



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO
CENTRO DE ENGENHARIAS - CE
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

MIRLA GÉSSICA LIRA ARAÚJO

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE SOLO ESTABILIZADO COM
RESÍDUO DE BRITAGEM DE ROCHA CALCÁRIA PARA EMPREGO DE
CAMADAS DE PAVIMENTO**

MOSSORÓ

2019

MIRLA GÉSSICA LIRA ARAÚJO

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE SOLO ESTABILIZADO COM
RESÍDUO DE BRITAGEM DE ROCHA CALCÁRIA PARA EMPREGO DE
CAMADAS DE PAVIMENTO**

Monografia apresentada a Universidade
Federal Rural do Semi-Árido como requisito
para obtenção do título de Engenheira Civil.

Orientador: Prof. Dra. Marília Pereira de
Oliveira

Coorientador: Prof. Felipe Augusto Dantas De
Oliveira

MOSSORÓ

2019

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

A658e Araújo, Mirla Géssica Lira .
ESTUDO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE SOLO
ESTABILIZADO COM RESÍDUO DE BRITAGEM DE ROCHA
CALCÁRIA PARA EMPREGO DE CAMADAS DE PAVIMENTO /
Mirla Géssica Lira Araújo. - 2019.
49 f. : il.

Orientadora: Marília Pereira de Oliveira.
Coorientador: Felipe Augusto Dantas De
Oliveira.
Monografia (graduação) - Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Curso de Engenharia Civil,
2019.

1. Granulometria. 2. Sustentabilidade. 3. ISC.
4. Índices Físicos. I. Oliveira, Marília Pereira
de , orient. II. Oliveira, Felipe Augusto Dantas
De, co-orient. III. Título.

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

MIRLA GÉSSICA LIRA ARAÚJO

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE SOLO ESTABILIZADO COM
RESÍDUO DE BRITAGEM DE ROCHA CALCÁRIA PARA EMPREGO EM
CAMADAS DE PAVIMENTO**

Monografia apresentada a Universidade
Federal Rural do Semi-Árido como requisito
para obtenção do título de Engenheiro Civil.

Defendida em: 12 / 08 / 2019.

BANCA EXAMINADORA

Marília Pereira de Oliveira

Marília Pereira de Oliveira, Prof. Dr. (UFERSA)
Presidente

Felipe Augusto Dantas de Oliveira

Felipe Augusto Dantas de Oliveira, Prof. (UFERSA)
Membro Examinador

Manoel Leandro Araújo e Farias

Manoel Leandro Araújo e Farias, Prof. Me. (UFERSA)
Membro Examinador

Cláudia Yanara Meira da Costa

Cláudia Yanara Meira da Costa, Eng.
Membro Examinador

À minha amada avó Maria Ceci, que sempre me amparou e sonhou esse momento juntamente comigo, o meu eterno amor e gratidão. (In Memoriam).

À minha mãe Mirtes Lira e família, pela capacidade de acreditar em mim e investir na minha educação. A vocês todo o meu amor. (Presentes).

AGRADECIMENTOS

A Deus, por nunca ter me desamparado, dando saúde, entendimento e força para superar as dificuldades.

A minha mãe e família que acreditaram na realização deste trabalho e deram-me forças e estímulo para prosseguir.

Aos meus amigos, em especial: Marina, Erik, João, Laís e Gledson, que ajudaram a tornar os dias difíceis mais leves.

À minha orientadora Marilia Pereira de Oliveira pela atenção e apoio.

Ao meu coorientador Felipe Augusto Dantas de Oliveira por toda ajuda, paciência e correções.

Aos companheiros de laboratório pela ajuda no decorrer dos ensaios.

A todos aqueles que contribuíram direta ou indiretamente e fizeram parte da minha formação, o meu muito obrigado.

RESUMO

A reutilização de resíduos como materiais para aplicação em obras rodoviárias é cada vez mais recorrente. O estado do Rio Grande do Norte, principalmente na região Oeste Potiguar, possui rocha calcária em abundância, a qual é utilizada no processo de fabricação de materiais de construção, como a brita calcária. A produção desse material acaba por gerar grande quantidade de resíduos sem uma utilização claramente definida, e como alternativa, é possível reutilizá-lo para estabilização de camadas de pavimentos. O presente trabalho teve por objetivo avaliar o comportamento mecânico do resíduo da britagem de rocha calcária (RBRC) como material estabilizante em camadas de pavimentos, onde para isso foi realizada a caracterização geotécnica dos materiais, como também, os ensaios mecânicos de compactação e Índice de Suporte Califórnia (ISC). Com a caracterização geotécnica foi verificado que o solo estabilizado se aproximou mais de uma areia bem-graduada com silte, classificando-se como A-3. Já o RBRC foi como SM pelo SUCS e como A-2-4 pelo sistema TRB. Para as misturas solo-resíduo, verificou-se que as novas granulometrias com teores de 20%, 35% e 50% de RBRC, houve um crescimento nos valores de ISC para as misturas solo-resíduo, proporcional ao aumento desses teores, cujos resultados foram, respectivamente, de 63,91%, 64,34% e 73,49%. De acordo com os parâmetros do DNIT, foi verificado que o RBRC apresenta potencial para ser empregado como estabilizante em camadas granulares de pavimentos.

Palavras-chave: Granulometria. Sustentabilidade. ISC. Índices Físicos.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Estrutura de Pavimento Flexível.....	21
Figura 2 - Estrutura de Pavimento Rígido	21
Figura 3 - Fluxograma de atividades realizadas na fase experimental	28
Figura 4 - Marcação dos pontos de coleta das amostras de solo	30
Figura 5 - Coleta das amostras 1, 2, e 3 de solo	30
Figura 6 – Local de coleta do RBRC.....	31
Figura 7 - Amostras dos solos coletados	31
Figura 8 - Material retido no peneiramento do RBRC	32
Figura 9 - Aplicação de pressão a vácuo na amostra de solo mais água	32
Figura 10 - Ensaio do limite de liquidez (a) e teste de plasticidade (b) para o RBRC.....	33
Figura 11 - Execução do ensaio de compactação a energia intermediária	34
Figura 12 - Distribuição granulométrica das amostras de solo	37
Figura 13 - Curva granulométrica da amostra de RBRC.....	39
Figura 14 – Curva de compactação do solo.....	42
Figura 15 - Curvas de compactação das misturas Solo - RBRC	42
Figura 16 - Comportamento ISC em relação ao teor de RBRC	44

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Sistema unificado de classificação dos solos	19
Quadro 2 - Sistema rodoviário de classificação dos solos	19
Quadro 3 - Faixas de composição granulométrica para base	25
Quadro 4 - Coordenadas geográficas dos pontos de coleta das amostras de solo	29

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Frações de solos	17
Tabela 2 - Resultados dos ensaios de caracterização	37
Tabela 3 - Propriedades físicas e classificação do RBRC	39
Tabela 4 - Percentual de RBRC e solo para as misturas granulométricas (Faixa F).....	41
Tabela 5 - Propriedades de compactação para solo e amostras estabilizadas	43
Tabela 6 - Resultados de Índice de Suporte Califórnia (ISC) (%)	43
Tabela 7 – Resultados da expansão	44

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
2	OBJETIVOS	14
2.2	OBJETIVO GERAL	14
2.3	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	14
3	REFERENCIAL TEÓRICO	15
3.2	SOLO.....	15
3.2.1	Índices Físicos.....	16
3.2.2	Textura do Solo	16
3.2.3	Limites de Consistência	17
3.2.4	Classificação dos Solos.....	18
3.3	PAVIMENTO.....	20
3.3.1	Seleção de materiais para base, sub-base e reforço do subleito.....	21
3.3.2	Propriedades mecânicas para materiais de base, sub-base e reforço do subleito 22	
3.4	ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS.....	23
3.4.1	Estabilização Mecânica	24
3.4.2	Estabilização Química	24
3.4.3	Estabilização Granulométrica	24
3.5	REUTILIZAÇÃO RESÍDUOS GERADOS NA CONSTRUÇÃO CIVIL	25
3.5.1	Uso de calcário em pavimentação.....	26
4	METODOLOGIA.....	28
4.2	SELEÇÃO DOS MATERIAIS	29
4.3	COLETA DOS MATERIAIS.....	29
4.3.1	Solos.....	29
4.3.2	Resíduo.....	30
4.4	PREPARO DAS AMOSTRAS	31
4.5	ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO FÍSICA.....	31
4.5.1	Análise Granulométrica	32
4.5.2	Massa Específica dos Grãos	32
4.5.3	Limites de Consistência	33
4.5.4	Classificação Geotécnica	33

4.6	COMPOSIÇÃO DAS MISTURAS.....	33
4.7	ENSAIOS MECÂNICOS.....	34
4.7.1	Ensaio de Compactação.....	34
4.7.2	Índice de Suporte Califórnia.....	35
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	36
5.2	CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA	36
5.2.1	Solos.....	36
5.2.2	Resíduo.....	38
5.3	COMPOSIÇÃO DAS MISTURAS SOLO-RBRC	40
5.4	CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA	41
5.4.1	Compactação	41
5.4.2	Índice de Suporte Califórnia.....	43
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	46
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	47

1 INTRODUÇÃO

Sabe-se que o solo é um material abundante e tem grande emprego em obras rodoviárias, porém por ter grande variabilidade nem sempre suas propriedades irão atender satisfatoriamente os requisitos de projeto para aplicação em camadas de pavimentos. Existem regiões onde há dificuldades de encontrar materiais adequados ao uso em projetos rodoviários, como alternativa há a remoção e substituição do solo de origem por materiais com características geotécnicas satisfatórias, porém, em muitas situações, o transporte de grandes volumes a grandes distâncias onera a construção (AZÊVEDO, 2010). Nesse caso, se faz necessário a substituição do material por um de melhor qualidade ou correção de suas propriedades, alternativa chamada de estabilização de solos.

De acordo com Santos (2012), para estabilizar um solo pode ser feito a correção granulométrica, bem como a aplicação de métodos físico-químicos, para isso é comum serem utilizados aditivos como a cal, cimento ou ainda materiais alternativos.

