



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DA PARAÍBA - CAMPUS VIII
CENTRO DE CIÊNCIAS, TECNOLOGIA E SAÚDE - CCTS
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

JULYE DE SOUTO MATIAS OLIVEIRA

**CARACTERIZAÇÃO E ESTABILIZAÇÃO DE UM SOLO PARA
UTILIZAÇÃO EM CAMADA DE BASE E SUB-BASE DE PAVIMENTO
FLEXÍVEL**

ARARUNA- PB

2019

JULYE DE SOUTO MATIAS OLIVEIRA

**CARACTERIZAÇÃO E ESTABILIZAÇÃO DE UM SOLO PARA
UTILIZAÇÃO EM CAMADA DE BASE E SUB-BASE DE PAVIMENTO
FLEXÍVEL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao departamento de Engenharia Civil da Universidade Estadual da Paraíba-UEPB, como requisito parcial à obtenção do título de bacharel em engenharia civil.

Área de concentração: Pavimentação.

Orientador: Prof.Esp.Lauandes Marques de Oliveira

ARARUNA- PB

2019

É expressamente proibido a comercialização deste documento, tanto na forma impressa como eletrônica. Sua reprodução total ou parcial é permitida exclusivamente para fins acadêmicos e científicos, desde que na reprodução figure a identificação do autor, título, instituição e ano do trabalho.

O48c Oliveira, Julye de Souto Matias.
Caracterização e estabilização de um solo para utilização em camada de base e sub-base de pavimento flexível [manuscrito] / Julye de Souto Matias Oliveira. - 2019.
62 p. : il. colorido.
Digitado.
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Estadual da Paraíba, Centro de Ciências, Tecnologia e Saúde , 2019.
"Orientação : Prof. Esp. Lauandes Marques de Oliveira , Coordenação do Curso de Engenharia Civil - CCTS."
1. Pavimentação. 2. Sistema Estrutural. 3. Logística Reversa. 4. Sustentabilidade. I. Título
21. ed. CDD 624.151 4

JULYE DE SOUTO MATIAS OLIVEIRA

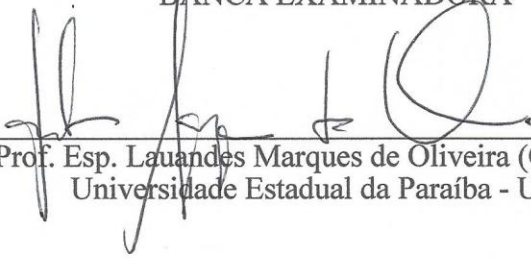
**CARACTERIZAÇÃO E ESTABILIZAÇÃO DE UM SOLO PARA
UTILIZAÇÃO EM CAMADA DE BASE E SUB-BASE DE PAVIMENTO
FLEXÍVEL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao departamento de Engenharia Civil da Universidade Estadual da Paraíba-UEPB, como requisito parcial à obtenção do título de bacharel em engenharia civil.


Área de concentração: Pavimentação.

Aprovada em: 11 / 12 / 2019


BANCA EXAMINADORA



Prof. Esp. Lauandes Marques de Oliveira (Orientador)
Universidade Estadual da Paraíba - UEPB



Prof. Me. Alan Barbosa Cavalcanti
Universidade Estadual da Paraíba - UEPB



Prof. Ma. Maria Júlia de Oliveira Holanda
Instituto Federal de Educação, Ciências e Tecnologia da Paraíba – IFPB

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Deus por ter me dado discernimento e força para superar todas as dificuldades.

Aos meus pais Delaide Cordeiro de Souto Oliveira e Graciliano Matias de Oliveira, por todo incentivo no decorrer de todo esse ciclo, pelo amor dado constantemente e apoio incondicional.

Aos meus irmãos, Jeová de Souto Matias Oliveira e Juany de Souto Matias Oliveira, por acreditarem em meu potencial e estarem comigo, em todos os momentos ao decorrer desses anos.

Aos demais familiares: avós, primos, tios e em especial a minha segunda mãe, que me deu todo o amor, carinho e afeto ao decorrer de toda minha vida Antônia Lúcia Matias de Oliveira.

Ao meu orientador e amigo, o professor Lauandes Marques de Oliveira, pelo incentivo desse trabalho, por sua disponibilidade em correções, pela compreensão e pelos momentos em que você sempre teve sensibilidade em me orientar.

Aos professores Alan Barbosa Cavalcanti e Maria Júlia de Oliveira Holanda que prontamente aceitaram o convite para fazer parte da banca avaliadora dessa pesquisa.

A todos os meus professores desde o início de minha vida escolar e em especial ao corpo docente da universidade, que ao decorrer desse percurso formaram meus princípios éticos e morais, além do meu conhecimento adquirido sobre a área que escolhi vivenciar por minha vida.

Ao técnico laboratorista Divaldo Alves que sempre se dispôs a supervisionar e auxiliar a execução dos ensaios realizados.

A todos os meus amigos que estiveram junto comigo nesta caminhada, durante os bons e maus momentos, muito obrigado pela amizade fiel e verdadeira, que vou levar por toda minha vida.

A todos que direta ou indiretamente contribuíram com minha formação, o meu muito obrigado.

“Quando você se torna a imagem na sua imaginação, você atinge o nível mais poderoso que você poderia atingir.”

Charles RuPaul.

RESUMO

A quantidade de resíduos gerados pela indústria da construção civil provoca sérios problemas ambientais quando dispostos de maneira inadequada. Com uma nova visão voltada para a sustentabilidade, diversos estudos passaram a avaliar a logística reversa reutilização de resíduos de construção e demolição nas mais diversas áreas da construção civil. Simultaneamente a isso, pode-se observar a dificuldade que alguns municípios têm em garantir a pavimentação da sua malha viária. Optar pela utilização de materiais alternativos provenientes da própria construção civil pode ser uma solução de baixo custo que as gestões públicas necessitam para expandir suas vias e diminuir a quantidade de rejeitos no meio ambiente. Visando mitigar os efeitos do descarte inapropriado, este estudo analisa a possibilidade da utilização de RCD em camadas de base e sub-base de pavimento do tipo flexível para um município de pequeno porte. Nesta pesquisa, foi feita uma análise do solo natural, recolhido no município de Araruna - PB, bem como misturas do mesmo solo estabilizado com diferentes frações pré-definidas de RCD e foi feito ensaios laboratoriais de caracterização física e mecânica a fim de determinar a viabilidade da utilização da mistura SOLO-RCD na pavimentação para malhas viárias de baixo volume de tráfego. Todas as misturas de SOLO-RCD estudadas foram aprovadas para serem utilizadas como camadas de sub-base. As misturas de solo e cascalhinho obtiveram: $C_u = 21$; $ISC = 64,20\%$ e $Expansão = 0,80\%$, as misturas contendo solo, cascalhinho e pó obtiveram: $C_u = 20$; $ISC = 33,70\%$ e $Expansão = 0,80\%$. Enquanto que o solo natural obteve: $C_u = 3,5$; $ISC = 13,60\%$ e $Expansão = 3,20\%$. Por fim, este estudo conclui que o solo estabilizado com as frações de RCD analisadas é adequado para o uso em camadas de sub-base de pavimentos com baixo volume de tráfego. Para níveis de tráfego elevado, o emprego desse material deve ser analisado com cautela, visto que as camadas necessitam maiores espessuras.

Palavras-chave: Pavimentação. Sistema Estrutural. Logística Reversa. Sustentabilidade.

ABSTRACT

The amount of waste generated by the construction industry causes serious environmental problems when disposed of improperly. With a new vision focused on sustainability, several studies have begun to evaluate reverse logistics in the reuse of construction and demolition waste in several areas of construction. At the same time, one can observe the difficulty that some municipalities have in ensuring the paving of their road network. Opting for the use of alternative materials from the building itself can be a low cost solution that public administrations need to expand their ways and reduce the amount of waste in the environment. In order to mitigate the effects of improper disposal, this study examines the possibility of using CDW in CAUQ type base and sub-base pavements for a small municipality. In this research, an analysis was made of the raw soil collected in the municipality of Araruna - PB, as well as mixtures of the same stabilized soil with different predefined CDW fractions and laboratory tests of physical and mechanical characterization to determine the viability of the use of the SOIL-CDW mixture in paving for low traffic road networks. All of the studied SOIL-CDW mixtures were approved for use as sub-base layers as they meet the minimum requirements required by the current standards, while the raw soil did not present satisfactory results that could be accredited to use the structural system layers of a pavement.

Keywords: Flexible Pavement. Structural system. Reverse logistic. Sustainability.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 01 - SEÇÃO TRANSVERSAL TÍPICA DE UM PAVIMENTO FLEXÍVEL.	21
FIGURA 02 - CLASSIFICAÇÃO DE SOLOS HRB ADOTADA PELA AASHTO. ...	27
FIGURA 03 - LOCAL DE EXTRAÇÃO DO SOLO ESTUDADO.....	39
FIGURA 04 - OBRA DE RETIRADA DO MATERIAL;.....	40
FIGURA 05 - ETAPAS METODOLÓGICAS PARA ESTA PESQUISA.....	41
FIGURA 06 – PENEIRAMENTO. A) AMOSTRA TOTAL SELECIONADA PARA O PENEIRAMENTO; B) FRAÇÃO RETIDA NA #4; C) FRAÇÃO RETIDA NA #16; D) FRAÇÃO RETIDA NA #40; E) FRAÇÃO RETIDA NA #50; F) FRAÇÃO RETIDA NA #100.	43
FIGURA 07 - PROCEDIMENTO ENSAIO DE DETERMINAÇÃO DA DENSIDADE REAL.....	45
FIGURA 08 - A) SOLO PENEIRADO; B) ADIÇÃO DE ÁGUA DESTILADA; C) SOLO PRONTO PARA REALIZAÇÃO DO ENSAIO; D) REALIZAÇÃO DO ENSAIO DE LL NO APARELHO DE CASAGRANDE; E) ROLAGEM DO SOLO NO ENSAIO DE LP.....	47
FIGURA 09 - RCD PENEIRADO.	48
FIGURA 10 - A) CORPO-DE-PROVA MOLDADO NA UMIDADE ÓTIMA; B) IMERSÃO EM ÁGUA DESTILADA; C) PENETRAÇÃO DO PISTÃO NO CORPO- DE-PROVA; D) CORPOS-DE-PROVA ROMPIDOS APÓS O ENSAIO.	50

LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 01 - LIMITE DE LIQUIDEZ DO SOLO NATURAL.	52
GRÁFICO 02 - GRANULOMETRIA DAS AMOSTRAS DE SOLO NATURAL, REFORÇO SC E REFORÇO SCP.....	53
GRÁFICO 03 - CURVAS DE COMPACTAÇÃO.....	54
GRÁFICO 04 - ENSAIO DE PENETRAÇÃO - ISC.	55

LISTA DE QUADROS

QUADRO 01 - CLASSIFICAÇÃO DOS RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO.	30
QUADRO 02 - COLETA DE RCD EM 2017.	30
QUADRO 03 - DADOS DO ENSAIO DE DENSIDADE REAL.	45
QUADRO 04 - COMPOSIÇÃO DAS AMOSTRAS ANALISADAS.	49
QUADRO 05 - LIMITES DE EXPANSÃO E ISC.	50
QUADRO 06 - RESUMO DOS ENSAIOS EXECUTADOS.	51
QUADRO 07 - RESULTADOS DA DENSIDADE REAL DO SOLO.	52
QUADRO 08 - EXPANSÃO E ISC.	56

LISTA DE TABELAS

TABELA 01 - TAXAS DE DESPERDÍCIOS DE MATÉRIAS DE CONSTRUÇÃO NO BRASIL.	29
--	----

LISTA DE SIGLAS

AASHTO – *American Association of State Highway and Transportation Officials*

ABRELPE - Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais

CBIC - Câmara Brasileira da Indústria da Construção

CBR – *Califórnia BearingRatio* (Índice Suporte Califórnia)

Cc – Coeficiente de Curvatura

CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente

Cu - Coeficiente de Uniformidade

DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem

DNIT – Departamento de Infraestrutura de Transportes

HRB - *Highway Research Board*

IP - Índice de plasticidade

IPEA - Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada

ISC - Índice Suporte Califórnia

LL – Limite de Liquidez

LP – Limite de Plasticidade

PNRS - Política Nacional de Resíduos Sólidos

RCC - Resíduo da Construção Civil

RCD - Resíduos da Construção e Demolição

SCP – Solo-Cascalinho

SCP – Solo-Cascalinho-Pó

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
2	JUSTIFICATIVA.....	18
3	OBJETIVOS	19
3.1	Objetivo Geral.....	19
3.2	Objetivos Específicos	19
4	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	20
4.1	O Pavimento flexível e sua estrutura.....	20
4.2	Importância das camadas de base e sub-base ao sistema estrutural.	22
4.3	Caracterização física e mecânica dos solos	24
4.3.1	Densidade Real	24
4.3.2	Limites de Atterberg	24
4.3.3	Análise Granulométrica	25
4.3.4	Compactação do solo e Índice de Suporte Califórnia (ISC ou CBR)	25
4.3.5	Classificação do Solo.....	26
4.3.5.1	<i>Sistema rodoviário de classificação – HRB/AASHTO.....</i>	<i>26</i>
4.4	Resíduo da construção civil e demolição – RCD	28
4.4.1	Classificação dos RCD.....	29
4.4.2	Impactos ambientais.....	30
4.4.3	Regulamentação e gerenciamento de RCD.....	31
4.4.4	Uso de RCD em camadas granulares de pavimentos.....	33
4.4.5	Sustentabilidade e Logística Reversa.....	35
4.5	Estabilização do Solo	36
5	METODOLOGIA	39
5.1	Coleta das Amostras	39
5.2	Ensaio Laboratoriais – Caracterização do Solo Natural	41
5.2.1	Análise granulométrica por peneiramento	42
5.2.2	Densidade real.....	44

5.2.3	Limites de Atterberg	46
5.3	Caracterização do RCD e misturas SOLO-RCD.....	48
6	RESULTADOS	52
5.	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	57
	REFERÊNCIAS	59

1 INTRODUÇÃO

Mesmo em baixa nos últimos anos, a indústria da construção civil ainda é um segmento que movimenta bastante a economia brasileira, principalmente por ser uma atividade diretamente ligada ao desenvolvimento econômico e social do país. De acordo com a Câmara Brasileira da Indústria da Construção - CBIC o mercado da construção civil representou, em 2017, 7,3% do PIB do Brasil. Porém, em contrapartida a todo desenvolvimento propiciado pela construção civil, há o ônus da degradação ambiental.

