



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

**LUCAS VICTOR SANTOS DO NASCIMENTO**

**ESTABILIZAÇÃO DE SOLO COM EMULSÃO ASFÁLTICA PARA UTILIZAÇÃO  
EM CAMADA DE BASE E SUB-BASE DE PAVIMENTO FLEXÍVEL**

**ARARUNA - PB**

**2020**

**LUCAS VICTOR SANTOS DO NASCIMENTO**

**ESTABILIZAÇÃO DE SOLO COM EMULSÃO ASFÁLTICA PARA UTILIZAÇÃO  
EM CAMADA DE BASE E SUB-BASE DE PAVIMENTO FLEXÍVEL**

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

**Área de concentração:** Pavimentação.

**Orientador:** Prof. Esp. Lauandes Marques de Oliveira.

**ARARUNA - PB**

**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.

N244e Nascimento, Lucas Victor Santos do.  
Estabilização de solo com emulsão asfáltica para utilização em camada de base e sub-base de pavimento flexível [manuscrito] / Lucas Victor Santos do Nascimento. - 2020.  
65 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. Solo-Emulsão. 2. Pavimentação. 3. Comportamento mecânico. 4. Melhoramento de solos. I. Título  
21. ed. CDD 624

**LUCAS VICTOR SANTOS DO NASCIMENTO**


**ESTABILIZAÇÃO DE SOLO COM EMULSÃO ASFÁLTICA PARA UTILIZAÇÃO  
EM CAMADA DE BASE E SUB-BASE DE PAVIMENTO FLEXÍVEL**

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

**Área de concentração:** Pavimentação.


Aprovada em: 11/12/2020.

**BANCA EXAMINADORA**



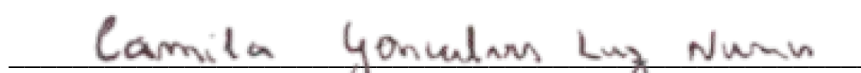
---

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



---

Profa. Ma. Maria das Vitórias do Nascimento  
Universidade Estadual da Paraíba - UEPB



---

Profa. Ma. Camila Gonçalves Luz Nunes  
Faculdades Integradas de Patos (FIP)

A minha mãe, minha vó e meu tio, por todo apoio incondicional. Dedico.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço à Deus por ter me dado determinação, sabedoria e força para superar todas as dificuldades.

A minha mãe, Elismar Gomes dos Santos, meu tio, Marcos André Gomes dos Santos e minha avó e segunda mãe, Josica Gomes dos Santos, agradeço por tudo que sou e por tudo que me dão e deram ao longo desses vinte e três anos, pois foi graças a vocês que eu consegui chegar até aqui.

Ao meu avô, Elías Gomes dos Santos, e minha tia, Idnéia Rodrigues da Silva dos Santos, por acreditarem em meu potencial e me apoiarem sempre, me ajudando neste caminho.

Aos meus irmãos e primos, por estarem comigo sempre e me ajudarem a ter forças para passar por qualquer obstáculo.

Ao meu orientador, Lauandes Marques de Oliveira, pelo incentivo desse trabalho, pelo apoio e pela paciência por todas as perguntas e áudios longos e as professoras Vitória e Camila por terem aceitado fazer parte da minha banca de TCC.

Aos demais parentes, em especial meu pai, Agenilson, e minha tia, Nonata, por todo o apoio e ajuda.

Aos meus amigos, Agnaldo, André, Glenda, Luana, Luiz e Sales, pelas alegrias, brincadeiras e bebedeiras, que me ajudaram a superar a vida acadêmica.

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

As minhas amigas, Monyke, Bárbara e Beatriz, que mesmo longe, sempre estiveram comigo, me apoiando e aconselhando.

A todos os meus amigos que estiveram junto comigo nesta caminhada, durante os bons e maus momentos, em especial, Ana Cristina e Heloyse, que sempre me ajudavam quando podiam, muito obrigado pela amizade fiel e verdadeira, que vou levar por toda minha vida.

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

“O sucesso é ir de fracasso em fracasso sem  
perder o entusiasmo.”

Desconhecido

## RESUMO

O Brasil possui uma rede bem extensa de estradas, que muitas vezes se encontram em um estado ruim ou péssimo. Nos últimos anos, o aumento do fluxo de veículos nessas estradas, tem agravado cada vez mais essa situação. Para que esses veículos trafeguem com segurança e conforto, é necessário que as rodovias estejam no mínimo boas. Porém, para que se construa uma rodovia que atenda a essas condições e que tenha uma longa vida útil, é necessário que não apenas o pavimento, mas que também as camadas que o sustenta, estejam em boa qualidade. Para que essas camadas suportem as cargas do tráfego, é necessário que as mesmas sejam formadas por matérias com ótimas propriedades mecânicas. Entretanto, muitas vezes, os solos encontrados na região, não atendem as especificações procuradas e o transporte de materiais de boa qualidade torna-se uma alternativa inviável. Por isso, optar pelo melhoramento e utilização do solo local, reduz consideravelmente os custos. A motivação central desse trabalho é ajudar na busca de alternativas e técnicas, que possibilitem o emprego desses materiais disponíveis na região, ajudando assim, na melhoria da pavimentação e da trafegabilidade das estradas. Para que esse solo possa ser utilizado na pavimentação, ele precisa ser estabilizado, melhorando assim, suas propriedades. A estabilização de solos por meio da utilização de emulsão asfáltica é uma das alternativas mais antigas, porém pouco estudada, e por isso é o objetivo central desse trabalho. Até hoje, não existe uma norma brasileira que prescreva um procedimento laboratorial para essa técnica, nem mesmo há muitos trabalhos publicados sobre a mesma. Por conta disso, este trabalho buscou estabilizar um solo encontrado na cidade de Araruna, através da utilização de emulsão asfáltica, e apresentar os resultados obtidos dessa mistura. Foi realizado ensaios básicos de caracterização do solo e da emulsão asfáltica, e ensaios de compactação e CBR, testando três porcentagens de emulsão, 4%, 8% e 12%, para a mistura solo-emulsão. Onde foi possível concluir que o emprego de pequenas quantidades de emulsão, em solos finos, aumenta a impermeabilidade do mesmo, o que resulta na diminuição da sua expansão. E que o emprego de grandes quantidades de emulsão resulta na diminuição da resistência dos solos finos, pois ocorre a diminuição do atrito entre os grãos, além de atrapalhar a compactação da mistura, pois existe água na emulsão, que afeta a quantidade de água da mistura.

**Palavras Chave:** Solo-Emulsão. Pavimentação. Comportamento mecânico. Melhoramento de solos.



## ABSTRACT

Brazil has a very extensive network of roads, which are often in a bad or bad state. In recent years, the increased flow of vehicles on these roads has increasingly aggravated this situation. For these vehicles to travel safely and comfortably, it is necessary that the highways are at least good. However, in the course of building a highway that meets these conditions and has a long service life, it is necessary that not only the pavement, but also the layers that sustain it, are in good quality. For these layers to withstand traffic loads, they must be formed by materials with optimal mechanical properties. However, many times, the soils found in the region do not meet the specifications sought and the transport of good quality materials becomes an unfeasible alternative. Therefore, opting for local land improvement and use considerably reduces costs. The central motivation of this work is to help in the search for alternatives and techniques, which enable the use of these materials available in the region, thus helping to improve the paving and traffic of the roads. For this soil to be used in paving, it needs to be stabilized, thus improving its properties. Soil stabilization through the use of asphalt emulsion is one of the oldest but little studied alternatives, and is therefore the central objective of this work. To date, there is no Brazilian standard that prescribes a laboratory procedure for this technique, nor is there even many published studies on it. Because of this, this work sought to stabilize a soil found in the city of Araruna, through the use of asphalt emulsion, and to present the results obtained from this mixture. Basic soil and asphalt emulsion characterization tests were performed, and compaction and CBR assays were performed, testing three emulsion percentages, 4%, 8% and 12%, for the soil-emulsion mixture. Where it was possible to conclude that the use of small amounts of emulsion in fine soils increases its impermeability, which results in the reduction of its expansion. And that the use of large amounts of emulsion results in decreased resistance of fine soils, because there is a decrease in friction between the grains, besides hindering the compaction of the mixture, because there is water in the emulsion, which affects the amount of water in the mixture.

**Keywords:** Soil-emulsion. Paving. Mechanical behavior. Soil improvement.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 01 – Índice ABCR de fluxo de veículos - Brasil – 2008 a 1019.....	15
Figura 02 – Sistema de classificação de solos HRB segundo a AASHTO.....	22
Figura 03 – Processo de fabricação de emulsões asfálticas. a) Esquema representativo de uma emulsão asfáltica catiónica; b) Esquema do processo industrial de fabricação de emulsão asfáltica – fase aquosa acidificada com emulsificantes aminados; c) Representação esquemática de um moinho coloidal de preparação dos glóbulos de asfalto para fabricação de emulsão...	25
Figura 04 – Tanques de armazenamento de emulsão asfáltica.....	26
Figura 05 – Representação esquemática da ruptura da emulsão catiónica ao entrar em contato com o agregado. a) A emulsão entra em contato com o agregado; b) Adsorção do agente emulsificante livre e atração das partículas de asfalto; c) Formação do filme de asfalto sobre o agregado.....	27
Figura 06 – Representação esquemática da ruptura da emulsão catiónica ao entrar em contato com o agregado. a) A emulsão entra em contato com o agregado; b) Adsorção do agente emulsificante livre e atração das partículas de asfalto; c) Formação do filme de asfalto sobre o agregado.....	35
Figura 07 – Ensaio de Limite de Liquidez. a) Preparação da amostra; b) Concha preenchida com a amostra; c) Abertura da ranhura de 1 cm; d) Fechamento da ranhura após os golpes.....	40
Figura 08 – Ensaio de Limite de Plasticidade. a) Preparação da amostra; b) Modelagem e moldagem a amostra; c) Detalhe do rolamento da amostra no vidro esmerilhada.....	41
Figura 09 – Ensaio de Peneiramento. a) Série de peneiras; b) Peneiramento manual; c) Material retido em cada peneira; d) Detalhe do material retido nas peneiras maiores.....	42

Figura 10 –	Ensaio de carga de partícula. a) Eletrodos ligados e mergulhados na emulsão; b) Eletrodos desligados e retirados da emulsão; c) Lavagem dos eletrodos com água destilada.....	44
Figura 11 –	Ensaio de resíduo seco. a) Aquecimento da emulsão à 50 °C; b) Peneiramento da emulsão; c) Pesagem do conjunto; d) Pesagem do conjunto + amostra; e) Aquecimento da amostra para obter o resíduo seco; d) Pesagem do conjunto + resíduo seco.....	46
Figura 12 –	Ensaio de sedimentação. a) Proveta contendo a emulsão para ser deixada em repouso por 5 dias; b) Ensaio de resíduo seco da amostra retirada do topo; c) Ensaio de resíduo seco da amostra retirada do fundo.....	48
Figura 13 –	Ensaio de compactação. a) Destorroamento da amostra; b) Corpo de prova compactado; c) Remoção do cilindro complementar; d) Remoção do excesso de solo; e) Extração do corpo de prova; f) Detalhe do corpo de prova extraído.....	50
Figura 14 –	Ensaio de CBR. a) Adição das sobrecargas sobre o corpo de prova compactado; b) Corpo de prova imerso em água; c) Instalação do corpo de prova na prensa; d) Início da penetração do corpo de prova; e) Corpo de prova após a penetração.....	51

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 –	Resumo dos tipos de material e betume para estabilização.....	33
Quadro 2 –	Resultados do ensaio de Densidade Real.....	51
Quadro 3 –	Resultados do ensaio de Limite de Plasticidade.....	52
Quadro 4 –	Resultados do teor de resíduo seco.....	54
Quadro 5 –	Resultados do ensaio de sedimentação.....	54
Quadro 6 –	Amostras analisadas.....	55
Quadro 7 –	Resultados da Compactação.....	57
Quadro 8 –	Resultados dos ensaios de Expansão e CBR.....	58
Quadro 9 –	Limites de expansão e CBR.....	58

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 01 – Resultados do ensaio de Limite de Liquidez.....	52
Gráfico 02 – Curva granulométrica.....	53
Gráfico 03 – Compactação – Solo Natural.....	56
Gráfico 04 – Compactação – Solo-Emulsão I (4% emulsão).....	57
Gráfico 05 – Compactação – Solo-Emulsão II (8% emulsão).....	57
Gráfico 06 – Compactação – Solo-Emulsão III (12% emulsão).....	58

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AASHTO	<i>American Association of State Highway and Transportation Officials</i>
ABCR	Associação Brasileira de Concessionárias de Rodovias
ABNT	Associação Brasileira de Norma Técnicas
ABEDA	Associação Brasileira das Empresas Distribuidoras de Asfaltos
AEMA	Asphalt Emulsion Manufactures Association
CAP	Cimento Asfáltico de Petróleo
CBR	<i>Califórnia Bearing Ratio</i> (Índice Suporte Califórnia)
CNT	Confederação Nacional de Transporte
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento de Infraestrutura de Transportes
EAP	Emulsão Asfáltica de Petróleo
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
HRB	<i>Highway Research Board</i>
IP	Índice de plasticidade
ISC	Índice Suporte Califórnia
LA	Lama Asfáltica
LL	Limite de Liquidez
LP	Limite de Plasticidade
ME	Método de Ensaio
RC	Ruptura Controlada
RL	Ruptura Lenta
RM	Ruptura Média
RR	Ruptura Rápida
SINMETRC	Sistema Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial
TCPAV	Tecnologia Construção e Pavimentação

## SUMÁRIO

<b>1.</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>15</b>
<b>2.</b>	<b>JUSTIFICATIVA .....</b>	<b>17</b>
<b>3.</b>	<b>OBJETIVOS .....</b>	<b>18</b>
<b>3.1</b>	<b>Objetivo Geral .....</b>	<b>18</b>
<b>3.2</b>	<b>Objetivos Específicos .....</b>	<b>18</b>
<b>4.</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>	<b>19</b>
<b>4.1</b>	<b>Caracterização física e mecânica dos solos .....</b>	<b>19</b>
<b>4.2</b>	<b>Ensaio de caracterização do solo .....</b>	<b>19</b>
<b>4.2.1</b>	<b><i>Densidade Real .....</i></b>	<b><i>19</i></b>
<b>4.2.2</b>	<b><i>Limites de Atterberg.....</i></b>	<b><i>20</i></b>
<b>4.2.2.1</b>	<b><i>Limite de Liquidez .....</i></b>	<b><i>20</i></b>
<b>4.2.2.2</b>	<b><i>Limite de Plasticidade .....</i></b>	<b><i>20</i></b>
<b>4.2.2.3</b>	<b><i>Índice de Plasticidade .....</i></b>	<b><i>20</i></b>
<b>4.2.3</b>	<b><i>Análise Granulométrica .....</i></b>	<b><i>20</i></b>
<b>4.2.4</b>	<b><i>Compactação do solo e Índice de Suporte Califórnia (ISC ou CBR).....</i></b>	<b><i>21</i></b>
<b>4.2.5</b>	<b><i>Classificação dos solos .....</i></b>	<b><i>21</i></b>
<b>4.3</b>	<b>Emulsão asfáltica .....</b>	<b>23</b>
<b>4.3.1</b>	<b><i>Processo de fabricação da emulsão asfáltica .....</i></b>	<b><i>24</i></b>
<b>4.3.2</b>	<b><i>Ruptura .....</i></b>	<b><i>26</i></b>
<b>4.3.3</b>	<b><i>Classificação .....</i></b>	<b><i>28</i></b>
<b>4.3.4</b>	<b><i>Ensaio de caracterização da emulsão asfáltica .....</i></b>	<b><i>28</i></b>
<b>4.3.4.1</b>	<b><i>Ensaio de carga de partícula .....</i></b>	<b><i>28</i></b>
<b>4.3.4.2</b>	<b><i>Ensaio de ruptura com cimento.....</i></b>	<b><i>29</i></b>
<b>4.3.4.3</b>	<b><i>Ensaio de viscosidade.....</i></b>	<b><i>29</i></b>
<b>4.3.4.4</b>	<b><i>Ensaio de sedimentação .....</i></b>	<b><i>29</i></b>
<b>4.3.4.5</b>	<b><i>Ensaio de resíduo por evaporação .....</i></b>	<b><i>29</i></b>
<b>4.3.4.6</b>	<b><i>Ensaio de peneiração .....</i></b>	<b><i>30</i></b>
<b>4.3.4.7</b>	<b><i>Ensaio de desemulsibilidade .....</i></b>	<b><i>30</i></b>
<b>4.3.4.8</b>	<b><i>Ensaio de determinação de resíduo por destilação .....</i></b>	<b><i>30</i></b>
<b>4.3.4.9</b>	<b><i>Ensaio de determinação do pH .....</i></b>	<b><i>30</i></b>
<b>4.4</b>	<b>Estabilização de solos .....</b>	<b>31</b>
<b>4.4.1</b>	<b><i>Estabilização Mecânica.....</i></b>	<b><i>31</i></b>
<b>4.4.1.1</b>	<b><i>Compactação.....</i></b>	<b><i>31</i></b>
<b>4.4.2</b>	<b><i>Estabilização Química.....</i></b>	<b><i>32</i></b>

