



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

AMANDA CRISTINE DA SILVA

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE SOLO ESTABILIZADO COM
EMULSÃO ASFÁLTICA, APLICADO A PAVIMENTAÇÃO**

MOSSORÓ
2019

AMANDA CRISTINE DA SILVA

**ESTUDO DO COMPOTAMENTO MECÂNICO DE SOLO ESTABILIZADO COM
EMULSÃO ASFÁLTICA, APLICADO A PAVIMENTAÇÃO**

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

Orientador: Felipe Augusto Dantas de
Oliveira, Prof.

MOSSORÓ

2019

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

S586e Silva, Amanda Cristine da.
ESTUDO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE SOLO
ESTABILIZADO COM EMULSÃO ASFÁLTICA, APLICADO A
PAVIMENTAÇÃO / Amanda Cristine da Silva. - 2019.
44 f. : il.

Orientador: Felipe Augusto Dantas de Oliveira.
Monografia (graduação) - Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Curso de Engenharia Civil,
2019.

1. Estabilização . 2. CBR. 3. Teores. 4.
Classificação . 5. Expansão. I. Oliveira, Felipe
Augusto Dantas de , orient. II. Título.

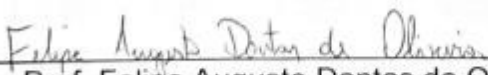
AMANDA CRISTINE DA SILVA

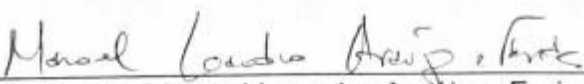
**ESTUDO DO COMPOTAMENTO MECÂNICO DE SOLO ESTABILIZADO COM
EMULSÃO ASFÁLTICA, APLICADO A PAVIMENTAÇÃO**

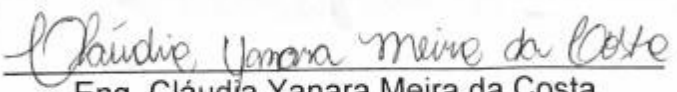
Monografia apresentada a Universidade
Federal Rural do Semi-Árido como requisito
para obtenção do título de Engenheira Civil.

Defendida em: 12 / 08 / 2019.

BANCA EXAMINADORA


Prof. Felipe Augusto Dantas de Oliveira
Presidente


Prof. Me. Manoel Leandro Araújo e Farias
Membro


Eng. Cláudia Yanara Meira da Costa
Membro

AGRADECIMENTOS

Espero poder de alguma forma retribuir todo conhecimento, disponibilidade, amizade e amor que me foram concedidos durante a execução desse trabalho.

Agradeço primeiramente a Deus por sempre está ao meu lado sendo minha luz ao longo desta graduação.

A minha mãe Maria Luzineide e minha vó Franscisca Caetano por serem mulheres tão fortes e exemplos para mim. Aos meus irmãos Adonis Yvês e Arthur Silva por compreenderem todas as minhas ausências, amo vocês.

Ao meu querido namorado Mateus Martins por toda paciência e dedicação ao nosso relacionamento.

Ao meu Orientador Felipe Augusto por toda orientação e disponibilidade durante a execução deste trabalho.

Gostaria de agradecer em especial aos melhores professores, aos que me mostraram a importância de ser uma boa profissional, Rosendo Sobrinho, Felipe Augusto, Maria Josicleide, Marineide Jussara e Rafael Bezerra.

Gostaria de agradecer aos meus amigos, Luana Dantas, Claudia Costa, Maryane Holanda, Victor Hugo, Kalyude, Emilly, Carlos, Elves Monteiro, Wesllyane e Valteson. Obrigada por existirem, sem vocês não seria capaz de chegar até aqui.

RESUMO

A estabilização de solo é uma das ferramentas utilizadas quando o material para utilização no pavimento não garante o suporte de carga suficiente que o projeto requeira. O trabalho visa à análise da utilização da emulsão asfáltica para a estabilização de solos no município de Mossoró-RN. Foram caracterizadas amostras de solos por meio dos ensaios de granulometria, limites de consistência e massa específica, para se escolher o material que mais assemelhe à amostra requerida. Utilizou-se de quatro teores diferentes de emulsão asfáltica para a análise, sendo eles 0,5%, 2,5%, 5,0% e 6,5%. Foram realizados ensaios de compactação e CBR e com isso feito análises comparativas com o solo puro. Os menores teores de emulsão foram os que obtiveram os resultados mais satisfatórios, sendo a menor expansão para o valor de 5,0% e o melhor CBR para 0,5%.

Palavras-chave: Estabilização. Classificação. Teores. Expansão. CBR.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Disposição das camadas do pavimento rígido	14
Figura 2: Disposição das camadas do pavimento flexível.....	14
Figura 3: Descrição das camadas do pavimento flexível	15
Figura 4: Classificação dos solos.	18
Figura 5: Classificação do solo pelo SUCS.....	19
Figura 6: Processo produtivo da emulsão asfáltica.	23
Figura 7: Aplicações da emulsão asfáltica.	24
Figura 8: Fluxograma das atividades realizadas.....	25
Figura 9: Pontos de coleta das amostras.....	26
Figura 10: Locais de retirada das amostras	27
Figura 11: Amostras para caracterização.....	29
Figura 12: Sequência de peneiras para o peneiramento fino.	30
Figura 13: Sequência de peneiras para o peneiramento grosso.	30
Figura 14: Ensaio de limite de liquidez	31
Figura 15: Ensaio de massa específica	32
Figura 16: Aplicação de golpes.	33
Figura 17: Balança determinadora de umidade	34
Figura 18: Solo e emulsão preparados.....	35
Figura 19: Processo de homogeneização dos componentes	35
Figura 20: Moldagem e imersão dos corpos de prova.....	36
Figura 21: Rompimento dos corpos de prova.....	37
Figura 22: Distribuição Granulométrica.....	39
Figura 24: Classificação das amostras.....	40
Figura 25: Gráfico de compactação.....	41
Figura 26: Resultados do CBR.	43

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Localização geográfica dos pontos de coleta.	27
Tabela 2: Composição da emulsão.	27
Tabela 3: Quantidade de amostra para análise granulométrica	29
Tabela 4: Valores de CNU e CC para as amostras.	39
Tabela 5: Medições no relógio comparador ao longo das 96 horas.	42
Tabela 6: Expansão das amostras após 96 horas.	42
Tabela 7: Resultados para CBR.....	43

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
2	OBJETIVOS	12
2.2	OBJETIVO GERAL	12
2.3	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	12
3	REFERENCIAL TEÓRICO	13
3.1	PAVIMENTOS	13
3.1.1	Tipos de Pavimentos.....	13
3.1.2	Estrutura do pavimento flexível.....	15
3.2	SOLOS PARA PAVIMENTAÇÃO.....	17
3.2.1	Descrição dos solos	17
3.2.2	Ensaio de caracterização	19
3.3	ESTABILIZAÇÃO DOS SOLOS	19
3.3.1	Estabilização granulométrica.....	20
3.3.2	Estabilização mecânica	20
3.3.3	Estabilização química	20
3.4	EMULSÃO ALFÁTICA	21
3.4.1	Componentes	22
3.4.2	Processo de produção da emulsão.....	23
3.4.3	Classificação.....	23
3.4.4	Aplicação.....	24
4	METODOLOGIA.....	25
4.1	SELEÇÃO DE MATERIAIS.....	26
4.1.1	Solo	26
4.1.2	Emulsão.....	27
4.2	ENSAIOS PARA CARACTERIZAÇÃO DOS SOLOS	28
4.2.1	Peneiramento	29
4.2.2	Limites de consistência.....	30
4.2.3	Massa específica.....	32
4.3	ENSAIOS MECÂNICOS	32
4.3.1	Ensaio de compactação	32
4.3.2	Ensaio CBR.....	34
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	38
5.1	CARACTERIZAÇÃO DOS SOLOS.....	38
5.1.1	Granulometria.....	38

5.1.2	Limites de Consistência	39
5.1.3	Massa específica.....	40
5.1.4	Classificação do solo.....	40
5.2	ENSAIOS MECÂNICOS	41
5.2.1	Ensaio de compactação	41
5.2.2	Ensaio CBR.....	41
	CONCLUSÕES.....	44
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	45

1 INTRODUÇÃO

No Brasil, a pavimentação é de grande importância para sociedade, visto que 75,9% do transporte responsável pelas empresas embarcadoras de produtos são por meio das rodovias, seguido por 9,2% do marítimo (FDC, 2017). Isso resulta em um ponto fundamental na economia do país, tendo em vista que desde as maiores cidades até os interiores mais distantes se comunicam por meio de rodovias, gerando assim uma teia de relações comerciais.

Uma problemática importante é o número alto de rodovias não pavimentadas ou necessitando de manutenção, sendo 78,5% de rodovias não pavimentadas (CNT, 2018). Estes problemas geram diminuição na qualidade de viagem e principalmente acarretam aumento no tempo total, causando dificuldades durante o traslado e encarecimento do mesmo.

Uma forma de solucionar essas dificuldades é por meio da estabilização dos solos. Pode ser feita a estabilização utilizando um estabilizante para melhorar suas características mecânicas, que pode ser realizada com cal, material asfáltico, cimento Portland e entre outros materiais.