Sabe-se que a construção civil é uma atividade que retira grandes quantidades de recursos naturais do meio ambiente e gera resíduos nas mesmas proporções. A Resolução nº307 do Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA de 2002 define Resíduo da Construção Civil - RCC como os rejeitos provenientes de construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, e os resultantes da preparação e da escavação de terrenos, tais como: tijolos, blocos cerâmicos, concreto em geral, solos, rochas, metais, resinas, colas, tintas, madeiras e compensados, forros, argamassa, gesso, telhas, pavimento asfáltico, vidros, plásticos, tubulações, fiação elétrica etc., comumente chamados de entulhos de obras, caliça ou metralha; Podendo também ser nomeados Resíduos da Construção e Demolição - RCD.

No Diagnóstico dos Resíduos Sólidos da Construção Civil publicado em 2012 pelo Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada - IPEA é estimado que a geração de RCD no Brasil varie de 0,3 a 0,7 tonelada de entulho por habitante todos os anos, o que representa o dobro da geração *per capita* de resíduos sólidos domiciliares, e 2/3 da massa de resíduos sólidos urbanos gerada nos municípios brasileiros sendo a maior parte proveniente de construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil. O Panorama de Resíduos Sólidos, publicado em 2018 pela Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais - ABRELPE aponta que foi coletado 45 milhões de RCD em todo o Brasil durante todo o ano de 2017, tendo em média cada habitante gerado 0,594 quilogramas de entulho por dia.

Analisando esses dados, percebe-se que o país tem um grande problema quanto à alocação desses resíduos. A Política Nacional dos Resíduos Sólidos juntamente com a Resolução nº307/2002 da CONAMA atribui ao gerador do resíduo a responsabilidade de gerenciar os rejeitos das atividades de construção, reforma, reparos e demolições de estruturas e estradas, bem como por aqueles resultantes da remoção de vegetação e escavação de solos. A má gestão desses resíduos, ou simplesmente a falta dela, pode

poluir os solos, degradar paisagens, trazer riscos a saúde coletiva e outros malefícios à sociedade e ao meio ambiente.

Brasileiro e Matos (2015) enfatizam que o RCD serve de matéria-prima para agregados de ótima qualidade, podendo ser utilizados num leque de variedades de processos construtivos: confecção de tijolos, blocos pré-moldados, meio-fio, calçadas, argamassa de revestimento, camadas de base e sub-base, pavimentos, entre outros. Portanto, uma alternativa de gestão inteligente desses rejeitos seria a implementação de uma logística reversa que aproveitaria o RCD de diferentes composições em diferentes áreas da engenharia visando reduzir a quantidade de resíduos depositados no meio ambiente e os custos de administração de resíduos e de matéria prima das novas obras.

Fugii (2012) afirma que uma das alternativas vantajosas para o RCD é a sua utilização em camadas de pavimento de rodovias submetidas a baixo volume de tráfego. Destaca-se que, dependendo de suas características e grau de pureza, eles podem também ser usados em rodovias de médio e mesmo de alto volume de tráfego, melhorando as características mecânicas e estruturais das camadas, porém Omido et. al (2018) enfatiza que a heterogeneidade dos produtos gerados a partir da reciclagem do RCD aponta a necessidade de elaboração de estudos locais para sua aplicação.

Neste estudo foram utilizadas amostras de solo e de RCD coletados no município de Araruna - PB e feitos ensaios laboratoriais necessários para determinar a viabilidade da utilização da mistura SOLO-RCD como camadas de base e sub-base para pavimentos do tipo flexível.

2 JUSTIFICATIVA

A pavimentação é de grande importância para o desenvolvimento dos centros urbanos, possibilitando a redução de tempo e custos de transportes. Todavia, a quantidade de material granular disponível para as estruturas de pavimento é cada vez menor, onerosa e há empasses para liberação ambiental (Fugii, 2012).

Diante dessa escassez de recursos, torna-se evidente a importância da busca por opções sustentáveis que possam substituir esses materiais. Pesquisas já apontam vários materiais alternativos com avaliação positiva quando usados para estabilizar solos para camadas de pavimentos. Entre esses materiais, tem o RCD que já está sendo explorado nos últimos anos como alternativa de matéria prima sustentável e de baixo custo.

Segundo Omido et. al (2018) a necessidade de expansão da malha viária pavimentada brasileira faz com que a utilização do RCD em camadas para pavimentação torne-se uma opção viável tanto para a administração pública quanto para a privada, em virtude do ganho ambiental e de seu custo.

Este estudo apresenta como tema a utilização de materiais alternativos para a aplicação em camadas de pavimentos com baixo volume de tráfego. Na versão preliminar do plano municipal simplificado de gestão dos resíduos sólidos do município em questão não há indicação de um sistema de destinação ou de disposição final dos resíduos da construção e demolição gerados nos seus limites, dessa forma, conclui-se que esses rejeitos terão a mesma destinação que o resíduo sólido comum.

Esta pesquisa justifica-se com base nesta problemática diagnosticada, pois sabe-se que a possibilidade de reciclar o agregado para ser utilizado na estabilização do solo para camadas de pavimento no próprio município seria uma alternativa de minimização dos problemas causados pela geração de resíduos e prover matéria prima a baixo custo para os serviços locais de pavimentação.

3 OBJETIVOS

3.1 Objetivo Geral

O presente trabalho tem como objetivo geral verificar a viabilidade da utilização do RCD num solo coletado no município de Araruna – PB, a fim de estabilizá-lo gerando uma mistura SOLO-RCD para a aplicação em camadas de base e sub-base de pavimentos com baixo volume de tráfego.

3.2 Objetivos Específicos

- ✓ Caracterizar e classificar o solo e o RCD coletados no município de Araruna-PB, com base nos ensaios laboratoriais;
- ✓ Sugerir dosagens para a estabilização da mistura SOLO – RCD;
- ✓ Comparar e avaliar os resultados da análise do comportamento mecânico do solo natural e da mistura SOLO – RCD.

4 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

4.1 O Pavimento flexível e sua estrutura

O pavimento de uma estrada é, segundo o Manual de Pavimentação do DNIT (2006), a superestrutura constituída por um sistema de camadas de espessuras finitas, assentadas sobre um semi-espaço considerado teoricamente como infinito, designado de subleito.

Segundo Senço (2008) essa estrutura tem como principal função proporcionar conforto e segurança para a circulação de veículos sob a superfície de sua camada mais externa, denominada camada de rolamento, bem como resistir e transmitir para o subleito os esforços verticais oriundos do tráfego e suportar os esforços horizontais (desgaste), Rutzen (2015) ainda comenta que o pavimento também deve resistir aos efeitos das mudanças climáticas e permitir o escoamento da água.

O pavimento rodoviário pode ser constituído por materiais variados com diferentes resistências, espessuras e deformabilidades e são divididos de acordo com sua rigidez. Ainda segundo o DNIT (2006), o pavimento flexível, escolhido para este estudo, é aquele em que todas as camadas sofrem deformação elástica significativa sob o carregamento aplicado e, portanto, a carga se distribui em parcelas aproximadamente equivalentes entre as camadas.

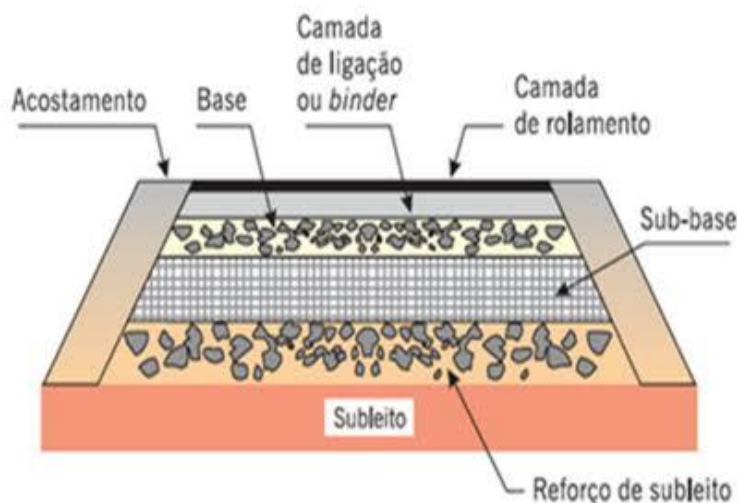
Além da estrutura flexível, os pavimentos rodoviários também podem ser classificados como semirrígidos ou rígidos, diferindo principalmente os materiais constituintes e o perfil de camadas.

Para Jimenez (2014), as características consideradas para o dimensionamento de um pavimento são:

- ✓ O tráfego e suas características: composição, volume, crescimento e tempo de utilização previsto;
- ✓ Capacidade de suporte do subleito cujo pavimento será assentado. Essa característica depende da natureza e propriedades do solo a ser utilizado;
- ✓ Materiais e processos construtivos utilizados;
- ✓ Condições climáticas da região que a qual o pavimento será submetido.

A figura 01 mostra as camadas constituintes do pavimento flexível. Nela consta uma fundação, o subleito, e camadas com diferentes espessuras. Cada camada tem uma função específica dentro do sistema estrutural e suas espessuras devem ser determinadas por algum método de dimensionamento, sendo o mais utilizado no Brasil o método do DNER.

Figura 01- Seção transversal típica de um pavimento flexível.



Fonte: Bernucci *et al.*, 2010.

O subleito é a camada mais interna do pavimento e se comporta como o terreno de fundação da estrutura recebendo e absorvendo os esforços provenientes do tráfego. O subleito pode ou não apresentar regularização da sua superfície, geralmente há a regularização quando houve uma terraplanagem recente, quando o subleito apresentar superfície irregular, será necessário executar uma camada de regularização entre o subleito e as demais camadas.

Senço (2008) define a camada de regularização como uma camada de espessura irregular, constituída sobre o subleito e destinada a conformá-lo transversal e longitudinalmente, deixando a superfície do subleito com as características geométricas do pavimento acabado.

No método de dimensionamento do DNER, a resistência do subleito é determinada pela média aritmética do CBR e de índices derivados do índice de Grupo, valor adquirido em ensaios de caracterização. Quando o CBR do solo for menor que 2% é aconselhável substituir todo o material do subleito por um de melhor qualidade;

Adotar uma camada de reforço quando o CBR estiver entre 2% e 20%; e quando o CBR for maior que 20%, a fundação pode ser considerada como uma sub-base.

A camada superior ao subleito é denominada reforço do subleito. Esta camada tem espessura constante e é construída apenas quando a camada imediatamente superior, a sub-base, precisa de um suporte. Para Senço (2008), o reforço é parte estrutural do pavimento, pois não tem a função absorver esforços, mas de distribuí-los para o subleito.

A sub-base é a camada acima do reforço e é uma camada complementar à base, geralmente, a sub-base é constituída por um material de qualidade inferior ao da base e superior ao do subleito. Será necessária a execução dessa camada quando os solos do subleito forem de baixa qualidade. A base de um pavimento é, segundo Senço (2008), a camada destinada a resistir aos esforços verticais oriundos do tráfego e distribuí-los.

E o revestimento, ou camada de rolamento, é a camada mais exterior e nobre do pavimento, nela atuarão diretamente todas as cargas do tráfego bem como todas as ações climáticas, portanto, deve ser o mais impermeável possível. Senço (2008) cita ainda que esta camada tem função de melhorar a superfície de rolamento das vias quanto às condições de conforto e segurança e resistir ao desgaste aumentando a durabilidade da estrutura.

Bernucciet al. (2008) complementa que esta camada também deve conferir ao pavimento: flexibilidade, estabilidade, resistência à derrapagem, e ao trincamento térmico. Revestimentos flexíveis são constituídos por agregados e materiais betuminosos ou calçamentos. No método de dimensionamento do DNER, a camada de revestimento tem superfície adotada a partir de indicadores técnicos e econômicos, visto que, a camada de revestimento é a de maior custo unitário.

4.2 Importância das camadas de base e sub-base ao sistema estrutural

A base de um pavimento é a camada destinada a resistir aos esforços verticais oriundos dos veículos, distribuindo-os adequadamente à camada subjacente, executada sobre a sub-base, subleito ou reforço do subleito devidamente regularizado e compactado (DNIT - Norma 141/2010-ES).

Já a sub-base é uma camada de pavimentação, complementar à base e com as mesmas funções desta, executada sobre o subleito ou reforço do subleito, devidamente

compactado e regularizado (DNIT – Norma 139/2010 – ES). Esta camada auxiliar deverá ser construída visando economia ou melhorias de desempenho da base.