Segundo o relatório publicado pelo Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (2012) em relação ao manejo dos resíduos sólidos da construção civil (RCC), apenas 392 municípios do Brasil (9,7%) possuem alguma forma de processamento dos RCC. No Rio Grande do Norte, mais precisamente na mesorregião do oeste potiguar, encontra-se a maior jazida de rocha calcária do país, atingindo uma área de aproximadamente 20.000 quilômetros quadrados, com uma espessura de 50 a 400 metros de profundidade (DNPM, 2015), onde ao final dos processos de britagem e peneiramento da rocha calcária, é gerado em grande quantidade um resíduo granular heterogêneo, chamado de Resíduo de Britagem de Rocha Calcária (RBRC).

Haja vista a abundância desse resíduo da região e a ausência de um destino adequado, ainda associado a necessidade de materiais alternativos para estabilização de solos que sejam economicamente viáveis, é pertinente analisar o material como alternativa de material estabilizante. Fazendo-se necessário, então, avaliação de suas propriedades mecânicas, de modo que não ocorra mistura de resíduos de qualidade inferior à do material, e consequentemente, não seja afetada a vida útil do pavimento, pois uma vez que os requisitos de projeto sejam atendidos, com a utilização podem ser diminuídos danos socioambientais causados pela ineficiente destinação, e ainda, reduzidos os custos da obra.

Diante disso, a pesquisa, através dos seus resultados, propôs a análise do comportamento mecânico de solo estabilizado com resíduo de britagem de rocha calcária, visando a redução dos custos das obras rodoviárias na região, como também, destino para o grande volume de resíduos estocados sem finalidade adequada. Para isso, foram realizados estudos avaliando as

propriedades físicas e mecânicas de solo estabilizado com o RBRC, visando, principalmente, a aplicação em camadas de pavimentos.

2 OBJETIVOS

2.2 OBJETIVO GERAL

Avaliar o comportamento mecânico do resíduo da britagem de rocha calcária como material estabilizante em camadas de pavimentos.

2.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar de ensaios de caracterização geotécnica do solo e resíduo;
- Classificar os materiais pelos sistemas mais usuais de classificação de solos;
- Obter as proporções adequadas de solo e resíduo para estabilização;
- Avaliar a influência do resíduo na resistência mecânica do material estabilizado.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

Na Construção Civil a maior parte das obras se assentam sobre o aterro, sendo assim indispensável que o comportamento do solo seja considerado, este, embora heterogêneo, também é o material mais empregado em obras devido a sua abundância, facilidade de obtenção e manuseio.

Dentre as várias áreas da engenharia civil, o investimento em infraestrutura rodoviária vem crescendo ao longo do tempo, onde, a matéria prima de execução das camadas de corpo de aterro, subleito, reforço do subleito, sub-base e base é o solo. De acordo com Bernucci *et al.* (2008) as estruturas de pavimento são dimensionadas para resistir as diversas solicitações de carga, dentro do período de projeto, de modo que danos estruturais fora do aceitável e previsto sejam evitados. O autor ainda ressalta, que para se dimensionar adequadamente uma estrutura de pavimento, deve-se conhecer bem as propriedades dos materiais que a compõem, sua resistência à ruptura, permeabilidade e deformabilidade.

Uma vez verificado que o solo não possui propriedades adequadas para suportar as cargas impostas ao pavimento, se faz necessário buscar soluções para que o material satisfaça os requisitos de projeto. Segundo Medina (1997), as possíveis soluções são remover o solo ruim e substituí-lo por outro de qualidade superior; projetar a obra para situação na qual o terreno se encontra; ou estabilizar o solo existente.

3.2 SOLO

Pelo ponto de vista da engenharia, o solo pode ser definido como um material que surge na natureza a partir do intemperismo, que se trata de um conjunto de processos físicos, químicos e biológicos que ocasionam a desintegração e decomposição das rochas e dos minerais (SANTOS, 2012). Das (2007) também trata o solo de modo semelhante, definindo-o como um agregado não cimentado de grãos minerais e matéria orgânica decomposta (partículas sólidas), com líquidos e ar nos espaços vazios entre as partículas sólidas, tendo então um caráter polifásico.

No caso de solos classificados como granulares, é possível desprezar o efeito da água em virtude da pouca proporção entre volume de água e das partículas, ou seja, quando se trata de solos compostos de partículas de grandes dimensões não há relação entre a natureza mineralógica da fração sólida do solo e a água. Já nos argilosos, o efeito da água é determinante,

pode-se considerar que há uma interação mútua entre grãos e água, refletindo nas suas propriedades (AZEVEDO, 2010).

Tendo em vista a ampla utilização do solo como material de construção e de sustentação das obras, o conhecimento de propriedades como origem, distribuição dos grãos, compressibilidade, resistência ao cisalhamento e capacidade de carga são essenciais, como forma de prever o seu comportamento diante das solicitações de projeto.

3.2.1 Índices Físicos

As propriedades do solo estão ligadas diretamente as suas três fases, logo é necessário conhecer a relação proporcional que existe entre estas, exemplo é que quando há redução no volume vazios, a resistência do material aumenta (PINTO, 2006).

Diante disto, alguns índices foram criados para relacionar os volumes e pesos das três fases, tornando possível identificar o estado de um solo. Alguns desses índices estão definidos conforme Pinto (2006):

- Umidade (w , h): relação entre o peso da água e o peso dos sólidos;
- Índices de Vazios (e): relação entre o volume de vazios e o volume das partículas sólidas;
- Porosidade (η): relação entre o volume de vazios e o volume total;
- Grau de Saturação (S , S_r): relação entre o volume da água e o volume de vazios;
- Peso Específico dos Sólidos (grãos) (γ_s): relação entre o peso das partículas sólidas e o seu volume;
- Peso Específico Natural (γ_{nat}): relação entre o peso total do solo e o seu volume total;
- Peso Específico Aparente Seco (γ_d): relação entre o peso dos sólidos e o volume total. É calculado a partir do peso específico natural e da umidade;

3.2.2 Textura do Solo

Em um solo há partículas de tamanhos diversos, sendo sua textura definida pela proporção relativa das classes de tamanho dessas partículas. Para reconhecimento do tamanho dos grãos realiza-se a análise granulométrica, que consiste em duas fases: peneiramento e sedimentação (PINTO, 2006). De acordo com Silva (2001), a textura é arenosa quando a fração de areia ultrapassa 85%; argilosa se o percentual de argila for em torno de 35%; e barrenta se

apresentar as três frações (areia, silte e argila) em quantidades proporcionais. Uma das formas de se diferenciar os tipos de solos é através do tamanho das partículas, segundo a NBR (Norma Brasileira Regulamentadora) 6502 (1995), conforme podemos observar na Tabela 1.

Tabela 1 - Frações de solos

Fração	Limites
Bloco de rocha	> 1 m
Matacão	200 mm a 1 m
Pedra-de-mão	60 mm a 200 mm
Pedregulho	2,0 mm a 60 mm
Areia grossa	0,6 mm a 2,0 mm
Areia média	0,2 mm a 0,6 mm
Areia fina	0,06 mm a 0,2 mm
Silte	0,002 mm a 0,06 mm
Argila	< 0,002 mm

Fonte: NBR 6502 (1995)

3.2.3 Limites de Consistência

A fração fina dos solos tem influência bastante significativa no seu comportamento, para um mesmo percentual de argila, o solo pode ter características bem diferentes que irão depender da sua composição mineralógica, onde, esse solo pode ser remoldado na presença de alguma umidade sem desagregar, assim só a distribuição granulométrica não o caracteriza bem (DAS, 2007).

Para analisar a influência das partículas argilosas no solo, a engenharia adota a verificação do comportamento na presença de água, conhecidos por limites de consistência ou de Atterberg, são eles: limite de liquidez (LL) e limite de plasticidade (LP).

A determinação do limite de liquidez é feita pelo aparelho de Casagrande, e é definido como o teor de umidade do solo com o qual uma ranhura nele feita requer 25 golpes (quedas de altura de 1 cm e intensidade constante) para se fechar numa concha (CAPUTO, 1988). Ainda segundo Das (2007), o limite de liquidez trata-se do teor de umidade no ponto de transição do estado plástico para o estado líquido. No Brasil, a padronização deste ensaio é realizada pela NBR 6459 (1984).

O limite de plasticidade, por sua vez, é determinado pelo menor teor de umidade para o qual o solo começa se fraturar quando se tenta moldar um cilindro de 3 mm de diâmetro e de 10 cm de comprimento, rolando-se o solo com a palma da mão (PINTO, 2006). Este teor representa o ponto de transição do estado semissólido para o estado plástico. No Brasil este ensaio é padronizado pela NBR 7180/1984.

3.2.4 Classificação dos Solos

Diante do que já foi citado em relação aos solos, ficou claro que suas propriedades podem variar bastante, onde solos diferentes com propriedades similares podem ser classificados em grupos e subgrupos. Em virtude disto, sistemas de classificação foram criados, indicando características geotécnicas semelhantes para determinados grupos de solos.

Hoje, dois sistemas de classificação são usualmente empregados no Brasil, os quais levam em consideração os índices de Atterberg e granulometria, sendo eles: Sistema Unificado de Classificação (SUCS), idealizado por A. Casagrande; e o Sistema Rodoviário de Classificação (HBR), que é o mais empregado atualmente para uso em estradas.

3.2.4.1 Sistema Unificado de Classificação dos Solos

Segundo Pinto (2006), de maneira geral, os solos estão distribuídos em 5 grupos: pedregulhos (G), areias (S), siltes inorgânicos e areias finas (M), argilas inorgânicas (C), e siltes e argilas orgânicos (O). Cada grupo é então dividido em subgrupos de acordo com suas propriedades e índices mais significativos. Os solos grossos possuem diâmetro da maioria absoluta maior que 0,074 mm (mais que 50% em peso, dos seus grãos, são retidos na peneira nº 200); e os solos finos diâmetro da maioria absoluta dos grãos é menor que 0,074 mm.

Quadro 1 - Sistema unificado de classificação dos solos

Classificação Geral	Tipos Principais	Símbolos
SOLOS GROSSOS (%P #200 < 50)	Pedregulhos ou Solos Pedregulhosos	GW, GP, GM e GC
	Areias ou Solos Arenosos	SW, SP, SM e SC
SOLOS FINOS (%P # 200 >50)	Siltosos	(LL < 50) ML, CL e OL
	Argilosos	(LL > 50) MH, CH e OH

Fonte: PINTO (2006)

3.2.4.2 Sistema Rodoviário de Classificação

O Sistema Rodoviário de Classificação, também denominado Classificação TRB, é o método mais adotado em obras rodoviárias, sendo também baseado na granulometria e nos limites de Atterberg, diferencia-se em relação a Classificação Unificada por considerar como solos de granulação grosseira os que têm menos de 35% passando na peneira de nº 200, estes seriam os solos A-1, A-2 e A-3. Os solos com mais de 35% que passam na mesma peneira formam os grupos A-4, A-5, A-6, e A-7, havendo ainda subdivisões como demonstrado no Quadro 2 (DAS, 2007).