4.4.3	<i>Estabilização Asfáltica</i> .....	33
4.5	<b>Dosagem Solo-Emulsão</b> .....	33
5.	<b>METODOLOGIA</b> .....	35
5.1	<b>Coleta das amostras</b> .....	35
5.2	<b>Ensaio laboratoriais - Caracterização do solo natural</b> .....	36
5.2.1	<i>Densidade Real</i> .....	37
5.2.2	<i>Limites de Atterberg</i> .....	38
5.2.3	<i>Análise Granulométrica</i> .....	41
5.3	<b>Ensaio de caracterização da emulsão</b> .....	43
5.3.1	<i>Ensaio de carga de partícula</i> .....	43
5.3.2	<i>Ensaio de teor de resíduo seco</i> .....	44
5.3.3	<i>Ensaio de Sedimentação</i> .....	46
5.4	<b>Mistura Solo-emulsão</b> .....	48
5.5	<b>Ensaio Mecânicos - Compactação e CBR</b> .....	49
6	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	52
6.1	<b>Caracterização do solo</b> .....	52
6.1.1	<i>Densidade real</i> .....	52
6.1.2	<i>Limites de Attenberg</i> .....	52
6.1.3	<i>Granulometria</i> .....	53
6.1.4	<i>Classificação do solo</i> .....	54
6.2	<b>Caracterização da Emulsão Asfáltica</b> .....	54
6.2.1	<i>Carga de partícula</i> .....	54
6.2.2	<i>Teor de resíduo seco</i> .....	54
6.2.3	<i>Sedimentação</i> .....	55
6.3	<b>Dosagem Solo-emulsão</b> .....	55
6.4	<b>Compactação</b> .....	56
6.5	<b>Expansão e CBR</b> .....	59
7	<b>CONCLUSÃO</b> .....	61
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	62



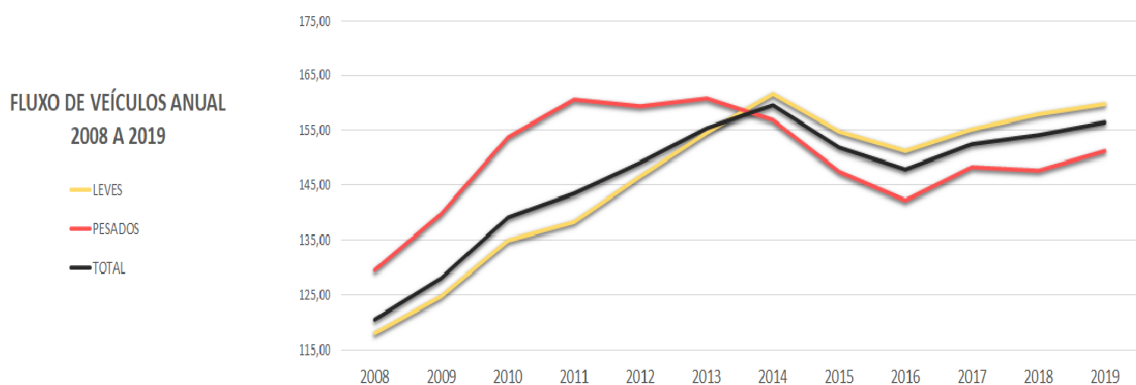
## 1. INTRODUÇÃO

O crescimento econômico está correlacionado aos sistemas de transportes, isso é, a qualidade e o desempenho da infraestrutura dos transportes estão ligados diretamente, de maneira positiva, a economia do país. Isso se dá porque todo produto produzido pelo país, seja produtos consumíveis, máquinas, materiais ou equipamentos, necessitam dos transportes para chegarem ao seu destino, nacional ou internacional. Como o modal de transportes mais utilizado no Brasil é o rodoviário, é extremamente importante, que as rodovias estejam em boas condições.

Por isso, é necessário que os pavimentos das rodovias, gerem conforto e segurança para os usuários. Porém, a pesquisa feita pela CNT sobre rodovias em 2019, constatou que 59% da malha rodoviária brasileira pesquisada apresenta um estado de conservação inadequado (Regular, ruim ou péssimo). Em 2018, esse dado era de 57%. Ou seja, a situação está piorando.

Esta mesma pesquisa aponta que 52,4% dos pavimentos estão com problemas devido ao grande aumento no tráfego de veículos que vem ocorrendo nos últimos anos, como pode ser observado na figura 01. Por conta disso há um aumento das cargas atuantes sobre o pavimento e conseqüentemente, os processos de deterioração vão se acentuando cada vez mais. Para controlar essa deterioração e aumentar a vida útil do pavimento, os métodos e tecnologias da execução de obras rodoviárias vêm desenvolvendo-se e aprimorando-se constantemente.

**Figura 01:** Índice ABCR de fluxo de veículos - Brasil – 2008 a 2019. (Base 100 = 1999).



**Fonte:** ABCR, 2019.

Para garantir a qualidade das rodovias, é preciso pensar não somente na camada de rolamento, mas também em toda a estrutura das mesmas: revestimento, base, sub-base, subleito e reforço do subleito. A quantidade de camadas, suas espessuras e os materiais que irão compor

cada uma, são definidos depois de uma análise feita no solo existente na área de construção e a disponibilidade de materiais para pavimentação na região.

Segundo Cristelo (2001), à medida que os padrões de qualidade na construção aumentam, é necessário cada vez mais, pavimentos melhores e com uma longa vida útil. Como, em alguns casos, os materiais que atendem as especificações exigidas à qualidade, apenas são encontrados em locais dos quais torna-se economicamente inviável o seu transporte, faz-se necessário a utilização dos materiais que se encontram no local da obra, implicando no melhoramento de suas propriedades mecânicas.

A engenharia vem utilizando-se das diversas formas de estabilização para a melhoria dos solos, sendo as mais conhecidas: a mecânica, a química e a física. Embora a estabilização mecânica seja normalmente utilizada em todos os tipos de obras, como construção civil, recursos hídricos e rodoviárias, isso não impede a utilização de outras formas de estabilização junto com a mesma para garantir melhores resultados.

Segundo Sampaio (2008), a compactação, um tipo de estabilização mecânica, é comumente utilizada em todos os tipos de obras rodoviárias. Ela pode ser utilizada sozinha ou em conjunto com a estabilização química e física. As químicas mais utilizadas são: com cimento Portland, com cal, com cinzas volantes e com emulsão asfáltica.

A estabilização química com emulsão asfáltica é uma medida para melhorar as propriedades de um solo com o intuito de que ele atinja resistência e estabilidade para suportar as cargas de tráfego, as forças de compressão como as de abrasão dos pneus. Além disso, a mistura solo-emulsão pode favorecer uma maior impermeabilização da camada, o que reduz os problemas com drenagem e o aumento da saturação do solo por conta da água, impedindo a perda de resistência do mesmo.

Com isto, este estudo tem como objetivo caracterizar um solo coletado em Araruna - PB e uma emulsão disponibilizada pela TCPAV através de ensaios laboratoriais. Estabilizar esse solo coletado com a emulsão gerando o que se chama de SOLO-EMULSÃO verificando assim a viabilidade da utilização da mistura como camadas de base e sub-base para pavimentos do tipo flexível.

## 2. JUSTIFICATIVA

A elaboração desse trabalho justifica-se por conta da carência de pesquisas nacionais sobre estabilização de solos através do uso da mistura solo-emulsão e a inexistência de um método de dosagem e especificações de serviço para esta mistura.

Existem pesquisas nacionais que tratam da estabilização de solos através do uso de produtos químicos como, cal, cimento, argila calcinada, entre outros. Entretanto, no caso da emulsão asfáltica, quando comparadas aos demais, aparece em menor número.

Embora seja uma técnica tratada no Brasil desde os anos 60 e 70 em trabalhos técnicos e relatos de obra, ainda são poucos os trabalhos científicos e acadêmicos que especifiquem a caracterização de solos estabilizados com emulsão asfáltica. Isso causa uma escassez de informações sobre a mistura solo-emulsão e a inexistência de métodos nacionais de dosagem.

Portanto, é necessário fazer pesquisas e estudos sobre a estabilização de solos com emulsão asfáltica, afim de buscar mais conhecimentos sobre o assunto e aprimorar as técnicas utilizadas atualmente. E utilizar esses conhecimentos e aprimoramentos para desenvolver uma norma de dosagem da mistura solo-emulsão.

Este trabalho tem o intuito de especificar os resultados obtidos na caracterização da mistura solo-emulsão visando colaborar para o emprego de um método nacional de dosagem e inspirar novas pesquisas sobre o assunto que possam servir de base para uma norma de dosagem e especificações de serviço.

### **3. OBJETIVOS**

#### **3.1 Objetivo Geral**

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

#### **3.2 Objetivos Específicos**

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

## **4. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

### **4.1 Caracterização física e mecânica dos solos**

O solo é um dos materiais mais antigos utilizados na engenharia civil. Ele serve de base para diversos tipos de estruturas, desde a construção civil até a pavimentação. Trata-se de um material derivado do intemperismo das rochas, que ao sofrerem ações externas, como chuvas, ventos, entre outros, vão se desgastando e se decompondo.

Sartori (2015), afirma que o solo é um dos materiais mais antigos utilizados na construção civil e se faz presente na maioria das obras de engenharia. Por conta disso que se faz necessário conhecer suas propriedades, pois isso permite fazer uma previsão de seu futuro comportamento diante das solicitações. Como por exemplo, determinar se um solo tem capacidade para servir como base de suporte para alguma estrutura de fundação.

Segundo Oliveira (2019), é importante determinar as propriedades dos solos, para classifica-los de acordo com suas características, permitindo assim, prever como aquele solo irá se comportar e com isso, dar uma aplicação adequada para o mesmo, assegurando uma maior margem de segurança no seu emprego.

Assim, é possível prever como um determinado solo irá se comportar, ao serem colocadas cargas sobre ele ou mesmo o que a água causará ao se infiltrar no mesmo. Esses e outros problemas, ocorrem frequentemente, por isso é importante saber as características do solo antes de usá-lo numa estrutura.

Existem vários sistemas ou trabalhos sobre como classificar um solo. Todas elas são em função da definição das características do solo, a partir de ensaios laboratoriais regulamentados por normas técnicas que prescrevem todo o procedimento necessário para sua execução.

### **4.2 Ensaios de caracterização do solo**

#### ***4.2.1 Densidade Real***

Trata-se da relação entre o peso específico das partículas sólidas e o peso de água pura com o mesmo volume que as partículas sólidas. Ao determina-la é possível definir várias propriedades dos solos, como por exemplo: drenagem, porosidade, permeabilidade, grau de saturação, e etc. Quanto maior for sua densidade, maior será a compactação e porosidade do

solo. A norma DNER-ME 093/94, prescreve o método para determinação da densidade real do solo.

#### ***4.2.2 Limites de Atterberg***

Os limites de Atterberg, ou Limites de Consistência, são métodos que avaliam a natureza dos solos. Eles permitem definir o Índice de Plasticidade (IP) do solo, a partir da determinação do Limite de Liquidez (LL) e do Limite de Plasticidade (LP) do mesmo.

##### ***4.2.2.1 Limite de Liquidez***

Segundo a norma DNER-ME 122/94, que prescreve a determinação do Limite de Liquidez, utilizando o aparelho normatizado (Casagrande), é o teor de umidade que limita os estados líquido e plástico do solo.

##### ***4.2.2.2 Limite de Plasticidade***

Limite de Plasticidade é o teor de umidade que limita os estados plásticos e semissólido do solo. A norma DNER-ME 082/94, apresenta o procedimento para determinação do LP de solos e prescreve a aparelhagem, a execução e condições para obtenção do resultado.

##### ***4.2.2.3 Índice de Plasticidade***

Ele é utilizado para a classificação de um solo. A norma DNER-ME 082/94 o apresenta como a diferença numérica entre o limite de liquidez e o limite de plasticidade. Quanto maior o IP, mais plástico será o solo e mais compressível.

#### ***4.2.3 Análise Granulométrica***

A análise granulométrica consiste na determinação das dimensões dos grãos presentes no solo. Segundo a EMBRAPA (2017), ela visa à quantificação da distribuição, por tamanho das partículas individuais de minerais do solo. A separação das frações é feita por peneiramento e sedimentação.

O procedimento para determinação da composição granulométrica de agregados graúdos e miúdos, por peneiramento, é normatizado pela DNER-ME 083/98. A norma DNER-ME 051/94 apresenta o procedimento para a determinação granulométrica por sedimentação.

#### ***4.2.4 Compactação do solo e Índice de Suporte Califórnia (ISC ou CBR)***

Compactação do solo é um rearranjo das frações sólidas e porosas do mesmo. Através dela, o volume de vazios no solo é diminuído, sem alterar significativamente sua quantidade de água, ocorrendo então, um aumento da quantidade de partículas sólidas por unidade de volume, ou seja, ocorre um aumento da densidade do solo. Ela é normatizada pela DNIT 164/2013-ME, para amostras não trabalhadas, que estabelece um método para determinar a correlação entre o teor de umidade e a massa específica aparente do solo seco.

CBR é um ensaio que consiste em determinar a resistência do solo compactado, sua capacidade de suporte, em comparação a uma brita padrão. A DNIT 172/2016-ME fixa os procedimentos para determinação desse índice, utilizando amostras deformadas e não trabalhadas, e para o cálculo da expansividade da amostra, quando imersa em água.

#### ***4.2.5 Classificação dos solos***

Segundo o DNIT (2006), para que o solo possa ser utilizado como fundação ou material de construção, o mesmo deve ser classificado de modo que possibilite formular métodos de projetos baseados nas suas propriedades. Pensando nisso, foram criados diversos sistemas de classificação, cada qual se adequando a uma utilização dos solos ou a métodos de projeto.

O sistema de classificação Highway Research Board (HRB), também conhecido como classificação HRB-AASHO, é um dos sistemas mais utilizados no Brasil e no mundo. Ele baseia-se na granulometria, nos limites de liquidez e plasticidade e no índice de grupo. A figura 02 contém o quadro da classificação HRB-AASHO.

