



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

RUAN OLIVEIRA FERNANDES

CARACTERIZAÇÃO E ESTABILIZAÇÃO DE UM SOLO COM RESÍDUO
PROVENIENTE DA USINAGEM DE MISTURAS ASFÁLTICAS PARA
UTILIZAÇÃO EM CAMADA DE BASE E SUB-BASE DE PAVIMENTO FLEXÍVEL

ARARUNA – PB
2020

RUAN OLIVEIRA FERNANDES

**CARACTERIZAÇÃO E ESTABILIZAÇÃO DE UM SOLO COM RESÍDUO
PROVENIENTE DA USINAGEM DE MISTURAS ASFÁLTICAS PARA
UTILIZAÇÃO EM CAMADA DE BASE E SUB-BASE DE PAVIMENTO FLEXÍVEL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Civil da Universidade Estadual da Paraíba, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Área de Concentração: Pavimentação.

Orientador: Prof. Lauandes Marques de Oliveira.

**ARARUNA – PB
2020**

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.

F363c Fernandes, Ruan Oliveira.

Caracterização e estabilização de um solo com resíduo proveniente da usinagem de misturas asfálticas para utilização em camada de base e sub-base de pavimento flexível [manuscrito] / Ruan Oliveira Fernandes. - 2020.

63 p. : il. colorido.

Digitado.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Estadual da Paraíba, Centro de Ciências, Tecnologia e Saúde , 2020.

"Orientação : Prof. Esp. Lauandes Marques de Oliveira , Coordenação do Curso de Engenharia Civil - CCTS."

1. Geotecnia. 2. Pavimentação. 3. Solo-Resíduo. 4. Sustentabilidade. I. Título

21. ed. CDD 624

RUAN OLIVEIRA FERNANDES

CARACTERIZAÇÃO E ESTABILIZAÇÃO DE UM SOLO COM RESÍDUO
PROVENIENTE DA USINAGEM DE MISTURAS ASFÁLTICAS PARA UTILIZAÇÃO
EM CAMADA DE BASE E SUB-BASE DE PAVIMENTO FLEXÍVEL

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Civil da Universidade Estadual da Paraíba, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Área de Concentração: Pavimentação

Aprovada em: 10/12/2020.

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)

Aos meus pais pelo incentivo, apoio e por serem a minha maior inspiração, com imenso amor. DEDIDO.

AGRADECIMENTOS

A Deus, porque Dele e por Ele, e para Ele, são todas as coisas. Por Sua graça oferecida a mim, seja a Ele a glória, o louvor e toda a minha gratidão.

Aos meus pais, Carmelita Fernandes e Osvaldo Justino, que não mediram esforços para que este sonho se tornasse realidade. Agradeço por todo amor, carinho, compreensão, paciência e preocupação. Obrigado pelos ensinamentos de cada dia, que permitiram que eu trilhasse pelo caminho correto. Essa conquista também é de vocês.

Aos meus irmãos Claudia, Claudio, Renato, Renata, Ruanne e Isabel, por sempre me incentivarem e me encorajarem. Mesmo tão distantes um do outro vocês sempre estiveram comigo, me apoiando ao longo de toda a minha caminhada.

A minha segunda mãe, Maria José Ramos, por estar sempre ao meu lado em todas as situações, disposta a ajudar no que eu precisar. Agradeço pelos conselhos e por sempre vibrar comigo nas minhas conquistas.

A minha namorada Monick, pela compreensão nos momentos em que não pude estar presente e pelo apoio de todos os dias.

Aos amigos que conquistei durante a trajetória, em especial, a Matheus Lima, Celiane Cabral, Rafaela Salustino, Fagna Fernandes, Lindiane Araújo e Lidja Rosa aos quais dividi momentos de aflição, mas também de muita alegria durante o curso. A trajetória longe de casa ao lado de vocês foi mais fácil. Do quarteto aos chegados a amizade só cresceu.

Aos irmãos da ICPI de Piedade, pelas orações e palavras de apoio.

A todos os professores e funcionários do Campus VII da UEPB pela contribuição na minha formação profissional. Em especial ao meu orientador, professor Lauandes Marques, por ter me recebido como orientando e acreditado no meu potencial.

A todos que contribuíram direta e indiretamente para a realização desse sonho e para a construção deste trabalho. Muito obrigado!

RESUMO

Dentro do setor da construção civil, a pavimentação se destaca pelo grande volume de recursos naturais utilizados no seu processo construtivo. Diante da escassez de jazidas de qualidade e dos impactos ambientais gerados, o reuso de resíduos que tenham, principalmente, potenciais para estabilizar solos menos nobres tem sido uma alternativa para mitigar estes problemas. Dentro desta perspectiva, esta pesquisa teve por objetivo avaliar a viabilidade técnica da utilização do resíduo proveniente da usinagem de misturas asfálticas na estabilização de solos destinados as camadas de base e sub-base de pavimentos flexíveis. Os procedimentos metodológicos estão ancorados em quatro etapas: a etapa inicial teve como premissa a identificação das questões que envolvem a temática, bem como as análises preliminares e o início do trabalho empírico, com a coleta dos materiais em campo. Os ensaios laboratoriais de caracterização física do solo natural e do resíduo, que compreendeu a mistura solo-resíduo, realizada em três teores distintos: 25%, 50% e 75%, constituiu a segunda etapa. A caracterização mecânica do solo e das misturas solo-resíduo fizeram parte da terceira e penúltima etapa. Na quarta e última etapa, priorizou-se a análise da contribuição da adição do resíduo nas propriedades físico-mecânicas do solo. Os resultados dos ensaios apontam para os seguintes dados: o solo natural com $IP=8,60\%$ e $IG=0$, especificado pelo sistema classificação HRB como um solo A-2-4; no concernente aos ensaios mecânicos o solo apresentou $W_{ot} = 10,84\%$, $\gamma_{dmáx} = 1,49 \text{ g/cm}^3$, expansão de $0,49\%$ e $ISC = 18,76\%$. Dentre as misturas analisadas, destacaram-se as misturas SR50 e SR75 que apresentaram ISC de $48,46\%$ e $110,46\%$ e expansão de $0,15\%$ e $0,013\%$, respectivamente. No entanto, a mistura SR25 não se enquadrou nos valores mínimos exigidos. Com base na análise técnica dos resultados, concluiu-se que o solo estabilizado com o resíduo é adequado para ser usado em camadas de base e sub-base de pavimentos flexíveis, entretanto, seu uso em pavimentos com alto volume de tráfego necessita de análise mais detalhada e cautelosa, pois a sua viabilidade depende de outros fatores.

Palavra-Chave: Geotecnia. Pavimentação. Solo-Resíduo. Sustentabilidade.

ABSTRACT

Within the civil construction sector, paving stands out for the large volume of natural resources used in its construction process. In view of the scarcity of quality deposits and the environmental impacts generated, the reuse of residues that have, mainly, potential to stabilize less noble soils has been an alternative to mitigate these problems. Within this perspective, this research aimed to evaluate the technical feasibility of using the residue from the machining of asphalt mixtures in the stabilization of soils destined to the base and sub-base layers of flexible pavements. The methodological procedures are anchored in four stages: the initial stage was based on the identification of issues involving the theme, as well as preliminary analyzes and the beginning of the empirical work, with the collection of materials in the field. The laboratory tests of physical characterization of the natural soil and the residue, which comprised the soil-residue mixture, carried out in three different levels: 25%, 50% and 75%, constituted the second stage. The mechanical characterization of the soil and soil-residue mixtures were part of the third and penultimate stage. In the fourth and last stage, the analysis of the contribution of the addition of the residue to the physical-mechanical properties of the soil was prioritized. The results of the tests point to the following data: the natural soil with $IP = 8.60\%$ and $IG = 0$, specified by the HRB classification system as an A-2-4 soil; with regard to mechanical tests, the soil presented $W_{ot} = 10.84\%$, $\gamma_{dmax} = 1.49 \text{ g / cm}^3$, 0.49% expansion and $ISC = 18.76\%$. Among the mixtures analyzed, the SR50 and SR75 mixes stood out, with an ISC of 48.46% and 110.46% and an expansion of 0.15% and 0.013% , respectively. However, the SR25 mixture did not meet the minimum required values. Based on the technical analysis of the results, it was concluded that the soil stabilized with the residue is suitable to be used in base and sub-base layers of flexible pavements, however, its use in pavements with high traffic volume needs more analysis. detailed and cautious, as its viability depends on other factors.

Keyword: Geotechnics. Paving. Soil-Residue. Sustainability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Estruturas de Pavimentos	18
Figura 2 - Representação esquemática de uma usina asfáltica contínua	21
Figura 3 - Representação esquemática de uma usina asfáltica por batelada.....	22
Figura 4 - Fluxograma do processo produtivo de uma usina de misturas asfálticas.....	23
Figura 5 - Estados físicos de uma composição solo-agregado.	26
Figura 6 - Classificação dos resíduos da construção civil	30
Figura 7 - Processo linear de descarte	31
Figura 8 - Processo circular de reciclagem e disposição final de resíduos da construção e demolição.....	31
Figura 9- Fluxograma das etapas metodologias da pesquisa.....	33
Figura 10 - Materiais utilizados na pesquisa. a) Amostra de solo natural; b) Amostra de resíduo da usinagem de misturas asfálticas	34
Figura 11 - Coleta do resíduo na empresa TCPAV	35
Figura 12 - Distância entre os locais de coleta do solo e coleta do resíduo.....	35
Figura 13 - Análise granulométrica por peneiramento. a) Lavagem da amostra de solo na peneira de abertura 0,075mm; b) Procedimento de pesagem das amostras retidas nas peneiras; c) Amostra retida em cada peneira	37
Figura 14 - Canelura na amostra de solo na concha do aparelho de Casagrande	38
Figura 15 - Execução da modelagem dos cilindros no ensaio de limite de plasticidade	39
Figura 16 - Aquecimento do picnômetro com o conjunto solo-água	40
Figura 17 - Sistema de classificação de solo HRB adotado pela AASHTO.....	41
Figura 18 - Análise granulométrica das misturas solo-resíduo. a) Granulometria da mistura SR25; b) Granulometria da mistura SR50; c) Granulometria da mistura SR75.....	43
Figura 19 - Etapas do ensaio de compactação. a) Compactação do corpo de prova na energia intermediária; b) Rasamento do excesso de material; c) Pesagem do conjunto (molde + solo compactado).....	44
Figura 20 - Etapas do ensaio de ISC. a) Moldagem dos corpos de prova na umidade ótima; b) Imersão na água para calculo da expansão; c) Aplicação de carga na prensa; d) Corpo de prova após a etapa de penetração.....	46

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Curva granulométrica do solo natural	48
Gráfico 2 - Curva granulométrica para o resíduo.	49
Gráfico 3 - Curva granulométrica para as misturas solo-resíduo.	50
Gráfico 4 - Resultados do ensaio de limite de liquidez	51
Gráfico 5 - Curva de compactação para o solo natural.....	53
Gráfico 6 - Curva de compactação para as misturas solo-resíduo.	54
Gráfico 7 - Curva Pressão x Penetração para o solo natural e as misturas estudadas.....	56
Gráfico 8 - Resultados do ICS para as composições estudadas.....	56

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Ensaio de caracterização dos materiais e misturas analisadas	36
Tabela 2 - Classificação dos solos com relação ao valor do seu IP	40
Tabela 3 - Resultados do ensaio de limite de plasticidade para o solo natural	51
Tabela 4 - Resultado do ensaio de densidade real para o solo natural.....	52
Tabela 5 - Umidade ótima e peso específico seco máximo das misturas solo-resíduo	55

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Limites de ISC e expansão para camadas de pavimentos flexíveis.....	24
Quadro 2 - Composição das amostras analisadas nos ensaios mecânicos	42
Quadro 3 - Composição granulométrica do solo natural	49
Quadro 4 - Resultados da expansão do solo natural e das misturas	55

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AASHTO	<i>American Association of State Highway and Transportation Officials</i>
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
CAUQ	Concreto Asfáltico Usinado a Quente
CAP	Cimento Asfáltico de Petróleo
CBR	<i>Califórnia Bearing Ratio</i>
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CNT	Confederação Nacional do Transporte
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento de Infraestrutura de Transportes
DER	Departamento de Estradas de Rodagem
HRB	<i>Highway Research Board</i>
IP	Índice de plasticidade
ISC	Índice Suporte Califórnia
LL	Limite de Liquidez
LP	Limite de Plasticidade
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
RAP	<i>Reclaimed Asphalt Pavement</i>
RCC	Resíduo da Construção Civil
SN	Solo Natural

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
2	JUSTIFICATIVA	16
3	OBJETIVOS	17
3.1	Objetivo Geral.....	17
3.2	Objetivos Específicos	17
4	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	18
4.1	Pavimentos	18
4.1.1	<i>Pavimentos Flexíveis</i>	19
4.2	Usinagem de Misturas Asfálticas	20
4.3	Estabilização de solos para uso em pavimentos	24
4.3.1	<i>Estabilização Física</i>	25
4.3.2	<i>Estabilização Mecânica</i>	26
4.3.3	<i>Estabilização Química</i>	27
4.4	Utilização de Resíduos Industriais em Camadas de Base e Sub-base de Pavimentos	27
4.5	Logística Reversa e Sustentabilidade.....	29
5	METODOLOGIA.....	33
5.1	Primeira Etapa: Coleta e Preparação dos Materiais.....	34
5.2	Segunda Etapa: Caracterização física dos materiais.....	36
5.2.1	<i>Análise granulométrica por peneiramento</i>	36
5.2.2	<i>Limite de Liquidez</i>	38
5.2.3	<i>Limite de Plasticidade</i>	39
5.2.4	<i>Densidade Real</i>	40
5.2.5	<i>Classificação do Solo</i>	41
5.2.6	<i>Análise granulométrica do Resíduo</i>	42
5.3	Terceira Etapa: Caracterização mecânica do solo natural e das misturas solo-resíduo.....	42
5.3.1	<i>Compactação</i>	43
5.3.2	<i>Índice de Suporte Califórnia (ISC ou CBR)</i>	45
5.4	Quarta Etapa: Análise dos Resultados	46
6	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	48
6.1	Caracterização física dos materiais e das misturas solo-resíduo.....	48
6.1.1	<i>Análise Granulométrica</i>	48
6.1.2	<i>Limites de Atterberg para o Solo</i>	51

6.1.3	<i>Densidade Real do Solo</i>	52
6.1.4	<i>Classificação do Solo</i>	53
6.2	Caracterização mecânica do solo natural e das misturas solo-resíduo	53
6.2.1	<i>Compactação</i>	53
6.2.1	<i>Índice de Suporte Califórnia (ISC)</i>	55
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS	58
	REFERÊNCIAS	60

1 INTRODUÇÃO

A indústria da construção civil é uma das atividades mais importantes no desenvolvimento econômico e social do país, contudo, denota-se como uma grande geradora de impactos ambientais (KARPINSK *et al*, 2009). Estes impactos ambientais estão ligados principalmente a exploração e ao alto consumo de recursos naturais e têm sido pauta das principais discussões no meio acadêmico e social. O setor ainda convive com índices elevados de desperdício de matérias-primas e geração acentuada de resíduos durante o processo construtivo.

Dados do relatório sobre gestão da sustentabilidade no setor da construção divulgado pela Fundação Dom Cabral, em 2012, mostram que este setor consome cerca de 75% de todos os recursos naturais e 44% da energia produzida no país. Diante deste cenário, de uma demanda cada vez mais alta por matéria prima, associado a escassez de jazidas de qualidade, a indústria da pavimentação tem visto a necessidade de buscar a incorporação de novos insumos para a construção de estradas sustentáveis e de baixo custo.

Tendo em vista, que no âmbito da construção civil, a pavimentação de estradas representa uma das principais obras de infraestrutura no Brasil, sendo também uma das atividades do setor que exige uma quantidade significativa de recursos naturais não renováveis. Buscando-se alternativas para minorar os impactos negativos gerados pela construção de pavimentos ao meio ambiente e a viabilidade de utilização de solos menos nobres, os estudos sobre a inserção de matérias primas advindas da reciclagem ou reutilização de resíduos sólidos produzidos pela construção civil e, até mesmo, resíduos produzidos por outras indústrias na pavimentação têm ganhado destaque nas últimas décadas.

Com base neste contexto, a pavimentação surge como uma possibilidade para o reuso de resíduos, sobretudo, aqueles considerados com maior potencial de estabilização de solos, devido a sua extensão e a quantidade de solo mobilizado (OLIVEIRA, 2014). A estabilização de solos menos nobres é um processo comum na construção de pavimentos, pois, a utilização de materiais granulares de boa qualidade nem sempre é viável, considerando que a escassez ou falta, aliada a distância das jazidas até o local de construção da via, impactam diretamente no uso frequente deste produto na pavimentação de vias.