Quadro 2 - Sistema rodoviário de classificação dos solos

(continua)

Classificação Geral	Materiais Granulares (35% ou menos da amostra total passa na N° 200)						
	A-1		A-3	A-2			
	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7
Classificação do grupo							
Ensaio de Peneiramento (porcentagem que passa)							
N° 10	50 máx						
N° 40	30 máx	50 máx	51 mín				
N° 200	15 máx	25 máx	10 máx	35 máx	35 máx	35 máx	35 máx
Características da fração que passa na N° 40							
Limite de liquidez				40 máx	41 mín	40 máx	41 mín
Índice de plasticidade		6 máx	NP	10 máx	10 máx	11 mín	11 mín

Quadro 2 - Sistema rodoviário de classificação dos solos

(conclusão)

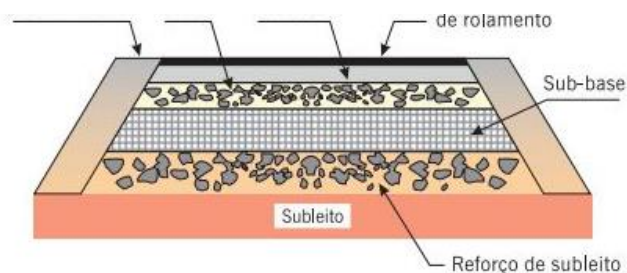
Classificação Geral	Materiais Argilo-Siltosos (mais de 35% da amostra total passa na N° 200)				
Classificação do grupo	A-4	A-5	A-6	A-7-5	A-7-6
Ensaio de Peneiramento (porcentagem que passa) N° 10 N° 40 N° 200	36 mín	36 mín	36 mín	36 mín	36 mín
Características da fração que passa na N° 40					
Limite de liquidez	40 máx	41 mín	40 máx	41 mín	41 mín
Índice de plasticidade	10 máx	10 máx	11 mín	11 mín	11 mín

Fonte: ADAPTADO DAS (2007)

3.3 PAVIMENTO

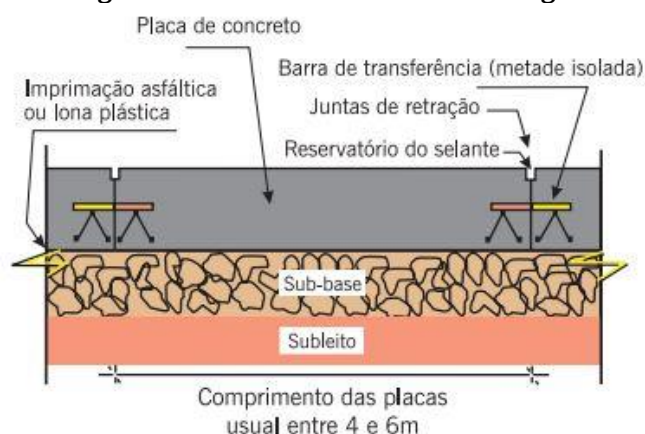
O pavimento de uma rodovia é uma superestrutura de múltiplas camadas de espessuras finitas, assentes sobre a superfície final de terraplenagem, a qual é designada de subleito (DNIT, 2006). Essas camadas são projetadas de modo a receber e transmitir os esforços provocados pelo tráfego, propiciando aos usuários melhoria nas condições de rolamento, conforto, economia e segurança. Para que isso seja possível, todos os seus integrantes devem estar sujeitos a deformações compatíveis com a sua natureza, evitando, assim, ruptura ou danos prematuros em suas camadas (BALBO, 2007).

Os pavimentos são divididos em três categorias, os flexíveis, os semirrígidos, e os rígidos. Os flexíveis são aqueles em que o revestimento é composto basicamente por uma mistura de agregados e ligantes asfálticos. É formado por quatro camadas principais: revestimento asfáltico, base, sub-base e reforço do subleito (Figura 1), onde todas sofrem deformação elástica significativa sob o carregamento aplicado e, portanto, a carga se distribui em parcelas aproximadamente iguais entre as camadas (BERNUCCI *et al.*, 2008).

Figura 1 - Estrutura de Pavimento Flexível

Fonte: BERNUCCI, 2008

O pavimento rígido caracteriza-se por ter um revestimento com elevada rigidez em relação às camadas inferiores, absorvendo, conseqüentemente, maior parte das tensões provenientes do carregamento aplicado (Figura 2). Quanto aos semirrígidos, estes possuem uma base cimentada por algum aglutinante com propriedades cimentícias (DNIT, 2006).

Figura 2 - Estrutura de Pavimento Rígido

Fonte: BERNUCCI, 2008

3.3.1 Seleção de materiais para base, sub-base e reforço do subleito

A escolha dos materiais adequados para base, sub-base e reforço do subleito é fundamentada na distribuição granulométrica, resistência, forma e durabilidade dos grãos. De acordo com Bernucci (2008) materiais com preponderância de agregados graúdos e de agregados miúdos, prevalecem as propriedades dessas frações. Já os materiais com frações mais finas, tem uso limitado em pavimentos em virtude desses finos reduzirem a permeabilidade dos materiais e sua rigidez, aumentando a deformabilidade e, principalmente, a expansão volumétrica em presença de água, diminuindo a resistência.

Dentro da variedade existente de solos, os solos tropicais finos apresentam excelente desempenho em obras viárias, em especial na execução de pavimentos de baixo custo. Dentre os solos tropicais destacam-se duas grandes classes: os lateríticos e os saprolíticos (MARSON, 2004).

Conforme relatam Santana e Gontijo (1987), estes solos apresentam diferenças de propriedades, em geral, os solos lateríticos apresentam CBR (*California Bearing Ratio*) relativamente alto e baixo índice de expansão, LL e IP (índice de plasticidade) elevados, e não perdem muita resistência quando estão em contato com a água, possuem aglomeração bem desenvolvida, tornando-se permeáveis e resistentes à erosão. Em contrapartida, os saprolíticos podem variar de extremamente plásticos até não plásticos, são bastante erodíveis e, em geral, apresentam baixo valor de CBR.

3.3.2 Propriedades mecânicas para materiais de base, sub-base e reforço do subleito

Os principais parâmetros adotados no Brasil para o dimensionamento de estruturas de pavimentos são: ISC (Índice de Suporte Califórnia), usado no dimensionamento convencional do DNER (Souza, 1979); e Módulo de Resiliência (MR) usado na Mecânica dos Pavimentos. Ainda deve-se ressaltar, que para obtenção desses parâmetros os resultados da umidade ótima obtidos no ensaio de compactação são fundamentais.

3.3.2.1 Características de Compactação

A compactação consiste no ato de aplicar pressão, vibração ou impacto ao solo com a finalidade de melhorar suas propriedades mecânicas. Nesse processo é provocado a expulsão do ar dos vazios do solo, resultando no aumento da sua massa específica aparente seca até determinado teor de umidade, pois é a partir de certo teor de umidade que o processo de compactação não mais consegue expulsar o ar dos vazios, por chegar a um alto grau de saturação (SOUZA JUNIOR, 2005).

Segundo Das (2007), a compactação aumenta a resistência dos solos, podendo ainda trazer benefícios, como aumento da resistência ao cisalhamento e da capacidade de suporte, reduzindo recalques das estruturas e aumentar a estabilidade dos taludes do aterro.

Ao se compactar um material busca-se uma condição em que o solo esteja compactado com uma umidade que forneça a máxima densidade aparente seca ($Y_{s,máx}$), chamada de umidade ótima de compactação. Isso só é possível quando é feita a lubrificação entre as partículas, pois quando se compacta um solo com baixa umidade, não se consegue uma redução significativa

de vazios, devido ao atrito entre as partículas ser alto (DANTAS, 2015). Os solos argilosos, em regra, possuem densidade aparente seca baixa, da magnitude de 1,5 a 1,4 g/cm³ e umidades ótimas altas, da ordem de 35 a 30%. Já os solos que exibem valores de densidade seca na faixa de 2,0 a 2,1 kg/dm³ e umidade ótima no intervalo de 9 a 10 %, são representativos de areias com pedregulhos (PINTO, 2006).

3.3.2.2 Índice de Suporte Califórnia (ISC)

A resistência do solo utilizado em camadas granulares de pavimentos pode ser medida por do método de ISC ou CBR. Essa resistência é uma resposta que combina indiretamente a coesão com o ângulo de atrito do material, sendo o ISC expresso em porcentagem, e definido como a relação entre a pressão necessária para produzir uma penetração de um pistão num corpo-de-prova de solo ou material granular e a pressão necessária para produzir a mesma penetração numa brita padronizada (BERNUCCI, 2008).

O ensaio fornece duas variáveis: o ISC, propriamente dito, expresso em porcentagem, e o valor de expansão. Conforme Dantas (2015) valores altos de expansão são indesejáveis, tendo em vista que solos que apresentam valores significativos sofrem deformações consideráveis ao serem solicitados. Para subleito, comumente, estipula-se o valor máximo aceitável de expansão de 2%, em casos em que a expansão supere este valor, em geral sugere-se troca de solo, ou sua estabilização, ou ainda a colocação de uma camada de material pétreo na dimensão de pedras (acima de 60mm), para aumento do valor de suporte. Para materiais de reforço do subleito, estipula-se em geral 1% como o valor máximo admissível de expansão axial e 0,5% para bases e sub-bases (BERNUCCI, 2008).

3.4 ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS

Nem todo material em seu estado natural atende aos requisitos de projeto de um pavimento, sendo a estabilização de solos um meio usual para correção de suas propriedades. Para Senço (2001), estabilizar um solo significa dar a ele condições de resistir as deformações e ruptura durante todo o período em que sua função exija atender tais requisitos, sem que se rompam. Ainda segundo o autor, as principais características que um solo estabilizado deve apresentar é resistência ao cisalhamento e à deformação. Usualmente as técnicas de estabilização de solos empregadas na pavimentação são química, mecânica e granulométrica.

