1 Curva de compactação .....	70
4.3.2 Módulo de resiliência .....	72
4.3.3 Deformação permanente .....	74
4.4 Dimensionamento do pavimento .....	78
4.5 Análise financeira .....	80
5 CONCLUSÃO.....	83
5.1 Sugestões para trabalhos futuros.....	84
REFERÊNCIAS .....	85

## 1 INTRODUÇÃO

O solo é um material que pode ser facilmente encontrado nas margens das rodovias, porém, a sua utilização em estado natural muitas vezes não é adequada, pelo fato de não atender os requisitos necessários para o uso em bases e sub-bases de pavimentos. Diante disso, uma das técnicas utilizadas para obtenção do aumento da resistência e da estabilidade são as estabilizações granulométricas. As camadas da estrutura do pavimento podem ser visualizadas na Figura 1.

Figura 1 – Estrutura do pavimento.



Fonte: Bernucci et. al. (2008, p. 10).

No Brasil tem crescido a quantidade de estudos acerca da incorporação de novos materiais granulares nas camadas do pavimento, visto que se trata de um país em que há a predominância do transporte rodoviário. Tendo em vista a melhoria da qualidade, redução de custos e promoção da atividade mineradora no País, dado que, atualmente, é uma das principais atividades econômicas, representando 4% do Produto Interno Bruto (PIB), segundo o Ministério de Minas e Energia (2018).

Na construção das camadas granulares dos pavimentos são utilizados materiais como areias naturais e artificiais, pedregulho natural, seixo britado, dentre outros. Porém a diminuição na natureza desses materiais com características geotécnicas suficientes para ser empregado em pavimentação já se mostra presente em alguns locais, tornando necessário o desenvolvimento de estudos no sentido de encontrar soluções para essa escassez. Diante disso, uma das medidas que podem ser tomadas é a utilização de materiais alternativos locais que tenham custos

inferiores aos tradicionais e que impulsionem a economia local, desde que garantida à boa qualidade técnica.

Rochas para britagem são consideradas recursos minerais abundantes e são encontradas com facilidade na natureza. Contudo, essa respectiva abundância deve ser encarada com a devida cautela. O custo de transporte da pedreira aos centros de distribuição ou ao consumidor final encarece o preço final. Quase todo o transporte é realizado através de rodovias. Assim sendo, idealmente, a produção da brita deve ser o mais próximo possível dos centros de consumo, o que torna antieconômico boa parte dos recursos minerais disponíveis na natureza (Quaresma, 2009).

Nesse sentido, é possível destacar os avanços verificados na área de estabilização de solos, salientando-se aqui o desenvolvimento de misturas solo-brita com agregado de origem calcária, abundante na região do Vale do Jaguaribe. Tais técnicas tem como objetivo a obtenção de melhorias no que diz respeito ao desempenho mecânico das camadas granulares e, assim, proporcionando maior vida útil a rodovia.

Com a análise do comportamento mecânico de diferentes misturas de solo brita será possível responder à questão: Qual mistura solo brita é a mais indicada para a utilização em bases e sub-bases de pavimentos?

## **1.1 Problema**

O problema da pesquisa se enquadra na crescente preocupação com a escassez de material natural com características geotécnicas adequadas para execução de pavimentos resistentes mostrando-se como uma excelente solução a estabilização solo-brita. Na tentativa de minimizar esta carência de materiais na pavimentação, uma alternativa seria aplicar brita calcária em camadas granulares dos pavimentos executados na RVJ proporcionando melhor comportamento mecânico à estrutura e assim, minimizando as intervenções de manutenções precoces. Essa inserção do agregado alternativo deve ser feita de forma a não comprometer a função estrutural do pavimento.

## **1.2 Justificativa**

Com a carência de materiais naturais com características suficientes para serem empregados na pavimentação, o desenvolvimento de uma dada região fica comprometido, já que a infraestrutura é componente importante no crescimento de um local. Assim, é necessário que haja materiais que possam substituir os materiais convencionalmente utilizados na construção dos pavimentos. Dessa forma, estudos devem ser desenvolvidos no sentido de aprimorar as técnicas existentes para a incorporação de agregados em solos naturais, como por exemplo de materiais advindos de jazidas de calcário a partir da atividade de companhias de mineração da RVJ, na pavimentação. Essa área por movimentar grandes volumes, se apresenta como alternativa para a inserção da brita calcária na estrutura do pavimento em camadas granulares, visto que este material se apresenta com um bom desempenho mecânico e menor custo em relação aos agregados convencionais.

## **1.3 Objetivos**

### ***1.3.1 Objetivo Geral***

O objetivo geral deste trabalho é realizar uma análise comparativa do comportamento mecânico de camadas granulares de pavimento com o uso da brita calcária e da brita granítica.

### ***1.3.2 Objetivos Específicos***

- Caracterizar o agregado convencional de origem granítica por meio de ensaios de laboratórios normatizados;
- Caracterizar o agregado alternativo de origem calcária por meio de ensaios de laboratório normatizados;

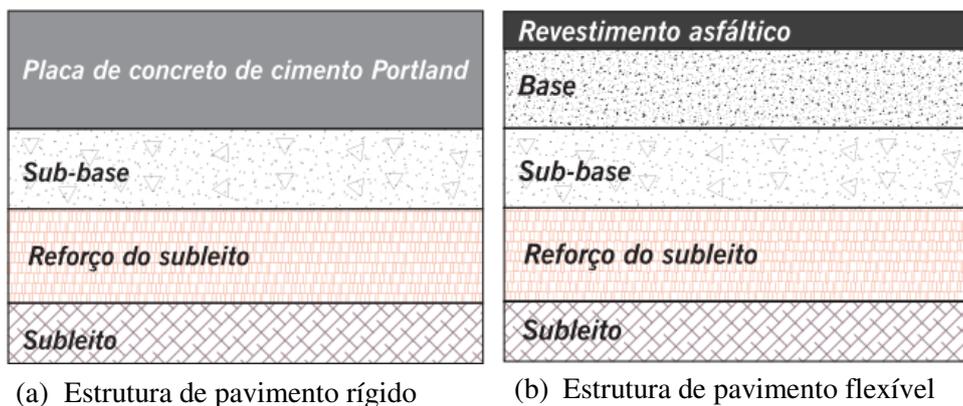
- Confeccionar uma mistura experimental utilizando os agregados e o solo em proporções definidas e realizar ensaios mecânicos com a mistura;
- Avaliar os resultados obtidos em laboratório;
- Avaliar os custos da utilização do agregado alternativo em rodovias situadas no Vale do Jaguaribe.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 Estrutura do pavimento

Segundo Bernucci et. al. (2008), as estruturas de pavimentos são sistemas de camadas sobrepostas sobre uma fundação chamada subleito. O comportamento estrutural depende da espessura de cada uma das camadas, da rigidez destas e do subleito, bem como da interação entre as diversas camadas do pavimento. As estruturas de pavimentos são subdivididas segundo a rigidez do conjunto em: estruturas rígidas e flexíveis, conforme Figura 2. De acordo com Balbo (2007), a estrutura de um pavimento tem a função de receber e transmitir os esforços solicitantes, fazendo com que as camadas mais próximas ao subleito, normalmente mais frágeis, não sejam atingidas.

Figura 2 - Tipos de pavimento.



Fonte: Bernucci et. al. (2008).

O pavimento rígido (Figura 2a) está geralmente associado aos que possuem a camada de revestimento em placas de concreto de cimento Portland, sendo composto por uma camada superficial de concreto, apoiada, em geral, sobre uma camada de material granular ou de material estabilizado, conhecida por sub-base, assentada sobre o subleito ou um reforço do subleito, quando necessário. Já para o pavimento flexível (Figura 2b), associa-se a camada de revestimento a pavimentos asfálticos, sendo, portanto, composto por uma camada superficial asfáltica, apoiada sobre camadas de base, de sub-base e de reforço do subleito, constituídas por materiais granulares, solos ou misturas de solos. Dependendo de alguns fatores como volume de tráfego e espessura das camadas, uma ou mais camadas podem ser suprimidas.

## 2.2 Estabilização granulométrica

Segundo Uieno (2011), devido à grande heterogeneidade dos solos e às inúmeras variedades das obras de engenharia, normalmente, o solo não satisfaz os requisitos de projeto e cabe ao projetista utilizar recursos para o emprego desse solo. No meio das variadas soluções existentes, encontra-se a estabilização, que representa um processo de alteração das propriedades do solo a fim de que se crie um novo material que atenda às determinações do projeto e o torne viável.

Senço (2001) afirma ainda que a estabilização de um solo se fundamenta em favorecê-lo de condições a suportar rupturas e deformações durante o tempo em que estiver desempenhando atribuições que requerem determinadas características, num pavimento ou outra obra qualquer.

Gondim (2008) apresenta, de uma maneira mais particular, que o processo de estabilização considera a aplicação de um fator estabilizante ao solo, com intuito de torná-lo capaz de satisfazer as exigências de um projeto a partir da modificação das suas propriedades. Podendo ser esse fator estabilizante um material granular, um aditivo químico ou também a aplicação de uma energia dinâmica.

A estabilização de solos constitui-se de técnicas de natureza física, físico-química, química ou mecânica, que visa a melhoria e a estabilidade das propriedades dos solos quanto à aplicação na engenharia. Ou seja, consiste em proporcionar ao solo a capacidade de suportar as cargas e os esforços induzidos pelo tráfego normalmente aplicados sobre o pavimento e às ações erosivas dos agentes naturais sob as condições mais adversas de solicitação consideradas no projeto (Barros, 2015, p. 19).

As alterações nas propriedades de um solo podem ser de ordem física ou de ordem química. Para melhor entendimento as técnicas de estabilização podem ser divididas em dois grupos: estabilização mecânica, quando ocorrem alterações de ordem física no solo através de correções da granulometria adicionando ou subtraindo certa parcela de frações constituintes, e estabilização química, quando as modificações se utilizam de aditivos orgânicos e/ou inorgânicos que promovem interação química entre as partículas de solo e um agente estabilizante (Gondim, 2008 e Bento, 2006).

## 2.3 Solo

De acordo com Senço (2007), o solo é o resultado da alteração de uma rocha-mãe ocasionada pela ação de vários processos físicos, físico-químicos e biológicos, sendo uma formação natural, de estrutura solta e deslocável e de espessura variável. Segundo o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT, 2006), na área da engenharia rodoviária, o solo é considerado como qualquer material, orgânico ou inorgânico, não consolidado ou parcialmente cimentado, encontrado na superfície terrestre que possa ser escavado com equipamentos manuais e sem a necessidade da utilização de explosivos.

Uieno (2011) afirma que por ser um material em abundância na natureza, além de ser muito utilizado na construção civil e encontrado em demasia, o solo tem um custo baixo quando comparado a outras matérias-primas da construção. O solo serve de base para a fundação de boa parte das obras de engenharia que se apoiam nele, sendo, portanto, fundamental conhecer suas características para que se possa prever seu comportamento diante das solicitações.

Segundo Senço (2007), o solo pode ser considerado como material de construção quando se pretende utilizá-lo como material componente, por exemplo, de uma camada de pavimento, deste modo, requer estudos preliminares de qualidade e controle rigorosos durante a aplicação. Uma das mais importantes atuações dos engenheiros de pesquisas são os estudos para a localização de jazidas e os complementares de estabilização dadas as irrefutáveis vantagens econômicas da utilização crescente de materiais locais.

### 2.3.1 Classificação do solo

De acordo com DNIT (2006), por se tratar de um material que ocorre na natureza de diversas maneiras, o solo para ser utilizado como fundação ou material de construção precisa ser classificado de forma tal que se consigam formular métodos de projetos fundamentados em determinadas características de cada grupo. Assim sendo, foram elaborados vários sistemas de classificação adequando-se a uma utilização dos solos ou a métodos de projeto. Pinto (2006) conclui que o objetivo da classificação dos solos, sob o ponto de vista de engenharia, é elaborar

uma estimativa do provável desempenho do solo ou, no mínimo, orientar o programa de verificação necessário para possibilitar a devida análise de um problema. O autor supracitado explica que os sistemas de classificação que se fundamentam nas propriedades dos grãos que compõem os solos têm como objetivo a determinação de grupos que exibem comportamentos similares sob os aspectos de interesse da Engenharia Civil, sendo empregados para tal objetivo a composição granulométrica e os índices de Atterberg.

Um sistema de classificação de solos que é bastante empregado em pavimentação em todo o mundo é o Sistema Rodoviário de Classificação AASHTO, e foi originalmente proposto nos Estados Unidos. Neste sistema considera-se a granulometria, o limite de liquidez e o índice de plasticidade (Pinto, 2006 e DNIT, 2006).

DNIT (2006) esclarece que nesta classificação os solos são reunidos em grupos e subgrupos, em relação a sua granulometria, limites de consistência e do índice de grupo. Na Figura 3 é mostrado o quadro de classificação dos solos. Nesse sistema, realiza-se a classificação pela verificação da porcentagem de material que passa na peneira nº 200, sendo considerados solos de granulação grossa os que têm menos de 35% passando nesta peneira. Esses são solos dos grupos A-1, A-2 e A-3. Os solos com mais de 35% passando na peneira nº 200 formam os grupos A-4, A-5, A-6 e A-7 e são considerados solos de granulação fina (Pinto, 2006).

Figura 3 - Classificação de Solos AASHTO.

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

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

Fonte: DNIT (2006).

## 2.4 Agregados

Bessa (2012) define agregados como sendo materiais granulados com forma e volume indefinidos que apresentam dimensões e propriedades suficientes para satisfazer às obras de engenharia civil, inclusive referentes à pavimentação. De acordo com Bagatini (2011), os agregados são materiais utilizados em pavimentação a fim de absorver os esforços verticais e estão dispostos em camadas rigorosamente dimensionadas a fim de atender esta solicitação.

Cavalcanti (2011) descreve que as funções da brita no pavimento são de proteger o subleito da ação do intemperismo e resistir e distribuir a carga do tráfego, transferindo-a às camadas inferiores. Alguns dos requisitos que a rocha pela qual se produz a brita deve cumprir são: resistência à compressão, ao impacto, ao desgaste e ao intemperismo.

Bernucci et. al. (2008) indicam que o agregado deve apresentar habilidade para resistir a quebras, degradação e desintegração, e para camadas de base e revestimento de pavimentos, normalmente o valor de abrasão Los Angeles (LA) é limitado a um valor máximo que depende do órgão normalizador.

#### ***2.4.1 Classificação dos agregados***

Segundo Bagatini (2011), os agregados que apresentam melhor desempenho costumam compor as camadas superiores do pavimento, como base e sub-base, por possuírem características de maior resistência, acompanhado pelas camadas gradualmente mais profundas, em que os agregados utilizados possuem menor resistência.

Franco (2007) diferencia as propriedades da partícula das que estão relacionadas à produção dos agregados, sendo as primeiras aquelas devidas à natureza geológica da rocha da qual o material deriva-se e as segundas as que estão ligadas à maneira pela qual a rocha é esmagada, britada e seu produto é classificado. A dureza da rocha, a formação mineral e os materiais contaminadores influenciam as características de atrito entre os agregados, impactam sobre a durabilidade e podem modificar o desempenho mecânico do material como um todo. Já a depender do tipo e da qualidade da produção do agregado, o material pode gerar um efeito considerável sobre as propriedades de engenharia do pavimento como, por exemplo, no comportamento da deformação permanente da estrutura.

Para Bessa (2012), a classificação se dá quanto ao tamanho dos grãos, quanto à distribuição granulométrica e quanto à origem (naturais ou artificiais). Alguns autores consideram como agregados artificiais aqueles que precisam de algum tipo de melhoramento, como é o caso da brita, enquanto outros consideram como artificiais aqueles materiais que são obtidos por meio de processos industriais, como é o caso da escória de aciaria. Os agregados utilizados em pavimentação podem ser divididos em três classificações: quanto ao seu tamanho, à distribuição dos grãos e à natureza (Bernucci et. al., 2008 e DNIT, 2006).

#### *2.4.1.1 Quanto ao tamanho*

De acordo com esta classificação, os agregados podem ser divididos em graúdo, miúdo e material de enchimento (filer). O agregado graúdo abrange aqueles retidos na peneira de abertura 2,0 milímetros, como é o caso das britas e dos cascalhos. Já o agregado miúdo abrange aqueles com dimensões entre 0,075 e 2,0 milímetros, como as areias e o pó de brita. E o material de enchimento deve possuir pelo menos 65% das partículas menores que 0,075 milímetros, como o cimento Portland e a cal extinta (DNIT, 2006).

#### *2.4.1.2 Quanto à distribuição dos grãos*

Segundo esta classificação, os agregados podem ser divididos de acordo com sua granulometria, determinada através de peneiramento. A classificação é realizada a partir da subdivisão da graduação dos materiais em algumas classes, como de graduação densa: aqueles que apresentam uma curva granulométrica bem graduada e contínua, com quantidade suficiente de material fino para preencher os vazios; aberta: aqueles com insuficiência de material fino; macadame: aquele que apresenta a maioria de suas partículas em um único tamanho; contínua: apresenta todas as frações em sua curva granulométrica; ou descontínua: aqueles que apresentam reduzida porcentagem de agregados em dimensões intermediárias (Bernucci et. al., 2008 e DNIT, 2006).