Como tema central este trabalho aborda a reutilização do resíduo proveniente do processo de usinagem das misturas asfálticas, como forma sustentável e economicamente viável para a construção de pavimentos. O método adotado no estudo propõe a substituição parcial do solo através da adição do resíduo da usinagem de misturas asfálticas, como

possibilidade de uso desta composição nas camadas de base e sub-base de pavimentos flexíveis, com base no conceito de logística reversa, em que, o próprio resíduo é reinserido no ciclo produtivo do processo de pavimentação.

Para tanto, no que concerne aos procedimentos metodológicos, buscou-se por meio de análise e ensaios laboratoriais, compreender qual o comportamento de um solo menos nobre quando agregado resíduo em sua composição, tomando como prerrogativa a estabilização desse material no período posterior da inserção do resíduo. Os critérios constantes na normatização de órgãos como DNIT e ABNT, fundamentaram as discussões e análises sobre a viabilidade técnica de uso em camadas granulares de pavimentos flexíveis.

2 JUSTIFICATIVA

A literatura indica que um dos principais problemas enfrentados na construção de rodovias é escassez de materiais granulares propícios, para utilização em camadas de base e sub-base de pavimentos. Por vezes, também, atrelada ao fator das grandes distâncias, que dificulta o transporte de materiais que tenham características necessárias para emprego nessas camadas, inviabilizam economicamente a construção de pavimentos.

Uma das soluções apontadas como possibilidade de resolução para esta problemática consiste na alteração das propriedades físicas e mecânicas de um material granular, de forma que este atenda as especificações determinadas pelos órgãos de normatização e controle de obras rodoviárias para uso em camadas granulares do pavimento. Este processo, chamado de estabilização de solos, tem sido uma das principais alternativas para a reciclagem e reutilização de materiais advindos das mais variadas indústrias.

Atrelado ao fator ambiental, amplamente debatido no setor da construção civil, por ser um dos que mais utilizam recurso renováveis e não renováveis, está o fator econômico. O aproveitamento de materiais recicláveis na pavimentação pode gerar uma redução de custos de execução do pavimento, além de contribuir para preservação das reservas naturais e para destinação final correta destes materiais.

Diante disto, o estudo apresentado procura ampliar o debate sobre o processo de estabilizar granulometricamente um solo com o emprego do resíduo oriundo da usinagem de misturas asfálticas e seu impacto socioambiental e socioeconômico. A temática, por sua vez, contribui para a discussão do uso sustentável dos recursos naturais, tendo em vista, jogar luz no debate que envolve a destinação correta do resíduo como forma de amenizar os impactos ambientais gerados por esse tipo de atividade.

O estudo, também aponta para a necessidade de tratar a temática da redução de custos orçamentários nas obras de pavimentação, uma vez que através do processo de logística reversa o resíduo pode ser reinserido no ciclo de produção do pavimento. Isto implica diretamente nos custos derivados do transporte de materiais, bem como nos custos relacionados à gestão de resíduos.

3 OBJETIVOS

3.1 Objetivo Geral

Avaliar o comportamento físico-mecânico de um solo estabilizado com resíduo oriundo da usinagem de misturas asfálticas para emprego em camadas de base e sub-base de pavimentos flexíveis.

3.2 Objetivos Específicos

- Investigar a caracterização física do solo natural, do resíduo da usinagem de misturas asfálticas e das misturas solo-resíduo com base em ensaios laboratoriais;
- Analisar, com base na variação das composições solo-resíduo, as mudanças sofridas na granulometria do solo natural;
- Avaliar as alterações no comportamento mecânico do solo natural com relação às misturas solo-resíduo, através dos ensaios de compactação e ISC (Índice de Suporte Califórnia);
- Verificar a viabilidade técnica das misturas solo-resíduo para emprego em camadas de base e sub-base de pavimentos flexíveis, comparando com a normatização vigente no país.

4 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

4.1 Pavimentos

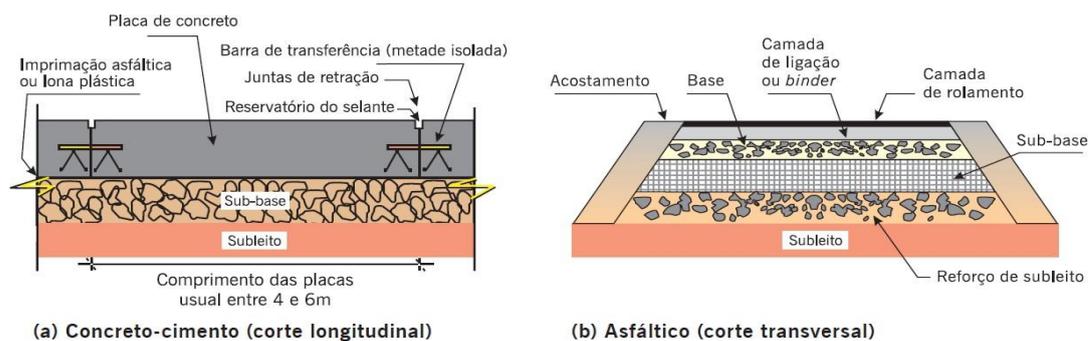
A necessidade de deslocamento remota aos tempos pré-históricos da humanidade, que no processo de ocupação dos espaços terrestre buscando sempre melhores condições de sobrevivência e que facilitassem a sua preservação, o trânsito de um espaço para outro está presente em todo contexto da história humana. No entendimento de Senço (2007) a utilização cada vez mais frequente dos meios de transporte, trouxe também, a necessidade de construção de estradas que pudessem ser transitáveis durante todo o ano.

Bernucci *et al.* (2006) aponta para o pioneirismo dos romanos no planejamento e na construção viária, enfatizando que há mais de 2000 anos eles já se destacavam por possuir uma boa malha viária com um sistema de planejamento e manutenção. Para Senço (2007) a busca pelo melhoramento do leito carroçável levou a utilização de revestimentos de pedras, de misturas betuminosas e de concreto de cimento. Este processo de melhoramento das vias transitáveis reflete um dos principais conceitos da pavimentação de rodovias.

Este conceito está atrelado à definição de pavimento, que é definido como uma estrutura de múltiplas camadas de espessuras finitas, assente sobre o subleito, tendo como objetivo principal resistir aos esforços oriundos do tráfego. Além disso, o pavimento deve proporcionar aos usuários melhoria nas condições de rolamento, com conforto, economia e segurança (BERNUCCI *et al.*, 2006).

De modo geral, os pavimentos são classificados em dois tipos: rígido e flexível. Esta classificação relaciona-se com a estrutura do pavimento em seu aspecto geral e, principalmente, com a distribuição das tensões induzidas na camada asfáltica pelas cargas do tráfego. A Figura 1 apresenta o modelo estrutural usuais em pavimentos rígidos e flexíveis.

Figura 1 - Estruturas de Pavimentos.



Fonte: Bernucci *et al.* (2006).

Conforme pode-se observar na Figura 1, o pavimento rígido é caracterizado pela presença de placas de concreto armado ou de concreto simples assentes sobre uma sub-base intermediária, enquanto o pavimento flexível é composto por uma camada de rolamento de material betuminoso que, geralmente, está assente sobre uma base granular ou um solo estabilizado granulometricamente. Entretanto, cabe ressaltar que o DNIT (2006) indica outra classificação que considera a tipologia de pavimento, denominada de semirrígido. Essa classificação tipológica define pavimento semirrígido como aquele cuja camada de rolamento é composta de revestimento betuminoso, estando sob uma base cimentada.

4.1.1 Pavimentos Flexíveis

A discussão do estudo em tela se deu a partir dos pavimentos flexíveis, uma das soluções mais tradicionais aplicadas na pavimentação de rodovias ou até mesmo na recuperação de rodovias existentes. De acordo com a Confederação Nacional do Transporte – CNT (2017) estima-se que aproximadamente 99% da malha rodoviária brasileira pavimentada é constituída por esse tipo de pavimento.

Como a própria nomenclatura indica, o pavimento flexível 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” (DNIT, 2006). As camadas que compõem este tipo de pavimento são: revestimento asfáltico, base, sub-base, reforço do subleito, quando necessário, e subleito. Nas proximidades adjacentes ao local de aplicação da carga concentra-se um campo de tensões que, por sua dinâmica, tem influência na espessura das camadas do pavimento, que têm como finalidade proteger a camada de subleito do pavimento.

Na concepção de Senço (2007) a camada que compõe o terreno de fundação do pavimento é o subleito e, deve ser regularizada para receber as demais camadas do pavimento que estão assente sobre ela. Quando esta camada apresenta pequena resistência aos esforços solicitantes do pavimento é empregado o reforço do subleito, sendo este de espessura constante construída sob a regularização. Nesse sentido, essa aplicação de reforço do subleito pode ser considerada uma camada suplementar do subleito ou uma camada complementar da sub-base.

No que concerne a camada de base, entende-se como a camada sobre a qual se constrói o revestimento, sendo destinada a resistir e distribuir os esforços oriundos do tráfego.

Nesse contexto, a sub-base surge como uma alternativa técnica e econômica, a partir da impossibilidade de construção da base que incide diretamente sobre a regularização ou, ainda, quando se tem uma camada de base muito espessa. Portanto, ao considerar as especificações do (DNIT, 2006), podemos entender a sub-base como uma camada complementar a base.

Considerando todo esse arcabouço, temos como parte final a camada de rolamento, apresentada na literatura como uma das camadas mais nobres do pavimento, que em outra definição pode ser entendida como “a camada, tanto quanto possível impermeável, que recebe diretamente a ação do tráfego e destinada a melhorar a superfície de rolamento quanto às condições de conforto e segurança, além de resistir ao desgaste, ou seja, aumentando a durabilidade da estrutura.” (SENÇO, 2007, p. 20).

Na composição dos pavimentos flexíveis essa camada é constituída, basicamente, por uma mistura de agregados e ligantes asfálticos, que apresenta variação de acordo com a necessidade técnica e econômica do pavimento, entretanto, cabe ressaltar que sua finalidade é sempre a garantia das condições que proporcionam conforto e segurança para o usuário (BERNUCCI *et al.*, 2006).

4.2 Usinagem de Misturas Asfálticas

Uma mistura asfáltica é composta, predominantemente, da associação de um teor “ótimo” de ligante asfáltico com agregados minerais de diferentes tamanhos. A massa formada por esta associação deve ser homogênea e obedecer aos critérios e especificações definidas em normas dos órgãos reguladores (BERNUCCI *et al.*, 2006). A dosagem das misturas asfálticas é um dos pontos mais importantes no seu processo de usinagem, de modo que as propriedades do revestimento asfáltico após a sua execução em campo dependem desta etapa.

A mistura que resulta no Concreto Asfáltico Usinado a Quente (CAUQ) é, atualmente, a mais utilizada na pavimentação de rodovias e vias urbanas brasileiras. Como o próprio nome já indica, este tipo de revestimento asfáltico é feito em temperaturas controladas que são previamente determinadas em função da curva viscosidade-temperatura do material betuminoso (BERNUCCI *et al.*, 2006).

Todo esse processo de produção do CAUQ, assim como diversos outros tipos de revestimentos asfálticos misturados a quente, ocorre dentro das usinas asfálticas que são definidas como “um conjunto de equipamentos mecânicos e eletrônicos interconectados de forma a produzir misturas asfálticas. Variam em capacidade de produção e princípios de

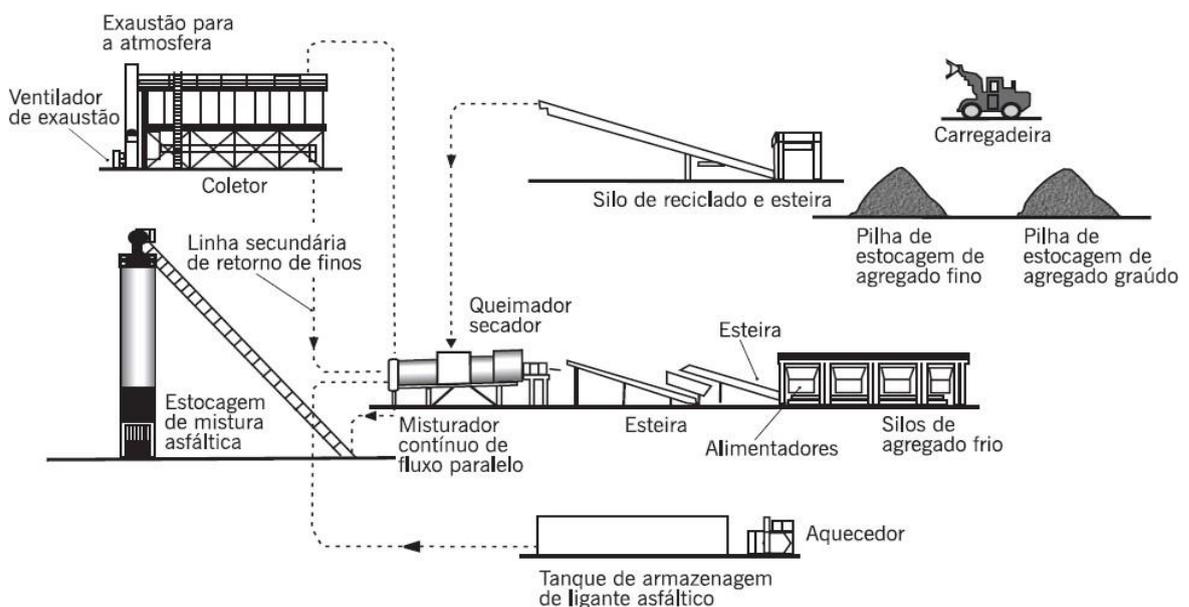
proporcionamento dos componentes, podendo ser estacionárias ou móveis” (BERNUCCI *et al.*, 2006).

Além de poder ser fixa ou alocada de acordo com a necessidade, as usinas ainda podem ser classificadas com relação a dosagem dos agregados, uma vez que cada silo é carregado com um tipo de agregado diferente (SILVA, 2015). A dosagem da mistura pode ser feita de forma volumétrica ou de forma mássica. As usinas de dosagem volumétrica têm o ajustamento de saída do silo e a velocidade das correias reguladas, de forma que a dosagem da mistura é feita em função da vazão mássica do material (m^3/h) (SILVA, 2015).

Por outro lado, as usinas que utilizam o sistema de dosagem mássica executam a dosagem da mistura fazendo a pesagem individual de cada tipo de agregado (SILVA, 2015). Estas ainda podem ser divididas em dois grupos com relação a forma que ocorrem as pesagens, são estes a usina de produção por batelada ou gravimétrica e a usina de produção contínua.

Segundo Silva (2015), nas usinas de produção contínua existe uma correia dosadora na saída de cada silo de agregados, de forma que a leitura do peso e a velocidade da correia são controladas automaticamente por uma célula de carga, o que garante precisão na dosagem do material. Este processo permite que a pesagem dos materiais ocorra de forma dinâmica. Nesse sentido, a ilustração da Figura 2, propicia o entendimento do processo produtivo de uma usina de produção contínua.

Figura 2 - Representação esquemática de uma usina asfáltica contínua.

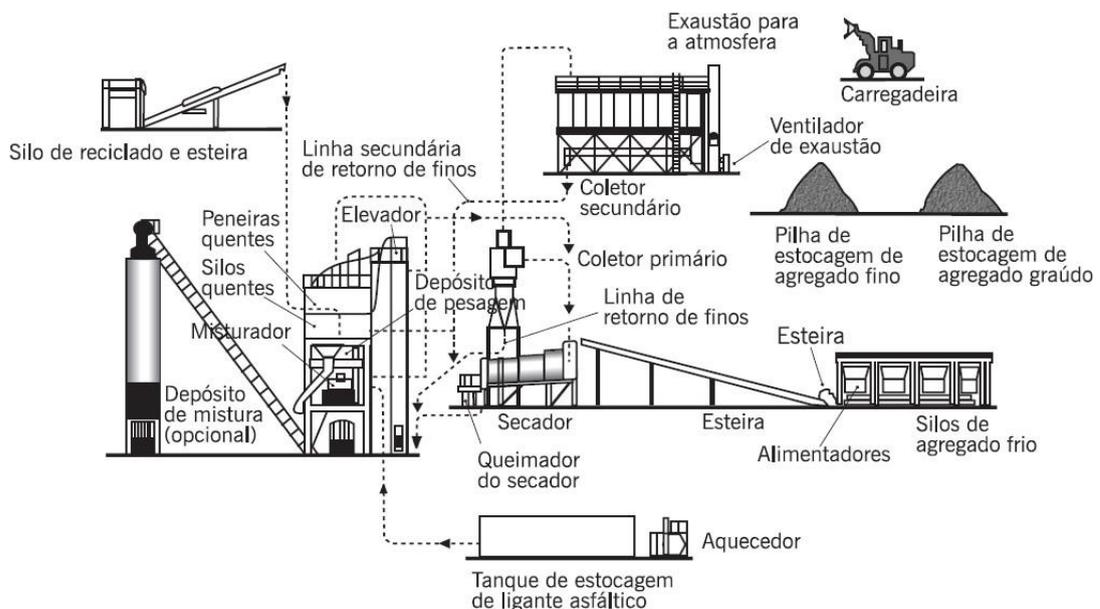


Fonte: Asphalt Institute (1998 apud BERNUCCI *et al.*, 2006).