3.4.1 Estabilização Mecânica

A estabilização mecânica visa fornecer ao material a ser usado como camada do pavimento uma condição de densidade máxima relacionada a uma energia de compactação e a uma umidade ótima, fornecendo ao solo aumento na resistência ao cisalhamento e na capacidade de suporte, além de diminuir índices de permeabilidade, compressão e contração. É um método complementar a outros métodos de estabilização (ARRIVABENI, 2017).

3.4.2 Estabilização Química

Para atuar como estabilizante químico de um solo, modificando as suas propriedades físicas e químicas, o material a ser adicionado reage como agente impermeabilizante, dispersante, floculante ou agregante dos materiais presentes no solo (SILVA, 1968).

Quando utilizada para solos granulares contribui na melhoria de sua resistência ao cisalhamento, através da adição de pequenas quantidades de ligantes nos pontos de contato dos grãos. Os ligantes mais utilizados são o Cimento Portland, cal, pozolanas e materiais betuminosos (GOULARTE *et al.*, 2009).

3.4.3 Estabilização Granulométrica

Esta metodologia consiste na adição de materiais granulares para estabilizar solos que não atendem aos parâmetros geotécnicos na adição ou retirada de partículas do solo, procurando-se obter como produto um material adequado para a aplicação em cada caso particular, de forma a atender as especificações normativas (ARRIVABENI, 2017).

O aumento da massa específica seca máxima é um comportamento esperado ao se estabilizar solos com os mais variados materiais. Ao realizar a mistura de um solo laterítico arenoso com cascalho na proporção de 50%, Emmert (2010) observou que à medida que houve a adição de cascalho na mistura a massa específica seca do solo aumentou gradualmente. Foi verificado também por Silveira (2010) a redução da umidade ótima ao se estabilizar solo natural com finos de granito, devido ao aumento do percentual das frações grossas nas misturas.

Na estabilização granulométrica, é necessário obter uma curva granulométrica contínua, em virtude disso, na norma 141/2010-ES (DNIT) são estabelecidas faixas de composição granulométricas para base de pavimentos (Quadro 3). Vale ressaltar que a composição granulométrica tem influência direta em outras propriedades como plasticidade, compactação,

capacidade de suporte etc. Por isso a importância de se ter uma mistura com granulometria adequada para aplicação em pavimentos.

Quadro 3 - Faixas de composição granulométrica para base

Tipos	Para N > 5 X 10 ⁵				Para N < 5 X 10 ⁵		Tolerâncias da faixa de projeto
Peneiras	A	B	C	D	E	F	
	% em peso passando						
2"	100	100	-	-	-	-	± 7
1"	-	75-90	100	100	100	100	± 7
3/8"	30-65	40-75	50-85	60-100	-	-	± 7
Nº 4	25-55	30-60	35-65	50-85	55-100	10-100	± 5
Nº 10	15-40	20-45	25-50	40-70	40-100	55-100	± 5
Nº 40	8-20	15-30	15-30	25-45	20-50	30-70	± 2
Nº 200	2-8	5-15	5-15	10-25	6-20	8-25	± 2

Fonte: DNIT (2010)

3.5 REUTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS GERADOS NA CONSTRUÇÃO CIVIL

A temática em torno de um destino para os Resíduos da Construção Civil (RCC) vem sendo amplamente discutida no Brasil nos últimos anos, em decorrência da alta taxa de geração, que representa cerca de 51% a 70% dos resíduos sólidos urbanos coletados (MARQUES NETO, 2005).

Cardoso *et al.* (2014) verificaram que na grande maioria dos municípios, a maior parte dos RCC's é depositada em terrenos baldios e nas margens de rios e córregos. Esta deposição irregular de entulho ocasiona desenvolvimento de vetores de doenças, entupimento de galerias e bueiros, assoreamento de córregos e rios, contaminação de águas superficiais e poluição visual.

Como a extração mineral, de modo geral, não é considerada uma atividade de impacto ambiental permanente, não há lei que exija o desenvolvimento de projetos por parte dessas empresas, que visem a preservação ambiental de modo a reduzir os danos causados pela extração mineral, assim, surge a necessidade de mitigar o impacto ambiental e a possibilidade

de instalar uma cultura de caráter sustentável na mineração buscando aplicações para reuso dos resíduos gerados (MME, 2009).

Uma solução de destinação final para esses resíduos é incorporá-los aos agregados utilizados em base e sub-base de pavimentos. Todavia é necessário que esses resíduos passem por análises prévias, para que não ocorra mistura de resíduos de qualidade inferior à do material, de modo a não interferir na vida útil do pavimento (BAGATINI, 2011).

3.5.1 Uso de calcário em pavimentação

O calcário tem sido um dos minérios de maior destaque no Estado do Rio Grande do Norte e um dos setores que recebe mais investimentos, pois é matéria prima para produtos da construção civil, da indústria química, da indústria agrícola e de outros segmentos industriais. A produção no ano de 2013, no Rio Grande do Norte, ocorreu principalmente nos municípios de Governador Dix-Sept Rosado, Mossoró e Baraúna, sendo de aproximadamente 1,7 milhões toneladas e teve, em média, movimentações financeiras de um montante aproximado de R\$ 25,8 milhões (DNPM, 2017).

Com base em suas características químicas, o calcário pode ser classificado como calcítico quando apresenta maior concentração de hidróxido de cálcio e menor de magnésia, e dolomítico quando constituído por maior concentração de óxido de cálcio e magnésia (LIMA, 2015). Quanto a propriedades físicas, elas podem variar de acordo com o tipo de calcário. A massa específica de diversos depósitos analisados por Mahrous *et al.* (2010) variaram de 2,25 a 2,7 g/cm³. A composição granulométrica, por sua vez, depende do processo ou equipamento de britagem da rocha, a ser utilizada de acordo com sua finalidade.

Durante o beneficiamento para tratamento da granulometria da rocha bruta é produzido o Resíduo de Britagem de Rocha Calcária (RBRC) que é descartado em pilhas a céu aberto, causando problemas de estocagem e manutenção. Tendo em vista que no RN há, segundo o DNIT (2015), cerca de 23 mil quilômetros de rodovias não pavimentadas, é necessário a utilização de solos como elementos estruturais de base e sub-base do pavimento e a redução dos custos destas obras. A inclusão de um material de baixo custo, no caso, o RBRC nestas obras poderá trazer viabilidade as novas rodovias e a ampliação da malha pavimentada no estado.

Saghafi *et al.* (2013) analisaram o comportamento do módulo de resiliência (MR) sob influência do aumento da tensão de desvio, para uma estabilização granulométrica de solo com pó calcário, nas proporções de 10 e 20% de pó. Para a porcentagem de 10% os níveis de MR

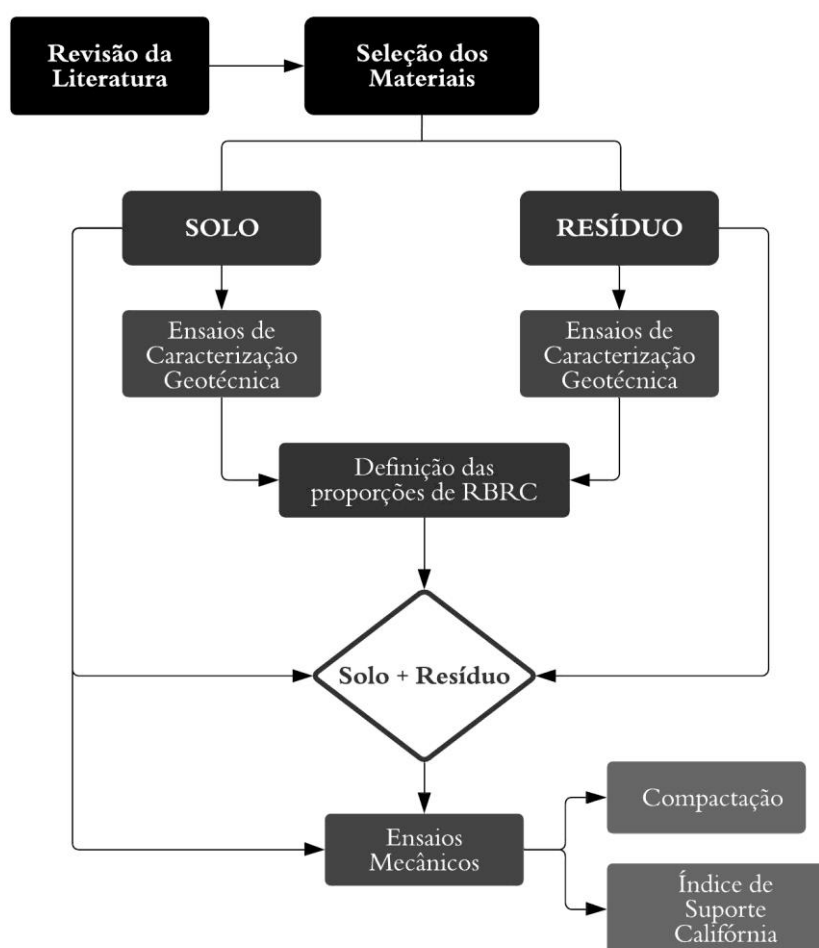
foram melhorados com o aumento da tensão de desvio, já para a de 20% o MR reduziu. Brooks *et al.* (2011) também verificou mudança no comportamento, onde houve o aumento da resistência a compressão simples ao adicionar calcário da fração de pó de pedra (nas proporções de 3, 6 e 9%) a dois de tipos de solos diferentes.

Com base nos autores supracitados é possível notar que as características do RBRC apresentam variabilidade, o que pode ser decorrente das suas características de formação. Portanto, é necessário prever o seu comportamento antes de seu emprego em camadas de pavimentos.

4 METODOLOGIA

A metodologia aplicada para a caracterização geotécnica do solo e resíduo da britagem de rocha calcária, assim como, para o solo estabilizado com proporções de 20, 35 e 50% de RBRC, irá fundamentar-se nos ensaios propostos pelo DNIT (2006), o qual fornece especificações necessárias para a caracterização, classificação pelo SUCS e Classificação TRB, além dos ensaios de compactação e ISC. Para os ensaios laboratoriais foram obedecidas às recomendações da ABNT. O fluxograma da sequência de atividades realizadas durante a fase experimental desta pesquisa encontra-se apresentado na Figura 3.