A cidade de Mossoró não fica distante deste cenário. Esse Município faz divisa com estado do Ceará, como também é situada próximo a várias cidades do estado do Rio Grande do Norte, dessa forma, é um ponto de ligação bastante utilizado entre os dois estados. Além de ser um ponto de passagem “obrigatória” entre as cidades vizinhas e o Ceará, ela também está no caminho que liga as duas capitais dos estados citados. Assim percebe-se a necessidade de fazer estudos no campo de pavimentação.

Visando solucionar estes problemas, percebe-se a necessidade de que haja pavimentação e manutenção das vias públicas, mas existem dificuldades para realização. Os solos locais muitas vezes não possuem capacidade de suporte suficiente para o projeto e aliado a isso se tem a logística de distância até as jazidas, podendo muitas vezes ser inviável adquirir esses materiais. Dessa forma, é necessário encontrar um artifício para melhorar as características do solo e torna-lo adequado para aplicação.

O modal rodoviário é muito utilizado para o transporte de passageiros e de cargas, por isso se faz necessário estudos para melhorias e barateamento no processo de pavimentação das rodovias brasileiras. Desta forma, analisar a possibilidade da utilização da emulsão asfáltica para estabilização da camada de base no município de Mossoró é de muita valia para os estudos na área de pavimentação.

2 OBJETIVOS

2.2 OBJETIVO GERAL

Avaliar a utilização de solos estabilizados com emulsão asfáltica para o município de Mossoró.

2.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterização física dos solos;
- Determinação dos teores de emulsão para a mistura;
- Obter valores das propriedades mecânicas para a mistura solo- emulsão e analisá-las.
- Executar a caracterização dos solos afim de se obter os parâmetros necessários para a análise;
- Definir o solo apropriado para a realização do estudo;
- Estimar os teores de emulsão
- Analisar as propriedades mecânicas das misturas de solos-emulsão.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 PAVIMENTOS

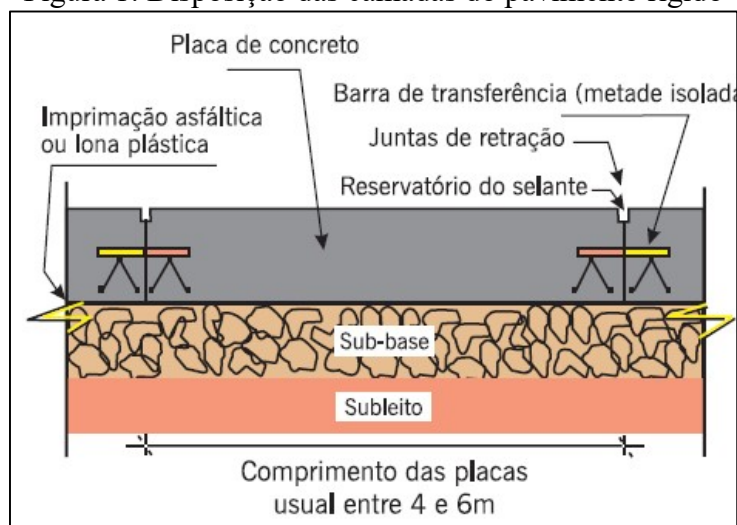
De acordo com a Confederação Nacional de Transportes (CNT) (2017), pavimento é uma estrutura composta por várias camadas dispostas uma acima da outra que assistem os translados de veículos, e o mesmo deve ser feito de maneira segura, confortável e durável.

3.1.1 Tipos de Pavimentos

O pavimento compreende um conjunto de camadas finitas sobre uma fundação que é denominada de subleito, e esse conjunto de camadas deve proporcionar aos usuários uma superfície de rolamento que atenda as especificações de conforto, segurança e economia para o desenvolvimento do tráfego nas vias em velocidade estabelecida. Além disso, devem ser mantidas as características em quaisquer condições climáticas encontradas. O comportamento do pavimento como estrutura depende das espessuras das camadas e das respectivas rigidezes de cada uma. Os pavimentos rodoviários se classificam em dois tipos, rígidos ou flexíveis (BERNUCCI *et al.*, 2008).

Os pavimentos rígidos também denominados por pavimentos de concreto são constituídos de uma placa de cimento Portland. O dimensionamento da espessura deste tipo de pavimento é feito de acordo com a resistência a flexão das placas de concreto em associação com a resistência alcançada nas demais camadas. Desta forma, pode-se afirmar que o pavimento rígido possui menos camadas que o pavimento flexível. Na Figura 1, é possível observar de forma detalhada as camadas do pavimento rígido (BERNUCCI *et al.*, 2008).

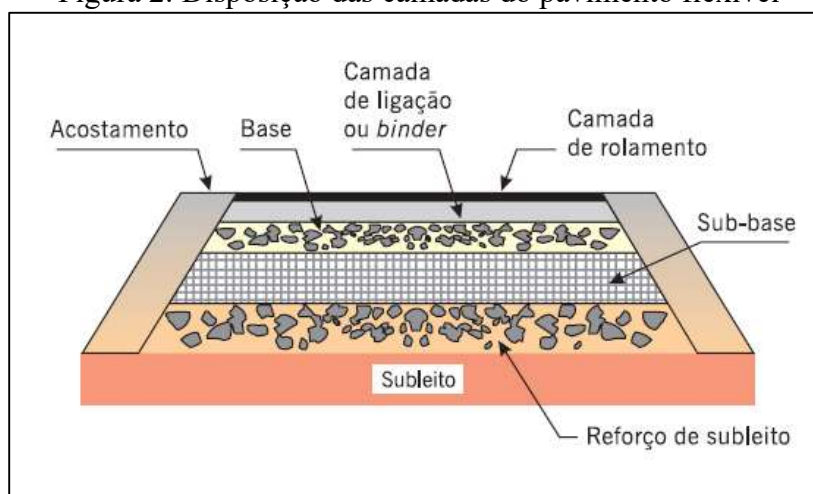
Figura 1: Disposição das camadas do pavimento rígido



Fonte: BERNUCCI *et al.*, (2008).

Os pavimentos flexíveis, por sua vez, possuem um revestimento em que sua mistura é constituída de forma básica por agregados e ligantes asfálticos. Na sua disposição há quatro camadas básicas principais que são: o revestimento asfáltico, a base, a sub-base e o reforço do subleito, como pode ser observado pela Figura 2. Mas nem sempre se tem a presença de todas essas camadas, isso irá depender das necessidades do subleito. Além disso, o revestimento asfáltico pode ser constituído por uma camada de rolamento, em contato direto com as rodas dos transportes e por camadas intermediárias ou de ligação também chamadas de *binder* (BERNUCCI *et al.*, 2008).

Figura 2: Disposição das camadas do pavimento flexível



Fonte: Fonte: BERNUCCI *et al.*, (2008).

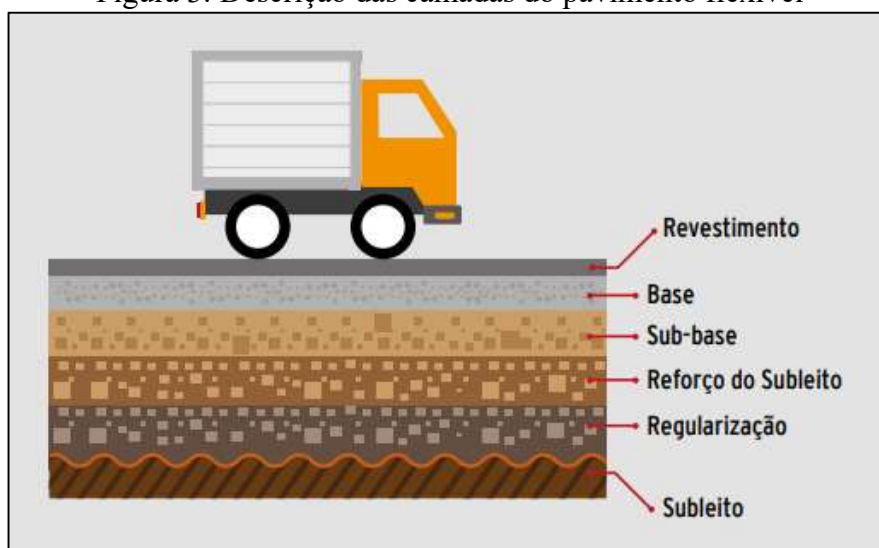
Ainda que o pavimento rígido apresente mais vantagens quando comparado ao pavimento flexível, o último ainda é muito utilizado no Brasil. A grande demanda por este

tipo de pavimento no nosso país se dá devido a elevada disponibilidade de recursos petrolíferos, resultando numa grande utilização de pavimentos asfálticos, sendo o 15º produtor de petróleo, mostrando a importância do estudo deste tema (BBC, 2019).

3.1.2 Estrutura do pavimento flexível

De acordo com CNT (2017), ao receber os esforços provenientes do tráfego, o pavimento deve repassá-los as camadas inferiores de modo a aliviar as tensões. No pavimento, as cargas devem ser transmitidas de forma que não ocorram deformações ou rupturas da estrutura. A Figura 3 apresenta as camadas presentes no pavimento flexível.

Figura 3: Descrição das camadas do pavimento flexível



Fonte: CNT (2017).