Uma base ou sub-base de pavimento flexível também deverá apresentar comportamento flexível, se deformando à medida que transmitem as cargas do tráfego para as camadas subjacentes até o subleito. Bases e sub-bases de natureza flexível serão construídas por materiais granulares e solos, estabilizados granulometricamente pela compactação ou, quando necessário, estabilizadores químicos ou aglomerantes que modifiquem a plasticidade e a sensibilidade à água. Algumas das bases tradicionais são de brita graduada, solo-cimento, macadame hidráulico ou macadame betuminoso.

Jimenez (2014) afirma que camadas granulares trabalham essencialmente por atrito interno entre as partículas de seu esqueleto mineral, portanto, a resistência ao desgaste por atrito dos agregados que compõe as camadas é uma propriedade essencial para o perfeito funcionamento da estrutura do pavimento. O DNIT em sua norma 141/2010 – ES apresenta as seguintes especificações mínimas para um solo poder ser utilizado como base de um pavimento:

- ✓ CBR (Índice Suporte Califórnia – ISC) $\geq 60\%$ para Número N $\leq 5 \times 10^6$ ou CBR $\geq 80\%$ para Número N $> 5 \times 10^6$;
- ✓ Expansão $\leq 0,5\%$.

Para a utilização do solo como sub-base, as recomendações da norma DNIT 139/2010 – ES são:

- ✓ CBR (Índice de Suporte Califórnia – ISC) $\geq 20\%$;
- ✓ Expansão $\leq 1\%$.

Materiais com valores inferiores aos citados devem ser descartados ou estabilizados a fim de se obter os requisitos mínimos para sua utilização na pavimentação. Um pavimento poderá ser considerado econômico, para Villibor *et al.* (2009), quando utilizar bases constituídas de materiais alternativos, podendo ser solos locais *in natura* ou em misturas com pequeno percentual de agregado, cujos custos de execução serão substancialmente menores que as bases mais utilizadas.

Existem atualmente inúmeras pesquisas sobre novos materiais e técnicas alternativas com potencial para serem empregados na pavimentação, propiciando substancial redução de custo final. Entretanto, deve-se ressaltar que os pavimentos econômicos são apenas indicados para vias com baixo volume de tráfego.

4.3 Caracterização física e mecânica dos solos

O solo se destaca como um dos materiais mais antigos utilizados na engenharia civil. Segundo Caputo (1988) solo é um material que resulta do intemperismo ou meteorização das rochas, por desintegração mecânica ou decomposição química. Portanto, o solo é um material derivado de rochas que sofreram ações de agentes externos e é formado por um conjunto de partículas sólidas, de natureza mineral e orgânica, ar e água, geralmente composto por um sistema trifásico.

A consistência do solo é determinada a partir do equilíbrio desse sistema trifásico e é, juntamente com a distribuição dos grãos, capacidade de drenagem, compressibilidade, expansão, resistência ao cisalhamento, e etc., uma característica de interesse de todo engenheiro geotécnico. A importância de caracterizar e classificar os solos, na área da engenharia, é definir as características previamente citadas a fim de prever o comportamento do solo estudado, dando a este uma aplicação adequada, bem como uma maior margem de segurança ao trabalho do engenheiro.

A caracterização do solo é feita a partir de ensaios laboratoriais regidos por normas técnicas que regulamentam todo o procedimento a ser realizado e especificam os materiais e métodos a serem utilizados.

4.3.1 Densidade Real

A densidade real do solo é a relação entre o peso específico das partículas sólidas e o peso de igual volume de água pura. Conhecendo-se a densidade do solo é possível definir diversas características do solo, tais como: porosidade, permeabilidade, grau de saturação, e etc.

De maneira geral, quanto maior for a densidade de um solo, maior será sua compactação e menor será sua porosidade. A norma DNER-ME 093/94 apresenta o procedimento de ensaio para a determinação da densidade real do solo.

4.3.2 Limites de Atterberg

O limite de liquidez é representado por um teor de umidade que marca, de acordo com a norma de referência DNER-ME 122/94, a transição do solo do estado plástico ao estado líquido. O método tradicional utilizado para determinação do teor de

liquidez é o padronizado por Arthur Casagrande, que utiliza o aparelho de sua própria autoria.

Já o limite de plasticidade é representado por um teor médio de umidade no qual o solo começa a se fissurar quando se tenta moldar um cilindro de 3,0 mm de diâmetro. Esse teor de umidade marca a transição do solo no estado sólido ao estado plástico. A norma DNER-ME 082/94 apresenta todo o procedimento para a determinação do limite de plasticidade de um solo.

Em estudos geotécnicos, a correlação entre o limite de liquidez e o limite de plasticidade, tem grande aplicação em avaliações de solo para uso em fundações, construções de estradas e estruturas para armazenamento e retenção de água. O Índice de plasticidade (IP) é definido pela norma DNER-ME 082/94 como a diferença numérica entre o limite de liquidez e o limite de plasticidade. Esse índice é utilizado na classificação dos solos.

4.3.3 Análise Granulométrica

Esta análise trata-se de um procedimento utilizado para determinar as dimensões dos grãos do solo e tem o objetivo de determinar os tamanhos dos diâmetros equivalentes das partículas sólidas em conjunto com a proporção de cada fração constituinte do solo em relação ao peso do solo seco.

O ensaio de granulometria tem como resultado a determinação da curva granulométrica que representa a graduação dos grãos do solo, bem como suas características de uniformidade e tipo de graduação.

A análise granulométrica pode ser realizada por meio do ensaio de sedimentação, normatizado pela norma DNER-ME 051/94 ou por peneiramento, que tem o método de ensaio normatizado pela norma DNER-ME 083/98.

4.3.4 Compactação do solo e Índice de Suporte Califórnia (ISC ou CBR)

A compactação é um método de estabilização do solo através da aplicação de energia e confere ao solo um aumento de seu peso específico e resistência ao cisalhamento, além da diminuição do índice de vazios, permeabilidade e compressibilidade (Rutzen, 2015).

O ensaio de compactação do solo utilizando amostras não trabalhadas é normatizado pela norma DNIT 164/2013-ME e tem o objetivo de determinar a correlação entre o teor de umidade do solo e sua massa específica aparente seca para cada uma das energias de compactação padrões: Proctor Normal, Proctor Intermediário e Proctor Modificado.

O ensaio de Determinação do Índice de Suporte Califórnia utilizando amostras não-trabalhadas é normatizado pela norma DNIT 172/2016-ME e tem por objetivo avaliar a capacidade de suporte de um solo compactado para sua utilização em bases, sub-bases e subleitos de pavimentos, bem como sua expansividade quando imerso em água.

4.3.5 Classificação do Solo

O solo é um material muito versátil na engenharia, ele pode ser utilizado como material de construção para as mais variadas obras ou como suporte de fundação, dependendo de suas principais características. Como os solos ocorrem em diferentes formas na natureza, foi necessário classifica-los de modo que agrupem os solos com características em comum. Vários sistemas de classificação já foram desenvolvidos, geralmente adequados a uma utilização dos solos ou a um método de projeto.

4.3.5.1 Sistema rodoviário de classificação – HRB/AASHTO

O sistema de classificação Highway Research Board (HRB), aprovado em 1945, é bastante utilizado na pavimentação. Os solos são subdivididos em sete grupos e oito subgrupos em função de sua granulometria, limites de consistência e do índice de grupo.

Tem-se que a classificação HRB/AASHTO é intimamente relacionada ao método de dimensionamento de pavimentos pelo índice de grupo. Neste método, o grupo do solo é determinado por processo de eliminação da esquerda para a direita do quadro de classificação (DNIT, 2006). A figura 02 contém o quadro de classificação do solo seguindo os critérios da AASHTO.

Figura 02 - Classificação de solos HRB adotada pela AASHTO.

Classificação geral	Materiais granulares (p) (35% ou menos passando na peneira nº 200)							Materiais siltosos e argilosos (p) (mais de 35% passando na peneira de nº 200)			
	A-1		A-3	A-2				A-4	A-5	A-6	A-7
	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				A-7-5 A-7-6
Peneiração: % que passa: Nº 10 Nº 40 Nº 200 (p)	50 máx. 30 máx. 15 máx.	50 máx. 25 máx.	51 mín. 10 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	36 mín.	36 mín.	36 mín.	36 mín.
Características da fração que passa nº 40: Limite de Liquidez-LL - (%) Índice de Plasticidade IP - (%)				40 máx. 10 máx.	41 mín. 10 máx.	40 máx. 11 mín.	41 mín. 11 mín.	40 máx. 10 máx.	41 mín. 10 máx.	40 máx. 11 mín.	41 mín. 11 mín.
Índice de Grupo (IG)	0		0	0		4 máx.		8 máx.	12 máx.	16 máx.	20 máx.
Materiais que predominam	Pedra britada pedregulho e areia		Areia fina	Areia e areia siltosa ou argilosa				Solos siltosos		Solos argilosos	
Comportamento geral como subleito	Excelente a bom							Fraco a pobre			

* Processo de classificação: Com os dados de laboratório, iniciar a classificação da esquerda para a direita, por eliminação.
O primeiro grupo da esquerda que satisfizer os dados será o grupo procurado.
* Solos A-7: Se IP ≤ LL - 30 será A-7-5; Se IP > LL-30, será A-7-6.

Fonte: Senço, 2008.

Os grupos e subgrupos são definidos pelo DNIT (2006) como:

- ✓ Grupo A-1: material constituído de mistura bem graduada de pedra ou pedregulhos, areia grossa, areia fina, entre outros.
 - Subgrupo A-1-a: materiais contendo fragmentos de pedra ou pedregulho, com ou sem material fino bem graduado, funcionando como aglutinante.
 - Subgrupo A-1-b: materiais constituídos de areia grossa, com ou sem aglutinante de solo bem graduado.
- ✓ Grupo A-2: este grupo inclui os materiais constituídos de mistura silte-argila entre os grupos A-4, A-5, A-6 e A-7. Constituem-se, também, de solos com 35% ou menos passantes na peneira nº 200, mas que não podem ser classificados como A-1 ou A-3, devido ao teor de finos, ou a plasticidade, ou ambos excedendo os limites estabelecidos para os citados grupos.
 - Subgrupos A-2-4 e A-2-5: esse grupo abrangem os materiais que contem pedregulho e areia grossa, em que o teor de silte e o índice de plasticidade ultrapassam os limites estabelecidos para o Grupo A-1, e ainda, areia fina com silte não plástico excedendo os limites do Grupo A-3.

- Subgrupos A-2-6 e A-2-7: incluem solos semelhantes aos descritos nos subgrupos A-2-4 e A-2-5, a exceção ocorre pela porção de finos que contem argila plástica com características dos Grupo A-6 ou A-7.
- ✓ Grupo A-3: o material típico deste grupo é areia fina de praia ou deserto, sem silte ou argila. O grupo inclui também misturas de areia fina mal graduada e quantidades limitadas de areia grossa e pedregulho depositado pelas correntes.
- ✓ Grupo A-4: o solo deste grupo é siltoso não plástico, ou moderadamente plástico, com 5% ou mais passando na peneira nº 200. Também, inclui misturas de solo fino siltoso com até 64% de areia e pedregulho retidos na peneira nº 200.
- ✓ Grupo A-5: o solo típico deste grupo é semelhante ao A-4, diferenciando-se por ter um caráter altamente elástico e elevado limite de liquidez.
- ✓ Grupo A-6: o solo deste grupo é argiloso plástico, com 75% ou mais de material passando na peneira nº 200. Inclui, também, misturas de solos finos argilosos, podendo conter até 64% de areia e pedregulho retido na peneira nº 200. Os solos deste grupo sofrem elevada mudança de volume entre os estados seco e úmido.
- ✓ Grupo A-7: o solo é semelhante ao descrito no grupo A-6, com a diferença que possui características de alto limite de liquidez do grupo A-5, podendo ainda ser elástico e estar sujeito a elevada mudança de volume.
 - Subgrupo A-7-5: materiais com índice de plasticidade moderado em relação ao limite de liquidez, podendo ser altamente elástico e sujeito a elevadas mudanças de volume.
 - Subgrupo A-7-6: materiais com elevados índices de plasticidade em relação aos limites de liquidez, estando sujeitos a elevadas mudanças de volume.

4.4 Resíduo da construção civil e demolição – RCD

O Resíduo da Construção e Demolição (RCD) é uma subcategoria dos resíduos sólidos urbanos. No Brasil temos a Resolução 307/2002 da CONAMA que estabelecem diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil. Essa Resolução define o RCD como o resíduo proveniente de construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, e os resultantes da preparação e da escavação de terrenos, tais como: tijolos, blocos cerâmicos, concreto em geral, solos, rochas, metais, resinas, colas, tintas, madeiras e compensados, forros, argamassa, gesso, telhas,

pavimento asfáltico, vidros, plásticos, tubulações, fiação elétrica etc., comumente chamados de entulhos de obras, calça ou metralha.

Grande parte da produção diária dos resíduos vem do desperdício de materiais em novas construções em geral, devido a projetos construtivos mal executados, com equivocadas especificações de materiais e detalhes associados à falta de planejamento da execução da obra, muitas vezes resultando em improvisos (BAPTISTA Jr.; ROMANEL, 2013). Na Tabela 01, as taxas de desperdício no Brasil são apresentadas em termos de valores médios, mínimos e máximos, em consequência da grande variação observada nos dados existentes.

Tabela 01 - Taxas de desperdícios de matérias de construção no Brasil.

Taxas de desperdício (%)			
Material	Média	Mínima	Máxima
Concreto usinado	9	2	23
Aço	11	4	16
Blocos e tijolos	13	3	48
Placas cerâmicas	14	2	50
Revestimento têxtil	141	14	14
Eletrodutos	15	13	18
Tubos	15	13	18
Tintas	17	8	56
Fios	27	14	35
Gesso	30	14	120

Fonte: ESPINELLI, 2005.