Figura 3 - Fluxograma de atividades realizadas na fase experimental



Fonte: Autoria Própria

4.2 SELEÇÃO DOS MATERIAIS

O principal critério para seleção foi utilizar materiais que a região de Mossoró, RN possui em maiores proporções. A escolha do tipo de solo para estabilização foi fundamentada em um diagnóstico preliminar baseado no estudo de Guilherme (2016) que apresenta, através do Mapeamento de propriedades geotécnicas dos solos de Mossoró-RN, os mais tipos de solos mais abundantes da Região.

Quanto ao resíduo, o escolhido foi o gerado na britagem de rocha calcária, tendo em vista o calcário ser um dos minérios de maior abundância no RN e um dos setores que recebe mais investimentos, pois é matéria prima para produtos da construção civil, como produção de brita que gera grande acúmulo de resíduo no processo de produção.

4.3 COLETA DOS MATERIAIS

4.3.1 Solos

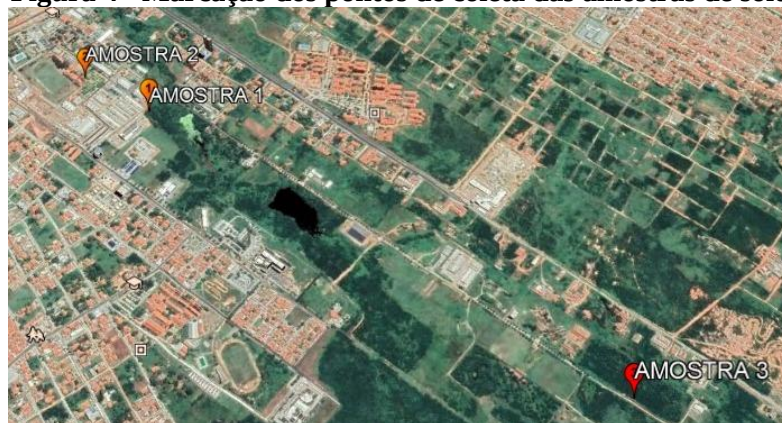
Para esta pesquisa foram coletadas três amostras de solos em diferentes pontos localizados na Universidade Federal Rural do Semiárido (UFERSA), visando encontrar um solo com características próximas ao tipo mais comum na região. No quadro 4 estão dispostas as coordenadas geográficas dos pontos de coleta referentes as amostras 1, 2 e 3, e na Figura 4 é possível visualizar a marcação dos pontos.

Quadro 4 - Coordenadas geográficas dos pontos de coleta das amostras de solo

Amostra	Coordenadas Geográficas	
	Latitude	Longitude
1	05° 12' 25'' S	37° 19' 18'' W
2	05° 12' 20'' S	37° 19' 26'' W
3	05° 12' 54'' S	37° 18' 27'' W

Fonte: Autoria própria

Figura 4 - Marcação dos pontos de coleta das amostras de solo



Fonte: Google earth

As porções de solo para as análises foi recolhida em quantidade suficiente, com o auxílio de picareta, pá, e sacos plásticos para armazenamento. Também foi feito a análise tátil visual a fim de ter uma primeira identificação da textura do solo. A figura 5 mostra o processo de coleta e armazenamento.

Figura 5 - Coleta das amostras 1, 2, e 3 de solo



Fonte: autoria própria

4.3.2 Resíduo

O RBRC foi coletado na pedreira Lino Brita, endereçada no bairro aeroporto, na cidade de Mossoró, sendo retirado da base da pilha (Figura 6). O resíduo foi armazenado em sacos plásticos resistentes, trazidos para o Laboratório de Solos e Pavimentação localizado na UFERSA.

Figura 6 – Local de coleta do RBRC



Fonte: Autoria Própria

4.4 PREPARO DAS AMOSTRAS

A preparação das amostras dos solos e resíduo para os ensaios foi feita de acordo com a NBR 6457 (ABNT, 1986). Foi realizada a secagem prévia ao ar, na sequência o destorroamento, homogeneização e quartemento da amostra. Considerando que o resíduo já se encontrava na situação de secagem à céu aberto, não houve necessidade da realização da secagem ao chegar ao laboratório. A Figura 7 apresenta as amostras dos solos coletados.

Figura 7 - Amostras dos solos coletados



Fonte: Autoria própria

4.5 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO FÍSICA

Para a caracterização geotécnica de ambos os materiais (solo e resíduo) foram realizados os mesmos ensaios laboratoriais, sendo eles: granulometria, massa específica dos grãos, limite de liquidez e limite de plasticidade, que serão descritos na sequência.

4.5.1 Análise Granulométrica

Para determinar as porcentagens das frações pedregulho, areia, silte e argila, foi feita a análise granulométrica. Os procedimentos para execução foram adotados conforme a NBR 7181 (ABNT, 1984), sendo o método seguido para determinação da distribuição dos grãos apenas por peneiramento, onde realizou-se o peneiramento dos materiais de diâmetro maior que 0,075 mm seguindo a sequência de peneiras especificadas na norma: diâmetro de 19,1; 9,5; 4,8; 2,0; 1,2; 0,6; 0,42; 0,25; 0,15; e 0,075 mm.

Figura 8 - Material retido no peneiramento do RBRC



Fonte: autoria própria

4.5.2 Massa Específica dos Grãos

Neste ensaio foi utilizado o método do picnômetro, conforme a NBR 6508 (ABNT, 1984). Para execução, o recipiente foi adaptado para um balão volumétrico de fundo chato com capacidade de 500 ml juntamente a uma bomba de vácuo (Figura 9).

Figura 9 - Aplicação de pressão a vácuo na amostra de solo mais água



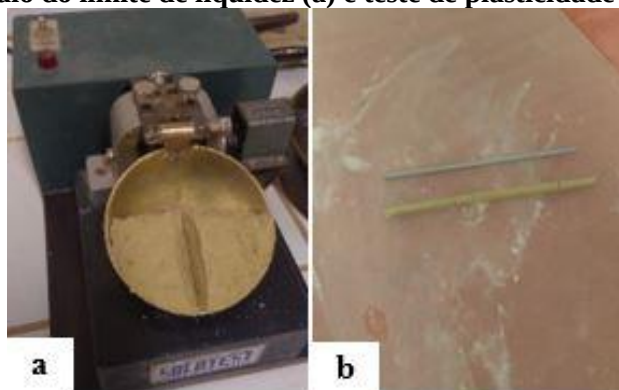
Fonte: autoria própria

4.5.3 Limites de Consistência

A caracterização dos grãos finos dos solos e resíduo foi realizada pela NBR 6459 – Solo – Determinação do limite de Liquidez (ABNT, 1984) e pela NBR 7180 – Solo – Determinação do limite de plasticidade (ABNT, 1984).

O ensaio referente ao limite de liquidez foi executado com o aparelho Casagrande, onde foram realizadas tentativas variando a umidade, a fim de determinar o teor de umidade dos solos e RBRC ao fechar a ranhura com 25 golpes. Para o LP os materiais foram moldados nas dimensões de um cilindro padrão estabelecido pela norma, e obtidos os respectivos teores de umidade.

Figura 10 - Ensaio do limite de liquidez (a) e teste de plasticidade (b) para o RBRC



Fonte: autoria própria

4.5.4 Classificação Geotécnica

Para a classificação das três amostras de solo e do resíduo da britagem da rocha calcária foram adotados os dois sistemas de classificação mais utilizados no Brasil: SUCS e TRB, os quais levam em consideração os índices de Atterbeg e granulometria.

4.6 COMPOSIÇÃO DAS MISTURAS

As proporções de solo e pó de brita calcária para estabilização foram determinadas em função da caracterização física inicial dos materiais, através do ensaio de análise granulométrica como descrito no item 3.4.3, tomando por base as faixas de composição granulométrica para base estabelecidas na norma 141/2010-ES (DNIT), e ainda, proporções adotadas pesquisas similares com o resíduo.

4.7 ENSAIOS MECÂNICOS

Para caracterização mecânica do solo e das misturas com RBRC foi executado o ensaio tradicionalmente utilizado para materiais a serem empregados em camadas de base e sub-base: ISC, para o qual se faz necessário a realização prévia do ensaio de compactação com o intuito de definir parâmetros de massa específica aparente seca máxima e da umidade ótima, que podem influenciar diretamente na resistência mecânica.

4.7.1 Ensaio de Compactação

Procedeu-se os ensaios de compactação para todas as amostras de acordo com instruções da NBR 7182 (ABNT, 1986), sendo executados com reuso do material e com energia intermediária, a qual foi adotada por atender grande parte das solicitações de projeto de pavimentos, com ressalva a camadas de base que a depender das solicitações, podem vir a exigir maior grau de compactação. Almeida (2017) cita que as energias intermediárias são boas alternativas às energias padronizadas e, portanto, tendem a apresentar melhorias, sendo opção quando a energia menor for insuficiente em termos de qualidade final do solo compactado, e o uso de uma energia maior apresentar custos elevados. Para cada ensaio foram determinados, pelo menos, cinco pontos de massa específica aparente seca e sua respectiva umidade, possibilitando a construção da curva de compactação para a obtenção do teor de umidade ótima e massa específica aparente seca máxima.

Figura 11 - Execução do ensaio de compactação a energia intermediária



Fonte: Autoria própria

4.7.2 Índice de Suporte Califórnia

A determinação da resistência mecânica foi realizada através dos resultados do ensaio do Índice de Suporte Califórnia, onde foi utilizada a norma NBR 9895 (ABNT, 1987). O corpo de prova para cada amostra foi moldado nas condições de umidade ótima obtidas na compactação à energia intermediária.

Os corpos de prova foram submersos, sendo realizada a medição da pressão ao ser imerso e a cada 24h durante 4 dias, determinando-se a expansão. Após esse período as amostras foram submetidas ao ensaio de resistência à penetração na prensa. Na Figura 11 encontra-se a prensa utilizada para realização do ensaio.

Figura 11 - Prensa para realização do ensaio de ISC



Fonte: Autoria própria

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste item serão apresentados os resultados dos ensaios de caracterização realizados para as três amostras de solo especificadas anteriormente e para o RBRC. Como também, os resultados dos ensaios mecânicos para o solo natural e estabilizado com três diferentes proporções de resíduo e a análise da aplicação do RBRC em obras rodoviárias.