Quando os agregados são transportados até o alto de uma torre, por onde caem, há um conjunto de peneiras vibratórias onde ocorre a pesagem estática individual de cada um destes, estamos diante de um modelo de usina gravimétrica. Este tipo de usina recebe esse nome porque o deslocamento do material durante a dosagem se faz com auxílio da força da gravidade (SILVA, 2015).

Silva (2015) destaca que este ciclo de dosar, interromper a dosagem, misturar e descarregar o material asfáltico, conhecido como batelada, caracteriza o processo de dosagem da mistura asfáltica como descontínuo, considerando, que há uma interrupção do processo. Logo após a dosagem dos agregados, o Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP) é adicionado ao misturador, conforme é observado no esquema da produção de misturas asfálticas em uma usina gravimétrica mostrado na Figura 3.

Figura 3 - Representação esquemática de uma usina asfáltica por batelada.



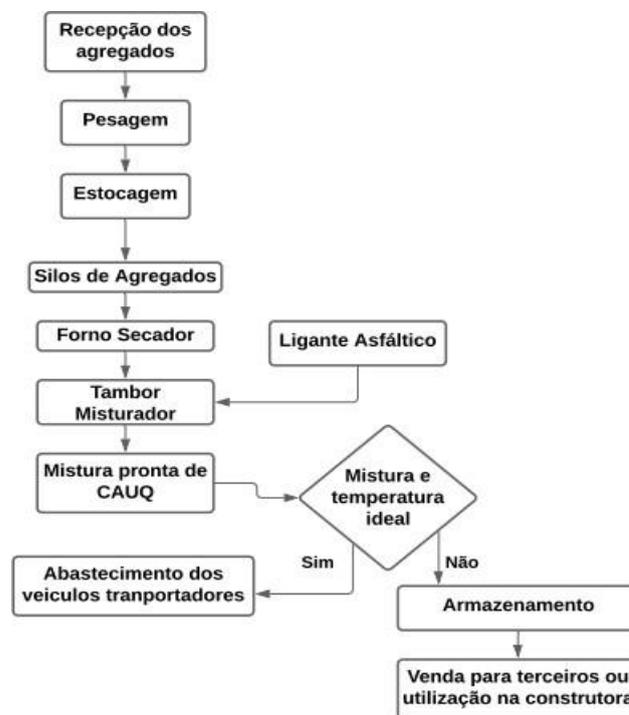
Fonte: Asphalt Institute (1998 apud BERNUCCI *et al.*, 2006).

Todos os tipos de usinas descritos tem em comum a estocagem dos materiais componentes da mistura asfáltica. De acordo com Bernucci *et al.* (2006) a estocagem dos agregados deve ser feita em áreas limpas para prevenir a sua contaminação, como também o seu manuseio dentro da usina deve ser feito de maneira a minimizar sua degradação e segregação. No que se refere ao ligante asfáltico, este deve ser mantido fluido, para que possa se movimentar nos dutos durante o processo de usinagem. Para tanto, os tanques de estocagem do material são mantidos aquecidos por a circulação de óleo ou elétrico (BERNUCCI *et al.*, 2006).

Após todo processo descrito, com a mistura pronta, uma parte significativa das empresas de usinagem não realizam a estocagem desta, sendo esta ação mais corriqueira nas usinas de produção contínua. A estocagem exige um custo extra na produção, uma vez que a mistura deve ser mantida na temperatura ideal. Nesse caso, o transporte dessa mistura para o local da obra, é realizado de forma imediata, com o intuito de garantir que o produto chegue à temperatura ideal ao seu destino e possibilite a aplicação de um revestimento de qualidade ao pavimento.

Cabe dizer que, nem sempre a mistura sai em condições ideais de aplicação. Durante o processo que os agregados ou o ligante asfáltico são processados, pode ocorrer que a temperatura ideal da mistura não seja alcançada. Outro fator que pode desenrolar-se, diz respeito ao quantitativo dos materiais na mistura, sobretudo, quando há o excesso ou a falta de ligante asfáltico, ou mesmo, de agregados na mistura (BERNUCCI *et al.*, 2006). O fluxograma na Figura 4 apresenta, de forma sucinta, o que acontece no processo produtivo em uma usina de asfalto.

Figura 4 - Fluxograma do processo produtivo de uma usina de misturas asfálticas.



Fonte: FAGNANI *et al.* (2009, com adaptações).

Além dos fatores listados acima, a descontinuidade no ciclo do processo produtivo das misturas pode levar a um maior desperdício de material. Ao fim de cada ciclo geram-se “sobras” de misturas asfálticas que estão fora do padrão de qualidade tanto no fator

temperatura, quanto no fator de dosagem, o que inviabiliza sua utilização nas camadas de revestimento.

Conforme ilustrado no fluxograma da Figura 4, a mistura asfáltica que não sai em condições técnicas para aplicação em campo é rejeitada, partindo do pressuposto que sua aplicação na camada de revestimento do pavimento pode ocasionar patologias futuras. Portanto, a recomendação é o descarte, gerando resíduo que pode ser utilizado em outras camadas do pavimento ou auxiliar na execução de calçamentos (FAGNANI *et al.*, 2009).

4.3 Estabilização de solos para uso em pavimentos

A NBR 6502/1995 define o solo como “material proveniente da decomposição das rochas pela ação de agentes físicos ou químicos, podendo ou não conter matéria orgânica”.

Entretanto, uma definição precisa está sujeita basicamente ao ramo de conhecimento empregado, tornando-se, portanto, complexo obter uma definição mais abrangente sobre solos. No contexto da engenharia rodoviária considera-se solo todo o material que pode ser escavado sem a necessidade de explosivos, sendo este qualquer material orgânico ou inorgânico, inconsolidado ou parcialmente cimentado, encontrado na superfície terrestre (DNIT, 2006). Algumas propriedades do solo são importantes no do ponto de vista da engenharia rodoviária, destacando-se: permeabilidade, capilaridade, compressibilidade, elasticidade, contratilidade e expansibilidade e resistência ao cisalhamento.

Quando os valores destas propriedades físicas e mecânicas não estão de acordo com a normatização vigente elas podem ser um fator limitante para o uso do solo nas obras rodoviárias. Isto, porque os materiais utilizados nas camadas que constituem o pavimento devem atender as especificações contidas nas normatizações do DNIT e ABNT. Dos parâmetros listados nas especificações de serviço DNIT 139/2010 e DNIT 141/2010 o Quadro 1 a seguir apresenta valores de Índice de Suporte Califórnia (ISC) e de expansão, para base e sub-base estabilizadas granulometricamente.

Quadro 1 - Limites de ISC e expansão para camadas de pavimentos flexíveis.

Camada	N ≤ 5 x 10 ⁶		N > 5 x 10 ⁶	
	ISC	Expansão	ISC	Expansão
Sub-base	≥ 20%	≤ 1,0%	≥ 20%	≤ 1,0%
Base	≥ 60%	≤ 0,5%	≥ 80%	≤ 0,5%

Fonte: Adaptado DNIT, 2010.

Quando o solo existente no local para ser usado nas camadas do pavimento não atende as especificações mínimas da norma, uma das soluções possíveis é alterar as propriedades do solo, de forma que o seu comportamento mecânico seja melhorado (SANTOS, 2019). Essa ação visa diminuir os custos com a logística de transporte deste material, melhorando o desempenho de execução das obras de pavimentação.

Um dos métodos mais utilizados para melhorar o solo é a estabilização granulométrica, que é a adição de um fator estabilizante ao solo tendo como finalidade aumentar a resistência do material aos esforços advindos do tráfego, de maneira durável, resistindo também às intempéries (VOGT, 1971). Os métodos de estabilização de solos mais usados são: mecânica, física e química.

Diante de todos os métodos existentes, ao optar-se por um deles deve-se conhecer qual propriedade do solo necessita ser melhorada. Gondim (2008) ressalta que para escolher o método adequado para estabilização do solo é necessário elencar os propósitos aos quais se destina o processo de estabilização, pois este não é um processo infalível, onde todas as propriedades do solo são corrigidas simultaneamente.

4.3.1 Estabilização Física

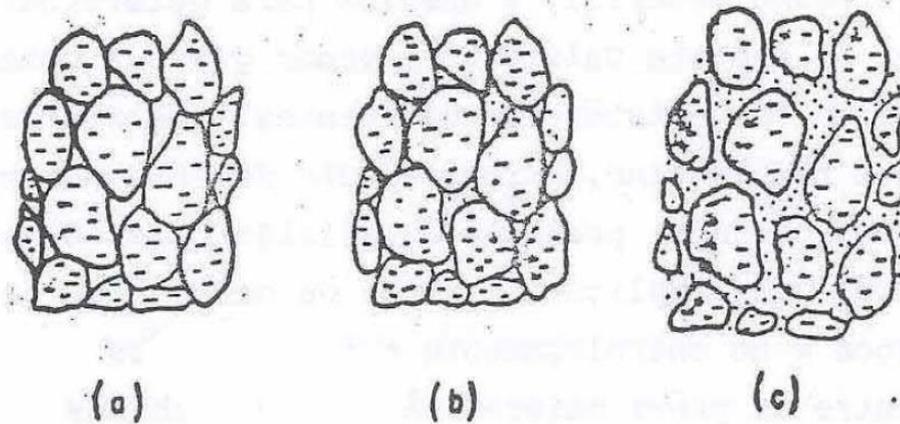
O processo de estabilização física mais empregada na estabilização de solos para uso em camadas de pavimentos é a correção granulométrica, que também faz parte da estabilização mecânica, sendo anterior ao processo de compactação. A correção granulométrica consiste na adição de um ou mais solos no solo a ser estabilizado formando-se assim um novo produto homogêneo, bem graduado e adequado para determinados fins de engenharia (SANTOS, LIMA e BUENO, 1995).

De modo geral, podemos observar que a natureza das partículas, que devem resistir aos esforços, bem como a estabilização da composição são fatores que têm influência direta no comportamento das composições granulométricas (VILLIBOR, 1982). Por exemplo, as areias finas, por ser um solo mal graduado, tendem a não alcançar altas densidades, por existir uma dificuldade em compactar este tipo de solo, por isso são menos desejáveis para suportar pavimentos (ALMEIDA, 2004).

No contexto da pavimentação as camadas de base e sub-base do pavimento, em sua grande maioria, são formadas de composições granulares. Quando bem graduadas e submetidas ao processo de compactação os vazios deixados pelos grãos grossos existentes no

solo, são preenchidos pelos finos, tornando assim a mistura mais compacta e menos deformável (VILLIBOR, 1982). A Figura 5 ilustra situações de composições granulométricas.

Figura 5 - Estados físicos de uma composição solo-agregado.



Fonte: Villibor (1982).

A composição granulométrica ideal é ilustrada na Figura 5 (b), pois os grãos maiores em contato garantem a resistência enquanto os vazios são ocupados pelo material fino. A composição da Figura 5 (a), formada apenas por grãos maiores, faz com que a distribuição dos esforços não produza os resultados esperados, devido a falta de partículas finas para preencher os vazios. Já a distribuição mostrada na Figura 5 (c) tem uma resistência mecânica menor, devido ao excesso de finos.

Portanto, o papel da estabilização granulométrica é corrigir a graduação do solo, de maneira que ao ser compactado o solo apresente as características necessárias ao bom funcionamento do pavimento. Neste sentido, Vizcarra (2010) destaca que na estabilização granulométrica procura-se obter um material bem graduado e de percentagem limitada de partículas finas, misturando solos de diferentes frações granulométricas fazendo em seguida à compactação da mistura.

4.3.2 Estabilização Mecânica

A estabilização mecânica de um solo consiste em procedimentos que mudem o arranjo das partículas do solo ou em procedimentos que façam uma correção granulométrica. Neste tipo de estabilização, a redução de volume de vazios está relacionada ao ganho de resistência mecânica (SANTOS, LIMA e BUENO, 1995). Por este motivo, um dos procedimentos mais

executados no processo de estabilização mecânica é a compactação, pois permite o rearranjo das partículas e a expulsão do ar aumentando o contato entre os grãos.

Por conceder ao solo uma melhoria em diversas propriedades a compactação é empregada em diversas obras de engenharia, dentre elas destaca-se o seu uso na pavimentação de rodovias. Pereira (2012) destaca que “em campo na construção do pavimento a densificação do solo é feita camada por camada, quer seja ou não usado outro processo”.

Em razão disto, alguns pesquisadores indicam que a compactação é parte integrante de qualquer processo de estabilização, embora não seja considerada por si só um tipo de estabilização. A sua execução acontece sempre posteriormente a mistura do estabilizante com o solo (VILLIBOR, 1982). Observa-se então que este tipo de estabilização quase sempre atua de forma complementar a outros métodos de estabilização.

4.3.3 Estabilização Química

A estabilização química, como o indica, compreende a adição de substâncias químicas ao solo, que de acordo com Santos, Lima e Bueno (1995) provocam mudanças que refletem nas propriedades de resistência mecânica, permeabilidade e deformabilidade do solo, atingindo o objetivo de estabilizar o solo.

Diversos aditivos podem ser usados para estabilizar um solo quimicamente. Quando o aditivo é adicionado ao solo ocorre uma reação química entre estes, onde as partículas do solo são, na grande maioria dos casos, aglutinadas pelo aditivo (GONDIM, 2008). Os estabilizantes mais usados atualmente são o cimento Portland, a cal e as emulsões asfálticas.

Dentre estes, o aditivo mais utilizado na estabilização de solos é o cimento, técnica utilizada no Brasil desde 1939. Este tipo de estabilização química concede ao solo um ganho de resistência, fazendo uso das reações pozolânicas e sílica ativa presente no solo, além disso, ele atinge a resistência em idades inferiores a cal (PEREIRA, 2012). No entanto, vale ressaltar que a substância química a ser escolhida vai depender da sua compatibilidade com solo que se está trabalhando.

4.4 Utilização de Resíduos Industriais em Camadas de Base e Sub-base de Pavimentos

Além de todos os materiais supracitados, utilizados nas mais diversas técnicas de estabilização de solos, atualmente existem diversas pesquisas que visam à reutilização de resíduos sólidos das mais variadas indústrias. Utilizando-se as técnicas de estabilização física

e mecânica, estes resíduos funcionam como agentes estabilizadores de solos destinados à aplicação nas camadas de base e sub-base de pavimentos.

Este fato dar-se devido a crescente preocupação com os impactos ambientais que os resíduos sólidos podem ocasionar, quando são descartados de forma inadequada. A utilização desses materiais alternativos na pavimentação traz uma alternativa de reaproveitamento ecológico, ajudando assim na gestão dos resíduos sólidos, minimizando os impactos ambientais causados pelas atividades humanas.

Nesse sentido, a título de exemplificação, pode-se citar o resíduo da fresagem da camada de rolamento durante o processo de restauração do pavimento, conhecido como *Reclaimed Asphalt Pavement* (RAP). Considerando que este resíduo é gerado em grande quantidade o seu descarte para aterros sanitários resultaria em altos custos. Este fator, atrelado ao custo elevado de matéria prima, torna a reutilização do RAP em obras de pavimentação uma boa opção de destino final desse resíduo (SANTOS e LEANDRO, 2017).

Atrelado ao fator sustentável, a reutilização de resíduos sólidos em camadas de pavimentos rodoviários ajuda a suprir de forma técnica e econômica a carência de materiais que atendam as especificações técnicas da normatização. Dentro desta perspectiva Silveira e Borges (2016) enfatizam que

[...] a falta de materiais granulares ou a sua grande distância do local de construção das vias acabam tornando inviável o uso em pavimentos. Dessa forma, surge a necessidade de utilizar solos menos nobres, estabilizando-os com aglomerantes e resíduos que melhorem suas propriedades (SILVERA E BORGES, 2016, p. 74).

Atualmente, entre os principais resíduos sólidos pesquisados como material alternativo para estabilização de solos destacam-se o Resíduo de Construção e Demolição (RCD), o resíduo cerâmico de polo oleiro e o rejeito do beneficiamento de granito.

Silva (2009) em sua pesquisa analisou um solo com características arenosas e outro solo que apresentou uma curva granulométrica mais contínua tendo grande quantidade de finos, ambos os solos foram coletados na Região Metropolitana de Fortaleza/CE. O autor concluiu que todas as misturas solo+RCD testadas, tendo como base o ensaio de ISC, poderiam ser utilizadas como camada de base e sub-base (ISC>60%). Sendo que as misturas que apresentaram melhores resultados tinham aproximadamente 40% de RCD.