**Figura 02:** Sistema de classificação de solos HRB segundo a AASHTO.

Classificação Geral	Materiais granulares (35% ou menos passando na peneira nº 200)						Materiais siltosos e argilosos (mais de 35% passando na peneira 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
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	0		0	0	4 máx.		8 máx.	12 máx.	16 máx.	20 máx.	
Materiais que predominam	Pedra Britada pedregulho e areia		Areia fina	Areia e areia silosa ou argilosa			Solos Siltosos		Solos argilosos		
Comportamento geral como subleito	Excelente a bom						Fraco a pobre				

Fonte: DNIT, 2006.

Segundo o DNIT (2006), os grupos e subgrupos são definidos como:

- Grupo A-1: inclui materiais constituídos de mistura bem graduada de fragmentos de pedra ou pedregulhos, areia grossa, areia fina e um aglutinante de solo não plástico ou fracamente plástico.
  - ↳ Subgrupo A-1-a: contém materiais contendo, principalmente, fragmentos de pedra ou pedregulho, com ou sem material fino bem graduado, funcionando como aglutinante.
  - ↳ Subgrupo A-1-b: contém materiais contendo, principalmente, areia grossa, com ou sem aglutinante de solo bem graduado.
- Grupo A-2: inclui grande variedades de materiais que se encontram entre os grupos A-1 e A-3 e materiais constituídos de mistura silte-argila dos grupos A-4, A-5, A-6 e A-7.
  - ↳ Subgrupos A-2-4 e A-2-5: contém materiais cujo o passante na peneira nº 200, seja menor ou igual a 35%, possuindo características dos grupos A-4 ou A-5. Estes grupos incluem materiais como pedregulho e areia grossa, que não se encaixam no Grupo A-1, e ainda, areia fina com silte não plástico excedendo os limites do Grupo A-3.
  - ↳ Subgrupos A-2-6 e A-2-7: contém solos semelhantes aos descritos nos subgrupos A-2-4 e A-2-5, a exceção é feita por conta da porção de finos que contem argila plástica com características dos grupos A-6 ou A-7.
- Grupo A-3: esse grupo inclui, areia fina de praia ou de deserto, sem silte ou argila, ou possuindo pequena quantidade de silte não plástico. Também contém misturas de areia fina mal graduada e quantidades limitadas de areia grossa e pedregulho depositados pelas correntes.



- Grupo A-4: este grupo inclui, solos siltosos não plásticos, ou moderadamente plástico, contendo, normalmente, 5% ou mais passando na peneira n° 200. Também contém solos finos siltosos com até 64% de areia e pedregulho retidos na peneira n° 200.
- Grupo A-5: inclui solos semelhantes aos descritos no A-4, com exceção de serem, geralmente, altamente elásticos, conforme indica seu elevado limite de liquidez.
- Grupo A-6: inclui solos argilosos plásticos, contendo, geralmente, 75% ou mais de material passante na peneira n° 200. Contem também misturas de solos finos argilosos, podendo conter até 64% de areia e pedregulho retidos na peneira n° 200.
- Grupo A-7: inclui material semelhante ao descrito no grupo A-6, contendo o alto limite de liquidez do grupo A-5, podendo ainda ser elástico e estar sujeito a elevada mudança de volume.
  - ↳ Subgrupo A-7-5: contém materiais com índice de plasticidade moderado em relação ao limite de liquidez, podendo ser altamente elástico e sujeito a elevadas mudanças de volume.
  - ↳ Subgrupo A-7-6: contém materiais com elevados índices de plasticidade em relação aos limites de liquidez, estando sujeitos a elevadas mudanças de volume.

### 4.3 Emulsão asfáltica

Uma emulsão é definida como a mistura de dois ou mais líquidos imiscíveis, ou seja, que não se misturam. Ela também recebe o nome de dispersão coloidal, já que em um líquido existem pequenas partículas de outro líquido dispersas no mesmo. “Uma emulsão é definida como uma dispersão estável de dois ou mais líquidos imiscíveis. No caso da emulsão asfáltica (EAP) os dois líquidos são o asfalto e a água” (BERNUCCI et al., 2010, p.81).

Por ser formada por líquidos imiscíveis, ela é termodinamicamente instável, ou seja, não se forma espontaneamente. Sendo necessário aplicar algum tipo de energia para que isso ocorra. Normalmente utiliza-se a mecânica, como a agitação. Porém, por conta da sua instabilidade e dependendo da sua finalidade, na maioria das vezes, faz-se necessário a utilização de um agente emulsificante para evitar que a emulsão volte ao seu estado original. Esse agente tem a função de retardar a separação das fases dos líquidos que constituem a mistura.

Sant'Ana (2009, p.60) faz a seguinte definição:

A emulsão asfáltica é um material constituído por duas fases, uma fase de material betuminoso, o CAP, dispersa em outra fase aquosa, a água, por meio de facilitadores químicos, como agentes emulsificantes, e de dispositivos mecânicos como os moinhos coloidais. O produto resultante apresenta estabilidade limitada cuja duração é função de vários fatores como armazenamento, temperatura, contato com outros materiais, tipo e proporção dos materiais constituintes.

O agente emulsionante ou emulsificante é um produto especial que reduz a tensão superficial, permitindo que os glóbulos de asfalto permaneçam suspensos na água por determinado tempo, evitando assim, a aproximação entre as partículas e sua posterior coalescência. O tempo de consolidação da separação entre os glóbulos de asfalto, dependendo da formulação da emulsão, pode durar de semanas até meses (BERNUCCI et al., 2010).

Segundo ABEDA (2010), esse agente confere cargas elétricas, que podem ser positivas (Catiônica) ou negativas (Aniônica), servindo como base para a classificação das emulsões quanto à sua carga de partícula. Além dele, outros componentes podem ser adicionados durante a fabricação e/ou aplicação das emulsões para atender a fins específicos.

Geralmente, as emulsões asfálticas, são compostas de 40% a 75% de CAP, 0,1% a 2,5% de emulsificante, 25% a 60% de água, 0 a 10% de solvente e ainda, em percentual bem reduzido, de outros componentes. De um modo genérico, elas são vistas como um líquido marrom de consistência variada, conforme a porcentagem de betume e o tamanho das partículas. No Brasil, de acordo com as normas vigentes de utilização de emulsões na pavimentação, o percentual mínimo de CAP é 60% (JAMES, 2006).

No Brasil, as emulsões asfálticas utilizadas na pavimentação são, predominantemente, do tipo catiônicas por conta do seu melhor desempenho quanto à compatibilidade com a maioria dos agregados minerais (ABEDA, 2010).

#### ***4.3.1 Processo de fabricação da emulsão asfáltica***

No processo de produção ou emulsificação, segundo a ABEDA (2010), é preciso promover a “quebra” do cimento asfáltico (CAP) em partículas minúsculas e que o mesmo fique disperso no meio aquoso. É necessário a aplicação de energia térmica e mecânica, utilizando o moinho coloidal, para que ocorra o cisalhamento do CAP e obtenha-se uma emulsão de asfalto em água.

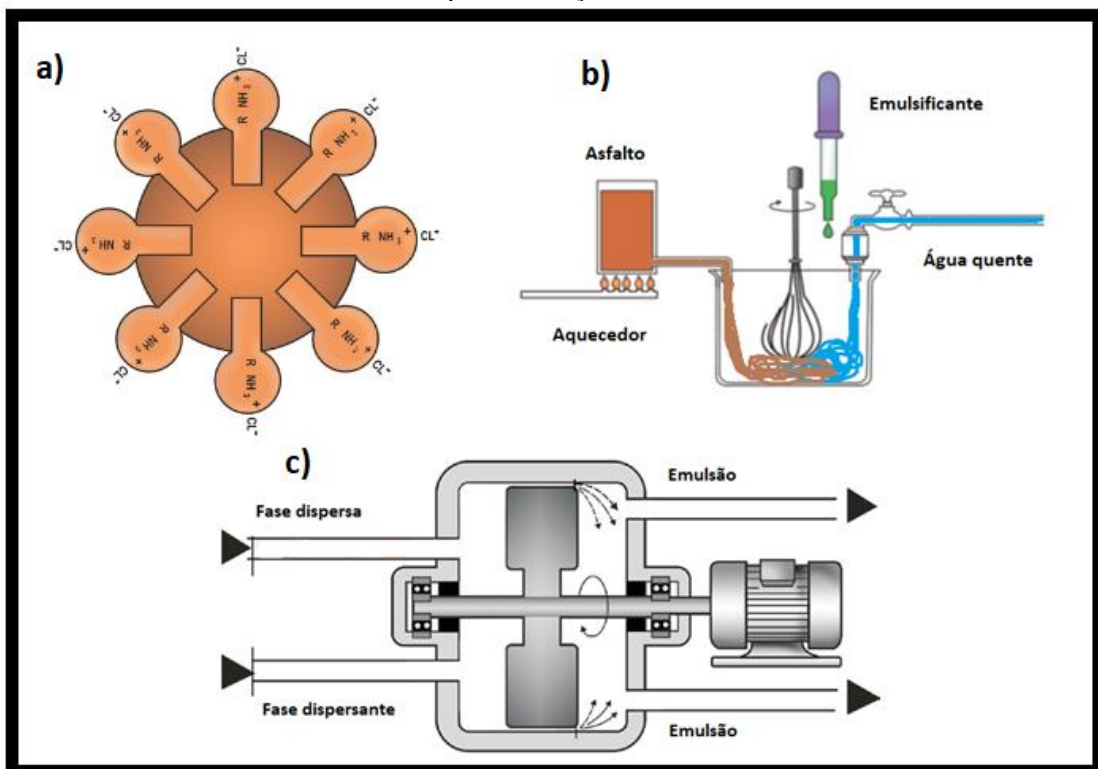
Segundo Bernucci et al. (2010, p.81):

A ação mecânica de obtenção dos glóbulos é feita em um moinho coloidal especialmente preparado para a “quebra” do asfalto aquecido em porções minúsculas que devem ter um tamanho especificado que é micrométrico. O tamanho dos glóbulos depende do moinho empregado e da viscosidade do asfalto original, normalmente variando entre 1 e 20 $\mu$ m.

De acordo com a AEMA (2004), o asfalto, previamente aquecido até uma viscosidade baixa, é adicionado no moinho coloidal, onde é dividido em partes minúsculas. Ao mesmo tempo, a água contendo o agente emulsificante é inserida no mesmo, à uma temperatura ajustada para que ocorra a emulsificação.

Essas temperaturas são ajustadas porque, para facilitar a entrada do asfalto no moinho é necessário que o mesmo seja aquecido até encontrar um ponto de equilíbrio entre as fases betuminosa e aquosa. Entretanto, não pode aquecer demais, devido ao fato de que a emulsão produzida deve sair a uma temperatura abaixo do ponto de ebulição da água (AEMA, 2004; Sant’Ana, 2009). O processo de fabricação de emulsões asfálticas e um exemplo do tipo de moinho coloidal utilizado no mesmo, pode ser visto na figura 03.

**Figura 03:** Processo de fabricação de emulsões asfálticas. a) Esquema representativo de uma emulsão asfáltica catiónica; b) Esquema do processo industrial de fabricação de emulsão asfáltica – fase aquosa acidificada com emulsificantes aminados; c) Representação esquemática de um moinho coloidal de preparação dos glóbulos de asfalto para fabricação de emulsão.



Fonte: Adaptado - LCPC, 1976.

Após o final da produção, a emulsão é colocada em tanques de armazenamento a granel. Esses tanques podem ser equipados com aquecedores para manter a mesma à uma temperatura que melhore sua trabalhabilidade e ainda conter agitadores mecânicos para mantê-la uniformemente misturada. Um exemplo desses tanques de armazenamento pode ser visto na figura 04.

**Figura 04:** Tanques de armazenamento de emulsão asfáltica.



**Fonte:** Próprio Autor, 2020.

#### **4.3.2 Ruptura**

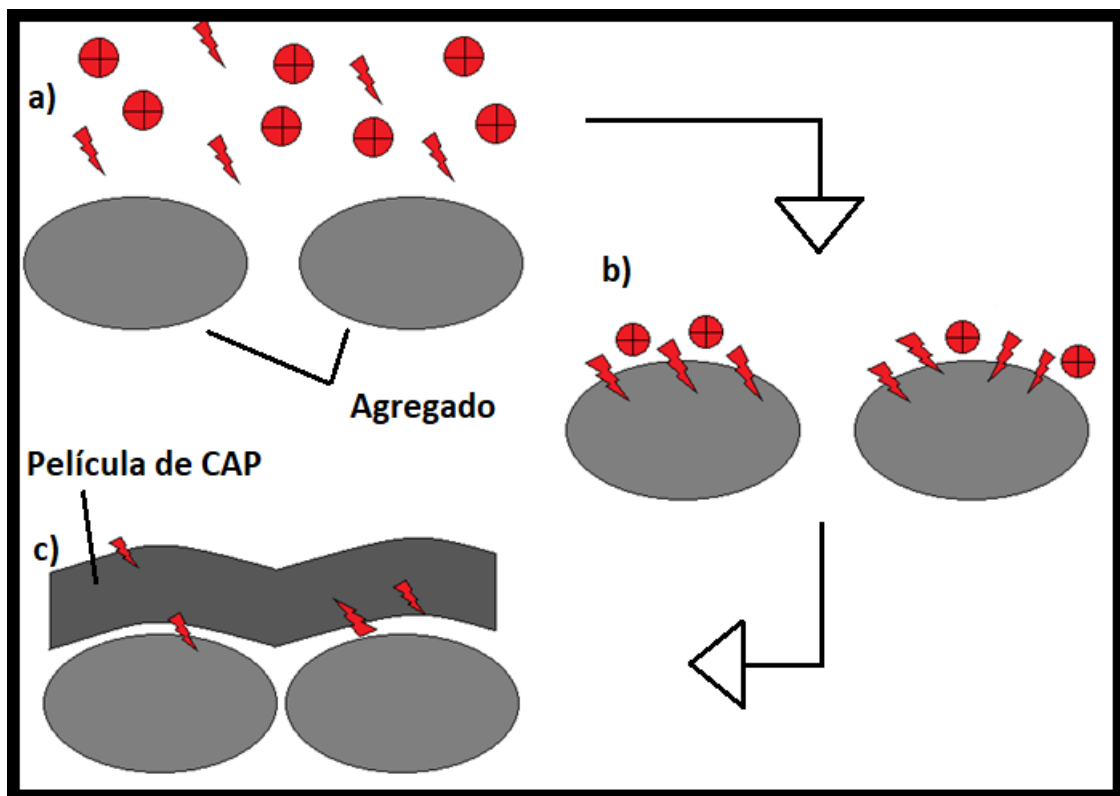
Denomina-se ruptura ou quebra, o processo que ocorre numa emulsão asfáltica, quando a mesma perde a sua estabilidade e começa a ter uma separação das suas fases, betuminosa e aquosa. Segundo Jacintho (2010), ela pode surgir por evaporação d'água, por um desequilíbrio eletroquímico ou pela ação do agregado. Bernucci et al. (2010), ressalta, que isso resulta na reconstituição do asfalto residual, que deve ser semelhante ao original utilizado na emulsificação.

Segundo ABEDA (2010), a velocidade em que ocorre esse processo depende: do tipo de emulsão, reatividade/superfície específica dos agregados, teor de umidade dos mesmos, das temperaturas dos materiais e ambiente e da ação mecânica de compactação.

Para emulsões de ruptura rápida ou média, o fenômeno inicial das partículas de emulsão asfáltica no agregado se desenvolve por meio de fenômenos eletroquímicos, provocados por aumento da acidez ou alcalinidade. Para as emulsões de ruptura lenta, o mecanismo é a evaporação da água (AEMA, 2004; JACINTHO, 2010).