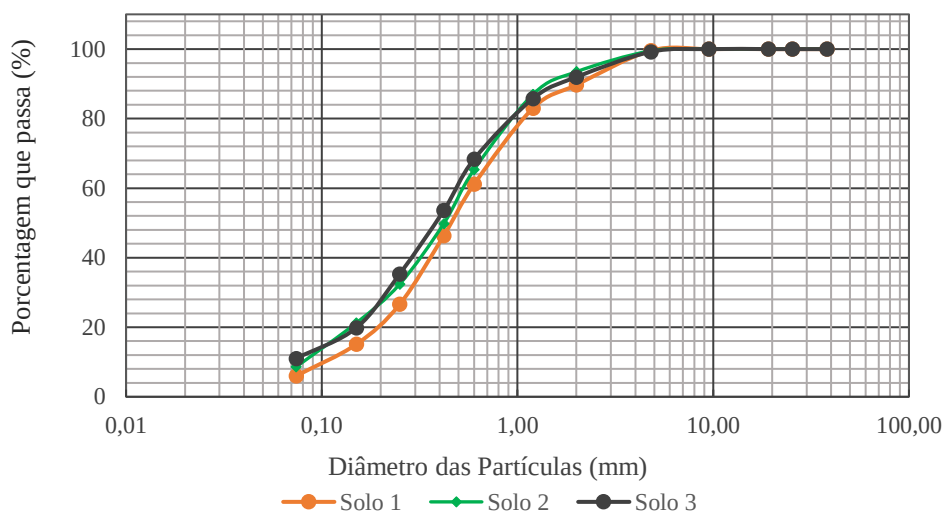
5.2 CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA

Com o intuito de classificar os solos coletados e o resíduo em análise foi realizada a caracterização geotécnica para ambos, cujos resultados alcançados estão apresentados na sequência.

5.2.1 Solos

O primeiro parâmetro analisado para as três amostras de solo foi a composição granulométrica, onde ambos apresentaram baixa porcentagem de pedregulhos. No que diz respeito ao teor de finos (passantes na peneira #200), a diferença entre os percentuais também não foi muito acentuada, onde os solos 1, 2 e 3 apresentaram porcentagens de 6,0%, 8,6% e 11%, respectivamente.

Quanto a forma das curvas de distribuição, indicadas na Figura 12, o coeficiente de não uniformidade (CNU) e o coeficiente de curvatura (CC) indicaram solos bem graduados com uniformidade média. Conforme Pinto (1998) solos bem graduados apresentam melhor entrosamento entre as partículas, e tendem a suportar melhor as solicitações de carga, contudo, é importante frisar que solos de granulometrias semelhantes podem apresentar comportamentos distintos, tendo outras propriedades que influenciam diretamente no seu comportamento.

Figura 12 - Distribuição granulométrica das amostras de solo

Fonte: Autoria própria

Os resultados dos ensaios de massa específica dos sólidos, LL e LP para cada amostra estão indicados na Tabela 2.

Tabela 2 - Resultados dos ensaios de caracterização

Amostras	ρ_s (g/cm ³)	LL	LP	IP
1	2,67	-	-	NP
2	2,81	-	-	NP
3	3,24	-	-	NP

Fonte: Autoria própria

Os valores de massa específica apresentaram variações, verificando-se que o solo com maior proporção de finos possui maior valor de massa específica. De acordo com o Manual de Pavimentação, os valores geralmente encontrados para solo encontram-se entre 2,6 e 2,8 g/cm³, nota-se que o solo 1 e o solo 2 se encontram dentro das especificações, dentro da margem de erro, porém o a terceira amostra apresentou variação significativa.

Quanto aos limites de consistência, não foi possível moldar os corpos de prova dentro das condições estabelecidas na norma, podendo-se concluir que os solos são não plásticos ou fracamente plásticos. Com relação a esses resultados, as amostras se enquadram nas especificações do DNIT (2006) de valores LL e índice de plasticidade (IP) para materiais a serem utilizados em camadas granulares, cujos valores máximos para LL e LP estabelecidos são de 25 e 6%, respectivamente.

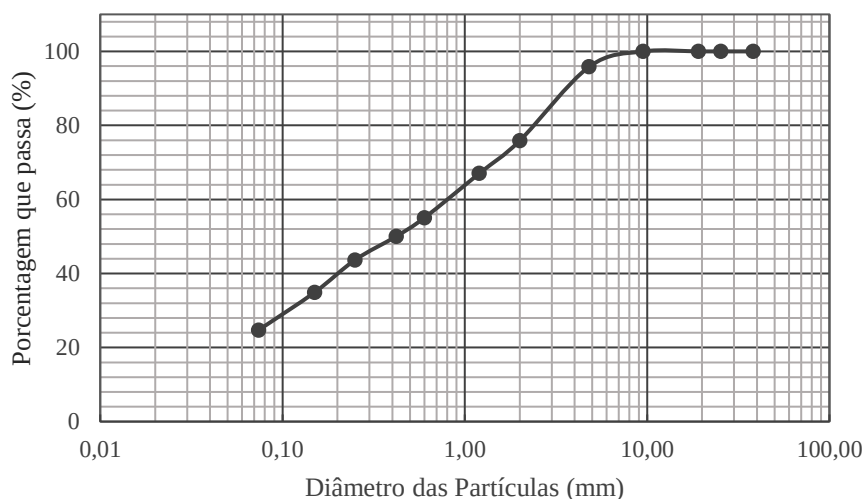
Através dos resultados de granulometria e dos limites de consistência os três solos foram classificados por meio dos sistemas SUCS e TRB. De acordo com a classificação unificada as três amostras são do tipo SW-SM (areia bem-graduada com silte) ou SW-SC (areia bem-graduada com argila), sendo a primeira mais provável, uma vez que foi constatado baixo grau de plasticidade no ensaio, e como, segundo Das (2007), a plasticidade é produzida pela água adsorvida que circunda as partículas de argila, pode-se esperar que os tipos de argilominerais e suas quantidades proporcionais em um solo, afetará esse limite.

No tocante a classificação TRB, as três amostras se mostraram intermediárias, onde os solos 1 e 2 ficaram entre as classificações A-1b e A3. Já o solo 3 aproximou-se mais do tipo A-3, com uma porcentagem de finos de 11%, ultrapassando em 1% o valor máximo de finos para um solo desse tipo; outro tipo que poderia se enquadrar seria um A-2-4, contudo o solo apresentou-se como NP.

Com base nesses resultados foi tomado para ser usado na estabilização o solo 3. O objetivo inicial seria estabilizar um tipo de solo que fosse mais abundante na região em que foi realizada a pesquisa, tendo por base Guilherme (2016), que apresentou A-2-4 e A-6 como os mais abundantes no município, como não foi possível encontrar o material com a classificação exata, adotou-se o que mais se aproximou.

5.2.2 Resíduo

O resíduo da britagem de rocha calcária foi submetido aos ensaios de caracterização geotécnica. Na Figura 13 encontra-se apresentada a curva granulométrica do material em questão, através da qual verificou-se a predominância de material arenoso com 24,72% de finos e, ainda, que a mesma apresenta um formato suave, o que sugere um material bem graduado. Conforme as especificações da norma 141/2010 – ES (DNIT, 2010) a distribuição dos grãos do resíduo satisfaz a faixa F (item 3.4.3), que podem ser aplicadas em bases de pavimentos para condições específicas de tráfego.

Figura 13 - Curva granulométrica da amostra de RBRC

Fonte: Autoria própria

Na Tabela 3 estão apresentados os resultados de massa específica dos grãos, limites de consistência e a classificação segundo os métodos SUCS e TRB.

Tabela 3 - Propriedades físicas e classificação do RBRC

Limite de Liquidez - LL (%)	13,83
Limite de Plasticidade - LP (%)	10,11
Índice de Plasticidade - IP (%)	3,72
Massa específica real (g/cm ³)	2,58
Classificação SUCS	SM
Classificação TRB	A-2-4

Fonte: Autoria própria

De acordo com a Tabela 3, a massa específica dos sólidos foi de 2,58 g/cm³, valor dentro do esperado para este tipo de resíduo, quando comparado aos resultados encontrados por Fernandes *et al.* (2016), que obteve resultados para RBRC entre 2,6 e 2,7 g/cm³.

No tocante aos limites de consistência, o uso do resíduo se enquadra dentro dos valores máximos de LL e IP de 25% e 6%, respectivamente, estabelecidos pelo DNIT (2006). Os valores para LL e IP encontrados por Fernandes *et al.* (2016) divergem um pouco dos apresentados na Tabela 6, sendo o LL mínimo de 19% e IP de 4%, variabilidade assim, não tão acentuadas, podem ser decorrentes das características de formação do calcário, assim como do processo de britagem.

O RBRC é classificado pelo TRB como A-2-4, esta mesma classificação apresenta materiais do tipo A-2-4, como bons para aplicação em camadas de pavimento, principalmente subleito (DNIT, 2006). Pelo SUCS é considerado arenoso siltoso (SM) que, de acordo com as

interrelações entre classificação TRB e unificada, está entre os mais prováveis correspondentes ao tipo A-2-4.

5.3 COMPOSIÇÃO DAS MISTURAS SOLO-RBRC

Para definir a composição das misturas solo mais RBRC buscou-se embasamento em algumas referências bibliográficas, contudo para esse resíduo (pó de brita calcária) pode-se notar que não há uma grande variabilidade de pesquisas aplicadas a temática, onde as encontradas apresentam resultados satisfatórios em composições discrepantes.

Lima & Moura (2010), por exemplo, ao realizarem misturas de solo arenoso com RBRC, oriundo de uma jazida de rocha calcária no Estado do Ceará, avaliaram a sua aplicação em obras rodoviárias, chegando a conclusão de que a sua utilização em uma proporção de 50% de RBRC seria aceita ao misturar-se com outra parcela de solo arenoso para camadas de sub-base de pavimentos. Saghfi *et al.* (2013), por sua vez, verificaram melhoras no módulo de resiliência (MR) de um solo ao adicionar o material nas proporções de 10 e 20%. E, ainda, Fernandes *et al.* (2016) ao analisar a aplicação de 100% do resíduo como material para camadas de pavimentos, constatou que o mesmo atende aos requisitos para aplicação em sub-base, ressaltando a necessidade de avaliá-lo para outras pedreiras em decorrência da sua variabilidade.