Já a reutilização do resíduo cerâmico advindo de polo oleiro para emprego em base e sub-base de pavimentos foi estudada por Dias (2016). A pesquisa apresenta a temática sobre a mistura composta por resíduo cerâmico britado, empregado como agregado graúdo; 30 % de areia, utilizada como agregado miúdo; e solo natural argiloso. As misturas com 40% e 20% de

resíduos cerâmicos apresentaram ICS superior a 80%, podendo ser aplicadas como camada de base e sub-base.

Outro rejeito industrial estudado como estabilizante de solos é o rejeito de beneficiamento de granito. Santos (2019) concluiu que o solo oriundo da região do Seridó no Rio Grande do Norte estabilizado com 10% de rejeito granítico apresentou grande potencialidade para uso em obras rodoviárias. A autora ainda destaca que “apesar da substituição do solo por 10% de rejeito apresentar redução de custo pouco significativa, defende-se a sua incorporação à mistura final por trazer benefícios ambientais sem onerar o valor global da obra”.

Ainda não existe fonte bibliográfica que trate do resíduo da usinagem de misturas asfálticas como agente estabilizador de solos para fins de camadas de base e sub-base de pavimentos. Portanto, esta pesquisa abre o debate a cerca do tema de forma a contribuir para reutilização de mais um resíduo, dando a ele uma destinação final adequada.

4.5 Logística Reversa e Sustentabilidade

A deposição irregular de resíduos sólidos advindos do setor da construção civil, seja do setor de edificações ou de construção pesada, é uma realidade em que ocorrem em muitos países. Este tipo de prática provoca problemas de ordem ambiental, visual e de saúde coletiva. Dentro desta perspectiva, a Resolução do Conselho Nacional de Meio Ambiente - CONAMA 307/2002 proíbe a disposição dos resíduos da construção civil em aterros de resíduos domiciliares, em áreas de “bota fora”, em encostas, corpos d’água, lotes vagos e em áreas protegidas por lei.

Um dos caminhos para mitigação deste problema é a redução na geração de RCC, que passa pela implantação de uma correta e eficiente administração, tendo como principal ferramenta o Plano de Gerenciamento de Resíduos da Construção Civil (PGRCC), apresentado também na Resolução CONAMA 307/2002 (PINTO, MELO e NOTARO, 2016).

Outra boa alternativa que permite uma destinação correta deste resíduo é a reutilização ou a reciclagem no próprio setor da construção civil ou em alguma outra indústria. No entanto, nem todos os resíduos podem ser reciclados ou reutilizados, por isso a referida resolução do CONAMA apresenta a classificação dos resíduos da construção civil, que auxilia na determinação de quais materiais podem ser reutilizados. A classificação é apresentada de forma sucinta na Figura 6.

Figura 6 - Classificação dos resíduos da construção civil.



Fonte: Brasil (2002).

Os resíduos classificados na classe A são indicados para reutilização ou reciclagem na forma de agregados ou para serem encaminhados a aterros apropriados, de modo que futuramente possam ser reciclados. Dentro deste grupo estão os resíduos de construção, demolição, reformas e reparos de pavimentação, bem como de outras obras de infraestrutura, incluindo os solos derivados de terraplanagem (BRASIL, 2002).

Alinhado a essa perspectiva, Mazur (2015) expõe que as restrições ecológicas, cada vez mais crescentes, aliada com as pressões da sociedade por empresas mais sustentáveis e os possíveis ganhos econômicos no processo de reutilização dos materiais, fazem com que muitas pesquisas sejam desenvolvidas na atualidade sobre a logística reversa como ferramenta sustentável dentro da construção civil.

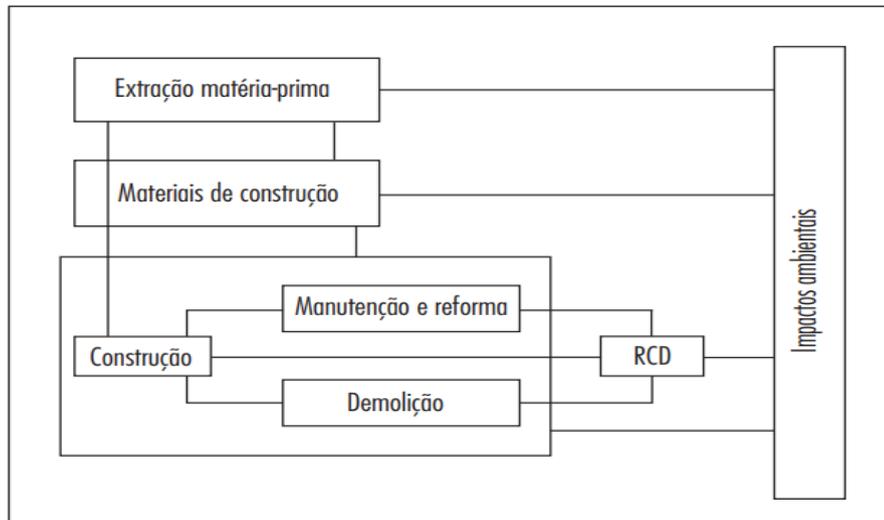
Este conceito de logística reversa vem sendo aprimorado, deixando de ser considerada “apenas” a reciclagem de embalagens, passando a ser um conceito mais amplo. A Lei 12.305/2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos, define em seu Art. 3º inciso XII a logística reversa como:

instrumento de desenvolvimento econômico e social caracterizado por um conjunto de ações, procedimentos e meios destinados a viabilizar a coleta e a restituição dos resíduos sólidos ao setor empresarial, para reaproveitamento, em seu ciclo ou em outros ciclos produtivos, ou outra destinação final ambientalmente adequada (BRASIL, 2017, p.11).

Certamente esta definição de logística reversa contrasta com o modelo de processo industrial linear mais adotado atualmente pelo setor da construção civil, onde os resíduos da construção civil geram desperdício de matéria prima e impactos ambientais significativos ao

ambiente urbano (BAPTISTA JR; ROMANEL, 2013). A Figura 7 mostra a esquematização deste modelo linear.

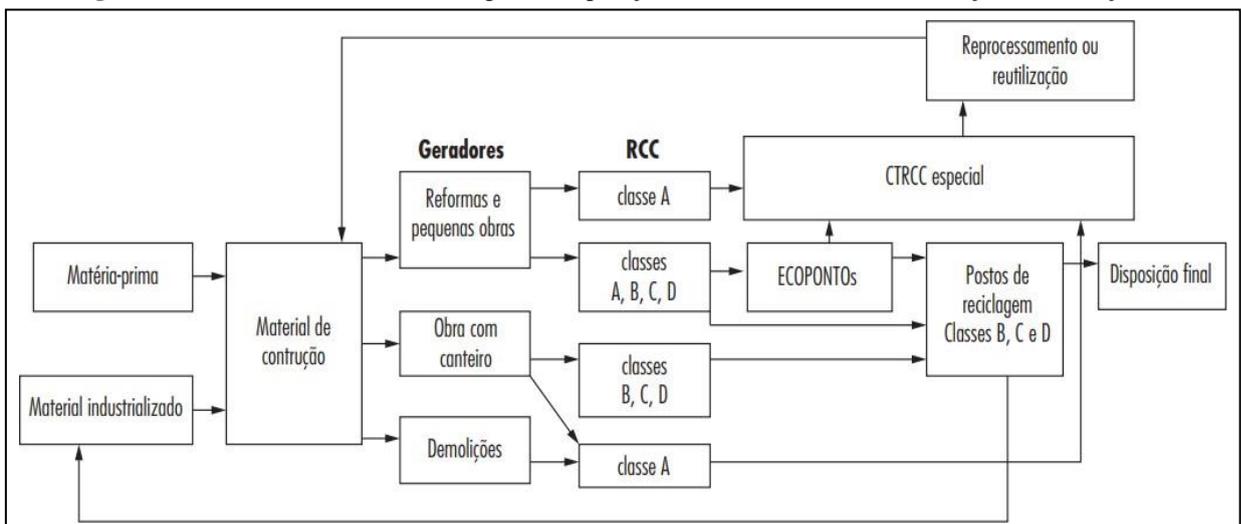
Figura 7 - Processo linear de descarte.



Fonte: Baptista Jr e Romanel (2013).

Por outro lado, a implantação do processo de logística reversa permite a migração desse processo linear para um processo de logística circular. A natureza desse sistema é a sustentabilidade, pois tem como principal característica incorporar novamente os resíduos gerados, já segregados por classe, a cadeia produtiva ou o descarte adequado desses resíduos, produzindo benefícios sociais, econômicos e ambientais (BAPTISTA JR; ROMANEL, 2013). O esquema da Figura 8 ilustra o processo de logística circular.

Figura 8 - Processo circular de reciclagem e disposição final de resíduos da construção e demolição.



Fonte: Baptista Jr e Romanel (2013).

Diante disso, observa-se que a reutilização do resíduo da produção de misturas asfálticas em camadas de base e sub-base de pavimentos caracteriza-se como um processo de logística circular, podendo este ser aproveitado no próprio ciclo produtivo da empresa geradora do resíduo.

Além disso, a destinação adequada desse resíduo permite o desenvolvimento sustentável do setor, pois conforme afirma Marcondes e Cardoso (2005) “a cadeia produtiva da Construção Civil, assim como outras cadeias industriais, deve promover o desenvolvimento sustentável, ou seja, deve desenvolver-se de forma a não comprometer a capacidade das gerações futuras em fazê-lo também”.

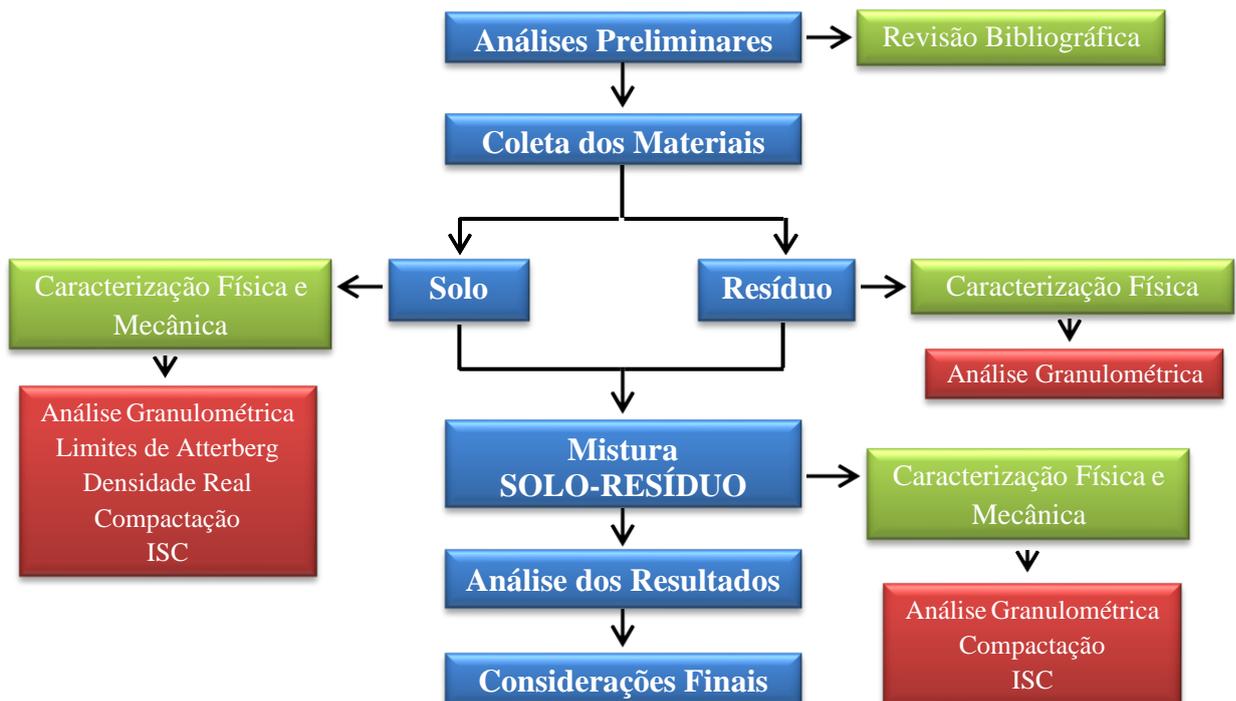
5 METODOLOGIA

Essa pesquisa está baseada em alguns aspectos que permitem classificá-la de acordo com os procedimentos técnicos utilizados como uma pesquisa experimental. O delineamento desse tipo de pesquisa consiste essencialmente em “determinar um objeto de estudo, selecionar as variáveis que seriam capazes de influenciá-lo, definir as formas de controle e de observação dos efeitos que a variável produz no objeto” (GIL, 2002). Alinhado a este contexto, a pesquisa apresentada teve como principal fonte técnica de coleta de dados os experimentos laboratoriais.

Quanto à abordagem foi utilizada uma abordagem quantitativa recorrendo-se a linguagem matemática para descrever as causas do fenômeno e as relações entre variáveis. Esse tipo de abordagem é centrado na objetividade, de modo que os resultados são tomados como um retrato real de toda a população (FONSECA, 2002).

Em relação aos objetivos a pesquisa foi classificada como explicativa. De acordo com Severino (2007) a pesquisa explicativa “além de registrar e analisar os fenômenos estudados, busca identificar suas causas, seja através da aplicação do método experimental/matemático, seja através da interpretação possibilitada pelos métodos qualitativos”. A Figura 9 expõe o fluxograma que, de forma resumida, mostra as etapas do processo metodológico que nortearam a pesquisa.

Figura 9- Fluxograma das etapas metodologias da pesquisa.



Fonte: Próprio Autor (2020).

Os aspectos metodológicos desta pesquisa foram desenvolvidos fundamentalmente em quatro etapas. A primeira etapa consistiu-se da revisão bibliográfica acerca do tema, bem como da coleta e preparação dos materiais utilizados nos experimentos. Na segunda etapa foram realizados ensaios laboratoriais de caracterização tanto para o solo quanto para o resíduo da usinagem de misturas asfálticas. Através dos dados de caracterização do solo foi feita a sua classificação pelo sistema de classificação do HRB-AASHTO.

Já na terceira etapa teve por objetivo a caracterização mecânica do solo natural e da mistura solo-resíduo para três teores distintos de adição de resíduo. Além disso, as misturas solo-resíduo ainda foram submetidas ao ensaio de análise granulométrica. Por fim, na quarta etapa os resultados foram analisados observando-se o comportamento físico-mecânico das misturas solo-resíduo, tendo como direcionamento o uso destas em camadas de base e sub-base de pavimentos flexíveis.

5.1 Primeira Etapa: Coleta e Preparação dos Materiais

O solo utilizado na pesquisa foi coletado em um terreno localizado no município de Araruna/PB. A coleta foi feita a uma profundidade mínima de 0,80 metros, a fim de evitar o excesso de matéria orgânica que se acumula na superfície. Foram coletados cerca de 150 quilogramas de solo para execução dos ensaios de caracterização. A Figura 10 mostra amostras do solo e do resíduo utilizados nesta pesquisa.

Figura 10 - Materiais utilizados na pesquisa. a) Amostra de solo natural; b) Amostra de resíduo da usinagem de misturas asfálticas.



Fonte: Próprio Autor (2020).

O resíduo empregado neste estudo foi fornecido pela empresa TCPAV, que administra uma usina de asfalto fixa localizada na cidade de Macaíba/RN. A usinagem do asfalto é feita por meio do sistema de dosagem mássica. O resíduo coletado é proveniente de falhas no

processo de início e reinício dos ciclos de produção das misturas asfálticas. O momento de coleta do resíduo, que foi retirado de maneira aleatória da pilha de material, sendo dividido em dois lotes de aproximadamente 30 quilogramas cada um. Conforme representado na Figura 11.