4.4.1 Classificação dos RCD

A classificação de RCD envolve a identificação do processo ou atividade que lhes deu origem e de seus constituintes. São agrupados a partir de características em comum e potencial de impacto à saúde dos seres vivos e ao meio ambiente.

O Quadro 01 mostra a classificação do RCD em quatro classes pela resolução CONAMA 307/2002 de acordo com seu potencial de reutilização. Vale ressaltar que o gerador é o responsável pela gestão de todo o RCD gerado em suas atividades.

Quadro 01 - Classificação dos resíduos de construção e demolição.

CLASSES	A	São os resíduos recicláveis ou reutilizáveis em forma de agregados, tais como: <ul style="list-style-type: none">• De construção, demolição, reformas e reparos de edificações; materiais cerâmicos em geral (blocos, telhas, tijolos, revestimento), concreto e argamassa;• De fabricação e/ou demolição de peças pré-moldadas em concreto (blocos, tubulações, meios-fios) produzidos nos canteiros de obras;• De construção, demolição, reformas e reparos pavimentação e de outras obras de infraestrutura, solos provenientes de terraplenagem.
	B	São os resíduos recicláveis para outros fins, tais como: plástico, papel/papelão, materiais metálicos, madeiras, vidros e outros.
	C	São resíduos para os quais ainda não foram desenvolvidas aplicações economicamente viáveis ou tecnologias que permitam o seu beneficiamento, tais como produtos oriundos do gesso.
	D	São os resíduos considerados perigosos, proveniente de processos de construção, tais como: solventes, tintas, óleos e outros, ou aqueles contaminados que provém de demolições, reformas e reparos de clínicas radiológicas, instalações industriais, etc.

Fonte:BRASIL, 2002.

4.4.2 Impactos ambientais

A construção civil é uma atividade de grande impacto ambiental. Além do exacerbado uso de recursos naturais, a construção civil gera grandes volumes de resíduos. A geração de RCD pode representar até 2/3 do volume total de resíduos sólidos urbanos gerados. A ABRELPE, em seu panorama de resíduos de 2017, estimou que foram coletadas oficialmente 45 milhões de toneladas de RCD em todo o Brasil, sendo a região Sudeste a maior geradora e a região Centro-Oeste a de maior índice de geração *per-capita*. Nesse mesmo ano, o total de resíduos sólidos gerado foi 78,4 milhões de toneladas. O quadro 02 trás os valores de coleta de RCD por região.

Quadro 02 - Coleta de RCD em 2017.

REGIÃO	2017	
	RCD Coletado (t/dia)	Índice per capita
BRASIL	123421	0,594
NORTE	4727	0,264
NORDESTE	24585	0,429
CENTRO-OESTE	13574	0,855
SUDESTE	64063	0,737
SUL	26472	0,556

Fonte: Pesquisa ABRELPE/IBGE, 2017.

Nota-se que as regiões com maior industrialização são as maiores geradoras de RCD, podendo então afirmar que quanto maior crescimento econômico da região, maior a geração de RCD. Os dados exibidos no quadro 02 são de massas de resíduos coletadas

oficialmente, portanto, pode-se concluir que esse valor real deve ser maior, visto que parte do resíduo gerado não tem uma destinação final adequada ou não tem destinação nenhuma, é simplesmente largado em algum local próximo ao da geração e acabam por não serem contabilizados.

De forma geral, os RCD's no Brasil não representam grandes riscos à saúde humana e ao meio ambiente em razão de suas características químicas e minerais serem semelhantes aos agregados naturais e solos (Cardoso, 2014, apud KARPINSKI, 2007). Entretanto, Paschoalin Filho (2012) comentou que a gestão inadequada de RCD oferece riscos à saúde coletiva, variado de proliferação de vetores, exposição não controlada de resíduos potencialmente perigosos, entupimento dos sistemas de drenagem urbana e degradação da paisagem urbana.

A resolução CONAMA 307/2002 atribui ao gerador a responsabilidade destinar adequadamente o resíduo gerado. Paschoalin Filho (2012) ainda comentou que grandes volumes de entulho são depositados diariamente em locais não adequados em diversos municípios brasileiros, configurando-se esta situação em cena comum na rotina dos cidadãos e ressaltam que tal prática além de imprópria é ilegal.

Ele também observou que a maior parte do volume de RCD despejado em áreas irregulares (“bota-foras” clandestinos, margens de rios ou córregos, logradouros, terrenos baldios, vias públicas, etc.) provém de pequenas construções residenciais e reformas, sendo o transporte operado por empresas irregulares ou carroceiros.

O acúmulo de resíduos em áreas inadequadas, decorrente da má gestão desses resíduos, é bastante prejudicial e pode facilitar a proliferação de organismos patogênicos tais como baratas, moscas, vermes, vírus, entre outros, além de comprometer a paisagem natural, o tráfego de pedestres, a drenagem pluvial e modificar de forma geral o meio ambiente e a qualidade de vida da população próxima a essas áreas.

4.4.3 Regulamentação e gerenciamento de RCD

A Política Nacional de Resíduos Sólidos – PNRS instituída pela lei 12.305/2010 foi um divisor de águas para a gestão de resíduos sólidos no Brasil. Esta Lei apresenta-se, como orientadora para Estados, Distrito Federal e Municípios, no sentido de indicar caminhos para o equilíbrio ambiental e para uma qualidade de vida sadia, no que se refere aos resíduos sólidos. Assim, a lei da PNRS define os fundamentos para a criação

de Políticas Públicas eficientes por parte das diversas esferas do Poder Público, iniciativas de Organizações Não Governamentais (ONGs) e de empresas, as quais estão discriminadas nessa Lei. Esta lei também determina que cada município elabore um plano de gestão integrada de resíduos sólidos.

Outros importantes instrumentos legais e resoluções normativas referentes aos RCD's são:

- ✓ Resolução CONAMA n° 307/2002: Estabeleceu diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos RCC;
- ✓ Resolução CONAMA n° 348/2004: Alterou a Resolução Conama n° 307/2002 incluindo o amianto na classe de resíduos perigosos;
- ✓ Resolução CONAMA n° 431/2011: Alterou o art. 3° da Resolução Conama n° 307/2002 estabelecendo nova classificação para o gesso;
- ✓ Decreto Regulamentador n° 7404/2010: Regulamentou a Lei n° 12.305, de 2 de agosto de 2010, que institui a PNRS, cria o Comitê Interministerial da Política Nacional de Resíduos Sólidos e o Comitê Orientador para a Implantação dos sistemas de logística reversa, e dá outras providências;
- ✓ PMJP/PB – Lei Municipal N° 11.176/2007: Institui o sistema de gestão sustentável de resíduos da construção civil e demolição e o plano integrado de gerenciamento de resíduos da construção civil e demolição de acordo com o previsto na resolução Conama n° 307, de 05 de julho de 2002, e dá outras providências, na cidade de João Pessoa, PB;
- ✓ PMSP/SP ETS - N° 001/2003 – Especificação de serviço - Camadas de reforço do subleito, sub-base e base mista de pavimento com agregado reciclado de resíduo sólidos da construção civil;
- ✓ NBR 15112/2004: Resíduos da construção civil e resíduos volumosos – Áreas de transbordo e triagem – Diretrizes para projeto, implantação e operação;
- ✓ NBR 15113/2004: Resíduos sólidos da construção civil e resíduos inertes – Aterros – Diretrizes para projeto, implantação e operação;
- ✓ NBR 15114/2004: Resíduos sólidos da construção civil e resíduos inertes – Área de reciclagem – Diretrizes para projeto, implantação e operação;
- ✓ NBR 15115/2004: Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – Execução de camadas de pavimentação – Procedimentos;

- ✓ NBR 15116/2004: Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural – Requisitos.

No município de estudo Araruna – PB, as pequenas construções residenciais são predominantes. Souza (2016) estima que a produção média atual de resíduos sólidos no município seja em torno de 11,4 toneladas diárias. Desse total é estimado que 4,8 toneladas, que representa 42,11% do total diário de resíduo sólido gerado, são referentes a RCD. O autor também menciona que grande parte do RCD gerado no município de Araruna é reutilizado como aterramento de estradas vicinais danificadas.

Segundo o Plano de Gestão de Resíduos Sólidos do município, a gestão de RCD é feita exclusivamente pela Prefeitura Municipal e, quando não utilizados, são levados para o lixão municipal, mesmo com a resolução CONAMA 307/2002 atribuindo a responsabilidade de destinação do RCD ao gerador. Souza (2016) também cita a recorrente demora que o resíduo fica exposto nas proximidades da obra, prática que vai contra o parágrafo primeiro do art. 4º da resolução CONAMA 307/2002 e que contribui diretamente na degradação da paisagem e do meio ambiente.

Em seu estudo, Souza (2016) ainda analisa o RCD encontrado no município, proveniente de reforma e demolição, e nota que há predominância de resíduos Classe A e pouca incidência de resíduos Classes B e C. Alguns dos materiais encontrados foram: Blocos cerâmicos e de concreto, argamassas, tijolos, solo, madeira, metal, papelão, plástico, gesso. Nota-se que o tipo de resíduo encontrado tem grande potencial de reutilização em outras atividades da engenharia. Um plano de gestão que recuperasse e reaproveitasse ao máximo os materiais que são atualmente descartados, resultaria em diminuição de custos em obras e erradicação de impactos devido à inadequada destinação atual.

4.4.4 Uso de RCD em camadas granulares de pavimentos

A resolução CONAMA 307/2002 afirma que o objetivo principal dos geradores em uma gestão de resíduos é a não geração deles, porém é sabido que esse cenário não é possível de ser alcançado na construção civil, visto que a quantidade de geração de resíduos é na ordem da quantidade de recursos naturais retirados do meio ambiente, portanto, a resolução aconselha os geradores a sempre reduzir, reciclar e reaproveitar a

quantidade de resíduos gerados, quando não for possível, deverá ser dada a correta destinação final do RCD.

De acordo com a pesquisa de Pinto (1999), há notícias sobre reutilização de materiais de demolição como agregado britado a partir do terço final do século XIX, entretanto, o uso significativo de RCD reciclado só veio acontecer após a Segunda Guerra Mundial, em resposta à necessidade de satisfazer a enorme demanda por materiais de construção e à necessidade de remover os escombros das cidades europeias, sendo a Alemanha o país mais atuante na reciclagem de RCD. Após a iniciativa alemã, outras nações se interessaram por essas práticas de reutilização de resíduo (PINTO, 1999 apud SCHULZ; HENDRICKS, 1992).

A reciclagem de RCD no Brasil é bem recente, mas tem chamado a atenção de gestores em busca de alternativas a soluções dos nossos problemas, principalmente pela geração de resultados satisfatórios a baixo custo. De acordo com PINTO (1999) Os países desenvolvidos vêm consolidando o uso de RCD reciclado como material de enchimento para a preparação de terrenos, para projetos de drenagem, para a sub-base de vias e estradas, e como agregado para a produção de novo concreto. Essas opções também são válidas para países, como o Brasil, que recentemente iniciam suas experiências com a gestão dos RCD e sua reciclagem.

Fugii (2012) cita em sua dissertação de mestrado as vantagens da reinserção do RCD como matéria prima nos processos construtivos:

- ✓ Baixo custo, já que grande parte dos custos é relativa ao transporte e que, como são produzidos nas cidades, pode existir uma grande vantagem competitiva em relação aos agregados naturais;
- ✓ Redução da demanda dos agregados primários e consequente preservação das paisagens urbanas e das jazidas;
- ✓ Diminuição das áreas de aterro;
- ✓ Diminuição da atração de transmissores de doenças, do entupimento de bueiros e do assoreamento dos cursos d'água e reservatório, implicando em aumento das enchentes e inundações nas estações chuvosas;
- ✓ Preservação ambiental, o que não é quantificado monetariamente.

A necessidade de expansão da malha viária pavimentada brasileira faz com que a utilização do RCD em camadas para pavimentação torne-se uma alternativa viável

tanto para a administração pública quanto para a privada, em virtude do ganho ambiental e de seu custo (Omido, 2018).

Vários estudos já apontam os resíduos reaproveitados na pavimentação no Brasil e esta se mostrou ser uma alternativa com grande potencial que o Brasil parece estar aos poucos acatando. Motta (2005) apud Bodi et al. (1995) comenta que em 1984 foi pavimentada a primeira via de São Paulo com o emprego de agregado reciclado de resíduos de construção, este logradouro é caracterizado pelo baixo volume de tráfego.

Desde então, a viabilidade do uso do RCD tem sido confirmada como material em camadas de base, sub-base e reforço de subleito para rodovias de baixo volume de tráfego. Orioli (2018) afirma que o principal estímulo para o desenvolvimento de técnicas para a reciclagem do RCD como material na pavimentação vem dos altos custos e da elevada demanda de materiais minerais.

4.4.5 Sustentabilidade e Logística Reversa

Com a vigência da Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei 12.305/2010), a logística reversa foi estabelecida como um dos instrumentos de implementação do princípio da responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos, de maneira a viabilizar um conjunto de ações que visam a coleta e a restituição dos produtos e resíduos sólidos ao setor empresarial, para reaproveitamento em seu ciclo ou em outros ciclos produtivos, ou outra destinação final ambientalmente adequada, de forma a minimizar o envio de materiais para disposição. A PNRS também orienta a hierarquia de ações a serem seguidas na gestão e no gerenciamento dos resíduos sólidos.

Almeida et al (2013) apud Council of Logistic Management (CLM, 2002) define a logística reversa como: “o processo de planejamento, implementação e controle da eficiência e custo efetivo do fluxo de matérias primas, estoque em processo, produtos acabados e as informações correspondentes do ponto de consumo para o ponto de origem com o propósito de recapturar o valor ou destinar à apropriada disposição”. Esse processo é um mecanismo de importante eficácia para a gestão dos danos ao meio ambiente, especialmente na questão da gestão de resíduos e da degradação ambiental.