Com base nessas informações foram estabelecidas algumas porcentagens, considerando a granulometria do “solo + resíduo” e se estas se enquadravam nas faixas granulométricas especificadas pelo DNIT (2010) para camadas granulares de pavimentos. Os cenários adotados estão apresentados na Tabela 4, cujas porcentagens de RBRC adotadas que atenderam as solicitações de tráfego para a faixa F, foram de 20, 35, e 50%.

Tabela 4 - Percentual de RBRC e solo para as misturas granulométricas (Faixa F)

Peneiras	Limites Faixa F			Materiais		Resultados	Condição
	Inferior	Superior	Tolerância	RBRC	Solo		
20% de RBRC							
1"	100	100	7	100	100	100,00	Atendida
3/8"	-	-	7	100	100	100,00	Atendida
n° 4	10	100	5	95,83	99,23	98,55	Atendida
n° 10	55	100	5	75,88	91,95	88,74	Atendida
n° 40	30	70	2	48,00	53,58	52,47	Atendida
n° 200	8	25	2	24,72	11,02	13,76	Atendida
35% de RBRC							
1"	100	100	7	100	100	100,00	Atendida
3/8"	-	-	7	100	100	100,00	Atendida
n° 4	10	100	5	95,83	99,23	98,04	Atendida
n° 10	55	100	5	75,88	91,95	86,33	Atendida
n° 40	30	70	2	48,00	53,58	51,63	Atendida
n° 200	8	25	2	24,72	11,02	15,82	Atendida
50% de RBRC							
1"	100	100	7	100	100	100,00	Atendida
3/8"	-	-	7	100	100	100,00	Atendida
n° 4	10	100	5	95,83	99,23	97,53	Atendida
n° 10	55	100	5	75,88	91,95	83,92	Atendida
n° 40	30	70	2	48,00	53,58	50,79	Atendida
n° 200	8	25	2	24,72	11,02	17,87	Atendida

Fonte: autoria própria

Ambos os materiais (solo e resíduo) possuem deficiência de grãos mais graúdos e, devido a isso, não se enquadraram nas faixas de A à D, que seriam pra solicitações de tráfego mais pesadas.

5.4 CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA

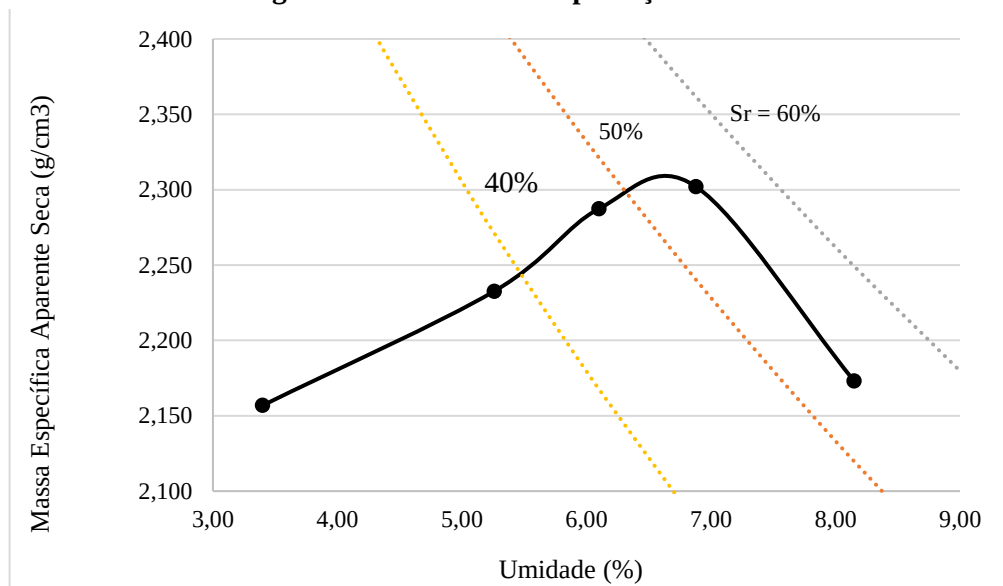
Neste item estão apresentados os resultados dos ensaios de compactação e ensaios de ISC para o solo adotado como referência e para as misturas 20%, 35%, e 50% de RBRC.

5.4.1 Compactação

Na Figura 14 está exposta a curva de compactação obtida para a amostra de solo 3 e na figura 15 as curvas para as amostras a 20%, 35% e 50% de RBRC, as quais serão tratadas por

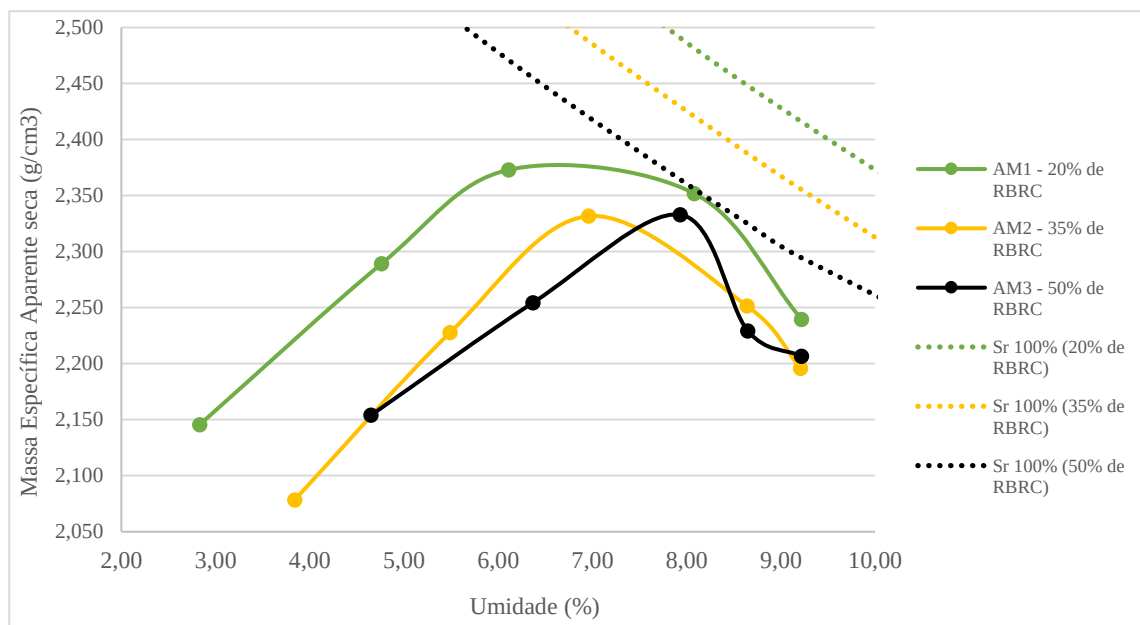
SR20 (solo-resíduo-20%), SR35, e SR50. A partir das curvas, foram obtidas as massas específicas aparente seca máximas e das umidades ótimas. Os resultados encontrados estão dispostos na tabela 5.

Figura 14 – Curva de compactação do solo



Fonte: Autoria própria

Figura 15 - Curvas de compactação das misturas Solo - RBRC



Fonte: autoria própria

Tabela 5 - Propriedades de compactação para solo e amostras estabilizadas

Características	Solo	SR20	SR35	SR50
$\gamma_{sm\acute{a}x}$ (g/cm ³)	2,31	2,38	2,34	2,33
hót. (%)	6,80	6,00	6,96	7,90

Fonte: autoria própria

Com base nas curvas dos gráficos de compactação para solo e misturas, é possível perceber influência positiva nos valores de massa específica seca máxima ($\gamma_{sm\acute{a}x}$) com as adições de RBRC ao solo, onde o maior valor obtido foi para a SR20. Esse aumento da $\gamma_{sm\acute{a}x}$ é consequência do aumento de agregados miúdos nas amostras, que proporcionou redução no índice de vazios. Todavia, ao aumentar as proporções de RBRC observou-se elevação das umidades ótimas e uma leve redução na massa específica aparente seca máxima, o que pode ser associado a elevação dos teores de passantes na #200. Pinto (2006), ao apresentar valores típicos de compactação para diferentes tipos de solos, mostra que solos com maiores teores de silte e argila tendem a ter umidades ótimas elevadas e valores de densidades secas menores, em relação a solos mais arenosos.

5.4.2 Índice de Suporte Califórnia

Determinadas as curvas de compactação, o solo e as amostras de solo estabilizado com RBRC foram submetidos aos ensaios de ISC, compactados segundo teores de umidade ótimos à energia intermediária. Na Tabela 6 estão expostos os resultados de ISC para o solo e as três amostras.

Tabela 6 - Resultados de Índice de Suporte Califórnia (ISC) (%)

Solo	SR20	SR35	SR50
42,89	63,91	64,34	73,49

Fonte: autoria própria

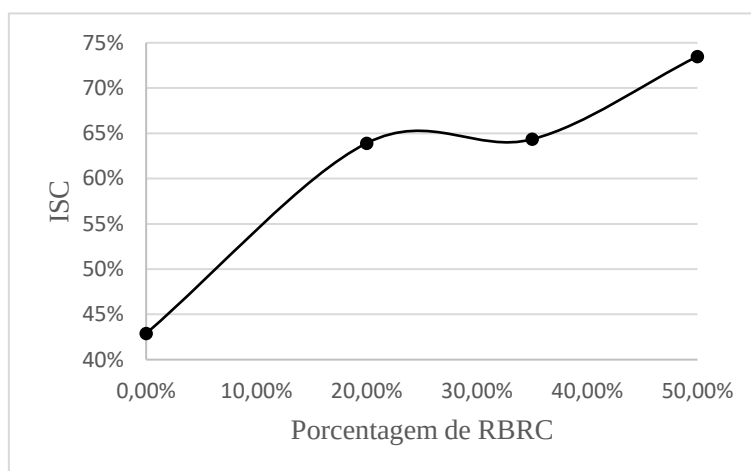
De acordo com as respostas numéricas alcançadas, verifica-se com o valor de ISC do solo (42,89%), o qual conforme a norma DNIT 139/10 - ES, possui resultado satisfatório para aplicação em sub-base.