3.1.2.1 Subleito

O terreno de fundação do pavimento é denominado de subleito (DNIT, 2006). O subleito é uma camada de fundação onde o pavimento é apoiado. Essa camada é incumbida por absorver de forma definitiva os esforços verticais advindos do tráfego. A constituição do subleito é o material natural que foi compactado e consolidado. Acima da camada do subleito é necessária ser feita uma camada de regularização, se essa camada for realizada após o processo de terraplanagem será necessária apenas correções de algumas falhas, mas se não, haverá a necessidade de efetuar maiores cuidados. O material a ser utilizado no reforço do subleito deverá ser preferivelmente do próprio subleito, porém, caso não seja possível, então deverá ser retirado de jazidas (CNT, 2017).

3.1.2.2 Reforço do Subleito

O reforço do subleito é uma camada que é necessária quando a capacidade de suporte do subleito é baixa, para não se ter uma sub-base de espessura grande. O reforço é feita após a regularização do subleito, possuindo espessura transversal constante e espessura longitudinal conforme o dimensionamento do pavimento. Um exemplo de materiais utilizados é o solo ou combinações de solos (CNT, 2017). Nesta camada o material da sua composição deve ter características geotécnicas maiores que o subleito e inferiores as camadas posteriores (DNIT, 2010).

3.1.2.3 Sub-base

Consiste em uma camada complementar à base. A sua utilização é justificada por questões técnicas e econômicas, quando não é conveniente construir a base acima do subleito. (DNIT, 2010). Quando for necessária, a sub-base deverá funcionar como uma camada drenante, além de controlar a ascensão capilar. Esta camada geralmente é constituída por solo estabilizado, podendo ser por misturas de solos e agregados, brita graduada e tratada com cimento, utilizando ligantes asfálticos, entre outros.

3.1.2.4 Base

Camada designada a suportar os esforços advindos do tráfego sobre o qual é construído o revestimento asfáltico (DNIT, 2010). A resistência à esforços da base está ligada diretamente a resistência dos materiais utilizados na sub-base, mas devem ter resistência maior que as camadas inferiores. Os materiais aplicados na base podem ter a necessidade de aplicação de uma camada de espessura fina de asfalto e esta camada pode ser imprimação ou pintura asfáltica (CNT, 2017).

3.1.2.5 Revestimento

O revestimento é uma camada que recebe diretamente os esforços ocasionados pelos veículos e espera-se que essa camada seja a mais impermeável possível. Além disso, deve ser dimensionada de modo a dar as melhores condições de rolamento, garantindo, desta forma,

conforto, segurança e durabilidade. Por motivos econômicos essa camada pode ter dois ou mais materiais na sua composição (CNT, 2017).

3.2 SOLOS PARA PAVIMENTAÇÃO

O solo é considerado como sendo um material da superfície da terra, podendo ser orgânico ou não, sem consolidação ou parcialmente cimentado. De maneira sucinta, tem-se que solo é aquele material que pode ser retirado por escavação, por meio de uma pá, picareta, escavadeira e entre outros, mas que não necessite a utilização de explosivos (DNIT, 2006).

As estradas possuem melhor desempenho quando estão dispostas sobre solos granulares, com fração “fina” o suficiente para proporcionar alguma coesão para o solo (DNIT, 2010).

3.2.1 Descrição dos solos

O solo pode ser classificado por diversas características dele, entre elas a dimensão dos seus grãos. O DNIT (2006) adota a seguinte escala granulométrica para frações de solo:

- Pedregulho: consiste na fração de solo passante na peneira (3”) e retido na peneira de 2,00 mm (nº10);
- Areia: consiste na fração de solo passante na peneira de 2,00 mm (nº 10) e é retida na peneira de 0,075mm (nº200);
- Areia grossa: compreende a fração de solo entre as peneiras 2,00 mm (nº10) e 0,42mm (nº40);
- Areia fina: é a fração entre as peneiras de 0,42 mm (nº 40) e 0,075 mm (nº200);
- Silte: consiste na fração com tamanho de grãos entre peneira de 0,075 mm (nº 200) e 0,005 mm;
- Argila: consiste na fração com tamanho de grãos abaixo de 0,005 mm (argila coloidal é a fração com tamanho de grãos abaixo de 0,001 mm).

Porém, solos encontrados na natureza não possuem apenas uma das frações anteriormente citadas, estes se apresentam como uma mistura de variadas frações. Desta forma, outros critérios acabam sendo necessários para uma melhor classificação destes materiais. Além da granulometria, alguns outros índices utilizados para a classificação podem

ser, como por exemplo, os limites de Atterberg, conhecidos como limite de liquidez (LL) e o limite de plasticidade (LP).

Esses índices geralmente são utilizados na classificação conhecida como a classificação rodoviária dos solos, mostrado na Figura 4 ou ainda pela sigla *Highway Research Board* (HRB).

Figura 4: Classificação dos solos.

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

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

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

Fonte: DNIT (2006).

Outra forma de classificar os solos é o sistema é o Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS). Este sistema de classificação considera como parâmetros mais relevantes a distribuição granulométrica, o LL, o índice de plasticidade (IP – diferença entre o LL e o LP) e a compressibilidade do solos. Os solos podem ser classificados em 15 grupos diferentes, mostrados na Figura 5.

Figura 5: Classificação do solo pelo SUCS.

SOLOS DE GRADUAÇÃO GROSSA: mais de 50% retido na peneira nº 200	Pedregulhos: 50% ou mais da fração graúda retida na peneira nº 4	Pedregulho sem finos	GW	Pedregulhos bem graduados ou misturas de areia de ped.com pouco ou nenhum fino.
			GP	Pedregulhos mau graduados ou misturas de areia e ped.com pouco ou nenhum fino.
		Pedregulho com finos	GM	Pedregulhos siltosos ou misturas de ped.areia e silte.
			GC	Pedregulhos argilosos, ou mistura de ped.areia e argila.
	Areias: 50% ou mais da fração graúda passando na peneira nº 4	Areias sem finos	SW	Areias bem graduadas ou areias pedregulhosas, com pouco ou nenhum fino.
			SP	Areias mau graduadas ou areias pedregulhosas, com pouco ou nenhum fino.
		Areias com finos	SM	Areias siltosas - Misturas de areia e silte.
			SC	Areias argilosas - Misturas de areia e argila.
SOLOS DE GRADUAÇÃO FINA: 50% ou mais passando pela peneira nº 200	SILTES e ARGILAS com $LL \leq 50$		ML	Siltes inorgânicos - Areias muito finas - Areias finas siltosas e argilosas.
			CL	Argilas inorgânicas de baixa e média plasticidade - Argilas pedregulhosas, arenosas e siltosas.
			OL	Siltes orgânicos - Argilas siltosas orgânicas de baixa plasticidade.
	SILTES e ARGILAS com $LL > 50$		MH	Siltes - Areias finas ou siltes micáceos - Siltes elásticos.
			CH	Argilas inorgânicas de alta plasticidade.
			OH	Argilas orgânicas de alta e média plasticidade.
	Solos Altamente Orgânicos		PT	Turfas e outros solos altamente orgânicos.

Fonte: DNIT (2006).

3.2.2 Ensaios de caracterização

Para prever o comportamento do solo é preciso estudar algumas características físicas do material. E, para estudar tais características, faz-se necessário à utilização de alguns ensaios, entre eles pode-se citar: o ensaio de granulometria; limite de liquidez; limite de plasticidade, ensaio Proctor de compactação e ensaio de Capacidade de Suporte Califórnia (CBR).

3.3 ESTABILIZAÇÃO DOS SOLOS

A estabilização do solo constitui-se da utilização de uma ferramenta estabilizante, objetivando provocar alterações nas propriedades do mesmo e concedendo características que atendam de forma satisfatória as necessidades previstas em projeto. A forma de estabilizar o solo pode ser com um material granular, aditivo ou uma aplicação de energia dinâmica (GONDIM, 2008).

Geralmente, em obras de engenharia busca-se melhorar no solo propriedades como a expansibilidade, durabilidade, resistência mecânica e permeabilidade. As modificações feitas nas propriedades do solo podem ser divididas em três tipos: estabilização mecânica, estabilização granulométrica e química. (GONDIM, 2008).

3.3.1 Estabilização granulométrica

Caracteriza-se por ser uma composição dos solos de modo que resulte em uma resistência na qual seja garantida por meio do contato grão a grão das partículas maiores e ao mesmo tempo os vazios entre as partículas sejam ocupadas por um material de granulometria mais fina. Deste modo, garante-se uma maior densidade e uma menor permeabilidade (GONDIM, 2008).

Constitui-se por camadas de solos, britas e rochas, de escória de alto forno ou também podendo ser pela mistura desses componentes. Estas camadas são puramente granulares e são estabilizadas por meio de compactação (DNIT, 2006)

3.3.2 Estabilização mecânica

A estabilização mecânica consiste em métodos que modificam somente o arranjo das partículas do solo, ou seja, consiste na compactação do solo por meio da expulsão do ar rearranjo das partículas (GONDIM, 2008).

3.3.3 Estabilização química

No processo de estabilização química utiliza-se de agentes estabilizantes que ao entrarem em contato com o solo reagem de modo a modificar suas propriedades físicas, causando um melhoramento nas suas características mecânicas. Nesta forma de estabilização podem ser utilizados diversos tipos de materiais, entre eles podemos citar cal, cimento, polímeros, produtos betuminosos e entre outros (GONDIM, 2008).