Compreender esse fluxo consiste no entendimento da logística reversa, em linhas gerais. Constitui-se, assim, nas formas de retorno de uma parte dos produtos que fluem em sentido inverso, do consumidor final ao fabricante e reintegram o ciclo de vida útil do produto, podendo ser modificados e terem uma nova aplicação ou não.

O objetivo principal da logística reversa é, segundo Wille (2012), a gestão e a distribuição do material descartado tornando possível o retorno de bens ou materiais constituintes ao ciclo produtivo agregando valor econômico, ecológico, legal e de localização ao negócio. As atividades presentes na logística reversa abrangem diversas etapas como: coleta, inspeção, separação, compra e venda, devolução, visando uma recuperação sustentável.

Almeida et al (2013) cita algumas estratégias implementadas por empresas do ramo da construção civil que visa a reinserção dos resíduos gerados no ciclo produtivo:

- ✓ Beneficiamento de resíduos classe A, com a produção de agregados reciclados utilizados como base e sub-base de vias de acesso;
- ✓ Redução da geração de resíduos classe A, utilizando as sobras de concreto na produção de pré-moldados utilizados na obra;
- ✓ Compostagem dos resíduos orgânicos para futuro uso na etapa de paisagismo da obra, substituindo parcialmente a compra de adubo;
- ✓ Reutilização de madeira, através de prateleiras de reúso, ao invés de serem descartadas diretamente nas caçambas, desenvolveu-se essas prateleiras como uma forma de reduzir os desperdícios;
- ✓ Os resíduos classe B são encaminhados para a reciclagem.

Almeida et al (2013) afirma que tais estratégias de gestão dos resíduos sólidos impactaram o desempenho organizacional da empresa, trazendo melhorias na imagem perante as partes interessadas, além de ganhos ambientais e econômicos, tais melhorias são convertidas em vantagens competitivas para a empresa. A gestão de resíduos é justificada pela geração de resultados financeiros que contribuem para aumentar os lucros dos investidores.

4.5 Estabilização do Solo

A pavimentação utiliza solos na composição de suas camadas. Para Sartori (2015) o melhor aproveitamento econômico e de desenvolvimento da obra, será quando for utilizado o solo já existente no local a ser realizado a obra. Entretanto, muitas vezes os solos presentes in loco não atendem as especificações mínimas exigidas por normas para a satisfatória utilização.

Por esse motivo, surgiu-se a necessidade de criar métodos para tornar o solo mais adequado para sua aplicação, ou seja, a estabilização deste material. Marques (2006) define estabilizar um solo como conferir-lhe a capacidade de resistir e suportar as cargas e os esforços induzidos pelo tráfego normalmente aplicados sobre o pavimento e também às ações erosivas de agentes naturais sob as condições mais adversas de solicitação consideradas no projeto.

Esse processo tem o objetivo de melhorar o desempenho mecânico bem como garantir maior vida útil à obra que utilizar esse solo estabilizado. Existem então cinco principais métodos para a estabilização: mecânico, granulométrico, químico, elétrico e térmico.

A Estabilização Mecânica baseia-se na correção granulométrica do solo (ou mistura de solos), a partir de processos de compactação, pois esta também é uma maneira de conferir ao solo uma condição de densificação máxima relacionada a uma energia de compactação e alcançar o valor de umidade ótima. Este método é comum no decorrer de uma obra, na execução das diferentes camadas de um pavimento e é complementar a outros métodos de estabilização (Sartori, 2015).

Marques (2006) fez as seguintes observações sobre os demais métodos de estabilização do solo:

A Estabilização Granulométrica consiste da alteração das propriedades dos solos através da adição ou retirada de partículas de solo. Este método consiste, basicamente, no emprego de um material ou na mistura de dois ou mais materiais, de modo a se enquadrarem dentro de uma determinada especificação. Também é chamada de Estabilização Granulométrica.

A Estabilização Química quando utilizada para solos granulares visa principalmente melhorar sua resistência ao cisalhamento (causado pelo atrito produzido pelos contatos das superfícies das partículas) por meio de adição de pequenas quantidades de ligantes nos pontos de contato dos grãos. Os ligantes mais utilizados são o Cimento Portland, Cal, Pozolanas, materiais betuminosos, resinas, etc. Nos solos argilosos (coesivos) encontramos estruturas flocladas e dispersas que são mais sensíveis a presença de água, influenciando a resistência ao cisalhamento. É comum a adição de agentes químicos que provoquem a dispersão ou floclação das partículas ou uma substituição prévia de cátions inorgânicos por cátions orgânicos hidrorrepelentes seguida de uma adição de cimentos.

A Estabilização Elétrica consiste na passagem de uma corrente elétrica pelo solo a estabilizar. As descargas sucessivas de alta tensão são usadas no adensamento de solos arenosos saturados e as de baixa tensão contínua são usadas em solos argilosos empregando os fenômenos de eletromose, eletroforese e consolidação eletroquímica. Não tem sido utilizada em pavimentos.

A Estabilização Térmica é feita através do emprego da energia térmica por meio de congelamento, aquecimento ou termosose. A solução do congelamento normalmente é temporária, alterando-se a textura do solo. O aquecimento busca rearranjos na rede cristalina dos minerais constituintes do

solo. A termosose é uma técnica de drenagem onde se promove a difusão de um fluido em um meio poroso pela ação de gradientes de temperatura. Também não é utilizada em pavimentos. (Marques,2006, capítulo 4; p. 65 a 66.)

5 METODOLOGIA

5.1 Coleta das Amostras

A amostra de solo desta pesquisa foi coletada em um terreno, indicado na figura 03, localizado no Loteamento Maria Liberato, na Rua Maria Azevedo do Nascimento no município de Araruna – PB, um município no agreste paraibano que possui aproximadamente 245,720 km² de área, 20.215 habitantes, de acordo com estimativa do IBGE para o ano de 2018.

O solo apresentava aparentemente características típicas de um solo argiloso. Foram coletados cerca de 100 kg de solo para a realização dos ensaios de caracterização. O mesmo foi escavado a uma profundidade de aproximadamente 1,5 metros, a fim de desprezar sua camada de matéria orgânica.

Figura 03 - Local de extração do solo estudado.



Fonte: Google Maps, 2019.

Foram coletados RCD's gerados pela obra da figura 04, mesmo local de coleta do solo. O processo de beneficiamento desses resíduos consiste em coleta e separação dos resíduos de Classe A, além de passar por um processo de britagem em um britador mecânico e separados quanto a granulometria, Cascalhinho (5mm a 9mm) e Pó (menor que 5mm).

Figura 04 - Obra de retirada do material;



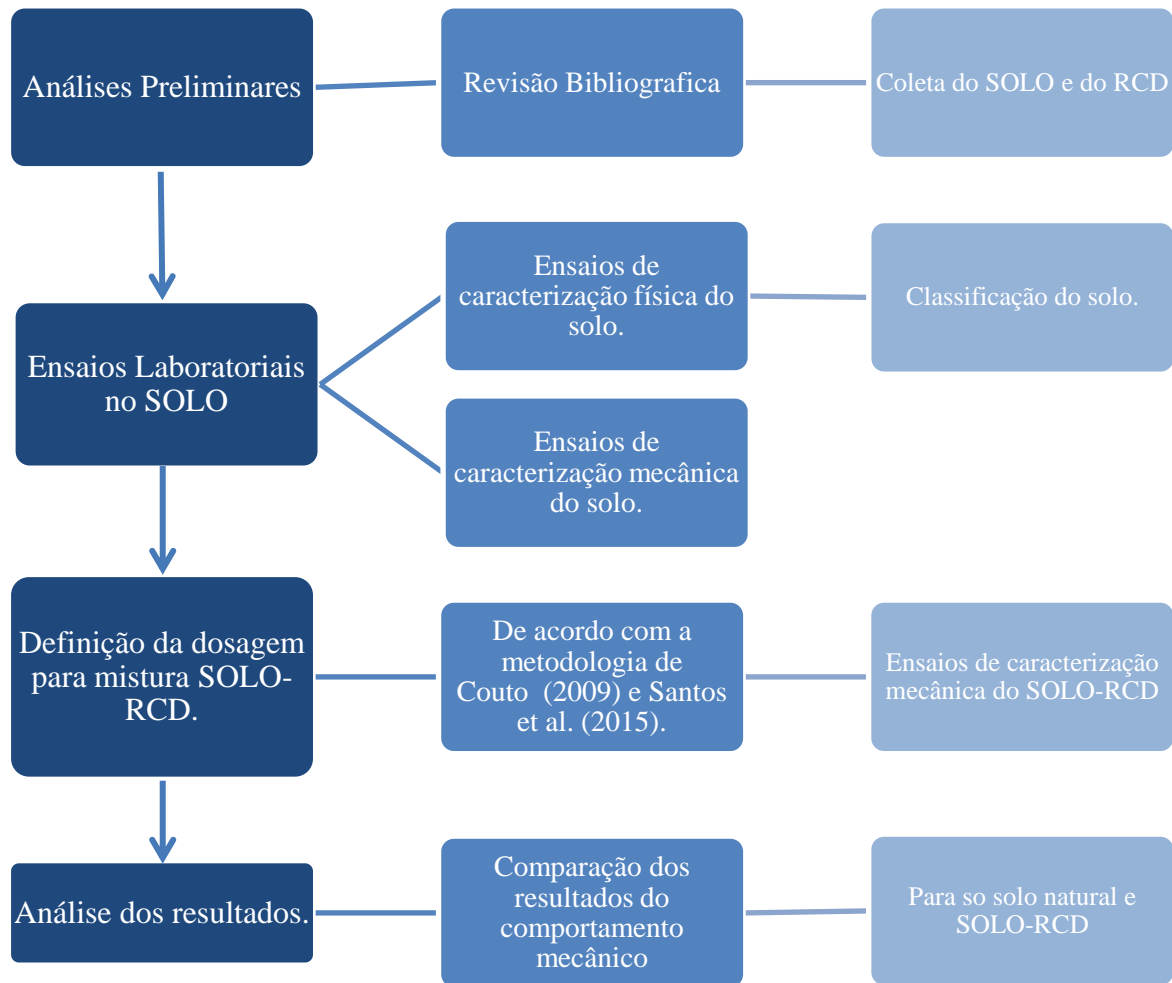
Fonte: Autora, 2019.

Após a coleta, as amostras foram transportadas até o laboratório de solos e materiais do campus VIII da UEPB, no dia 26 de março de 2019, para realização dos experimentos, realizados de acordo com as normas do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) e da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) para Mecânica dos Solos.

Para preparação dos ensaios, as amostras coletadas foram espalhadas e secas ao ar separadamente por um período de 48 horas. Com a amostra de solo seca ao ar, foi feita a preparação do solo para execução dos ensaios de caracterização e, posteriormente, de resistência mecânica.

Os ensaios de caracterização executados foram para a determinação da densidade real, seus limites de plasticidade e liquidez e sua granulometria. Com esses dados, foi feita a classificação do solo e sua estabilização granulométrica com dosagens previamente determinadas. Após a estabilização, foi feita a caracterização mecânica do solo e de misturas solo-RCD, e por fim, foram analisados os resultados obtidos. O fluxograma da figura 05 contém resumidamente todo o processo metodológico realizado na construção do presente trabalho.

Figura 05- Etapas metodológicas para esta pesquisa.



Fonte: Autora, 2019.

5.2 Ensaios Laboratoriais – Caracterização do Solo Natural

No laboratório, o solo foi reduzido pelo método do quarteamento, seguindo as diretrizes da norma DNER-PRO 199/96 – “*Redução de amostra de campo de agregados para ensaio de laboratório*” e foi tomada uma porção de massa a ser preparada para os ensaios de caracterização. A amostra de solo foi preparada segundo instruções apresentadas na norma DNER-ME 041/94 – “*Preparação de amostras para ensaios de caracterização*” que fixa o procedimento para preparação de amostras para os ensaios de umidade higroscópica, densidade real e limites de liquidez e plasticidade.

Foram utilizados os seguintes equipamentos:

- ✓ Peneiras #10 e #40, de 2,0 mm e 0,425 mm de abertura respectivamente;
- ✓ Pá de mão;

- ✓ Balde;
- ✓ Balança;
- ✓ Cápsulas metálicas.

Inicialmente, foi feito o destorroamento manual e em seguida o quarteamento, também manual, da amostra de solo tomada. Uma diagonal foi descartada e, devido aparente homogeneidade de grãos do solo, esse procedimento não se repetiu. Foi pesado 1,5 kg de material remanescente do quarteamento e passado na peneira de 2,0 mm de abertura, tendo o cuidado de destorroar os torrões ainda aparentes no solo. Da fração de solo passante na peneira de 2,0 mm, foram realizados os ensaios de determinação da umidade e densidade do solo. Para a determinação dos limites de liquidez e plasticidade, a amostra de solo utilizada também passou na peneira de 0,425 mm de abertura.