#### *2.4.1.3 Quanto à natureza*

Segundo esta classificação, os agregados podem ser divididos em natural, artificial e reciclado. Os agregados naturais são adquiridos através de processos convencionais de desmonte e escavação, podendo ser utilizados no tamanho e forma encontrados na natureza, ou ainda podendo ser britados, como é o caso das britas e da areia. Os agregados artificiais são resíduos advindos de processos industriais, e podem apresentar alta resistência ao atrito, como, por exemplo, a escória de alto-forno e de aciaria. Ainda, os agregados reciclados têm origem

da reutilização de materiais diversos, por exemplo, os resíduos da construção civil (Bernucci et. al., 2008 e DNIT, 2006).

De acordo com Marques (2018), a classificação mais usada no Brasil seria quanto à sua natureza. Segundo esta classificação, os agregados são divididos em naturais: aqueles que são empregados conforme se encontram na natureza, salvo operações de britagem e lavagem como é o caso dos cascalhos, saibros, areias; e em artificiais: que são aqueles que têm origem na alteração química ou física de outros materiais, como a escória de alto forno, argila expandida, ou que requer extração como é o caso das rochas, sendo o tipo mais comum a pedra britada.

Conforme afirma Roberts et. al. (1996 *apud* Marques, 2018), os agregados utilizados na construção de rodovias são amplamente adquiridos de depósitos de rochas naturais. As rochas naturais decorrem através de afloramentos ou próximo à superfície ou como depósitos de agregados. Estas rochas são categorizadas pelos geólogos em 3 agrupamentos em relação a sua origem em: ígneas (magmáticas), sedimentares e metamórficas.

De acordo com Martins (1995 *apud* Marques, 2018) faz-se necessário um projeto cauteloso de exploração das rochas com vistas a atenuar perturbações ambientais e perdas a paisagem devido a boa parte das rochas duras exploradas para a indústria de construção encontrarem-se em áreas de alto valor paisagístico ou de preservação ambiental.

Marques (2018) exemplifica que em regiões como a Norte do Brasil que apresentam escassez de material para produção de britas é possível a utilização de material alternativo, como o uso de argila expandida, como agregado para utilização em serviços de pavimentação.

Silva Júnior (2014) conclui que por constituir o produto da fragmentação mecânica de rochas naturais a partir da ação antropogênica, a pedra britada é classificada como agregado de origem artificial, de tamanho graúdo.

## **2.5 Calcário**

O calcário é uma rocha sedimentar gerada de material precipitado por agentes químicos e orgânicos. Os afloramentos de calcário são frequentes na crosta terrestre e sob variadas formas, conforme o tipo de formação e a época. Admite diversos nomes, como

mármore, marga ou calcita. A calcita, na qual sua composição básica é o carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ), é o principal constituinte mineralógico dos calcários e mármore com elevada pureza (Sampaio e Almeida, 2005 e Aoki, 2007).

De acordo com Sampaio e Almeida (2005), a calcita é o componente mais comum nos calcários e mármore, bem como de outras rochas sedimentares e metamórficas. Ocorre no sistema cristalino e hexagonal com boa clivagem romboédrica. Suas propriedades físicas são: dureza de 3 pela escala Mohs e densidade de 2,72.

Os autores supracitados apontam que provavelmente não existem outras rochas com uma diversidade de uso tão abrangente quanto o calcário e dolomito. Essas rochas são utilizadas na fabricação de blocos para a indústria da construção, material para agregados, cal e até rochas ornamentais. As rochas carbonatadas e seus produtos são também usados como matéria-prima para as indústrias de vidro, carga, agentes para remover enxofre e outros na indústria siderúrgica, corretivos de solos, dentre outros.

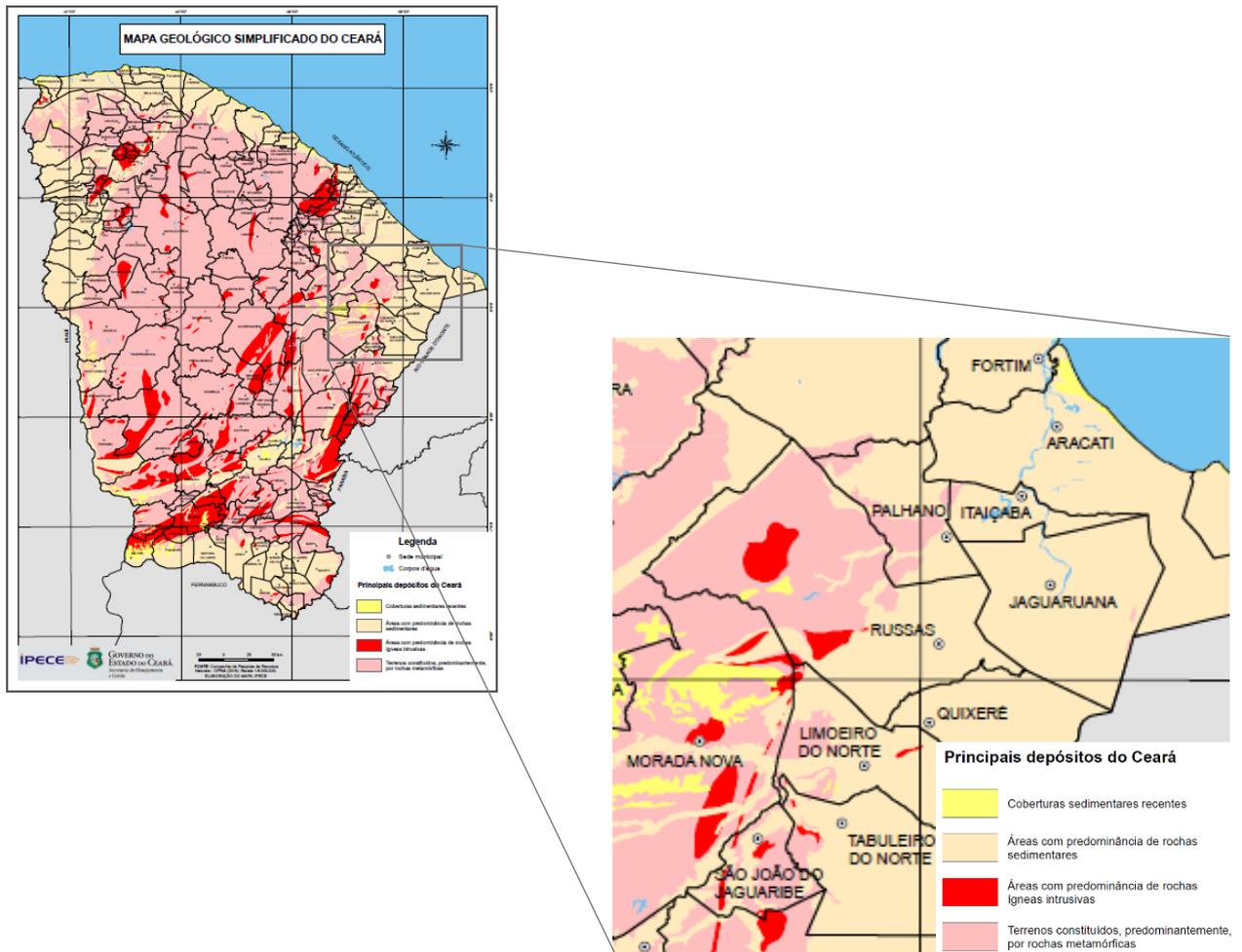
Ainda de acordo com Sampaio e Almeida (2005), a extração em pedreiras e depósitos que variam em idade origina o calcário encontrado amplamente em todos os continentes. As reservas de rochas carbonatadas são extensas, entretanto, a sua ocorrência com alta pureza equivale a menos que 10% das reservas de carbonatos lavradas em todo mundo.

Quaresma (2009) relata que a princípio toda rocha pode ser britada e utilizada na construção civil. Todavia, para algumas utilizações podem existir características indesejáveis que venham a impedir seu uso, como em concreto, em pavimento asfáltico, base e sub-base, entre outras. O granito, o basalto e o calcário estão entre as rochas mais usadas na produção de brita. No Brasil aproximadamente 85% da brita produzida é proveniente de granito/gnaiss, 10% de calcário/dolomito e 5% de 22 basalto/diabásio. A produção de calcário bruto (não beneficiado) acontece em quase todos os estados brasileiros. Os maiores produtores no ano de 2005 foram: Minas Gerais, com 22,3% de participação na produção nacional; Distrito Federal, com 20,4%; Sergipe, com 13,4%; e Ceará, com 11,0%. Juntos, esses estados totalizaram dois terços da produção brasileira, que em 2005 atingiu cerca de 21,9 milhões de toneladas, incluindo a produção de calcita e conchas calcárias (Anuário Mineral Brasileiro - AMB, 2006 *apud* Silva, 2009).

Segundo o Instituto Brasileiro de Mineração (IBRAM, 2011), nas últimas duas décadas, grandes empresas da área de extração e beneficiamento de calcário evidenciaram

interesse em instalar unidades industriais no Brasil. Este interesse se dá devido ao afloramento de mais de 20 mil quilômetros quadrados de rocha calcária, prontas para exploração de acordo com o Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM), nas regiões Oeste do Rio Grande do Norte e no estado do Ceará, conforme mostra a Figura 4.

Figura 4 - Mapa geológico do Ceará.



Fonte: Autora (2019).

De acordo com Moraes (2016), a escassez de informação sobre a utilização adequada da rocha calcária para produção de brita tem como consequência a baixa representatividade do uso desta rocha. Em geral, a dúvida dos consumidores se vale na confiabilidade da brita granítica visto que suas características são bem difundidas e estudadas. A brita calcária possui propriedades distintas, que solicitam estudos que explorem a melhor técnica e finalidade deste agregado.

Lima (2015) desenvolveu uma pesquisa sobre o uso de agregados de rochas calcárias para camadas de pavimentos estabilizadas granulometricamente. No trabalho desenvolvido, o autor determinou misturas em três cenários, sendo adicionados ao solo 25%, 50% e 75% de agregado calcário em relação a sua massa, observando-se o aumento das frações grosseiras no solo e a redução da plasticidade, à medida que o teor do agregado na mistura aumentou. Os melhores resultados obtidos foram para as misturas compostas por 50% de solo e 50% de agregado.

## 2.6 Comportamento mecânico

### 2.6.1 Módulo de Resiliência

O conceito de resiliência foi desenvolvido por Francis Hveem, em 1955, ao defender a hipótese de que os pavimentos asfálticos (“flexíveis”) trincavam devido à repetição de pequenas deformações elásticas (deformações resilientes) nas camadas subjacentes. Para que se compreendesse que os deslocamentos nos pavimentos, perante a ação de cargas cíclicas, são muito maiores do que os que ocorrem em sólidos elásticos que compõem estruturas usuais de engenharia, foi adotado o termo resiliência (Medina e Motta, 2005 *apud* Silva, 2014).

Segundo o Método de Ensaio do DNIT, DNIT 134/2018-ME, o valor do módulo de resiliência (MR) é, por definição, a relação entre a tensão desvio ( $\sigma_d$ ) aplicada repetidamente em uma amostra e a deformação específica vertical recuperável ou resiliente ( $\epsilon_r$ ) correspondente, conforme Equação 1.

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

Segundo Gondim (2008), a real condição de carregamento a que um pavimento está submetido pode ser descrita, aproximadamente, através de ensaios de carga repetida. O ensaio de módulo de resiliência, exemplo de ensaio de carga repetida, consiste em definir o comportamento de um material, sob confinamento, após a aplicação de repetidos ciclos de carga e descarga. Tendo em vista a simulação das ações do tráfego são aplicados repetidos ciclos.

### 2.6.2 Deformação Permanente

A deformação permanente é resultado do acúmulo de pequenas quantidades da parcela de deformação total que não volta ao seu estado original após sofrer ação de carga de tráfego de veículo. Este defeito estrutural, quando ocorre ao longo do eixo longitudinal da faixa de tráfego nas trilhas de roda é denominado de afundamento de trilha de roda (ATR), considerando-se um defeito estrutural grave caso ultrapasse de certa profundidade. Esse defeito pode ser conferido apenas ao revestimento, às camadas subjacentes, ao subleito ou ainda à combinação de colaboração de diversas camadas (Norback, 2018).

A deformação permanente é diretamente relacionada à história de tensões e tem origem, pela mecânica dos pavimentos, na flexão repetida e na compressão do tráfego que geram uma deformação total na estrutura, desmembrada em duas parcelas: deformação elástica (resiliente) e deformação plástica (permanente). A deformação permanente é a parcela em que a camada, após sofrer solitação de carga, não retorna à sua posição original, sendo esses deslocamentos não recuperáveis acumulados ao longo da vida do pavimento. (LIMA E MOTTA, 2015a, p. 210).

O ATR pode ser uma derivação de contribuições de acúmulo de deformação permanente de uma ou mais camadas do pavimento e do subleito e quando excessiva ou súbita resulta em ruptura plástica. Para se ter garantia de que a ruptura plástica não ocorrerá, sonda-se solos granulares e finos que apresentem acomodamento de deformações permanentes com o número de ciclos de solitações, conhecido como *shakedown*. O termo inglês *shakedown* não possui tradução consagrada no estudo de pavimento asfálticos, podendo ser interpretado como o acomodamento das deformações permanentes, ou plásticas, que um material ou estrutura de pavimento desenvolve quando submetido à ação de cargas repetidas (Guimarães, 2009 e Lima, 2016).

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 Considerações iniciais

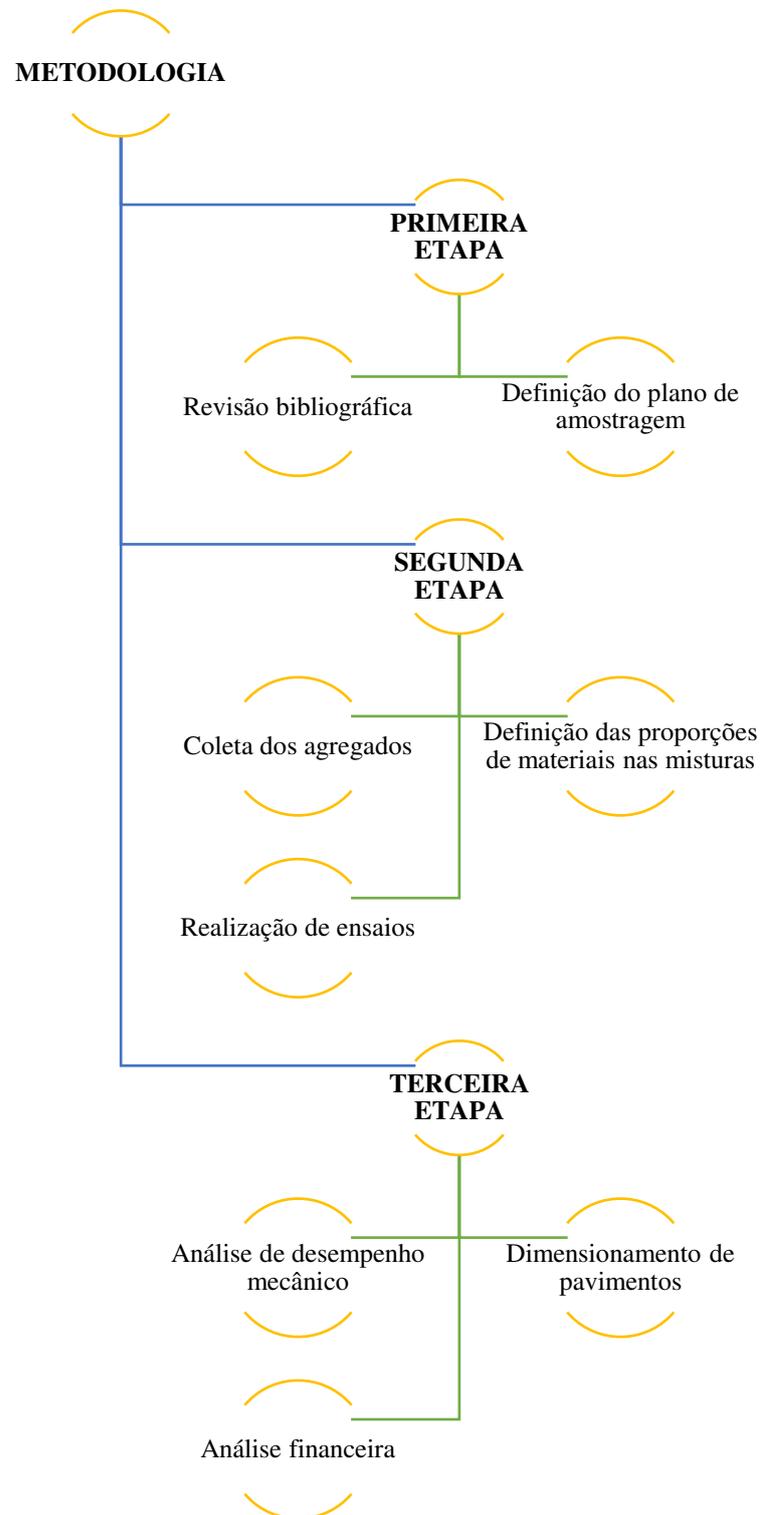
A metodologia utilizada nesta pesquisa, consistiu em realizar, inicialmente uma revisão de literatura sobre o problema estudado. Depois de concluída a revisão bibliográfica foi realizada a preparação de amostras de solo e britas, e a caracterização através de ensaios laboratoriais. As misturas de solo com as diferentes britas em proporção pré-determinada foram submetidas a ensaios geotécnicos. Dos resultados obtidos comparam-se suas propriedades para aplicação no pavimento com dimensionamento da estrutura e análise da viabilidade financeira.