3.3.3.1 Estabilização Solo-Emulsão

A estabilização com solo-emulsão ocorre normalmente com a combinação de um solo local com a emulsão asfáltica, por meio de equipamentos apropriados sendo espalhada e compactada a frio. Consiste em uma técnica alternativa considerada de baixo custo para preservação de energia. A possibilidade de estabilização com uma emulsão asfáltica depende da composição granulométrica e das características da emulsão utilizada. Para solos mais arenosos a finalidade principal da emulsão é unir os grãos, já para solos mais argilosos tem a

função de proteção para os grãos contra a umidade, ou seja, opera como um impermeabilizante (ABEDA, 2010).

A qualidade da estabilização de um solo com emulsão depende de alguns fatores, entre eles pode-se citar, um projeto de dosagem para saber o valor ótimo para o determinado solo, boas condições de mistura e compactação (ABEDA, 2010).

3.4 EMULSÃO ASFÁLTICA

Segundo *Asphalt Emulsion Manufacturers Association* (AEMA) (2019), a emulsão asfáltica é a combinação de três componentes, asfalto, água e uma pequena quantidade de um agente emulsificante. Esses três componentes são introduzidos em um mecanismo denominado de moinho coloidal, onde o asfalto é cisalhado gerando pequenas gotículas. O agente emulsificante é um tensoativo que mantém os glóbulos suspensos estáveis e controla o tempo de quebra dos mesmos. Como resultado é formado um produto de coloração marrom e consistência próxima a uma variação entre água e um creme, que é utilizado em processos a frio de construção e manutenção de estradas.

De acordo com Gondim (2008), as emulsões são caracterizadas por uma mistura heterogênea de dois ou mais constituintes imiscíveis entre si, onde ao menos um deles se apresenta de forma contínua e o outro se apresenta de forma dispersa.

As emulsões asfálticas são misturas de pequenos glóbulos de cimento asfáltico de petróleo (CAP), dispersos em água e estabilizados por tensoativos. Para se obter a emulsão é necessário combinar a água com asfalto aquecido e utilizado o agente emulsificante que proporciona estabilidade a mistura feita e beneficia a dispersão (TORRES, 2013).

A composição da emulsão asfáltica varia de acordo com o seu emprego e finalidade. Normalmente apresentam de 30 a 50% de água, 50 a 70% de cimento asfáltico e 0,1% a 2,5% de agentes emulsificantes (ABEDA, 2010).

De modo a garantir estabilidade à mistura entre os líquidos não miscíveis entre si é necessário à utilização de agitação mecânica de maneira constante ou a utilização de um componente que desacelere a separação das fases que é o caso do emulsificante (GONDIM, 2008).

3.4.1 Componentes

- Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP):

De acordo com a Associação Brasileira das Empresas Distribuidoras de Asfalto (ABEDA), o CAP consiste em um ligante betuminoso alcançado por meio da destilação do petróleo e apresenta qualidade e consistências aplicáveis para construção e manutenção de pavimentos asfálticos, devido a possuir propriedades aglutinantes, impermeabilizantes e flexibilidade, durabilidade e alta resistência à ação da maioria dos ácidos, sais e álcalis.

- Água:

Caracteriza-se como o segundo constituinte de maior importância na constituição na emulsão asfáltica. Devido apresentar minerais e outras substâncias, a utilização de água pode resultar no inverso ao que se deseja na sua aplicação (TORRES, 2013).

- Emulsificante:

São compostos com peso molecular um tanto elevado, entre 100 e 300 g/mol. Os emulsificantes possuem uma parcela hidrofílica, ou seja, possui afinidade pela água, e outra hidrofóbica, com afinidade por moléculas orgânicas (TORRES, 2013).

O emulsificante tem como finalidade diminuir a tensão superficial entre as fases da emulsão e, além disso, evitar que ocorra coalêscência que consiste na junção das partes separadas (GONDIM, 2018).

Além dos emulsificantes pode existir a presença de outros aditivos, que podem ser incorporados durante a presença do processo de fabricação (ABEDA, 2010).

- Solvente:

É um constituinte que deve possuir compatibilidade com o asfalto, diminuindo a viscosidade, dando mais facilidade ao processo de emulsificação e resultando em uma mistura homogênea. Afim de não deixar resíduos no asfalto é necessário que o solvente seja volátil (TORRES, 2013).

- Aditivos:

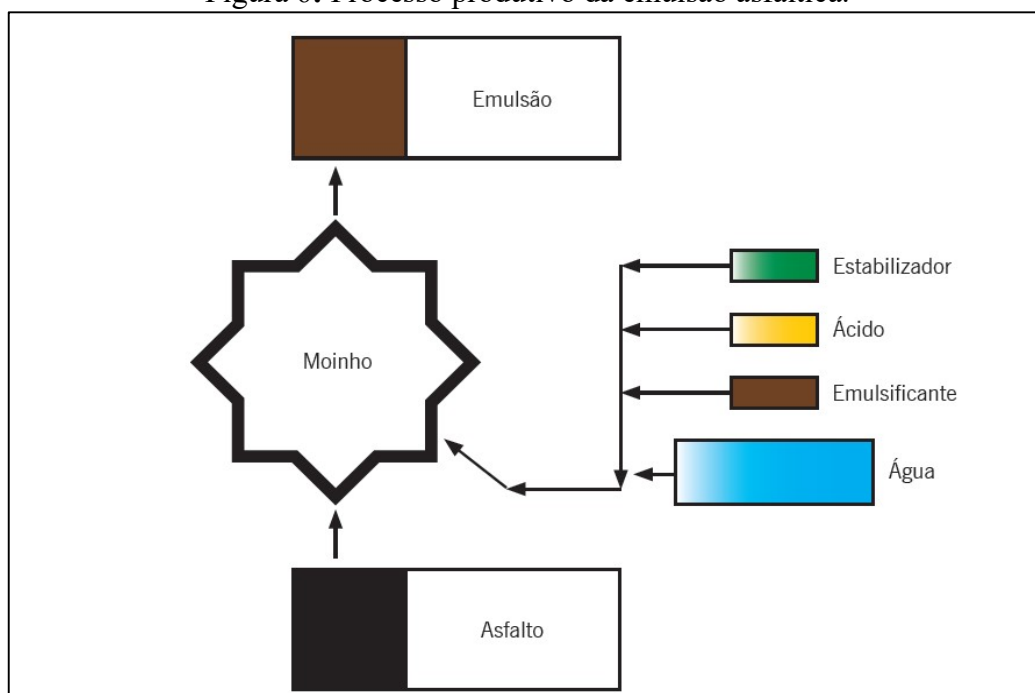
O aditivo a ser aplicado dependerá do tipo de emulsão a ser efetuada, como exemplo de aditivos tem-se os ácidos e estabilizantes (TORRES, 2013).

3.4.2 Processo de produção da emulsão

O processo de produção da emulsão asfáltica necessita da quebra do CAP em partículas micrométricas e que o mesmo fique disperso em meio aquoso. É utilizado o moinho coloidal para promover o cisalhamento do cimento asfáltico por meio da energia térmica e mecânica, como pode ser visualizado na Figura 6 (ADEBA, 2010).

O cimento asfáltico é aquecido normalmente a temperaturas de 140 a 145 °C, a solução aquosa é entre 50 a 60 °C, no qual já se encontram previamente dissolvidos os agentes emulsificantes (ADEBA, 2010).

Figura 6: Processo produtivo da emulsão asfáltica.



Fonte: ADEBA (2010).

3.4.3 Classificação

É possível classificar a emulsão de duas formas, quanto ao tipo de carga da partícula e quanto ao tempo de ruptura. Em relação a carga da partícula ela pode ser catiônica, aniônica,

neutra e anfotéricas. Já em relação ao tempo de ruptura pode se classificar como ruptura rápida, ruptura média, ruptura lenta e ruptura controlada.

3.4.4 Aplicação

As emulsões asfálticas possibilitam aplicação em diversas camadas do pavimento, podendo ser utilizada desde a construção de pavimentos novos até restauração de pavimentos com problemas (ABEDA, 2010). A Figura 7 mostra a vasta gama de aplicações da emulsão asfáltica, entre elas podemos observar a estabilização de solos que é foco do trabalho em questão.

Figura 7: Aplicações da emulsão asfáltica.



