

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

**Lysiane Menezes Pacheco**

**SOLOS ESTABILIZADOS COM EMULSÃO ASFÁLTICA  
PARA USO EM PAVIMENTAÇÃO: ESTUDO  
LABORATORIAL**

Porto Alegre  
dezembro 2011

**LYSIANE MENEZES PACHECO**

**SOLOS ESTABILIZADOS COM EMULSÃO ASFÁLTICA  
PARA USO EM PAVIMENTAÇÃO: ESTUDO  
LABORATORIAL**

Trabalho de Diplomação apresentado ao Departamento de Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Civil

**Orientador: Jorge Augusto Pereira Ceratti**  
**Coorientadora: Luciana Rohde**

Porto Alegre  
dezembro 2011

**LYSIANE MENEZES PACHECO**

**SOLOS ESTABILIZADOS COM EMULSÃO ASFÁLTICA  
PARA USO EM PAVIMENTAÇÃO: ESTUDO  
LABORATORIAL**

Este Trabalho de Diplomação foi julgado adequado como pré-requisito para a obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL e aprovado em sua forma final pelo Professor Orientador e pela Coordenadora da disciplina Trabalho de Diplomação Engenharia Civil

Porto Alegre, 02 de dezembro de 2011

Prof. Jorge Augusto Pereira Ceratti  
DSc. pela UFRJ  
Orientador

Luciana Rohde  
Dra. pela UFRGS  
Coorientadora

Profa. Carin Maria Schmitt  
Coordenadora

**BANCA EXAMINADORA**

**Prof. Jorge Augusto Pereira Ceratti**  
DSc. pela Universidade Federal do Rio de Janeiro

**Luciana Rohde**  
Dra. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

**Prof. Washington Peres Núñez**  
Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

**Lélio Antonio Teixeira Brito**  
PhD. pela University of Nottingham

Dedico este trabalho a meus pais, Varcedi e Eliane, que sempre me apoiaram e especialmente durante o período do meu Curso de Graduação estiveram ao meu lado.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço ao meu orientador Prof. Jorge Augusto Pereira Ceratti e à coorientadora Profa. Luciana Rohde, que foram fundamentais para realização desse trabalho. Pelo apoio, ensinamentos e tempo disponibilizado.

Agradeço à incansável Profa. Carin Maria Schmitt pela dedicação e pelo grande auxílio.

Agradeço aos meus pais, Varcedi e Eliane, por todo amor, educação e por terem me proporcionado boas oportunidades. Aos meus irmãos, Lari e Pedro, pelo companheirismo e amor, e a toda minha família.

Agradeço ao meu amor, meu noivo Rodrigo, por todo carinho e compreensão quando eu tinha que “estudar eternamente”.

Agradeço aos colegas do LAPAV, pela amizade, ensinamentos e risadas. De forma especial àqueles que sempre me ajudaram: Seu Ivo, Vini, Dani, Douglas, André, Marco, Lélío, Sú, Astrid, Rebeca e, principalmente, ao Daniel Martell.

Agradeço aos amigos que fiz na Universidade, Andry, Ricardo e Alberto, não só pelas manhãs de estudos de sábado na PUC, como também pelos momentos de descontração.

Por fim, agradeço a todos aqueles que direta, ou indiretamente, me ajudarem e contribuíram para esse trabalho, principalmente aos professores.

O sucesso nasce do querer, da determinação e persistência em se chegar a um objetivo. Mesmo não atingindo o alvo, quem busca e vence obstáculos, no mínimo fará coisas admiráveis

*José de Alencar*

## RESUMO

Este trabalho visa avaliar a técnica de estabilização de solos com emulsão asfáltica para emprego em camadas de pavimentos de vias de baixo volume de tráfego. A utilização de solos existentes no local da obra, porém sem a capacidade estrutural necessária, é de extrema importância, visto que é uma alternativa econômica que preserva o meio ambiente e os recursos naturais. O uso de materiais locais elimina as atividades de transporte, extração e descarte. Além disso, a técnica proposta dispensa o aquecimento, uma vez que é realizada em temperatura ambiente. Para verificar a viabilidade do uso do solo-emulsão, no emprego em bases de pavimentos asfálticos, foram realizados ensaios laboratoriais que avaliam suas propriedades mecânicas, sendo eles: módulo de resiliência, resistência à compressão simples e resistência à tração por compressão diametral. Na primeira etapa dos ensaios, foram confeccionados diversos corpos-de-prova de dois tipos de solo distintos (um fino e outro granular) variando percentual de água e de emulsão. Aquelas composições que apresentaram melhores resultados no ensaio de resistência à tração foram selecionadas. Posteriormente, essas composições foram submetidas ao ensaio de resistência à compressão simples e, a partir desses resultados, foram definidos os teores de projeto. O módulo de resiliência não compôs a parte de dosagem da mistura solo-emulsão, mas serviu para avaliar as propriedades das misturas mais eficientes. Ao final da pesquisa, observou-se que a adição de emulsão resulta em incremento de resistência à compressão em ambos os solos (16,2% no solo fino e 30,0% no solo granular), incremento de 442,9% de resistência à tração no solo fino e original resistência à tração no solo granular; ou seja, houve melhoramento das propriedades mecânicas dos materiais. Entretanto, considerando uma estrutura típica de pavimento de via de baixo volume de tráfego, o solo-emulsão granular apresenta excesso de tensões do topo do subleito, apontando a necessidade de se verificar o uso de outras técnicas associadas que permitam controlar este mecanismo.

Palavras-chave: Camada de Base. Estabilização de Solos. Solo-Emulsão.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Diagrama de delineamento da pesquisa .....	20
Figura 2 – Camadas dos pavimentos rígidos .....	22
Figura 3 – Camadas dos pavimentos flexíveis .....	22
Figura 4 – Estrutura dos grãos de solo e partículas de betume .....	43
Figura 5 – Curva granulométrica do solo 1 .....	52
Figura 6 – Curva granulométrica do solo 2 .....	52
Figura 7 – Galão de emulsão asfáltica .....	54
Figura 8 – Primeira mistura com o solo 1 .....	58
Figura 9 – Primeira mistura com o solo 2 .....	58
Figura 10 – Primeiros CP com o solo 1.....	59
Figura 11 – Primeiros CP com o solo 2 .....	59
Figura 12 – CP de solo 1 após ruptura .....	67
Figura 13 – Comparativo das RT .....	70
Figura 14 – Comparativo das RCS .....	71
Figura 15 – MR das misturas de projeto .....	73
Figura 16 – Estruturas analisadas .....	74

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Terminologia das bases .....	24
Quadro 2 – Granulometria dos solos para solo-emulsão .....	36
Quadro 3 – Requisito dos solos a serem estabilizados segundo vários autores .....	38
Quadro 4 – Classificação da AASHTO .....	40
Quadro 5 – Módulos de riqueza (k) .....	47
Quadro 6 – Caracterização dos solos .....	53
Quadro 7 – Caracterização do primeiro galão de emulsão asfáltica .....	55
Quadro 8 – Caracterização do segundo galão de emulsão asfáltica .....	56
Quadro 9 – Teores de água e de emulsão a serem ensaiados .....	57
Quadro 10 – Resultados da primeira moldagem para RT .....	60
Quadro 11 – Resultados da segunda moldagem para RT .....	60
Quadro 12 – Resultados da terceira moldagem para RT .....	61
Quadro 13 – Resultados da quarta moldagem para RT .....	62
Quadro 14 – Resultados da quinta moldagem para RT .....	62
Quadro 15 – Resultados da sexta moldagem para RT .....	63
Quadro 16 – Resultados da sétima moldagem para RT .....	64
Quadro 17 – Resultados da oitava moldagem para RT .....	64
Quadro 18 – Média das RT .....	65
Quadro 19 – Comparativo de teores de água e emulsão entre o primeiro e o segundo galão de emulsão asfáltica .....	66
Quadro 20 – Resultados de RCS .....	68
Quadro 21 – Modelos dos MR .....	73
Quadro 22 – Valores utilizados na análise mecânica .....	75

## LISTA DE SIGLAS

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

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

CAP – cimento asfáltico de petróleo

CBR – *California Bearing Ratio*

CP – corpo-de-prova

DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes

EAP – emulsão asfáltica de petróleo

IP – índice de plasticidade

ISC – índice de suporte Califórnia

LAPAV – Laboratório de Pavimentação

LA-E – emulsão asfáltica não iônica para lama asfáltica

LL – limite de liquidez

LP – limite de plasticidade

MR – módulo de resiliência

NBR – Norma Brasileira

RCS – resistência à compressão simples

RL-1C – emulsão asfáltica catiônica de ruptura lenta

RT – resistência à tração

SUCS – Sistema Unificado de Classificação de Solo

TRB – *Transportation Research Board*

UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

## LISTA DE SÍMBOLOS

IG – índice de grupo

A – material que passa na peneira n. 200 menos 35 (%), caso esta % for  $> 75$ , adota-se  $A = 40$ , caso esta % seja  $< 35$ , adota-se  $A = 0$

B – material que passa na peneira n. 200 menos 15 (%), caso esta % for  $> 55$ , adota-se  $B = 40$ ; caso esta % seja  $< 15$ , adota-se  $B = 0$

C – valor de limite de liquidez (LL) menos 40 (%), caso o LL  $> 60\%$ , adota-se  $C = 20$ ; se o LL  $< 40\%$ , adota-se  $C = 0$

D – valor de índice de plasticidade (IP) menos 10 (%), caso o IP  $> 30\%$ , adota-se  $D = 20$ ; se o IP  $< 10\%$ , adota-se  $D = 0$

$\gamma$  – massa específica aparente seca ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )

P – teor de betume a ser acrescentado (%)

a – solo retido na peneira n. 10 (%)

b – solo passante na peneira n. 10 e retido na peneira n. 40 (%)

c – solo passante na peneira n. 40 e retido na peneira n. 200 (%)

d – solo passante na peneira n. 200 (%)

$\Sigma$  – superfície específica ( $\text{m}^2/\text{kg}$ )

$P_4$  – fração entre as peneiras 50 e 25 mm (%)

$P_3$  – fração entre as peneiras 25 e 12,5 mm (%)

$P_2$  – fração entre as peneiras 12,5 e 4,76 mm (%)

$P_1$  – fração entre as peneiras 4,76 e 2,00 mm (%)

$S_3$  – fração entre as peneiras 2,00 e 0,42 mm (%)

$S_2$  – fração entre as peneiras 0,42 e 0,177 mm (%)

$S_1$  – fração entre as peneiras 0,177 e 0,075 mm (%)

F – fração passante na peneira 0,075 mm (%)

p – teor de asfalto residual (%)

k – coeficiente de módulo de riqueza (dependente do agregado e do asfalto)

$\sigma_R$  – tensão de tração (MPa)

C – carga de compressão de ruptura (N)

D – diâmetro do corpo-de-prova (cm)

$k_1$  – parâmetro de modelagem

$k_2$  – parâmetro de modelagem

$\Theta$  – soma das tensões principais  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  e  $\sigma_3$  (kPa)

cP – centipoise

s – desvio padrão

$p_{atm}$  – pressão atmosférica (kPa)

$\sigma_v$  – tensão vertical de compressão(kPa)

N – número de passagens de eixos padrões de projeto

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	15
<b>2 DIRETRIZES DA PESQUISA</b> .....	17
2.1 QUESTÃO DE PESQUISA .....	17
2.2 OBJETIVOS DO TRABALHO .....	17
<b>2.2.1 Objetivo principal</b> .....	17
<b>2.2.2 Objetivos secundários</b> .....	17
2.3 HIPÓTESE .....	18
2.4 PREMISSA .....	18
2.5 DELIMITAÇÃO .....	18
2.6 LIMITAÇÕES .....	18
2.7 DELINEAMENTO .....	18
<b>3 PAVIMENTAÇÃO</b> .....	21
3.1 SUBLEITO .....	22
3.2 REFORÇO DE SUBLEITO, SUB-BASE E BASE .....	23
3.3 REVESTIMENTO .....	24
<b>4 ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS</b> .....	26
4.1 ESTABILIZAÇÃO MECÂNICA .....	27
4.2 ESTABILIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA .....	28
<b>4.2.1 Solo-Cal</b> .....	28
<b>4.2.2 Solo-Cimento</b> .....	29
<b>5 SOLO-EMULSÃO</b> .....	32
5.1 MATERIAIS .....	32
<b>5.1.1 Emulsão</b> .....	33
5.1.1.1 Aspectos gerais .....	33
5.1.1.2 Ensaio de caracterização .....	34
<b>5.1.2 Solo</b> .....	36
5.1.2.1 Aspectos gerais .....	36
5.1.2.2 Ensaio de caracterização .....	39
<b>5.1.3 Água</b> .....	42
5.2 CARACTERÍSTICAS E COMPORTAMENTO DO SOLO-EMULSÃO .....	42
5.3 PROJETO DE MISTURAS SOLO-EMULSÃO .....	44
<b>5.3.1 Módulo de resiliência</b> .....	47
<b>5.3.2 Resistência à tração</b> .....	48

<b>5.3.3 Resistência à compressão simples</b> .....	48
5.4 EMPREGO DO SOLO-EMULSÃO .....	49
<b>6 MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	50
6.1 MATERIAIS EMPREGADOS .....	50
<b>6.1.1 Solos</b> .....	51
<b>6.1.2 Emulsão asfáltica</b> .....	54
6.2 DOSAGEM E EXECUÇÃO DA MISTURA: RESULTADOS PRELIMINARES PARA DEFINIÇÃO DOS TEORES DE PROJETO .....	56
<b>6.2.1 Definição dos teores de projeto para o solo 1</b> .....	68
<b>6.2.2 Definição dos teores de projeto para o solo 2</b> .....	69
<b>7 RESULTADOS</b> .....	70
7.1 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO .....	70
7.2 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES .....	71
7.3 MÓDULO DE RESILIÊNCIA .....	72
<b>8 CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	77
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	79
APÊNDICE A .....	82
APÊNDICE B .....	85
APÊNDICE C .....	88



## 1 INTRODUÇÃO

No Brasil, o modal mais utilizado para transporte, tanto de cargas quanto de passageiros, é o rodoviário. Segundo dados da Confederação Nacional de Transporte, ele é responsável por 61,1% do total de transporte de cargas, seguido pelo ferroviário com 20,7% (BRASIL, 2011a). Esse número aumenta quando se trata apenas de transporte de passageiros: quase 95% dos deslocamentos coletivos interestaduais do País são feitos através de ônibus (BRASIL, 2011b). A partir desses valores, nota-se o grau de importância do serviço rodoviário.

Muitas rodovias não são pavimentadas e, parte das que são, encontram-se em processo de deterioração avançado. Isso faz com que o tempo de viagem aumente, encarecendo o traslado e, conseqüentemente, ao se tratar do transporte de mercadorias, o custo do produto final.

A solução seria pavimentar as vias, entretanto a escassez de material empregado para esse fim, no entorno das mesmas, bem como o alto custo de extração e de transporte de material virgem, pode se tornar um empecilho. Com o intuito de minimizar esse problema, diversas tecnologias que empregam materiais alternativos à pavimentação convencional são estudadas, como por exemplo, a estabilização de solos.

O solo local com capacidade de suporte limitada, encontrado em abundância, pode ter suas características mecânicas melhoradas a partir de sua mistura com algum estabilizante. Essa aglutinação pode ser feita com material asfáltico, cimento Portland, cal, entre outros materiais. O resultado desse processo chama-se solo estabilizado.

A estabilização de solo com ligante betuminoso pode ser feita a partir de cimento asfáltico de petróleo, asfalto diluído ou emulsão asfáltica, sendo esse último material o mais empregado no Brasil. Segundo Ingles e Metcalf<sup>1</sup> (1972 apud JACINTHO, 2005, p. 13), a emulsão recobre as partículas do solo, proporcionando maior coesão entre elas, além de impedir que a umidade as atinja. Portanto, a emulsão asfáltica aumenta a resistência do solo, além de funcionar como um impermeabilizante.

---

<sup>1</sup> INGLES, O. G.; METCALF, J. B. **Soil Stabilization**: principles and practice. Sydney: Butterworths, 1972.

A base de pavimentos asfálticos é, em geral, executada a partir da junção de diversas frações de pedra britada que é posteriormente compactada. Em locais nos quais não existam jazidas para extração de material pétreo e o transporte da brita graduada, pela grande distância, seja economicamente inviável, a mesma pode ser substituída pelo solo-emulsão. A camada de base executada com solo-emulsão tem características mecânicas que minimizam deflexões – oriundas do intenso tráfego de veículos pesados – e melhoram o desempenho do pavimento.

Boa parte da produção agrícola e pecuária do País escoia por rodovias não pavimentadas, no entanto, durante algumas épocas do ano, pelas variações climáticas, essas vias tornam-se inseguras e desconfortáveis. Durante o período de chuvas pode ocorrer formação de atoleiros, impedindo o tráfego. Nos períodos de seca, a poeira gerada pela passagem dos veículos prejudica a visibilidade. Para melhorar a trafegabilidade desses locais o solo-emulsão pode ser empregado como revestimento primário.

Como o solo-emulsão está ganhando destaque na pavimentação, nesse trabalho serão analisadas as propriedades de duas diferentes misturas de solo-emulsão, a partir de ensaios laboratoriais, tendo em vista a sua utilização como base de pavimentos.

Sendo assim, este trabalho foi dividido em oito capítulos. Seguindo este capítulo de introdução, o próximo capítulo contém as diretrizes da pesquisa, ou seja, o que se pretende com ela e como a mesma foi desenvolvida. Os capítulos 3, 4 e 5 apresentam uma revisão bibliográfica sobre pavimentação, estabilização de solos e solo-emulsão, respectivamente. O capítulo 6 apresenta a procedência e as características dos materiais estudados, além da metodologia laboratorial utilizada para análise das propriedades mecânicas do solo-emulsão. No capítulo 7 constam os resultados dos ensaios mecânicos e suas análises. Por fim, no capítulo 8 é concluído o trabalho, se atendo, principalmente, a discorrer sobre o desempenho do solo-emulsão e sua viabilidade técnica.

## **2 DIRETRIZES DA PESQUISA**

Este capítulo destina-se à apresentação das diretrizes definidas para o desenvolvimento do presente trabalho. Nele está contida a questão a ser respondida, os objetivos do trabalho, a hipótese, a premissa, a delimitação, as limitações, bem como o delineamento.

### **2.1 QUESTÃO DE PESQUISA**

A questão de pesquisa deste trabalho é: as propriedades mecânicas das misturas de emulsão asfáltica com os solos estudados são adequadas para uso em base de pavimentos?

### **2.2 OBJETIVOS DO TRABALHO**

Os objetivos do trabalho estão classificados em principal e secundários e são apresentados nos próximos itens.