Neste capítulo são apresentados os materiais utilizados na pesquisa, sendo estes, a brita calcária, proveniente da companhia de mineração Carbomil Química S/A, a brita granítica, proveniente de uma pedreira da Região Metropolitana de Fortaleza (RMF) e um solo proveniente da cidade de Morada Nova, localizada na RVJ. Em seguida, é apresentada a metodologia aplicada para que os objetivos propostos sejam alcançados, bem como o programa experimental adotado. Todos os ensaios foram realizados no Laboratório de Solos do CT Asfalto, pertencente ao Departamento de Engenharia de Transportes (DET) da UFC.

Neste estudo, portanto, serão testados dois agregados graúdos como estabilizantes granulométricos, sendo um convencionalmente utilizado em camadas granulares, de origem granítica, e outro apresentando-se como material alternativo, de origem calcária, dando preferência ao segundo devida abundância na Região do Vale do Jaguaribe (RVJ), além de apresentar menor custo em relação ao agregado convencional.

A Figura 5 apresenta o fluxograma de atividades realizadas a fim de alcançar os objetivos propostos deste trabalho.

Figura 5 - Fluxograma metodológico.



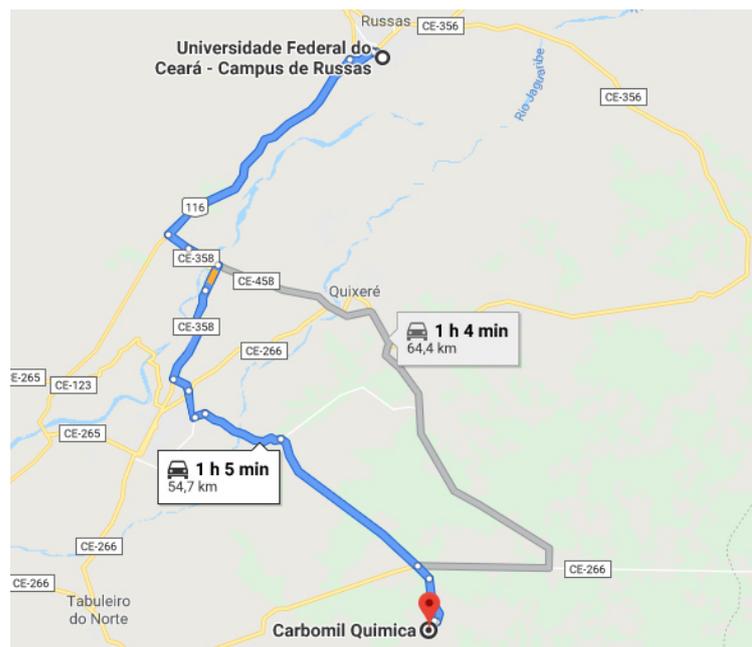
Fonte: Autora (2019).

## 3.2 Materiais empregados

### 3.2.1 Brita calcária

A brita de origem calcária em estudo nesta pesquisa é proveniente da Companhia de Mineração Carbomil, situada na Zona Rural do município de Limoeiro do Norte, na RVJ, distante aproximadamente 230 Km da cidade de Fortaleza, capital do Estado do Ceará, e 55 Km da cidade de Russas, onde está localizada a Universidade Federal do Ceará (UFC) - Campus Russas, conforme apresentado na Figura 6.

Figura 6 - Localização da Companhia de Mineração Carbomil em relação ao *campus* de Russas.



Fonte: Google Maps (2019).

A brita calcária utilizada neste estudo foi a disponível no montante de armazenagem de tamanho de 15 a 20 mm, apresentado na Figura 7, escolha feita em função do interesse da pesquisa, separada por peneiras dispostas no britador mecânico visualizado na Figura 8. O material se encontrava em estado solto permitindo a coleta de amostras de forma manual, utilizando-se apenas pás. A preparação da amostra consistiu em lavar na peneira 1,70 mm, secar

em estufa e estocar em baldes com capacidade para 15 kg cada, para maior facilidade de manuseio.

Figura 7 - Montante selecionado.



Fonte: Autora (2019).

Figura 8 - Britador mecânico e produtos da britagem.



Fonte: Autora (2019).

Além disso, antes da realização de cada ensaio, utilizou-se o repartidor de amostras, apresentado na Figura 9, a fim de se obter as quantidades representativas especificadas pelas normas.

Figura 9 - Repartidor de amostra.

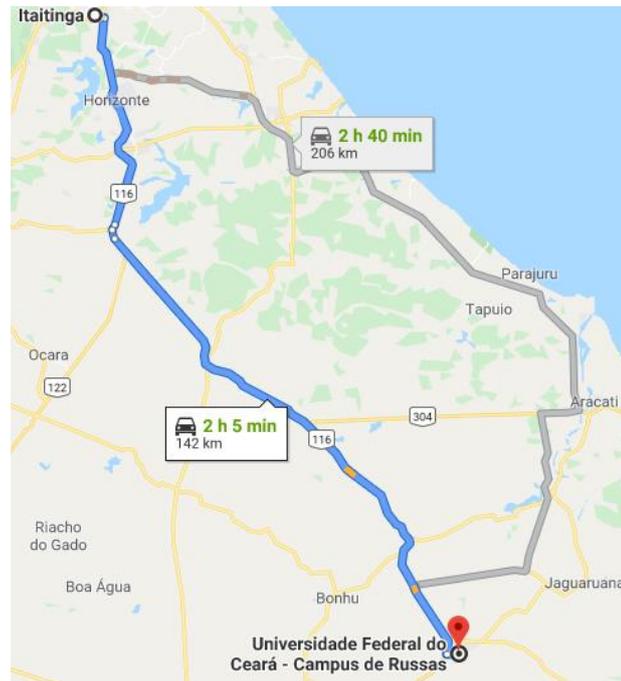


Fonte: Autora (2019).

### **3.2.2 Brita granítica**

A brita de origem granítica em estudo nesta pesquisa foi adquirida em uma loja de materiais de construção na cidade de Russas e é proveniente de pedreira situada no município de Itaitinga, pertencente a RMF, distante aproximadamente 32 Km da cidade de Fortaleza, capital do Estado do Ceará, e 142 Km da cidade de Russas, onde está localizada a Universidade Federal do Ceará (UFC) - Campus Russas, conforme apresentado na Figura 10.

Figura 10 - Localização da pedreira em relação ao *campus* de Russas.



Fonte: Google Maps (2019).

A brita granítica utilizada neste estudo foi a disponível no comércio de material de construção Brasil Construção LTDA, situada na cidade de Russas, de tamanho 19 mm, escolha feita em função do interesse da pesquisa.

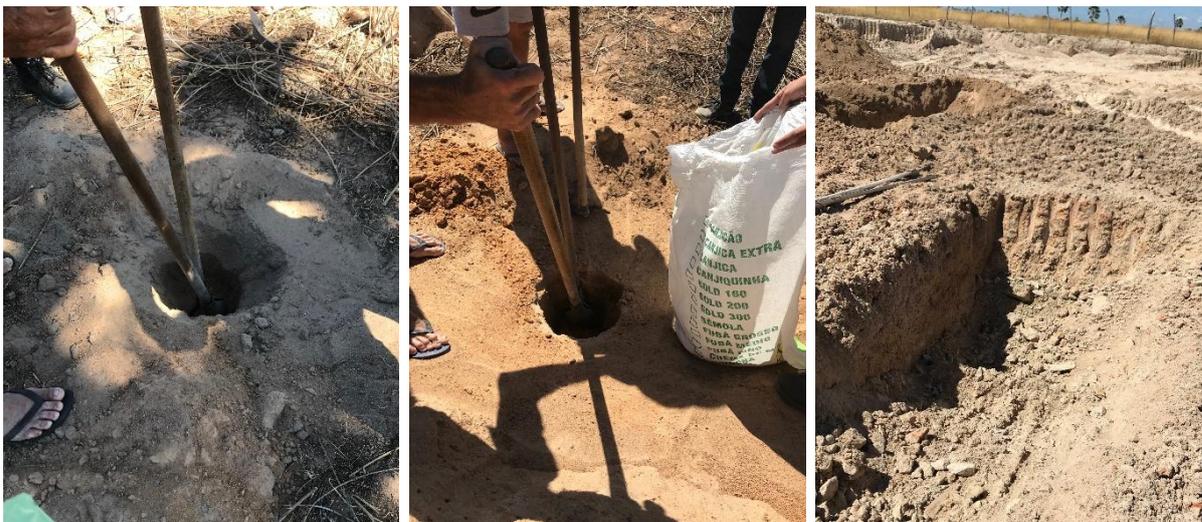
A preparação consistiu em lavar na peneira 1,70 mm, secar em estufa e estocar em baldes com capacidade para 15 kg cada, para maior facilidade de manuseio. Assim como feito com a calcária, utilizou-se do repartidor de amostras na obtenção da quantidade de material necessária para realização dos ensaios.

### 3.2.3 Solo

O solo utilizado na pesquisa foi coletado no município de Morada Nova, situado na RVJ, distante 64,2 km da cidade de Russas. Conforme Sousa (2019), o solo utilizado é laterítico, sendo um solo LG' (solo argiloso laterítico) de acordo com a classificação MCT (Miniatura Compactado Tropical). Foram realizados ensaios de classificação de solo para obter a classificação AASHTO do material.



Figura 12 - Forma de coleta e aspecto visual do solo coletado.



Fonte: Autora (2019).

### 3.2.4 Mistura solo-brita

Conforme sugerido pela literatura (Lima, 2015), a proporção das misturas ensaiadas foi de 50% em substituição em massa tanto da brita de origem granítica, quanto de origem calcária. A Tabela 1 apresenta a composição das misturas com maior clareza.

Tabela 1 - Composição das misturas.

Misturas	Composição (%)		
	Solo (S)	Brita calcária (BC)	Brita granítica (BG)
M1 (50S+50BG)	50	0	50
M2 (50S+50BC)	50	50	0

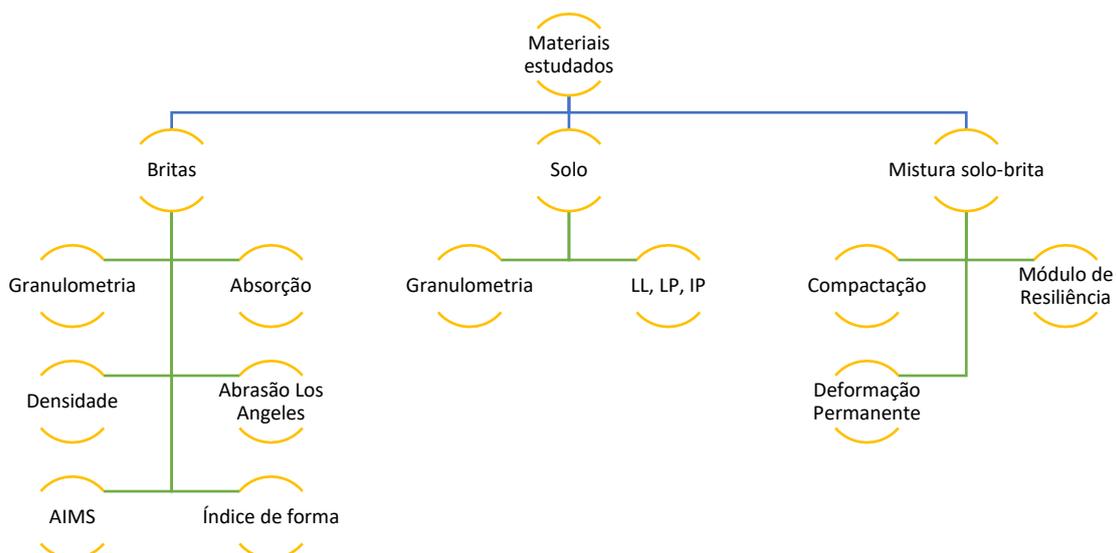
Fonte: Autora (2019).

### 3.3 Programa experimental

Almejando o alcance dos objetivos pré-estabelecidos nesta pesquisa, adotou-se uma sequência metodológica, conforme Figura 13. Cada etapa do programa experimental contemplou diferentes ensaios realizados nos materiais em estudo e nas misturas propostas.

São apresentados neste item, os ensaios de caracterização que foram realizados com as britas, com o solo e com as misturas solo-brita utilizados nesta pesquisa. São discutidos os ensaios que foram realizados no material granular, como densidade aparente e absorção dos agregados graúdos, esfericidade, angularidade e textura superficial do agregado graúdo através da utilização do *Aggregate Image Measurement System (AIMS2)*, granulometria por peneiramento e Abrasão Los Angeles, ensaios realizados para caracterizar os solos, como limite de liquidez, limite de plasticidade e granulometria por peneiramento, e os ensaios de desempenho mecânico realizados nas misturas solo-brita, como ensaio de compactação, de Módulo de Resiliência (MR) e de Deformação Permanente (DP). A Figura 13 resume as etapas metodológicas que compõem esta pesquisa.

Figura 13 - Fluxograma experimental.



Fonte: Autora (2019).

### 3.3.1 Ensaios realizados no solo natural

Os ensaios de caracterização do solo são aqueles que têm como finalidade determinar as propriedades físicas fundamentais do solo. Os ensaios foram realizados conforme as recomendações do Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER) e estão apresentados na Tabela 2, com as normas e métodos utilizados para execução dos mesmos.

Tabela 2 - Normas empregadas para os ensaios realizados no solo.

<b>Ensaios</b>	<b>Métodos</b>
Limite de Liquidez (LL)	DNER-ME 122/94
Limite de Plasticidade (LP)	DNER-ME 082/94
Granulometria por peneiramento	DNER-ME 080/94

Fonte: Autora (2019).

Por meio dos dados resultantes dos ensaios de LL e LP, pode-se encontrar o Índice de Plasticidade (IP), ou seja, a amplitude da faixa de plasticidade (Ortigão, 2007). Já através dos dados resultantes do ensaio de granulometria, juntamente com os dados dos demais ensaios, pode-se classificar o solo com base no sistema de classificação de solos AASHTO.

Os limites de consistência definidos são LP e LL, correspondentes à transição entre os estados plástico e líquido e permitem avaliar a plasticidade dos solos. Atterberg sugeriu que a diferença, em percentagem, entre os limites de plasticidade e liquidez, denominada de índice de plasticidade (IP), informa quanto à amplitude da faixa de plasticidade, e que este índice poderia ser empregado para classificar os solos. A Equação 2 corresponde ao cálculo deste índice.

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

Já o ensaio de granulometria por peneiramento tem como finalidade o estudo da composição granulométrica do agregado, identificando seus componentes, referente às dimensões de cada partícula e às suas respectivas porcentagens de ocorrência, caracterizando-o fisicamente.

A partir dos resultados obtidos nos ensaios acima determinados, pode-se utilizar o sistema de classificação de solos bastante utilizado na engenharia rodoviária que é o da AASHTO.

Nesta classificação, os solos são reunidos em grupos e subgrupos, em função de sua granulometria, limites de consistência e do índice de grupo. Determina-se o grupo do solo, por processo de eliminação da esquerda para a direita, no quadro de classificação da AASHTO, Figura 3. O primeiro grupo a partir da esquerda, com o qual os valores do solo ensaiado coincidir, será a classificação correta.

### 3.3.2 Ensaios realizados nos agregados

As características tecnológicas de um agregado servem para assegurar uma fácil distinção de materiais, de modo a se poder comprovar sua uniformidade, bem como a escolha de um material que resista, de forma adequada, as cargas que o pavimento irá suportar. Os ensaios de caracterização dos agregados graúdos são aqueles que têm como finalidade determinar as características dos agregados que devem ser levadas em conta nos serviços de pavimentação. Os ensaios foram realizados conforme as recomendações do Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER) e estão apresentados na Tabela 3, com as normas e métodos utilizados para execução dos mesmos.

Tabela 3 - Normas empregadas para os ensaios realizados nos agregados graúdos.

<b>Ensaios</b>	<b>Métodos</b>
Granulometria por peneiramento	DNER-ME 083/98
Absorção e densidade aparente	DNER-ME 081/98
Esfericidade, angularidade e textura superficial	AASHTO (2016) Standard method of test for determining aggregate shape properties by means of digital image analysis, Washington, DC, TP81-10
Índice de forma	DNER-ME 086/94
Abrasão “Los Angeles”	DNER-ME 035/98

Fonte: Autora (2019).