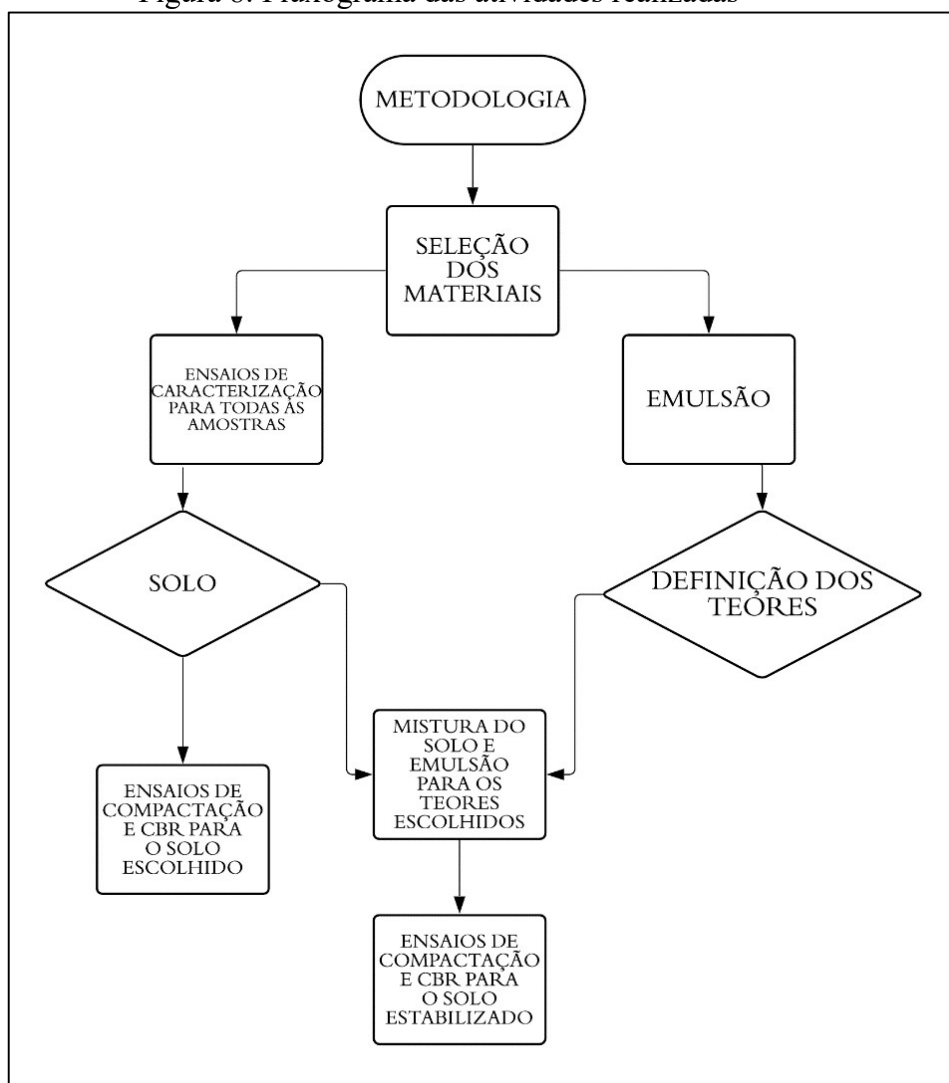
Fonte: ABEDA (2010).

4 METODOLOGIA

Realizou-se uma pesquisa de caráter experimental. Todos os procedimentos e ensaios realizados foram baseados nas normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). Além disso, para pesquisa bibliográfica foram utilizados o Manual do DNIT (2006) e trabalhos acadêmicos publicados na área.

A metodologia deste trabalho é dividida entre três etapas. Inicialmente foi realizada a seleção dos materiais: solo e emulsão. Para a segunda etapa, foram realizados os ensaios de caracterização do solo, sendo executados o de peneiramento, limite de liquidez, limite de plasticidade e o de massa específica. A terceira etapa compreende os ensaios mecânicos, sendo estes o de compactação e o CBR. A sequência está ilustrada no fluxograma que compõe a Figura 8.

Figura 8: Fluxograma das atividades realizadas



Fonte: Autoria própria (2019).

4.1 SELEÇÃO DE MATERIAIS

4.1.1 Solo

Para a execução deste trabalho, foram extraídas amostras de três jazidas diferentes presentes na Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA) - Campus Mossoró, conforme localização indicada na Figura 9. O número de locais selecionados é devido à necessidade da obtenção de um tipo específico de solo.

Segundo Guilherme (2016), o solo predominante da região de Mossoró é o A-2-4 e A-6, essa classificação é de acordo com o sistema *Transportation Reserach Board* (TRB) e antigo *Highway Research Board* – HRB adotado pela AASHTO. Desta forma, o solo escolhido deve ser o mais próximo se não o próprio A-2-4.

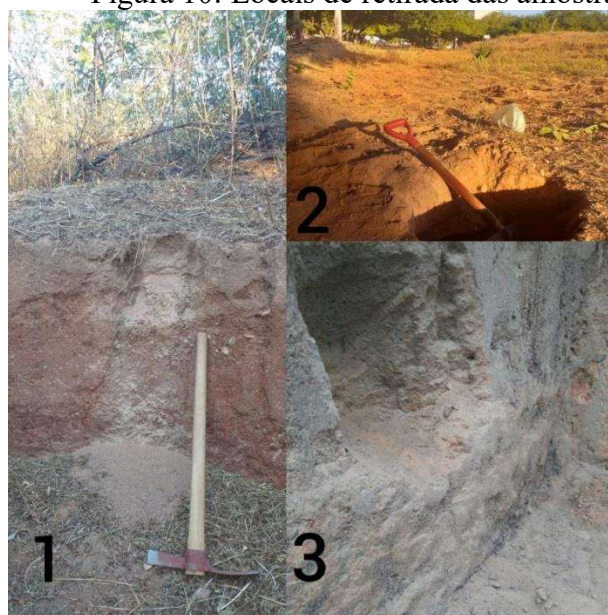
Para retirada das amostras foram utilizadas pás e picaretas, sendo posteriormente armazenadas em sacolas plásticas, com cuidado para não ter perda das características naturais do solo. A Figura 10 apresenta os pontos após realização coleta. Além disso, tem-se as coordenadas geográficas das jazidas por meio da Tabela 1.

Figura 9: Pontos de coleta das amostras.



Fonte: Adaptado do Google (2019)

Figura 10: Locais de retirada das amostras



Fonte: Autoria própria (2019).

Tabela 1: Localização geográfica dos pontos de coleta.

LOCALIZAÇÃO DO PONTOS DE COLETA		
PONTOS DE COLETA	LONGITUDE	LATITUDE
1	37° 19' 18 w	5° 12' 25" s
2	37° 19' 26" w	5° 12' 20" s
3	37 ° 18' 27" w	5 ° 12' 54" s

Fonte: Autoria própria (2019).

4.1.2 Emulsão

A emulsão foi adquirida no comércio local do município de Mossoró/RN. A escolha do produto se deu em meio às opções disponíveis no mercado. O material escolhido é da marca Vonder, do tipo impermeabilizante. A Tabela 2 contém a composição da emulsão utilizada.

Tabela 2: Composição da emulsão.

COMPOSIÇÃO DA EMULSÃO VONDER		
Nome químico ou comum	Número do registro CAS	Concentração
Asfalto	8052-42-4	20-30 %
5-cloro-2-metil- 4-isotiazolina-3-ona- com 2-metil-4-isotiazolina-3-ona	55965-84-9	0,10%
Água	-	70-80 %

Fonte: Autoria própria (2019).

A definição dos teores de emulsão utilizados neste trabalho foi baseada em trabalhos feitos anteriormente, tentando abranger o máximo todas recomendações válidas encontradas, embora se tenha considerações bem distintas entre as pesquisas. Segundo Santos (2009) para estabilização química de solos granulares demonstra melhores resultados para teores entre 4 a 6%.

Já Gandolfi e Cardoso (2013) sugere que sejam utilizados teores entre 0,5 e 3%, pois foram os valores que mostraram os melhores resultados para solos granulares. E por fim, Sampaio (2008) diz que deve-se estudar diversas percentagens de emulsão asfáltica para a amostra de solo a ser trabalhada, para observar o melhor de teor de fluido para o solo em estudo.

Desta forma, foram estabelecidos os teores de 0%, 0,5%, 2,5%, 5,0% e 6,5%, visando observar o comportamento do solo de forma mais ampla, desde as percentagens favoráveis até as desfavoráveis. Para a utilização desses valores, é preciso calcular a proporção de emulsão em relação a massa do solo escolhida e os teores. Além disso, como a emulsão apresenta uma quantidade de água significativa que interfere na umidade ótima, faz-se necessário o cálculo da quantidade de água presente.

4.2 ENSAIOS PARA CARACTERIZAÇÃO DOS SOLOS

As três amostras de jazidas diferentes passaram por uma sequência de ensaios, objetivando a caracterização e, por fim, a determinação do solo mais próximo ao requerido para execução do trabalho. Esta classificação foi feita por meio do *Transportation Reserach Board* (TRB), de forma que todos os ensaios feitos foram baseados nas normas da ABNT.

O preparo do material a ser estudado foi realizado de acordo com NBR 6457 – Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização (ABNT, 2016). As amostras de solo sofreram uma secagem prévia de modo a atingir a umidade higroscópica. Em seguida, os torrões presentes foram destorroados, com o intuito de evitar que estes descaracterizem as amostras, com cuidado para não quebrar os grãos do solo. Por fim, foi realizado o quarteamento, visando obter uma porção representativa de toda a amostra.

Figura 11: Amostras para caracterização



Fonte: Autoria própria (2019).

Segundo a NBR 6457 (ABNT, 1984), a quantidade mínima de solo a ser utilizado para o ensaio de peneiramento é dada de acordo com o diâmetro dos maiores grãos que como pode ser visualizado na Tabela 3.

Tabela 3: Quantidade de amostra para análise granulométrica

Maiores grãos (mm)	Quantidade mínima a tomar (kg)
< 5	1
5 a 25	4
>25	8

Fonte: NBR 6457 (1984).

4.2.1 Peneiramento

Este ensaio tem como finalidade estabelecer a distribuição granulométrica do solo, ou seja, a percentagem de peso em cada faixa específica pelas peneiras para o peneiramento grosso e peneiramento fino. Por meio dos resultados obtidos e através da análise granulométrica é possível se construir uma curva de distribuição granulométrica.