De acordo com AEMA (2004), no tratamento de superfícies e vedações, as emulsões são fabricadas para que ao entrar em contato com alguma substância estranha, como agregados ou uma superfície de pavimento, ela se quebre quimicamente, ocasionando na separação da água e da fase asfáltica. Isso resulta, segundo Bernucci et al. (2010), na eventual evaporação da água de dispersão e por conta disso, ocorre uma adsorção do asfalto pelo material pétreo, formando-se uma película de CAP sobre o mesmo. Na figura 05, representa-se, de forma esquemática, o efeito de ruptura de uma emulsão sistemática quando entra em contato com o agregado

**Figura 05:** Representação esquemática da ruptura da emulsão catiônica ao entrar em contato com o agregado. a) A emulsão entra em contato com o agregado; b) Adsorção do agente emulsificante livre e atração das partículas de asfalto; c) Formação do filme de asfalto sobre o agregado.



Fonte: Adaptado - ABEDA, 2010.

Assim, a ruptura pode ser definida como a quebra da estabilidade química do sistema, CAP, emulsificante e água. Ao entrar em contato com um agregado, a emulsão se “quebra”. Assim, a água se evapora, o emulsificante é absorvido pelo agregado e o CAP é atraído pelo agregado formando uma película sobre o mesmo. Por isso, geralmente utiliza-se emulsões catiônicas (positivas) no Brasil, para facilitar a junção do CAP com o solo, já que o solo geralmente contém carga negativa.

### **4.3.3 Classificação**

As emulsões asfálticas são classificadas de acordo com a carga do glóbulo de asfalto e pela sua velocidade de ruptura. No primeiro caso, elas podem ser catiônicas (quando possuem carga positiva), aniônicas (quando possuem carga negativa) e não iônicas (quando são neutras). Para o segundo caso, elas podem ser classificadas como de ruptura rápida, média e lenta (James, 2006; Sant'Ana 2009).

Emulsões de ruptura rápida, se rompem rapidamente ao entrar em contato com agregados de pequena área superficial. Já as médias, se rompem mais lentamente comparado a rápida, para que possam se misturar aos agregados de pequena área superficial, como as utilizadas em misturas de graduação aberta. Emulsões de ruptura lenta, se rompem de modo bem mais lento do que as outras citadas, para que se misturem aos agregados reativos de grande superfície (JAMES, 2006).

Segundo o DNIT (2013) e a ABNT NBR 14594 (2017), as emulsões asfálticas podem ser classificadas como:

- 1) RR, RM, RC e RL: ruptura rápida, ruptura média, ruptura controlada e ruptura lenta, respectivamente;
- 2) EAI: emulsão asfáltica para o serviço de imprimação;
- 3) LA e LAN: emulsões asfálticas de ruptura lenta catiônica e de carga neutra, respectivamente, para serviço de lama asfáltica;
- 4) LARC: emulsão asfáltica catiônica de ruptura controlada, para o serviço de lama asfáltica.

Seguidas de uma indicação numérica (1 ou 2), que faz referência a sua viscosidade Saybolt Furol e teor de solvente, e da letra C, que indica que se trata de uma emulsão de origem catiônica.

### **4.3.4 Ensaios de caracterização da emulsão asfáltica**

#### **4.3.4.1 Ensaio de carga de partícula**

É o ensaio que determina se a emulsão está carregada positivamente ou negativamente, respectivamente, classificadas como, catiônicas ou aniônicas. Se não existir carga de partícula,

ela é considerada neutra e classificada como não iônica. Caso a emulsão apresente um pequeno depósito em ambos os eletrodos, ela é classificada como anfotérica.

Esse ensaio é normatizado pela ABNT NBR 6567/2015, ele consiste em usar um equipamento de medida de pH, que deposita eletrodos dentro da emulsão. Com isso, é possível verificar para qual deles, positivo ou negativo, as partículas da emulsão estão sendo atraídas.

#### *4.3.4.2 Ensaio de ruptura com cimento*

O ensaio de ruptura de uma emulsão com cimento é descrito na norma ABNT NBR 6297/2012, e consiste em acrescentar quantidades preestabelecidas de cimento numa emulsão de ruptura lenta e misturá-los em condições especiais. Em seguida, a mistura é drenada, lavada e secada em estufa, sobre uma peneira de 1,4 mm. Após sair da estufa, a mesma é pesada e o peso retido representa a quantidade de emulsão rompida. O resultado é dado pela relação entre o resíduo retido e a quantidade inicial de emulsão.

#### *4.3.4.3 Ensaio de viscosidade*

Este ensaio serve para determinar a consistência da emulsão asfáltica e com isso, sua trabalhabilidade. Ele é descrito pela norma ABNT NBR 14491/2007 e é medido por meio do viscosímetro Saybolt-Furol. Consiste em colocar a emulsão dentro do viscosímetro e observar o tempo, que leva para a emulsão escoar, de modo contínuo, pelo orifício do equipamento.

#### *4.3.4.4 Ensaio de sedimentação*

O ensaio de sedimento é prescrito pela ABNT NBR 6570/2016 e consiste em transferir uma determinada quantidade de emulsão asfáltica para uma proveta e deixá-la em repouso por 5 dias. Após esse período, são coletadas amostras do topo e do fundo da proveta para obtenção dos respectivos resíduos de asfalto por evaporação.

#### *4.3.4.5 Ensaio de resíduo por evaporação*

Esse ensaio tem como objetivo, determinar a quantidade de resíduo seco, ligante residual seco presente na emulsão asfáltica. Ele é prescrito pela ABNT NBR 14376/2019 e

consiste em coletar uma determinada amostra de emulsão, aquece-la até a completa evaporação da água e pesar o resíduo seco remanescente.

#### *4.3.4.6 Ensaio de peneiração*

Esse ensaio consiste em verter uma determinada quantidade de emulsão asfáltica por uma peneira, preestabelecida, e pesar a quantidade de resíduo asfáltico retido na peneira. O ensaio é normatizado pela ABNT NBR 14393/2012 e é importante para garantir a qualidade na fabricação da emulsão.

#### *4.3.4.7 Ensaio de desemulsibilidade*

Normatizado pela ABNT NBR 6569/2008, esse ensaio serve para avaliar a ruptura de emulsão por um procedimento químico. Consiste em misturar uma determinada quantidade de reagente químico adequado e emulsão asfáltica, e analisar se a emulsão foi parcial ou totalmente rompida.

#### *4.3.4.8 Ensaio de determinação de resíduo por destilação*

Esse ensaio consiste em colocar uma determinada quantidade de emulsão asfáltica em um destilador metálico específico, determinado pela ABNT NBR 6568/2005 que descreve o procedimento, e aquece-la a 260 °C, durante o tempo necessário para que o processo de destilação termine. Em seguida, pesa-se o resíduo obtido e determina-se seu percentual em relação à emulsão.

#### *4.3.4.9 Ensaio de determinação do pH*

Esse ensaio é descrito pela norma ABNT NBR 6299/2012 e consiste em usar um potenciômetro previamente calibrado com soluções-padrões, para determinar o pH de uma emulsão asfáltica, e com isso saber se a mesma é básica ou ácida, o que irá depender do emulsificante utilizado na fabricação da emulsão.



#### **4.4 Estabilização de solos**

A pavimentação envolve diretamente o uso de solos para diferentes camadas de sua composição. Para melhor aproveitamento econômico e de desenvolvimento da obra, o ideal, seria utilizar o solo já existente no local a ser realizado a obra (SARTORI, 2015).

Infelizmente ocorrem vezes nas quais o solo existente no local não atende as condições solicitadas e há então a necessidade de tornar o mesmo mais adequado para a sua aplicação. Segundo Suarez (2008), para melhorar os materiais encontrados na região é preciso utilizar o processo de estabilização de solos, que proporciona aos solos, características mecânicas capazes de resistir aos agentes erosivos da natureza como também às solicitações e aos esforços produzidos pela ação do tráfego rodoviário.

Sendo assim, a estabilização de solos é um processo que visa a melhoria das propriedades mecânicas e hidráulicas dos mesmos. Consiste num procedimento onde é feito a adição de pelo menos um outro material ao solo, para que o mesmo se adeque as especificações exigidas no seu emprego.

Os principais métodos de estabilização de solos são: a mecânica, onde procura-se melhorar as características dos solos modificando o arranjo das partículas, ou a sua granulometria; a física, onde se altera as propriedades dos mesmos através de reações físicas, como calor, eletricidade, etc.; a química, a melhoria do solo ocorre através da adição de materiais químicos (CRISTELO, 2001; NASCIMENTO, 1970).

##### ***4.4.1 Estabilização Mecânica***

Segundo Sampaio (2008), a estabilização mecânica se restringe a dois métodos, compactação e correção ou ajuste granulométrico. O primeiro e mais utilizado, promove um rearranjo das partículas, geralmente é realizado associado à estabilização física e/ou química, que é o caso nesse trabalho. O segundo, trata-se de uma inclusão ou retirada de partículas do solo.

###### ***4.4.1.1 Compactação***

Trata-se da redução de volume de vazios de uma massa de solo, para que o mesmo fique mais denso, resultando na melhoria de suas propriedades. Segundo Santos (2009), dentre os

principais benefícios desse processo, está o aumento da densidade, da resistência ao cisalhamento e da capacidade de suporte. Além da redução do índice de vazios, da contração e da compressibilidade dos solos.

Segundo Hilf (1991), a compactação é um processo que consiste em reduzir o volume de uma massa de solo, composta de solo, ar e água, através da aplicação momentânea de cargas, como rolamento, socamento ou vibração. Ela envolve a expulsão de ar sem alterar significativamente a quantidade de água na massa do solo. Assim, o teor de umidade do solo é praticamente o mesmo para o solo solto e não compactado e para esse mesmo solo após a compactação. Assim, como a quantidade de ar é reduzida sem alterar a quantidade de água na massa do solo, o grau de saturação aumenta.

Para Cristelo (2001, p. 215):

O comportamento de um solo está geralmente dependente do seu índice de vazios, nomeadamente no que diz respeito às características de resistência ao corte, deformabilidade e permeabilidade. Assim, quanto menor o índice de vazios, maior a resistência e menor a deformabilidade e permeabilidade. Mas existem outras razões para que se procure sempre atingir o menor índice de vazios possível:

- A adição de água a solos granulares soltos pode levar a fenómenos de liquefacção;
- Alguns solos, com uma estrutura tipo colmeia com um grande volume de vazios, apresentam comportamento colapsível. A introdução de água numa estrutura deste tipo diminui as forças entre partículas e funciona como um lubrificante que permite que estas partículas deslizem umas em relação às outras, ocupando os espaços antes vazios. Uma compactação adequada reduz o risco de colapso.

#### ***4.4.2 Estabilização Química***

A estabilização química é um processo que consiste em adicionar à uma massa de solo, produtos químicos, que ocasionarão em reações químicas, com o intuito de melhorar as propriedades do mesmo, como resistência mecânica, permeabilidade e deformidade.

Segundo Jacintho (2010), na estabilização química, são adicionados aditivos que, ao interagirem com as partículas do solo, acarretaram na melhoria e estabilidade das propriedades mecânicas e hidráulicas. Os principais aditivos utilizados são: cal, cimento, asfaltos e produtos químicos industrializados, como cloretos, ácidos fosfóricos etc.

#### **4.4.3 Estabilização Asfáltica**

Para Sant'Ana (2009), a estabilização asfáltica é um processo de adição de ligante asfáltico aos solos para sua aplicação como material de pavimentação. Segundo Cristelo (2001), a utilização de materiais betuminosos na estabilização, não é tão popular como a cal ou o cimento, por conta do seu elevado preço e das suas complexas condições de uso.

Na estabilização asfáltica, o material betuminoso utilizado pode ser o CAP, a emulsão asfáltica e o asfalto diluído. Atualmente os mais utilizados são, as emulsões e os cimentos asfálticos, tendo em vista que os asfaltos diluídos tem um maior potencial de agressão ao meio ambiente (INGLES; METCALF, 1972; SANT'ANA, 2009).

Esse processo de estabilização pode conferir diferentes resultados dependendo do tipo de solo utilizado. Para solos arenosos ou granulares incoerentes, ele fornecerá coesão entre as partículas, por conta do betume que as envolve. Já para solos finos e coerentes, o betume funciona como um impermeabilizante, reduzindo os efeitos danosos, como perda de resistência, que a absorção de água causaria (CRISTELO, 2001; SANT'ANA, 2009; SANTOS, 2009).

#### **4.5 Dosagem Solo-Emulsão**

Ainda não existe um procedimento universal de dosagem que determine o teor adequado para uma mistura de solo-emulsão. Segundo Sant'Ana (2009), existem diversas variáveis envolvidas na mistura, como características naturais dos solos, especificações das emulsões, quantidade de água, tipo e teor de emulsão. E a falta de um método específico para a dosagem de solo-emulsão nas normas brasileiras, atrapalha ainda mais a utilização dessa técnica.

Como já mencionado, dependendo do tipo de solo, pode-se ter ganhos diferentes ao se utilizar asfalto residual na estabilização. Como por exemplo, para solos finos, acredita-se que a mistura irá acrescentar melhores propriedades impermeabilizantes para o solo. Ingles e Metcalf (1972) afirmam que, por conta disso, deduz-se que quanto maior a porcentagem de asfalto, maior será a impermeabilização do solo. Entretanto, uma grande quantidade de asfalto fará com que o filme que envolve os grãos (demonstrado na figura 5c) fique espesso demais, resultando na diminuição do atrito entre os grãos e, conseqüentemente, da resistência da mistura. A melhor dosagem que possa ser utilizada será aquela que proporcione maior impermeabilização sem afetar sua resistência.

Segundo Sant'Ana (2009), em geral, os solos que apresentam características plásticas devem ser evitados, por dificultar a trabalhabilidade, grande formação de grumos e má cobertura de grãos. Para Ingles e Metcalf (1972), o limite de liquidez deve ser menor que 40% e o índice de plasticidade menor que 18%.

Segundo Sant'Ana, alguns pesquisadores, tentam realizar experiências, baseadas no empirismo de métodos locais, afim de conseguir reunir conhecimento sobre a técnica. Yoder e Witczak (1995), apresentam uma proposta da quantidade de betume utilizada para diferentes tipos de materiais. Eles ainda ressaltam que, na estabilização de um solo fino, deve ser considerado a possibilidade de pulverização do solo e se o asfalto pode ser completamente misturado nele. Eles ainda afirmam que, o solo precisa estar úmido para facilitar a difusão do betume por toda a massa do solo. A tabela 0 apresenta suas propostas.