#### **2.2.1 Objetivo principal**

O objetivo principal deste trabalho é a análise da adequação das propriedades mecânicas das misturas de emulsão asfáltica com os dois solos estudados para o emprego em base de pavimentos asfálticos em vias de baixo volume de tráfego.

#### **2.2.2 Objetivos secundários**

Os objetivos secundários do trabalho são:

- a) a descrição das características dos solos estudados;
- b) a descrição das características da emulsão asfáltica empregada;
- c) a definição do teor de projeto de emulsão e de água;
- d) os valores alcançados para as propriedades mecânicas, após a mistura dos solos com a emulsão.

## 2.3 HIPÓTESE

A hipótese do trabalho é que as misturas estudadas de solo-emulsão são adequadas para o uso em base de pavimentos de vias de baixo volume de tráfego, pois a estabilização promove melhorias nas propriedades mecânicas dos compósitos.

## 2.4 PREMISSA

O uso do solo-emulsão é de extrema relevância, visto que é uma tecnologia econômica e confiável a ser empregada em camada de base e em camada de rolamento em vias de baixo volume de tráfego.

## 2.5 DELIMITAÇÃO

O trabalho está delimitado ao uso de dois tipos de solos específicos, um granular e outro fino.

## 2.6 LIMITAÇÕES

São limitações do trabalho:

- a) a análise das propriedades mecânicas a partir de resultados de ensaios laboratoriais;
- b) o emprego de dois galões de uma emulsão neutra (sem carga) fornecidos por um fabricante de emulsões;
- c) o emprego de um solo granular proveniente do Bairro Lomba do Pinheiro de Porto Alegre;
- d) o emprego de um solo fino proveniente do Campus do Vale da UFRGS.

## 2.7 DELINEAMENTO

O trabalho será realizado através das dez etapas apresentadas a seguir que estão representadas na figura 1:

- a) pesquisa bibliográfica;

- b) caracterização dos solos;
- c) caracterização da emulsão;
- d) definição dos teores de emulsão e de água;
- e) definição do programa experimental;
- f) moldagem dos corpos-de-prova de mistura solo-emulsão;
- g) execução dos ensaios;
- h) análise dos resultados;
- i) escolha dos teores de projeto de emulsão e de água;
- j) conclusões.

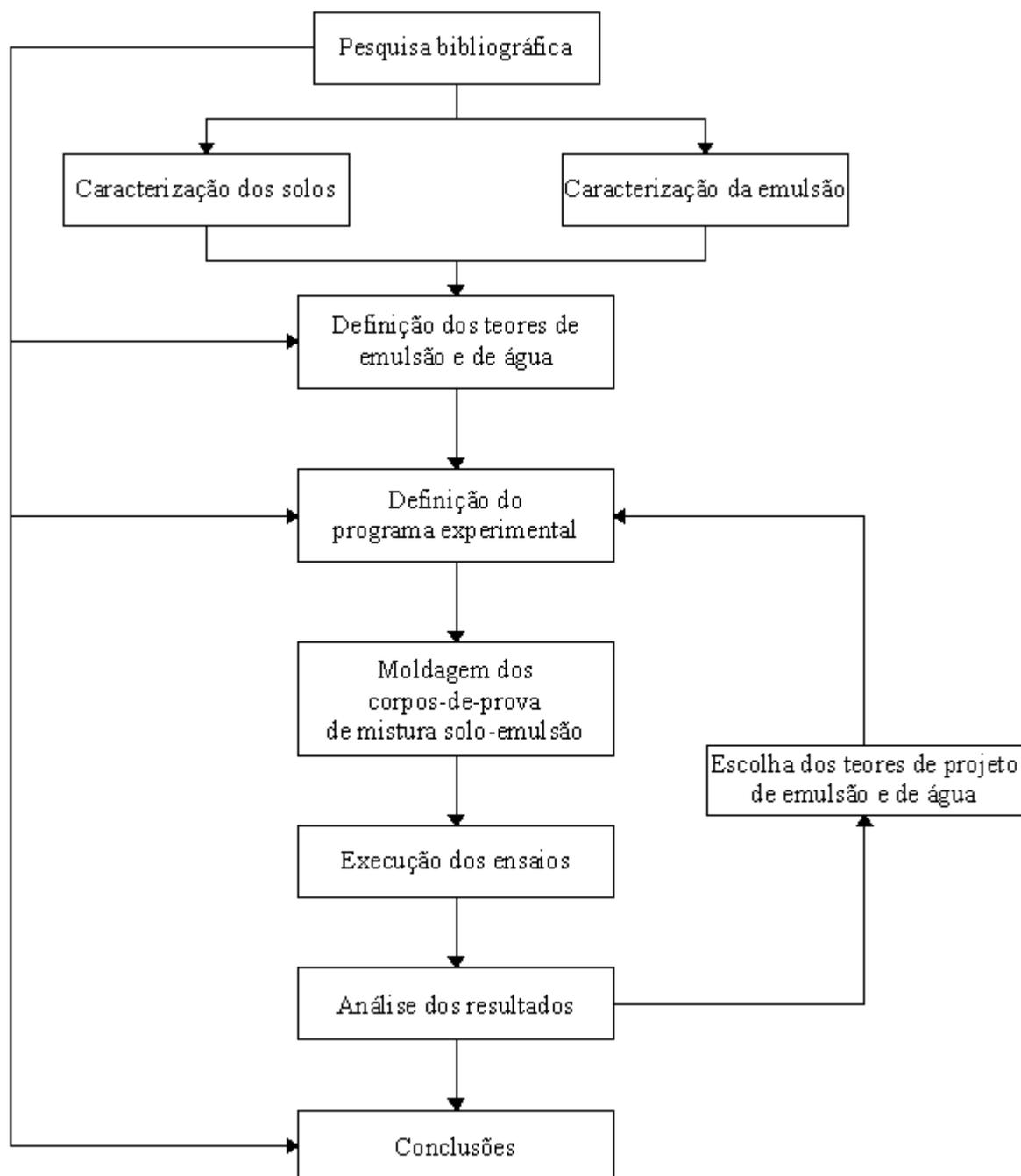
Na pesquisa bibliográfica, primeiramente procurou-se obter um conhecimento satisfatório da mistura de solo-emulsão através da leitura e análise de trabalhos sobre o assunto. Também se obteve conhecimento sobre os tipos existentes de estabilização de solos. Durante essa etapa, foi aprimorado o conhecimento sobre a estrutura do pavimento flexível.

Posteriormente, com auxílio de professores e especialistas, foram definidos os ensaios utilizados para caracterização do material empregado, ou seja, dos solos e da emulsão. Assim, deu-se início aos trabalhos no LAPAV – Laboratório de Pavimentação – da Escola de Engenharia da UFRGS. A partir dos resultados dos ensaios de granulometria dos solos, do seu teor de umidade ótima e do resíduo asfáltico por evaporação da emulsão, foi possível encontrar teores iniciais de emulsão e de água a ser adicionada ao solo.

No programa experimental foram definidos os ensaios mecânicos a serem realizados, quantos corpos-de-prova seriam necessários e quais as suas dimensões. Esses ensaios foram resistência à compressão simples, adaptação da norma DNER-ME 201/94 e resistência à tração por compressão diametral, segundo DNIT-ME 136/2010.

A etapa seguinte foi constituída da moldagem dos corpos-de-prova da mistura e da realização dos ensaios de análise do comportamento do solo-emulsão, para que então fossem escolhidos os teores de projeto de água (de diluição e de dispersão) e de emulsão. Assim, foram moldados corpos-de-prova nesses teores e ensaiados para determinação do módulo de resiliência, segundo DNIT-ME 134/2010. Por fim, com os resultados dos ensaios, foram avaliadas se as propriedades das misturas eram satisfatórias, chegando-se às conclusões do trabalho.

Figura 1 – Diagrama de delineamento da pesquisa



(fonte: elaborada pela autora)

### 3 PAVIMENTAÇÃO

Conforme Bernucci et al. (2008, p. 9), o pavimento é uma estrutura disposta sobre a superfície final do terreno (preparada para essa finalidade), composta por várias camadas de espessuras definidas. Segundo a NBR 7207 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1982, p. 2), essa estrutura é:

[...] destinada, econômica e simultaneamente, em seu conjunto:

- a) a resistir e distribuir ao subleito os esforços verticais oriundos dos veículos;
- b) a melhorar as condições de rolamento quanto à comodidade e segurança;
- c) a resistir aos esforços horizontais que nela atuam tornando mais durável a superfície de rolamento.

Além disso, de acordo com Bernucci et al. (2008, p. 9), o pavimento tem, entre outras, a finalidade de resistir à ação do clima, possibilitando a passagem de veículos durante todas as épocas do ano. Sendo assim, a pavimentação reduz custos não só para os usuários das vias, como para toda a população, fortemente dependente do transporte rodoviário (SENÇO, 1997, p. 30).

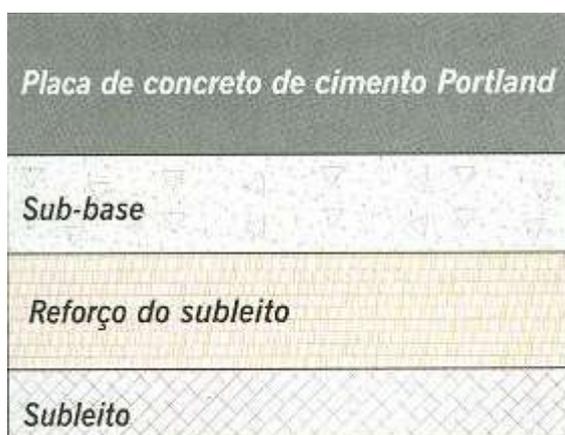
Há duas categorias tradicionais de classificação dos pavimentos: rígidos e flexíveis. Atualmente, devido ao tipo de revestimento empregado, passou-se a denominar também, respectivamente, de pavimentos de concreto de cimento Portland ou de concreto-cimento e pavimentos asfálticos (BERNUCCI et al., 2008, p. 9).

Pavimentos rígidos são pouco deformáveis. Sua estrutura é constituída por um revestimento de placas de concreto de cimento Portland, as quais raramente são armadas, apoiadas sobre uma sub-base, a qual é assentada sobre o subleito ou, quando este não apresentar qualidade estrutural suficiente, sobre o reforço de subleito. A figura 2 apresenta essa estrutura. A espessura do pavimento é função da resistência à flexão das placas, visto que elas rompem por tração na flexão quando submetidas à deformação, e da resistência das camadas subjacentes (BERNUCCI et al., 2008, p. 337; MEDINA; MOTTA, 2005, p. 16; SENÇO, 1997, p. 23).

Pavimentos flexíveis são suscetíveis a deformações elásticas. Estas estruturas são compostas por camadas de diferentes espessuras, executadas com diferentes materiais – sendo eles não

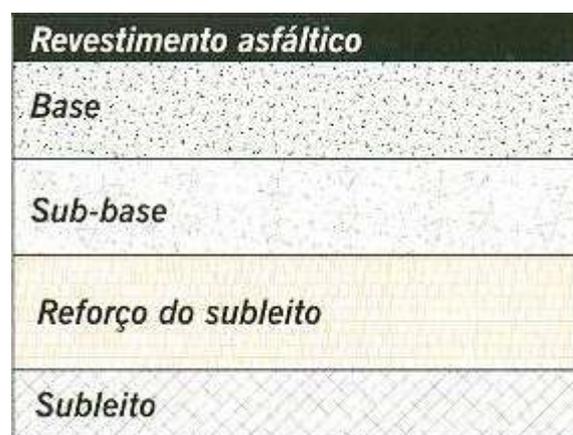
rígidos – e que distribuem e transferem os esforços solicitantes às camadas subjacentes, minimizando as pressões que agem na fundação do pavimento. As camadas são dispostas sobre o subleito do terreno, sendo elas: reforço de subleito, sub-base, base e revestimento. Entretanto, há casos, devido ao comportamento de algum material ou à intensidade e volume de tráfego, em que alguma dessas camadas pode ser dispensada. Elas são dimensionadas à compressão, à tração na flexão (a qual é provocada pelas deformações – oriundas do tráfego – que levam a estrutura a deformações permanentes e ao rompimento por fadiga) e a partir da resistência das camadas inferiores. Na figura 3 é apresentado esse sistema (BERNUCCI et al., 2008, p. 337-338; SENÇO, 1997, p. 23).

Figura 2 – Camadas dos pavimentos rígidos



(fonte: BERNUCCI et al., 2008, p. 338)

Figura 3 – Camadas dos pavimentos flexíveis



(fonte: BERNUCCI et al., 2008, p. 337)

Conforme Medina e Motta (2005, p. 16), há ainda pavimentos que empregam materiais tanto rígidos quanto flexíveis na sua estrutura, sendo denominados semi-rígidos. É dita estrutura semi-rígida quando se assenta um revestimento betuminoso (flexível) sobre uma base cimentada (rígida).

Esse trabalho se aterá a abordar pavimentos flexíveis, portanto os itens a seguir descreverão as camadas que compõem esses pavimentos.

### 3.1 SUBLEITO

Segundo a NBR 7207 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1982, p. 1), subleito é o “Terreno de fundação do pavimento ou do revestimento.”. Portanto, subleito é

o solo existente no local em que se construirá a rodovia – o qual será compactado e devidamente regularizado, a fim de conformá-lo ao greide da mesma – que servirá de apoio a ela e absorverá os esforços do tráfego.

A espessura do pavimento é maior quanto pior for o material constituinte do subleito. Ou seja, vias projetadas para receber cargas pesadas cujo subleito tenha pouca capacidade de suporte geram pavimentos espessos. Por outro lado, vias projetadas para receber cargas leves cujo subleito tenha boa capacidade de suporte geram pavimentos delgados (SENÇO, 1997, p. 14). Quando o comportamento do solo natural não satisfaz as necessidades para servir de fundação para uma via, ele deve ser substituído por um material com maior capacidade de suporte.

### 3.2 REFORÇO DE SUBLEITO, SUB-BASE E BASE

O reforço de subleito é uma camada construída sobre o subleito regularizado, possuindo características tecnológicas superiores as deste. É construído quando o subleito apresenta qualidade estrutural insuficiente ou quando as cargas de tráfego são muito pesadas. A sub-base é uma camada corretiva do subleito ou complementar à base, sendo constituída de materiais com melhor qualidade que o reforço do subleito. Por fim a base é a camada sobre a qual se constrói o revestimento. Essas três camadas têm como função resistir e distribuir os esforços verticais oriundos dos veículos (SENÇO, 1997, p. 15, 17, 19, 20; SENÇO, 2001, p. 13).

Geralmente, no Brasil, as camadas de reforço do subleito, sub-base e base que compõem a estrutura de um pavimento com revestimento asfáltico são constituídas de materiais compactados classificados como: granulares, solos e cimentados. Os materiais granulares não possuem coesão e não resistem à tração, já os solos coesivos resistem principalmente à compressão e, uma pequena parcela, à tração, graças à coesão gerada pela fração fina. São considerados materiais granulares e solos: brita graduada simples, brita corrida, macadame (hidráulico e a seco), misturas estabilizadas granulometricamente, solo agregado, solo natural e ainda materiais de reutilização e reciclagem (BERNUCCI et al., 2008, p. 352).

Os materiais cimentados são materiais granulares ou solos misturados com algum aditivo como, por exemplo, cal (gerando camada flexível) e cimento (gerando camada rígida), o que aumenta a rigidez e a resistência à tração e à compressão do material natural. Materiais

cimentados mais comumente utilizados são: brita graduada tratada com cimento, solo-cimento, solo-cal, solo-cal-cimento e concreto rolado (BERNUCCI et al., 2008, p. 352).

Nas bases, ainda, pode ser empregado material estabilizado com ligante asfáltico, ou seja, material asfáltico combinado com agregados ou solos, proporcionando aumento da coesão e da rigidez da mistura, fazendo com que haja resistência à tração. As misturas asfálticas empregadas são: solo-asfalto, solo-emulsão, macadame betuminoso e base asfáltica de módulo elevado (BERNUCCI et al., 2008, p. 352). O quadro 1 apresenta a terminologia das bases.

Quadro 1 – Terminologia das bases

Bases	Rígidas	Concreto de cimento		
		Macadame de cimento		
		Solo-cimento		
	Flexíveis	Solo estabilizado		Granulometricamente – SAFL
				Solo-betume – Solo-cal
				Solo-brita
		Macadame hidráulico		
		Brita graduada com ou sem cimento		
		Macadame betuminoso		
		Alvenaria poliédrica	por aproveitamento	
Paralelepípedos				

(fonte: SENÇO, 1997, p. 25)

### 3.3 REVESTIMENTO

Revestimento é a camada superficial do pavimento, portanto é a que tem contato direto com a ação do tráfego. Ela é destinada a resistir aos esforços horizontais, os quais provocam desgaste da superfície, melhorar as condições de conforto e segurança, impermeabilizar o

pavimento, além de absorver parte dos esforços verticais gerados pelo tráfego e transmitir, de forma atenuada, o restante (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1982, p. 2; BERNUCCI et al., 2008, p. 9).

O revestimento pode ser formado, por uma camada superior, denominada camada de rolamento e por camadas de ligação, denominadas *binder* (BERNUCCI et al., 2008, p. 9). Fazem-se duas camadas por razões construtivas (limitação de espessura para compactação) e econômicas, visto que a camada de *binder* possui propriedades mecânicas inferiores às da camada de rolamento.

Para que o revestimento seja bem aglutinado, impedindo que haja desagregação de material, utiliza-se uma mistura basicamente constituída de agregados e ligantes asfálticos (BERNUCCI et al., 2008, p. 9). O agregado gera uma superfície rugosa, conferindo atrito entre o pneu dos veículos e a camada, já o ligante asfáltico é quem impede que a água atinja as outras camadas do pavimento.

## 4 ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS

Nas obras de Engenharia é necessária uma qualidade técnica dos materiais empregados que atenda as especificações de projeto, fato que muitas vezes não é obtido com material de jazidas existentes perto da obra. Nesses casos, é preciso explorar e transportar material de jazidas mais distantes, o que pode ser prejudicial ao meio ambiente e economicamente inviável (GONDIM, 2008, p. 23).

Gondim (2008, p. 23) cita que neste contexto, tem-se buscado melhorar as propriedades dos solos existentes na região da obra, a partir de intervenções mecânicas ou aplicação de aditivos, a fim de desenvolver um novo material que se adéque aos critérios técnicos. Essa solução chama-se estabilização de solos.

Segundo Senço (2001, p. 47), “A estabilização de um solo consiste em dotá-lo de condições de resistir a deformações e ruptura durante o período em que estiver exercendo funções que exigem essas características, num pavimento ou outra obra qualquer.”. De acordo com Gondim (2008, p. 23), além da resistência, a estabilização visa modificar as características de expansão, permeabilidade e durabilidade do solo.