Os ensaios de caracterização do solo foram iniciados pelo ensaio de peneiramento, obedecendo a NBR 7181 – Solo – Análise Granulométrica (ABNT, 2018). O solo deve ser peneirado na malha de 2 mm para separar o material fino do grosso. O material que fica retido nesta peneira é lavado, levado para estufa por um período de 24 horas para ser feito o peneiramento grosso posteriormente. O solo que passa na peneira de 2 mm deve ser separado para a realização dos ensaios de peneiramento fino, limite plasticidade e limite de liquidez. Na

Figura 12, está presente a série de peneiras do peneiramento fino e na Figura 13 a sequência de peneiras do peneiramento grosso.

Figura 12: Sequência de peneiras para o peneiramento fino.



Fonte: Autoria própria (2019).

Figura 13: Sequência de peneiras para o peneiramento grosso.



Fonte: Autoria própria (2019).

4.2.2 Limites de consistência

Com o conhecimento adquirido através da experiência revelou a necessidade de outros ensaios para caracterização de solos para identificar percentagens de finos presentes, para isto existe os ensaios de consistência. A plasticidade é a propriedade dos solos finos de serem ou não moldáveis, sob específicas condições de umidade sem haver variações de volume (CAPUTO, 2015).

Atteberg propôs limites que delimitam os vários estados de consistência dos solos, o limite de liquidez e o limite de plasticidade (CAPUTO, 2015). O LL consiste no estado de transição do estado plástico para o estado líquido, está relacionado com a capacidade de absorver água. Já o LP configura como a transição do estado semissólido para o estado plástico (DNIT, 2006).

Os ensaios são feitos com material passante na peneira 0,42mm, utilizando-se 200 gramas, seguindo a NBR 7180 – Determinação do limite de plasticidade (ABNT, 2016) e NBR 6459 – Determinação do limite de liquidez (ABNT, 2017).

Para o ensaio de LL utiliza-se um aparelho denominado de Casagrande, o qual possui uma concha onde são aplicados golpes de uma altura de 1 cm e intensidade constante almejando fechar uma ranhura feita no solo com o auxílio de um cinzel, como na Figura 14. São realizadas tentativas para traçar uma reta relacionando a umidade com o número de golpes. O LL é considerado como o teor de umidade para o qual o solo se fecha com 25 golpes. O LP, por sua vez, é feito por meio da tentativa de moldagem do solo em forma de cilindro de diâmetro de 3mm e 10 cm de comprimento (CAPUTO, 2015).

Figura 14: Ensaio de limite de liquidez



Fonte: Autoria própria (2019).

4.2.3 Massa específica

O ensaio de massa específica é regido pela NBR 6508(1984) – Determinação da massa específica. Por meio deste ensaio, é obtida a massa específica do solo de granulometria superior a 4,8 mm, sendo efetuadas duas vezes de modo a se obter uma média para o valor. A Figura 15 apresenta a execução do ensaio de massa específica do solo.

Figura 15: Ensaio de massa específica



Fonte: Autoria própria (2019).

Com todos os dados obtidos, foram feitas análises para classificação e, por fim, foi escolhido o solo que mais se assemelhasse ao requerido como objetivo para pesquisa. A partir desta escolha, prosseguiu-se com os demais ensaios.

4.3 ENSAIOS MECÂNICOS

4.3.1 Ensaio de compactação

O processo manual ou mecânico que pretende diminuir o volume de vazios e consequentemente aumentar sua resistência é denominado de compactação. Ao se compactar um solo, espera-se que haja aumento não só em relação a resistência, mas também, melhorias em outros fatores, como: compressibilidade, permeabilidade, e absorção d'água. A compactação influencia consideravelmente na estabilização de maciços terrosos e possui uma relação particular com os problemas de pavimentação e barragens de terra (CAPUTO, 2015).

Para encontrar o valor da umidade ótima é preciso efetuar o ensaio de compactação, também conhecido como ensaio de Proctor. O ensaio foi realizado em uma energia

intermediária de compactação, pois, de acordo com Almeida (2019), a energia de compactação intermediária pode ser uma energia satisfatória para pavimentos, mas isso irá depender do material que será empregado. E ao se utilizar energias de compactação intermediárias pode ser alcançar economia no pavimento, tornando-o a utilização bastante atraente.

O ensaio foi realizado para o solo puro, ou seja, sem emulsão, como forma de encontrar o teor ótimo de água necessário para moldar os corpos de prova de solo e os corpos de prova de solo com emulsão para a aplicação do ensaio CBR.

Neste ensaio, foram moldados corpos de prova em um cilindro metálico grande com energia de compactação intermediária, ou seja, utilizando-se de 26 golpes por meio de um soquete metálico, como visto na Figura 16. Esses 26 golpes foram distribuídos a cada camada, totalizando 5 camadas em cada corpo de prova moldado. O ensaio normatizado pela NBR 7182: 2016 - Ensaio de compactação.

Para encontrar a umidade ótima é preciso encontrar vários pontos por meio da variação da umidade, sempre acrescentando 2% a cada nova moldagem. De cada ponto, uma umidade é obtida. No caso, foi utilizada a balança de umidade Figura 17 e o peso específico seco calculado.

Figura 16: Aplicação de golpes.



Fonte: Autoria própria (2019).

Figura 17: Balança determinadora de umidade



Fonte: Autoria própria (2019).

4.3.2 Ensaio CBR

É de grande importância se executar os corpos de prova do CBR em umidade ótima. Pois quando se tem um solo na umidade ótima comparado ao mesmo solo, porém situado no ramo seco, é natural que o solo mais seco tenha maior resistência, entretanto, o solo com a umidade ótima possui menor número de vazios o que o torna mais resistente e estável, fazendo desta forma com esse solo tenha maior resistência estável em relação ao solo com menor quantidade de água, quando submetidos à saturação (CAPUTO, 2015).

Ensaio foi introduzido por Porter (1929), sendo sequenciado por primeiramente a determinação da umidade ótima e do peso específico, por conseguinte a determinação das propriedades expansivas e por fim a determinação do índice de suporte Califórnia (CAPUTO, 1996).

Sendo conhecido o valor da umidade ótima, pode-se moldar os corpos de prova para o ensaio CBR. Foi utilizado a mesma energia de compactação e o mesmo processo utilizado para moldagem no ensaio de compactação.

Iniciou-se pelo processo de preparação do solo, segundo a NBR 6457. A emulsão a ser homogeneizada ao solo foi misturada a água de compactação, pensando-se em uma melhor uniformidade na mistura. Na Figura 18 visualiza-se os componentes antes da mistura e na Figura 19 os materiais homogeneizados.

Figura 18: Solo e emulsão preparados.



Fonte: Autoria própria (2019).

Figura 19: Processo de homogeneização dos componentes



Fonte: Autoria própria (2019).

Após a mistura, foi feita a preparação dos equipamentos para iniciar o processo de moldagem com auxílio dos cilindros e soquete. Após o preenchimento do molde, realizou-se o rasamento do corpo de prova, sendo feita a preparação para o ensaio de CBR. A norma regulamentadora desse ensaio é NBR 9895: 2017 - Índice de Suporte Califórnia. A preparação consiste na colocação das sobrecargas e do relógio comparador, com posterior imersão do corpo de prova em água.

Figura 20: Moldagem e imersão dos corpos de prova.



Fonte: Autoria própria (2019).

Desta forma, para o ensaio de expansão se realiza medidas a cada 24 horas, de um extensômetro estabelecido em um tripé, às medições são em milímetros para se verificar as amostras. Para a obtenção dos valores de CBR, a metodologia seguida foi a seguinte:

- Instalou-se o conjunto, molde cilíndrico com corpo de prova e sobrecarga, na prensa;
- Assentou-se o pistão da prensa na superfície do topo do corpo de prova, zerando-se em seguida os extensômetros;
- Aplicou-se o carregamento com velocidade de 1,27 mm/min, anotando-se a carga e a penetração a cada 30 segundos até decorridos o tempo de 10 minutos.

E por fim é medido a resistência a penetração por meio do ensaio visto na Figura 21.

Figura 21: Rompimento dos corpos de prova



Fonte: Autoria própria (2019).

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Inicialmente será abordado neste tópico os resultados de caracterização para as três amostras de solos coletadas. Nestes resultados iniciais são abordados os ensaios de peneiramento, massa específica, limite de liquidez, limite de plasticidade e a classificação. Por conseguinte serão determinadas as quantidades de emulsão e água a serem introduzidas à mistura solo-emulsão.

A seguir são analisadas propriedades mecânicas para o solo e a mistura solo-emulsão, dentro dos teores de emulsão escolhidos para pesquisa, os ensaios efetuados foram o de compactação e Índice de Suporte Califórnia.

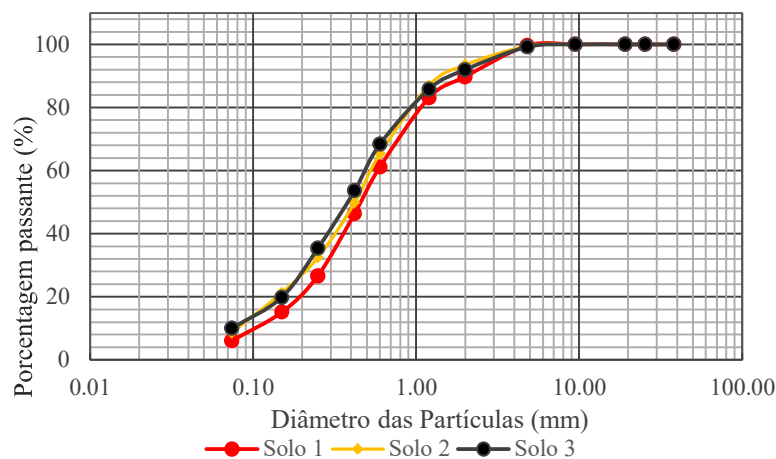
5.1 CARACTERIZAÇÃO DOS SOLOS

A caracterização do solo consistiu na realização de ensaios de granulometria, LL, LP e massa específica para classificar os solos pelos métodos TRB e Sistema Unificado.