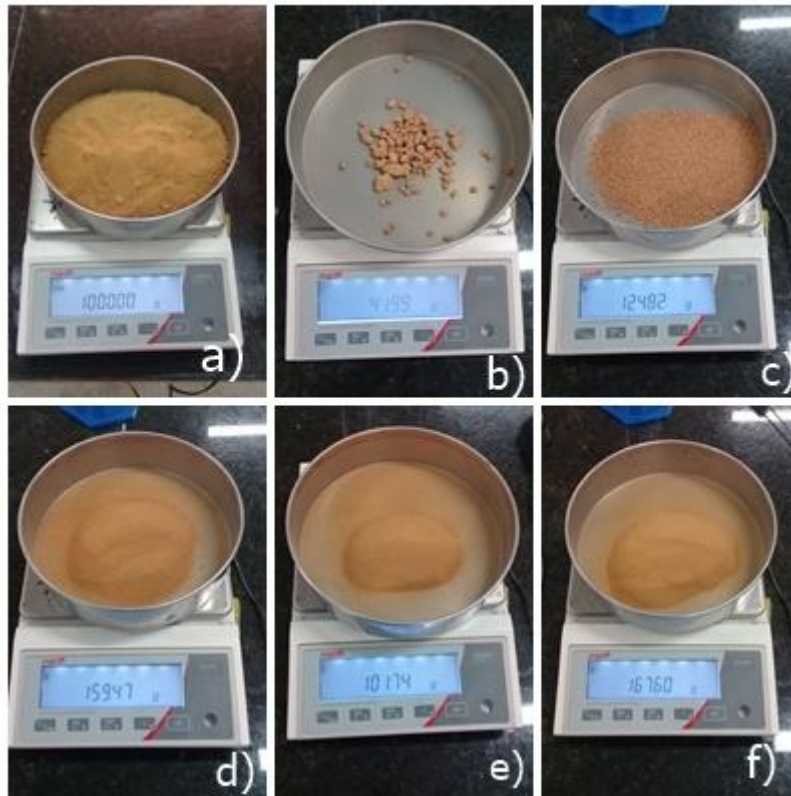
5.2.1 Análise granulométrica por peneiramento

Para essa análise foi tomada uma amostra de solo de 1,0 kg, após ser reduzida por quarteamento, como especificado na norma de referência DNER-ME 083/98 – *Análise granulométrica de agregados*. A amostra foi secada na estufa a 110° C por 24 horas no dia anterior ao de realização do ensaio. A aparelhagem utilizada para a realização desse ensaio foi:

- ✓ Série de peneiras de abertura de malha conforme a DNER-EM 035/95, incluindo tampa e fundo;
- ✓ Balança com capacidade de 5,0 kg sensível a 0,1% da massa do solo;
- ✓ Repartidores de amostra;
- ✓ Escovas apropriadas para limpeza das peneiras;
- ✓ Estufa elétrica capaz de manter a temperatura constante entre 110° C ± 5° C;

Com a amostra seca, foi iniciado o peneiramento manual. Toda a amostra foi passada na série de peneiras 75-50-37,5-25-19-9,5-4,75-2,36-2,0-1,18-0,60-0,425-0,30-1,15-0,075, como especifica a norma DNER-EM 035/95 – *Peneiras de malhas quadradas para análise granulométrica em solos*. As massas de solo retida em cada peneira foram pesadas e algumas estão indicadas na figura 06.

Figura 06–Peneiramento. a) Amostra total selecionada para o peneiramento; b) Fração retida na #4; c) Fração retida na #16; d) Fração retida na #40; e) Fração retida na #50; f) Fração retida na #100.



Fonte: Autora, 2019.

Com os dados obtidos na pesagem do solo retido em cada peneira foi calculado os percentuais de massa de material individual e acumulado, retido e passante para cada peneira e traçada a curva granulométrica para posterior análise. Também foram calculados os coeficiente de uniformidade (C_u) que determina a uniformidade dos grãos do solo, sendo determinado que é a razão entre os diâmetros D_{60} e D_{10} .

O D_{60} representa o diâmetro que 60% do material passa no peneiramento e o D_{10} é o diâmetro em que apenas 10% do material passa no peneiramento. Esse coeficiente determina a uniformidade do solo quando:

- ✓ $C_u < 5$: Solo uniforme;
- ✓ $5 < C_u < 15$: Solo medianamente uniforme;
- ✓ $C_u > 15$: Solo não uniforme.

Outro parâmetro é o coeficiente de curvatura (C_c), é calculado pela equação 1 mede a graduação do solo com base nos diâmetros D_{60} , D_{30} e D_{10} . D_{30} é o diâmetro em que 30% do material passa no peneiramento. Os valores de D_{60} , D_{30} e D_{10} foram

encontrados interpolando os valores imediatamente superiores e inferiores da curva para cada valor de diâmetro desejado.

$$C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{60} * D_{10}} \text{(Equação 1)}$$

Solos mal graduados apresentarão uma curva granulométrica de pequena extensão no eixo das abscissas e os grãos com dimensões parecidas e têm coeficiente de curvatura maior que 3 ou menor que 1. Solos bem graduados apresentarão uma maior variedade de tamanho dos grãos, curva granulométrica de grande amplitude e coeficiente de curvatura entre 1 e 3.

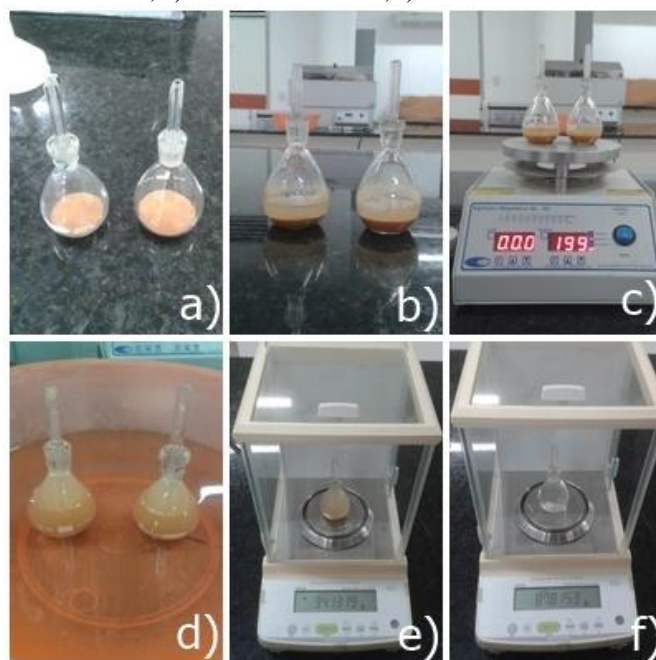
5.2.2 Densidade Real

Para a determinação da densidade real, foi utilizado o solo passante na peneira de 2,0 mm, devidamente preparado de acordo com o item 1.1. Todo o ensaio foi realizado seguindo a norma de referência DNER-ME 093/94 - Determinação da densidade real. A aparelhagem utilizada foi:

- ✓ Peneira de 2,0 mm de abertura;
- ✓ Picnômetros com capacidade de 50 ml;
- ✓ Balança com capacidade de 220 g;
- ✓ Funil;
- ✓ Fonte de calor;
- ✓ Recipiente de plástico.

Inicialmente, cada picnômetro a ser utilizado foi pesado vazio e seco (P_1). Do solo passado na #10 foi pesado duas amostras de aproximadamente 10 gramas cada. Cada amostra foi inserida em um picnômetro com o auxílio de um funil e, novamente, pesada (P_2). Em seguida, foi adicionado água destilada em cada picnômetro até cobrir com folga a amostra de solo, os picnômetros foram colocados na fonte de calor durante um intervalo de tempo de aproximadamente 15 minutos. Após esse período, os picnômetros esfriaram a temperatura ambiente e foram completamente preenchidos com água destilada. A figura 07 contém o relatório fotográfico com detalhes da execução de cada etapa do ensaio de densidade.

Figura 07 - Procedimento ensaio de determinação da densidade real; a) Picnômetros com solo; b) Picnômetros com solo e água – P2; c) Picnômetros na fonte de calor; d) Picnômetros no banho de água destilada; e) P3 - Picnômetro 2; f) P4 - Picnômetro 2.



Fonte: Autora, 2019.

Os picnômetros contendo água e solo foram colocados em um recipiente contendo água à temperatura ambiente, por onde permaneceram em banho por mais 15 minutos. Após esse período, o conjunto picnômetro-água-solo foi pesado. Por fim, os picnômetros foram completamente preenchidos com água destilada, após serem esvaziados e higienizados, e foi feita, novamente, a pesagem.

O ensaio foi realizado para duas amostras de solo, como exige a norma de referência. Os dados colhidos em laboratório referente a ambos experimentos estão expostos no quadro 03.

Quadro 03 - Dados do ensaio de densidade real.

Peso do solo (g)	Peso do picnômetro vazio - P ₁ (g)	Peso do picnômetro com solo – P ₂ (g)	Peso do picnômetro com solo e água – P ₃ (g)	Peso do picnômetro com água - P ₄ (g)	Temperatura do banho - t (°C)
10,18	36,77	46,95	98,97	92,66	25°
10,21	37,02	47,23	94,13	87,81	25°

Fonte: Autora, 2019.

A densidade de um solo à temperatura de banho (D_t) é calculada aplicando a equação 2. A norma DNER-ME 093/94 afirma que o valor da densidade real de um solo deverá ser referido à água à temperatura de 20° célsius, portanto, foi aplicada a equação

3que multiplica o valor de D_t por k_{20} que é a razão entre a densidade relativa da água à uma temperatura (t) e a densidade reativa da água à 20° C.

$$D_t = \frac{P_2 - P_1}{(P_4 - P_1) - (P_3 - P_2)} \text{(Equação 2)}$$

$$D_{20} = D_t * k_{20} \text{(Equação 3)}$$

5.2.3 Limites de Atterberg

Para a determinação do teor de liquidez do solo foi utilizado o método de Casagrande. O ensaio foi realizado no dia 10 de abril de 2019 seguindo as diretrizes da norma DNER-ME 082/94 – *Determinação do limite de liquidez do solo*. A aparelhagem utilizada foi:

- ✓ Aparelho de Casagrande;
- ✓ Cinzel;
- ✓ Balança sensível a 0,01g;
- ✓ Estufa elétrica capaz de manter a temperatura constante entre 110° C ± 5° C;
- ✓ Cápsula de porcelana de 500 ml;
- ✓ Espátula metálica;

Para a determinação do teor de liquidez do solo, a amostra foi destorroada e foi tomado, inicialmente, 70 gramas do solo passante na peneira de 0,425 mm de aberturapara retirada de pedregulhos e outras impurezas e 15 cm³ de água destilada. Foi feita a mistura e homogeneização manual do conjunto solo-água numa cápsula de porcelana com o auxílio de uma espátula.

A massa de solo devidamente homogeneizada foi utilizada para preencher a concha do equipamento de Casagrande e, com o auxílio de um cinzel, foi feita uma ranhura em sua parte central. Em seguida, com o aparelho já devidamente calibrado, a concha contendo a massa de solo foi golpeada contra a base do aparelho e tomado nota do número de golpes necessários para que as bordas da ranhura unam-se na extensão de 1,0 centímetro.

Uma porção de solo que se uniu foi transferida para uma cápsula metálica e realizada sua pesagem e levada a estufa elétrica a uma temperatura de 110° C e foram retiradas após aproximadamente 24 horas. Esse procedimento foi repetido para outras 4 misturas com diferentes frações de solo e água destilada. O procedimento do ensaio anteriormente detalhado está representado na figura 08.

Figura 08 - a) solo peneirado; b) adição de água destilada; c) solo pronto para realização do ensaio; d) realização do ensaio de LL no Aparelho de Casagrande; e) rolagem do solo no ensaio de LP.



Fonte: Autora, 2019.

Depois de feitas todas as pesagens, foi calculada a umidade de cada massa de solo. Com os resultados de umidade, foi necessário a construção de um gráfico linear para a determinação do limite de plasticidade.

Do solo remanescente do ensaio do limite de liquidez, uma fração foi retirada para a determinação do limite de plasticidade. O teor de plasticidade do solo foi determinado conforme prescreve a norma DNER-ME 082/94 e consistiu em utilizar o solo remanescente do ensaio do limite de liquidez adicionando solo ou água e moldando-o com as mãos até se tornar uma massa plástica e homogênea. A aparelhagem utilizada foi:

- ✓ Placa de vidro esmerilhada;
- ✓ Estufa elétrica capaz de manter a temperatura constante entre $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$;
- ✓ Cápsulas de porcelana de 500 ml;
- ✓ Espátula metálica;
- ✓ Balança sensível a 0,01g.

O material homogeneizado foi colocado sobre a face esmerilhada da placa de vidro e com a palma da mão foi aplicada uma pressão fazendo a massa de solo tomar a forma achatada. Fez-se movimentos de vai e vem sobre a amostra, ainda com a palma das mãos, aplicando certa pressão para que se diminua o diâmetro do cilindro até aproximadamente 3,0 mm e a amostra começasse a se fragmentar. As partes do cilindro

que apresentaram rupturas foram desagregadas e foram levadas à estufa, após pesagens, por onde permaneceram por 24 horas.

5.3 Caracterização do RCD e misturas solo-RCD

O RCD utilizado é constituído predominantemente por material classe A (telhas, concreto, etc.), e após análise preliminar, percebeu-se que tinha diâmetro máximo igual a 19 mm. A figura 09 mostra a granulometria inicial do RCD trabalhado.

Figura 09 - RCD peneirado.



Fonte: Autora, 2019.

Para melhor aproveitamento desse material, foi optado por moê-lo fazendo uso de um britador mecânico e utiliza-lo em forma de Cascalhinho (5mm a 9mm) e Pó (menor que 5mm).

Posteriormente foram nomeadas e preparadas as amostras a partir da incorporação dos agregados no solo em diferentes proporções, indicadas no Quadro 04. As proporções de solo-agregado foram escolhidas com base em pesquisas realizadas por Couto (2009) e Santos et al. (2015), sendo SC a nomenclatura adotada para o a mistura de solo e cascalhinho e SCP a nomenclatura adotada para a mistura de solo, cascalhinho e pó.