Um solo estabilizado utilizado em pavimentação deve possuir resistência ao cisalhamento e resistência à deformação. A resistência ao cisalhamento deve fazer com que, quando sujeito à ação do tráfego, ele resista, sem romper, a deformações além de certos limites considerados compatíveis com as necessidades de tal tráfego (SENÇO, 2001, p. 47).

A mudança das propriedades dos solos pode ser conseguida natural ou artificialmente (SENÇO, 1997, p. 24). Segundo Kézdi (1979, p. 22-23), há três categorias de classificação de estabilização, a partir do método empregado, sendo elas: mecânica, física e química. Entretanto, Miceli Júnior (2006, p. 32) cita que na estabilização química há ocorrência de reações físicas, portanto neste trabalho serão considerados dois tipos de estabilização: mecânica e físico-química.

A escolha do tipo de estabilização depende de quais propriedades deseja-se corrigir e de qual uso o solo será destinado (GONDIM, 2008, p. 23; MICELI JÚNIOR, 2006, p. 30). A seguir

são detalhados de forma geral os métodos de estabilização, apesar de o trabalho ser focado um específico.

#### 4.1 ESTABILIZAÇÃO MECÂNICA

Na estabilização mecânica o solo é estabilizado sem adição de nenhum tipo de aditivo (KÉZDI, 1979, p. 22). São considerados métodos mecânicos aqueles que mudam o arranjo das partículas de solo ou sua granulometria, ou ainda que influam no nível d'água (GONDIM, 2008, p. 25; KÉZDI, 1979, p. 23).

A compactação é o procedimento mais difundido no mundo, visto que é de fácil emprego e não necessita de manutenção. Nesse processo, reduzem-se os volumes de vazios existentes no solo, rearranjando as suas partículas, a partir de aplicação de energia mecânica (GONDIM, 2008, p. 25; KÉZDI, 1979, p. 23). Com isso visa-se aumentar a densidade, a resistência ao cisalhamento e capacidade de suporte do solo e diminuir, o índice de vazios, a contração e a compressibilidade do mesmo (SANTOS, 2009, p. 8). Kézdi (1979, p. 23) ainda cita que todos os outros tipos de estabilização são acompanhados de compactação.

Também é considerada estabilização mecânica a mistura de diferentes tipos de solo, ou solos e agregados. Essa técnica procura obter uma mistura que possua maior estabilidade que os materiais de origem. A estabilização granulométrica consiste em compor uma mistura densa, ou seja, que possua material graúdo suficiente para que haja aumento da resistência, a partir do contato entre grãos, e que possua material fino para preencher os vazios, garantindo maior densidade e menor permeabilidade (GONDIM, 2008, p. 26; KÉZDI, 1979, p. 23; MICELI JÚNIOR, 2006, p. 31).

Por fim, Kézdi (1979, p. 23) menciona a estabilização mecânica feita a partir da drenagem de uma camada de solo. Ou seja, a partir da drenagem, por meio de instalações adequadas e bem monitoradas, se faz a manutenção no teor de água a um nível constante, proporcionando melhorias nas características mecânicas do material.

## 4.2 ESTABILIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA

Estabilização físico-química consiste na adição de produtos químicos ao solo. Esses produtos químicos são denominados agentes estabilizantes e podem ser, por exemplo, cimento Portland, cal, materiais betuminosos, produtos químicos industrializados, etc. (GONDIM, 2008, p. 26).

Os estabilizantes reagem quimicamente com as partículas do solo, a partir de reações físicas. Dependendo do estabilizante utilizado pode ser propiciado melhoramento da estabilidade, das propriedades mecânicas e/ou hidráulicas do solo (GONDIM, 2008, p. 26).

Segundo Kézdi (1979, p. 23), as reações físicas que ocorrem são mudança de temperatura, hidratação, evaporação e adsorção. Já as reações químicas são troca iônica, precipitação, polimerização e oxidação.

Atualmente, os estabilizantes químicos mais empregados são cal, cimento Portland e emulsão asfáltica. Visto que o solo-emulsão é objetivo principal desse trabalho, ele será tratado em um capítulo específico. Nos próximos itens será feita uma breve abordagem do solo-cal e do solo-cimento.

### 4.2.1 Solo-Cal

Solo-cal, como o próprio nome diz, é uma mistura de solo com cal. A cal é um aglomerante resultante da calcinação do calcário a elevadas temperaturas. Utiliza-se para estabilização a cal hidratada, que é o “[...] pó obtido pela hidratação da cal virgem, constituído essencialmente de uma mistura de hidróxido de cálcio e hidróxido de magnésio, ou ainda, de uma mistura de hidróxido de cálcio, hidróxido de magnésio e óxido de magnésio.” (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2003, p. 2).

Segundo Guimarães (2002, p. 118), os componentes químicos da cal classificam-na em calcítica, dolomítica e magnesiana. A calcítica é aquela que possui alto teor de óxido de cálcio, a dolomítica é a que possui a relação entre óxidos de cálcio e de magnésio igual em proporção molecular e a magnesiana é a que possui teores de óxido de magnésio intermediário entre os outros dois tipos de cales. A cal que proporciona melhores resultados é aquela que apresenta elevados teores de hidróxido de cálcio, portanto a cal calcítica.

Ocorrem diversas reações na mistura de solo-cal, sendo elas divididas nas que modificam as características geotécnicas do solo e nas de aglomeração dos grãos. As primeiras ocorrem imediatamente, ou seja, são reações rápidas, e as segundas, são reações lentas (BERNUCCI et al., 2008, p. 364; PINTO, 1985, p. 81).

As reações imediatas são provocadas pela liberação do hidróxido de cálcio (presente na cal calcítica) a partir do contato de silicatos e aluminatos com água. Elas geram floculação e redução de plasticidade e expansibilidade do solo. As reações lentas são provocadas por reações pozolânicas e de carbonatação e geram cimentação entre solo e estabilizante. Dessa maneira, como a resistência é decorrente da cimentação, ela cresce com o passar do tempo (BERNUCCI et al., 2008, p. 364; PINTO, 1985, p. 81; SENÇO, 2001, p. 137). Assim, conforme Bernucci et al. (2008, p. 364), os objetivos da estabilização são enrijecimento, trabalhabilidade e redução de expansão do solo.

Segundo Pinto (1985, p. 84-86), os fatores que influenciam o comportamento do solo-cal são o tipo de solo estabilizado, o tipo e teor de cal empregada, e o tempo e a temperatura de cura. Bernucci et al. (2008, p. 364) indicam que, em geral, solos argilosos e siltosos caulínicos apresentam melhores resultados de resistência após a estabilização. Ainda esses autores citam que a origem e as impurezas presentes na cal influenciam o poder de estabilização. Pinto (1985, p. 85-86) adverte que as impurezas presentes na cal são semelhantes às partículas do solo e que, por vezes, podem auxiliar nas reações. Entretanto o autor ressalta que ao se calcular o teor de cal deve ser descontado os materiais inertes. A resistência aumenta em função do aumento do teor de cal (geralmente utiliza-se de 4 a 10% da massa total) após tempo de cura de 84 dias, visto que apenas após esse período a resistência é totalmente dependente do teor de cal. Além disso, temperaturas elevadas contribuem para esse ganho.

Em pavimentação o solo-cal é utilizado principalmente como reforço de subleito e sub-base. Ainda alguns estudos indicaram que essa mistura pode ser empregada como bases de vias de baixo volume de tráfego (BERNUCCI et al., 2008, p. 364).

#### **4.2.2 Solo-Cimento**

Solo-cimento é a mistura de solo pulverizado com água e cimento (acima de 5% em massa) com o objetivo de enrijecimento. Quando se visa apenas a melhoria da trabalhabilidade e um

pequeno aumento da capacidade de suporte chama-se solo melhorado com cimento. O cimento mais utilizado é o cimento Portland comum, entretanto, eventualmente, se utiliza cimento Portland de Alto-Forno e cimento Portland Pozolânico (NOGUEIRA, 1961, p. 194; SENÇO, 2001, p. 76).

Bernucci et al. (2008, p. 363) relatam que não devem ser utilizados solos com percentual elevado de argila, visto que esses exigem grande teor de cimento, o que encarece o procedimento, além de gerar retração. Moncayo V (1980, p. 35) cita que todos os solos podem ser utilizados para estabilização com cimento, exceto aqueles altamente orgânicos, entretanto os mais adequados são os granulares, facilmente dispersos.

De acordo com Moncayo V (1980, p. 35), comparativamente a solos granulares o solo-cimento:

- a) é mais resistente como camada de base, distribuindo as cargas de tráfego em áreas maiores, o que diminui a espessura das camadas;
- b) tem maior módulo de elasticidade;
- c) é mais impermeável;
- d) é resistente a erosão da água;
- e) em presença de umidade a resistência é aumentada;
- f) ao secar não perde compactação;
- g) sua resistência aumenta com o passar do tempo.

A resistência à compressão da mistura está diretamente ligada ao teor de cimento empregado (encontrado a partir da dosagem e ensaios laboratoriais apresentados na NBR 12253/92), ao tempo de mistura, ao tempo de cura, ao teor de argila e, de forma intuitiva, ao CBR (*California Bearing Ratio*, também conhecido por ISC – Índice de Suporte Califórnia) do solo. O tempo de mistura refere-se ao intervalo de tempo entre a mistura e a compactação, o qual não deve ultrapassar quatro horas (SENÇO, 2001, p. 109-113).

O solo-cimento empregado como camada de pavimento pode ser misturado diretamente na pista, quando forem vias de baixo volume de tráfego, caso contrário deve ser feito a partir de usinagem. Para realização da cura, a qual permite a hidratação do cimento e conseqüentemente o ganho de resistência, pode ser empregado capim umedecido, solo arenoso (não é muito aconselhado, visto que o cimento reage com as partículas de solo da cobertura), ou asfalto diluído e emulsão asfáltica de cura rápida, os quais são mais utilizados e

indicados. Não deve ser permitido tráfego durante o período de cura (SENÇO, 2001, p. 90, 98-99).

Em rodovias, o solo-cimento é destinado a bases de pavimentos asfálticos e a sub-base de pavimentos de concreto. Além disso, ele é especificado por órgãos e concessionárias, demonstrando seu caráter para competir com base de brita graduada simples (BERNUCCI et al., 2008, p. 363-364).

## 5 SOLO-EMULSÃO

O solo-betume é uma técnica de estabilização mundialmente conhecida, empregada há mais de 50 décadas no Brasil (GONDIM, 2008, p. 31). Segundo Senço (2001, p. 132), estabilização betuminosa é o método em que se adiciona material betuminoso a um solo, ou mistura de solos, com o objetivo de melhorar as suas características.

Diversos ligantes asfálticos são comercializados no Brasil, entretanto, por possuírem as características necessárias o cimento asfáltico de petróleo, o asfalto diluído e a emulsão asfáltica são os mais empregados para estabilização betuminosa. Por não necessitarem de aquecimento para sua fluidificação, visto que são líquidos à temperatura ambiente, os dois últimos materiais betuminosos citados são os mais utilizados, dando destaque maior à emulsão, que gera o solo-emulsão.

De acordo com a Associação Brasileira das Empresas Distribuidoras de Asfaltos (2001), o solo-emulsão é a denominação da mistura de solos, geralmente locais, com emulsão asfáltica (podendo ser ainda adicionado fíler mineral ativo) a qual é espalhada e compactada a frio. Ainda considera-se a água como material constituinte da mistura.

Nos itens seguintes serão abordados os materiais empregados no solo-emulsão, as características e comportamento dessa mistura, bem como seu projeto e emprego.

### 5.1 MATERIAIS

Entre diversos outros fatores, o tipo e qualidade dos materiais constituintes da mistura são de extrema importância para a sua qualidade. A seguir será apresentada, brevemente, o que é a emulsão asfáltica e quais as mais empregadas frente ao uso em solo-emulsão. Ainda, nesse mesmo contexto, serão indicados quais os tipos de solos apresentam os melhores resultados após serem estabilizados com emulsão. Por fim, será detalhada a influência da água nessa técnica.

## 5.1.1 Emulsão

O próximo item trata de aspectos gerais de emulsão asfáltica (fabricação e funcionamento), além de relatar qual tipo é mais usualmente empregado em solo-emulsão. O item seguinte apresenta os ensaios utilizados para caracterização da mesma.

### 5.1.1.1 Aspectos gerais

Para que o cimento asfáltico de petróleo – CAP – recubra os agregados é necessário que possua uma viscosidade baixa, fato que só é obtido com o aquecimento desse ligante. Evitando-se aquecer o ligante foi desenvolvida, entre outros materiais, a emulsão asfáltica – EAP. A EAP é uma dispersão de asfalto e água. Para mantê-la estável é ainda imprescindível um agente emulsificante, que reduz a tensão superficial da água, o que permite que os glóbulos de asfalto fiquem em suspensão na água, sem que se unam (BERNUCCI et al., 2008, p. 81).

Primeiramente, é realizada a chamada quebra do asfalto líquido aquecido, em um moinho coloidal, para que sejam formados os glóbulos micrométricos de asfalto. Posteriormente, misturam-se os glóbulos com uma solução composta por água, emulsificante e outros aditivos que possuem efeitos diferenciados (BERNUCCI et al., 2008, p. 81).

Devido ao contato com o agregado, à evaporação da água ou ao desequilíbrio eletroquímico ocorre a ruptura da emulsão, ou seja, a separação da água e dos glóbulos, deixando-os livres para se aglutinarem, resultando em um asfalto residual. O tempo de ruptura é uma forma de classificação da emulsão, podendo ser lenta, média ou rápida. Além disso, a emulsão é classificada quanto à carga iônica, a partir do tipo de emulsificante empregado, em catiônica (carga positiva), aniônica (carga negativa) ou não-iônica (sem carga elétrica, ou seja, neutra). Por fim, a emulsão também é classificada em função do teor de asfalto contido na mesma (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS EMPRESAS DISTRIBUIDORAS DE ASFALTOS, 2001; BERNUCCI et al., 2008, p. 83-84).

De acordo com Kézdi (1979, p. 200), o emulsificante presente na emulsão empregada para estabilizar o solo deve reagir com a superfície mineral dos grãos. Ainda dentro desse contexto, Jacintho (2005, p. 16) cita que a velocidade de ruptura da emulsão é escolhida de acordo com a superfície específica e com as características químicas do solo. O autor informa

que são recomendadas emulsões de ruptura média e lenta, e a mais utilizada é a emulsão de ruptura lenta catiônica – RL-1C.

A Associação Brasileira das Empresas Distribuidoras de Asfaltos (2001) também relata esse emprego majoritário da emulsão RL-1C. Além disso, alerta que dependendo da quantidade de finos reativos e/ou plásticos passantes da peneira n. 200, pode-se empregar emulsão asfáltica não iônica para lama asfáltica – LA-E – ou ainda fíler (cal ou cimento Portland).

Gondim (2008, p. 45), a partir de pesquisas realizadas na área, observa que as emulsões aniônicas reagem apenas com agregados alcalinos, já as emulsões catiônicas reagem tanto com agregados alcalinos quanto com ácidos. É por esse motivo que se recomenda e emprega, na maioria das vezes, as emulsões catiônicas, para que, independentemente do tipo de solo, ele possa ser estabilizado satisfatoriamente.

Quando a emulsão rompe rapidamente pode ser que não haja uma mistura adequada entre o solo e o betume, resultando em uma estabilização deficiente. Por isso apenas as emulsões de ruptura média e lenta são usadas para solo-emulsão.

#### 5.1.1.2 Ensaio de caracterização

É necessário conhecer as propriedades do material que se está utilizando, para verificar, não somente, se eles atendem as especificações de normas, como também se são adequados ao uso proposto. Neste contexto, existem diversos ensaios específicos de classificação das emulsões, sendo alguns deles:

- a) sedimentação;
- b) peneiração;
- c) desemulsibilidade;
- d) resíduo por evaporação;
- e) viscosidade;
- f) carga de partícula;
- g) pH;
- h) ruptura da emulsão.

O ensaio de **sedimentação**, proposto na norma NBR 6570/2010, tem por objetivo avaliar o grau de desagregação da emulsão asfáltica, ou seja, a sedimentação, após 5 dias sem agitação.

O ensaio de **peneiração**, cuja metodologia consta na norma NBR 14393/2006, mede a formação de grumos de CAP, superiores a determinada espessura, na emulsão asfáltica, que ocorrem devido à má fabricação ou estocagem do produto. O ensaio de **desemulsibilidade**, contido na norma NBR 6569/2000, visa identificar a porcentagem de emulsão que rompe a partir da sua mistura com um reagente químico.

O ensaio de **resíduo por evaporação**, descrito na norma NBR 14376/99, determina a quantidade de resíduo seco contido na emulsão, após a evaporação de todos os voláteis, ou seja, nesse ensaio é encontrada a quantidade de material asfáltico que compõe a emulsão. A **viscosidade** nada mais é do que a consistência, a trabalhabilidade do material (mais fluido ou mais duro), a qual, para emulsão asfáltica, é encontrada nos métodos descritos na NBR 14491/2000.

O ensaio de **carga de partícula**, descrito na norma NBR 6567/2000, define qual a carga das partículas de emulsão, ou seja, se a mesma é aniônica, catiônica ou não iônica. O ensaio de determinação do **pH**, norma NBR 6299/2005, tem por finalidade identificar se a emulsão é ácida ou básica, característica que é adquirida a partir do emulsificante utilizado. Por fim, a **ruptura da emulsão**, encontrada a partir das normas NBR 6302/200 e 6297/2003, determina a porcentagem de emulsão que rompe, frente ao todo, sob certas condições.

Como dito anteriormente, as emulsões são compostas de, entre outros materiais, ligante asfáltico. Assim, é necessário conhecimento das propriedades desse ligante que está contido na emulsão. Logo, ensaios com o resíduo da emulsão (CAP residual) são fundamentais, sendo alguns deles:

- a) ponto de amolecimento;
- b) penetração;
- c) ductilidade.

O ensaio de **ponto de amolecimento** é normalizado pela NBR 6560/2008. Ele indica a temperatura na qual o asfalto amolece e atinge certa condição de escoamento (BERNUCCI et al., 2008, p. 48). A partir desse resultado, sabe-se a temperatura que o asfalto da pista amolece, perdendo capacidade elástica, o que contribui para ocorrência de deformações permanentes.

O ensaio de **penetração** é padronizado pela NBR 6576/2007. Seu objetivo é determinar a penetração da agulha na amostra de CAP, e assim, de forma qualitativa, determinar a consistência do mesmo.