Os ensaios abaixo descritos foram realizados tanto para a brita de origem calcária, como para a brita de origem granítica, obedecendo às mesmas normas e condições.

### 3.3.2.1 Granulometria por peneiramento – Agregado graúdo

Na norma utilizada para a realização deste ensaio é especificada a quantidade de material que deve ser usado para o peneiramento, de acordo com o tamanho máximo da partícula do agregado. O peneiramento tem como função separar um material em frações, por meio de peneiras com dimensões definidas, podendo ser feito manualmente ou com auxílio de um agitador mecânico (Figura 14).

Essa norma indica que o material deve ser seco em estufa para evitar o efeito da umidade no peneiramento e baseia-se também na seleção das peneiras a serem usadas, que devem ser limpas e com abertura de malha em ordem crescente da base para o topo.

A escolha das peneiras a serem utilizadas no processo foi de acordo com a norma DNER-EM 035/95 que seguem as seguintes aberturas nominais, em milímetros: 50 - 38 - 32 - 25 - 19 - 12,5 - 9,5 - 6,3 - 4,8 - 2,4 e 0,15.

Figura 14 - Agitador mecânico.



Fonte: Autora (2019).

### 3.3.2.2 Absorção e densidade aparente

Conforme indica a norma DNER-ME 081/98, a massa da amostra a ser ensaiada varia conforme a dimensão máxima característica do agregado. De acordo com o resultado obtido no ensaio de granulometria, a dimensão máxima característica foi de 25 mm, sendo usado, portanto, 4.000 g para o ensaio de determinação da absorção e da densidade do agregado, quantidade mínima necessária para execução do ensaio. A Figura 15 apresenta um dos processos deste ensaio.

Figura 15 - Ensaio de absorção e densidade aparente.



Fonte: Autora (2019).

Para encontrar a densidade aparente do agregado na condição seca e a absorção, utilizam-se as seguintes equações, 3 e 4, respectivamente:

$$D_{ap} = \frac{M_s}{M_h - L} \quad (3)$$

Onde:

$D_{ap}$  = densidade aparente (g/cm<sup>3</sup>);

$M_s$  = massa, ao ar, do agregado seco (g);

$M_h$  = massa, ao ar, do agregado na condição saturada superfície seca (g);

$L$  = leitura na balança correspondente ao agregado submerso (g).

$$a = \frac{M_h - M_s}{M_s} \times 100 \quad (4)$$

Onde:

a = absorção do agregado, em percentagem.

### 3.3.2.3 Análise da esfericidade, angularidade e textura superficial utilizando o AIMS2 e técnicas de Processamento Digital de Imagens (PDI)

“A forma, a angularidade e a textura superficial de partículas têm mostrado afetar o comportamento de materiais utilizados na pavimentação, como misturas asfálticas, concreto de cimento Portland e camadas granulares.” (Ibiapina, 2018, p. 125)

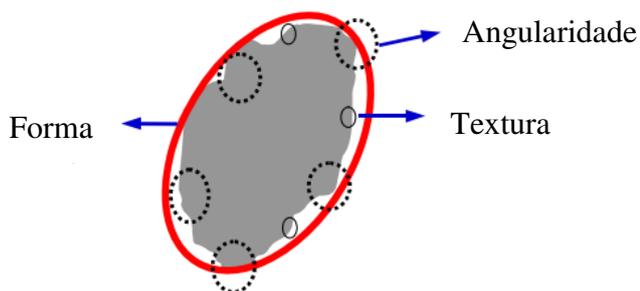
O equipamento utilizado foi o AIMS2 (Figura 16), com método de ensaio conforme sugerido por Ibiapina (2018), que representa um sistema de PDI, com mecanismo de aquisição de imagens e *software* acoplado. Foi desenvolvido para quantificar características relacionadas às propriedades de forma (Figura 17), que incluem a forma 2D, esfericidade, angularidade e textura superficial, por análises de imagens bi e tridimensionais das partículas e avaliar cada propriedade selecionada através do posicionamento dos agregados nas suas respectivas bandejas da plataforma giratória.

Figura 16 - Aggregate Image Measurement System (AIMS2).



Fonte: Autora (2019).

Figura 17 - Propriedades de forma.



Fonte: Adaptado de Masad et. al. (2005).

A utilização do AIMS2 exige que um passo a passo seja seguido, sendo utilizado neste trabalho o procedimento proposto por Ibiapina (2018). Sugere Ibiapina (2018, p. 129-130) que o material coletado seja quarteado utilizando repartidor de amostra, em seguida, fracionado por meio de uma série de peneiras até que a quantidade mínima de partículas em cada fração seja suficiente para a análise, conforme Figura 18. Cada fração da amostra obtida deve ser lavada, utilizando como suporte as peneiras correspondentes, até que se perceba que a água sai limpa após passar através das partículas. Realiza-se a secagem de todas as frações em estufa.

Figura 18 - Quantidade mínima de partículas por fração.

Tamanho	Massa aproximada (recomendação)	Quantidade mínima de partículas
25,0 mm (1")	5 kg	50
19,0 mm (3/4")	2 kg	50
12,5 mm (1/2")	2 kg	50
9,5 mm (3/8")	2 kg	50
4,75 mm (# 4)	2 kg	50
2,36 mm (# 8)	200 g	150
1,18 mm (# 16)	200 g	150
0,6 mm (# 30)	200 g	150
0,3 mm (# 50)	200 g	150
0,15 mm (# 100)	200 g	150
0,075 mm (# 200)	200 g	150

Fonte: Ibiapina (2018).

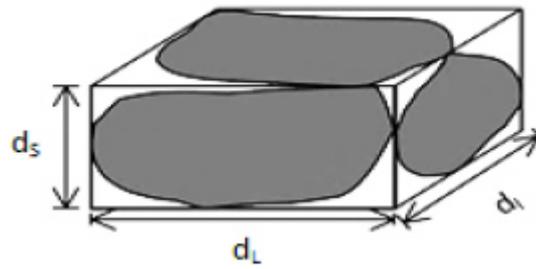
Cada fração da amostra deve ser analisada separadamente. Seleciona-se as partículas a serem analisadas aleatoriamente e as distribui no suporte, deixando que sua orientação seja definida também de modo aleatório. Para partículas graúdas, o espaçamento deve ser de pelo menos 1,0 mm entre elas.

Fornece-se ao sistema o tamanho das partículas da fração a ser analisada e inicia-se o processo de aquisição e análise das imagens, de forma automatizada. Caso a quantidade necessária de partículas não seja alcançada na primeira sequência de capturas, substitui-se todas as partículas do suporte por outras, da mesma amostra, e repete-se o processo, até que se complete a quantidade indicada ao sistema.

As partículas graúdas são consideradas no sistema de análise do equipamento AIMS2 como aquelas que ficam retidas na peneira de abertura de 4,75 mm (#4). O ensaio foi realizado apenas com frações graúdas devido indisponibilidade da quantidade mínima de partículas miúdas na amostra estudada.

As propriedades de forma das partículas de agregados podem ser descritas através de quatro parâmetros geométricos calculados pela metodologia AIMS2. A esfericidade (Figura 19) é o parâmetro de forma utilizado para partículas graúdas e representa uma relação entre as três dimensões do agregado. O valor dessa propriedade varia de 0,0 a 1,0, sendo maior quanto mais cúbica for a partícula, e é calculado pela Equação 5. A forma 2D é o parâmetro de forma utilizado para partículas miúdas e descreve a forma de partículas a partir de imagens 2D. O seu índice varia de 0 a 20, sendo o valor zero para um círculo perfeito, e é expresso pela Equação 6. A angularidade (Figura 20), parâmetro usado para agregados graúdos e miúdos (< 4,75 mm), mede as alterações de direção existentes ao longo do contorno da partícula por meio do método do gradiente, estando relacionada à nitidez dos cantos das imagens em 2D, pode variar de 0 a 10.000, sendo calculado pela Equação 7. Quanto mais arredondada é uma partícula, menor é o valor de angularidade. Por fim, a textura superficial, aplicada apenas a agregados graúdos, descreve a suavidade ou rugosidade relativa da superfície das partículas por meio de *Wavelets*, o qual quantifica as variações existentes nos níveis de pixels de imagens em escala de cinza. Seu valor pode variar de 0 a 1.000 e é calculado pela Equação 8 (Al Rousan, 2004; Ibiapina, 2018 e Masad et. al., 2007).

Figura 19 - Três dimensões de uma partícula para o cálculo da esfericidade.



Fonte: Adaptado de Masad et. al. (2007).

$$\text{Esfericidade} = \sqrt[3]{\frac{d_s d_I}{d_L^2}} \quad (5)$$

Onde:

$d_s$  = menor dimensão;

$d_I$  = dimensão intermediária;

$d_L$  = maior dimensão da partícula.

$$\text{Forma 2D} = \sum_{\theta=0}^{\theta=360-\Delta\theta} \left[ \frac{R_{\theta+\Delta\theta} - R_{\theta}}{R_{\theta}} \right] \quad (6)$$

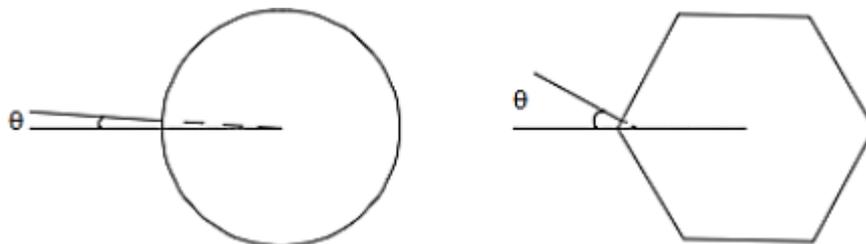
Onde:

$\theta$  = ângulo direcional;

$R$  = raio em diferentes direções;

$\Delta\theta$  = diferença de incremento no ângulo.

Figura 20 - Ângulos de orientação dos pontos do contorno da partícula para cálculo da angularidade.



Fonte: Ibiapina (2018).

$$\text{Angularidade} = \frac{1}{\frac{n}{3}-1} \sum_{i=1}^{n=3} |\theta_i - \theta_{i+3}| \quad (7)$$

Onde:

$\theta$  = ângulo de orientação dos pontos do contorno;

$n$  = número total de pontos;

$i$  =  $i$ -ésimo ponto do contorno da partícula.

$$\text{Textura superficial}_n = \frac{1}{3N} \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^N \left( D_{i,j}(x,y) \right)^2 \quad (8)$$

Onde:

$n$  = nível de decomposição da imagem;

$N$  = número de coeficientes em uma imagem detalhada;

$D$  = função de decomposição;

$i$  = direção da textura (1, 2 ou 3);

$j$  = índice *Wavelet*;

$x,y$  = localização dos coeficientes no domínio transformado.

A classificação das propriedades de forma de agregados para o AIMS2 foi realizada a partir dos valores limites de classificação proposta por Ibiapina (2018), apresentado na Figura 21, que representa uma customização do sistema de Al Rousan (2004) a partir da aplicação em um banco de dados de agregados brasileiros analisados no AIMS.

Figura 21 - Valores limites de classificação (IBIAPINA, 2018).

Propriedade	Valores limites				
Forma 2D	< 4,0	4,0 – 11,0	11,0 – 15,5	> 15,5	-
	Circular	Semicircular	Semialongado	Alongado	-
Angularidade	< 1.260	1.260 – 4.080	4.080 – 7.180	> 7.180	-
	Arredondado	Subarredondado	Subangular	Angular	-
Esfericidade	< 0,5	0,5 – 0,7	0,7 – 0,9	> 0,9	-
	Achatado/Alongado	Baixa esfericidade	Esfericidade moderada	Alta esfericidade	-
Textura superficial	< 260	260 - 440	440 - 600	600 - 825	> 825
	Polido	Macio	Baixa rugosidade	Rugosidade moderada	Alta rugosidade

Fonte: Ibiapina (2018).

A resistência à deformação permanente está intimamente ligada às características do agregado mineral como angularidade, forma e textura, que interferem no intertravamento do esqueleto pétreo. Para prevenir problemas associados à deformação permanente, é desejável que o agregado tenha forma mais cúbica, seja mais anguloso e tenha textura mais rugosa (Onofre, 2012).

### 3.3.2.4 Índice de forma

A norma DNER-ME 086/94, utilizada para este ensaio, recomenda que inicialmente seja realizada a análise granulométrica do material a fim de se conhecer em qual das graduações o material se enquadra, de acordo com a Figura 22. Após a escolha da graduação, selecionam-se as frações das quantidades indicadas, usando-se as peneiras com crivos de abertura circular.

Figura 22 - Determinação da graduação do material após análise granulométrica.

Graduação	Crivos de abertura circular mm		Pesos das frações da amostra g	Crivos redutores correspondentes mm **	
	Passando *	Retido		Crivo I	Crivo II
<b>A</b>	76,0	63,5	3 000	38,0	25,0
	63,5	50,0	3 000	32,0	21,0
	50,0	38,0	3 000	25,0	17,0
	38,0	32,0	3 000	19,0	12,7
<b>B</b>	32,0	25,0	2 000	16,0	10,5
	25,0	19,0	2 000	12,7	8,5
	19,0	16,0	2 000	9,5	6,3
<b>C</b>	19,0	16,0	2 000	9,5	6,3
	16,0	12,7	2 000	8,0	5,3
	12,7	9,5	2 000	6,3	4,2
<b>D</b>	12,7	9,5	1 000	6,3	4,2
	9,5	6,3	1 000	4,8	3,2

\* Tamanho diretriz

\*\* Abertura em tamanhos comerciais.

Fonte: DNER (1994).

De cada fração separam-se as partículas retidas no crivo redutor de abertura igual à metade do tamanho diretriz correspondente, anotando-se o seu peso. O material que passar no

primeiro crivo redutor deve ser passado em um segundo crivo redutor de abertura igual a 1/3 do tamanho diretriz da fração, anotando-se o peso do material retido neste crivo.

Para cada fração que compõe a graduação determina-se, em relação a seu peso inicial, as porcentagens retidas em cada crivo circular. Para esse ensaio, classificou-se os agregados como sendo de graduação C, a partir da análise granulométrica, e a norma específica que devem ser utilizadas três frações distintas com pesos de 2.000 g cada fração de amostra, porém o ensaio foi realizado com apenas duas frações devido indisponibilidade de material passando na 12,7 e retido na 9,5.

Para encontrar o índice de forma, utiliza-se a Equação 9.

$$f = \frac{P_1 + 0,5 \times P_2}{100 \times n} \quad (9)$$

Onde:

f = índice de forma;

P<sub>1</sub> = soma das porcentagens retidas no crivo I, de todas as frações que compõem a graduação;

P<sub>2</sub> = soma das porcentagens retidas no crivo II, de todas as frações que compõem a graduação;

n = número de frações que compõem a graduação escolhida.

### 3.3.2.5 Abrasão “Los Angeles”

De acordo com a norma DNER-ME 035/98, utilizada para este ensaio, utilizou-se a graduação B, visto que é a graduação que melhor se enquadra ao resultado da análise granulométrica, e a norma específica que devem ser utilizadas 11 esferas e realizadas 500 rotações. A Figura 23 apresenta o equipamento utilizado para a realização deste ensaio. A abrasão “Los Angeles” do agregado é calculada pela Equação 10.

Figura 23 - Equipamento utilizado para ensaio de Abrasão "Los Angeles".



Fonte: Autora (2019).

$$A_n = \frac{m_n - m'_n}{m_n} \times 100 \quad (10)$$

Onde:

$A_n$  = abrasão "Los Angeles" da graduação  $n$ ;

$n$  = graduação escolhida para o ensaio;

$m_n$  = massa total da amostra seca, colocada na máquina;

$m'_n$  = massa da amostra lavada e seca, após o ensaio.

### 3.3.3 Ensaio realizados nas misturas solo-brita

Foram idealizadas misturas compostas em teores pré-definidos dos materiais descritos nos itens anteriores: brita calcária (BC) + solo (S) e brita granítica (BG) + solo (S), com o objetivo de avaliar o desempenho mecânico de cada mistura solo-brita. Para tanto, foram realizados ensaios conforme as recomendações do Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER), atual DNIT (Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes), e estão apresentados na Tabela 4, com as normas e métodos utilizados para execução dos mesmos.

Tabela 4 - Normas empregadas para os ensaios realizados nas misturas solo-brita.

<b>Ensaio</b>	<b>Métodos</b>
Compactação	DNER-ME 162/94
Módulo de Resiliência	DNIT 134/2018-ME
Deformação Permanente	BS EN 13286-7: 2004

Fonte: Autora (2019).

Os ensaios abaixo descritos foram realizados tanto para a mistura solo + brita calcária, como para a mistura solo + brita granítica, obedecendo às mesmas normas e condições.

### 3.3.3.1 Preparação das misturas

Para a preparação das amostras, o solo como recebido do campo é seco ao ar e destorroado e reduzido até uma quantidade de três quilogramas, visto que o solo é areno siltoso, enquanto que o agregado graúdo é passado na peneira de 19 mm, havendo material retido, é procedida a substituição do mesmo por igual quantidade em peso do material passando na de 19 mm e retido na de 4,8 mm, até que se obtenha um total de três quilogramas. Tudo isto, após eliminação prévia do material retido na peneira de 50 mm.