5.1.1 Granulometria

A Figura 22 mostra a distribuição granulométrica para os três solos. Percebe-se uma grande semelhança na distribuição das amostras. Como a peneira 2,0 mm delimita o material grosso do fino segundo a NBR 7181 (ABNT, 2018) e os percentuais de solo passantes nessa amostra foram de respectivamente 89,72%, 93,49% e 91,95%, percebeu-se que os materiais em estudo são predominantemente finos, e com pouca existência de partículas de granulometria grossa. Os percentuais de finos passantes na peneira 0,074 mm se apresentam em pequena quantidade nas três amostras, sendo 6%, 8,60% e 9,95% para o Solo 1, Solo 2 e Solo 3, respectivamente.

Figura 22: Distribuição Granulométrica



Fonte: Autoria própria (2019).

Ao observar a Figura 12 e os valores obtidos para o Coeficiente de Não Uniformidade (CNU) e o Coeficiente de Curvatura (CC), é possível por meio da Tabela 4 aferir que os três solos apresentam uma uniformidade média e curva suave, concluindo-se que o solo é bem graduado. Segundo Caputo (2015), um solo bem graduado é aquele que apresenta uma granulometria continua nos seus grãos. Gondim (2008) afirma que um solo bem graduado é interessante para pavimentação, pois o contato grão a grão das partículas maiores com o preenchimento dos vazios pelas partículas menores, garantindo uma maior densidade e reduz a permeabilidade, isso qualificando uma boa característica para pavimentação.

Tabela 4: Valores de CNU e CC para as amostras.

SOLO	CNU	CC
AMOSTRA 1	6,0	1,5
AMOSTRA 2	7,1	1,3
AMOSTRA 3	6,7	1,2

Fonte: Autoria própria (2019).

5.1.2 Limites de Consistência

Quanto aos limites de consistência, descobriu-se inicialmente pelo ensaio de LP que não foi possível determinar a plasticidade do solo, o que acarretou na consideração de que os mesmos se comportaram como sendo do tipo NP, isto é, não plástico. Ao se efetuar o ensaio de LL, não conseguiu-se os golpes necessários para determinação, tendo em vista que a amostra ao se acrescentar mais água fechava com numero de golpes entre 4 e 7, mas ao estar mais seca se deslocava.

A não plasticidade do solo configura como uma boa característica para os solos, pois significa a baixa presença de finos. Segundo DNIT (2006), as estradas com melhor desempenho são aquela que detêm uma maior porcentagem de solos granulares. O pouco teor de finos presentes na amostra serve apenas para gerar uma coesão para o material, o que se caracteriza como uma boa propriedade.

5.1.3 Massa específica

O ensaio de massa específica foi feito para todas as amostras duas vezes, a fim de se obter uma média entre os valores e minimizar os possíveis erros. Os valores de massa específica foram maiores para as amostras que obtiveram percentuais de finos maiores, sendo respectivamente 2,67, 2,81 e 3,24 g/cm³.

5.1.4 Classificação do solo

A fim de se classificar a amostra foram utilizados dois métodos de classificação o TRB e o SUCS. A Figura 23 mostra a classificação feita para os dois métodos para todas as amostras coletadas, de modo a condicionar a escolha da amostra para serem desenvolvidos os demais ensaios da pesquisa.

Figura 23: Classificação das amostras.

TIPO DE CLASSIFICAÇÃO	AMOSTRA 1	AMOSTRA 2	AMOSTRA 3
SUCS	SW-SM-Areia bem-graduada com silte SW-SC Areia bem-graduada com argila	SW-SM-Areia bem-graduada com silte SW-SC Areia bem-graduada com argila	SW-SM-Areia bem-graduada com silte SW-SC Areia bem-graduada com argila
CLASSIFICAÇÃO TRB	A-3 ou A-1b	A-3 ou A-1b	A-3

Fonte: Autoria própria (2019).

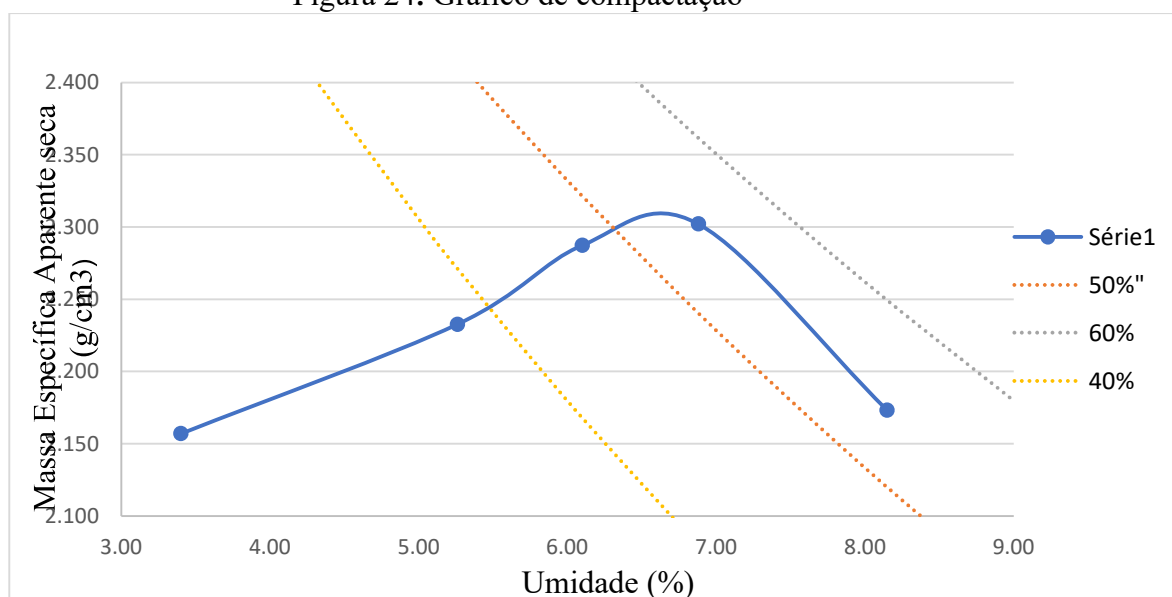
Percebe-se que a amostra que se apresentou mais próximo ao solo A-2-4 foi a terceira amostra classificada como A-3. Desta forma, os demais ensaios se procedem com essa a utilização da amostra 3.

5.2 ENSAIOS MECÂNICOS

5.2.1 Ensaio de compactação

O ensaio de compactação resultou em um gráfico relacionando a umidade com o peso específico seco. Percebe-se que a primeira parte do trecho se configura como ramo seco até atingir o ponto de máximo onde se encontra a umidade máxima e o peso específico seco máximo, após esse ponto tem-se o ramo úmido. Nesse primeiro trecho, conforme o aumento do teor de umidade o solo aumenta sua trabalhabilidade e consequentemente maiores valores de peso específico seco e teores de ar menores. Tem-se que a curva de saturação 100% nunca irá alcançar a curva de compactação, pois é impossível expulsar todo ar presente nos vazios. A Figura 24 apresenta a configuração descrita acima, validando desta forma o gráfico.

Figura 24: Gráfico de compactação



Fonte: Autoria própria (2019).

5.2.2 Ensaio CBR

5.2.2.1 Expansão

A Tabela 5 mostra o comportamento do solo quanto a expansão durante 96 horas de ensaio. Com essas medições o solo possui expansão de 0,05%. Também pode ser observado os valores de expansão para as quatro percentagens de emulsão asfáltica durante o período de 96 horas, sendo feitas medidas a cada 24 horas. Para as percentagens de 0 (SS) 0,5% (SE5) e

6,5% (SE65) resultaram nos maiores valores de expansão, sendo seguido pelo valor de 2,5% (SE25) e por fim a percentagem de 5% (SE50) que não teve nenhuma expansão.

Tabela 5: Medições no relógio comparador ao longo das 96 horas.

AMOSTRA	MEDIÇÕES (mm)			
	24 h	48h	72h	96h
SS	0,040	0,060	0,060	0,060
SE5	0,007	0,009	0,009	0,009
2E25	0,000	0,003	0,003	0,003
SE50	0,000	0,000	0,000	0,000
SE65	0,007	0,009	0,009	0,009

Fonte: Autoria própria (2019).

Para o DNIT (2006), são indicados para subleito uma expansão menor ou igual a 2%, no caso para materiais de sub-base é interessante um valor menor ou igual a 1% e por fim para a base uma expansão menor ou igual a 0,5%.

Foram calculadas a percentagens de expansão do solo em relação à altura para serem comparadas aos valores indicados pelo DNIT (2006). A Tabela 6 mostra as percentagens de expansão que, como se pode observar, a emulsão diminui a expansão do solo, o que foi indicado com maior eficiência para o teor de 5%. Foi percebido que em qualquer teor de emulsão asfáltica há a diminuição da expansão.