O ensaio de **ductilidade** é normalizado pela NBR 6293/2001. Nesse ensaio mede-se a capacidade de alongamento do material asfáltico antes de romper e, de forma indireta, é avaliada a sua coesão.

## 5.1.2 Solo

No próximo item são abordados aspectos referentes a solos empregados em solo-emulsão. O item seguinte apresenta os ensaios utilizados para caracterização de solos em geral.

### 5.1.2.1 Aspectos gerais

Diversas pesquisas foram executadas para encontrar o tipo de solo que melhor se comporte com emulsão asfáltica. Nogueira (1961, p. 226) cita que os melhores resultados para estabilização betuminosa são obtidos com solos que possuam a granulometria apresentada no quadro 2.

Quadro 2 – Granulometria dos solos para solo-emulsão

<b>Peneira</b>	<b>% passante</b>
n. 4	>50%
n. 40	35 – 100%
n. 200	10 – 50%

(fonte: adaptado de NOGUEIRA, 1961, p. 226)

O autor ainda indica que:

- a) o diâmetro máximo das partículas do solo não devem ser superiores a 1/3 da espessura da camada compactada de solo tratado;
- b) o material passante na peneira n. 40 deverá ter limite de liquidez (LL) inferior a 40% e índice de plasticidade (IP) inferior a 18%.

Kézdi (1979, p. 188-189) afirma que embora quase todos os solos inorgânicos possam ser estabilizados com betume, os que apresentam melhores resultados são os que possuem as características citadas no quadro 2 e nas alíneas acima. Além disso, o autor relata que se o solo inorgânico for ácido deve ser estabilizado primeiramente com cal. Por fim, se o solo contém matéria orgânica ácida não pode ser estabilizado com betume.

Os materiais britados com equivalente de areia superior a 30% e porcentagem de material passante na peneira n. 200 inferior a 15 e os solos com IP menor que 8%, equivalente de areia entre 20 e 30% e com menos de 20% de material passante na peneira n. 200, podem ser estabilizados diretamente com emulsão asfáltica. Já os solos com IP maior que 8% e equivalente de areia menor que 20%, necessitam de cal ou cimento Portland para reduzir sua plasticidade antes de ser adicionada a EAP (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS EMPRESAS DISTRIBUIDORAS DE ASFALTOS, 2001). O quadro 3 é um resumo dos requisitos empregados por diversos autores para escolha de solos a serem estabilizados com betume.

Segundo Gondim (2008, p. 40), a maior parte dos pesquisadores relata que solos granulares apresentam resultados melhores quanto à estabilização betuminosa. Isso porque solos finos e plásticos são difíceis de destorroar, o que prejudica a mistura do sistema. Entretanto, Vogt<sup>2</sup> (1971 apud MICELI JÚNIOR, 2006, p. 55) afirma que é necessária uma parcela mínima de finos passantes na peneira n. 200, visto que o fíler tem função de aumentar a viscosidade do filme de ligante e dar uma coesão residual suficiente.

Nota-se que, até o momento, só foram abordadas características físicas do solo, porém Jacintho (2005, p. 14) ressalta que “Diferentes constituições químicas e mineralógicas dos solos, bem como a superfície específica dos grãos, exercem forte influência no processo de estabilização.”. Nesse contexto, estudos de Kézdi (1979, p. 200-201) informam que:

- a) quanto maior o teor de silício contido nos minerais de argila do solo, maior o teor de betume necessário para uma estabilização satisfatória;
- b) quanto maior o teor de ferro e alumínio contido nos minerais de argila do solo, mais fácil será a estabilização;
- c) íon de sódio presente no solo sempre é prejudicial, enquanto íon de cálcio, dependendo de sua concentração, pode ser prejudicial ou favorável.

---

<sup>2</sup> VOGT, J. C. Estabilização betuminosa. In: SIMPÓSIO SOBRE PESQUISAS RODOVIÁRIAS, 7., 1971, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: Instituto de Pesquisas Rodoviárias, 1971.

Quadro 3 – Requisito dos solos a serem estabilizados segundo vários autores

Tipo de solo	LL e IP do solo	% passante peneira n. 200	Fonte
Areias	IP máximo de 12%	25% máximo	Yoder e Witczak <sup>3</sup> (1975)
Pedregulhos e areia pedregulhosas	IP máximo de 12%	15% máximo	
Solos finos	IP máximo de 18% LL máximo de 40%	35% máximo	
Solos em geral	IP máximo de 18% LL máximo de 40%	entre 10 e 50%	Kézdi <sup>4</sup> (1979)
Solos em geral	IP máximo de 14%	5% mínimo	Vogt <sup>5</sup> (1971)
Solos arenosos		35% máximo	Brasil <sup>6</sup> (1988)
Solos argilosos	IP máximo de 6% LL máximo de 30%	35% máximo	
Materiais britados		15% máximo	Associação Brasileira das Empresas Distribuidoras de Asfaltos <sup>7</sup> (2001)
Solos em geral	IP máximo de 8%	20% máximo	
Solos em geral		25% máximo	<i>American Society of Testing Materials</i> <sup>8</sup> (2006)

(fonte: MICELI JÚNIOR, 2006, p. 56)

Reforça-se que esses parâmetros do solo são aconselháveis, entretanto não se descarta a possibilidade que sejam estabilizados solos com valores diferentes a esses apresentados. Isso

<sup>3</sup> YODER, E. J.; WITCZAK, M. W. **Principles of pavement design**. 2nd ed. New York: John Wiley, 1975.

<sup>4</sup> Veja lista de referências.

<sup>5</sup> VOGT, J. C. Estabilização betuminosa. In: SIMPÓSIO SOBRE PESQUISAS RODOVIÁRIAS, 7., 1971, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: Instituto de Pesquisas Rodoviárias, 1971.

<sup>6</sup> BRASIL. Ministério dos Transportes. Departamento de Estradas de Rodagem de São Paulo. **DER-SP 307**: base e sub-base de solo asfalto. São Paulo, 1988.

<sup>7</sup> Veja lista de referências.

<sup>8</sup> AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 4223**: standard practice for preparation of test specimens of asphalt – stabilized soils. Pennsylvania, 2006.

porque há experiência na literatura de casos em que solos com parâmetros diferentes obtiveram ótimo desempenho.

#### 5.1.2.2 Ensaio de caracterização

A diversidade de características e comportamento dos solos, frente ao uso na Engenharia, levou ao seu agrupamento em conjuntos que apresentam certas propriedades semelhantes. A classificação tem por objetivo estimar o provável comportamento do solo e ainda permitir o planejamento de investigações, obtendo-se, portanto, os parâmetros necessários (PINTO, 2002, p. 51-52).

Os sistemas de classificação baseados no tipo e no comportamento dos grãos do solo são os mais conhecidos e utilizados e buscam definir grupos que apresentem comportamentos semelhantes sob o ponto de vista da Engenharia Civil. Nestes sistemas, a classificação é baseada na composição granulométrica e nos índices de Atterberg (PINTO, 2002, p. 51-52).

Dentre eles, cita-se o Sistema Unificado de Classificação de Solo (SUCS) e o Sistema da *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO). Cabe ressaltar que ambos os sistemas foram desenvolvidos para classificar solos de países de clima temperado, portanto para solos de climas tropicais esses sistemas de classificação podem não ser precisos.

O SUCS, segundo Pinto (2002, p. 52), “[...] é utilizado principalmente pelos geotécnicos que trabalham em barragens de terra.”. De acordo com Brasil (2006, p. 55), o SUCS baseia-se na identificação da textura e plasticidade do solo. Pinto (2002, p. 53) cita que o primeiro aspecto a se considerar é a porcentagem de finos presentes no solo.

O sistema AASHTO foi originalmente desenvolvido em 1929. Ele sofreu diversas revisões até o sistema atual, publicado em 1978, baseado na versão de 1945 TRB – *Transportation Research Board*. Esse sistema é muito empregado no reconhecimento de solos para pavimentos rodoviários em todo o mundo, por isso é também chamado de Sistema Rodoviário de Classificação (PINTO, 2002, p. 57). O quadro 4 apresenta a classificação geral.

Quadro 4 – Classificação AASHTO

CLASSIFICAÇÃO GERAL	Materiais granulares - 35% (ou menos) passando na peneira n. 200							Materiais silto-argilosos - 35% (ou menos) passando na peneira n. 200			
	A-1		A-3	A-2				A-4	A-5	A-6	A-7
	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				A-7-5 A-7-6
Granulometria - % passante na peneira											
n. 10	50 máx.		51 mín.								
n. 40	30 máx.	50 máx.									
n. 200	15 máx.	25 máx.	10máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	36 mín.	36 mín.	36 mín.	36 mín.
Características da fração passante na peneira n. 40											
Limite de Líquidez (%)				40 máx.	41 mín.	40 máx.	41 mín.	40 máx.	41 mín.	40 máx.	41 mín.
Índice de Plasticidade (%)	6 máx.	6 máx.	NP	10 máx.	10 máx.	11 mín.	11 mín.	10 máx.	10 máx.	11 mín.	11 mín.
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 siltosos ou argilosos				Solos siltosos		Solos argilosos	
Comportamento como subleito	Excelente a bom							Sofrível a mau			

o IP do grupo A-7-5 é igual ou menor que o LL - 30; se maior será A-7-6

(fonte: adaptado de BRASIL, 2006, p. 56)

O limite de liquidez é obtido a partir do ensaio cujas especificações constam na norma DNER-ME 122/94 e o limite de plasticidade (LP) na norma DNER-ME 082/94. A diferença entre LL e LP gera o índice de plasticidade. De acordo com Brasil (2006, p. 37) o índice de grupo é dado pela fórmula 1:

$$IG = 0,2A + 0,005AC + 0,01BD \quad (\text{fórmula 1})$$

Onde:

IG – índice de grupo;

A – material que passa na peneira n. 200 menos 35 (%), caso esta % for > 75, adota-se A = 40, caso esta % seja < 35, adota-se A = 0;

B – material que passa na peneira n. 200 menos 15 (%), caso esta % for > 55, adota-se B = 40; caso esta % seja < 15, adota-se B = 0;

C – valor de limite de liquidez (LL) menos 40 (%), caso o LL > 60%, adota-se C = 20; se o LL < 40%, adota-se C = 0;

D – valor de índice de plasticidade (IP) menos 10 (%), caso o IP > 30%, adota-se D = 20; se o IP < 10%, adota-se D = 0.

Além da granulometria e dos índices de Atterberg, outras características importantes do solo são: umidade ótima, massa específica aparente seca máxima, CBR e módulo de resiliência. Essas características não servem para classificar o solo, apenas são parâmetros necessários para o dimensionamento satisfatório de uma obra.

A compactação tem como objetivo aumentar o contato entre grãos e tornar o aterro mais homogêneo (PINTO, 2002, p. 65). Na compactação, a partir de uma energia aplicada, encontra-se uma umidade ótima na qual a massa específica aparente seca ( $\gamma$ ) é a máxima. Ou seja, há uma umidade na qual o volume de vazios preenchidos com ar é mínimo. Esses parâmetros são encontrados através do ensaio de compactação, também conhecido como ensaio de Proctor, detalhado na norma NBR 7182/86.

O CBR está ligado com a resistência do solo. Nesse ensaio, normalizado pela norma DNER-ME 049/94, mede-se a penetração de um pistão em uma amostra saturada. O resultado é a porcentagem de pressão para gerar a referida penetração, utilizando como base o valor de 100%, correspondente ao ensaio com a amostra padrão (brita graduada). O módulo de resiliência é descrito no item 5.3.1.

### 5.1.3 Água

Para realização da técnica de solo-emulsão existem quatro teores de água que devem ser observados, ou seja, água:

- a) presente no solo – umidade higroscópica (MICELI JÚNIOR, 2006, p. 80);
- b) presente na emulsão – percentual de água existente na emulsão, encontrado através de ensaios de resíduo (MICELI JÚNIOR, 2006, p. 80);
- c) de diluição – água que se adiciona na emulsão para diminuir sua viscosidade, facilitando a mistura. Além disso, como será apresentado no próximo subcapítulo, emulsões diluídas rompem mais lentamente, havendo maior tempo para que ocorra a mistura (MATTOS, 1991, p. 109, 118);
- d) de dispersão – água que se adiciona previamente no solo para, assim como a água de diluição, retardar a ruptura e facilitar a homogeneização da mistura (MATTOS, 1991, p. 118). Vogt<sup>9</sup> (1971 apud MICELI JÚNIOR, 2006, p. 80) afirma que existe um teor mínimo de água, ficando entre 3 e 5%, abaixo do qual não é possível dispersar a emulsão no solo.

A soma de todas essas parcelas de água deve atingir a umidade ótima do solo, para que assim a mistura obtenha uma adequada estabilidade e resistência estrutural (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS EMPRESAS DISTRIBUIDORAS DE ASFALTOS, 2001).

## 5.2 CARACTERÍSTICAS E COMPORTAMENTO DO SOLO-EMULSÃO

O sistema solo-emulsão-água pode ser considerado como um sistema heterogêneo, constituído por três fases e quatro componentes. Das três fases uma é contínua e duas são descontínuas. A fase contínua é constituída pela solução aquosa, obtida pela água de diluição e pela fase aquosa da emulsão. Nessa fase, a água faz papel de solvente e o emulsificante da emulsão – denominado agente tensio-ativo, pois diminui a tensão superficial do solvente – faz o papel de soluto. As fases descontínuas são constituídas pelo solo e pelos glóbulos de betume presentes na emulsão (MATTOS, 1991, p. 107).

Quando os grãos de solo entram em contato com a solução aquosa eles adsorvem parte do soluto tensio-ativo, o que provoca uma diminuição da concentração desse soluto na solução

---

<sup>9</sup> VOGT, J. C. Estabilização betuminosa. In: SIMPÓSIO SOBRE PESQUISAS RODOVIÁRIAS, 7., 1971, Rio de Janeiro. *Anais...* Rio de Janeiro: Instituto de Pesquisas Rodoviárias, 1971.

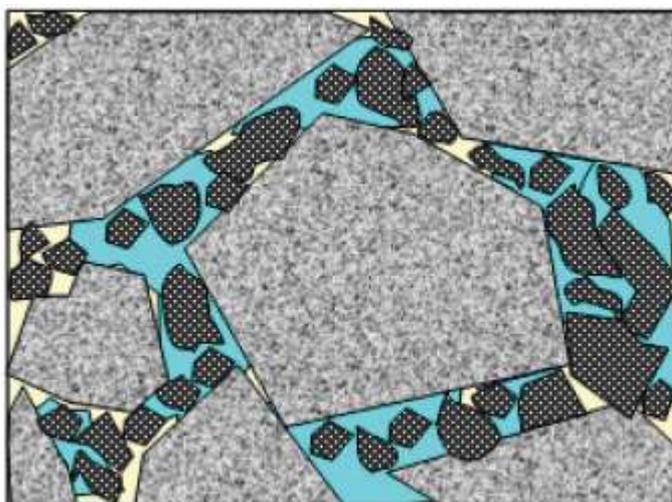
aquosa. A diminuição do soluto gera aumento da tensão superficial que provoca a ruptura da emulsão e, por fim, a formação de aglomerados de betume (MATTOS, 1991, p. 108-109).

A quantidade de soluto adsorvido é proporcional à concentração de soluto existente na solução aquosa. Ou seja, quanto mais dissolvida for a emulsão, ou quanto maior a quantidade de água adicionada ao solo, mais retardada será a ruptura da emulsão e melhor será a mistura (MATTOS, 1991, p. 109).

Após a compactação as partículas de ligante betuminoso, que se formam devido à ruptura da emulsão, fecham a rede de capilares do solo, proporcionando, juntamente com o soluto tensioativo presente na superfície dos grãos de solo, uma ação hidrófuga, que aumenta a resistência do sistema. Entretanto, essas partículas também recobrem os grãos de solo, funcionando como rótulas que minimizam o contato entre os grãos, diminuindo, assim, a resistência cisalhante (MATTOS, 1991, p. 111-112).

Para que não haja redução de atrito, é ideal que a película de betume que recobre os grãos seja fina. Porém, quanto mais espessa for, maior será a coesão entre os grãos (KÉZDI, 1979, p. 182). Assim, o filme tem que possuir uma espessura ideal para se adequar às duas limitações. A *Asphalt Academy* (2009, p. 1) cita que não há formação de um filme em toda volta dos grãos de solo, visto que as partículas de betume não se conectam. Na figura 4 apresenta esse sistema.

Figura 4 – Estrutura dos grãos de solo e partículas de betume



(fonte: ASPHALT ACADEMY, 2009, p. 2)

Diante desses fatos, Moncayo V (1980, p. 39) cita que a estabilização com betume possui as finalidades de aumentar a resistência do solo e reduzir a absorção de água, a partir da adição de quantidades diferentes de asfalto. Miceli Júnior (2006, p. 48) informa que a melhoria no comportamento mecânico e o efeito impermeabilizante tornam a mistura mais resistente aos esforços de tráfego e às variações da umidade. Ainda são citados como benefícios (ASPHALT ACADEMY, 2009, p. 5; BERNUCCI et al., 2008, p. 352):

- a) o aumento de resistência à tração – resultante da propriedade visco-elástica do betume, o que elimina a ocorrência de rachaduras quando a mistura é submetida a esforços de tração;
- b) coesão – oriunda das películas de betume;
- c) durabilidade – vinculada à impermeabilização.

Assim como nos outros dois tipos de estabilização físico-química, a resistência adquirida pela mistura é muito influenciada pelo tempo de cura. Sant’Ana (2009, p. 186) afirma que sete dias é tempo suficiente para que o processo de cura da EAP ative as propriedades ligantes desse material. Gondim (2008, p. 48) indica que nessa etapa ocorrem diversas reações entre a emulsão e o solo, visto que é durante a cura que acontece a evaporação da água da emulsão, o que facilita a formação do filme de betume. Portanto, diferentemente das curas convencionais, nesse processo é fundamental a perda de água.

### 5.3 PROJETO DE MISTURAS SOLO-EMULSÃO

Como apresentado anteriormente, é ideal que se misture ao solo uma quantidade de emulsão asfáltica que não prejudique nem a resistência nem a impermeabilização. Logo, busca-se um teor ótimo de EAP.

Gondim (2008, p. 46) cita que, devido às poucas pesquisas sobre esse assunto, não há uma dosagem normalizada. Cada pesquisador desenvolveu um método próprio de dosagem, não havendo uniformidade entre eles. Sant’Ana (2009, p. 78) ainda enfatiza que essa carência está também relacionada às diferenças de fabricação da emulsão e das características do solo, além de variáveis envolvidas na mistura e no condicionamento dos corpos-de-prova.