Já a preparação das misturas, realiza-se colocando o solo natural na bandeja em quantidade pré-definida e adicionando o agregado graúdo, procedendo a uniformização manual dos dois materiais. Por fim, adiciona-se a água necessária para se obter o teor de umidade ótima de cada uma das misturas, obtido através do ensaio de compactação. A Figura 24 apresenta o processo de uniformização manual da mistura.

Figura 24 - Uniformização manual da mistura.



Fonte: Autora (2019).

### 3.3.3.2 Ensaio de compactação

O ensaio consiste na aplicação de uma força mecânica no material, provocando a redução do índice de vazios e melhorando suas propriedades mecânicas. A partir desse ensaio é possível determinar as umidades ótimas e as densidades máximas de cada mistura, quando compactado em uma determinada energia adotada. Para isso, pode-se realizar o ensaio na energia normal, intermediária ou modificada, com a aplicação de diferentes números de golpes.

As misturas foram submetidas ao ensaio de compactação Proctor na energia intermediária (26 golpes). Escolheu-se trabalhar com a energia intermediária de compactação, pelo fato desta ser a energia mais utilizada para construção de camadas de bases rodoviárias de misturas de solos estabilizados.

O ensaio de compactação consiste em compactar uma amostra de material homogêneo com um soquete, em um molde cilíndrico de dimensões padronizadas. A compactação é feita em camadas, aplicando-se um determinado número de golpes por camada conforme a energia de compactação desejada. A Figura 25 apresenta o molde cilíndrico e o extrator de amostra.

Figura 25 - Extração do corpo de prova no ensaio de compactação.



Fonte: Autora (2019).

Repete-se a operação tantas vezes quantas necessárias para caracterizar a curva de compactação, sendo o mínimo de cinco vezes. Desmanchando-se inteiramente o corpo-de-prova após cada compactação, adicionando de 1 a 2 por cento de água e homogeneizando.

### *3.3.3.3 Ensaio de Módulo de Resiliência*

Para a realização do ensaio do módulo de resiliência foi utilizado o método da resiliência da COPPE/UFRJ normatizado através da norma do DNIT 134/2018-ME que se utiliza de equipamento triaxial de carga repetida (Figura 26) em laboratório e objetiva determinar os valores de módulo de resiliência de solos e materiais granulares para várias tensões aplicadas. O ensaio triaxial de carga repetida é caracterizado pela aplicação da tensão desvio aplicada verticalmente no topo da amostra, de forma cíclica no sentido de compressão.

Figura 26 - Ensaio triaxial de carga repetida.



Fonte: Autora (2019).

Para a realização deste ensaio são moldados dois corpos de prova na umidade ótima obtida pela curva de compactação, em cilindro tripartido com dimensões de 100x200 mm, em 10 camadas e com a aplicação de 10 golpes por camada. Estes corpos de prova foram moldados exclusivamente para a realização deste ensaio.

Mistura-se os materiais sempre no dia anterior a serem moldados e armazena-os em saco plástico a fim de homogeneizar a amostra e manter o teor de umidade. O ensaio consiste em duas etapas, a primeira é a etapa de condicionamento, e, a segunda, da obtenção do módulo de resiliência propriamente dito. Após a moldagem no cilindro tripartido, os CPs (um para cada mistura diferente – Figura 27) são submetidos a primeira etapa do ensaio que tem como objetivo minimizar os efeitos de deformação plástica e da história de tensões. Nela, são aplicados três conjuntos de 500 golpes cada, em diferentes pares de tensões. Logo após, submete-se os CPs à segunda etapa, onde mede-se a deformação específica resiliente correspondente à aplicação dos pares de tensões confinante e desvio.

Figura 27 - Corpos de prova do ensaio de MR.



Fonte: Autora (2019).

Os resultados podem ser expressos por relações matemáticas através de modelos de comportamento elástico linear ou não linear, clássicos ou composto, entre o Módulo de Resiliência e a tensão desvio ( $\sigma_d$ ) isoladamente, a tensão confinante ( $\sigma_3$ ) isoladamente ou as duas tensões simultaneamente, obtidos por regressão. Os parâmetros obtidos através da análise desses modelos têm fundamental importância para o dimensionamento mecanístico-empírico de pavimento para camadas granulares visto que são parâmetros de entrada para a definição da estrutura do pavimento. Na Tabela 5 verificam-se os modelos existentes e suas relações matemáticas.

De acordo com Figueiredo Filho e Silva Júnior (2009), o coeficiente de correlação ( $R^2$ ) é a medida do grau de associação linear entre duas variantes quantitativas. O valor do coeficiente varia de -1 a 1, o sinal indicando a direção positiva ou negativa do relacionamento. A correlação perfeita possui valor de -1 ou 1, enquanto que o valor zero indica que não há relação linear entre as variáveis.

Desta forma, os modelos abaixo apresentados serão testados nos programas Excel e LABFit e o que melhor se enquadrar no comportamento das amostras estudadas, a partir da análise dos  $R^2$ , será utilizado para o dimensionamento.

Tabela 5 - Modelos que descrevem comportamentos resilientes.

<b>Modelo</b>	<b>Equação</b>
Tensão desvio	$MR = K_1 \cdot \sigma_d^{K_2}$
Tensão confinante	$MR = K_1 \cdot \sigma_3^{K_2}$
Modelo Composto	$MR = K_1 \cdot \sigma_3^{K_2} \cdot \sigma_d^{K_3}$

Fonte: Autora (2019).

#### 3.3.3.4 Ensaio de Deformação Permanente

Para avaliação da deformação permanente, optou-se pela escolha do método de ensaio triaxial de carga cíclica normatizado pela norma europeia BS EN 13286-7 (2004, *apud* Vasconcelos, 2018). O ensaio é realizado no mesmo equipamento que se faz o ensaio de módulo de resiliência.

Existe uma instrução de ensaio proposta pelo DNIT (DNIT 179/2018 – IE) para descrição do ensaio de deformação permanente de solos utilizando o equipamento triaxial de carga repetida. Nessa norma, são realizados ensaios triaxiais de cargas repetidas de longa duração, em que são indicados pelo menos 6 pares de tensões, devendo-se aplicar no mínimo 150.000 ciclos para cada estado de tensão. Optou-se, no entanto, neste trabalho por realizar o ensaio em conformidade com a norma europeia BS EN 13286-7 (2004 *apud* Vasconcelos, 2018), uma vez que essa metodologia demanda significativa redução no tempo de ensaio de cada corpo-de-prova e, conseqüentemente, redução dos recursos energéticos.

O procedimento utilizado para moldagem dos dois corpos-de-prova e montagem do aparato de ensaio foi igual ao utilizado para ensaio de MR. No ensaio de DP, no entanto, não deve ser realizada a fase de condicionamento, pois todas as deformações permanentes devem ser contabilizadas na análise. A Tabela 6 apresenta os pares de tensão a que cada amostra se submeteu.

Tabela 6 - Relação dos pares de tensões utilizados no ensaio de Deformação Permanente.

Tensão (kPa)		N
$\sigma_d$	$\sigma_3$	
40		
80		
120	40	10.000
160		

Fonte: Autora (2019).

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 Resultados dos ensaios realizados no solo natural

#### 4.1.1 Limites de Atterberg

Realizou-se os ensaios de LL e LP do solo através dos métodos de ensaio apresentados no capítulo anterior e os resultados obtidos de LL e LP foram 21,03% e 15,3%, respectivamente. De posse desses resultados de LL e LP, calculou-se o valor de IP ( $IP = LL - LP$ ) como sendo igual a 5,75%, o que classifica o solo como um material pouco plástico. Os resultados obtidos para LL, LP e IP para o solo natural são apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 - Valores para LL, LP e IP.

<b>Material</b>	<b>LL (%)</b>	<b>LP (%)</b>	<b>IP (%)</b>
Solo natural	21,03	15,3	5,75

Fonte: Autora (2019).

De acordo com os resultados apresentados, conclui-se que o solo ensaiado pode ser utilizado em camadas de base e sub-base de pavimentos, visto que se enquadra nas especificações de consistência, sendo elas, LL máximo de 25% e IP máximo de 6%. É possível concluir também que o material ensaiado pode ser utilizado em camadas de base estabilizada granulometricamente visto que o solo é classificado como laterítico e se enquadra nas especificações da norma DNIT 098/2007 – ES, sendo elas, LL máximo de 40% e IP máximo de 15%. A Figura 28 apresenta os aspectos do solo após ensaios de LL e LP.

Figura 28 - Aspecto do solo após ensaios de LL e LP.

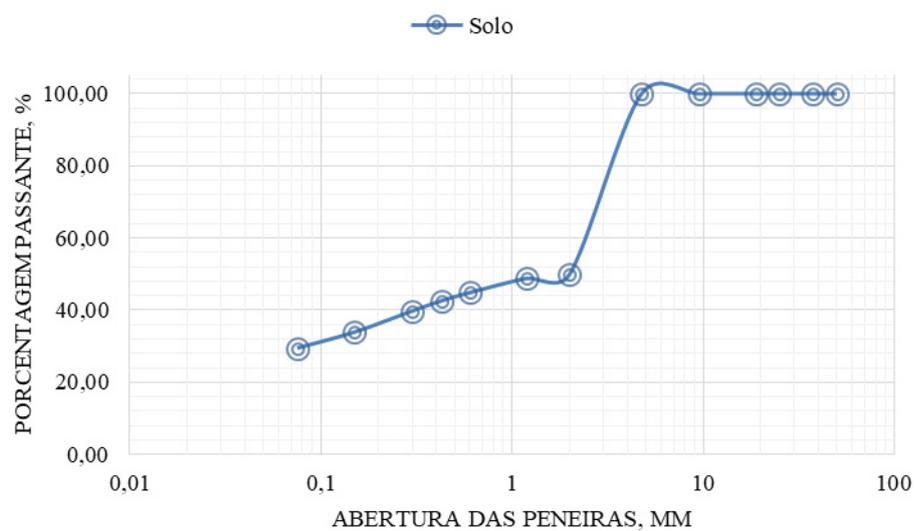


Fonte: Autora (2019).

#### 4.1.2 Análise granulométrica do solo

Realizou-se o ensaio de análise granulométrica por peneiramento para solos conforme DNER-ME 080/94 e a distribuição das dimensões das partículas está representada através da curva de granulometria no Gráfico 1.

Gráfico 1 - Curva granulométrica do solo natural.



Fonte: Autora (2019).

A partir da análise desta curva, observa-se que o solo apresenta característica pedregulhosa com presença de finos, pois a mesma apresenta uma descontinuidade no gráfico nas frações de 1 a 10 mm.

#### ***4.1.3 Classificação AASHTO***

Quanto às classificações de solos tradicionais, a do Sistema Rodoviário de Classificação – AASHTO, leva em conta a granulometria e a plasticidade. Por este sistema, o solo natural utilizado neste trabalho foi classificado como sendo do grupo A-2-4. Segundo DNIT (2006), o subgrupo de solo A-2-4 abrange materiais como pedregulho e areia grossa, em que o teor de silte e o IP ultrapassam os limites estabelecidos para o grupo A-1, e ainda areia fina com silte não plástico que excede os limites do grupo A-3. Esta classificação indica também que o comportamento do solo como subleito é considerado de excelente a bom.

### **4.2 Análise comparativa entre a brita calcária e a brita granítica**

#### ***4.2.1 Análise granulométrica das britas***

Realizou-se um total de dois ensaios de análise granulométrica para agregados graúdos, sendo um para a brita calcária e um para a brita granítica, a fim de se obter em cada ensaio o resultado em que a soma das massas retidas não fosse superior a 0,5% da massa inicial da amostra seca, conforme determina o item 7.1.1 da DNER-ME 083/98. Nas Figuras 29 e 30 pode-se analisar a composição granulométrica obtida a partir do ensaio de granulometria.

Figura 29 - Composição granulométrica da brita granítica.



Fonte: Autora (2019).

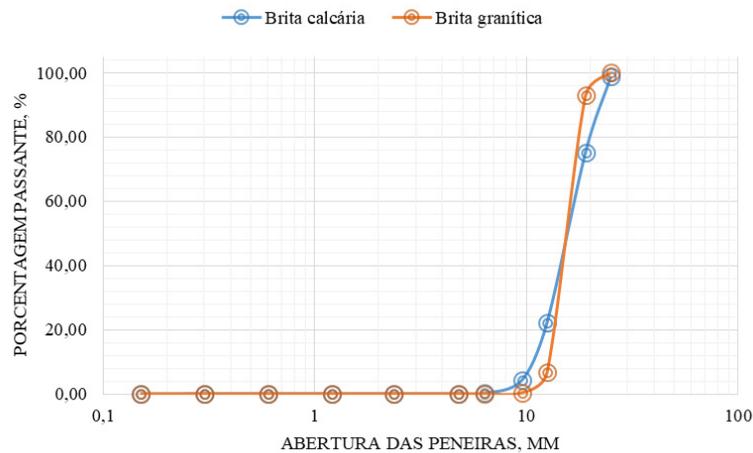
Figura 30 - Composição granulométrica da brita calcária.



Fonte: Autora (2019).

A partir do ensaio de análise granulométrica das britas granítica e calcária obtiveram-se, conforme especificação da norma DNER-ME 083/98, os valores de módulo de finura iguais a 7,06 e 7,20, respectivamente, e dimensão máxima característica dos agregados de 25 mm para ambas. As curvas granulométricas traçadas baseadas nos resultados obtidos neste ensaio estão apresentadas no Gráfico 2.

Gráfico 2 - Curvas granulométricas dos agregados graúdos.



Fonte: Autora (2019).

A partir da análise destas curvas, observa-se que a maioria das partículas dos agregados em questão apresentam tamanhos em uma faixa bem estreita, entre 10 e 25 mm, sendo, portanto, de graduação uniforme. A disposição da curva nessa faixa é bastante íngreme, indicando a classificação anterior.

#### 4.2.2 Absorção de água e densidade aparente

Realizou-se um total de dois ensaios para absorção de água, sendo um para brita granítica e um para a brita calcária, conforme DNER-ME 081/98. As massas dos agregados na condição saturada obtidas com os ensaios foram de 4025,8 g e 4188,5 g, respectivamente, pelas quais calculam-se as porcentagens de absorção de água conforme item 7.1.2 da DNER-ME 081/98, resultando em 0,7% e 5,2%, respectivamente. Já para a determinação da densidade aparente dos agregados, também se realizou um total de dois ensaios, sendo um para cada brita, e as leituras correspondentes aos agregados submersos através da pesagem hidrostática foram 2555,2 g para a brita granítica e de 2493,3 g para a brita calcária, pelas quais calculam-se os valores de densidade aparente na condição seca conforme item 7.1.1 da DNER-ME 081/98, resultando em 2,718 e 2,348, respectivamente, resultados adimensionais decorrentes do procedimento de ensaio.

Os ensaios de densidade aparente e da absorção de água não estão listados na norma que especifica os requisitos exigíveis de agregado graúdo para obras rodoviárias, portanto será feita a comparação entre eles. Sendo assim, a densidade aparente da brita granítica é de 2,72 e da brita calcária é de 2,35, notório que ambas possuem densidade aparente próxima entre si, uma diferença de 0,37, resultando no percentual de 15,74%. De acordo com esse resultado, percebe-se que a mistura solo-brita granítica será uma mistura mais densa, devido a maior densidade da brita. Enquanto que a absorção de água da brita calcária é de 5,2%, a da brita granítica é de 0,7%, em outras palavras, a brita calcária absorve 7,5 vezes mais água do que a brita granítica. Devido ao alto valor de absorção da brita calcária, que pode ser visto como uma desvantagem desse material, a mesma não poderia ser indicada para utilização em revestimento, porém pode ser empregada em camadas granulares requerendo mais água em termos de umidade.

#### ***4.2.3 Análise dos agregados através do uso do PDI (AIMS2)***

O ensaio realizado utilizando técnicas de PDI e o equipamento AIMS2 traz resultados referentes à caracterização dos dois diferentes agregados em relação a suas propriedades de forma com parâmetros de tendência central e de dispersão. Esses parâmetros estão relacionados ao total de agregados analisados de acordo com a origem dos mesmos, não considerando a distribuição destes peneira a peneira. Vale salientar que os agregados em estudo não tinham, em sua composição, frações miúdas em quantidade mínima necessária para a execução do ensaio, sendo, portanto, todo o procedimento realizado apenas com partículas graúdas, sendo utilizadas pelo menos 50 partículas retidas, valor mínimo exigido pelo ensaio, em cada uma das seguintes peneiras: 19 mm, 12,5 mm, 9,5 mm e 4,75 mm.