Quadro 04- Composição das amostras analisadas.

Composição	Amostras		
	Solo Natural	Reforço SC	Reforço SCP
Solo	100%	50%	50%
Cascalhinho de RCD	-	50%	25%
Pó de RCD	-	-	25%

Fonte: Autora, 2019.

Por fim, para caracterização e verificação das propriedades do solo reforçado foram realizadas análise granulométrica, ensaios de compactação e determinação do Índice de Suporte Califórnia.

Para os três tipos de amostra (solo natural, reforço SC e reforço SCP), as análises granulométricas por peneiramento foram realizadas de acordo com o método de ensaio do DNER – ME 080/94, análogo ao anteriormente descrito.

A partir do peneiramento realizado, foi traçada uma curva granulométrica. A curva deve garantir uma distribuição contínua dos grãos para que haja uma melhor acomodação entre os grãos menores e maiores, evitando um maior índice de vazios. A NBR 15115 (2004) determina que a curva tenha um Coeficiente de Uniformidade (Cu) maior ou igual a 10.

Foram realizados ensaios de compactação seguindo a norma do DNIT 164/2013 - ME para amostras não trabalhadas e com energia intermediária de compactação Proctor para a determinação da umidade ótima em que os corpos-de-prova devem ser compactados no ensaio no ensaio de ISC.

Após obtenção das curvas geradas nos ensaios de compactação do solo natural e dos reforços SC e SCP, utilizou-se o Índice de Suporte Califórnia, para determinar a resistência do solo natural e do agregado reciclado a ser empregado como camadas de base e sub-base de pavimentos. O ensaio de ISC utilizando amostras não trabalhadas é especificado na norma do DNIT 172/2016 – ME.

Fundamentalmente, o experimento realizado em laboratório para determinar o ISC foi executado em três etapas: moldagem do corpo-de-prova adotando-se a umidade ótima obtida no ensaio de compactação; imersão do corpo-de-prova em água destilada por quatro dias; e penetração de um pistão no corpo-de-prova (Figura 10), onde a constante de calibração do extensômetro foi de 0,097. Ao fim dos quatro dias de

imersão foi feita a verificação da expansão de cada corpo-de-prova através de um extensômetro posicionado no topo dos corpos-de-prova assim que imersos em água.

Figura 10 - a) corpo-de-prova moldado na umidade ótima; b) imersão em água destilada; c) penetração do pistão no corpo-de-prova; d) corpos-de-prova rompidos após o ensaio.



Fonte: Autora, 2019.

Destaca-se que para as diferentes aplicações em camadas de pavimentos são especificados pela NBR 15115 (2004) valores mínimos de ISC e expansão (Quadro 05).

Quadro 05 - Limites de expansão e ISC.

Tipo de Camada	Expansão (%)	ISC (%)
Reforço do Subleito	$\leq 1,0 \%$	$\geq 12 \%$
Sub-base	$\leq 1,0 \%$	$\geq 20 \%$
Base	$\leq 0,5 \%$	$\geq 60 \%$

Fonte: NBR 15115, 2004.

O Quadro 06 mostra um resumo dos ensaios realizados em laboratório relacionando-os com os métodos e normas que regem sua realização, assim como as amostras a eles submetidas.

Quadro 06 - Resumo dos ensaios executados.

Ensaio	Metodologia	Norma	Solo Natural	Solo com Reforço
Limite de Liquidez (LL)	Método de referência	DNER - ME 122/94	X	-
Limite de Plasticidade (LP)	Convencional	DNER - ME 082/94	X	-
Densidade real	Método de referência	DNER – ME 093/94	X	-
Análise granulométrica	Peneiramento	DNER - ME 080/94	X	X
Compactação	Amostras não trabalhadas e energia intermediária	DNIT 164/2013 ME	X	X
ISC	Amostras não trabalhadas e energia intermediária	DNIT 172/2016 ME	X	X

Fonte: Autora, 2019.

6 RESULTADOS

Os resultados da determinação da densidade real do solo estão no Quadro 07e poderão ser considerados, pois segundo a norma de referência DNER-ME 093/94, o valor da densidade real só poderá ser aceito quando feito duas verificações, no mínimo, e estas não diferirem de 0,009. A diferença entre as densidades encontradas nos dois ensaios foi de 0,0058.

Quadro 07 -Resultados da densidade real do solo.

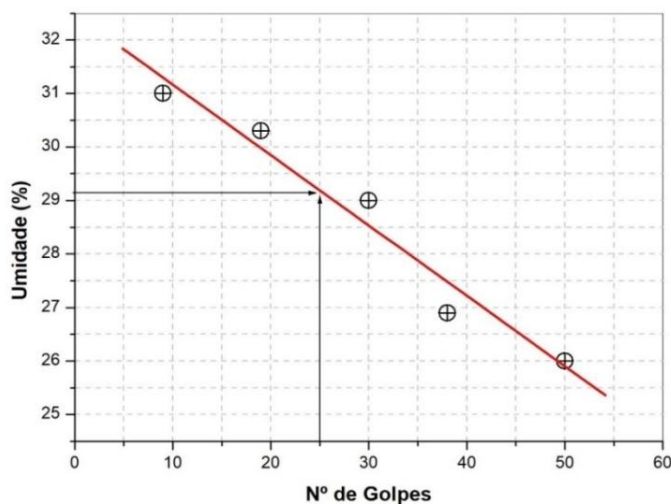
MEDIÇÃO 1		MEDIÇÃO 2		MÉDIA (D20)	DESVIO PADRÃO	DIFERENÇA
Dt (t=25°)	2,631	Dt (t=25°)	2,6247	2,623	0,0029	0,0058
D20 (t=20°)	2,628	D20 (t=20°)	2,6218			

Fonte: Autora, 2019.

Conclui-se que a densidade real do solo estudado é $2,623 \pm 0,0029$. Segundo Cooper e Mazza (2017) a densidade das partículas do solo variam entre 2,3 e 2,9 sendo considerada 2,6 como a média, pois os constituintes minerais predominantes nos solos são o quartzo, os feldspatos e os silicatos de alumínio coloidais, cujas densidades de partículas estão em torno de 2,65.

Para avaliar a plasticidade do solo natural e discutir a viabilidade de seu uso em pavimentação, caracterizou-se o solo quanto aos limites de consistência por meio de limite de plasticidade (Gráfico01), limite de plasticidade e a determinação do índice de plasticidade.

Gráfico 01 - Limite de liquidez do solo natural.



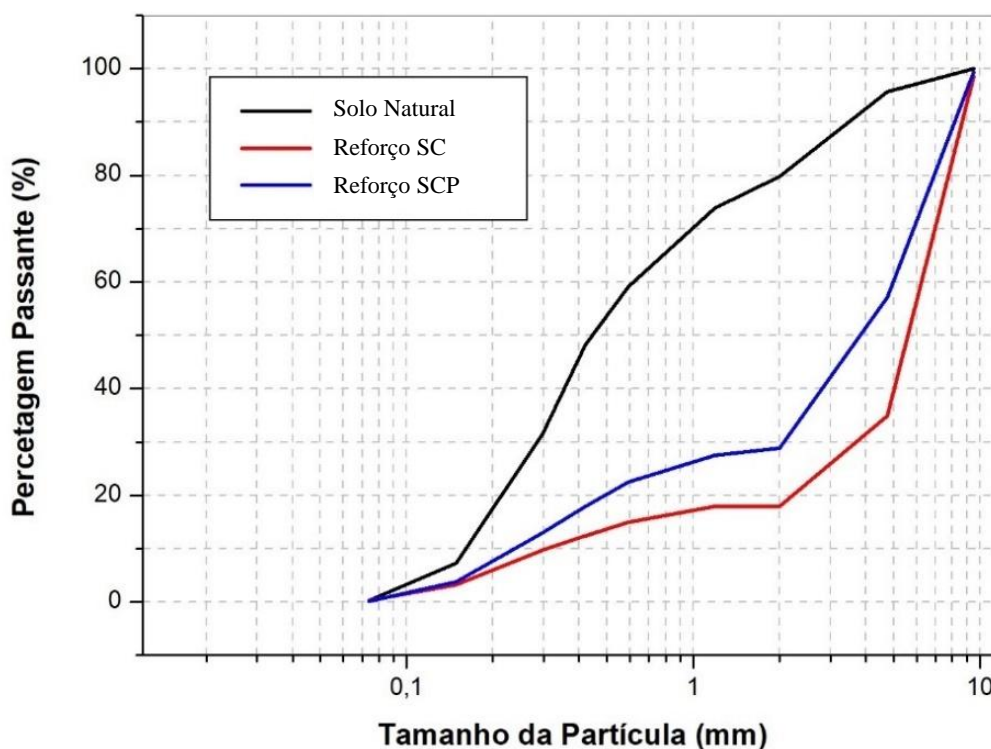
Fonte: Autora, 2019.

O valor do limite de liquidez para o solo natural foi de 29,2%, conforme demonstrado no Gráfico 1, foi obtido pelo método de referência onde o LL é igual a umidade equivalente a um nº de 25 golpes realizado no ensaio. Já para o cálculo limite de plasticidade, foi aplicada a média aritmética da umidade encontrada nas cinco amostras conforme especificado pelo DNER - ME 082/94, chegando ao resultado de 15,8%. Com base nos resultados obtidos de LL e LP, calcula-se um índice de plasticidade (IP) de 13,4%, sendo classificado como mediantemente plástico (CAPUTO, 1988).

De acordo resultados obtidos para o solo natural observa-se que o material se mostrou inadequado para o uso em pavimentação, uma vez que o DNIT limita o LL em no máximo 25% e IP no máximo 6%.

Com o ensaio de granulometria por peneiramento realizado e os dados obtidos pelo mesmo, foi possível gerar as curvas granulométricas das amostras (Gráfico 02), relacionando o tamanho das partículas com o percentual passante nas peneiras.

Gráfico 02 - Granulometria das amostras de solo natural, reforço SC e reforço SCP.



Fonte: Autora, 2019.

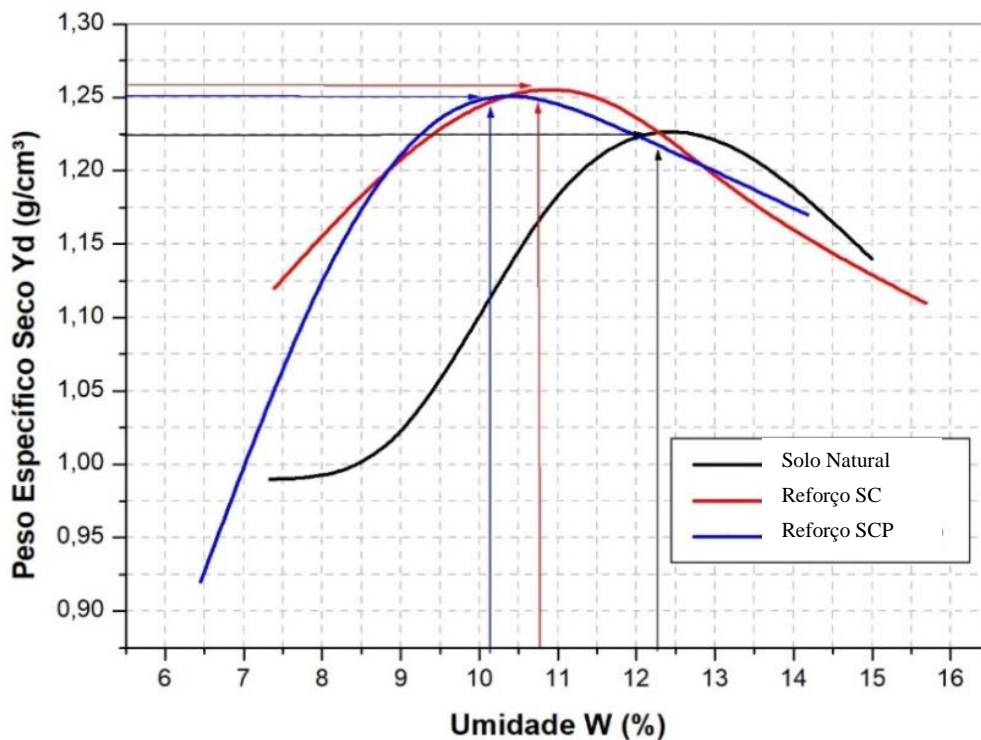
Com os valores de granulometria e índices de consistência anunciados, foi verificado que o solo possui índice de grupo (ig) nulo, devido a pouca quantidade de grãos passados na #200, e pertence ao grupo A-2-6 pela classificação HRB/AASHTO,

que representa um solo composto por areia e areiasiltosa ou argilosa e em geral com bom desempenho para sua utilização como subleito. grupo de solos que englobam areias bem graduadas com silte.

Com relação ao coeficiente de uniformidade (C_u), a amostra de solo natural obteve-se um C_u de aproximadamente 3,5. Já os reforços SC e SCP, os valores encontrados foram de 21 e 20 respectivamente. Nos dois casos (SC e SCP), as amostras estudadas atenderam aos requisitos estabelecidos pela NBR 15115 (2004) para a utilização de agregados reciclados de RCD como reforço de subleito, sub-base e base em pavimentos, uma vez que os coeficientes de uniformidade obtidos foram maiores que 10. Quanto a porcentagem passante na peneira nº 40 foi de 48,33% para o solo natural, 13,2% para o reforço SC e 18% para o reforço SCP, os dois últimos atendendo a as especificações da norma, que estabelece que a quantidade passante na peneira 0,42mm (nº 40) deve ficar entre 10% e 40%.