Para se encontrar o teor ótimo de emulsão, é fundamental escolher qual parâmetro deseja-se analisar (por exemplo: resistência e/ou desgaste). Em virtude disso, é necessário que se

misture diversos teores de emulsão ao solo e ensaiem-se corpos-de-prova para que se verifique a variação do parâmetro que se deseja avaliar com a dosagem (MICELI JÚNIOR, 2006, p. 58).

Miceli Júnior (2006, p. 59) expõe os ensaios cujos resultados servem como referência para diversos autores escolherem o teor de projeto. Sendo alguns deles: estabilidade Marshall, módulo de resiliência, resistência à tração indireta, resistência à compressão simples, CBR, mini-CBR, ensaios triaxiais UU e estabilidade Hubbard-Field. Entretanto, Gondim (2008, p. 46) ressalta que grande parte dos ensaios utilizados para a dosagem está em desuso ou são inadequados para avaliação de misturas estabilizadas físico-quimicamente.

Dentro deste contexto, Kézdi (1979, p. 203) apresenta a fórmula 2 para determinação da quantidade de betume necessária para cada solo. A quantidade calculada deve ser transformada em quantidade de emulsão asfáltica (a partir do resíduo existente). Esse teor de EAP é o ponto de partida central, devendo-se misturar percentuais a mais e a menos, para assim realizar os ensaios propostos e encontrar o teor de projeto:

$$P = 0,015a + 0,02b + 0,03c + 0,09d \quad (\text{fórmula 2})$$

Onde:

P – teor de betume a ser acrescentado (%);

a – solo retido na peneira n. 10 (%);

b – solo passante na peneira n. 10 e retido na peneira n. 40 (%);

c – solo passante na peneira n. 40 e retido na peneira n. 200 (%);

d – solo passante na peneira n. 200 (%).

Segundo o mesmo autor, pode haver uma simplificação da fórmula 2, resultando em um teor de betume dependente apenas da fração passante na peneira n. 200, conforme a fórmula 3:

$$P = 2,75 + 0,064d \quad (\text{fórmula 3})$$

Onde:

P – teor de betume a ser acrescentado (%);

d – solo passante na peneira n. 200 (%).

Sant’Ana (2009, p. 85-86) afirma que o teor de asfalto utilizado no solo-emulsão é proporcional à superfície específica das partículas do solo. Como as partículas finas possuem maior superfície específica, quanto maior o teor de finos, maior o teor de CAP a ser empregado. O autor apresenta a fórmula 4, denominada fórmula de Vogt, para encontrar a superfície específica do agregado, adotando que a massa específica dos grãos é 2,65 g/cm<sup>3</sup>:

$$100\Sigma = 0,07P_4 + 0,14P_3 + 0,33P_2 + 0,81P_1 + 2,7S_3 + 9,15S_2 + 21,9S_1 + 135F \quad (\text{fórmula 4})$$

Onde:

$\Sigma$  – superfície específica (m<sup>2</sup>/kg);

P<sub>4</sub> – fração entre as peneiras 50 e 25 mm (%);

P<sub>3</sub> – fração entre as peneiras 25 e 12,5 mm (%);

P<sub>2</sub> – fração entre as peneiras 12,5 e 4,76 mm (%);

P<sub>1</sub> – fração entre as peneiras 4,76 e 2,00 mm (%);

S<sub>3</sub> – fração entre as peneiras 2,00 e 0,42 mm (%);

S<sub>2</sub> – fração entre as peneiras 0,42 e 0,177 mm (%);

S<sub>1</sub> – fração entre as peneiras 0,177 e 0,075 mm (%);

F – fração passante na peneira 0,075 mm (%).

O mesmo autor finaliza com a fórmula 5, denominada fórmula de Duriez, a qual indica a quantidade de CAP residual ideal para o tipo de solo estudado, que posteriormente deve ser transformada em quantidade de EAP, novamente servindo de ponto de partida central:

$$p = k.(\Sigma)^{0,2} \quad (\text{fórmula 5})$$

Onde:

p – teor de asfalto residual (%);

k – coeficiente de módulo de riqueza (dependente do agregado e do asfalto);

$\Sigma$  – superfície específica (m<sup>2</sup>/kg).

No quadro 5 são apresentados alguns módulos de riqueza usuais, devido ao tipo de mistura empregada e a sua finalidade de aplicação.

Quadro 5 – Módulos de riqueza (k)

<b>Mistura</b>	<b>k</b>	<b>Aplicação</b>
CAUQ	3,5 a 4,0	Rodovia
CAUQ	3,8 a 4,2	Aeroporto
<i>Sheet Asphalt</i>	4,0 a 4,5	Capa
PMQsD	3,0 a 3,6	Capa
PMFA	2,5 a 3,5	Base
PMFA	2,8 a 4,0	Capa

(fonte: SANT'ANA, 2009, p. 88)

Os ensaios mais aceitos e usuais para avaliação das propriedades mecânicas e, conseqüentemente, dosagem de misturas solo-emulsão são: módulo de resiliência (MR), resistência à tração (RT) por compressão diametral e resistência à compressão simples (RCS), os quais serão apresentados nos próximos itens.

### 5.3.1 Módulo de resiliência

O MR é a relação entre a tensão aplicada e a conseqüente deformação recuperável (resiliente). É um parâmetro indispensável no dimensionamento de pavimentos. Essa propriedade estima a capacidade de deformação elástica do material (flexibilidade) quando submetido a carregamentos cíclicos, simulando as condições de carregamento do pavimento em campo. A norma DNIT-ME 134/2010 apresenta o procedimento para se obter o MR de solos, determinado pelo ensaio triaxial de cargas repetidas, entretanto o mesmo procedimento pode ser utilizado para obter o MR de solos estabilizados com emulsão asfáltica.

### 5.3.2 Resistência à tração

Conhecer a RT das camadas do pavimento é fundamental, visto que essas sofrem tração na flexão, gerada pela passagem do tráfego. Segundo Bernucci et al. (2008, p. 308), devido à dificuldade de ensaiar corpos-de-prova à tração, utilizam-se métodos que determinam esse parâmetro indiretamente. No Brasil, desde 1972, determina-se a RT de misturas asfálticas indiretamente, através de ensaio de compressão diametral.

O ensaio de resistência à tração por compressão diametral, padronizado pela pelas normas NBR 15087/2004 e DNIT-ME 136/2010, consiste em aplicar um esforço de compressão no plano diametral do corpo-de-prova até a sua ruptura. Assume-se que a ruptura é devida apenas a tensão de tração gerada no plano perpendicular ao de aplicação da carga, sendo essa, a tensão máxima admissível do material. De acordo com a norma DNIT-ME 136 (BRASIL, 2010, p. 2) a RT é dada pela fórmula 6:

$$\sigma_R = \frac{2C}{100 \cdot \pi \cdot D \cdot H} \quad (\text{fórmula 6})$$

Onde:

$\sigma_R$  – tensão de tração (MPa);

C – carga de compressão de ruptura (N);

D – diâmetro do corpo-de-prova (cm);

H – altura do corpo-de-prova (cm).

### 5.3.3 Resistência à compressão simples

A RCS é dada pela razão entre a carga de compressão de ruptura e a área da seção transversal do corpo-de-prova (BRASIL, 1994, p. 4). É ideal que se conheça esse parâmetro, devido ao fato das camadas sofrerem compressão pela passagem dos veículos.

A resistência à compressão axial dos corpos-de-prova de solo-cimento é normalizada pela DNER-ME 201/94. A obtenção da resistência à compressão de solo-emulsão pode ser baseada na mesma, visto que não há norma específica para esse material.

## 5.4 EMPREGO DO SOLO-EMULSÃO

Com solo estabilizado por EAP pode-se executar sub-base e base de pavimentos. As bases de solo-emulsão podem receber uma camada de revestimento de mistura asfáltica à quente, ou quando forem vias de baixo volume de tráfego, segundo a Associação Brasileira das Empresas Distribuidoras de Asfaltos (2001), o revestimento pode ser, por exemplo, tratamento antipó, capa-selante, lama asfáltica, tratamento superficial ou microrevestimento asfáltico. Por fim, ainda para as vias de baixo volume de tráfego, o solo-emulsão pode servir, concomitantemente, como camada de base e camada de rolamento, nesse caso, atendendo às exigências quanto ao desgaste.

Cabe ressaltar que o solo-emulsão não deve ser construído em dias frios e úmidos. Isso se deve ao fato de que em períodos de chuva o teor de água presente no solo pode ser superior a umidade ótima, ou a umidade ótima pode ser ultrapassada após o acréscimo da emulsão (na qual grande parte da sua estrutura é constituída de materiais líquidos). Em baixas temperaturas, além de não haver secagem da água do solo, a emulsão pode romper prematuramente, resultando em um mistura não ideal (ASPHALT ACADEMY, 2009, p. 11; NOGUEIRA, 1961, p. 226).

## 6 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo serão descritos os materiais utilizados para a mistura solo-emulsão. Não serão apresentados os pormenores dos ensaios de caracterização e mecânicos, visto que o detalhamento consta nas normas citadas. Apenas serão apresentados procedimentos específicos utilizados no trabalho.

Como exposto no capítulo anterior, é necessário que sejam ensaiadas diversas composições de mistura para se encontrar aquela que gere melhores resultados no parâmetro que se deseja avaliar. Dessa forma, utilizando a equação de Duriez foi encontrado um teor de emulsão, o qual foi o ponto de partida para a dosagem. Foram moldados diversos corpos-de-prova (CP) variando:

- a) teor de emulsão;
- b) temperatura da emulsão;
- c) teor de água de dispersão;
- d) forma de adição da água de dispersão;
- e) teor de água de diluição da emulsão;
- f) forma e tempo de armazenamento da mistura antes da compactação.

A partir disso, foram escolhidas aquelas combinações de teores (água e emulsão) que apresentaram maior resistência à tração seca, após sete dias de cura ao ar, no ensaio de resistência à tração por compressão diametral. Essas combinações foram ensaiadas à compressão simples, também após sete dias de cura. Novamente, aquela que obteve a maior resistência foi admitida como a composição de projeto. O processo de dosagem detalhado será apresentado no item 6.2.

### 6.1 MATERIAIS EMPREGADOS

Nos dois itens seguintes serão apresentados os materiais utilizados para compor a mistura de solo-emulsão. Os materiais foram divididos em solos e emulsão asfáltica.

### 6.1.1 Solos

Os solos foram utilizados em uma pesquisa de âmbito nacional, além disso, foram aproveitados em uma dissertação de mestrado sobre solo-emulsão e no presente trabalho. O solo fino (denominado de solo 1) é proveniente de uma escavação realizada no Campus do Vale da UFRGS. O solo granular (denominado de solo 2) foi comprado pelo laboratório de uma empresa que comercializa esse tipo de material, localizada na Região Metropolitana de Porto Alegre.

Ambos os solos chegaram ao LAPAV em caminhões e foram despejados sobre uma pista asfáltica, permanecendo neste local durante um mês. Após esse período, foram armazenados em caixas plásticas. Anteriormente aos ensaios, entre 15 e 25 kg de solo eram levemente destorroados, deixados 48 horas na estufa à 100°C – para que fosse retirada toda umidade – e guardados em sacos plásticos.

A granulometria dos solos foi feita por peneiramento até as partículas retidas na peneira n. 200, com as partículas passantes dessa peneira foi feito o ensaio por sedimentação. Os dois métodos são descritos na norma NBR 7181/84. As curvas granulométricas constam nas figuras 5 e 6.

Os ensaios de compactação, de Índice de Suporte Califórnia e de módulo de resiliência foram realizados com energia de compactação modificada. Quanto maior a compactação do material maior a sua resistência. Assim, preconizando que a resistência do solo-emulsão fosse o mais próximo possível da resistência da brita graduada (visto que ele será empregado como camada de base) decidiu-se aplicar energia modificada para compactação dessa mistura. Como a umidade ótima do solo puro e sua massa específica aparente seca máxima são valores utilizados na dosagem do solo-emulsão, foi necessário utilizar energia modificada para os ensaios de solo puro também.

Em posse da granulometria e dos limites de Atterberg, segundo a classificação da AASHTO, o solo 1 é A-4 e o solo 2 é A-1-b. Portanto, o solo 1 é siltoso e o solo 2 é composto por fragmentos de pedras, pedregulho fino e areia.

Todos os ensaios de caracterização foram realizados no LAPAV e os resultados estão presentes no quadro 6. As curvas de compactação dos solos constam no apêndice A. Os resultados do ensaio de módulo de resiliência encontram-se no apêndice B.

Figura 5 – Curva granulométrica do solo 1

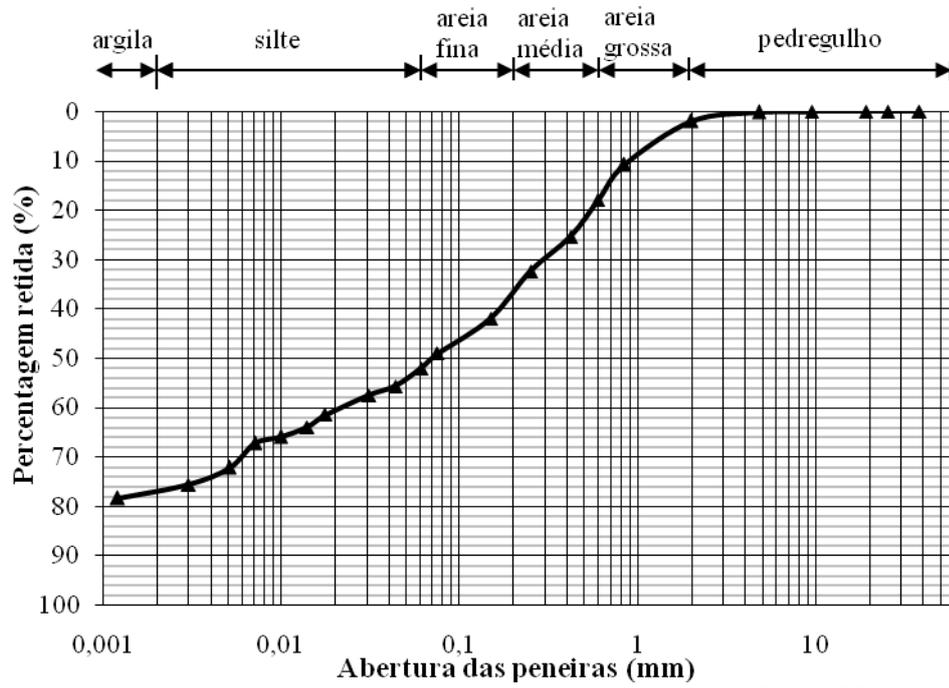
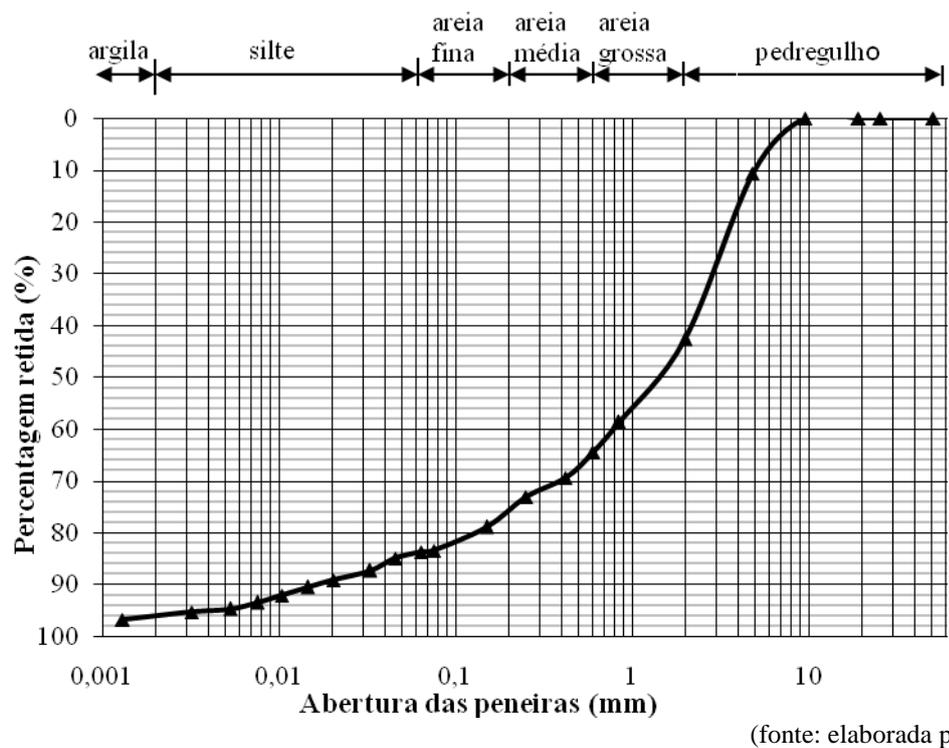


Figura 6 – Curva granulométrica do solo 2



Quadro 6 – Caracterização dos solos

Determinações		Solos	
		Solo 1	Solo 2
Granulometria (%)	Passante na 4,75 mm (n. 4)	99,85	89,42
	Passante na 2,00 mm (n. 10)	98,05	57,46
	Passante na 0,425 mm (n. 40)	74,67	30,66
	Passante na 0,075 mm (n. 200)	50,99	16,56
	Menor que 0,05 mm	44,32	15,07
	Menor que 0,005 mm	27,87	5,29
	Menor que 0,002 mm	21,66	3,23
Massa específica dos grãos que passam na n. 4 ( $\text{g/cm}^3$ )		2,604	2,682
Limite de liquidez (%)		27	23
Limite de plasticidade (%)		17	Não plástico
Ensaio de compactação	umidade ótima (%)	10,0	5,9
	$\gamma$ máxima ( $\text{g/cm}^3$ )	1,91	2,02
Ensaio de Índice de Suporte Califórnia (%)		22	41
Expansão (%)		0,14	0,07
Ensaio de módulo de resiliência MR (MPa) e $\Theta$ (kPa)		$\text{MR}=148,994.\Theta^{0,076}$	$\text{MR}=2,431.\Theta^{0,690}$

(fonte: elaborado pela autora)

### 6.1.2 Emulsão asfáltica

A emulsão asfáltica empregada neste trabalho foi fornecida por uma empresa que produz, comercializa e distribui materiais asfálticos. Ela foi fornecida em dois galões de 10 litros (figura 7), os quais foram armazenados em local protegido de umidade, luz e calor intenso para que fossem mantidas suas características. Além disso, pelo mesmo objetivo, os galões foram agitados todos os dias.

O primeiro galão foi fornecido em julho de 2011 e com ele foram moldados todos os CP ensaiados à RT. Os ensaios de RCS e MR foram realizados com a mistura cuja emulsão provinha do galão 2, fornecido em setembro do mesmo ano.