**Quadro 01:** Resumo dos tipos de material e betume para estabilização.

Tipo de Solo	Características do Solo	Tipos de Materiais Betuminosos	Quantidade de M. Betuminoso (%)
Solos Finos	máx. LL = 40% máx. IP = 18%	Emulsões e Asfaltos Diluídos	4 - 8
Areias	máx. passante na n° 200 = 25% máx. IP = 12%	CAP de alta penetração, Emulsões e Asfaltos Diluídos	4 - 10
Cascalho	máx. passante na n° 200 = 15% máx. IP = 12%	Emulsões, Asfaltos Diluídos e CAP	2 - 6

**Fonte:** Adaptado, Yoder e Witczak, 1995.

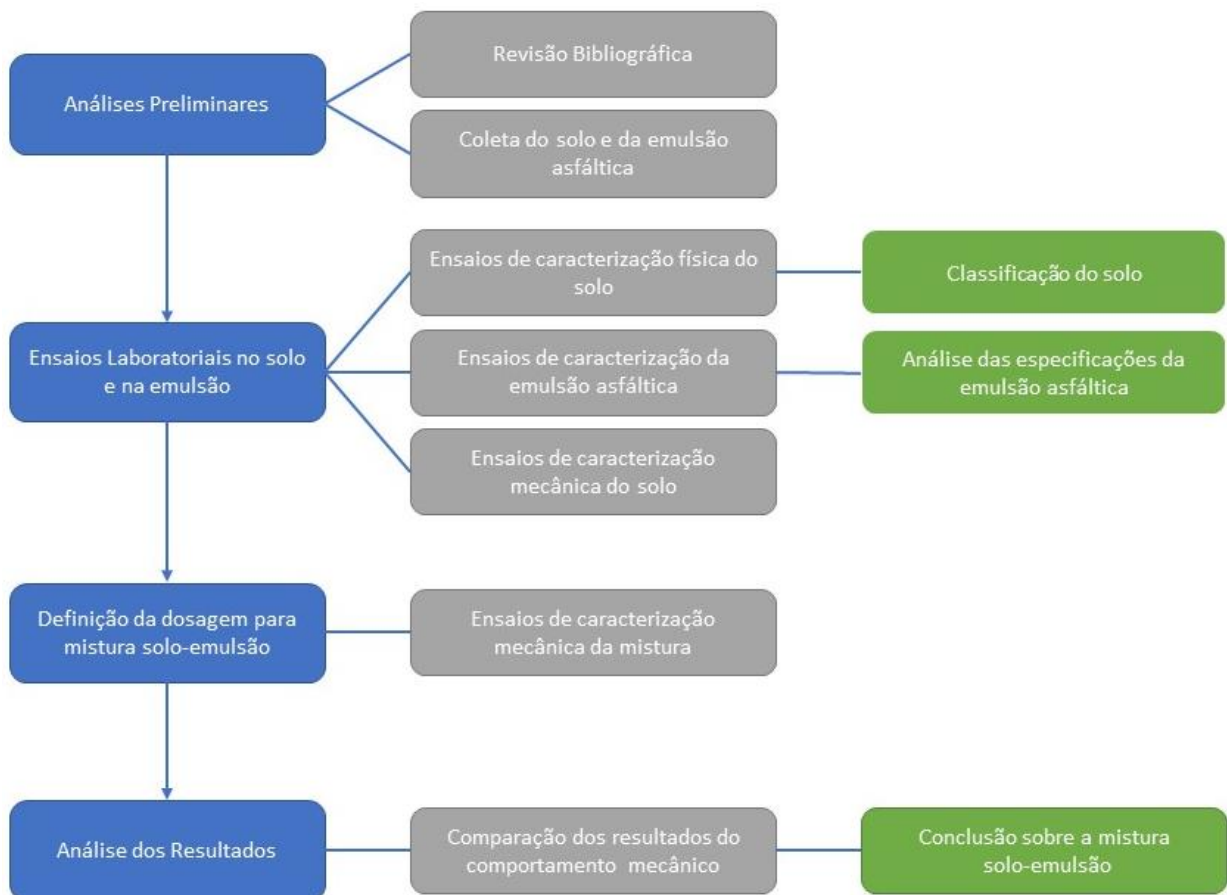
Nota-se que os autores citados não apresentam as especificações para solos muito plásticos, o que pode ser devido ao fato já citado por outros autores, sobre o mal comportamento dos solos plásticos na mistura.

Winterkon e Fang (1975), afirmam que, as misturas que apresentaram melhores resultados, analisando o fator de dificultar a entrada de água ao se infiltrar em vazios, foram as que continham solos com 50%, ou mais, de material passante na peneira n°4, com 35% a 100% de passantes na peneira n° 40 e 10% a 50% de passantes na peneira n° 200. E que a porcentagem de betume utilizada estava entre 4% a 7%. E ainda ressaltam, a necessidade de o solo estar úmido de forma a facilitar a difusão no solo e ajudar à desagregação das partículas.

## 5. METODOLOGIA

Esse trabalho, trata-se de uma pesquisa qualitativa, onde houve a busca por informações que descrevessem os acontecimentos ocorridos nos ensaios, trazendo detalhes e a profundidade necessária para entender os resultados alcançados. Mas também, trata-se de uma pesquisa quantitativa, apresentando os experimentos realizados e trazendo os dados coletados, para provar os pontos gerais da pesquisa. A figura 06 contém etapas metodológicas dessa pesquisa.

**Figura 06:** Etapas Metodológicas.



Fonte: Próprio Autor, 2020.

### 5.1 Coleta das amostras

A amostra de solo estudada nesta pesquisa, foi coletada em um terreno localizado no município de Araruna - PB, um município compreendido na mesorregião do Agreste Paraibano, na microrregião do Curimataú Oriental. A cidade está localizada no alto de uma serra, a cerca de 590 metros acima do nível do mar.

Foram coletadas aproximadamente 100 kg de solo para os ensaios de caracterização do mesmo e de estabilização asfáltica. Para conseguir essa amostra, primeiro foi escavado uma profundidade de 2 m, para retirada de possíveis matérias orgânicas. O solo encontrado abaixo dessa camada, apresentava aparentemente características de um solo argiloso.

A amostra de emulsão asfáltica, foi disponibilizada pela TCPAV, Tecnologia em construção e pavimentação, localizada na rua Santa Maria, n.22 Distrito de Mangabeira, Macaíba - RN. Trata-se de uma empresa de engenharia habilitada a executar serviços de construção civil em geral, incluindo engenharia técnica, terraplenagem, pavimentação, etc.

Foram coletadas aproximadamente 40 L de emulsão asfáltica para os ensaios de caracterização da mesma e de estabilização asfáltica. De acordo com a ficha técnica do laboratório de pesquisa da empresa e a ficha técnica disponibilizada pelo seu fornecedor, foi possível constatar que se tratava de uma Emulsão Asfáltica RL-1C (Ruptura Lenta, de origem catiônica).

## **5.2 Ensaios laboratoriais - Caracterização do solo natural**

Para a preparação da amostra para a execução dos ensaios, a mesma foi espalhada e deixada para secar ao ar, por um período de 48 horas. Com a amostra de solo seca ao ar, foi feito o quarteamento da mesma, seguindo o método B (quarteamento) da norma DNER-PRO 199/96 – “Redução de amostra de campo de agregados para ensaio de laboratório” e foi tomada uma parte do solo para os ensaios de caracterização. Em seguida, a amostra de solo tomada, foi preparada seguindo os procedimentos presentes na norma DNER-ME 041/94 – “Preparação de amostras para ensaios de caracterização”.

Os materiais utilizados foram:

- Peneiras de 2,0 mm e de 0,42 mm;
- Pá de mão;
- Balde;
- Balança;
- Cápsulas metálicas.

Inicialmente, a amostra de campo foi colocada sobre uma superfície rígida, limpa e plana. Em seguida, a mesma foi revolvida, até atingir uma homogeneização. Depois foi feito o quarteamento manual da amostra, descartando uma diagonal. E da diagonal que ficou, repetiu-se o processo anterior, para reduzir a amostra ao tamanho desejado. Esse material remanescente foi então destorroado manualmente e pesado, cerca de 1500g, por se tratar de um solo argiloso ou siltoso, e passado na peneira de 2,0 mm, tomando a precaução de destorroar os torrões ainda aparentes na amostra. A fração passada na peneira de 2,0 mm, foi novamente quarteada, até um peso de cerca de 250 g, para os ensaios de umidade higroscópica e densidade real. O restante da amostra que passou na peneira 2,0 mm foi passada na peneira de 0,42 mm, e do material passante na mesma, foi feito o quarteamento e pesado cerca de 200 g para os ensaios de liquidez e plasticidade.

### ***5.2.1 Densidade Real***

Todo o ensaio de densidade real foi feito com base na norma DNER-ME 093/94, que apresenta o procedimento para determinação da densidade real de solos, assim como, à aparelhagem e cálculos. A aparelhagem utilizada foi:

- Peneira de 2,0 mm, conforme ABNT EB-22, de 1988, registrada no SINMETRO como NBR-5734 designada Peneiras para ensaio;

- Balança com capacidade de 200 kg, sensível a 0,01 g;

- Estufa capaz de manter a temperatura entre 105 °C e 110 °C;

- Picnômetro com capacidade de 50 ml;

- Termômetro graduado em 0,5 °C, de 0 °C a 60 °C;

- Fonte de calor;

- Cápsula de porcelana com 5 cm de diâmetro;

- Dessecador;

- Funil de 5 cm de diâmetro;

- Pegador de madeira;

- Pano limpo e seco.

Inicialmente, a amostra adquirida no item 4.2.1, para o ensaio de densidade real, foi colocada em estufa a 105 °C - 110 °C por 24h e esfriada no dessecador. Para o ensaio, foi retirada 2 amostras de solo seco de 10g cada. Em seguida, foram pesados os picnômetros vazios, secos e limpos (P1). Cada amostra foi colocada em um picnômetro e pesada (P2). Depois, foi colocado água destilada no picnômetro até cobrir a amostra com excesso. Logo após, aqueceu-se os picnômetros, deixando-os ferver por aproximadamente 15 minutos. Passado o intervalo de tempo, os picnômetros foram retirados, deixados esfriar ao ambiente e enchidos novamente com água destilada, para serem colados em um banho de água à temperatura ambiente, por mais 15 minutos. Em seguida, foram retirados do banho, enxugados com um pano limpo e seco e pesados novamente (P3). Por fim, os picnômetros foram esvaziados, lavados e enchidos completamente com água destilada. Repetiu-se o processo de banho de água e novamente foram pesados (P4).

Conforme exige a norma, o resultado foi obtido pela média das duas determinações. Primeiro, foi calculado a densidade real do solo ( $D_t$ ) à temperatura (t) pela equação 1. Em seguida, para obter o valor da densidade real à água à temperatura de 20 °C ( $D_{20}$ ), é preciso multiplicar o valor encontrado por uma constante ( $k_{20}$ ) conforme mostra a equação 2.

$$D_t = \frac{P_2 - P_1}{(P_4 - P_1) - (P_3 - P_2)} \quad \text{(Equação 1)}$$

$$D_{20} = k_{20} * D_t \quad \text{(Equação 2)}$$

### 5.2.2 Limites de Atterberg

Para a determinação do limite de liquidez, foi utilizado o método de Casagrande, seguindo a norma DNER-ME 122/94 “Solos - determinação do limite de liquidez – método de referência”. A aparelhagem utilizada foi:

- Aparelho de Casagrande;
- Cinzel;
- Espátula metálica;
- Cápsula de porcelana com capacidade de 500 ml;
- Balança sensível a 0,01 g;
- Estufa capaz de manter a temperatura entre 105 °C e 110 °C;



Das 200 g do solo, obtida de acordo com o item 4.2.1, para os ensaios de liquidez e plasticidade, tomou-se cerca de 70 g. Essa amostra foi colocada numa cápsula, onde foi adicionado 15 cm<sup>3</sup> de água destilada. Em seguida, foi feita a homogeneização da mistura de solo e água com a espátula, até a mesma atingir uma massa plástica. Então, tomou-se uma porção suficiente da mistura preparada, para ser colocada na concha em torno do ponto correspondente ao de contato entre a concha e a base do aparelho Casagrande.

Com o aparelho Casagrande devidamente calibrado, conforme exige a norma, a massa plástica foi espalhada na superfície da concha, de modo a ocupar aproximadamente 2/3 da mesma. Em seguida, a massa de solo foi alisada com a espátula, até apresentar uma espessura de 1 cm. Feito isso, com auxílio do cinzel, foi produzido uma canelura (ranhura), de 1 cm, na massa de solo, seguindo o plano de simetria do aparelho. Pelo acionamento da manivela, golpeou-se a concha contendo o solo contra a base do aparelho, até que as duas bordas inferiores da ranhura se unissem na extensão de 1cm. O procedimento desse ensaio pode ser visto na figura 07.

Após essa união, foi retirada uma amostra do ponto onde ocorreu a união, de aproximadamente 1 cm<sup>2</sup>, e a mesma foi colocada numa cápsula, pesada e imediatamente levada para a estufa, para determinação da umidade. Esse procedimento foi repetido outras 4 vezes, para as frações de solo remanescentes, com adições de água gradativamente crescentes. Após o intervalo de 24 horas, as amostras pesadas foram retiradas da estufa e pesadas novamente, para o cálculo da umidade de cada massa de solo, conforme a equação 3.

Os valores de umidade e número de golpes foram representados em um sistema de eixos ortogonais, no qual, na ordenada, são representados os números de golpes em escala logarítmica e na abcissa, os correspondentes teores de umidade em escala aritmética. Em seguida, foi traçado uma reta, tão próxima quanto possível, de pelo menos três pontos. O limite de liquidez, expresso em teor de umidade, foi anotado como o valor da abcissa do ponto da reta correspondente aos 25 golpes.

$$h = \frac{P_h - P_s}{P_s} * 100 \quad (\text{Equação 3})$$

**Figura 07:** Ensaio de Limite de Liquidez. a) Preparação da amostra; b) Concha preenchida com a amostra; c) Abertura da ranhura de 1 cm; d) Fechamento da ranhura após os golpes.



**Fonte:** Próprio Autor, 2020.

Das 130 g restantes da amostra obtida no item 4.2.1, foi retirado cerca de 50 g para o ensaio de limite de plasticidade. Esse ensaio foi realizado de acordo com a DNER-ME 082/94 “Solos - determinação do limite de plasticidade”. A aparelhagem utilizada foi:

- Cápsula de porcelana com capacidade de 500 ml;
- Espátula metálica;
- 5 cápsulas metálicas pequenas;
- Estufa capaz de manter a temperatura entre 105 °C - 110 °C;
- Balança com capacidade de 200g, sensível a 0,01 g;
- Placa de vidro de superfície esmerilhada.

Colocou-se as 50 g na cápsula e acrescentou-se uma água destilada, até que a mistura apresentasse uma massa plástica. Então, tomou-se cerca de 20 g, dessa massa plástica, e a mesma foi modelada na forma elipsoidal e colocada sobre a placa de vidro. Em seguida, a mesma foi rodada entre a palma da mão e a face esmerilhada da placa, num movimento de vai e vem, aplicando pressão suficiente para moldá-la na forma de um cilindro de diâmetro uniforme.

Após o cilindro atingir 3 mm de diâmetro ou se fragmentar, ele foi quebrado em vários pedaços, moldado em forma elipsoidal e repetiu-se o processo de rolamento. Caso o cilindro de solo tenha se fragmentado, foi retirado uma pequena amostra do solo do ponto no qual o mesmo se fragmentou antes de dá continuidade ao ensaio. A figura 08 contém o relato fotográfico de algumas etapas do ensaio.

**Figura 08:** Ensaio de Limite de Plasticidade. a) Preparação da amostra; b) Modelagem e moldagem a amostra; c) Detalhe do rolamento da amostra no vidro esmerilhada.



Fonte: Próprio Autor, 2020.

Esse processo foi repetido até ser obtido 5 amostras de solo de pontos onde o mesmo se fragmentou. Essas amostras foram colocadas em cápsulas e, imediatamente, pesadas e colocadas na estufa, onde permaneceram por 24 horas, para determinação da sua umidade.

### 5.2.3 Análise Granulométrica

A análise granulométrica por peneiramento, foi feita seguindo a norma DNER-ME 083/98 “Agregados - análise granulométrica”. Foi coletada uma amostra do solo, que foi cuidadosamente reduzida pelo método de quartejamento, procedimento já descrito no item 4.2.1, até atingir cerca de 1 kg, como exige a norma. Em seguida, a amostra foi secada na estufa (110 °C  $\pm$ 5 °C) durante 24 horas, para realização do ensaio. A aparelhagem utilizada nesse ensaio foi:

- Peneiras de malhas quadradas conforme a DNER-ME 035/95, inclusive tampa e fundo;
- Balança, sensível a 0,01 g;
- Estufa capaz de manter uma temperatura uniforme de  $110\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;
- Escova apropriada para limpeza de peneiras;

O peneiramento foi feito, manualmente, aplicando inicialmente na peneira de maior abertura, e subsequentemente nas demais da série (ordem decrescente). A agitação das peneiras, foi feita em movimentos laterais e circulares alternados, tanto no plano horizontal quanto no vertical e inclinado.