A Tabela 8 apresenta um resumo dos resultados obtidos com o AIMS2, representados através de parâmetros estatísticos, tais como média, desvio padrão e Coeficiente de Variação (CV), para cada tipo de agregado analisado. A Tabela 9 apresenta a classificação dos agregados pelo sistema de Ibiapina (2018) em relação a cada propriedade considerando as médias dos resultados de cada uma destas propriedades. Observou-se que a textura superficial foi a propriedade que apresentou os maiores coeficientes de variação (acima de 45%), acredita-se que este fato se deve a aleatoriedade da posição de cada partícula no preparo da amostra a

ser analisada no AIMS2. Isso acontece porque as diversas faces de uma brita não possuem um padrão bem definido (Bessa, 2012).

Tabela 8 - Médias e desvios-padrão dos resultados obtidos.

<b>Propriedade</b>	<b>Agregado</b>	<b>Parâmetro estatístico</b>			
		<b>Média</b>	<b>Número de partículas</b>	<b>Desvio Padrão</b>	<b>CV (%)</b>
Esfericidade	Calcário	0,637	193	0,103	16,2%
	Granítico	0,669	199	0,103	15,4%
Angularidade	Calcário	2974,7	200	805,3	27,1%
	Granítico	2813,6	200	642,1	22,8%
Textura Superficial	Calcário	99,3	195	61,0	61,4%
	Granítico	468,1	196	226,0	48,3%

Fonte: Autora (2019).

Tabela 9 - Classificação dos agregados.

<b>Agregado</b>	<b>Propriedade</b>		
	<b>Esfericidade</b>	<b>Angularidade</b>	<b>Textura Superficial</b>
Calcário	Baixa esfericidade	Subarredondado	Polido
Granítico	Baixa esfericidade	Subarredondado	Baixa rugosidade

Fonte: Autora (2019).

A partir dos resultados obtidos para esfericidade e angularidade, é possível verificar que os dois tipos de agregados são classificados igualmente com relação a esses parâmetros. Segundo Bessa (2012), os fatores mais importantes para determinar tais características seriam os processos de produção dos agregados. Pressupondo, assim, que os processos de britagem dos materiais em análise foram muito parecidos. Já em relação aos resultados obtidos para textura superficial, analisa-se que os valores foram muito distintos para os dois agregados em estudo e a classificação dos dois foi diferente também. Acredita-se que esta propriedade é

afetada pela mineralogia da rocha dos agregados analisados, o que explica tamanha diferença quanto a classificação (Bessa, 2012 e Diógenes, 2018).

Conforme explanado por Bessa (2012), a classificação proposta é pertinente para se ter uma ideia geral das propriedades de esfericidade, de angularidade e de textura, porém, por considerar apenas a média dos valores obtidos no AIMS2 e, ainda, considerar todos os agregados oriundos do mesmo tipo de rocha como se fossem exatamente iguais em relação a tais propriedades, esta forma de classificação pode não ser realista e precisa.

#### ***4.2.4 Índice de forma***

Realizou-se um total de dois ensaios para índice de forma, sendo um para a brita calcária e um para a brita granítica, conforme DNER-ME 086/94. Determinaram-se os índices de forma dos agregados conforme item 7 b) da DNER-ME 086/94, o qual os calcula a partir da Equação 5 apresentada neste trabalho, resultando em 0,93 para a brita granítica e 0,85 para a brita calcária.

De acordo com Silva (2009), o ensaio de índice de forma dos grãos de agregado retorna valores que variam de 0 a 1, sendo cada vez mais cúbico ao se aproximar do valor 1, característica de um cubo perfeito. No presente trabalho, os resultados obtidos foram de 0,93 e 0,85 o que enquadra tanto a brita granítica quanto a brita calcária como sendo de forma cúbica.

#### ***4.2.5 Abrasão “Los Angeles”***

Realizou-se um total de dois ensaios para desgaste de abrasão “Los Angeles”, sendo um para a brita calcária e um para a brita granítica, conforme DNER-ME 035/98. Determinaram-se as abrasões “Los Angeles” de acordo como o item 6 da DNER-ME 035/98, o qual as calcula a partir da Equação 6 apresentada neste trabalho, resultando em 38,15% para a brita granítica e 45,14% para a brita calcária.

A condição específica do ensaio de desgaste a abrasão “Los Angeles” para utilização em base estabilizada granulometricamente está determinada no item 5.1 d) da DNIT

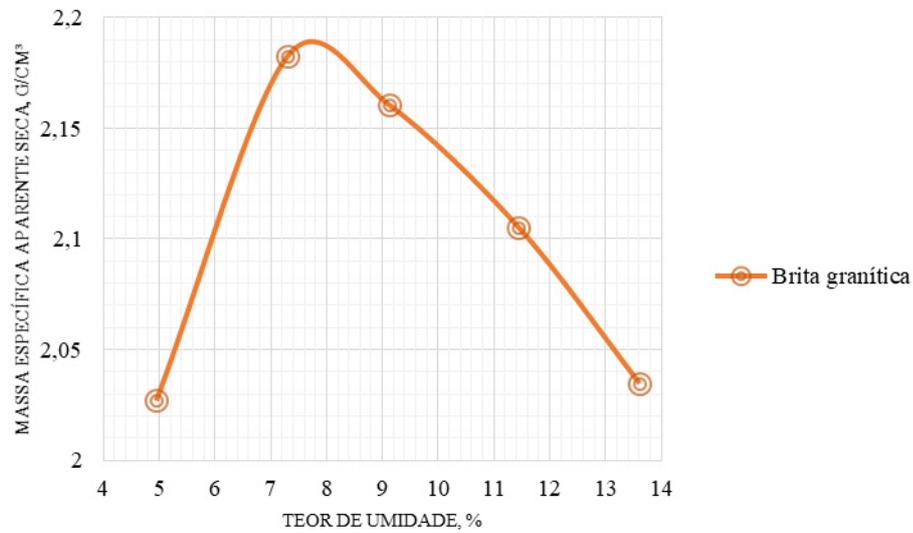
141/2010 - ES, em que o mesmo determina que o desgaste abrasão deve ser inferior a 55% em massa do material. É possível inferir ainda que o material ensaiado pode ser utilizado em camadas de base estabilizada granulometricamente com utilização de solo laterítico, classificação do solo utilizado nesse trabalho, e se enquadra nas especificações da norma DNIT 098/2007 – ES, item 5.3 i), que determina que o desgaste abrasão deve ser inferior a 65% em massa do material. Desta forma, a brita granítica e a brita calcária mostraram-se dentro dos parâmetros exigidos, consolidando a sua aplicabilidade aos fins que este estudo se propõe.

### **4.3 Análise comparativa entre as misturas solo-brita**

#### ***4.3.1 Curva de compactação***

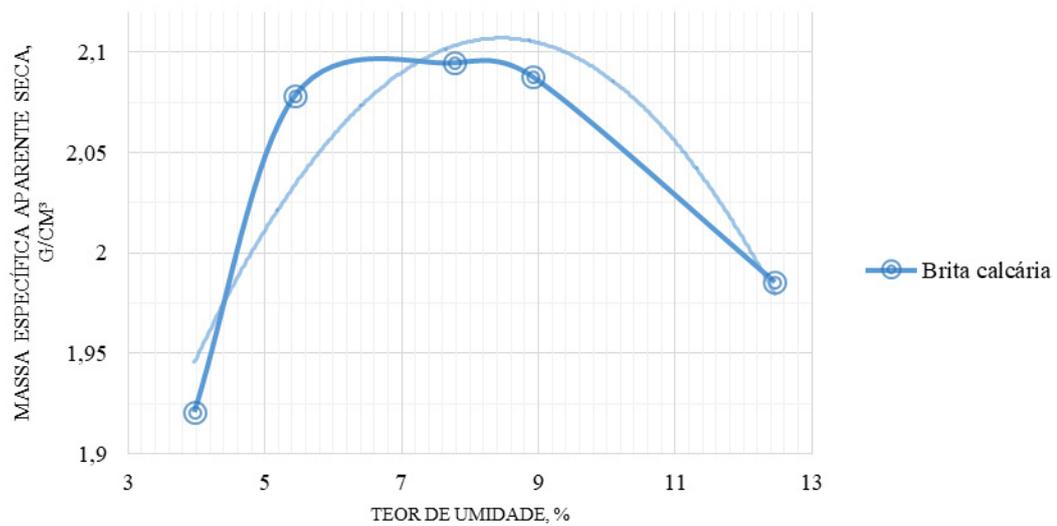
Realizou-se um total de dois ensaios de compactação das misturas solo-brita, sendo um para a brita calcária e um para a brita granítica, conforme determina a norma DNER-ME 162/94, que se utiliza de amostras trabalhadas. Os Gráficos 3 e 4 apresentam as curvas de compactação das misturas solo-brita granítica e solo-brita calcária ensaiados para a energia intermediária, 26 golpes por camada sendo 5 camadas, que fornecem valores de 2,19 g/cm<sup>3</sup> e 2,107 g/cm<sup>3</sup> para a massa específica aparente seca máxima e 7,8% e 8,4% para a umidade ótima para a mistura com brita calcária e com brita granítica, respectivamente.

Gráfico 3 - Curva de compactação da mistura solo-brita granítica.



Fonte: Autora (2019).

Gráfico 4 - Curva de compactação da mistura solo-brita calcária.



Fonte: Autora (2019).

A partir da análise das curvas e da Tabela 10, que traz um resumo dos resultados, é possível verificar que houve acréscimo da umidade ótima ( $h_{ót}$ ) e redução da massa específica seca máxima ( $\gamma_{máx}$ ) da mistura solo-brita calcária em relação a mistura solo-brita granítica. Isso

se deve, principalmente, ao fato da brita de origem calcária absorver maior quantidade de água que a de origem granítica, conforme verificado no ensaio de absorção.

Tabela 10 – Resumo dos resultados dos ensaios de compactação das misturas ensaiadas.

Misturas	Compactação	
	$h_{ót}$ (%)	$\gamma_{máx}$ (g/cm <sup>3</sup> )
M1 (50S+50BG)	7,8	2,19
M2 (50S+50BC)	8,4	2,107

Fonte: Autora (2019).

#### 4.3.2 Módulo de resiliência

Realizou-se um total de dois ensaios de Módulo de Resiliência para as misturas solo-brita, sendo um para a brita calcária e um para a brita granítica. Os ensaios foram realizados a partir da moldagem de um corpo de prova para cada mistura em umidade ótima própria, sendo os CPs produzidos especificamente para este procedimento.

Para a análise dos resultados dos ensaios de MR, foram utilizados os programas Excel e LABFit. O LABFit é um *software* utilizado para tratamento e análise de dados experimentais e ajuste de curvas.

Para avaliar o comportamento resiliente das misturas propostas, se faz necessária uma análise comparativa entre os resultados de MR obtidos para cada um dos materiais e o teste dos melhores modelos que irão representar os seus comportamentos resilientes. Os modelos testados nesta pesquisa foram os modelos clássicos que descrevem comportamentos resilientes de solos e o modelo composto, o qual é representado por uma superfície. Esses modelos relacionam o MR com a tensão desvio ( $\sigma_d$ ), com a tensão confinante ( $\sigma_3$ ) e com as duas tensões simultaneamente.

Os parâmetros de modelagem (valores de K) e os coeficientes de correlação ( $R^2$ ) são apresentados na Tabela 11. Observa-se que os valores de  $R^2$  do modelo composto são superiores aos outros modelos, por isso ele foi o modelo escolhido para a representação dos MRs das misturas investigadas.

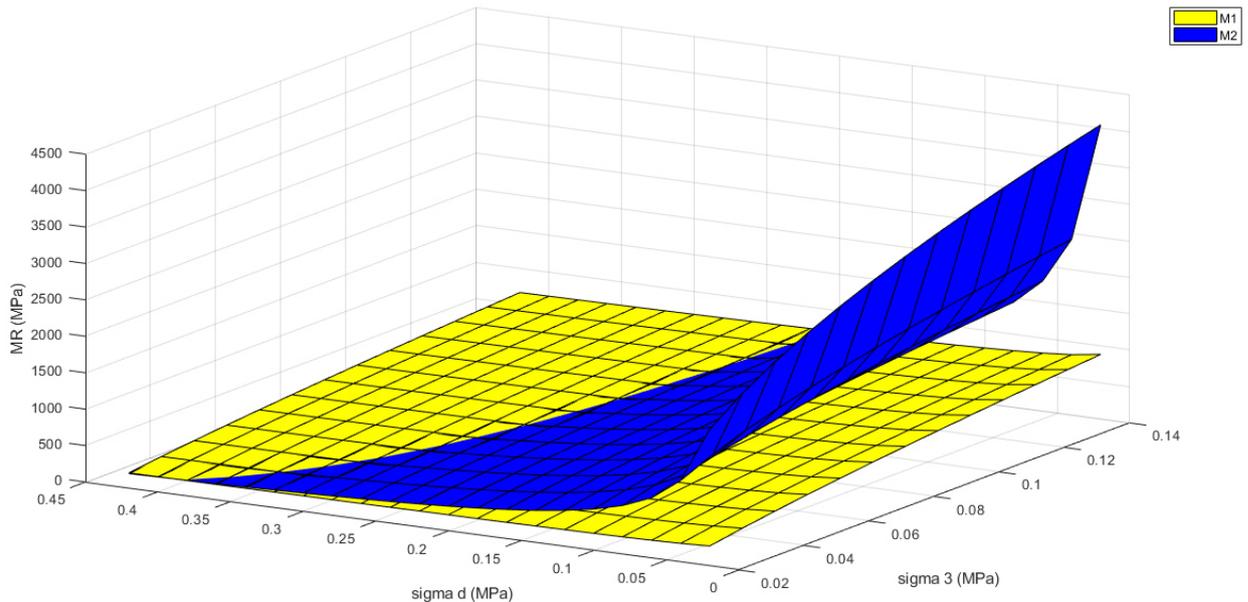
Tabela 11 - Resumo de valores de parâmetro de modelagem e coeficientes de correlação para as misturas.

Mistura	$MR = K_1 \cdot \sigma_3^{K_2}$			$MR = K_1 \cdot \sigma_d^{K_2}$			$MR = K_1 \cdot \sigma_3^{K_2} \cdot \sigma_d^{K_3}$			
	$K_1$	$K_2$	$R^2$	$K_1$	$K_2$	$R^2$	$K_1$	$K_2$	$K_3$	$R^2$
M1	1760,4	0,484	0,858	799,9	0,264	0,389	1986,8	0,601	-0,096	0,884
M2	625,95	-0,07	0,015	376	-0,343	0,425	480,9	0,394	-0,742	0,784

Fonte: Autora (2019).

A Figura 31 apresenta as superfícies que representam o comportamento da mistura solo-brita granítica (M1) e da mistura solo-brita calcária (M2) para o modelo composto testado, obtidas através do *software* Matlab e utilizando o algoritmo elaborado por Gondim (2008), onde se observa que M1 apresenta maiores dependências com a tensão confinante e M2 com a tensão desvio. A Tabela 12 apresenta os valores de módulo de resiliência médio obtidos para cada mistura.

Figura 31 - Comparativo das superfícies das curvas de MR para o caso do modelo composto.



Fonte: Autora (2019).

Tabela 12 - Valores de módulo de resiliência médios.

MR médio	
M1	M2
463 MPa	798 Mpa

Fonte: Autora (2019).

### 4.3.3 Deformação permanente

Realizou-se um total de dois ensaios de Deformação Permanente para as misturas solo-brita, sendo um para a brita calcária e um para a brita granítica, a partir da moldagem de um corpo de prova para cada mistura em umidade ótima própria, sendo os CPs produzidos especificamente para este procedimento. Os resultados estão apresentados nas Tabelas 13 e 14 onde constam os valores da deformação permanente total após a primeira carga ( $\epsilon^1$ ) e a deformação acumulada com 5.000 ciclos ( $\epsilon^{5000}$ ) e 10.000 ciclos ( $\epsilon^{10000}$ ), além do percentual do afundamento acumulado em 50% do ciclo de aplicação de carga ( $\epsilon^{5000}/\epsilon^{10000}$ ).

Tabela 13 - Deformação Permanente Total da mistura solo-brita granítica e suas relações de acúmulo.

Ensaio	Tensão		$\sigma_d/\sigma_3$	$\epsilon^1$ (mm)	$\epsilon^{5000}$ (mm)	$\epsilon^{10000}$ (mm)	$\epsilon^{5000}/\epsilon^{10000}$ (%)
	(KPa)						
	$\sigma_d$	$\sigma_3$					
1	40		1	0,000898	0,051479	0,061927	83,1
2	80		2	0,000027	0,076150	0,080332	94,8
3	120	40	3	0,000025	0,094567	0,099269	95,3
4	160		4	0,000012	0,109879	0,113803	96,6

Fonte: Autora (2019).

Tabela 14 - Deformação Permanente Total da mistura solo-brita calcária e suas relações de acúmulo.