Figura 7 – Galão de emulsão asfáltica



(fonte: foto da autora)

Os ensaios de caracterização do primeiro galão foram realizados no LAPAV e seus resultados são apresentados no quadro 7. Não foi executado ensaio de carga de partícula, visto que a empresa informou que a emulsão era neutra, desenvolvida com a finalidade de ser utilizada para solo-emulsão. Os ensaios do segundo galão, também de emulsão neutra, foram realizados

no laboratório da empresa fornecedora, porém o ensaio de resíduo foi repetido no LAPAV para confirmação do resultado, visto que este era um parâmetro fundamental para dosagem. Os resultados dos ensaios constam no quadro 8.

Quadro 7 – Caracterização do primeiro galão de emulsão asfáltica

Característica	Norma	Valor	Especificação
<b>Ensaio sobre a emulsão</b>			
Viscosidade Saybol-Furol, 50°C, máx. (s)	NBR 14491/2000	11,46	Não especificado
Sedimentação, por diferença, 5 dias (%)	NBR 6570/2010	2,41	Não especificado
Resíduo, peso, mín. (%)	NBR 14376/99	58	Não especificado
Densidade (-)		1,017	Não especificado
<b>Ensaio sobre o resíduo</b>			
Penetração, 25°C, 100 g, 5 s (0,01 mm)	NBR 6576/2007	61	Não especificado
Ponto de amolecimento, mín. (°C)	NBR 6560/2008	44,5	Não especificado
Viscosidade Brookfield, 135°C, SP 21, 20 RPM, mín. (cP)	NBR 15184/2004	332,5	Não especificado

(fonte: elaborado pela autora)

Quadro 8 – Caracterização do segundo galão de emulsão asfáltica

Característica	Norma	Valor	Especificação
<b>Ensaio sobre a emulsão</b>			
Viscosidade Saybol-Furol, 50°C, máx. (s)	NBR 14491/2000	11	Não especificado
Sedimentação, por diferença, 5 dias (%)	NBR 6570/2010	2	Não especificado
Resíduo, peso, mín. (%)	NBR 14376/99	56	Não especificado
pH, máx.	NBR 6299/2005	6,3	Não especificado
Peneiração 0,84 mm, peso máx. (%)	NBR 14393/2006	0	Não especificado
Desemulsibilidade, peso (%)	NBR 6569/2000	0	Não especificado

(fonte: elaborado pela autora)

## 6.2 DOSAGEM E EXECUÇÃO DA MISTURA: RESULTADOS PRELIMINARES PARA DEFINIÇÃO DOS TEORES DE PROJETO

Por apresentar resultados satisfatórios em outras pesquisas, foi adotado que a dosagem seria baseada nas fórmulas 4 e 5, apresentadas anteriormente. Obtida pela fórmula 4 e pela granulometria dos solos, a superfície específica ( $\Sigma$ ) do solo 1 foi 72,54 m<sup>2</sup>/kg e do solo 2 foi 25,24 m<sup>2</sup>/kg.

Inserindo esses valores na fórmula 5 e utilizando módulo de riqueza (k) de 1,5 (visando teor de asfalto residual baixo para que, como se trata de vias de baixo volume de tráfego, o projeto seja econômico) obteve-se teor de asfalto residual (p) de 3,53% para o solo 1 e 2,86% para o solo 2. Como o primeiro galão de EAP possuía 58% de asfalto residual, para se chegar ao teor de asfalto residual calculado foi necessário aproximadamente 6,1% de emulsão no solo 1 e 4,9% no solo 2.

O teor de emulsão calculado serviu como ponto central da dosagem, sendo ensaiado também  $\pm 1$  ponto percentual de emulsão para ambos os solos. Assumiu-se que fluido era a soma da água de dispersão adicionada ao solo e da emulsão, ou seja, foi desconsiderado que uma parte da mesma era CAP residual. Do mesmo modo, o teor de fluido central foi a umidade ótima,

ensaiando-se também  $\pm 3$  pontos percentuais de fluido no solo 1 (7 e 13%) e  $\pm 2$  pontos percentuais no solo 2 (3,9 e 7,9%). O quadro 9 é um resumo dos teores iniciais a serem ensaiados.

Quadro 9 – Teores de água e de emulsão a serem ensaiados

Solo	CP	Teores (%)		Teor de fluido (%)
		Água	Emulsão	
1	1.1	0,9	6,1	7,0
	1.2	0,0	7,1	
	1.3	1,9	5,1	
	1.4	3,9	6,1	10,0
	1.5	2,9	7,1	
	1.6	4,9	5,1	
	1.7	6,9	6,1	13,0
	1.8	5,9	7,1	
	1.9	7,9	5,1	
2	2.1	0,0	3,9	3,9
	2.2	0,0	4,9	
	2.3	0,0	5,9	
	2.4	2,0	3,9	5,9
	2.5	1,0	4,9	
	2.6	0,0	5,9	
	2.7	4,0	3,9	7,9
	2.8	3,0	4,9	
	2.9	2,0	5,9	

(fonte: elaborado pela autora)

Partindo desses princípios, deu-se início à preparação das misturas no LAPAV para se executar os ensaios de RT. Foram separados, em recipientes circulares, 1100 g de solo na umidade de 0%. Primeiramente foi acrescentada a água de dispersão (água destilada) e posteriormente a emulsão asfáltica, em duas partes iguais (o que foi realizado em todas as posteriores moldagens), sendo misturado com espátula até obter homogeneização. Após esta etapa, a mistura ficou descansando ao ar por uma hora, simulando o tempo transcorrido entre aplicação e compactação no campo.

A mistura com o solo 1 ficou visivelmente comprometida, visto que a emulsão formou grumos com as partículas mais finas, não recobrendo todos os grãos. Nessa mistura, o material pulverulento envolveu a emulsão ao invés da emulsão envolvê-lo. Isto é exemplificado na figura 8. Na mistura com o solo 2 obteve-se melhor aparência, visto que a EAP cobriu as partículas, como é mostrado na figura 9.

Figura 8 – Primeira mistura com o solo 1



(fonte: foto da autora)

Figura 9 – Primeira mistura com o solo 2



(fonte: foto da autora)

Com cada mistura moldou-se um CP (de 10,2 cm de diâmetro e  $6,0 \pm 0,5$  cm de altura) aplicando 50 golpes em cada face com o soquete automático utilizado no método Marshall. No terceiro dia após a moldagem, os CP foram desmoldados e permaneceram curando à temperatura ambiente até o sétimo dia (figuras 10 e 11), quando foram rompidos à tração por compressão diametral.

Figura 10 – Primeiros CP com o solo 1



(fonte: foto da autora)

Figura 11 – Primeiros CP com o solo 2



(fonte: foto da autora)

Para comprovar que a emulsão impermeabilizou o solo, os CP devem ficar imersos em água antes de ocorrer o ensaio. Assim, para o ensaio de RT foram confeccionados dois CP para cada composição de teores, um sendo rompido seco, após permanecer uma hora na estufa à 25°C, e outro sendo rompido saturado, após permanecer uma hora em imersão na água à 25°C.

Nesta primeira etapa foram moldados os CP 1.4, 1.5, 1.6, 1.7, 2.5, 2.7, 2.8 e 2.9. A RT seca mais alta para o solo 1, como pode ser visto no quadro 10, foi 0,14 MPa e 0,05 MPa para o solo 2. Todos os CP de ambos os solos não suportaram a imersão. O termo líquido refere-se a soma das águas de dispersão e de diluição e da parte fluida da emulsão. O termo relação refere-se à relação entre a resistência à tração com e sem imersão.

Como citado anteriormente, a EAP não recobriu as partículas do solo 1, então foi decidido realizar uma nova moldagem aquecendo a emulsão à 50°C, para torná-la mais fluida e verificar se esse fator não melhoraria a mistura. Moldaram-se os CP 1.7 e 2.5 seguindo essa teoria e a eles deu-se o nome de 1.71 e 2.51. Além disso, a diluição da emulsão diminuiu sua viscosidade, o que também melhora o processo de mistura. Assim, moldaram-se os CP 1.70 e 2.50 com a emulsão aquecida à 50°C e diluída na proporção 1:1 (permanecendo o teor de fluido igual ao teor do 1.7 e 2.5, logo o teor de CAP residual calculado caiu pela metade). No quadro 11 constam os resultados obtidos.

Quadro 10 – Resultados da primeira moldagem para RT

Solo	CP	Teores (%)			Teores reais (%)		RT (MPa)		Relação (%) $\frac{RT\ c/ imers\tilde{a}o}{RT\ s/ imers\tilde{a}o}$
		Água	Emulsão	Diluição	Líquido	CAP residual	sem imersão	com imersão	
1	1.4	3,9	6,1	0,00	6,46	3,54	0,09	0,00	-
	1.5	2,9	7,1	0,00	5,88	4,12	0,07	0,00	-
	1.6	4,9	5,1	0,00	7,04	2,96	0,14	0,00	-
	1.7	6,9	6,1	0,00	9,46	3,54	0,12	0,00	-
2	2.5	1,0	4,9	0,00	3,06	2,84	0,02	0,00	-
	2.7	4,0	3,9	0,00	5,64	2,26	0,05	0,00	-
	2.8	3,0	4,9	0,00	5,06	2,84	0,02	0,00	-
	2.9	2,0	5,9	0,00	4,48	3,42	0,02	0,00	-

(fonte: elaborado pela autora)

Quadro 11 – Resultados da segunda moldagem para RT

Solo	CP	Teores (%)			Teores reais (%)		RT (MPa)		Relação (%) $\frac{RT\ c/ imers\tilde{a}o}{RT\ s/ imers\tilde{a}o}$
		Água	Emulsão	Diluição	Líquido	CAP residual	sem imersão	com imersão	
1	1.70	6,9	3,05	3,05	11,23	1,77	0,28	0,14	48
	1.71	6,9	6,10	0,00	9,46	3,54	0,35	0,07	20
2	2.50	1,0	2,45	2,45	4,48	1,42	0,05	0,00	-
	2.51	1,0	4,90	0,00	3,06	2,84	0,00	0,00	-

(fonte: elaborado pela autora)

A partir dos resultados apresentados no quadro 11 para a mistura 1 ficou evidenciado que o aquecimento e a diluição da EAP contribuíram para o aumento da RT. Assim, foi executada uma nova moldagem em que a emulsão foi diluída na proporção 1:1, todavia, foi mantido o teor de CAP residual calculado, ou seja, foi acrescentado mais líquido, o que também melhora o processo de mistura. Aquecer a emulsão à 50°C demorou entorno de 100 min. Com o receio de que nesse tempo ocorresse a sua ruptura, ficou padronizado que a emulsão diluída seria

mantida durante 30 min na estufa à 50°C, atingindo, dessa forma, entre 30 e 40°C. Para haver um maior controle, após a mistura, as unidades de teste permaneceram durante duas horas na estufa à 25°C antes da compactação. Depois desse período, foram recolhidos 50 g de cada unidade para verificação da umidade de compactação, os valores constam no apêndice C. Os resultados do ensaio de RT para essas condições encontram-se no quadro 12.

Quadro 12 – Resultados da terceira moldagem para RT

Solo	CP	Teores (%)			Teores reais (%)		RT (MPa)		Relação (%) $\frac{RT\ c/\ imers\tilde{a}o}{RT\ s/\ imers\tilde{a}o}$
		Água	Emulsão	Diluição	Líquido	CAP residual	sem imersão	com imersão	
1	1-4	3,9	6,1	6,1	12,56	3,54	0,35	0,18	51
	1-5	2,9	7,1	7,1	12,98	4,12	0,23	0,12	52
	1-6	4,9	5,1	5,1	12,14	2,96	0,31	0,19	60
	1-7	6,9	6,1	6,1	15,56	3,54	0,19	0,14	72
	1-8	5,9	7,1	7,1	15,98	4,12	0,12	0,07	58
	1-9	7,9	5,1	5,1	15,14	2,96	0,18	0,10	52
2	2-4	2,0	3,9	3,9	7,54	2,26	0,09	0,02	25
	2-5	1,0	4,9	4,9	7,96	2,84	0,09	0,00	-
	2-6	0,0	5,9	5,9	8,38	3,42	0,09	0,02	24
	2-7	4,0	3,9	3,9	9,54	2,26	0,09	0,05	50
	2-8	3,0	4,9	4,9	9,96	2,84	0,09	0,05	49
	2-9	2,0	5,9	5,9	10,38	3,42	0,00	0,00	-

(fonte: elaborado pela autora)

Foram ensaiados para cada solo, após uma hora de estabilização da temperatura na estufa em 25°C – visto que não é preciso período de cura para que ocorram reações – três CP de solo natural compactado na umidade ótima. Os resultados encontram-se no quadro 13. Nos CP de solo 1 puro (1-0), a média das RT seca foi inferior aos resultados dos ensaios com adição de emulsão, portanto, é evidenciado que este material asfáltico proporciona ganho de resistência ao solo. Estes CP de solo 2 (2-0) não possuem RT seca, assim é comprovado que a emulsão proporciona melhoria ao solo, garantindo-lhe essa resistência. Como nestes ensaios os

resultados foram muito baixos ou nulos e por ser uma condição mais severa, não se realizou ensaio de solo puro com imersão.

Quadro 13 – Resultados da quarta moldagem para RT

Solo	CP	Teores (%)			Teores reais (%)		Média RT (MPa)
		Água	Emulsão	Diluição	Líquido	CAP residual	sem imersão
1	1-0	10,0	0,0	0,0	10,00	0,00	0,07
2	2-0	5,9	0,0	0,0	5,90	0,00	0,00

(fonte: elaborado pela autora)

Em todos os CP de solo-emulsão da terceira moldagem o teor de líquido total adicionado era superior ao da umidade ótima. Então foi decidido avaliar a resistência de CP de solo 1 em que não houvesse água de dispersão, apenas fosse adicionada a emulsão diluída 1:1, diminuindo o teor total de líquido. Os resultados são encontrados no quadro 14.

Quadro 14 – Resultados da quinta moldagem para RT

Solo	CP	Teores (%)			Teores reais (%)		RT (MPa)		Relação (%) $\frac{RT \text{ c/ imersão}}{RT \text{ s/ imersão}}$
		Água	Emulsão	Diluição	Líquido	CAP residual	sem imersão	com imersão	
1	1-1a	0,0	6,1	6,1	8,66	3,54	0,34	0,05	14
	1-3a	0,0	5,1	5,1	7,24	2,96	0,20	0,00	-

(fonte: elaborado pela autora)

Avaliando o solo 1 é evidenciado que o teor de CAP residual que apresentou melhores resultados de RT seca é o 3,54%, porém desde que o teor de líquido seja próximo a umidade ótima (8,66% e 12,56%). Naquele CP cujo teor foi 15,56% a RT seca diminuiu consideravelmente. No solo 2, como a maioria dos CP apresentou resultados de RT seca similares, não há como avaliar, apenas sabe-se que adicionando 10,38% de líquido (entorno de 1,7 vezes a mais que a umidade ótima do solo) essa resistência é nula. Ou seja, assim como já era previsto, para ambos os solos o excesso de água é prejudicial para a resistência à tração, pois as partículas de solo são excessivamente lubrificadas, reduzindo o atrito entre elas.

Como não se puderam tirar muitas conclusões, foi realizada mais uma campanha de moldagem. Nessa etapa foi adicionada água para que o solo seco chegasse à umidade ótima. O solo úmido foi armazenado durante quinze horas em sacos plásticos fechados. Após esse tempo, foi adicionada emulsão pura aquecida durante 30 min à 50°C. O teor de emulsão foi o máximo para cada solo A mistura também foi mantida durante duas horas à 25°C na estufa até a compactação. O quadro 15 apresenta os resultados.

Quadro 15 – Resultados da sexta moldagem para RT

Solo	CP	Teores (%)			Teores reais (%)		RT (MPa)		Relação (%) <u>RT c/ imersão</u> RT s/ imersão
		Água	Emulsão	Diluição	Líquido	CAP residual	sem imersão	com imersão	
1	1-M	10,0	7,1	0,0	12,98	4,12	0,34	0,21	61
2	2-M	5,9	5,9	0,0	8,38	3,42	0,10	0,05	51

(fonte: elaborado pela autora)

O CP 1-M apresentou os mesmos teores de líquido e de CAP residual que o CP 1-5, entretanto a RT seca e imersa do primeiro é superior a do segundo. O mesmo fato é observado nos CP 2-M e 2-6. Sendo assim, para estes casos, é nítido que a hidratação prévia das partículas de solo contribui para o aumento da resistência.

Foram moldados, dessa mesma forma, os CP do solo 1 com teor de emulsão mínimo e intermediário. Os resultados constam no quadro 16. O CP 1-N apresentou os mesmos teores de líquido e de CAP residual que o CP 1-4, o mesmo fato ocorreu com os CP 1-O e 1-6. Como se esperava, houve um aumento na RT seca ao se condicionar o solo na umidade ótima, entretanto esse acréscimo não foi tanto quanto na moldagem anterior. Já na RT imersa não houve ganho, ela permaneceu igual ou reduziu em comparação a dos CP sem o condicionamento.

Sendo assim, a hidratação prévia das partículas de solo contribui para o aumento considerável da RT apenas quando se utiliza o teor máximo de emulsão, e por consequência, o teor máximo de água de diluição. Por essa razão, nem foram ensaiados os teores mínimo e intermediário do solo 2.

Quadro 16 – Resultados da sétima moldagem para RT

Solo	CP	Teores (%)			Teores reais (%)		RT (MPa)		Relação (%) <u>RT c/ imersão</u> RT s/ imersão
		Água	Emulsão	Diluição	Líquido	CAP residual	sem imersão	com imersão	
1	1-N	10,0	6,1	0,0	12,56	3,54	0,37	0,18	48
	1-O	10,0	5,1	0,0	12,14	2,96	0,32	0,16	50

(fonte: elaborado pela autora)

Mesmo havendo um ganho ao longo das moldagens, buscou-se elevar ainda mais a RT de ambos os solos. Sendo assim, foi suposto que um maior teor de CAP residual proporcionaria ganho de RT. Portanto, foi aumentando o módulo de riqueza para que, conseqüentemente, fosse aumentado o teor de CAP. Para o solo 1 o módulo de riqueza foi 2, gerando teor de CAP residual de 4,71%, logo 8,12% de emulsão. Como o solo 2 apresentou resultados inferiores, o módulo de riqueza foi superior, 2,5, gerando teor de CAP residual de 4,77%, logo 8,22% de emulsão.