Quanto a aplicação em bases de pavimentos, verificou-se a real necessidade de estabilizá-lo, tendo em vista que, de acordo com a norma DNIT 141/2010 – ES, as condições para aplicação em bases de pavimentos requerem ISC maiores que 60% para volumes menores de tráfego e maiores que 80% para maiores solicitações ($N > 5 \times 10^6$). Cabe frisar que estes

valores do DNIT estão relacionados para uma energia de compactação do tipo Proctor modificada, contudo em sua classificação o solo tem alto teor de areia fina e apresentou silte como característica secundária e, segundo os resultados de Zica (2010), solos siltosos ou com teores consideráveis de silte, tendem a não responder a acréscimos de energia, podendo perder sua capacidade de suporte.

No que diz respeito as amostras estabilizadas com o pó da britagem de rocha calcária, nota-se um aumento bastante significativo no ISC em relação ao valor resultante para o solo. Verificando também que os valores de ISC para as três amostras estão dentro dos parâmetros do DNIT supracitados, com correlação positiva entre o aumento na porcentagem de resíduo e valores de ISC, cujo comportamento está apresentado da Figura 16.

Figura 16 - Comportamento ISC em relação ao teor de RBRC



Fonte: autoria própria

Azevedo (2007) enfatiza que a perda da capacidade de suporte ocorre basicamente em função da expansão das partículas e da redução do atrito interno do material, causando a diminuição da resistência ao cisalhamento, diante disso nota-se também resultados positivos no que diz respeito aos valores de expansão apresentados na Tabela 7, estes foram bastante inferiores aos valores máximos normatizados em DNIT ES 139/10 e 141/10.

Tabela 7 – Resultados da expansão

Solo	SR20	SR35	SR50
0,05	0,0	0,01	0,02

Fonte: autoria própria

Ademais, conforme os resultados apresentados, os materiais utilizados nesta pesquisa podem ser empregados em camadas granulares de pavimentos, onde as faixas granulométricas, limites de consistências, assim como, os parâmetros de expansão e ISC atenderam as exigências

normatizadas pelo DNIT. Contudo, atenção especial deve ser dada a utilização em base para solicitações de tráfego pesadas, que segundo DNIT ES 141/10 o ISC deve-se superar valores de 80%, nesse caso, recomenda-se aumentar a energia de compactação.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Através dos ensaios de limite de consistência e granulometria foram classificados os solos e resíduo, e escolhido o solo para estabilizar, assim como, os devidos teores de RBRC. O solo apresentou características intermediárias de acordo com as classificações SUCS e TRB, onde pelo SUCS aproximou-se mais do de uma areia bem-graduada com silte, e quanto ao TRB do tipo A-3. Já o RBRC é classificado como SM pelo SUCS e como A-2-4 pelo sistema TRB.

Para as misturas solo-resíduo, verificou-se que as novas granulometrias com teores de 20%, 35% e 50% de RBRC, se enquadraram na Faixa F do DNIT. Ainda com base nos resultados dos ensaios de caracterização mecânica (compactação e ISC) observou-se um crescimento nos valores de ISC para as misturas solo-resíduo, proporcional ao aumento dos teores, cujos resultados foram, respectivamente, de 63,91%, 64,34% e 73,49%, sendo os valores de expansão abaixo dos limites máximos do DNIT.

O solo estabilizado com o resíduo da britagem de rocha calcária apresentou características de granulometria, consistência, expansão e capacidade de suporte, adequadas para serem empregadas em camada de pavimentos dentro dos limites estabelecidos pelo DNIT, com atenção especial quando tratar-se de solicitações mais pesadas de tráfego. Sendo, portanto, uma alternativa adequada para serem empregados em estruturas de pavimentos de tráfego leve, alternativa esta, sustentável, tendo em vista que daria destino adequado aos resíduos gerados na produção de brita calcária.

Com a finalidade de expandir os conhecimentos sobre o comportamento do RBRC, e dando continuidade ao estudo realizado nesta pesquisa, sugere-se a necessidade de estudos com o RBRC que possibilite afirmações quanto a variabilidade do resíduo para diferentes pedreiras, bem como, analisar se existem propriedades químicas que possam influenciar no seu comportamento mecânico ao ser empregado na estabilização de solos, e ainda, verificar o MR para fins de análise estrutural em termos de tensão e deformação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARRIVABENI, B. S. **ALTERNATIVAS PARA ESTABILIZAÇÃO GRANULOMÉTRICA E QUÍMICA DE SOLO DE ESTRADAS FLORESTAIS**. 2017. 62 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciência Florestal, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT) (1986). **NBR 6457**– Amostras de solo – preparação para ensaio de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT) (1984). **NBR 6459**– Solo – determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT) (1984) **NBR 6508**– Grãos que passam na peneira de 4,8mm – determinação da massa específica. Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT) (1984) **NBR 7180**– Solo – determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT) (1984) **NBR 7181**– Solo – análise granulométrica. Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT) (1984) (1987) **NBR 9895** - Solo - índice de suporte Califórnia. Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT) (1986) **NBR 7182**– Solo – ensaio de compactação. Rio de Janeiro.
- AZEVÊDO, A. L. C. de. **ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS COM ADIÇÃO DE CAL. UM ESTUDO A RESPEITO DA REVERSIBILIDADE DAS REAÇÕES QUE ACONTECEM NO SOLO APÓS A ADIÇÃO DE CAL**. 2010. 177 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Geotécnica, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2010.
- BAGATINI, F. **Resíduos de construção civil: aproveitamento como base e sub-base na pavimentação de vias urbanas**. 2011. 70 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.
- BALBO, J. T. **Pavimentação Asfáltica: materiais, projeto e restauração**. São Paulo: Oficina de Textos, 2007. 558 p.
- BERNUCCI, L. B. et al. **Pavimentação asfáltica: Formação básica para engenheiros**. Rio de Janeiro: Petrobras: Abeda, 2008.
- BRASIL. **Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM) (2017)**. Anuário Mineral Brasileiro. Brasília.

BROOKS, R., UDOEYO, F., TAKKALAPPELLI, K. **Geotechnical Properties of Problem Soils Stabilized with Fly Ash and Limestone Dust in Philadelphia**. Journal Materials in Civil Engineering, v. 23, n. 5, p. 711-716, 2011.

DAS, B. M. **Fundamentos de engenharia geotécnica**. São Paulo: Thosson Learning, 2007.

CAPUTO, H. P. **Mecânica Dos Solos E Suas Aplicações – Fundamentos**, vol. 1/ 6ª Edição. Rio de Janeiro, RJ: LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora S.A, 1988.

CARDOSO, A. C. F.; GALATTO, S. L.; GUADAGNIN, M. R. **Estimativa de Geração de Resíduos da Construção Civil e Estudo de Viabilidade de Usina de Triagem e Reciclagem**. Revista Brasileira de Ciências Ambientais, Criciúma, Sc, v. 31, n. 9, p.1-10, mar. 2014.

DANTAS, A. A. N. **Caracterização de resíduos oriundos do beneficiamento do minério de ferro para uso em pavimentação**. 2015. 88 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Eng Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2015.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT) (2006) **Manual de Pavimentação**. 3a edição. Rio de Janeiro.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM – **DNIT ES 139/10**. Pavimentação – sub-base estabilizada granulometricamente. – Especificação de Serviço. Rio de Janeiro, 1997.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM – **DNIT ES 141/10**. Pavimentação –base estabilizada granulometricamente. – Especificação de Serviço. Rio de Janeiro, 1997.

EMMERT, F. **Avaliação do emprego de técnicas de estabilização de solos na melhoria de estradas florestais da região de Niquelândia – GO**. Dissertação (Mestre em Engenharia) – Universidade de Brasília, 2010.

FERNANDES, F. C.; QUEIROZ, F. L.; FRANÇA, F. A. N. **Variabilidade das Propriedades Geotécnicas do Resíduo de Britagem de Rocha Calcária e sua Utilização em Obras Rodoviárias**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 18., 2016, Belo Horizonte. Anais. Belo Horizonte: Abms, 2016. p. 1 - 8.

GOULART, C. L.; PEDREIRA, C. L. S. **ESTABILIZAÇÃO QUÍMICA DE SOLO COM ADIÇÃO DE CIMENTO OU CAL COMO ALTERNATIVA DE PAVIMENTO**. 2009. 7 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Rio Grande, Natal, 2009.

GUILHERME, A. T. P. **Análise comparativa de modelos para previsão e mapeamento de propriedades geotécnicas dos solos da microrregião de Mossoró-RN**. 2016. 138 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2016.

Lima, D. R.; Moura, A. S. (2010). **Estudo da utilização do rejeito de calcário para uma obra de pavimentação**. 3p. Artigo. Universidade Federal do Ceará, campus Cariri.

MARQUES NETO, J. C. **Gestão dos Resíduos de Construção e Demolição no Brasil**. 1ed., 162p, São Carlos: Editora RiMa, (2005).

MAHROUS, A. M.; TANTAWI, M.; EL-SAGEER, H. Evaluation of the engineering properties of some egyptian limestones as constrution materials for highway pavements. **Construction and Building Materials**, v. 24, n. 12, p. 2598-2603, 2010.

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

MEDINA, J. **Mecânica dos Pavimentos**. Rio de Janeiro: UFRJ, 1997. 380p.

MME (Brasil); **Colaboração Empresa de Pesquisa Energética – EPE**. Plano Nacional de Energia, 2030. Brasília, 2009. Ministério das Minas e Energia – MME

PAIXÃO, J. F. **Diagnóstico dos Resíduos Sólidos Industriais**. Brasília: Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada, 2012.

PINTO, C. S. (2006). **Curso Básico de Mecânica dos Solos**. 3a ed. Oficina de Textos. São Paulo, SP.

SAGHAFI, B. Use of waste limestone dust and steel slag in UK highways type I unbound mixtures. **Construction Materials**, v. 106, p. 99-107, abril 2013.

SANTOS, M. N. **Análise do Efeito da Estabilização Mecânica em Matrizes de Terra**. PUC – Relatório de iniciação científica, Rio de Janeiro, 2012.

SENÇO, W. **Manual de técnicas de pavimentação**. 1. ed. São Paulo: Pini, 2001.

SILVEIRA, R. N. P. O. **Análise das propriedades física e mecânicas de dois resíduos finos de pedra para utilização em pavimentos rodoviários**. 2010. 161f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2010.

SOUZA JUNIOR, J. D. **O Efeito da energia de compactação em propriedades dos solos utilizados na pavimentação do estado do Ceará**. 2005. 211p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes). Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, 2005.