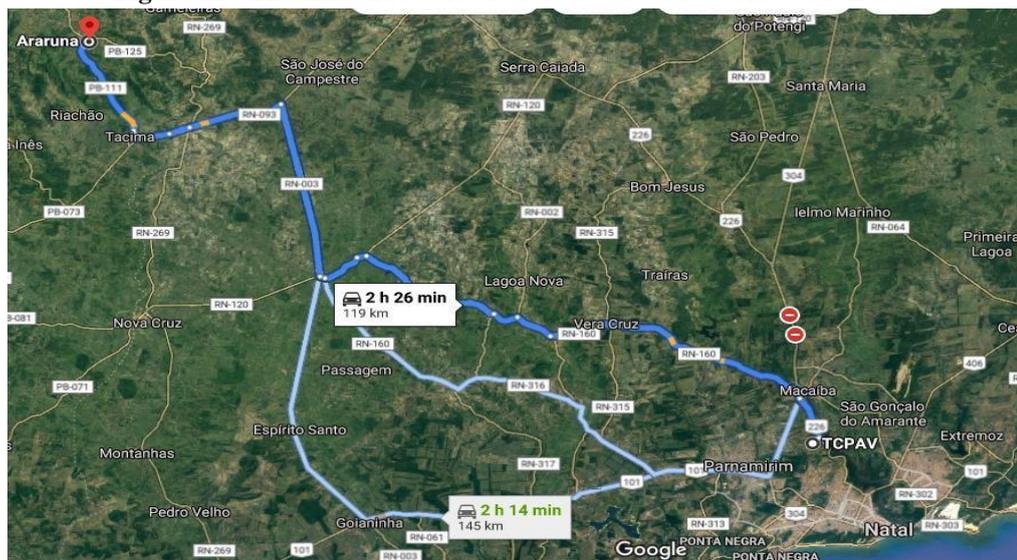
Figura 11 - Coleta do resíduo na empresa TCPAV.



Fonte: Próprio Autor (2020).

O local de coleta do solo tem coordenadas geográficas de $6^{\circ}32'19''\text{S}/35^{\circ}43'52''\text{W}$, enquanto o local de coleta do resíduo tem como referência geográfica as seguintes coordenadas $05^{\circ}51'04''\text{S}/35^{\circ}17'46''\text{W}$. O percurso de menor distância entre as duas cidades é de aproximadamente 119 km, conforme mostrado na Figura 12.

Figura 12 - Distância entre os locais de coleta do solo e coleta do resíduo.



Fonte: Google Maps (2020).

Finalizada a primeira fase, o processo de coleta, os materiais foram transportados para o Laboratório de Geotécnica do Campus VIII da Universidade Estadual da Paraíba – UEPB,

onde deu-se início aos ensaios de acordo com os critérios estabelecidos nas normas técnicas do Departamento Nacional de Infraestrutura e Transporte (DNIT) e da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). A Tabela 1 apresenta as normas utilizadas em cada um dos ensaios.

Tabela 1 - Ensaios de caracterização dos materiais e misturas analisadas.

Ensaio	Norma	Material Ensaiado		
		Solo Natural	Resíduo	Solo + Resíduo
Análise	NBR 7181/2016	X	-	X
Granulométrica	DNER-ME 083/98	-	X	-
Limite de Liquidez	DNER-ME 122/94	X	-	-
Limite de Plasticidade	DNER-ME 082/94	X	-	-
Densidade Real	DNER-ME 093/94	X	-	-
Compactação	DNIT-ME 164/2013	X	-	X
ISC	DNIT-ME 172/2016	X	-	X

Fonte: Elaborada pelo Autor, 2020.

Além dos ensaios mostrados na Tabela 1, a preparação das amostras de solo natural para o ensaio em laboratório, seguiu-se as orientações e recomendações especificadas na norma DNER 041/94, com relação ao preparo e procedimentos que envolvem os ensaios de caracterização. Nesse sentido, a observação da norma foi de fundamental importância no processo que norteou os procedimentos para a preparação de amostras utilizadas nos ensaios de umidade hidrocópica, limites de liquidez e plasticidade e densidade real.

No decorrer do procedimento de preparação, o processo de secagem das amostras foi realizado ao ar e destorroamento foi feito com auxílio da mão de gral. Após o cumprimento do rito especificado nas orientações e recomendações da norma DNER 041/94, a amostra do solo natural, preparada anteriormente, foi quarteado manualmente, possibilitando a obtenção de uma amostra representativa para a continuidade dos ensaios que seriam realizados nas fases posteriores.

5.2 Segunda Etapa: Caracterização física dos materiais

5.2.1 Análise granulométrica por peneiramento

Para realização do ensaio de análise granulométrica por peneiramento, foi utilizada uma amostra preparada e quantificada de acordo com a norma NBR 6457/2016, e sua execução procedeu-se de acordo com as diretrizes descritas na NBR 7181/2016.

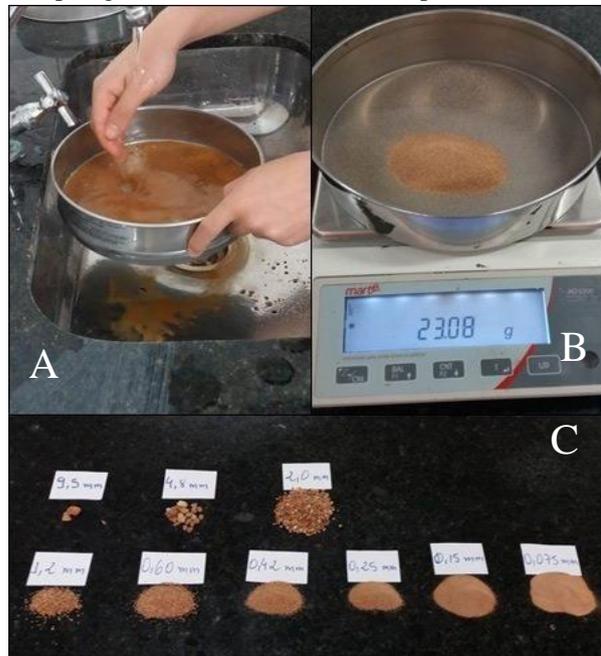
Passado o processo de preparação e quantificação, iniciou-se a fase de peneiração, em que a amostra de solo foi submetida ao processo de peneiramento em uma peneira de

espessura 2,0 mm. O material retido nesta peneira foi encaminhado para ser lavado, a fim de eliminar o material fino que ainda estava aderente. Logo após esse processo de lavagem, a amostra de solo retida na peneira 2,0 mm foi levada a estufa a uma temperatura de 105 °C, até a constância de massa.

Na sequência, tomou-se uma amostra do material passante na peneira de 2,0 mm e feito o encaminhamento para lavagem em peneira de abertura 0,075 mm e, posteriormente, levado a estufa até a constância de massa do material.

Com as amostras secas, procedeu-se o peneiramento manual grosso na série de peneiras com variação de aberturas que compreendem a seguinte numeração: 50; 38; 25; 19; 9,5; 4,8 e 2,0 mm para amostra retida na peneira de 2,0 mm. No que concerne ao peneiramento fino, o peneiramento se deu na série de peneiras com as variações numéricas que se apresenta na sequência de: 1,2; 0,60; 0,42; 0,25; 0,15 e 0,075 mm. Nesse sentido, considerou-se para o peneiramento fino a amostra retida na peneira de abertura 0,075 mm. A ilustração da Figura 13 registra o processo de lavagem e de pesagem do material retido nas peneiras, bem como a distribuição granulométrica da amostra.

Figura 13 - Análise granulométrica por peneiramento. a) Lavagem da amostra de solo na peneira de abertura 0,075mm; b) Procedimento de pesagem das amostras retidas nas peneiras; c) Amostra retida em cada peneira.



Fonte: Próprio Autor (2020).

Do material passante na peneira 2,0 mm, foram tomadas outras duas amostras para determinação da umidade hidrocópica, calculada a partir da Equação 01, em que o P_h é o peso do material seco em estudo e o P_s é o peso do material úmido.

$$h = \frac{P_h - P_s}{P_s} \times 100 \quad (\text{Equação 01})$$

5.2.2 Limite de Liquidez

A literatura apresenta o limite de liquidez como pertencente ao escopo dos limites de Atterberg e representa a transição do estado plástico do solo para o estado líquido, sendo expresso em percentagem. Sua determinação se deu através do método de referência e seguiu os procedimentos do método de ensaio DNER 122/94.

Na fase inicial desse processo, tomou-se cerca de 70 g da amostra de solo passante na peneira 0,42 mm preparada de acordo com a norma DNER 041/94. Posteriormente, foram adicionados a amostra de solo aproximadamente 15 cm³ de água destilada, procedendo-se a homogeneização da mistura até formar uma massa plástica.

Em continuidade ao processo, a mistura foi colocada na concha do aparelho de Casagrande, onde é feita uma canelura de 1 cm na parte central da massa de solo, conforme mostra a Figura 14. Após realização das fases anteriores, foram, então, aplicados sucessivos golpes na concha contra a base do aparelho. Recolheu-se uma porção de solo em que se verificou a união das bordas na canelura para determinação da umidade.

Figura 14 - Canelura na amostra de solo na concha do aparelho de Casagrande.



Fonte: Próprio Autor (2020).

Este procedimento foi repetido por cinco vezes para teores crescentes de umidade, onde os valores foram representados em um sistema de eixos ortogonais, sendo os teores de umidade apresentados na abcissa em escala aritmética e os valores do número de golpes representados na ordenada em escala logarítmica. O valor do limite de liquidez corresponde ao teor de umidade para 25 golpes.

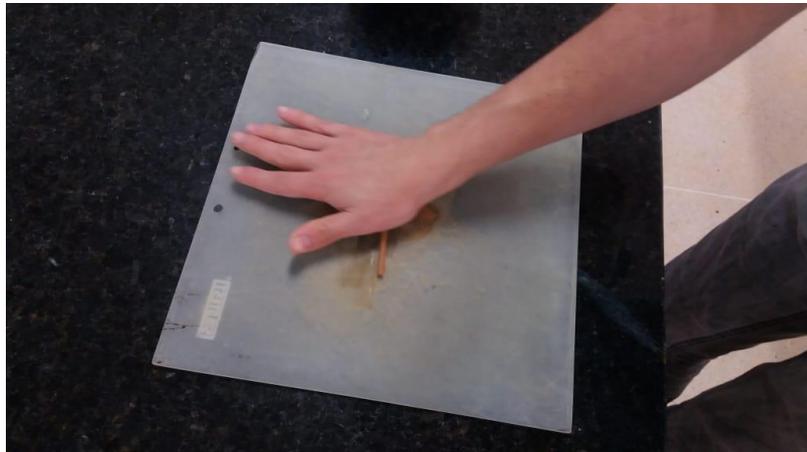
5.2.3 Limite de Plasticidade

Assim como o limite de liquidez, o limite de plasticidade é um limite de consistência dado pelo teor de umidade do solo que marca a mudança do estado plástico do solo para o estado semissólido, tendo seu valor expresso em porcentagem. Essa característica do solo foi obtida de acordo com o descrito no método de ensaio DNER 082/94.

Foram tomadas 50 g da mesma amostra de solo usada no ensaio de limite de liquidez, assim como preconiza a norma de preparação de amostras DNER 041/94. Juntou-se a essa amostra de solo água destilada até que a mistura formasse uma massa plástica. Tomou-se uma pequena quantidade dessa massa e foram moldados pequenos cilindros de aproximadamente 3 mm de espessura e 10 cm de comprimento.

Essa modelagem, demonstrada na Figura 15, foi feita entre a mão e a face esmerilhada de uma placa de vidro, de forma que os cilindros que apresentaram fissuras quando atingidas as medidas foram levados à estufa para determinação do teor de umidade. Os procedimentos foram repetidos até se obter três valores que não deferissem em mais de 5% da média.

Figura 15 - Execução da modelagem dos cilindros no ensaio de limite de plasticidade.



Fonte: Próprio Autor (2020).

Após a determinação dos valores do limite de liquidez e do limite de plasticidade efetuou-se o cálculo do índice de plasticidade do solo, dado pela Equação 02.

$$IP = LL - LP \quad \text{(Equação 02)}$$

Caputo (1988) apresenta uma classificação dos solos proposta por Jenkins. A Tabela 2 mostra essa classificação, observando-se que, quando o solo não apresenta plasticidade o IP = NP (não plástico).

Tabela 2 - Classificação dos solos com relação ao valor do seu IP.

Valor do IP	Condição do Solo
$1 < IP < 7$	Fracamente Plástico
$7 < IP < 15$	Medianamente Plástico
$IP > 15$	Altamente Plástico

Fonte: Elaborada pelo Autor, 2020.

5.2.4 Densidade Real

Este ensaio é efetuado segundo o procedimento descrito no método de ensaio DNER 093/94. Inicialmente a amostra de solo não retido na peneira 2,0 mm e preparada de acordo com a norma DNER 041/94 foi levada a estufa, retirando-se, logo após, a quantidade de 10 g de solo seco para execução do ensaio.

Em seguida, pesou-se o picnômetro vazio, seco e limpo, sendo essa medida nomeada de variável P1. A amostra de solo foi colocada no picnômetro que foi novamente pesado, obtendo-se a variável P2. Posteriormente, colocou-se água destilada no picnômetro até cobrir com excesso a amostra de solo. O picnômetro foi aquecido durante 15 minutos, conforme mostrado na Figura 16, e deixado à temperatura ambiente para esfriar.

Figura 16 - Aquecimento do picnômetro com o conjunto solo-água.

Fonte: Próprio Autor (2020).

Após esfriar, o picnômetro foi cheio por completo com água destilada e colocado em banho de água a temperatura ambiente por 15 minutos. Registrou-se a temperatura do banho, nomeada com a variável t. Logo que foi retirado do banho foi seco com pano limpo e levado para balança, de modo que o peso do picnômetro mais o conteúdo foram registrados como variável P3.

Por fim, foi retirado todo o material do picnômetro, enchendo-o completamente e, em seguida, apenas com água destilada, colocando-o novamente em banho de água a temperatura ambiente por 15 minutos. Após esse tempo, o picnômetro com água destilada foi retirado do banho e levado a balança para determinação do peso definido como variável P4. A densidade real do solo para a temperatura t foi determinada de acordo com a Equação 03.

$$D_t = \frac{P2-P1}{(P4-P1)-(P3-P2)} \quad (\text{Equação 03})$$

Este valor da densidade real ainda foi corrigido através da Equação 04 para referência da água a uma temperatura de 20 °C, em que k_{20} é a razão entre a densidade relativa da água à temperatura t e a densidade relativa da água a 20 °C.

$$D_{20} = k_{20} \times D_t \quad (\text{Equação 04})$$

5.2.5 Classificação do Solo

A classificação do solo foi feita através do sistema de classificação do Highway Research Board (HRB-AASHTO), tendo em vista, pertencer ao grupo dos mais utilizados para classificação de solos na engenharia rodoviária. Este sistema é baseado em resultados dos ensaios de análise granulométrica e dos limites de Atterberg. O solo analisado nesta pesquisa foi classificado de acordo com essa metodologia, que é apresentada concisa na Figura 17.

Figura 17 - Sistema de classificação de solo HRB adotado 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.	41 mín.	40 máx.	41 mín.	40 máx.	41 mín.	40 máx.	41 mín.
Índice de Grupo (IG)	6 máx.		NP	10 máx.	10 máx.	11 mín.	11 mín.	10 máx.	10 máx.	11 mín.	11 mín.
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			

Fonte: Senço (2007).

A metodologia de classificação do sistema HRB apresenta oito diferentes grupos para a classificação do solo que, em seu bojo, apresenta diversos subgrupos. Dentro de cada grupo ou subgrupo, o solo foi avaliado, também, quanto a sua “capacidade de suporte” através do índice de grupo (IG) dado pela Equação 05. O IG está compreendido entre o intervalo de 0 (solos ótimos) a 20 (solos péssimos).

$$IG = 0,2 \times a + 0,005 \times a \times c + 0,01 \times b \times d \quad (\text{Equação 05})$$

Onde na equação “a” é dado pelo percentual de material passando na peneira nº 200 – 35; “b” corresponde ao valor do percentual de material passando na peneira nº 200 – 15; “c” é igual ao limite de liquidez – 40 e “d” é dado por IP – 10.

5.2.6 Análise granulométrica do Resíduo

O ensaio de granulometria para o resíduo da usinagem de misturas asfálticas foi baseado no método de ensaio DNER 083/98. Após a coleta da amostra no campo, a mesma foi reduzida por quartejamento manual até atingir a quantidade necessária para realização do ensaio.

O processo executivo do ensaio consistiu-se, basicamente, do peneiramento manual da amostra iniciando-se da peneira de maior abertura (50 mm) até a peneira de menor abertura da série (0,075 mm). Foram registradas as massas retidas em cada peneira, para posteriormente aplicar nos cálculos dos resultados do ensaio.

5.3 Terceira Etapa: Caracterização mecânica do solo natural e das misturas solo-resíduo

Esta etapa baseou-se na execução dos ensaios de compactação e Índice de Suporte Califórnia (ISC) no solo natural e nas misturas solo-resíduo. As misturas foram caracterizadas para três teores distintos de resíduo adicionados ao solo 25%, 50% e 75%, respectivamente. As composições das amostras ensaiadas, bem como a nomenclatura adotada para cada uma estão indicadas no Quadro 2 a seguir.