Foi pesada a massa retida em cada uma das peneiras e calculada a sua porcentagem em relação a amostra total seca. Depois de obter a porcentagem retida em cada peneira, foi obtido a porcentagem acumulada em cada uma, somando a porcentagem retida na mesma com as porcentagens retidas nas peneiras maiores que ela. Em seguida, subtraiu-se, de 100%, a porcentagem acumulada em cada peneira, para obter a porcentagem de material passante na mesma. A figura 09 mostra a amostra após a finalização do ensaio.

**Figura 09:** Ensaio de Peneiramento. a) Série de peneiras; b) Peneiramento manual; c) Material retido em cada peneira; d) Detalhe do material retido nas peneiras maiores.



**Fonte:** Próprio Autor, 2020.

### **5.3 Ensaio de caracterização da emulsão**

Por conta da falta de equipamentos no laboratório da universidade e da pandemia, que dificultou o acesso a outras instituições que poderiam ter esses equipamentos, só foi possível a realização de três ensaios de caracterização da emulsão asfáltica.

#### ***5.3.1 Ensaio de carga de partícula***

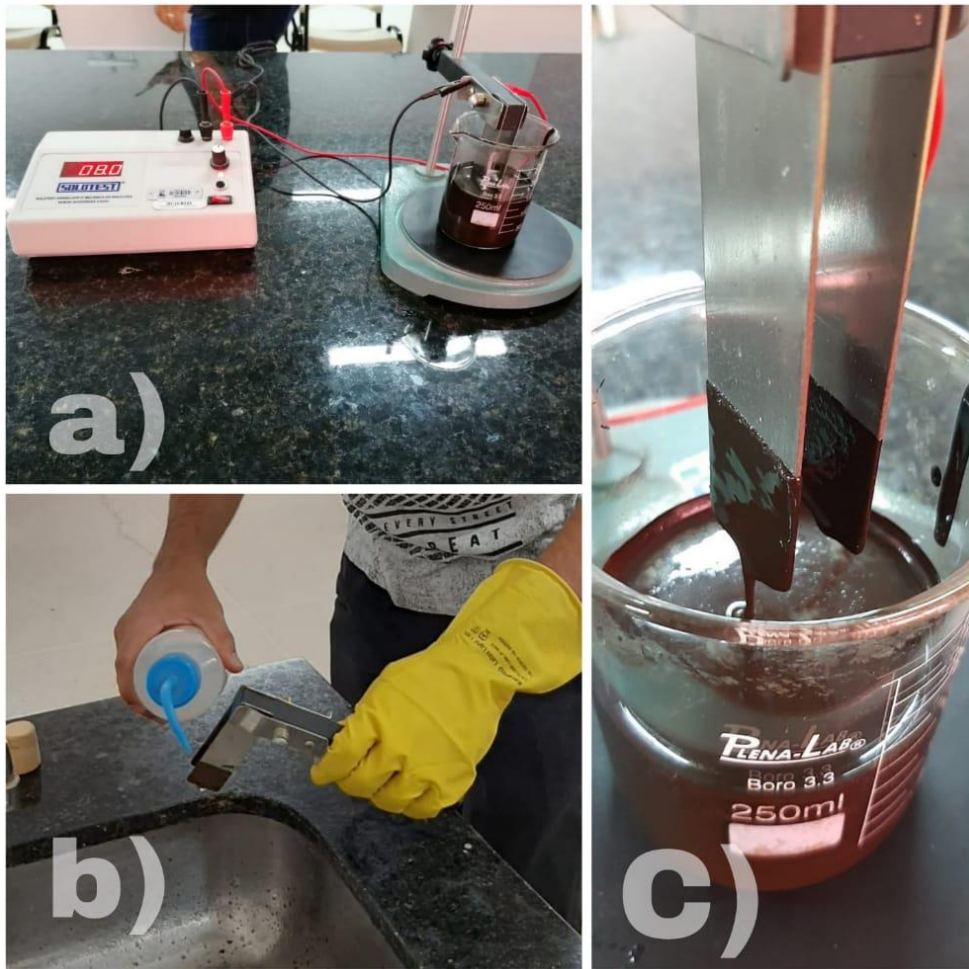
O ensaio de carga de partícula foi executado de acordo com o método A da ABNT NBR 6567/2015 “Emulsões asfálticas - Determinação da carga de partícula”. A aparelhagem utilizada para a execução desse ensaio foi:

- Fonte de corrente contínua de 12 V, um miliamperímetro e um resistor variável;
- Duas placas de aço inoxidável, de dimensões 2,5 cm x 10,0 cm;
- Béquero de vidro
- Termômetro de 0 °C a 100 °C, com exatidão de 1 °C.

Foi coletado uma pequena amostra de emulsão asfáltica, que foi homogeneizada e aquecida até uma temperatura de aproximadamente 50 °C, como exige a norma, e a mesma foi depositada num béquer de 150 ml. Os eletrodos foram lavados e secos, de acordo com as exigências da norma, e então foram ligados e mergulhados na emulsão, até uma profundidade de 2,5 cm. Em seguida, a corrente foi ajustada para 8 mA, com auxílio do resistor variável, onde foi mantida por aproximadamente 30 minutos. Decorridos os 30 minutos, a fonte de corrente foi desligada e os eletrodos foram retirados para lavagem. Após serem lavados suavemente com água destilada, foi possível verificar se houve ou não depósito de ligante asfáltico nos eletrodos e com isso determinar sua carga. A figura 10 contém o relatório fotográfico das etapas do ensaio.



**Figura 10:** Ensaio de carga de partícula. a) Eletrodos ligados e mergulhados na emulsão; b) Eletrodos desligados e retirados da emulsão; c) Lavagem dos eletrodos com água destilada.



Fonte: Próprio Autor, 2020.

A emulsão catiônica deposita uma camada de asfalto sobre o eletrodo negativo, enquanto o eletrodo positivo fica limpo. Quando a emulsão é aniônica ocorre o contrário, ela deposita asfalto no eletrodo positivo, enquanto o eletrodo negativo fica limpo. Na emulsão não iônica, ambos os eletrodos ficam limpos e na anfotérica o depósito ocorre em ambos os eletrodos.

### 5.3.2 Ensaio de teor de resíduo seco

Este ensaio foi realizado seguindo os procedimentos da norma ABNT NBR 14376/2019 “Determinação do teor do resíduo seco de emulsões asfálticas”. Para a realização do ensaio, a emulsão asfáltica foi homogeneizada dentro do recipiente de armazenamento e depois foi coletada uma pequena amostra da mesma. A aparelhagem utilizada foi:

- Fonte de calor;
- 2 Béqueres;
- Tela refratária;
- Luva de proteção térmica;
- Bastão em vidro termorresistente;
- Peneira com abertura de malha de n° 20;
- Termômetro;
- Balança, sensível a 0,1 g.

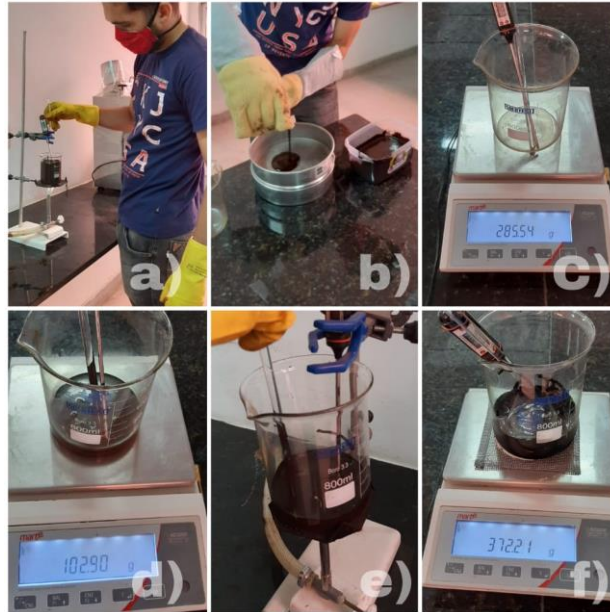
Para a preparação da amostra, a mesma foi colocada em um béquer, onde foi aquecida a 50 °C, sempre sendo agitada com o bastão. Após chegar na temperatura desejada, a emulsão foi vertida na peneira de malha n° 20 e coletada em outro béquer.

Em seguida, foi pesado um conjunto de ensaio (Béquer limpo, termômetro e bastão) e anotado sua massa (A). Foi adicionado cerca de 100 g da amostra preparada, passante na peneira n° 20, ao conjunto de ensaio, posicionado sobre o prato da balança protegido com a tela refratária, e pesado sua massa (B). O conjunto contendo a emulsão foi aquecido, com agitação constante, tomando cuidado para que não ultrapassasse a temperatura de 130 °C.

O aquecimento e a agitação foram mantidos até obter-se um resíduo homogêneo de superfície espelhada. Ao chegar nesse ponto, o conjunto foi então retirado da fonte de calor e levado para ser pesado novamente (C). A figura 11 contém o relatório fotográfico das etapas do ensaio. A porcentagem de resíduo seco (R) de emulsão asfáltica foi então obtida pela equação 4.

$$R = \frac{(C-A)}{(B-A)} * 100 \quad \text{(Equação 4)}$$

**Figura 11:** Ensaio de resíduo seco. a) Aquecimento da emulsão à 50 °C; b) Peneiramento da emulsão; c) Pesagem do conjunto; d) Pesagem do conjunto + amostra; e) Aquecimento da amostra para obter o resíduo seco; f) Pesagem do conjunto + resíduo seco.



Fonte: Próprio Autor, 2020.

A emulsão asfáltica tem que estar em conformidade com as especificações da mesma, ou seja, para uma emulsão RL-1C, segundo a norma DNIT 165/2013, o teor de resíduos secos não deve ser menor que 60%.

### 5.3.3 Ensaio de Sedimentação

Este ensaio foi realizado seguindo os procedimentos da norma ABNT NBR 6570/2016 “Determinação da sedimentação e estabilidade à estocagem de emulsões asfálticas”. Para a realização do ensaio, a emulsão asfáltica foi homogeneizada dentro do recipiente de armazenamento e depois foi coletada uma pequena amostra da mesma. A aparelhagem utilizada foi:

- Duas provetas de 500 ml;
- Bastão de vidro termorresistente;
- Luva de proteção térmica;
- Peneira de malha quadra de abertura nominal de 841  $\mu\text{m}$  (n° 20);
- Balança, sensível a 0,1 g;
- Béqueres.



Foi coletado cerca de 1200 ml da emulsão asfáltica, previamente homogeneizada. A mesma foi passada na peneira de nº 20 e depositada em um béquer. Foram transferidos 500 ml da amostra passante na peneira para cada proveta. Em seguida, as provetas foram fechadas e deixadas em repouso à temperatura ambiente por 5 dias para o ensaio de sedimentação.

Foi pesado o conjunto (béquer + bastão) e anotado sua massa (A1). Passado o período de repouso, foi coletado cerca de 55 ml de emulsão do topo de uma proveta, que foi adicionado ao conjunto e pesado (B1). Foi determinado o resíduo seco dessa amostra conforme o item 4.3.2 e anotado sua massa (C1). Em seguida, foi retirado cerca de 390 ml do fundo da proveta, que foi descartado, e a emulsão remanescente foi adicionado ao conjunto (béquer + bastão), previamente limpo e pesado (A2). O conjunto contendo a emulsão foi pesado novamente e anotado sua massa (B2). Então, repetiu-se o procedimento descrito no item 4.3.2 para obtenção do resíduo seco e pesou-se o conjunto novamente (C2). A figura 12 contém alguns passos importantes do ensaio.

Esse procedimento foi repetido com a amostra contida na segunda proveta, conforme exige a norma. Com isso calcula-se a quantidade de resíduo seco no topo (T) e no fundo (F) de cada proveta, de acordo com as equações 5 e 6. Em seguida, calcula-se a média de resíduo seco do topo e do fundo das provetas, conforme as equações 7 e 8. A determinação da sedimentação (S) foi dada pela subtração do percentual médio de resíduo seco no fundo pelo percentual médio de resíduo seco no topo, de acordo com a equação 9.

$$T = \frac{(C1-A1)}{(B1-A1)} \quad \text{(Equação 5)}$$

$$F = \frac{(C2-A2)}{(B2-A2)} \quad \text{(Equação 6)}$$

$$T_{\text{médio}} = \frac{T1+T2}{2} * 100\% \quad \text{(Equação 7)}$$

$$F_{\text{médio}} = \frac{F1+F2}{2} * 100\% \quad \text{(Equação 8)}$$

$$S = F_{\text{médio}} - T_{\text{médio}} \quad \text{(Equação 9)}$$

Onde;

$T_{\text{médio}}$ : é o valor médio do topo;

$F_{\text{médio}}$ : é o valor médio do fundo;

S: é a sedimentação em porcentagem.

**Figura 12:** Ensaio de sedimentação. a) Proveta contendo a emulsão para ser deixada em repouso por 5 dias; b) Ensaio de resíduo seco da amostra retirada do topo; c) Ensaio de resíduo seco da amostra retirada do fundo.



Fonte: Próprio Autor, 2020.

Segundo a norma DNIT 165/2013, o valor encontrado para sedimentação, não deve ser superior a 5%. Caso o valor da sedimentação seja negativo, implica a ocorrência de flotação na emulsão.

#### 5.4 Mistura Solo-emulsão

Conforme a recomendação de Yoder e Witczak (1995) e Winterkon e Fang (1975), o solo foi umedecido, acrescentando pequenas quantidades de água, apenas para facilitar a difusão da emulsão por todo o solo. E seguindo Sant'Ana (2009), a mistura foi deixada em repouso por pelo menos 1 hora, para secar ao ar, afim de permitir que as reações químicas da emulsão acontecessem.

### 5.5 Ensaio Mecânicos - Compactação e CBR

O ensaio de compactação, foi utilizado tanto no solo natural como na mistura solo-emulsão. O ensaio foi feito seguindo a norma DNIT 164/2013 - ME “Solos – Compactação utilizando amostras não trabalhadas”, utilizando o método B, energia intermediária de compactação Proctor. A aparelhagem utilizada foi:

- Aparelho de compactação (Molde cilíndrico metálico, cilindro complementar e base metálica com dispositivo de fixação);
- Disco espaçador metálico;
- Soquete metálico cilíndrico;
- Extrator de amostra do molde cilíndrico;
- Balança com capacidade de 20 kg, sensível a 1 g;
- Balança com capacidade de 1 kg, sensível a 0,01 g;
- Estufa capaz de manter a temperatura a  $110\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;
- Régua de aço biselada;
- Cápsulas de alumínio;
- Papel filtro;
- Acessórios auxiliares (bandeja, espátula, etc).

Foi coletada uma quantidade de solo, após a mesma ser seca ao ar, que foi destorroada, homogeneizada e reduzida, por quarteamento, até que fosse obtido 6 kg de amostra, quantidade exigida na norma para solos argilosos ou siltosos. Em seguida, fixou-se o molde à base metálica, contendo o disco espaçador e o papel filtro, e depois fixou-se o cilindro complementar. Esse conjunto foi então pesado e sua massa foi anotada.