Para cada amostra compactada pode-se obter uma curva em forma de sino (Gráfico 03), cujo pico concentra o maior peso específico seco em função do percentual de umidade. Essa umidade a qual o material se encontra quando chega ao pico da curva de compactação é denominada umidade ótima.

Gráfico 03- Curvas de compactação.

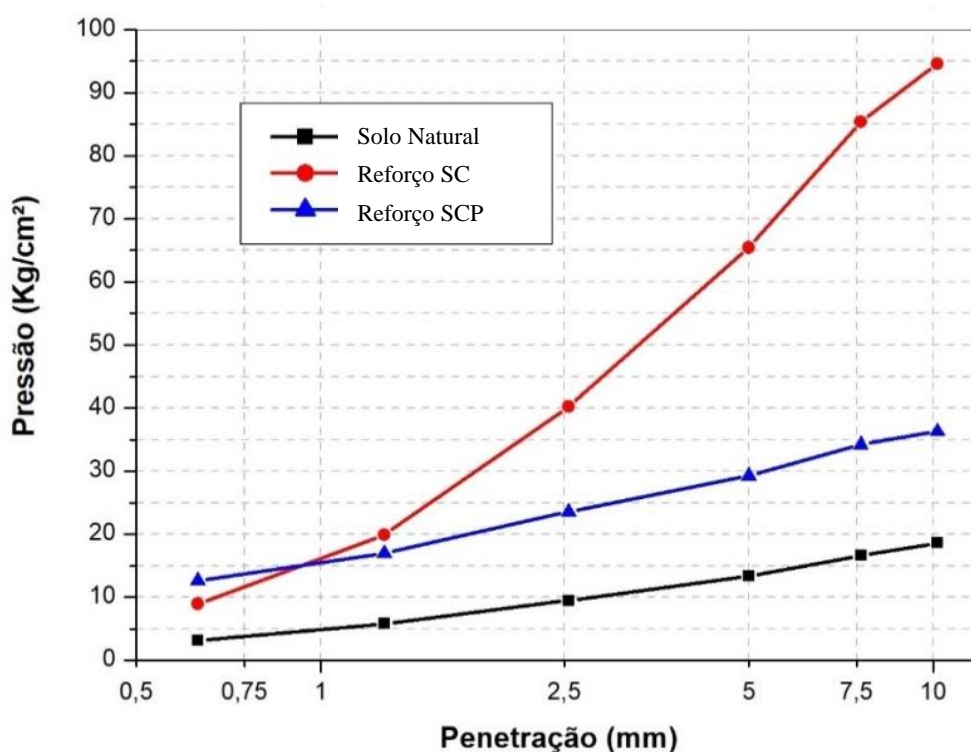


Fonte: Autora, 2019.

Ao analisar o Gráfico 03, pode-se observar que o solo natural apresenta uma umidade ótima de 12,3% com peso específico máximo ($\gamma_{\text{máx}}$) igual a 1,22g/cm³, enquanto o reforço SC 10,7% com $\gamma_{\text{máx}}$ de 1,26 g/cm³ e o reforço SCP 10,2% com de 1,25 g/cm³, o que implica dizer que esses são os valores ideais para cada amostra atingir uma melhor compactação das partículas. Observa-se que a curva do solo natural apresenta um deslocamento para a direita, em comparação com as demais curvas, o que evidencia que para atingir seu grau de compactação máximo, o solo natural necessita de maior quantidade de água em comparação ao solo estabilizado.

Quanto ao Índice de Suporte Califórnia, o Gráfico 04 abaixo apresenta os dados obtidos no ensaio de penetração dos corpos-de-prova.

Gráfico 04 - Ensaio de penetração - ISC.



Fonte: Autora, 2019.

Nota-se que a penetração no corpo-de-prova constituente apenas do solo natural trabalha em uma faixa de pressão menor que os demais, enquanto a amostra contendo o reforço SC precisou de uma pressão exercida bem maior para os mesmos pontos de penetração. Vale ressaltar que a relação entre essas pressões determinadas e as pressões padrão para cada ponto de penetração determinam o ISC do material de acordo com o DNIT 172/2016 ME.

Quanto aos valores de ISC e expansão encontrados, o Quadro 08 apresenta os resultados obtidos para cada amostra, bem como os limites definidos pela norma de referência para a utilização em camadas de base e sub-base.

Quadro 08 - Expansão e ISC.

	ISC (%)	Referência NBR 15115/2004		Expansão (%)	Referência NBR 15115/2004	
		Base	Sub-base		Base	Sub-base
Solo natural	13,60%	≥ 60%	≥ 20%	3,20%	≤ 0,5%	≤ 1,0%
Solo + Cascalhinho	64,20%	≥ 60%	≥ 20%	0,80%	≤ 0,5%	≤ 1,0%
Solo + Cascalhinho + Pó	33,70%	≥ 60%	≥ 20%	0,80%	≤ 0,5%	≤ 1,0%

Fonte: Autora, 2019.

Percebe-se que o solo natural não atende as especificações da NBR 15115/2004 para a utilização em camadas de pavimentos. Entretanto, após a estabilização utilizando o agregado reciclado de RCD os valores do ISC aumentaram, chegando a 64,2% para o reforço SC e 33,7% para o reforço SCP com expansão de 0,80% em ambos os casos. Tais características possibilitam o uso dos reforços SC e SCP como sub-base de pavimentos. É importante ressaltar que apesar do reforço SC apresentar um ISC maior que 60%, o mesmo não se adequa a camada de base por apresentar expansão maior que 0,5% como determina a NBR 15115/2004.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O uso de RCD na forma de agregado como camada de pavimentos representa uma alternativa sustentável uma vez que este pode vir a aprimorar as características mecânicas de subleitos compostos de solos pouco resistentes e diminuir os custos finais das obras de pavimentação.

Os ensaios realizados mostram que o solo natural utilizado pertence ao grupo A-2-6 pela classificação HRB/AASHTO, que representa um solo composto por areia e areia siltosa ou argilosa e em geral com bom desempenho para sua utilização como subleito.

Quanto a sua caracterização mecânica, os resultados obtidos mostram que o solo não apresenta características mecânicas que lhe credenciassem ao uso na pavimentação como camadas de base e sub-base, uma vez que seu ISC é inferior aos valores recomendados por norma e em função dos altos valores para os limites de consistência e expansão. Uma solução para o aproveitamento desse solo nas camadas estruturais citadas seria a sua estabilização.

Em termos da capacidade de suporte das misturas, os resultados obtidos pelo solo estabilizado são considerados satisfatórios. Ao incorporar os reforços, as misturas atingem ISC suficiente para se enquadrar em camada de sub-base e até mesmo de base (no caso do reforço SC). No entanto, em termos de expansão, os reforços SC e SCP atendem os valores estabelecidos apenas para camada de sub-base de pavimentos, evidenciando que apenas uma estabilização granulométrica não foi suficiente para diminuir a expansão da mistura para sua utilização como base. Uma alternativa seria testar outros tipos de estabilização.

Este estudo ainda evidencia o poder de uso que materiais recicláveis possuem na construção civil e podem ser uma solução caseira e de baixo custo na pavimentação em municípios com baixo volume de tráfego, reduzindo o consumo de materiais nobres utilizados e de resíduos de construção e demolição depositados no meio ambiente.

Como sugestão para trabalhos futuros recomenda-se: Avaliar a viabilidade econômica do uso dos agregados estudados; Avaliar a incorporação de agregados de maior granulometria e em diferentes proporções; Avaliar outros métodos de estabilização; Buscar um traço ótimo para a estabilização da mistura; Caracterizar as amostras por meio de ensaios adicionais de caráter físico-mecânico, tais como: índice de

forma, deformação permanente, módulo de resiliência, resistência por compressão simples, análise microscópica e permeabilidade.

REFERÊNCIAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – Execução de camadas de pavimentação – Procedimentos**. Rio de Janeiro, RJ, 2004.

ABRELPE - Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil de 2017**. São Paulo, SP, 74p, 2018.

ALMEIDA, C. S. L.; GOMES, S. M. S.; AZEVEDO, T. C.; RIBEIRO, M. A.; BANQUEIRO, A. G. M. **Gestão de Resíduos, Desempenho Organizacional e Logística Reversa na Construção Civil**. Artigo publicado no Simpósio de excelência em gestão e tecnologia. 2013.

ARARUNA, Prefeitura Municipal. **Plano Municipal Simplificado de Gestão de Resíduos Sólidos**. Araruna, PB, 2018.

BERNUCCI, L. B. et al. **Pavimentação Asfáltica: formação básica para engenheiros**. Rio de Janeiro: Petrobrás: ABEDA, 2008.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Resolução CONAMA 307, de 5 de julho de 2002. **Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos na construção civil**. Diário Oficial da União, Brasília, 17 jul. 2002.

BRASILEIRO, L. L.; Matos, J. M. E. **Revisão bibliográfica: reutilização de resíduos da construção e demolição na indústria da construção civil**. Revista Cerâmica. v. 61. p. 178189, 2015.

COUTO, J. B. **Estudo de misturas de solo agregado em bases e sub-bases rodoviárias do Rio Grande do Sul: Caracterização de laboratório e execução de trecho experimental**. 2009. 162 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

CAPUTO, H. P. **Mecânica dos solos e suas aplicações: Fundamentos**. 6 ed. Rio de Janeiro: LTC, 1988. 248 p.

CARDOSO, A. C. F. **Estimativa de Geração de Resíduos da Construção Civil e Estudo de Viabilidade de Usina de Triagem e Reciclagem**. Artigo, publicado em Revista Brasileira de Ciências Ambientais - Número 31. Criciúma, SC, Março de 2014.

COOPER, M.; MAZZA, J. A. **Densidade do solo e densidade de partículas**. Notas de Aula. Universidade de São Paulo, 2017.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. **Resolução CONAMA n. 307.** Brasília, DF. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res02/res30702.html>>. Acesso em: 25 de março de 2019.

DNIT. **Manual de Pavimentação.** 2006. Disponível em:<https://www1.dnit.gov.br/arquivos_internet/ipr/ipr_new/manuais/Manual_de_Pavimentacao_Versao_Final.pdf>. Acesso em: 25 de março de 2019.

DNIT 139 – **Pavimentação – Sub-base estabilizada granulometricamente - Especificação de serviço.** Rio de Janeiro, RJ, 2010.

DNIT 142 – **Pavimentação – Base estabilizada granulometricamente - Especificação de serviço.** Rio de Janeiro, RJ, 2010.

ESPINELLI, U. **A gestão do consumo de materiais como instrumento para a redução da geração de resíduos nos canteiros de obras.** In: Seminário de Gestão e Reciclagem de Resíduos da Construção e Demolição – Avanços e Desafios. São Paulo. PCC USP, 2005.

FUJII, L. M. T. **Estudo de misturas de solo, RCD e cal virgem e hidratada para uso em obras rodoviárias.** Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-215/2012, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 137 p.

JIMÉNEZ, F. E. P. - CEPSA Portuguesa Petróleos, SA. **Manual de Pavimentação.** 3ª ed. Lisboa, Portugal, 2014.

MARQUES, G. L. O. **Estabilização dos Solos para Fins de Pavimentação.** Notas de Aula, Universidade Federal de Juiz de Fora, 2006.

MOTTA, R. S. **Estudo laboratorial de agregado reciclado de resíduo sólido para utilização em camadas de pavimento de baixo volume de tráfego.** Dissertação de mestrado - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, SP, 2005.

OMIDO, A. R.; BARBOZA, C. S.; ZIMMER, A. S.; ARDURES, A. K.; SILVA, L. H. S. **Estudos para aproveitamento de resíduos de construção civil na execução de camadas de pavimentação.** Publicado no 1º Congresso Sul-Americano de Resíduos e Sustentabilidade. Gramado, RS. 2018.

ORIOLI, M.A. **Estudo do uso de agregado reciclado de resíduos de construção civil e demolição em misturas solo-agregado.** Dissertação (Mestrado), Escola de Engenharia de São Paulo; Universidade de São Paulo, São Carlos, 2018.

PASCHOALIN FILHO, J. A. **Destinação irregular de resíduos de construção e demolição (RCD) e seus impactos na saúde coletiva.** Artigo, publicado em: Revista de Gestão Social e Ambiental - RGSA, v. 6, n. 1, p. 127-142. São Paulo, SP, 2012.

PINTO, T. P. **Metodologia para a gestão diferenciada de resíduos sólidos na construção urbana.** Tese de doutorado - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, SP, 1999.

RUTZEN, D. **Agregado reciclado para uso em pavimentação: Efeitos da adição de cal em resíduos de construção e demolição.** Trabalho de Diplomação, Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

SANTOS, A. G. et al. **Avaliação de custo de construção de uma estrada de pavimento empregando agregado reciclado de RCD.** Reec – Revista Eletrônica da Engenharia Civil [s.I.], v. 10, n. 1, p. 1-13, 7 jul. 2015.

SARTORI, G. **Estudo de Estabilização de Solos para Fins de Pavimentação na Região de Campo Mourão.** 54 páginas. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado) -Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Campo Mourão, 2015.

SENÇO, W. **Manual de técnicas de pavimentação.** 2ª ed. São Paulo, SP, 2008.

SOUZA, A. S. **Caracterização da gestão de resíduos em um município de pequeno porte.** Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado) -Universidade Estadual da Paraíba, Araruna, PB, 2016.

VILLIBOR, D. F. et al. **Pavimentos de Baixo Custo para Vias Urbanas: Bases Alternativas com Solos Lateríticos** Gestão de Manutenção de Vias Urbanas. 3. ed. São Paulo: Arte & Ciência, 2009.

WILLE, M. M. **Logística reversa: conceitos, legislação e sistema de custeio aplicável.** Artigo científico. Curitiba, 2012.