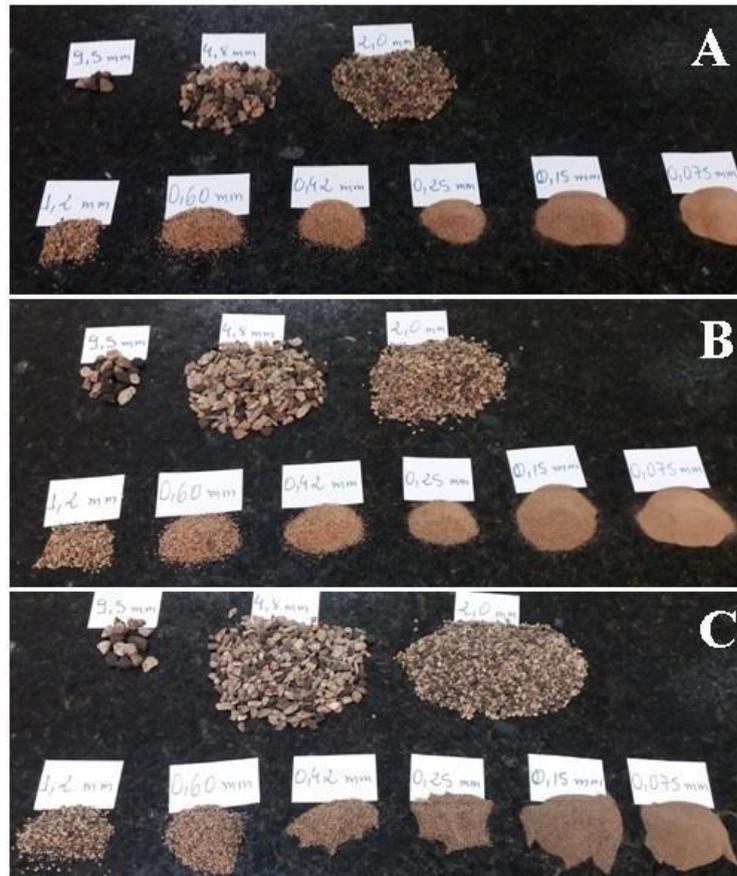
Quadro 2 - Composição das amostras analisadas nos ensaios mecânicos.

Nomenclatura	Composição	
	Solo Natural	Resíduo
SN	100%	-
SR25	75%	25%
SR50	50%	50%
SR75	25%	75%

Fonte: Elaborado pelo Autor, 2020.

Além da caracterização mecânica, as misturas solo-resíduo foram submetidas ao ensaio de análise granulométrica por peneiramento segundo a norma NBR 7181/2016. A seguir, a Figura 18 ilustra a distribuição das massas retidas em cada peneira após a realização do ensaio.

Figura 18 - Análise granulométrica das misturas solo-resíduo. a) Granulometria da mistura SR25; b) Granulometria da mistura SR50; c) Granulometria da mistura SR75.



Fonte: Próprio Autor (2020).

O procedimento do ensaio foi análogo descrito no item 5.2.1.1 e, com base nele, foram construídas as curvas granulométricas para as misturas solo-resíduo para posterior comparação com a curva granulométrica obtida para o solo natural.

5.3.1 Compactação

O ensaio de compactação teve por objetivo principal determinar o teor de umidade ótimo e a massa específica aparente máxima do solo, sendo este feito através das orientações estabelecidas na norma DNIT 164/2013.

Antes de serem ensaiadas, as amostras dos materiais foram previamente secas ao ar, destorroadas e reduzidas até obter-se uma amostra representativa de 6,0 kg passante na peneira de abertura 19 mm. Obtidas, assim, as amostras representativas, o ensaio teve prosseguimento com a adição de água e homogeneização da primeira amostra.

Em seguida, as amostras foram compactadas no molde cilíndrico com disco espaçador em cinco camadas iguais. A compactação foi feita utilizando-se a energia de compactação intermediária, onde se aplicou 26 golpes com o soquete, distribuídos uniformemente sobre a superfície de cada camada. Ao fim da compactação, removeu-se o cilindro complementar do molde, onde o excesso de material foi rasado, de forma que o material compactado fique na altura exata do molde.

Na parte final do processo, pesou-se o material úmido compactado mais o molde para posterior determinação da massa úmida compactada (P_h) por subtração da massa do molde. Aferiu-se também o volume do solo compactado (V). O processo executivo do ensaio está exemplificado de forma resumida na Figura 19.

Figura 19 - Etapas do ensaio de compactação. a) Compactação do corpo de prova na energia intermediária; b) Rasamento do excesso de material; c) Pesagem do conjunto (molde + solo compactado).



Fonte: Próprio Autor (2020).

Repetiram-se os procedimentos descritos acima para teores crescentes de umidade até obter-se os pontos necessários para construção da curva de compactação. Foram usadas

amostras não trabalhadas para a execução do ensaio, sendo coletadas em cada corpo de prova, duas amostras do material para determinação do teor de umidade.

O produto final do ensaio foi à curva de compactação para cada composição das misturas estudadas onde foram marcadas, em ordenadas, as massas específicas aparentes (γ_s), obtidas de acordo com a Equação 06, e, em abscissas, os teores de umidade correspondente (h), obtidos de acordo com a Equação 01.

$$\gamma_s = \frac{P_h}{V} \times \frac{100}{100 + h} \quad (\text{Equação 06})$$

5.3.2 Índice de Suporte Califórnia (ISC ou CBR)

Através do ensaio de ISC temos indicações da expansividade do solo sob um pavimento quando este estiver saturado, além de fornecer indicações sobre a perda de resistência do solo com a saturação. O ensaio foi realizado no solo natural e nas misturas solo-resíduo seguindo as recomendações da metodologia de ensaio DNIT 172/2016.

O ensaio foi dividido em três etapas, em que a primeira etapa se consistiu na moldagem dos corpos de provas, utilizando-se a energia Proctor intermediária e adotando-se a umidade ótima obtida no ensaio de compactação.

Terminadas as moldagens os corpos de prova foram imersos em água por 96 horas (quatro dias), sendo colocada sobre eles uma sobrecarga de pesos anelares com massa superior a 4,536 kg. As leituras do extensômetro foram registradas a cada 24 horas e a expansão, em percentagem, obtida pela Equação 07.

$$\text{Expansão} = \frac{\text{leitura final} - \text{leitura inicial}}{\text{altura inicial do corpo de prova}} \times 100 \quad (\text{Equação 07})$$

Após o período de embebição, os moldes foram retirados da água, deixando-se escoar a água por aproximadamente 15 minutos. Em seguida, teve início a etapa de penetração, última etapa do ensaio, que forneceu os dados sobre a resistência do solo saturado.

Nesta etapa, o corpo de prova dentro do molde cilíndrico foi levado para a prensa onde aplicou-se uma carga de aproximadamente 45N com velocidade de 1,27 mm/min. Foram anotadas as leituras obtidas no extensômetro do anel dinamométrico da prensa para os tempos de 0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 3,0; 4,0; 6,0; 8,0 e 10 minutos. A Figura 20 ilustra as três etapas descritas.

Figura 20 - Etapas do ensaio de ISC. a) Moldagem dos corpos de prova na umidade ótima; b) Imersão na água para cálculo da expansão; c) Aplicação de carga na prensa; d) Corpo de prova após a etapa de penetração.



Fonte: Próprio Autor (2020).

A pressão exercida no corpo de prova foi obtida pelo produto da leitura do extensômetro e a constante do anel dinamométrico e corrigida pela curva pressão x penetração, quando necessário. O ICS para cada corpo de prova, expresso em porcentagem, foi calculado pela Equação 08, adotando-se o maior dos valores obtidos nas penetrações de 0,1 e 0,2 polegadas.

$$\text{ICS} = \frac{\text{pressão calculada ou pressão corrigida}}{\text{pressão padrão}} \times 100 \quad (\text{Equação 08})$$

5. 4 Quarta Etapa: Análise dos Resultados

A análise dos resultados foi nortada pelo objetivo geral deste trabalho que propõe avaliar o comportamento físico-mecânico das misturas solo-resíduo, observando-se a contribuição da substituição parcial do solo natural pelo resíduo. Logo, foi feito um comparativo entre as características físico-mecânicas do solo natural e das misturas solo-resíduo.

Além disso, o estudo ainda visa à aplicação dessas misturas em camadas de base e sub-base de pavimentos flexíveis, por este motivo os resultados obtidos nos ensaios foram

comparados com as exigências mínimas das especificações de serviço DNIT 139/2010 e DNIT 141/2010 para materiais granulares destinados a estas camadas.

Esta pesquisa aborda apenas a viabilidade técnica de uso do resíduo de usinagem de misturas em estabilização de solos para fins de pavimentação, tendo como base os resultados obtidos em laboratório. As características ligadas à viabilidade econômica de uso do resíduo e a potencialidade das misturas solo-resíduo para uso em camadas de base e sub-base serão analisadas em pesquisas posteriores.

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

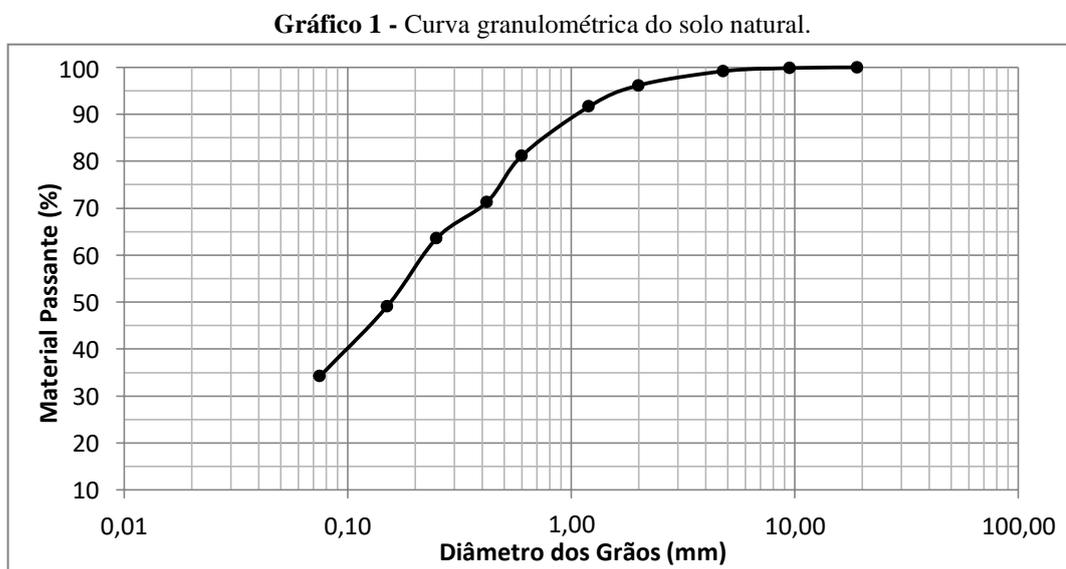
Essa seção tem como objetivo apresentar os resultados obtidos através dos ensaios de caracterização realizados para o solo natural e para as misturas solo-resíduo estudadas, conforme descrito nos procedimentos metodológicos.

Nesse sentido, a apresentação dos resultados e discussão do estudo em tela, se dará em duas etapas. Na parte inicial serão abordados os ensaios de caracterização física e, posteriormente, serão abordados os resultados e análises do comportamento mecânico do solo e das misturas.

6.1 Caracterização física dos materiais e das misturas solo-resíduo

6.1.1 Análise Granulométrica

Com os dados coletados no ensaio de análise granulométrica por peneiramento realizado no solo natural construiu-se uma curva granulométrica para o solo, ilustrada no Gráfico 1 e, que representa a distribuição granulométrica das partículas do solo.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2020).

Observa-se que a curva granulométrica para o solo natural apresenta um formato típico de solos mal graduados, notando-se, ainda, uma composição onde a predominância é de material fino. O Quadro 3 apresenta a composição do solo natural, tendo como base os diâmetros das partículas e a classificação apresentada na NBR 6502/1995.

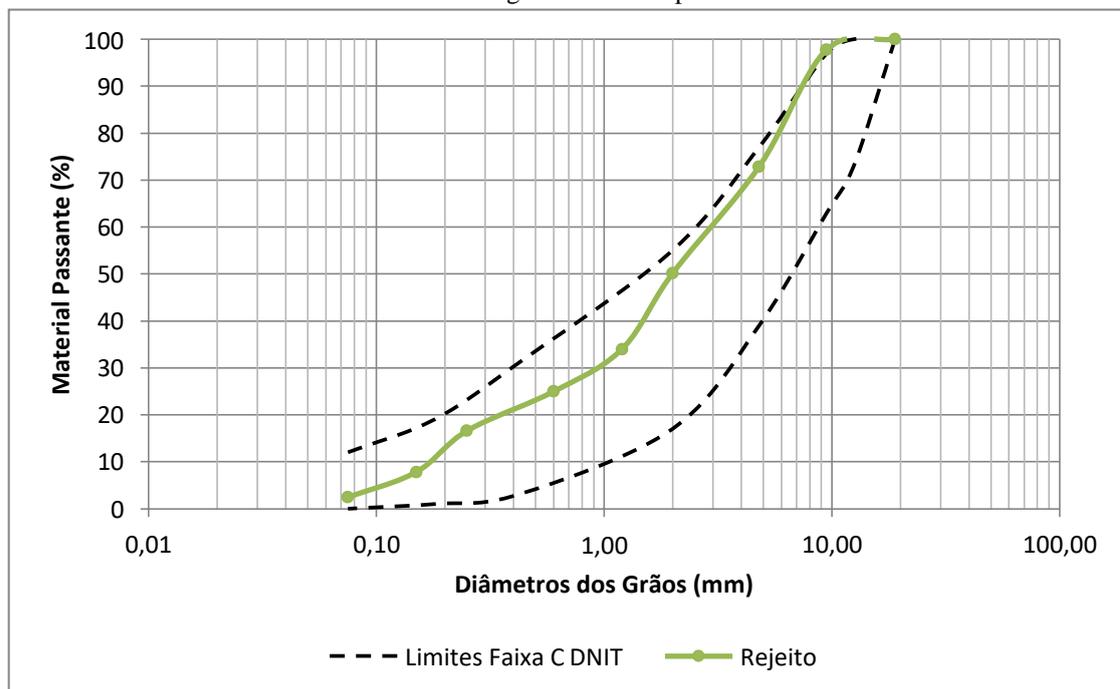
Quadro 3 - Composição granulométrica do solo natural.

Faixa Granulométrica	Porcentagem
Pedregulho ($\phi > 2\text{mm}$)	3,84%
Areia Grossa ($0,60 < \phi < 2\text{mm}$)	14,98%
Areia Média ($0,20 < \phi < 0,60\text{mm}$)	23,68%
Areia Fina ($0,06 < \phi < 0,2\text{mm}$)	23,28%
Finos – Silte + Argila ($\phi < 0,06\text{mm}$)	34,22%

Fonte: Elaborado pelo Autor, 2020.

Ao analisar a composição granulométrica apresentada pelo o solo natural, avalia-se que este não se enquadra nas faixas granulométricas indicadas na especificação de serviço DNIT 141/2010 e, portanto, não pode ser utilizado como material de base de pavimentos.

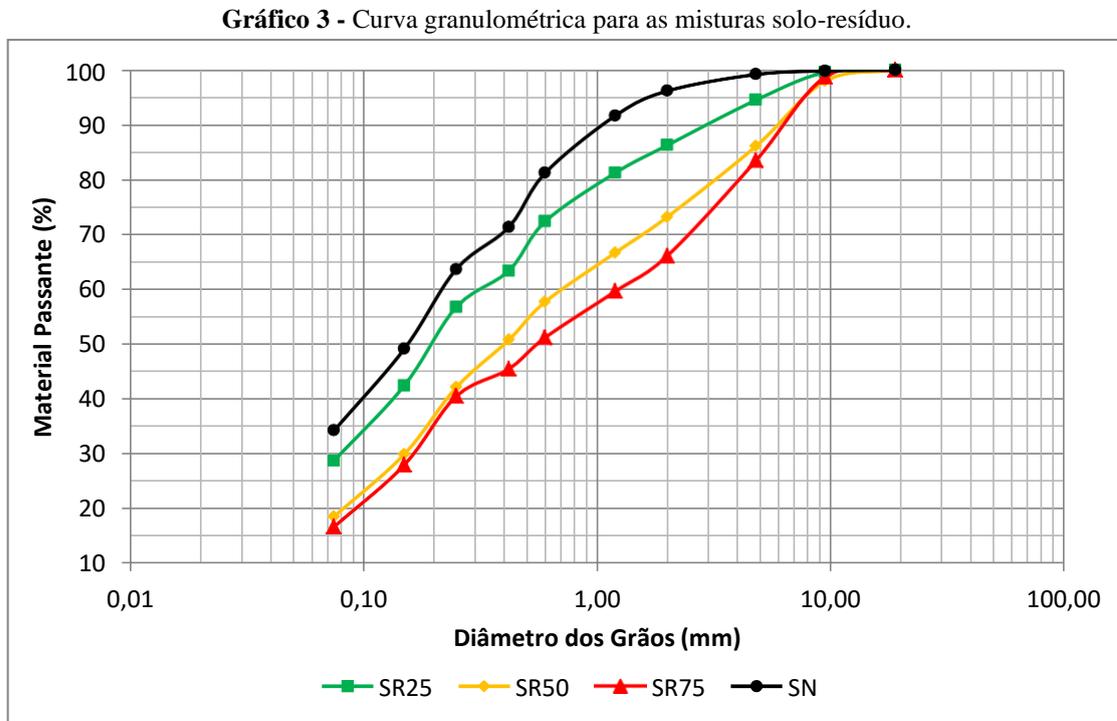
No tocante ao resíduo da usinagem de misturas asfálticas, coletado na usina, teve sua granulométrica analisada e comparada com os requisitos apresentados na especificação de serviço DNIT 031/2014, para os materiais que compõem as misturas de concreto asfáltico. O Gráfico 2 mostra a distribuição granulométrica desse resíduo.