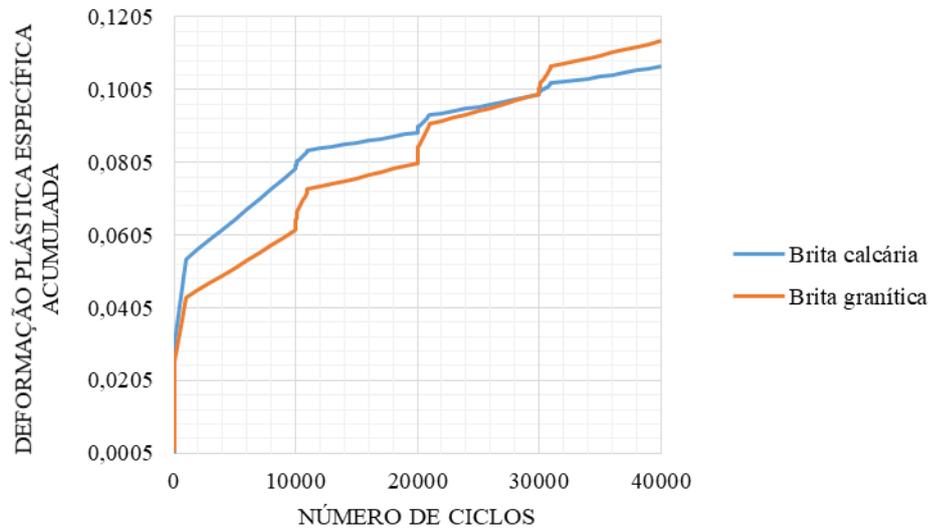
Ensaio	Tensão		$\sigma_d/\sigma_3$	$\epsilon^1$ (mm)	$\epsilon^{5000}$ (mm)	$\epsilon^{10000}$ (mm)	$\epsilon^{5000}/\epsilon^{10000}$ (%)
	(KPa)						
	$\sigma_d$	$\sigma_3$					
1	40		1	0,000517	0,064811	0,078688	82,4
2	80		2	0,000025	0,085880	0,088713	96,8
3	120	40	3	0,000031	0,095837	0,099090	96,7
4	160		4	0,000024	0,104090	0,106898	97,4

Fonte: Autora (2019).

O acúmulo total de DP se concentrou em todos os ensaios realizados nas primeiras 5.000 aplicações de cargas, mostrando que após esse período as misturas tendem a se estabilizar, ou seja, com 50% das cargas programadas aplicadas, o corpo de prova apresenta uma deformabilidade quase irreversível em sua estrutura original. Nesse período, quase todos os ensaios mostraram uma deformação acumulada superior a 90%.

Guimarães (2009) afirma que o valor admissível para deformação permanente em um pavimento é de, no máximo, 12,5 mm. Conforme os resultados expostos, observa-se que os valores de deformação permanente para as amostras estudadas estão bem abaixo desse parâmetro, categorizando-as como de desempenho satisfatório para utilização nas camadas do pavimento. O Gráfico 5 apresenta as deformações acumuladas ao longo do número total de golpes, sendo possível notar os baixíssimos valores de deformação plástica acumulada total, analisando, ainda, que se obteve menores valores para a mistura M2, amostra que contém o material proposto na pesquisa.

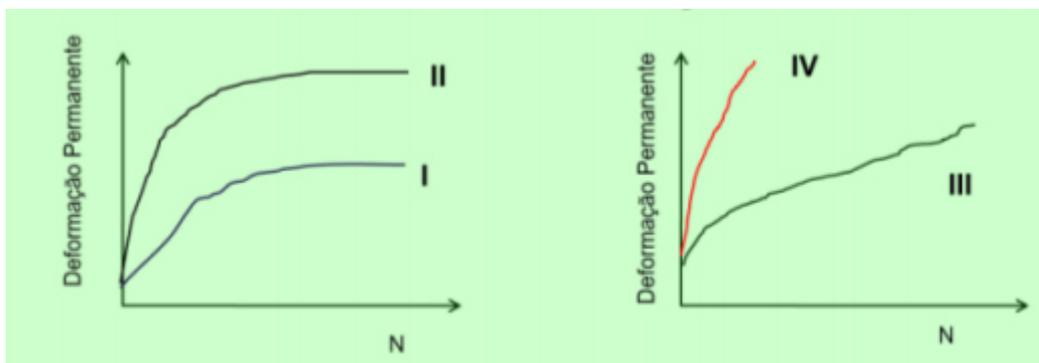
Gráfico 5 - Comparativo das deformações acumuladas totais.



Fonte: Autora (2019).

Pode-se ainda analisar os gráficos acima quanto ao tipo de comportamento do material. De acordo com a norma brasileira para determinação da deformação permanente, DNIT 179/2018 – IE, é possível diferenciar em função dos níveis de tensões alguns tipos de comportamento dos materiais comparados mutuamente, ou mesmo, para cada material, os intervalos de comportamento em relação a resistência à ruptura plástica. A Figura 32 traz os modelos de comportamento à deformação permanente de vários materiais ou de um mesmo material a vários níveis de solicitação de carga cíclica.

Figura 32 - Modelos de comportamento à deformação permanente.

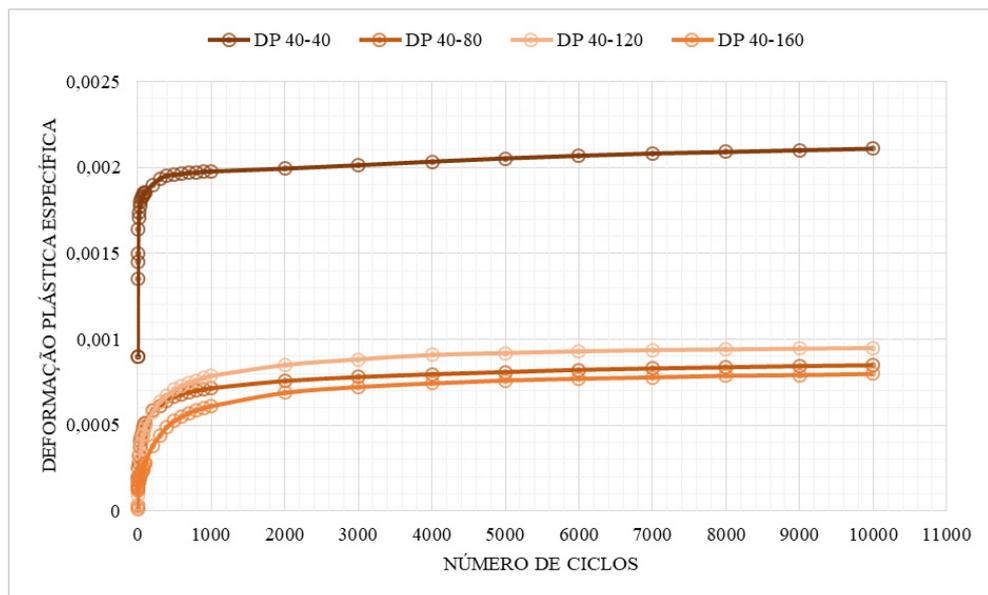


Fonte: DNIT (2018).

Com base no Gráfico 5 e na Figura 32, pode-se classificar o comportamento da mistura solo-brita calcária como tipo 2, chamado de acomodamento plástico ou *shakedown*, onde se percebe a tendência à estabilização de DP com o número de ciclos; e da mistura solo-brita granítica como tipo 3, onde o material continua a acumular DP. Reiterando a conclusão de que a mistura M1 tende a se estabilizar e deforma menos.

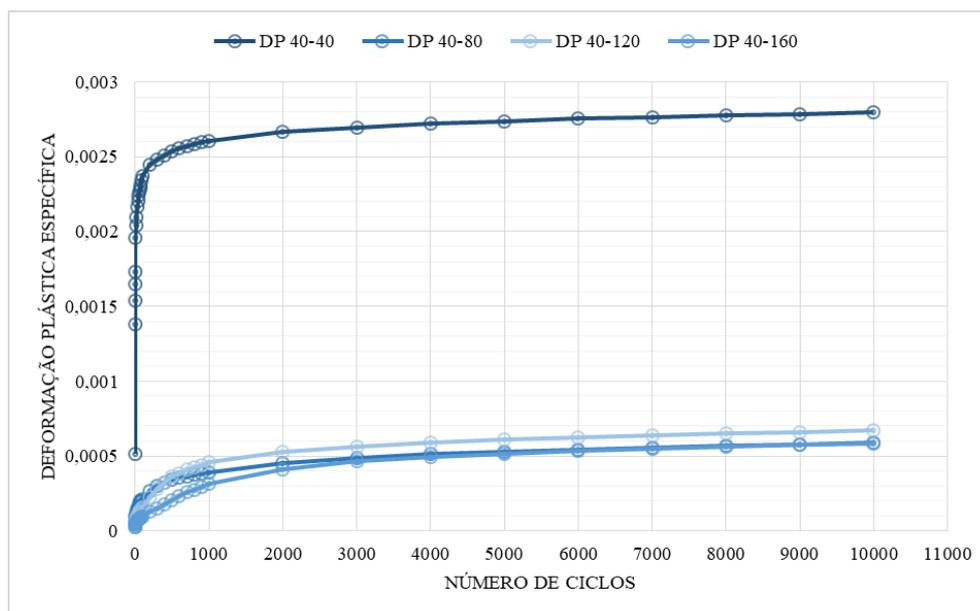
Fundamentado na análise dos Gráficos 6 e 7, é possível observar que para o primeiro par de tensão, 40-40, obtém-se as maiores deformações plásticas dos ensaios e com o passar do tempo e com o aumento das tensões, as deformações diminuíram, principalmente para a mistura M2, com a brita calcária, que possui menores valores de deformação. Dessa forma, o material tem boa resistência à deformação permanente, pois se observa uma tendência a acomodação do mesmo ao longo do ensaio.

Gráfico 6 - Deformação Permanente total para M1.



Fonte: Autora (2019).

Gráfico 7 - Deformação Permanente total para M2.



Fonte: Autora (2019).

Na prática, pode-se afirmar que o material atenderia solicitações ao longo da sua vida útil, e por mais que os níveis de tensões apresentassem acréscimos, o pavimento não sofreria tanto com o aparecimento de trilhas de roda devido a tendência a acomodação do material, principalmente para a mistura M2.

#### 4.4 Dimensionamento do pavimento

Com o objetivo de comparar estruturas de pavimentos flexíveis com a utilização de diferentes materiais em estabilização granulométrica, recorreu-se ao dimensionamento de tais estruturas através do método mecanístico-empírico, que se baseia no trabalho “*Método de Dimensionamento Mecanístico-Empírico de Pavimentos Asfálticos – SISPAV*”, utilizando os resultados obtidos nos ensaios de MR como dados de entrada do programa SisPavBR.

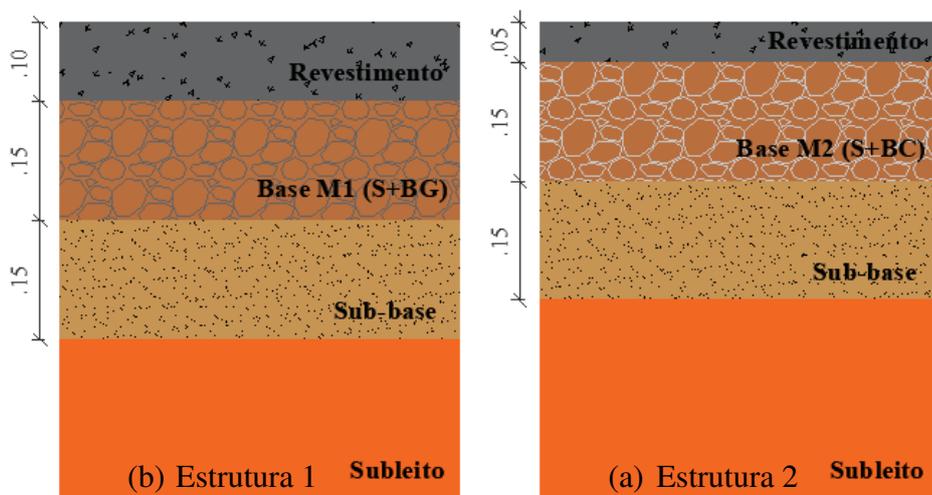
Em conformidade com os valores cadastrados no programa e com a similaridade com a região na qual se baseia o estudo, considerou-se a seguinte estrutura: subleito de solo laterítico com MR constante de 52 MPa; sub-base de solos finos, siltosos ou argilosos com MR constante de 130 MPa e revestimento de Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP) 50/70 com MR

constante de 4193 MPa. Para a camada de base, utilizou-se o modelo composto, visto que melhor representou as misturas estudadas, conforme apresentado no item 4.3.2 do presente trabalho. Os coeficientes de Poisson adotados nesta pesquisa foram:  $\nu = 0,337$  para o revestimento;  $\nu = 0,35$  para base e sub-base e  $\nu = 0,40$  para subleito.

No que diz respeito ao tráfego, dimensionou-se o pavimento considerando o número equivalente N de repetições do eixo simples roda dupla, configurado no programa para o valor de  $5 \times 10^6$  apontado para utilização em rodovias com médio volume de tráfego, durante o período de tempo de projeto de 10 anos.

Dessa forma, obtiveram-se duas estruturas de pavimento com dimensões totais de 40 e 35 cm, respectivamente. Para a Estrutura 1 (EST1), apresentada na Figura 32a, adotou-se um revestimento asfáltico com 10 cm de espessura, base granular composta pela mistura M1 com espessura de 15 cm e sub-base composta por solo fino, siltoso ou argiloso sugerido pelo programa com espessura de 15 cm. Já para a Estrutura 2 (EST2), apresentada na Figura 32b, adotou-se um revestimento asfáltico com 5 cm de espessura, base granular composta pela mistura M2 com espessura de 15 cm e sub-base composta por solo fino, siltoso ou argiloso sugerido pelo programa com espessura de 15 cm. As estruturas teóricas propostas neste trabalho estão apresentadas na Figura 33.

Figura 33 - Estruturas teóricas propostas neste trabalho.



Fonte: Autora (2019).

A estrutura do pavimento proposta neste estudo com a base granular da mistura M2 (EST2) alcançou bom desempenho quando analisada no programa SisPavBR apresentando reduzidos danos críticos e deformações permanentes abaixo do limite aceitável. Já a estrutura com a base granular da mistura M1 (EST1) alcançou resultados bem inferiores apresentando elevados danos críticos, apesar das deformações permanentes estarem, ainda, abaixo do limite aceitável. A EST1 e a EST2 apresentaram, respectivamente, vidas de projeto estimadas de 12,3 e 87 anos e ambas tiveram como dano crítico a fadiga na base do revestimento asfáltico (eixo y), equivalentes a 81,17% e 11,50%. Assim, espera-se que ambas suportem o tráfego para o qual foram dimensionadas, porém com a estrutura contendo material alternativo tendo vida de projeto bem mais elevada que a estrutura convencional e apresentando desempenho mais satisfatório.

Para o dimensionamento dessas estruturas, utilizou-se o comando de análise do programa SisPavBR, após várias tentativas com o comando “dimensionar”, onde sempre alcançava os limites superiores e inferiores, optando, por fim, por estruturas com espessuras mínimas especificadas pelo DNIT e que dessem resultados razoáveis. Quanto à diferença de espessura da camada de revestimento para a EST1, de acordo com a análise realizada para os mesmos valores da EST2, a vida de projeto estimada era de 4,9 anos, mostrando-se como inadequada à aplicação

#### **4.5 Análise financeira**

Para a análise financeira, consultou-se as tabelas de custos da Secretaria de Infraestrutura do Estado do Ceará (SEINFRA-CE) do ano de 2018 com vigência atual e SEINFRA/ANP (Agência Nacional do Petróleo) versão 2019/10 a respeito dos insumos do Grupo Material Betuminoso. Considerou-se o solo com custo zero de aquisição e de transporte. Os custos de aquisição dos agregados foram obtidos em contato com as empresas responsáveis pelo fornecimento e os valores repassados já leva em consideração os custos de transporte. As composições de custos utilizadas foram obtidas pela SEINFRA com alteração no custo do serviço C3139 – Brita produzida para bases.

O trecho esboçado para o comparativo foi de 1 km de comprimento e 7,2 m de largura para as camadas de revestimento (R) e de base (B). Para ambas as estruturas, calculou-

se os custos para construção das camadas de revestimento e de base. Na Tabela 15 e na Tabela 16 estão os custos obtidos para a construção das camadas já mencionadas para ambas as estruturas.

Tabela 15 - Custos para construção das camadas de revestimento e de base da EST1.

<b>Descrição</b>	<b>Unidade</b>	<b>Custo Unitário (R\$)</b>	<b>Quantidade</b>	<b>Total</b>
Execução da camada R (Composição C3155 – Concreto Betuminoso Usinado a Quente com CAP 50/70)	m <sup>3</sup>	575,43	720,0	R\$ 414.309,60
Execução da camada B (Composição C3137 – Base Solo Brita com 50% de Brita Granítica)	m <sup>3</sup>	128,69	1.080,0	R\$ 138.985,20
			<b>Custo Total</b>	<b>R\$ 553.294,80</b>

Fonte: Autora (2019).

Tabela 16 - Custos para construção das camadas de revestimento e de base da EST2.