Foi adicionado à massa de solo, uma pequena quantidade de água e então misturou-se bem, para que a mistura ficasse homogênea. Após a homogeneização, deu-se prosseguimento ao ensaio. Foram preparadas 5 camadas iguais de solo no molde, de forma a se obter uma altura total do corpo de prova de cerca de 12,5 cm após a compactação, sendo aplicado em cada camada 26 golpes com o soquete caindo de uma altura de 45,72 cm, aproximadamente.

Após a compactação, o cilindro complementar foi removido e, com auxílio da régua de aço, foi rasado o excesso de material na altura exata do molde. Em seguida, o conjunto mais o solo compactado foram pesados e sua massa anotada. Depois, utilizando o extrator de amostra, o corpo de prova foi retirado do molde e duas amostras de solo foram retiradas do mesmo, para a determinação do teor de umidade. Essas amostras foram colocadas em capsulas metálicas, pesadas e colocadas na estufa, onde permaneceram por 24 horas.

Passado as 24 horas, as cápsulas foram pesadas novamente e foi possível determinar a umidade do corpo de prova através na equação 10. Esse ensaio foi repetido outras 4 vezes, com umidades diferentes e crescentes, para se obter a curva de compactação. Com a curva de compactação foi possível determinar a umidade ótima do solo para o ensaio de CBR. A figura 13 contém o relatório fotográfico de alguns passos do ensaio.

**Figura 13:** Ensaio de compactação. a) Destorroamento da amostra; b) Corpo de prova compactado; c) Remoção do cilindro complementar; d) Remoção do excesso de solo; e) Extração do corpo de prova; f) Detalhe do corpo de prova extraído.



Fonte: Próprio Autor, 2020.

O ensaio de compactação foi repetido para as misturas solo-emulsão. Com isso, foi possível conseguir a umidade ótima do solo e das misturas solo-emulsão, e assim preparar um corpo de prova na umidade ótima de cada situação. Feito isso, deu início ao ensaio de CBR, de acordo com a norma DNIT 172/2016 - ME “Solos – Determinação do Índice de Suporte Califórnia utilizando amostras não trabalhadas”.

Após repetir o ensaio de compactação da amostra na umidade ótima, o molde contendo o corpo de prova foi retirado da base metálica e colocado em um balde de água por 4 dias, para

o ensaio de expansão. Conforme exige a norma, foram colocadas sobrecargas no solo compactado e, com auxílio de um extensômetro, foi possível verificar sua expansão no decorrer do tempo determinado. As medições foram realizadas a cada 24 horas e após os 4 dias, o molde contendo o corpo de prova foi retirado da água e levado para uma prensa. O cálculo da expansão foi feito de acordo com a equação 11.

No ensaio de penetração, fez-se o assentamento de um pistão de penetração no solo, por meio da aplicação de uma carga de, aproximadamente 45N, controlada pelo deslocamento do ponteiro do extensômetro do anel dinamométrico. Foram feitas leituras do extensômetro do anel em função da penetração do pistão no solo e do tempo, durante 10 min. O cálculo o CBR foi feito de acordo com a equação 12. A figura 0 contém o relatório fotográfico do ensaio.

$$\text{Expansão (\%)} = \frac{\text{Leitura final} - \text{Leitura inicial no extensômetro}}{\text{Altura inicial do corpo de prova}} * 100 \quad (\text{Equação 10})$$

$$\text{CBR} = \frac{\text{Pressão calculada}}{\text{Pressão padrão}} * 100 \quad (\text{Equação 11})$$

**Figura 14:** Ensaio de CBR. a) Adição das sobrecargas sobre o corpo de prova compactado; b) Corpo de prova imerso em água; c) Instalação do corpo de prova na prensa; d) Início da penetração do corpo de prova; e) Corpo de prova após a penetração.



Fonte: Próprio Autor, 2020.

Através dos ensaios de expansão e CBR, pode-se dizer se o solo ou a mistura solo-emulsão, pode ser utilizado nas estruturas de um pavimento, como base, sub-base ou reforço de subleito.

## 6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 6.1 Caracterização do solo

#### 6.1.1 Densidade real

Os resultados da determinação da densidade real do solo podem ser vistos no quadro 03. Segundo a norma DNER-ME 093/94, para que o valor encontrado seja aceitável, o ensaio deve ser realizado no mínimo duas vezes e os valores encontrados não podem ter uma diferença maior que 0,009. Como a diferença dos ensaios deu 0,007, que é menor do que a condição imposta pela norma, o valor é aceitável.

**Quadro 02:** Resultados do ensaio de Densidade Real.

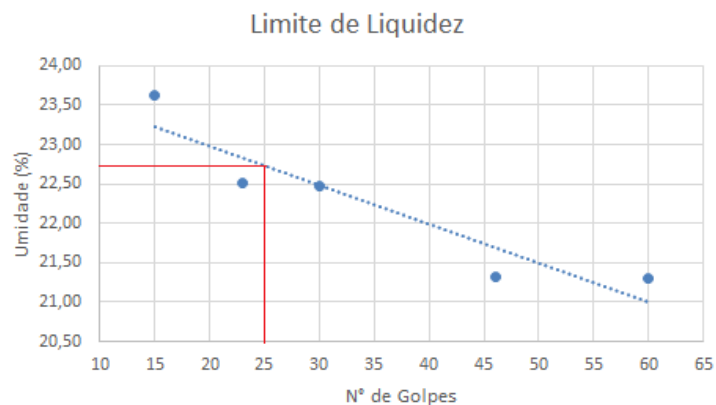
Ensaio	Picn. Vazio P1 (g)	Pic. + Amostra P2 (g)	Pic. + Amostra + Água P3 (g)	Pic. + Água P4 (g)	Dt	k20	D20	Média
1	36,96	47,76	99,11	92,57	2,54	0,9993	2,533	2,530
2	38,36	49,43	100,05	93,36	2,53	0,9993	2,526	

Fonte: Próprio Autor, 2020.

#### 6.1.2 Limites de Attenberg

Os valores obtidos no ensaio de limite de liquidez, foram lançados num gráfico, onde foi traçado uma reta próxima de pelo menos três pontos, conforme exige a norma DNER - ME 122/94. O valor que representa o limite de liquidez é dado pelo valor de umidade para 25 golpes, conforme pode ser visto no gráfico 01.

**Gráfico 01:** Resultados do ensaio de Limite de Liquidez.



Fonte: Próprio Autor, 2020.

Já o limite de plasticidade, é expresso pela média dos teores de umidade obtidos nos ensaios, conforme pode ser visto no quadro 04.

**Quadro 03:** Resultados do ensaio de Limite de Plasticidade.

Cápsula nº	Peso da Água (g)	Peso do Solo Seco (g)	Umidade (%)	Lpméd (%)
LP 01	0,19	0,77	24,68	17,41
LP 02	0,11	0,77	14,29	
LP 03	0,22	1,47	14,97	
LP 04	0,18	1,29	13,95	
LP 05	0,14	0,73	19,18	

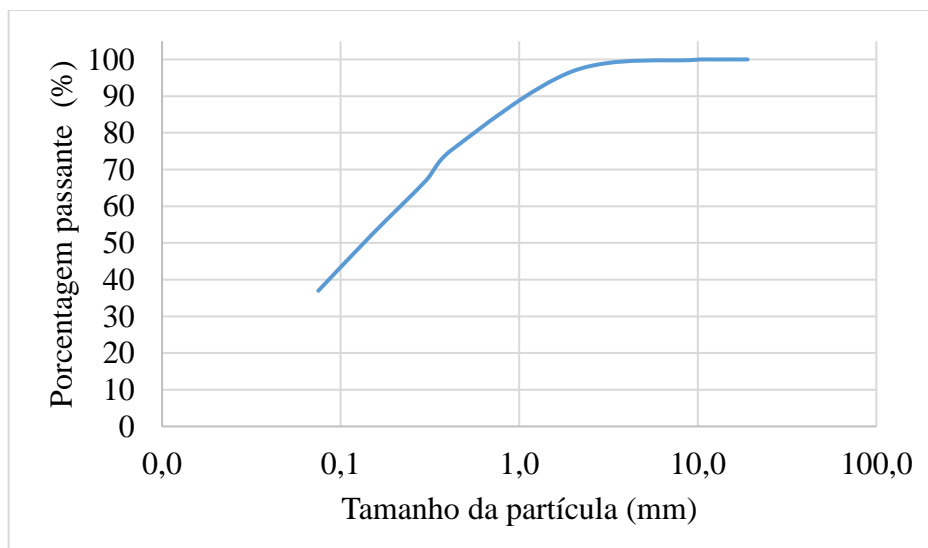
**Fonte:** Próprio Autor, 2020.

Assim, percebe-se que o limite de liquidez e o limite de plasticidade correspondem, respectivamente, 22,75% e 17,41%. Como as normas exigem que o valor considerado seja o valor mais próximo inteiro, temos que, LL = 23% e LP = 17%. Com isso foi possível calcular o índice de plasticidade, que deu 6%.

### 6.1.3 Granulometria

Através do ensaio de granulometria por peneiramento realizado e os dados obtidos, foi possível traçar a curva granulométrica da amostra de solo coletada e encontrar a porcentagem de material passante nas peneiras nº 10, nº 40 e nº 200, o que possibilitou a classificação do solo. O gráfico 02 apresenta a relação entre o material passante nas peneiras e o tamanho das suas partículas.

**Gráfico 02:** Curva granulométrica.



**Fonte:** Próprio Autor, 2020.

Pode-se perceber que a maior parte das partículas são de tamanho menores que 1 mm. Nota-se também que o diâmetro máximo das partículas encontradas nesse solo é de 10 mm.

#### ***6.1.4 Classificação do solo***

De acordo com a AASHTO, como o material passante na peneira de nº 200 é, aproximadamente, 37%, o solo se encaixa em “Materiais siltosos e argilosos”. Como o limite de liquidez é menor que 40%, o Índice de Plasticidade é menor que 10 e o Índice de Grupo é menor que 8, o solo em questão se encaixa no grupo A-4, solos siltosos não plásticos, ou moderadamente plástico. Também contém solos finos siltosos com até 64% de areia e pedregulho retidos na peneira nº 200.

### ***6.2 Caracterização da Emulsão Asfáltica***

Como já foi mencionado anteriormente, por conta da falta de equipamentos no laboratório da universidade, não foi possível realizar todos os ensaios de caracterização da emulsão. Porém, graças a TC PAV, fornecedora da emulsão, sabe-se que se trata de uma Emulsão Asfáltica de ruptura lenta, catiônica (RL-1C).

#### ***6.2.1 Carga de partícula***

No ensaio de carga de partícula, o depósito de emulsão foi identificado no eletrodo negativo, ficando comprovado assim, que se trata de uma emulsão catiônica, que é a mais utilizada no Brasil, pois o solo geralmente apresenta carga negativa, o que torna a atração entre a emulsão catiônica (positiva) mais eficiente. De acordo com a norma DNIT 165/2013 - ME “Emulsão asfáltica para pavimentação - Especificação de material”, a carga de partícula deve ser positiva, logo a emulsão está de acordo com as especificações quanto a carga de partícula.

#### ***6.2.2 Teor de resíduo seco***

No ensaio de determinação do teor de resíduo seco, obteve-se um resultado de aproximadamente 84%. De acordo com a norma DNIT 165/2013 - ME, o teor de resíduo mínimo é de 60%. Como o valor encontrado está bem acima do mínimo, a emulsão está de acordo com as especificações da norma quanto ao teor de resíduo seco. O quadro 05 mostra os resultados encontrados no ensaio de teor de resíduo seco.



**Quadro 04:** Resultados do teor de resíduo seco.

Conjunto (g)	Conjunto + amostra (g)	Conjunto + amostra seca (g)	Resíduo Seco
285,54	388,44	372,21	84,23%

Fonte: Próprio Autor, 2020.

### 6.2.3 Sedimentação

No ensaio de determinação da sedimentação, o resultado obtido foi de 0,57%. De acordo com a norma DNIT 165/2013 - ME, a sedimentação máxima permitida é de 5%. Logo, a sedimentação encontrada está abaixo do limite exigido. O quadro 06 contém os resultados do ensaio de sedimentação.

**Quadro 05:** Resultados do ensaio de sedimentação.

Amostra	Resíduo Seco	Resíduo Seco Médio	Sedimentação	Repetibilidade
Fundo 1	68,93%	68,92%	0,57%	0,03%
Fundo 2	68,90%			
Topo 1	68,52%	68,34%		0,36%
Topo 2	68,16%			

Fonte: Próprio Autor, 2020.

Como a repetibilidade está abaixo de 0,4%, como exige a ABNT NBR 6570/2016, para resultados de sedimentação até de 1%, a emulsão está de acordo com as especificações quanto a esse critério.

### 6.3 Dosagem Solo-emulsão

Por se tratar de um solo fino, optou-se por seguir as propostas de Yoder e Witczak (1995) e Winterkon e Fang (1975), respectivamente, 4% a 8% e 4% a 7%. Logo, adotou-se os valores extremos dessas propostas, 4% e 8%. Afim também, de observar a afirmação de Ingles e Metcalf (1972), sobre grandes quantidades de betume resultaram na diminuição da resistência, adotou-se também um valor de 12%. As amostras analisadas podem ser observadas no quadro 06.

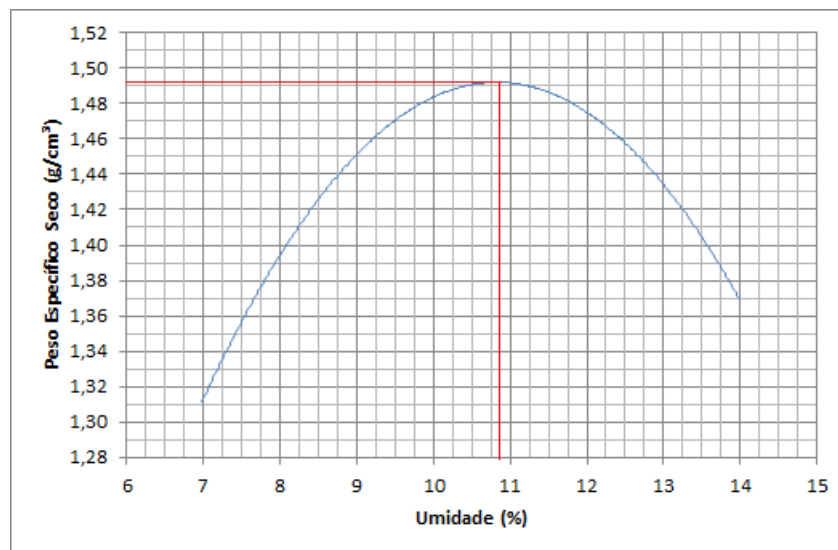
**Quadro 06:** Amostras Analisadas.

Composição	Amostras			
	Solo	Solo-Emulsão I	Solo-Emulsão II	Solo-Emulsão III
Solo	100%	96%	92%	88%
Emulsão Asfáltica	-	4%	8%	12%

Fonte: Próprio Autor, 2020.

## 6.4 Compactação

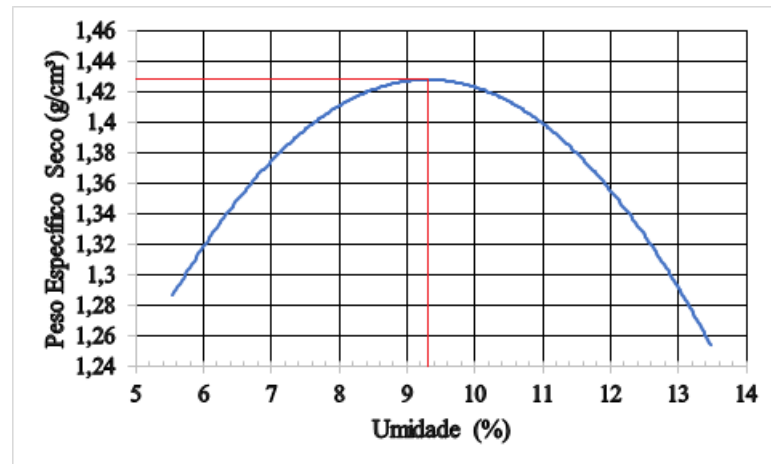
Na determinação da umidade dos corpos de prova contendo emulsão, foram coletadas amostras contendo apenas solo, tendo em vista que existe a presença de água na emulsão e que isso afetaria os resultados de umidade. O gráfico 03 apresenta a curva de compactação do solo natural.