Gráfico 2 - Curva granulométrica para o resíduo.

Fonte: Elaborado pelo Autor (2020).

Conforme mostrado no gráfico a mistura do resíduo apresenta uma distribuição granulométrica dos agregados que possivelmente seja compatível com os limites da faixa C especificado pelo DNIT. Esta faixa é usada para a usinagem de misturas asfálticas aplicadas em camadas de rolamento, atividade principal da usina onde foi coletado o resíduo.

Foram realizados ensaios de análise granulométrica, também, para as misturas solo-resíduo. Os resultados, expostos no Gráfico 3, mostram uma alteração no comportamento da curva granulométrica para cada variação no teor de resíduo misturado ao solo.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2020).

Observa-se que na medida em que o resíduo é adicionado ao solo a curva granulométrica tende a apresentar um formato típico de curva de solos não uniformes (bem graduados). Este fenômeno acontece em função da adição do componente estabilizante ao solo, corrigindo a sua granulometria.

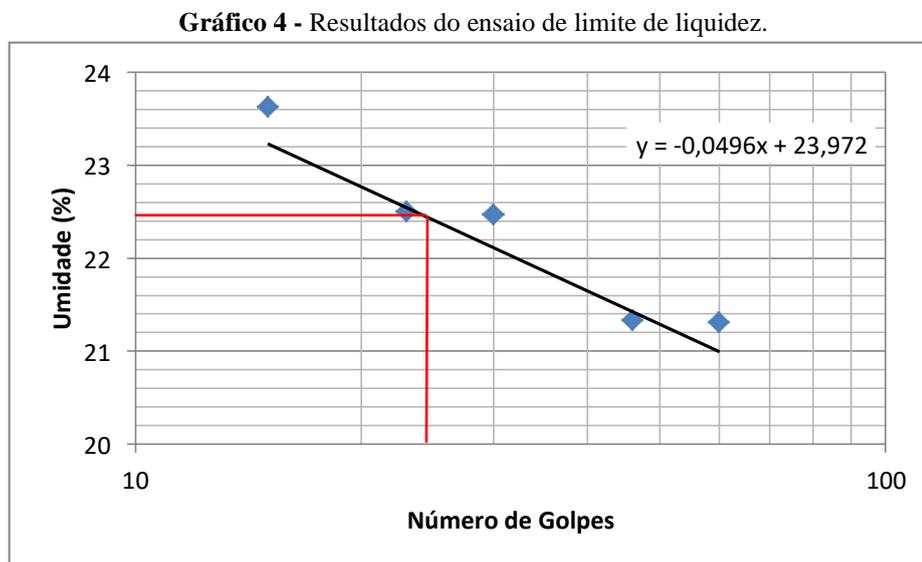
Comparando-se a curva do solo natural com a curva da mistura SR25, observa-se que estas apresentam formato semelhante, com a predominância de partículas finas na mistura. No que tange as curvas das misturas SR50 e SR75 tendem a um formato contínuo indicando que as misturas tendem a uma graduação medianamente uniforme.

Dentro dos critérios apresentados na especificação de serviço DNIT 141/2010, para camada de base estabilizada granulometricamente e, dentre as misturas analisadas, a mistura SR25 não satisfaz nenhuma das faixas granulométricas especificadas. Por sua vez, a mistura SR50 encaixa-se nas faixas E e F que são utilizadas em pavimentos com volume de tráfego $N \leq 5 \times 10^6$. A mistura SR75, além de estar dentro das faixas E e F, também atendeu os critérios da faixa D, recomendada para pavimentos com volume de tráfego $N > 5 \times 10^6$.

6.1.2 Limites de Atterberg para o Solo

Os ensaios que englobam os limites de Atterberg, são os ensaios de limite de liquidez e limite de plasticidade. Os chamados limites de consistência, considerados de extrema importância na caracterização do solo, pois a fração fina tem enorme relevância no comportamento do solo.

No que diz respeito ao limite de liquidez, o Gráfico 4 mostra o produto deste ensaio. Nele observamos a relação entre o teor de umidade do solo e o número de golpes no aparelho de Casagrande representada no sistema de eixos ortogonais.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2020).

Ao analisarmos a curva de fluidez acima obtemos o valor de 23% para o limite de liquidez, sendo este valor correspondente ao teor de umidade para 25 golpes no aparelho de Casagrande.

Ainda dentro do grupo dos limites de Atterberg, os valores do limite de plasticidade podem ser observados na Tabela 3. Os valores de umidade para as três amostras não diferiram em mais de 5% da respectiva média e, portanto, são aceitáveis.

Tabela 3 - Resultados do ensaio de limite de plasticidade para o solo natural.

	Limite de Plasticidade (%)	Limite de Plasticidade Médio (%)
1	14,29	
2	14,97	14,40
3	13,95	

Fonte: Elaborada pelo Autor, 2020.

Obtidos os valores dos limites de liquidez e plasticidade, calculou-se o índice de plasticidade do solo estudado com base na Equação 02. Desta forma, o solo apresentou um IP de 8,60%, podendo ser classificado, de acordo com a Tabela 2, como medianamente plástico.

Mesmo apresentando limite de liquidez inferior a 25%, o solo apresenta um índice de plasticidade maior que 6%, não atendendo as especificações da norma DNIT 141/2010. Logo, além de não atender os requisitos de granulometria, o solo não pode ser usado como camada de base, também, por não atender ao limite do índice de plasticidade.

6.1.3 Densidade Real do Solo

A densidade real ou relativa de um solo considera apenas o volume dos grãos que compõe a amostra, desprezando-se o conceito dos espaços vazios existentes entre os grãos. Os solos apresentam os mais variados valores de densidade real, pois este valor está inteiramente relacionado com os minerais presentes no solo.

Os resultados deste ensaio para o solo estudado estão contidos na Tabela 4 abaixo e foram aceitos, pois houve uma diferença entre eles menor que 0,009, conforme determina a norma. Os valores de D_t e D_{20} foram calculados de acordo com as equações 03 e 04, respectivamente.

Tabela 4 - Resultado do ensaio de densidade real para o solo natural.

Amostra	Dt (t = 23 °C)	Média	D20
1	2,535	2,531	2,529
2	2,527		

Fonte: Elaborada pelo Autor, 2020.

Diante do resultado exposto, observa-se que o solo natural apresentou uma densidade real de 2,53 g/cm³. Este valor está entre o intervalo de valores mais comuns de densidade para os principais minerais que constituem o solo como argilominerais (2,00 a 2,65 g/cm³), quartzo e feldspato (2,50 a 2,60 g/cm³), bem como próximo ao valor médio da densidade de partículas de 2,65 g/cm³ (SILVA, 2013).

6.1.4 Classificação do Solo

Diante dos resultados dos ensaios obtidos o solo natural foi classificado segundo a metodologia do sistema HRB/AASHTO. Por se tratar de um solo com menos de 35% do material passante na peneira nº 200, com LL de 23% e IP de 8,60% do solo pertence ao grupo A-2 e classificado no subgrupo A-2-4. Dentro deste grupo estão os solos que contém grande variedade de materiais granulares e materiais silte-argilosos.

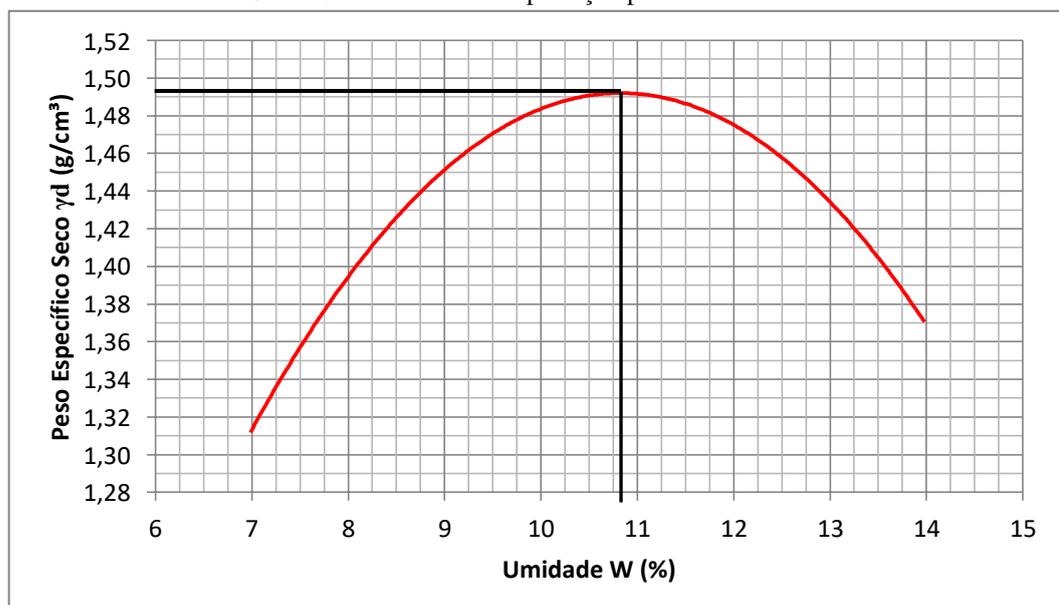
Quanto a “capacidade de suporte” do solo o IG foi obtido através da Equação 05, sendo este igual a 0. Solos com $IG=0$, em geral, possuem boa capacidade de suporte, por isso dentro desta classificação este solo apresenta um comportamento geral entre excelente e bom para ser usado como subleito de pavimentos. Tendo em vista que, a especificação de serviço DNIT 139/2010 estabelece que os materiais usados em sub-bases estabilizadas granulometricamente devem possuir IG igual a zero.

6.2 Caracterização mecânica do solo natural e das misturas solo-resíduo

6.2.1 Compactação

Com os dados obtidos no ensaio, desenhou-se a curva de compactação para o solo natural, que consiste na representação gráfica do peso específico seco do solo em função da umidade, como mostrado no Gráfico 5.

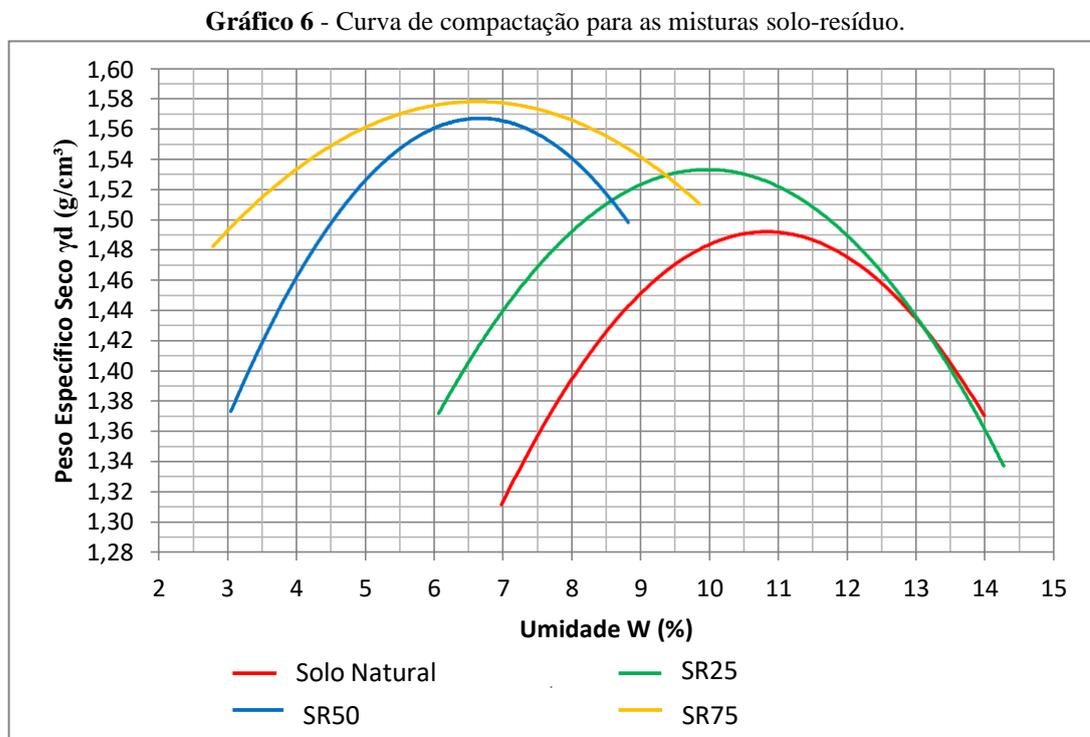
Gráfico 5 - Curva de compactação para o solo natural.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2020).

O solo natural apresentou uma umidade ótima (Wot) de 10,84% e um peso específico seco máximo (γ_d máx.) de 1,49 g/cm³. Estes valores são representados graficamente no pico da curva que divide o ramo seco e o ramo úmido. Nesta umidade, o solo apresenta o melhor valor de peso específico seco ao ser compactado, pois, na prática, é expelida uma maior quantidade de ar dos vazios, tendo-se, então um maior agrupamento dos grãos.

Também foram realizados ensaios de compactação para as amostras das misturas solo-resíduo SR25, SR50 e SR75. Abaixo o Gráfico 6 apresenta as curvas de compactação das três misturas e a curva de compactação do solo natural, a fim de que seja comparado o comportamento desta após a adição do resíduo ao solo.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2020).

Nesse caso, observou-se que, à medida que é adicionado resíduo ao solo, menor é a quantidade de água inserida na mistura para que esta atinja a umidade ótima de compactação. Este fato é evidenciado de forma gráfica com o deslocamento para a esquerda das curvas de compactação das misturas em relação a curva do solo natural.

De forma análoga, à medida que foi inserido o resíduo no solo ocorreu um deslocamento das curvas das misturas para cima, indicando que estas apresentam peso específico seco máximo maior que o solo natural. A Tabela 5 apresenta os valores de umidade ótima e peso seco máximo para as misturas solo-resíduo.

Tabela 5 - Umidade ótima e peso específico seco máximo das misturas solo-resíduo

Mistura	Umidade ótima - Wot (%)	Peso Específico Seco Máximo - γ_d máx. (g/cm ³)
SN	10,84	1,49
SR25	9,98	1,53
SR50	6,65	1,57
SR75	6,64	1,62

Fonte: Elaborado pelo Autor, 2020.

A mistura SR25 apresentou um teor de umidade ótima próximo do solo natural, enquanto as misturas SR50 e SR75 necessitam de uma menor quantidade de água para atingir a umidade ótima. Além da redução dos teores de umidade, a adição do rejeito no solo provocou um aumento no peso específico seco máximo. Isso está diretamente ligado a composição granular das misturas solo-rejeito, que apresentaram uma uniformidade menor. A melhora na granulometria do material permite que os espaços vazios deixados pelos grãos de maior diâmetro sejam preenchidos pelos grãos finos, tornando a mistura mais compacta.

6.2.1 Índice de Suporte Califórnia (ISC)

Os resultados desse ensaio são provenientes dos corpos de prova moldados na umidade ótima obtida no ensaio de compactação com a energia de compactação Proctor intermediária. O Quadro 4 apresenta os resultados para a primeira parte do ensaio para o solo e as misturas, que consiste na verificação da expansão do material em condições de saturação.

Quadro 4 - Resultados da expansão do solo natural e das misturas.