<b>Descrição</b>	<b>Unidade</b>	<b>Custo Unitário (R\$)</b>	<b>Quantidade</b>	<b>Total</b>
Execução da camada R (Composição C3155 – Concreto Betuminoso Usinado a Quente com CAP 50/70)	m <sup>3</sup>	575,43	360,0	R\$ 207.154,80
Execução da camada B (Composição C3137 – Base Solo Brita com 50% de Brita Calcária)	m <sup>3</sup>	180,01	1.080,0	R\$ 194.410,80
			<b>Custo Total</b>	<b>R\$ 401.565,60</b>

Fonte: Autora (2019).

Comparou-se economicamente a estrutura de pavimento com a base de solo-brita granítica projetada (EST1) com a estrutura com a base de solo-brita calcária (EST2). A comparação foi realizada através de gráficos e tabelas comprovando a hipótese que a EST2,

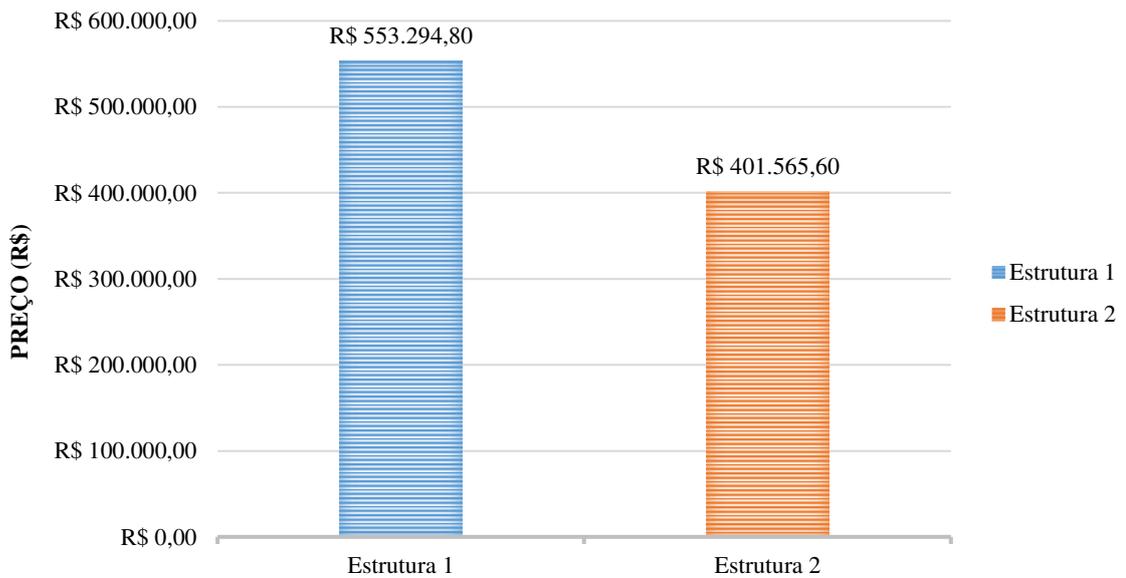
idealizada com material alternativo, oferece menor custo à construção do pavimento pela economia no revestimento. A Tabela 17 e o Gráfico 8 apresentam o comparativo dos preços de construção das camadas de revestimento e de base para as duas estruturas projetadas.

Tabela 17 - Comparativo dos preços de construção das camadas.

<b>Preço em R\$</b>	
<b>EST1</b>	<b>EST2</b>
R\$ 553.294,80	R\$ 401.565,60

Fonte: Autora (2019).

Gráfico 8 - Comparativo dos preços das camadas das estruturas propostas.



Fonte: Autora (2019).

## 5 CONCLUSÃO

O objetivo deste trabalho foi estudar a aplicabilidade da brita calcária da região do Vale do Jaguaribe em camadas de base de solos estabilizados granulometricamente em comparação com a utilização da brita granítica, por meio de ensaios mecânicos. Para isso, foram analisados um total de 4 corpos de prova de dimensões 100x200 mm para ambos materiais. Realizaram-se vários ensaios de caracterização de materiais, mas o enfoque principal é o comportamento mecânico nos ensaios triaxiais de carga repetida para DP e MR a fim de realizar o dimensionamento do pavimento pelo método mecanístico-empírico no programa SisPavBr.

A partir das pesquisas bibliográficas, dos resultados obtidos e das discussões apresentadas, pode-se determinar as seguintes conclusões acerca do estudo:

- A partir dos ensaios de caracterização física realizados com a brita calcária, conclui-se que a mesma atende os requisitos necessários dispostos em norma para ser utilizada para fins de pavimentação, com o desgaste de abrasão “Los Angeles” menor que 55% e, mais especificamente, atende ao requisito de utilização em base estabilizada granulometricamente com utilização de solo laterítico sendo inferior a 65%;
- A mistura proposta na proporção de 50/50 em massa foi determinada empiricamente, baseando-se em Lima (2015), e resultou em uma mistura viável economicamente visto que a execução da estrutura projetada com o agregado alternativo é bem mais barata que com o convencional e ainda oferece a possibilidade de movimentar a economia local, devido a abundância de jazidas apropriadas para exploração;
- A partir dos ensaios mecânicos realizados, conclui-se que o desempenho da mistura solo-brita com o material alternativo apresentou melhores resultados quando comparado a mistura com o agregado convencional, como maiores valores de módulo de resiliência, em média, e menores de deformação permanente;
- Devido ainda às características mecânicas, a estrutura proposta com o material alternativo apresentou um pavimento menos espesso o que resulta em maior facilidade e rapidez de execução, oferecendo assim menor custo financeiro e otimização do tempo de obra, sem perder a qualidade técnica visto que o pavimento com este material apresenta maior vida de projeto estimada mesmo com menores espessuras.

## 5.1 Sugestões para trabalhos futuros

De modo a complementar o estudo desenvolvido neste trabalho, seguem algumas sugestões e recomendações para elaboração de trabalhos posteriores referentes a utilização da brita calcária na pavimentação.

- Construir e acompanhar um trecho experimental na Região do Vale do Jaguaribe com utilização de base de mistura solo + brita calcária para avaliar em campo os resultados de DP obtidos em laboratório;
- Realizar ensaios de deformação permanente com outros pares de tensões, níveis mais elevados de tensões desvio e maiores números de ciclos de aplicação para obter um limite de *shakedown* para brita desta natureza;
- Obter dados suficientes para utilização do *software* MeDiNa visto que melhor se adequa às condições tropicais brasileiras;
- Estudar outras proporções de mistura solo-brita calcária a fim de se obter a melhor composição quanto ao desempenho mecânico para estruturas mais delgadas;
- Utilizar outros tipos de solo, com a mesma proporção de agregado, para avaliar o desempenho em camadas de base e sub-base de pavimentos rodoviários através de um estudo comparativo;
- Verificar a influência da variação da umidade ótima nas características mecânicas visando a alta absorção da brita calcária.

## REFERÊNCIAS

AL-ROUSAN, T.M. **Characterization of Aggregate Shape Properties Using a Computer Automated System**. 2004. Tese (Doutorado em Filosofia) – Texas A&M University, College Station, Texas, Estados Unidos, 2004.

AOKI, J. **Calcário para Cimento**. 2007. Disponível em: <<https://www.cimentoitambe.com.br/calcario-para-cimento/>>. Acesso em: 30 de outubro de 2019.

BAGATINI, F. **Resíduos de Construção Civil: Aproveitamento como Base e Sub-base na Pavimentação de Vias Urbanas**. 2011. Trabalho de Diplomação (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

BALBO, J. T. **Pavimentação Asfáltica: Materiais, Projetos e Restauração**. São Paulo: Oficina de Textos, 2007.

BARROS, K. S. **Estudo de Cinzas Volantes de Uma Termelétrica da Região Metropolitana de Fortaleza-CE para Aplicação em Camadas Granulares de Pavimentos**. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2015.

BENTO, P. F. **Uso de Cal e Fibras na Melhoria de Materiais para Utilização em Estruturas de Pavimentos**. 2006. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Universidade de Brasília, Brasília, 2006.

BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. **Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros**. Petrobras – ABEDA: Rio de Janeiro, 2008.

BESSA, I. S. **Avaliação do Processamento Digital de Imagens como Ferramenta para Caracterização de Agregados e Misturas Asfálticas**. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2012.

CAVALCANTI, V. M. M. **A Indústria de Agregados para Construção Civil na Região Metropolitana de Fortaleza.** Fortaleza: Departamento Nacional de Produção Mineral – DNPM, 2011.

DANTAS, A. R. S. **Influência da Distribuição Granulométrica do Agregado Graúdo na Resistência à Compressão do Concreto Confeccionado com Brita Calcária e Aditivo Plastificante.** 2019. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró, 2019.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-EM 035:** Peneiras de Malhas Quadradas para Análise Granulométrica de Solos. DNER, 1995. 6 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 035:** Agregados – Determinação da Abrasão “Los Angeles”. DNER, 1998. 4 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 041:** Solos – Preparação de Amostras para Ensaios de Caracterização. DNER, 1994. 6 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 080:** Solos – Análise Granulométrica por Peneiramento. DNER, 1994. 4 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 081:** Agregados – Determinação da Absorção e da Densidade de Agregado Graúdo. DNER, 1998. 6 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 082:** Solos – Determinação do Limite de Plasticidade. DNER, 1994. 3 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 083:** Agregados – Análise Granulométrica. DNER, 1998. 5 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 086**: Agregado – Determinação do Índice de Forma. DNER, 1994. 5 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 122**: Solos – Determinação do Limite de Liquidez – Método de Referência e Método Expedido. DNER, 1994. 7 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 162**: Solos – Ensaio de Compactação Utilizando Amostras Trabalhadas. DNER, 1994. 7 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 098 – ES**: Pavimentação – Base Estabilizada Granulometricamente com Utilização de Solo Laterítico. DNIT, 2007. 7 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 134 – ME**: Pavimentação – Solos – Determinação do Módulo de Resiliência. DNIT, 2018. 18 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 141 – ES**: Pavimentação – Base Estabilizada Granulometricamente. DNIT, 2010. 9 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 179 – IE**: Pavimentação – Solos – Determinação da Deformação Permanente. DNIT, 2018. 20 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT. **Manual de pavimentação**. 3. ed. Rio de Janeiro: Instituto de Pesquisas Rodoviárias - IPR, 2006.

DIÓGENES, L. M. **Avaliação das Relações Entre Propriedades de Agregados Minerais com Base nas Características do Processo de Britagem e da Rocha de Origem**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2018.

FIGUEIREDO FILHO, D. B.; SILVA JÚNIOR, J. A. Desvendando os Mistérios do Coeficiente de Correlação de Pearson ( $r$ ). **Revista Política Hoje**, Pernambuco, v. 18, n. 1, p.115-146, jun. 2009. Disponível em: <<https://periodicos.ufpe.br/revistas/politica hoje/>>. Acesso em: 03 de dezembro de 2019.

FRANCO, F. A. C. P. **Método de Dimensionamento Mecânico-Empírico de Pavimentos Asfálticos – SisPav**. 2007. Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia Civil) – COPPE/Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

GONDIM, L. M. **Estudo Experimental de Misturas Solo-Emulsão Aplicado às Rodovias do Agropólo do Baixo Jaguaribe/Estado do Ceará**. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2008.

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

IBIAPINA, D. S. **Proposição de um Sistema de Classificação das Propriedades de Forma de Agregados Caracterizados com o Uso do Processamento Digital de Imagens para a Seleção de Materiais Brasileiros**. 2018. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2018.

INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO – IBRAM. 2011. Disponível em: <<http://www.ibram.org.br/>>. Acesso em: 04 de novembro de 2019.

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

LIMA, C. D. A.; MOTTA, L. M. G. Influência da Variação Granulométrica de Brita Graduada Simples na Deformação Permanente. In: ANPET – CONGRESSO DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTES, 29, 2015. **Anais...** Ouro Preto, Brasil, 2015a.

LIMA, F. C. **Uso de Agregados de Rochas Calcárias para Camadas de Pavimentos Estabilizadas Granulometricamente**. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) - Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2015.

MARQUES, G. L. O. **Pavimentação**. Notas de Aula – Universidade Federal de Juiz de Fora. Juiz de Fora, 2018. Disponível em: <<http://www.ufjf.br/pavimentacao/files/2009/03/Notas-de-Aula-2018.pdf>>. Acesso em: 04 de novembro de 2019.

MASAD E.; AL-ROUSAN T.; BUTTON J.; LITTLE D. **Appendixes to NCHRP Report 555: Test Methods for Characterizing Aggregate Shape, Texture, and Angularity**. Washington DC: Transportation Research Board, 2005. DOI: 10.17226/23206.

MASAD E.; AL-ROUSAN T.; BUTTON J.; LITTLE D.; TUTUMLUER E. **Test Methods for Characterizing Aggregate Shape, Texture, and Angularity**. Report NCHRP – 555, National Cooperative Highway Research Program. National Research Council, Washington, DC, 2007. DOI: 10.17226/14017.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA – MME. 2014. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br/>>. Acesso em: 01 de outubro de 2019.

MORAIS, A. A. C. **Análise Comparativa da Brita Calcária, Beneficiada de Diferentes Formas, para Utilização em Concreto como Agregado Graúdo**. 2016. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró, 2016.

NORBACK, C. **Caracterização do Módulo de Resiliência e da Deformação Permanente de Três Solos e Misturas Solo-Brita**. 2018. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018.

ONOFRE, F. C. **Avaliação do Comportamento Mecânico de Misturas Asfálticas Produzidas com Ligantes Asfálticos Modificados por Ácido Polifosfórico e Aditivos Poliméricos, Enfatizando a Resistência à Deformação Permanente**. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2012.

ORTIGÃO, J. A. R. **Introdução à Mecânica dos Solos dos Estados Críticos**. 3. ed. Rio de Janeiro: Terratek, 2007.

PINTO, C. S. **Curso Básico de Mecânica dos Solos em 16 Aulas**. 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

QUARESMA, L. F. **Agregados para Construção Civil**. Perfil da Brita para Construção Civil. MME. MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA Contrato N° 48000.003155/2007-17: Desenvolvimento de estudos para elaboração do plano duodecenal (2010-2030) de geologia, mineração e transformação mineral. Banco Internacional para a Reconstrução e Desenvolvimento – BIRD. 2009. Disponível em: <[http://www.mme.gov.br/.../P22\\_RT30\\_Perfil\\_de\\_brita\\_para\\_construxo\\_civil.pdf](http://www.mme.gov.br/.../P22_RT30_Perfil_de_brita_para_construxo_civil.pdf)>. Acesso em: 30 de outubro de 2019.

SAMPAIO, J. A. e ALMEIDA, S. L. M. de. **Calcário e Dolomito**. CENTRO DE TECNOLOGIA MINERAL – CETEM. 2005. Disponível em: <<http://mineralis.cetem.gov.br/bitstream/cetem/1051/1/15.calcarioedolomita.pdf>>. Acesso em: 30 de outubro de 2019.

**SECRETARIA DA INFRAESTRUTURA DO CEARÁ – SEINFRA**. 2018. Disponível em: <<https://www.seinfra.ce.gov.br/tabela-de-custos/>>. Acesso em: 23 de outubro de 2019.

SENÇO, W. de. **Manual de Técnicas de Pavimentação**, volume 1. 2. ed. ampl. São Paulo: Pini, 2007.

SENÇO, W. de. **Manual de Técnicas de Pavimentação**, volume 2. 1. ed. São Paulo: Pini, 2001.

SILVA, B. T. A. **Utilização de Materiais Alternativos para a Construção de Pavimentos Urbanos na Região Metropolitana de Fortaleza**. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2009.

SILVA, C. F. S. C. **Análise de Tensões em Pavimentos a Partir de Modelo Físico Instrumentado**. 2014. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil) – COPPE/Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.

SILVA, J. O. **Perfil do Calcário**. MME. MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA Contrato Nº 48000.003155/2007-17: Desenvolvimento de estudos para elaboração do plano duodecenal (2010-2030) de geologia, mineração e transformação mineral. Banco Internacional para a Reconstrução e Desenvolvimento – BIRD. 2009. Disponível em: <  
[http://www.mme.gov.br/.../P27\\_RT38\\_Perfil\\_do\\_Calcxrio.pdf](http://www.mme.gov.br/.../P27_RT38_Perfil_do_Calcxrio.pdf)>. Acesso em: 30 de outubro de 2019.

SILVA JÚNIOR, F. A. **Avaliação do Efeito da Adição do Resíduo de Borracha de Pneu e Brita Calcária na Formação de Compósitos Cimentícios**. 2014. Tese (Doutorado em Ciências e Engenharia de Materiais) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2014.

SOUSA, R. L. O. de. **Caracterização Geotécnica dos Solos do Baixo Jaguaribe para Uso em Pavimentação**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Ceará, Russas, 2019.

UIENO, M. S. **Estudo da Estabilização Granulométrica de Solos da Região de SINOP – MT, para Fins de Pavimentação**. 2011. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade do Estado do Mato Grosso, Mato Grosso, 2011.

VASCONCELOS, S. D. **Avaliação das Cinzas de Carvão Mineral Produzidas em Usina Termelétrica para Construção de Camadas de Pavimentos**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2018.