**Gráfico 03:** Compactação – Solo Natural.

Fonte: Próprio Autor, 2020.

Logo, a umidade ótima para o solo natural é, aproximadamente, 10,8% e que o peso específico seco máximo que ele atinge é cerca de 1,49 g/cm<sup>3</sup>. O gráfico 04 apresenta a curva de compactação para a mistura solo-emulsão.

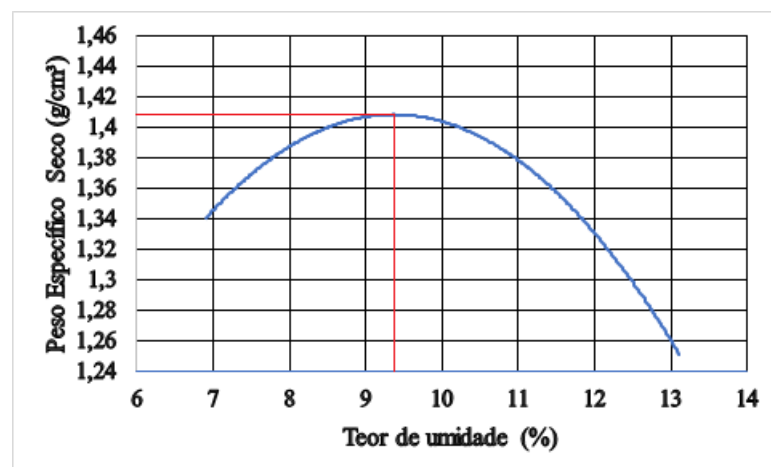
**Gráfico 04:** Compactação – Solo-Emulsão I (4% emulsão).



Fonte: Próprio Autor, 2020.

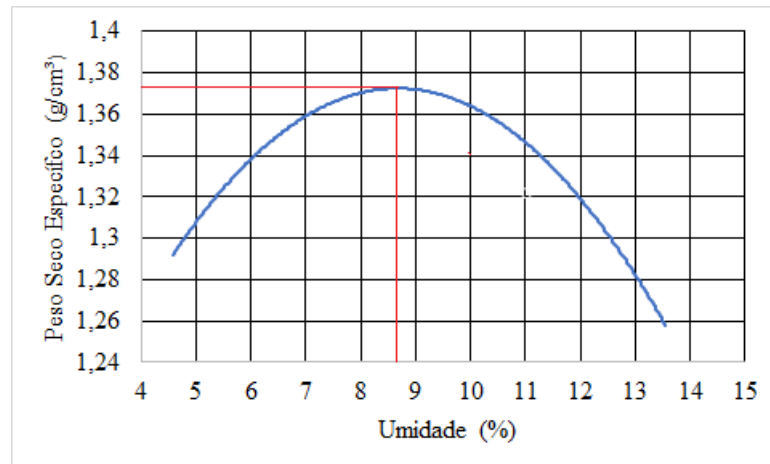
Observa-se que ao estabilizar o solo com a emulsão, sua umidade ótima reduziu. Isso implica dizer que, para estabilizar o solo-emulsão com a compactação, o mesmo necessitaria de menos água do que o solo normal. O gráfico 5 apresenta a curva de compactação para a mistura solo-emulsão II.

**Gráfico 05:** Compactação – Solo-Emulsão II (8% emulsão).



Fonte: Próprio Autor, 2020.

Mesmo após o aumento da porcentagem de emulsão misturada ao solo, a umidade ótima continuou basicamente a mesma, aproximadamente, 9,3%. Porém, o peso específico seco diminuiu, isso se dá pela maior presença de emulsão no solo. O gráfico 06 apresenta a curva de compactação da mistura solo-emulsão III.

**Gráfico 06:** Compactação – Solo-Emulsão III (12% emulsão).

Fonte: Próprio Autor, 2020.

Observa-se que a umidade ótima diminuiu novamente, assim como o peso específico máximo. Isso implica que, o aumento da porcentagem de emulsão na mistura afeta o grau de compactação, diminuindo o seu peso específico máximo e sua umidade ótima, resultando na diminuição de resistência do solo. Isso se deve por conta da água presente na própria emulsão, que afeta a quantidade de água na mistura. O quadro 07 contém os resultados de todas as amostras. Ou seja, quanto mais emulsão se aplica no solo, mais úmido ele fica.

**Quadro 07:** Resultados da Compactação.

Situação	Umidade Ótima (%)	Peso Específico Seco (g/cm³)
Solo Natural	10,8	1,491
Solo-Emulsão I (4%)	9,3	1,428
Solo-Emulsão II (8%)	9,3	1,41
Solo-Emulsão III (12%)	8,6	1,375

Fonte: Próprio Autor, 2020.

Os valores de umidade ótimas obtidos nos ensaios de compactação, representam as porcentagens ideais de água para cada amostra, para que a mesma possa atingir um melhor grau de compactação. Assim, para os ensaios de Expansão e CBR, realizados em cada amostra, foram utilizados seus respectivos valores de umidade ótima.

## 6.5 Expansão e CBR

O quadro 08 contém os resultados obtidos nos ensaios de expansão e CBR, de cada amostra analisada. Nota-se que o solo em questão, trata-se de um solo que não apresenta grande grau expansão. Se não fosse pelo seu baixo CBR, poderia até ser utilizado como material para a camada de base dos pavimentos. Porém, por apresentar CBR igual a 18,76%, só poderia ser utilizado como material para reforço de subleito.

**Quadro 08:** Resultados dos ensaios de Expansão e CBR.

Situação	Expansão (%)	CBR (%)
Solo Natural	0,494	18,76
Solo-Emulsão I (4%)	0,238	17,56
Solo-Emulsão II (8%)	0,31	16,48
Solo-Emulsão III (12%)	0,78	13,10

Fonte: Próprio Autor, 2020.

Nota-se que ao adicionar 4% de emulsão ao solo, o mesmo apresentou uma menor expansão. O mesmo ocorre para a amostra contendo 8% de emulsão. Porém, para a amostra contendo 12% de emulsão houve um aumento da sua expansão, embora ainda esteja no limite aceitado para sub-base e reforço, isso implica dizer que para valores muito altos a emulsão deixa de ser efetiva contra a expansão. Além do mais, observa-se que quanto maior for a adição de emulsão, menor é o CBR da amostra. Logo, quanto maior for a quantidade de emulsão menor será a capacidade de suporte do solo-emulsão. O quadro 09 apresenta as condições definidas pelo DNIT, para a utilização de materiais em camadas de base, sub-base e reforço de subleito.

**Quadro 09:** Limites de expansão e CBR.

Referência NBR 15115/2004		
Tipo	Expansão	CBR
Base	$\leq 0,5\%$	$\geq 60\%$
Sub-base	$\leq 1\%$	$\geq 20\%$
Reforço	$\leq 1\%$	$\geq 12\%$

Fonte: Adaptado, DNIT, 2006.

Nota-se que o solo em questão apresenta um CBR menor que 20%, o que significa que o mesmo não pode ser utilizado em base ou sub-bases de pavimentos. A mistura com emulsão

não fez sua resistência aumentar, o que já era previsto, pois para solos finos, a principal característica analisada é a expansão.

Percebe-se também, que com o aumento de emulsão, há uma diminuição gradativa da resistência. E para a mistura solo-emulsão III (12%), a expansão foi maior que o solo natural. Como a emulsão contém água, quanto mais misturarmos, mais úmido o solo vai ficar. Ou seja, poderia se considerar, que existe um teor de água, a qual foi adicionada para melhorar o grau de compactação, e existe o teor de resíduos, por conta da emulsão.

Por conta do grande teor de resíduos, o grau de compactação do solo diminuiu. Então, ao estabilizar solos com grandes quantidades de emulsão, afeta o grau de compactação também, que acaba por diminuir a resistência e com o solo mal compactado há um aumento da expansão.

## 7 CONCLUSÃO

O solo natural analisado não apresentou uma grande expansão, característica que deveria ser melhorada com a adição de emulsão. Mesmo assim, foi possível notar, que a expansão do solo foi de 0,494%. Com a adição de 4% de emulsão, essa expansão diminuiu para 0,238% e com 8%, a expansão foi de 0,31%. Logo, percebe-se que houve uma melhora no controle da expansão do solo, isso se deu por conta da emulsão ter melhorado a impermeabilidade do solo, o que diminuiu a quantidade de água infiltrada no mesmo e conseqüentemente sua expansão.

Entretanto, com a adição de 12% de emulsão, nota-se que a expansão aumentou para 0,78% e que seu CBR diminuiu de 18,76% para 13,1%. Assim, é possível dizer, que não se deve utilizar teores de emulsão muito grandes, pois resulta na diminuição do atrito entre os grãos e, conseqüentemente, da resistência da mistura.

Nota-se também que mesmo com o aumento da emulsão a impermeabilidade não impediu a entrada de água e conseqüentemente houve o aumento da expansão. Isso pode ser devido ao fato da água presente na emulsão, que altera a umidade desejada da mistura na hora da compactação, o que resulta numa má compactação.

Esse estudo evidencia que a emulsão pode ser utilizada para melhorar a impermeabilidade de solos finos, diminuindo sua expansão e confirma que, para que a estabilização química em solos finos, utilizando emulsão asfáltica, atinja os melhores resultados, deve-se utilizar entre 4% a 8% de emulsão, conforme as recomendações de pesquisadores dessa área. O que incentiva a realização de mais estudos sobre esse assunto, afim de servir como base para a criação de uma norma de dosagem da mistura solo-emulsão.

Como sugestão para trabalhos futuros recomenda-se: Analisar o efeito da emulsão nos solos grossos; buscar um teor ideal de emulsão para mistura; caracterizar as amostras por meio de ensaios adicionais de caráter físico-mecânico, tais como: índice de forma, deformação permanente, módulo de resiliência, resistência por compressão simples, análise microscópica e permeabilidade; avaliar se é melhor o solo está úmido ou seco quando for fazer a mistura.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABEDA. **Manual básico de emulsões asfálticas**. 2. Ed. Rio de Janeiro, 2010.

ABCR. **Relatório anual**. São Paulo, 2019.

ABNT. **NBR 6297**: Emulsão asfáltica de ruptura lenta – Determinação da ruptura – Método da mistura com cimento. Rio de Janeiro, 2012.

ABNT. **NBR 6299**: Emulsões Asfálticas – Determinação do pH. Rio de Janeiro, 2012.

ABNT. **NBR 6567**: Ligantes asfálticos – Emulsões asfálticas – Determinação da carga de partícula. Rio de Janeiro, 2015.

ABNT. **NBR 6568**: Emulsões asfálticas – Determinação do resíduo de destilação. Rio de Janeiro, 2005.

ABNT. **NBR 6569**: Emulsões catiônicas – Determinação da Desemulsibilidade. Rio de Janeiro, 2008.

ABNT. **NBR 6570**: Ligantes asfálticos – Determinação da sedimentação e estabilidade à estocagem de emulsões asfálticas. Rio de Janeiro, 2016.

ABNT. **NBR 14393**: Emulsões asfálticas – Determinação da peneiração. Rio de Janeiro, 2012.

ABNT. **NBR 14376**: Ligantes asfálticos – Determinação do teor do resíduo seco de emulsões asfálticas convencionais ou modificadas – Métodos Expeditos. Rio de Janeiro, 2019.

ABNT. **NBR 14491**: Emulsões asfálticas – Determinação da viscosidade Saybolt Furol. Rio de Janeiro, 2007.

ABNT. **NBR 14594**: Emulsões asfálticas catiônicas – Requisitos. Rio de Janeiro, 2017.

AEMA. **Asphalt emulsion**: a basic asphalt emulsion manual. Manual Series No. 19. New York, 2004.



BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. **Pavimentação asfáltica**: formação básica para engenheiros. 3. Ed. Rio de Janeiro, 2008.

CNT. **Pesquisa rodoviária 2018**. Disponível em: <<https://www.cnt.org.br>>. Acesso em: 10 out. 2020.

CNT. **Pesquisa rodoviária 2019**. Disponível em: <<https://www.cnt.org.br>>. Acesso em: 10 out. 2020.

CRISTELO, Nuno Miguel Cordeiro. **Estabilização de solos residuais graníticos através da adição de cal**. 2001. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Universidade do Minho, Lisboa, 2001.

DNER. **082/94**. Solos – determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 1994.

DNER. **083/98**. Agregados – análise granulométrica. Rio de Janeiro, 1998.

DNER. **093/94**. Solos – determinação da densidade real. Rio de Janeiro, 1994.

DNIT. **Manual de Pavimentação**. 3. Ed. Rio de Janeiro, 2006.

DNIT. **164/2013-ME**. Solos – Compactação utilizando amostras não trabalhadas – Método de Ensaio. Rio de Janeiro, 2013.

DNIT. **165/2013-EM**. Emulsões asfálticas para pavimentação – Especificação de material. Rio de Janeiro, 2013.

DNIT. **172/2016-ME**. Solos – Determinação do Índice de Suporte Califórnia utilizando amostras não trabalhadas – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2016.

EMBRAPA. **Manual de métodos de análise de solo**. 3. Ed. Brasília, 2017.

HILF, J. W. **Compacted Fill**. Van Nostrand Reinhold Company. New York, 1991.

INGLES, O. G.; METCALF, J. B. **Soil stabilization: principles and practice**. Sidney, 1972.

JACINTHO, Elza Conrado. **Estudo de propriedades e comportamentos de misturas solo-emulsão aplicado a barragens**. Tese (Doutorado em Geotecnia) – Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2010.

JAMES, Alan. **Overview of Asphalt Emulsion**. Asphalt Emulsion Technology, Transportation Research Board, Washington, D.C., 2006.

NASCIMENTO, U. **Princípios e âmbito de aplicação da estabilização de solos**. Curso de Estabilização de Solo 108: Estabilização de Solos. Lisboa, 1970.

OLIVEIRA, Jule de Souto Matias. **Caracterização e estabilização de um solo para utilização em camada de base e sub-base de pavimento flexível**. Monografia (Bacharelado em Engenharia Civil), Campus VIII, Universidade Estadual da Paraíba, Araruna, 2019.

SAMPAIO, Mirian Guillen. **Comportamento mecânico e hídrico de solos estabilizados com emulsão asfáltica**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2008.

SANT'ANA, Walter Canales. **Contribuição ao estudo de solo-emulsão em pavimentos de rodovias de baixo volume de tráfego para o estado do Maranhão**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

SANTOS, Washington José. **Avaliação do uso de emulsão asfáltica na estabilização química de três solos de Sergipe**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2009.

SARTORI, Guilherme. **Estudo de estabilização de solos para fins de pavimentação na região de campo mourão**. Monografia (Bacharelado em Engenharia Civil) – Departamento Acadêmico de Construção Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão, 2015.

SUAREZ, D. A. A. **Estudo do comportamento mecânico de dois solos lateríticos do estado de São Paulo com adição de emulsão asfáltica**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.

YODER, E. J.; WITCZAK, M. W. **Principles of Pavement Desing.** 2. Ed. New York. 1975.

WINTERKORN, H. F.; FANG, H. Y. **Foundation engineering hanbook.** 1. Ed. New York, 1975.