Tabela 6: Expansão das amostras após 96 horas.

PERCENTAGEM DE EMULSÃO	Expansão (%)
SS	0,0500
SE5	0,0074
SE25	0,0025
SE65	0,0000
SE50	0,0074

Fonte: Autoria própria (2019)

Os valores do CBR são mostrados na Tabela 7. Pode-se observar que o solo teve um ISC de 42,89%. A amostra 0,5% foi o melhor resultado dentro das amostras estudadas, em seguida a amostra 5,0%, a amostra de 2,5% ficou em terceiro e por fim como o menor ISC foi o da amostra 6,5%. A amostra com o menor ISC foi à com maior teor de ligante, isso pode acontecer devido a quantidade emulsão funcionar como lubrificante, reduzindo o contato dos grãos e consequentemente a resistência.

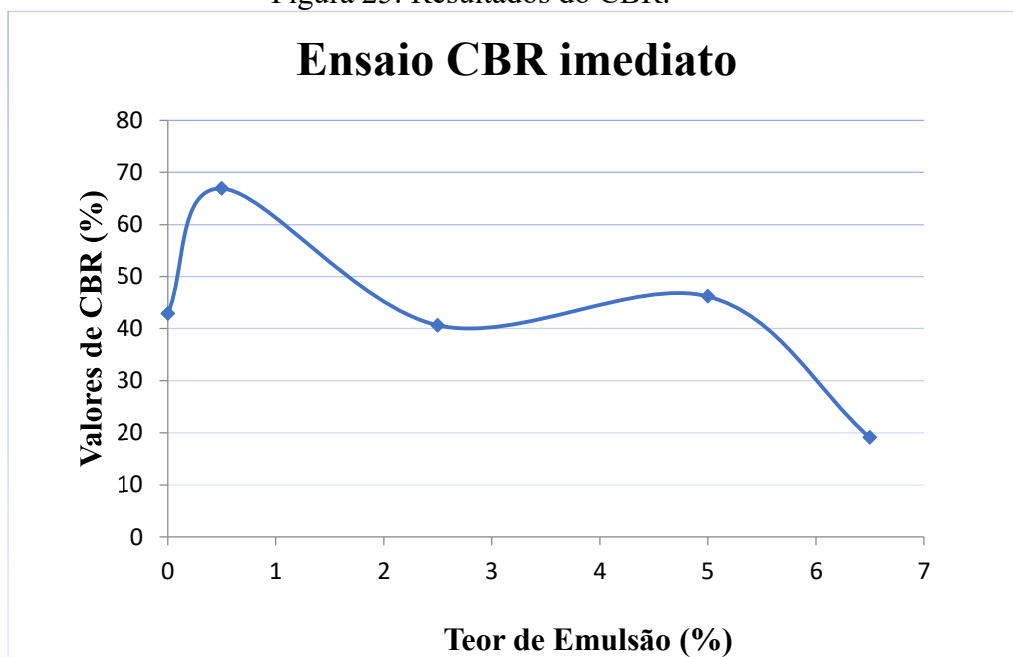
Tabela 7: Resultados para CBR

ENSAIO DE PENETRAÇÃO	
AMOSTRA	ISC (%)
SS	42,89
SE5	66,91
SE25	40,61
SE50	46,18
SE65	19,06

Fonte: Autoria própria (2019).

O DNIT especifica valores de CBR indicados para cada camada do pavimento. Para subleito é requerido $\text{CBR} \geq 2\%$, sub-base deve possuir $\text{CBR} \geq 20\%$ e base deve ter $\text{CBR} \geq 80\%$. Todas as amostras são usuais para a sub-base, mas não são aceitáveis para a camada de base, entretanto isso é para uma energia de compactação intermediária. Há a possibilidade de em uma energia de compactação modificada esses valores serem elevados.

Figura 25: Resultados do CBR.



Fonte: Autoria própria (2019)

CONCLUSÕES

Este trabalho avaliou a possível utilização da emulsão asfáltica para estabilização de solos em pavimentos no município de Mossoró. Essa análise foi feita por meio da caracterização de amostras de solo e ensaios mecânicos como Proctor e CBR para o solo escolhido de acordo com suas características geotécnicas.

Por meio do estudo realizado foi possível aferir as seguintes considerações:

- De forma geral, a utilização da emulsão asfáltica acarretou resultados satisfatórios;
- Na caracterização, o solo se mostrou bem graduado e não plástico o que o qualifica como um bom material para utilização em pavimentos;
- Houve uma diminuição dos valores de expansão ao utilizar os teores de emulsão asfáltica, sendo o melhor resultado para o valor de 5%, que não teve nenhuma expansão;
- Em relação ao CBR com uma energia de compactação intermediária apresentou melhores resultados para os menores teores de emulsão utilizados. Sendo observado que 0,5% de teor de emulsão gerou consideravelmente no resultado mais satisfatório na pesquisa;
- Como o percentual de emulsão varia de 0,5 a 2,5, é interessante estudar outros pontos entre estas duas percentagens citadas. O intuito ser feito isso é para buscar a possível existência de um teor ótimo. Como sugerido por Gandolfi (2013), os teores de 0,5% a 3,0%.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABEDA. **Manual básico de emulsões asfálticas**. Rio de Janeiro: Associação Brasileira das Empresas Distribuidoras de Asfaltos, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6457**: Amostras de solo - preparação para ensaios de compactação e de caracterização. 2 ed. Rio de Janeiro: Abnt, 201V6.

_____. **NBR 7181**: Solo - Análise granulométrica. Rio de Janeiro: Abnt, 2018.

_____. **NBR 7180**: Solo – Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro: Abnt, 2016.

_____. **NBR 6459**: Solo – Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro: Abnt, 2017.

_____. **NBR 6508**: Grãos de solo que passam na peneira de 4,8 mm – Determinação da massa específica. Rio de Janeiro: Abnt, 2016.

_____. **NBR 9895**: Solo – Índice de Suporte Califórnia. Rio de Janeiro: Abnt, 2017.

Confederação Nacional do Transporte. (CNT) **Transporte rodoviário**: Por que os pavimentos das rodovias do Brasil não duram? Brasília: Confederação Nacional do Transporte, 2017

_____. **Pesquisa Ferroviária**. Brasília: Confederação Nacional do Transporte, 2007.

AEMA. **BASICS OF ASPHALT EMULSIONS**. 2019. Disponível em: <<https://www.aema.org/page/basicsofasphaltemuls?&hhsearchterms=%22emulsion+and+asphalt%22>>. Acesso em: 21 jun. 2019.

ALMEIDA, Felipe Maraschine de. **ENERGIAS PARA COMPACTAÇÃO DE SOLOS DESTINADOS A ESTRUTURAS DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS**. 2017. 101 f. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia Civil, Ufu, Uberlândia, 101.

BBC (Comp.). **Quais são os países com as maiores reservas de petróleo e por que isso não é sempre um sinal de riqueza**. 2019. Disponível em: <<https://www.bbc.com/portuguese/internacional-47795371>>. Acesso em: 07 abr. 2019.

BERNUCCI, Liedi Bariani et al. **Pavimentação Asfáltica**: Formação básica para engenheiros. 3. ed. Rio de Janeiro: Abeda, 2008. 496 p.

CABRAL, Fundação Dom. **CUSTOS LOGÍSTICOS NO BRASIL 2017**. 2017. Disponível em: <<https://www.fdc.org.br/conhecimento-site/nucleos-de-pesquisa-site/Materiais/pesquisa-custos-logisticos2017.pdf>>. Acesso em: 20 jun. 2019.

CAPUTO, Homero Pinto. **Mecânica dos Solos e suas aplicações**. 7. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 2015. 244 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTE. **Manual de pavimentação**. Rio de Janeiro: Brasil, 2006.

GONDIM, Lilian Medeiros. **ESTUDO EXPERIMENTAL DE MISTURAS SOLO-EMULSÃO APLICADO ÀS RODOVIAS DO AGROPÓLO DO BAIXO JAGUARIBE/ESTADO DO CEARÁ**. 2008. 213 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2008.

GANDOLFI, Guilherme Gomes; CARDOSO, Letícia Sabino. **ESTUDO DA ESTABILIZAÇÃO QUÍMICA DO TIPO SOLO-EMULSÃO EM SOLO TROPICAL LATERÍTICO GRANULAR UTILIZADO EM OBRAS DE PAVIMENTAÇÃO**. 2013. 82 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2013.

MOURA, Edson de. **TRANSPORTES E OBRAS DE TERRA - Movimento de Terra e Pavimentação**. 2011 Disponível em:
<http://www.professoredmoura.com.br/download/Mecanica_dos_Solos.pdf>. Acesso em: 20 jun. 2019.

SAMPAIO, Mirian Guillen. **COMPORTAMENTO MECÂNICO E HÍDRICO DE SOLOS ESTABILIZADOS COM EMULSÃO ASFÁLTICA**. 2008. 157 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2008.

SANTOS, Washington José. **AValiação do uso de emulsão asfáltica na estabilização química de três solos de Sergipe**. 2009. 165 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2009.

TORRES, Júlia Cristina de Lima. **Obtenção de emulsões asfálticas convencionais e modificadas com argilas e nanoargilas**. 2013. 90 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2013.