Para ambos os solos foram moldados dois CP com umidade ótima e mais o teor de emulsão calculado e outros dois CP com o teor de emulsão calculado e uma quantidade de água de dispersão, cujo teor de líquido total fosse a umidade ótima. O processo de adição da água foi o mesmo utilizado nas duas últimas moldagens. Nesses CP, a emulsão não foi diluída e estava à 25°C. A mistura também foi mantida à 25°C na estufa durante duas horas até a compactação. O quadro 17 apresenta os resultados.

Quadro 17 – Resultados da oitava moldagem para RT

Solo	CP	Teores (%)			Teores reais (%)		RT (MPa)		Relação (%) <u>RT c/ imersão</u> RT s/ imersão
		Água	Emulsão	Diluição	Líquido	CAP residual	sem imersão	com imersão	
1	1-a	10,00	8,12	0,00	13,41	4,71	0,23	0,16	67
	1-b	6,60	8,12	0,00	10,00	4,71	0,25	0,20	80
2	2-a	5,90	8,22	0,00	9,35	4,77	0,07	0,05	66
	2-b	2,40	8,22	0,00	5,90	4,77	0,05	0,00	-

(fonte: elaborado pela autora)

Comparativamente aos CP 1-M e 2-M, nota-se que o acréscimo de CAP residual diminuiu a RT dos dois solos, ou seja, houve formação de um filme espesso de betume sobre os grãos, diminuindo o atrito entre eles. Isso é confirmado com o fato de haver maior impermeabilização, o que garante menor absorção de água (vinculada com a alta relação de RT).

As composições que obtiveram, concomitantemente, a maior RT seca e a RT imersa superior a zero foram moldadas novamente, em duplicata, para que pudesse ser feita uma avaliação mais criteriosa, a partir da média de três valores de RT seca. Isto é apresentado no quadro 18. Como os valores de RT seca estão dentro ou muito próximos do intervalo média  $\pm$  desvio padrão (s), a média de RT apresentada é válida e apresenta grau de confiança entorno de 90%.

Quadro 18 – Média das RT

Solo	CP	RT (MPa)			média (MPa)	s	média - s	média + s
		1	2	3				
1	1-1a	0,34	0,40	0,32	0,35	0,04	0,32	0,39
	1-4	0,35	0,39	0,39	0,38	0,03	0,35	0,40
	1-M	0,34	0,34	0,38	0,35	0,02	0,33	0,38
	1-N	0,37	0,28	0,31	0,32	0,04	0,27	0,36
2	2-8	0,09	0,13	0,12	0,12	0,02	0,10	0,13
	2-M	0,10	0,10	0,10	0,10	0,00	0,10	0,10

(fonte: elaborado pela autora)

A RT imersa não serviu como critério de escolha do teor, visto que no trabalho em questão o solo-emulsão será empregado como camada de base, onde dificilmente ocorrerá saturação, pois haverá uma camada impermeável sobre esta. Caso o solo-emulsão fosse empregado como revestimento primário, deveria ser evitada a perda de resistência em função do aumento da umidade. Assim, a relação entre as RT seria de extrema importância, devendo ser o parâmetro fundamental de escolha do teor de projeto (sendo ele diferente daquele escolhido no presente trabalho).

As quatro composições de mistura do solo 1 e as duas composições de mistura do solo 2 foram selecionadas para realização do ensaio de RCS. Visto que o segundo galão de emulsão asfáltica possuía menor teor de resíduo (56%), para se chegar ao mesmo teor de CAP residual foi necessário maior teor de emulsão. Sendo assim, o teor de emulsão central foi 6,3% para o solo 1 e 5,1% para o solo 2. Naqueles CP em que o teor de água de dispersão era a umidade ótima, nada foi modificado. Naqueles em que o teor era diferente, foi adicionada menor quantidade de água para que o teor de líquido fosse o mesmo adotado anteriormente. O quadro 19 é um comparativo entre os teores desses CP obtidos com a emulsão proveniente do primeiro e do segundo galão.

Quadro 19 – Comparativo de teores de água e emulsão entre o primeiro e o segundo galão de emulsão asfáltica

Solo	CP	Teores com o primeiro galão (%)			Teores com o segundo galão (%)		
		Água	Emulsão	Diluição	Água	Emulsão	Diluição
1	1-1a	0,0	6,1	6,1	0,0	6,3	6,3
	1-4	3,9	6,1	6,1	3,5	6,3	6,3
	1-M	10,0	7,1	0,0	10,0	7,3	0,0
	1-N	10,0	6,1	0,0	10,0	6,3	0,0
2	2-8	3,0	4,9	4,9	2,6	5,1	5,1
	2-M	5,9	5,9	0,0	5,9	6,1	0,0

(fonte: elaborado pela autora)

A execução da mistura para esse ensaio foi a mesma adotada para cada CP no ensaio de RT, entretanto a quantidade de solo era 2.200 g. Os CP possuíam aproximadamente 10,0 cm de diâmetro e 12,7 cm de altura e foram moldados em três camadas iguais, sendo aplicados 26 golpes por camada com um soquete de 4,536 kg. Não se aplicou nenhuma energia de compactação específica, apenas buscou-se a massa específica aparente seca máxima obtida no ensaio de compactação do solo puro com energia modificada. As umidades de compactação encontram-se no apêndice C. A desmoldagem, facilitada visto que se utilizou um molde tri partido, era realizada imediatamente após a moldagem.

Como citado anteriormente, as resistências imersas não serão parâmetro de escolha, sendo assim os CP só foram ensaiados à RCS seca à 25°C, após sete dias de cura ao ar. Foram moldados três CP para cada teor, para que os valores analisados já fossem uma média. Durante o ensaio foi utilizado um disco no topo dos CP para distribuição uniforme da carga.

O padrão de ruptura das misturas de solo-emulsão observado e mostrado através da figura 12 é quase vertical, diferentemente do padrão inclinado, próximo a 45°, observado em rupturas por cisalhamento. Este fato se deve ao aumento de rigidez, concebido pela emulsão. Os resultados do ensaio de RCS com solo-emulsão e com solo natural (1-0 e 2-0, ensaiado após 16 horas de cura ao ar, apenas por motivo de deslocamento) encontram-se no quadro 20.

Figura 12 – CP de solo 1 após ruptura



(fonte: foto da autora)

Quadro 20 – Resultados de RCS

Solo	CP	RCS (MPa)
1	1-0	1,30
	1-1a	0,58
	1-4	1,51
	1-M	1,76
	1-N	1,34
2	2-0	0,20
	2-8	0,26
	2-M	0,26

(fonte: elaborado pela autora)

Nos próximos dois itens serão analisados os resultados de RT e RCS das seis composições selecionadas. A partir disso, serão definidos os teores de projeto para o solo 1 e para o solo 2.

### 6.2.1 Definição dos teores de projeto para o solo 1

Dentre as quatro composições de solo 1, a 1-1a apresentou RCS muito inferior as demais. A composição 1-N obteve a menor RT e a RCS foi a segunda mais baixa. Portanto essas misturas não foram mais avaliadas.

A 1-M apresentou RCS 16,6% superior a da 1-4, e a 1-4 apresentou RT 8,6% superior a da 1-M. Visto que o solo puro apresenta resistência à compressão similar a do solo-emulsão, porém possui uma baixa resistência à tração, buscou-se, entre as duas misturas, aquela que resultasse em maior RT e que, ao mesmo tempo, fosse a mais econômica, ou seja, possuísse o menor teor de emulsão. Sendo assim, os teores de projeto são aqueles que compõem a mistura 1-4, sendo eles: 3,54% de CAP residual e 12,56% de água (uma parcela de diluição – igual ao teor de emulsão – e a parcela restante dispersada no solo seco).

### **6.2.2 Definição dos teores de projeto para o solo 2**

Como o solo puro compactado não possui RT e as duas composições de solo-emulsão apresentaram a mesma RCS, sendo essa próxima a RCS do solo puro compactado, definiu-se que o teor de projeto seria aquele cuja RT fosse a mais alta e que, concomitantemente, possuísse o menor teor de emulsão. Sendo assim, os teores de projeto são aqueles que compõem a mistura 2-8, sendo eles: 2,84% de CAP residual e 9,96% de água (uma parcela de diluição – igual ao teor de emulsão – e a parcela restante dispersada no solo seco).

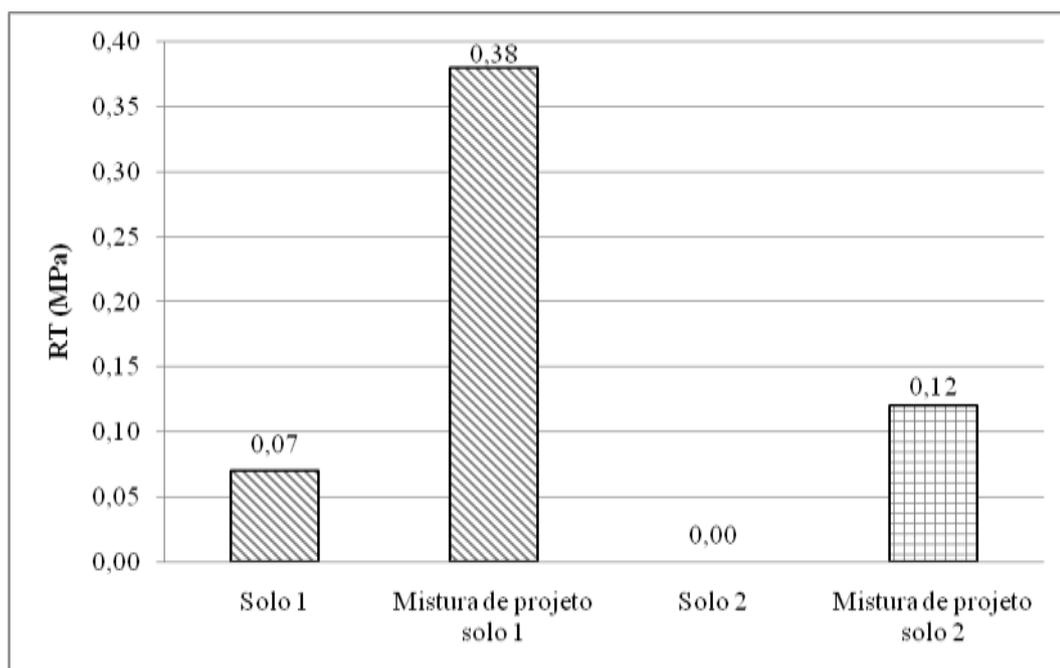
## 7 RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos com os teores de projeto nos ensaios mecânicos propostos, sendo eles: resistência à tração, resistência à compressão e módulo de resiliência triaxial. Como os resultados dos dois primeiros ensaios com as combinações mais eficientes já foram apresentados no item dosagem e execução da mistura: resultados preliminares para definição dos teores de projeto, do capítulo anterior, apenas serão expostos gráficos desses valores. O item 7.3 apresentará resultados do ensaio de módulo de resiliência, o qual não havia sido utilizado para dosagem.

### 7.1 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO

As resistências à tração seca aos sete dias, obtidas através do ensaio de compressão diametral, para as misturas de projeto com os solos 1 e 2 são apresentadas na figura 13. Comparativamente, também são apresentadas estas resistências para os solos puros compactados na umidade ótima.

Figura 13 – Comparativo das RT



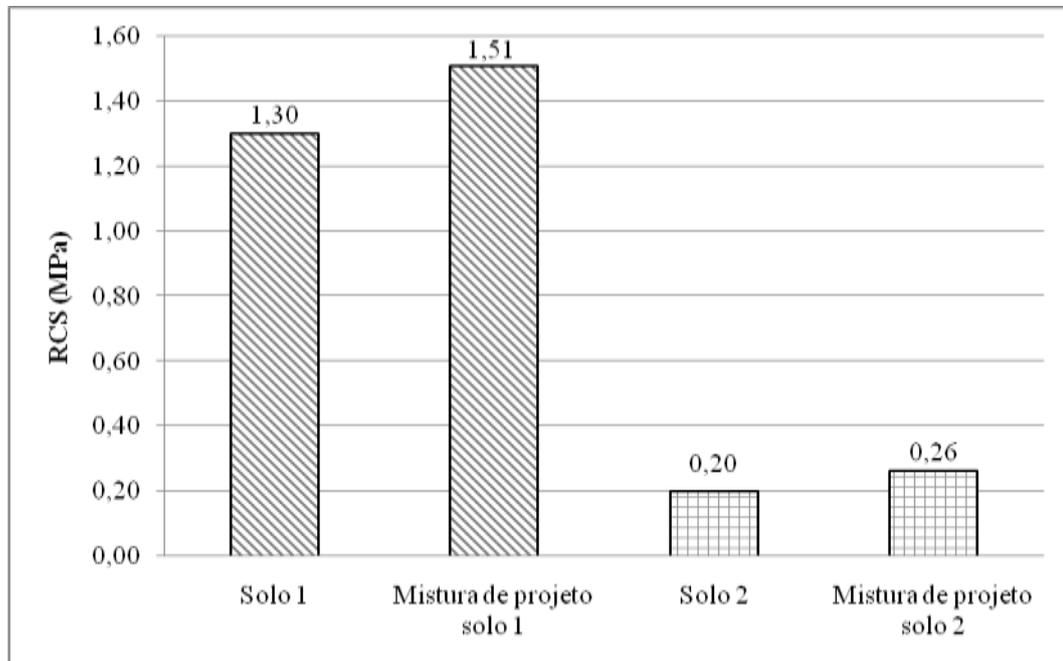
(fonte: elaborada pela autora)

A estabilização do solo 1 com emulsão asfáltica resultou em um aumento de 442,9% da RT. O solo 2 também obteve ganho de resistência após a adição de emulsão, visto que não havia esta propriedade no solo puro, conforme já havia sido adiantado no item 3.2. Nota-se que para ambas as situações (solo puro e solo-emulsão) a RT do solo 1 é superior a do solo 2. Isso é consequência, principalmente, da distribuição granulométrica. O solo 1 apresenta uma parcela de argila, a qual é um agente cimentante que confere coesão ao solo, esse fato não ocorre no solo 2, visto que a maior parte do material é graúdo, não possuindo esta propriedade aglutinante.

## 7.2 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES

As resistências à compressão simples para as misturas de projeto com os solos 1 e 2 são apresentadas na figura 14. Comparativamente, também são apresentadas estas resistências para os solos puros compactados na umidade ótima.

Figura 14 – Comparativo das RCS



(fonte: elaborada pela autora)

A estabilização do solo 1 com emulsão asfáltica resultou em um aumento de 16,2% da RCS. Para o solo 2 esse aumento foi de 30,0%. Assim, o emprego da emulsão promoveu um ganho

maior ao solo 2, entretanto esse valor foi alto, visto que a resistência para ambas as situações foi baixa. Novamente, tanto o solo puro quanto o solo-emulsão 1 apresentaram maiores resultados.

### 7.3 MÓDULO DE RESILIÊNCIA

Assim como os dois outros ensaios, o módulo de resiliência triaxial com cargas repetidas foi feito em CP que ficaram curando ao ar por sete dias. Estes CP possuíam 10,0 cm de diâmetro e 20,0 cm de altura e foram moldados em cinco camadas iguais, sendo aplicados 27 golpes por camada com um soquete de 4,536 kg. Portanto, foi aplicada energia modificada, a qual já havia sido utilizada para confecção dos CP de solo puro ensaiados. As umidades de compactação encontram-se no apêndice C.

Visto que no ensaio em questão tanto a tensão confiante quando a tensão desvio variam, para descrever o comportamento do MR deve ser utilizado um modelo o qual abranja ambas as tensões. Desta forma tem-se o MR expresso na fórmula 7:

$$MR = k_1 \cdot \Theta^k \quad (\text{fórmula 7})$$

Onde:

MR – módulo de resiliência (MPa);

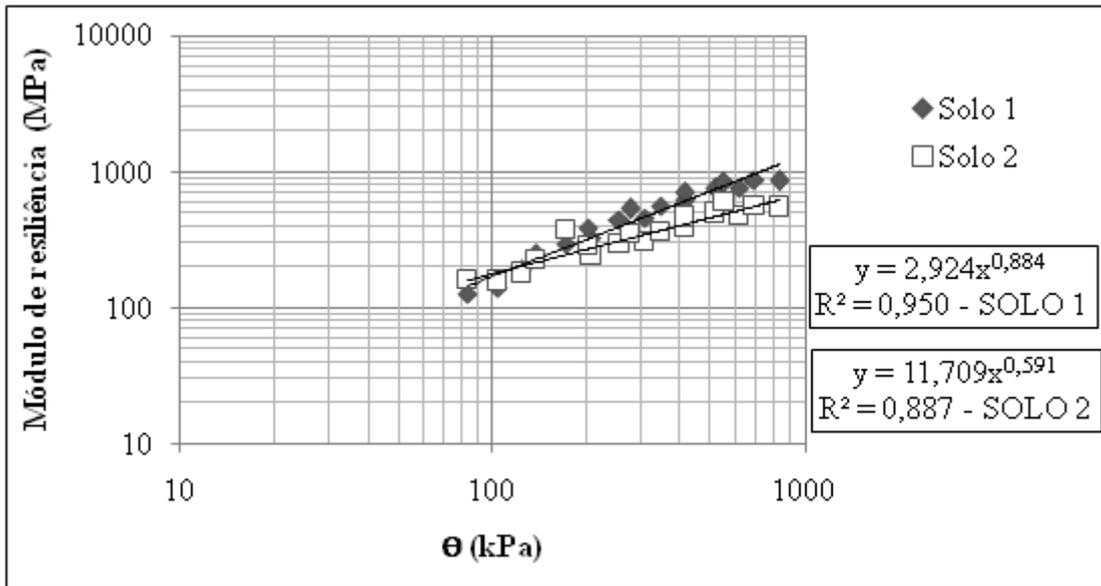
$k_1$  – parâmetro de modelagem (MPa);

$k_2$  – parâmetro de modelagem;

$\Theta$  – soma das tensões principais  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  e  $\sigma_3$  (kPa).

Assim, para a mistura com o solo 1 o modelo é  $MR=2,924 \cdot \Theta^{0,884}$ , o grau de compactação obtido foi 107,5% e a umidade do CP durante o ensaio foi 5,64%. O modelo matemático que descreve o módulo de resiliência para a mistura com o solo 2 é  $MR=11,709 \cdot \Theta^{0,591}$ , o grau de compactação obtido foi 99,7% e a umidade do CP durante o ensaio foi 1,60%. Os módulos de resiliência encontrados para cada estado de tensão para a mistura com o solo 1 e 2 constam na figura 15.

Figura 15 – MR das misturas de projeto



(fonte: elaborada pela autora)

Analisando os modelos de módulos, nota-se que o solo 1 puro é o mais insensível aos estados de tensões, sendo o mais sensível aos estados de tensões este mesmo solo, porém acrescido de emulsão. No quadro 21 são apresentados todos os modelos.