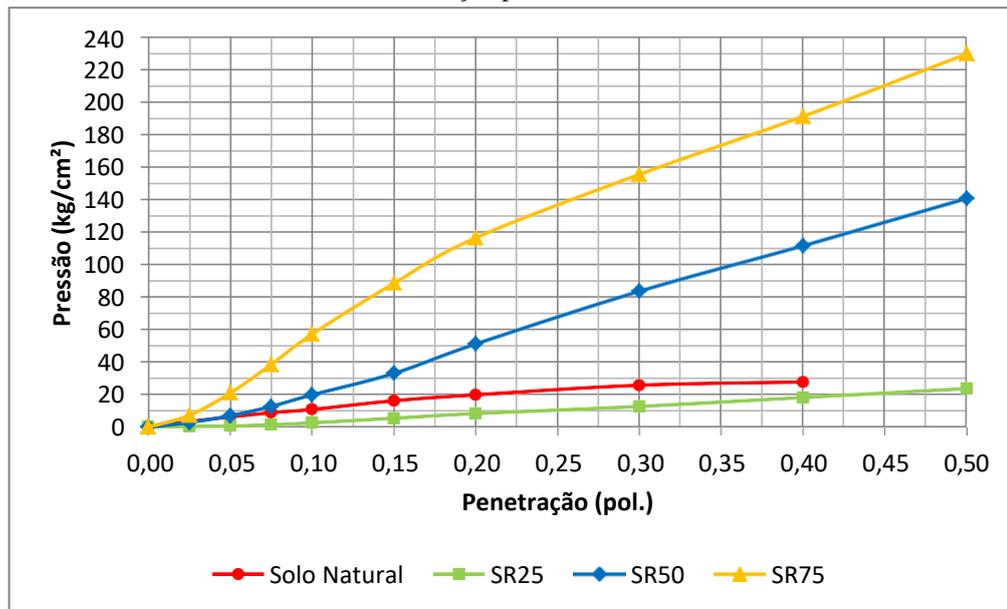
Mistura	Expansão (%)
Solo Natural	0,494
SR25	0,440
SR50	0,155
SR75	0,013

Fonte: Elaborado pelo Autor, 2020.

Diante dos resultados expostos, observa-se que o solo natural apresentou uma baixa expansão, dentro do limite para ser usado como camada de base ou sub-base. A mistura SR25 apresentou uma redução mínima na expansão. No entanto, as misturas SR50 e SR75 tiveram reduções significativas de 68,62% para a primeira, chegando até a aproximadamente 97% para a mistura SR75. Os valores de expansão para as misturas estudadas se enquadram nos requisitos normativos para uso em camadas de base e sub-base.

Com relação ao ensaio de penetração, as misturas apresentaram comportamento diferente a medida que adicionava-se resíduo ao solo natural. O Gráfico 7 mostra a curva obtida nesta etapa do ensaio, correlacionado a pressão calculada e a penetração no corpo de prova.

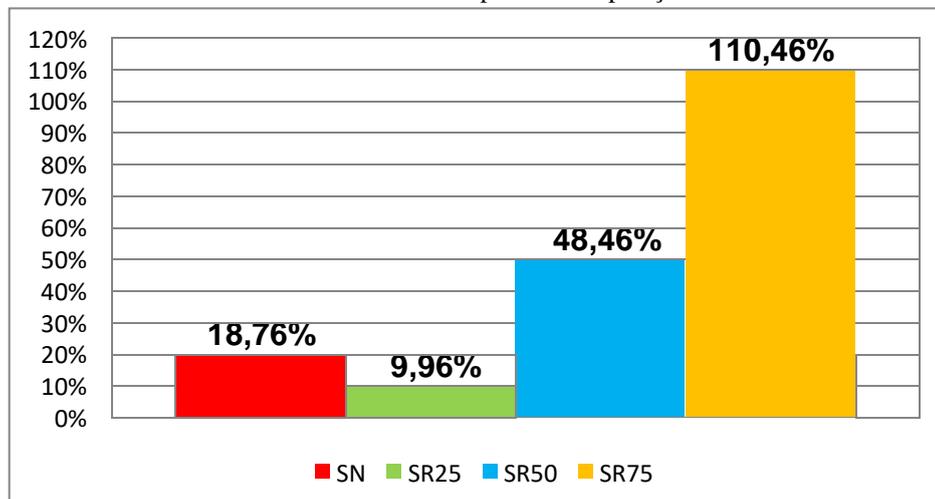
Gráfico 7 - Curva Pressão x Penetração para o solo natural e as misturas estudadas.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2020).

Com base nestas curvas foram feitas as correções nas pressões, quando necessário. Além disso, observa-se que a adição de 50% e 75% de resíduo ao solo elevou a sua capacidade de suporte. Este fato fica evidenciado quando analisamos os valores de Índice de Suporte Califórnia para o solo natural e para as misturas estudadas, mostrados no Gráfico 8.

Gráfico 8 - Resultados do ICS para as composições estudadas.



Fonte: Elaborado pelo Autor, 2020.

Os resultados apontam que o solo natural apresentou um valor de ISC abaixo do valor mínimo exigido pelo DNIT nas especificações 139/2010 e 141/2010, que traçam as diretrizes de caracterização dos materiais utilizados em sub-base e base de pavimentos flexíveis. Porém o solo natural apresenta condições suficientes para o seu aproveitamento como subleito do pavimento.

Notou-se que a mistura S25 apresentou uma expansão menor que o solo natural, porém a capacidade de suporte desta mistura na condição de saturação é menor que o solo natural. É provável que a grande quantidade de solo natural nessa mistura tenha gerado um teor de umidade ótimo maior do que o esperado para a mistura. Essa saturação extra leva a diminuição da resistência da amostra estabilizada.

Com relação às misturas SR50 e SR75, observou-se uma melhora significativa nos valores de ISC quando comparadas com o solo natural. Este fato está correlacionado com a melhora na graduação do material, pois o contato entre os grãos de maior diâmetro e o preenchimento dos vazios pelo material fino confere ao solo uma maior capacidade de suporte.

Analisando o uso das misturas em camadas de base e sub-base e, com base nas especificações do DNIT supracitadas, a mistura SR50 apresenta ICS maior que 20% podendo ser utilizada como material de sub-base, entretanto não tem capacidade de suporte suficiente para ser utilizada em camadas de sub-base em pavimentos flexíveis.

Ainda dentro deste contexto, a mistura SR75 apresentou bons resultados no ensaio de ISC, podendo ser usada tanto em camadas de sub-base como em camadas de base de pavimentos flexíveis. Embora a mistura SR25 tenha apresentado uma redução no valor de ISC, os valores deste índice para as misturas SR50 e SR75 evidenciam a contribuição positiva para a capacidade de suporte do solo com a adição do resíduo.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Diante dos resultados dos ensaios mencionados ao longo desta pesquisa, conclui-se que o estudo realizado trouxe contribuições significativas sobre a alternativa de reinserção do resíduo da usinagem de misturas asfálticas no próprio ciclo produtivo dos pavimentos flexíveis. Tendo como foco o emprego deste resíduo em camadas granulares do pavimento.

Ao analisar apenas as características físicas o solo natural, percebeu-se que ele está dentro das especificações para ser usado como material de sub-base. No entanto, não atende as especificações granulométricas e de índice de plasticidade para ser utilizado como material de base em pavimentos flexíveis.

Quanto a caracterização mecânica, o ensaio de compactação evidenciou uma modificação na curva de compactação do solo conforme a percentagem de resíduo adicionada aumentava. A diminuição da umidade ótima com a adição do resíduo ao solo e, conseqüentemente, a diminuição no uso de água, apontam para a otimização do empreendimento no que diz respeito a custos, desempenho e sustentabilidade.

Apesar de está dentro das especificações de caracterização física e de apresentar expansão dentro dos parâmetros para ser usado em camadas de sub-base, o solo natural não apresentou ISC suficiente para ser usado nesta camada. Em relação a camada de base, o solo natural está dentro do limite aceito para expansão, mas, não atende ao critério do ISC.

Os resultados obtidos nos ensaios realizados com a mistura SR50 mostram a viabilidade de uso desta mistura como camada de sub-base de pavimentos flexíveis. Quanto a mistura SR75, os ensaios de granulometria, expansão e ISC apontam para o potencial de uso da mistura em camadas de sub-base e base, tanto para volume de tráfego inferior a 5×10^6 quanto para pavimentos com volume de tráfego $N > 5 \times 10^6$.

No entanto, a possibilidade de uso da mistura SR75 em camadas de base nas obras de pavimentação de rodovias com grande volume de tráfego deve ser analisada com maiores detalhes e cautela. Tendo em vista que, em consequência as altas cargas aplicadas no pavimento às camadas necessitam ser mais espessas, por isso, é necessário estudar o volume disponível do resíduo aplicado ao solo nesta pesquisa.

Além disso, a mistura SR75 apresentou bons resultados quando compactada na energia Proctor intermediária, porém, para as camadas de base, a energia de compactação recomendada é a Proctor modificada. Nesse caso, a tendência é que, quando compactada nesta energia, a mistura SR75 apresente índices ainda melhores, confirmando a sua potencialidade de utilização em camadas de base.

Portanto, é possível concluir que a adição do resíduo da usinagem de misturas asfálticas contribuiu significativamente para o melhoramento das características físico-mecânicas do solo natural. Este fato, demonstra a viabilidade de uso das misturas solo-resíduo para emprego em camadas de base e sub-base de pavimentos flexíveis. Os resultados da pesquisa ainda apontam para a reinserção do resíduo no ciclo construtivo do pavimento como uma possível alternativa sustentável e economicamente viável para construção de pavimentos flexíveis.

7.1 Sugestões para futuras pesquisas

A título de complementação. A pesquisa realizada revelou que pontos importantes precisam ser abordados para ampliar a discussão em relação à estabilização de solos com resíduo da usinagem de misturas asfálticas para fins de pavimentação. Por isso, como sugestão para trabalhos futuros recomenda-se:

- Caracterizar as amostras por meio de ensaios de caráter físico, mecânico, químico e mineralógico, tais como: análise mineralógica, difração de raios-X, análise química, módulo de resiliência, resistência por compressão simples, permeabilidade e durabilidade;
- Verificar as alterações no comportamento físico-mecânico de um solo natural que apresente maior índice de expansão e menor capacidade, após a adição do resíduo;
- Levantamento do volume médio de resíduo gerado no processo de usinagem de misturas asfálticas, para posterior planejamento de utilização e gestão desse resíduo;
- Avaliar novas metodologias de dosagem, no intuito de buscar um traço ótimo para estabilização da mistura;
- Avaliar a viabilidade econômica de uso das misturas em camadas de base e sub-base, levando em consideração o processo de logística reversa do material.

REFERÊNCIAS

- ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6502: Rochas e solos**. Rio de Janeiro, 1995.
- ALMEIDA, G. C. P. de. **Caracterização física e classificação dos solos**. Notas de aula. Universidade Federal de Juiz de Fora, 2004.
- BAPTISTA JR., J. V.; ROMANEL, C. **Sustentabilidade na indústria da construção: uma logística para reciclagem dos resíduos de pequenas obras**. Urbe, Revista Brasileira de Gestão Urbana vol.5 n°2 Curitiba Jul./Dez. 2013.
- BERNUCCI. L. B. et al. **Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros**. Rio de Janeiro: Petrobrás: Abeda, 2006.
- BRASIL. CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. **Resolução CONAMA n° 307**, de 5 de julho de 2002. Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil. Brasília, DF, 5 jul. 2002.
- BRASIL. Lei 12.305, de 2 de agosto de 2010. **Política Nacional de Resíduos Sólidos**. 3. ed., reimpr. Brasília: Câmara dos Deputados, Edições Câmara, 2017. 80p.
- CAPUTO, H. P. **Mecânica dos solos e suas aplicações: Fundamentos**. 6 ed. Rio de Janeiro: LTC, 1988. 248 p.
- CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE – CNT. **Transporte Rodoviário: porque os pavimentos das rodovias do Brasil não duram?**. Brasília: CNT, 2017.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES - DNIT. **Manual de Pavimentação**. 3ª ed. Rio de Janeiro, 2006.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 139/2010-ES: Pavimentação – sub-base estabilizada granulometricamente – especificação de serviço**. Rio de Janeiro. 2010. 8 p.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 141/2010-ES : Pavimentação – base estabilizada granulometricamente – especificação de serviço**. Rio de Janeiro. 2010. 9 p.
- DIAS, D. K. dos R. **Reutilização do Resíduo Cerâmico Oriundo do Polo Oleiro de Iranduba e Manacapuru para Emprego como Elementos Constituinte de Base e Sub-base de Pavimento**. 2016. 166 f. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Amazonas. Manaus/AM, 2016.
- FAGNANI, K. C. et al. **Diagnóstico de uma usina de asfalto visando a implantação de um Sistema de Gestão Ambiental com base na norma ABNT NBR ISO 14001**. Estudos Tecnológicos. São Leopoldo - RS. Vol. 5, n° 2, p. 212-226, mai/ago. 2009.
- FONSECA, J. J. S. **Metodologia da pesquisa científica**. Fortaleza: UEC, 2002. Apostila.

- GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2002.
- GONDIM, L. M. **Estudo Experimental de Misturas Solo-Emulsão Aplicado à Rodovias do Agropólo do Baixo Jaguaribe/Estado do Ceará**. 2008. 213 f. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Ceará. Fortaleza/CE, 2008.
- KARPINSKI, L. A. et al. **Os resíduos da indústria da construção civil e Quantificação da geração de resíduos de construção e demolição**. Dados eletrônicos. Porto Alegre: Edipucrs, 2009.
- MARCONDES, F. C. S.; CARDOSO, F. F. Contribuição para a aplicação do conceito de logística reversa na cadeia de suprimentos da construção civil. In: **IV Simpósio Brasileiro de Gestão e Economia da Construção / I Encontro Latino-americano de Gestão e Economia da Construção: Construção na América Latina: inclusão e modernização (IV SIBRAGEC / I ELAGEC)**. Porto Alegre, 24 a 26 outubro 2005, UFRGS.
- MAZUR, J. **Resíduos sólidos da construção civil e a logística reversa no canteiro de obras vinculados à saúde e segurança do trabalhador**. 2015, 46 f. Monografia de Especialização em Engenharia de Segurança do Trabalho – XXIX Curso de Especialização em Engenharia de Segurança do Trabalho, Departamento Acadêmico de Construção Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná.
- OLIVEIRA, A. G. de. **Estudo das propriedades mecânicas do lodo têxtil para fins de utilização em pavimentos rodoviários**. 2014. 112 f. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande/PB, 2014.
- PEREIRA, K. L. de A. **Estabilização de um solo com cimento e cinza de lodo para uso em pavimentos**. 2012. 125 f. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal/RN, 2012.
- PINTO, G. J. F.; MELO, E. S. R. L. de; NOTARO, K de A. **Geração de Resíduos Sólidos da Construção Civil – Método de Cálculo**. In: VII Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental. Campina Grande/PB, 2016.
- SANTOS, Á. S. dos; LEANDRO, E. de A.. **Estudo da aplicação de asfalto fresado e resíduo de rocha ornamental como base e sub-base de pavimentos**. 2017. 96 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás. Goiânia/GO, 2017.
- SANTOS, M. F., LIMA, D. C., BUENO, B. S. **Estabilização dos solos com cal e betume**. In: 6º Reunião de pavimentação urbana, p.74 – 97, Santos/SP: Abril, 1995.
- SANTOS, N. M. dos. **Uso de rejeito do beneficiamento de granito para substituição parcial de um solo em camadas de pavimentação**. 2019. 76 f. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal/RN, 2019.
- SENÇO, W. de. **Manual de Técnicas de Pavimentação**. 2. ed. São Paulo: Pini, 2007. 1 v.
- SEVERINO, A. J. **Metodologia do trabalho científico**. 23. ed. São Paulo: Cortez, 2007.

- SILVA, R. V. **Quais são as usinas de asfalto?**. 2015. Disponível em <<https://www.linkedin.com/pulse/quais-s%C3%A3o-usinas-de-asfalto-paulo-rog%C3%A9rio-veiga-silva>>. Acesso em 27 de mar. 2020.
- SILVA, B. T. A da. **Utilização de Materiais Alternativos para a Construção de Pavimentos Urbanos na Região Metropolitana de Fortaleza**. 2009. 180 f. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Ceará. Fortaleza/CE, 2009.
- SILVA, A. P. da. **Relações massa volume: atributos físicos e químicos do solo**. Notas de aula. Universidade Federal de Campina Grande, 2013.
- SILVEIRA, L. R.; BORGES, R. A. **Uso de Materiais Alternativos para Melhoria de Solo na Pavimentação de Vias**. vol. 1. 5ª ed. E&S - Engineering and Science, 2016, p. 73-82.
- VILLIBOR, D. F. **Estabilização Granulométrica ou Mecânica**. Gráfica EESC – USP. São Carlos/SP, 1982.
- VIZCARRA, G. O. C. **Aplicabilidade de Cinzas de Resíduo Sólido Urbano para Base de Pavimentos**. 2010. 120 p. Dissertação (Mestrado). Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2010.
- VOGT, J.C. **Estabilização Betuminosa**. In: 7º Simpósio sobre pesquisas rodoviárias. Rio de Janeiro, 1971.