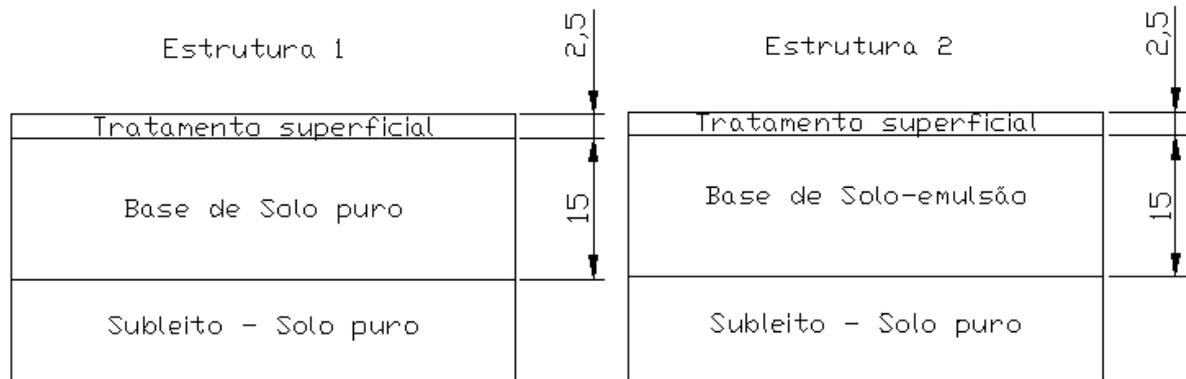
Quadro 21 – Modelos dos MR

	Puro	com emulsão
Solo 1	$148,994\theta^{0,076}$	$2,924\theta^{0,884}$
Solo 2	$2,431\theta^{0,690}$	$11,709\theta^{0,591}$

(fonte: elaborado pela autora)

Para avaliar o comportamento dos solos foi realizada uma análise mecânica com auxílio do programa Everstress 5.0. Nesta análise, comparou-se uma estrutura composta apenas pelo solo puro com uma composta pelo mesmo material, porém estabilizado com emulsão asfáltica. Na figura 16 constam estas estruturas. As espessuras são em centímetros.

Figura 16 – Estruturas analisadas



(fonte: elaborada pela autora)

O módulo de resiliência para a camada de tratamento superficial foi 500 MPa e coeficiente de Poisson 0,3. Os coeficientes de Poisson foram 0,45 para camada de base e subleito. Os modelos de MR para solo puro e solo-emulsão foram transformados, segundo a fórmula 8, visto que o programa utiliza este padrão de entrada de dados:

$$MR = k_1 \cdot \left( \frac{\Theta}{p_{atm}} \right)^{k_2} \quad (\text{fórmula 8})$$

Onde:

MR – módulo de resiliência (MPa);

$k_1$  – parâmetro de modelagem (MPa);

$k_2$  – parâmetro de modelagem;

$\Theta$  – soma das tensões principais  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  e  $\sigma_3$  (kPa);

$p_{atm}$  – pressão atmosférica (kPa).

Para a análise, apenas foram considerados o MR das camadas de base e subleito, os quais são calculados pelo programa através de iterações, e a tensão vertical de compressão gerada no topo do sub-leito. Estes valores encontram-se no quadro 22 juntamente com a tensão máxima

admissível no topo do subleito, dada pela fórmula 9 (HEUKELOM; KLOMP<sup>10</sup>, 1962 apud MEDINA; MOTTA, 2005, p. 368-369):

$$\sigma_{v \text{ adm}} = \frac{0,006 \text{ MR}}{1+0,7 \log N} \quad (\text{fórmula 9})$$

Onde:

$\sigma_{v \text{ adm}}$  – tensão vertical máxima admissível no topo do subleito (MPa);

MR – módulo de resiliência (MPa);

N – número de passagens de eixos padrões de projeto,  $5 \cdot 10^5$  utilizado neste trabalho.

Quadro 22 – Valores utilizados na análise mecânica

	Estrutura 1 solo 1	Estrutura 2 solo 1	Estrutura 1 solo 2	Estrutura 2 solo 2
MR na camada de base (MPa)	245,22	716,20	183,54	429,09
MR na camada de subleito (MPa)	234,91	228,95	120,37	101,92
$\sigma_v$ no topo do subleito (kPa)	227,26	168,85	202,13	147,21
$\sigma_{v \text{ adm}}$ no topo do subleito (kPa)	282,50	275,33	144,75	122,57

(fonte: elaborado pela autora)

É evidenciado, para ambos os solos, que o estabilizando com emulsão asfáltica há uma elevação do MR da camada na qual se encontra (neste caso, camada de base). Aumentando o MR tem-se aumento da rigidez da estrutura, o que diminui as tensões que chegam no subleito (o que também é demonstrado nos resultados), diminuindo, por sua vez, a ocorrência de defeitos na superfície, oriundos da deformação plástica daquela camada, aumentando, portanto, a vida útil da estrutura.

A estrutura composta apenas com o solo 1 puro já possuía tensão gerada no pavimento inferior a tensão máxima admissível, sendo aquela 80,44% desta. Com o solo-emulsão tem-se um decréscimo desta porcentagem, que passa a ser 61,33%.

<sup>10</sup> HEUKELOM, W.; KLOMP, A. J. G. Dynamic testing as a means of controlling pavements during and after construction. Proceedings, 1. INTER. CONF. STRUCT. DESIGN OF ASPHALT PAVEM., 1962, Ann Arbor, Univ. Michigan, Ann Arbor, p. 667-679.

A estrutura com o solo puro 2 não atendia a esta solicitação, sendo a tensão gerada 39,64% superior a tensão admissível. Estabilizando o solo esta porcentagem passa a ser 20,10%, entretanto, também não é satisfeita a condição.

## 8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Para analisar o comportamento mecânico dos dois solos distintos de Porto Alegre estabilizados com emulsão asfáltica foram examinados resultados de 112 CP ensaiados mecanicamente. Sendo tais ensaios: resistência à tração por compressão diametral, resistência à compressão simples e módulo de resiliência.

Verificou-se que a resistência está diretamente ligada com a umidade da mistura. A forma de adição da água (dispersa no solo ou diluída na emulsão) também interfere nos resultados. A quantidade de emulsão influi significativamente na resistência. Adicionando altos valores de emulsão (referentes a módulo de riqueza superior a 1) a resistência decresce devido a lubrificação das partículas e consequente diminuição de atrito entre elas.

Em relação ao solo fino, houve aumento da resistência seca à tração e à compressão de CP que curaram 7 dias ao ar em comparação com as resistências do solo puro. A emulsão propiciou impermeabilização no solo, visto que a relação entre RT imersa e seca atingiu valor máximo de 80% e obteve média de 51%.

Em relação ao solo granular, houve incremento da resistência seca à compressão de CP que curaram 7 dias ao ar em comparação com a resistência do solo puro. Houve geração de RT seca, visto que o solo puro não possuía essa propriedade. Esses fatos devem-se às características aglutinantes da emulsão. O efeito da estabilização é parcialmente perdido após a saturação da amostra, visto que, apesar da relação entre RT imersa e seca atingir 66%, a média é de apenas 24%. Ou seja, a impermeabilização não é tão eficiente quanto no solo anterior.

O solo puro fino é menos sensível ao estado de tensões que a mistura solo-emulsão. Para baixas tensões o primeiro possui maiores valores de MR. Já no solo-emulsão granular o comportamento resiliente foi superior para todos estados de tensões previstos na norma DNIT-ME 134/2010 se comparado ao solo puro.

Verificou-se, desta forma, que a adição de emulsão tem efeitos distintos nos solos. Entretanto, para ambos, a emulsão confere aumento de capacidade de suporte e de impermeabilidade.

O solo-emulsão fino pode ser utilizado como camada de base de vias de baixo volume de tráfego, pois, além das características adquiridas citadas, atende a especificação de tensão gerada no topo do subleito inferior a tensão máxima admissível, para a estrutura avaliada. O solo-emulsão granular possui as características, entretanto não atende a especificação, devendo ser realizadas investigações para outras estruturas.

Visto que não há método de dosagem normalizado, nesta pesquisa, de cunho exploratório, buscou-se apenas a forma de execução da mistura que procedesse em uma composição com os melhores resultados nos ensaios propostos. Portanto, não foram fixados parâmetros para que fosse analisado, por exemplo, o comportamento da resistência em relação a umidade da mistura e/ou teor de emulsão. Assim, uma sugestão para pesquisas futuras é que sejam fixados a forma de adição da água e os teores de emulsão e sejam variados os teores de líquido, para que se encontrem modelos que descrevam as características as quais se deseja analisar.

Apesar de ser citado na revisão bibliográfica que sete dias é tempo suficiente para que o processo de cura da EAP ative as propriedades ligantes desse material, seria interessante avaliar se para os solos estudados a cura aos 28 dias não aumentaria a resistência. Desta forma, poder-se-ia analisar também os resultados dos ensaios executados logo após a moldagem, verificando o comportamento da resistência e assim, se a via poderia ser aberta ao tráfego já no primeiro dia.

## REFERÊNCIAS

ASPHALT ACADEMY. **Technical Guideline**: bitumen stabilised materials. 2nd ed. Pretoria, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS EMPRESAS DISTRIBUIDORAS DE ASFALTOS. **Manual Básico de emulsões asfálticas**: soluções para pavimentar sua cidade. Rio de Janeiro, 2001. Disponível em: < <http://www.abeda.org.br/>><sup>11</sup>. Acesso em: 7 jun. 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7207**: terminologia e classificação de pavimentação. Rio de Janeiro, 1982.

\_\_\_\_\_. **NBR 7.175**: cal hidratada para argamassas. Rio de Janeiro, 2003.

BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. **Pavimentação asfáltica**: formação básica para engenheiros. 1. ed. (3. reimp.). Rio de Janeiro: Petrobras, Abeda, 2008.

BRASIL. Ministérios dos Transportes. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. **DNER-ME 201**: solo cimento – compressão axial de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 1994.

\_\_\_\_\_. Ministérios dos Transportes. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **Manual de Pavimentação**. Brasília, 2006.

\_\_\_\_\_. Ministério dos Transportes. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **DNIT-ME 136**: pavimentação asfáltica – misturas asfálticas – determinação da resistência à tração por compressão diametral. Rio de Janeiro, 2010.

\_\_\_\_\_. Confederação Nacional de Transporte. **Boletim estatístico** (dados referentes ao setor de transporte), Brasília, maio 2011a. Disponível em: <[http://www.cnt.org.br/Imagens%20CNT/PDFs%20CNT/Boletim%20Estat%20C3%ADstico/Boletim%20Estatistico%20CNT%20-%20mai\\_2011.pdf](http://www.cnt.org.br/Imagens%20CNT/PDFs%20CNT/Boletim%20Estat%20C3%ADstico/Boletim%20Estatistico%20CNT%20-%20mai_2011.pdf)>. Acesso em: 6 jun. 2011.

\_\_\_\_\_. Ministério dos Transportes. Agência Nacional de Transportes Terrestres. **Transporte de passageiros**: apresentação. Brasília, 2011b. Disponível em: <<http://www.antt.gov.br/passageiro/apresentacaopas.asp>>. Acesso em: 13 abr. 2011.

GONDIM, L. M. **Estudo experimental de misturas solo-emulsão aplicado às rodovias do agropólo do baixo Jaguaribe/estado do Ceará**. 2008. 213 f. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia de Transportes) – Programa de Mestrado em Engenharia dos Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza. Disponível em: <[http://www.det.ufc.br/index.php?option=com\\_docman&task=cat\\_view&gid=99&dir=DESC&order=date&Itemid=137&limit=5&limitstart=15](http://www.det.ufc.br/index.php?option=com_docman&task=cat_view&gid=99&dir=DESC&order=date&Itemid=137&limit=5&limitstart=15)><sup>12</sup>. Acesso em: 21 mar. 2011.

<sup>11</sup> Acesso ao manual: estando no site <<http://www.abeda.org.br/>> clicar em <Biblioteca> posteriormente em <Manuais> no canto esquerdo da página e por fim <Clique aqui para fazer dowload>.

<sup>12</sup> Acesso à dissertação: estando no site <[http://www.det.ufc.br/index.php?option=com\\_docman&task=cat\\_view&gid=99&dir=DESC&order=date&Itemid=137&limit=5&limitstart=15](http://www.det.ufc.br/index.php?option=com_docman&task=cat_view&gid=99&dir=DESC&order=date&Itemid=137&limit=5&limitstart=15)> procurar o título do trabalho em questão e clicar sobre ele.

GUIMARÃES, J. E. P. **A cal: fundamentos e aplicações na engenharia civil**. 2. ed. São Paulo: Pini, 2002.

JACINTHO, E. C. **Estudo do comportamento de misturas solo-emulsão para uso em barragens**. 2005. 160 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília. Disponível em: <<http://www.geotecnia.unb.br/index.php?p=posgrad&pos=dissert>><sup>13</sup>. Acesso em: 21 mar. 2011.

KÉZDI, Á. **Stabilized earth roads: developments in geotechnical engineering**. Amsterdam: Elsevier, 1979.

MATTOS, A. B. G. Estabilização de solo com betume. In: REUNIÃO ABERTA ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 25., 1991, São Paulo. **Anais...** Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Pavimentação, 1991.

MEDINA, J.; MOTTA, L. M. G. **Mecânica dos Pavimentos**. 2. ed. Rio de Janeiro:[s. n.], 2005.

MICELI JÚNIOR, G. **Comportamento de solos do estado do Rio de Janeiro estabilizados com emulsão asfáltica**. 2006. 267 f. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia de Transportes) – Curso de Mestrado em Engenharia de Transportes, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro. Disponível em: <<http://transportes.ime.eb.br/MATERIAL%20DE%20PESQUISA/DISSERTA%C3%87%C3%95ES.htm>><sup>14</sup>. Acesso em: 21 mar. 2011.

MONCAYO V, J. **Manual de pavimentos: asfalto, adoquin, empedrado, concreto**. México: Companhia Editorial Continental, 1980.

NOGUEIRA, C. **Pavimentação: projeto e construção**. Rio de Janeiro: Ao Livro Técnico, 1961.

PINTO, C. S. Estabilização de pavimentos com cal. In: REUNIÃO ABERTA DA INDÚSTRIA DA CAL, 5., 1985, São Paulo. **Anais...** São Paulo: Escola Politécnica da USP, 1985.

\_\_\_\_\_. **Curso básico de mecânica dos solos: com exercícios resolvidos**. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2002.

SANTOS, W. J. **Avaliação do uso de emulsão asfáltica na estabilização química de três solos do Sergipe**. 2009. 141 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande. Disponível em: <[http://www.coenge.ufcg.edu.br/publicacoes/Public\\_361.pdf](http://www.coenge.ufcg.edu.br/publicacoes/Public_361.pdf)>. Acesso em: 5 maio 2011.

<sup>13</sup> Acesso à dissertação: estando no site <<http://www.geotecnia.unb.br/index.php?p=posgrad&pos=dissert>>, procurar o autor ou o título do trabalho em questão (na coluna da esquerda consta G.DM-132/05) e selecionar <Link PDF>.

<sup>14</sup> Acesso à dissertação: estando no site <<http://transportes.ime.eb.br/MATERIAL%20DE%20PESQUISA/DISSERTA%C3%87%C3%95ES.htm>>, procurar o autor ou o título do trabalho e clicar sobre o título.

SANT'ANA, W. C. **Contribuição ao estudo de solo-emulsão em pavimentos de rodovias de baixo volume de tráfego para o estado do Maranhão**. 2009. 342 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes) – Departamento de Engenharia de Transportes, Universidade de São Paulo, São Paulo. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3138/tde-11082009-120234/pt-br.php>><sup>15</sup>. Acesso em: 30 mar. 2011.

SENÇO, W. **Manual de técnicas de pavimentação**. 1. ed. São Paulo: Pini, 1997. v. 1.

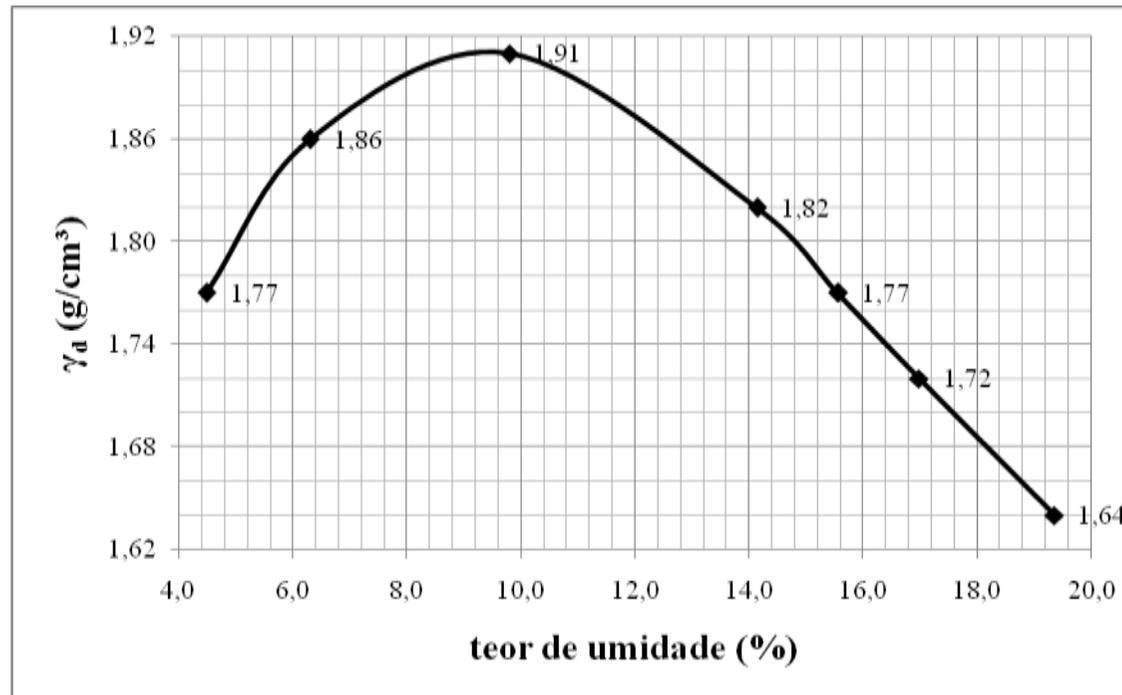
\_\_\_\_\_. **Manual de técnicas de pavimentação**. 1. ed. São Paulo: Pini, 2001. v. 2.

---

<sup>15</sup> Acesso à dissertação: estando no site <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3138/tde-11082009-120234/pt-br.php>> clicar em <Walter\_Canales\_SantAna\_Tese\_Revisada.pdf (9.46 Mbytes)>.

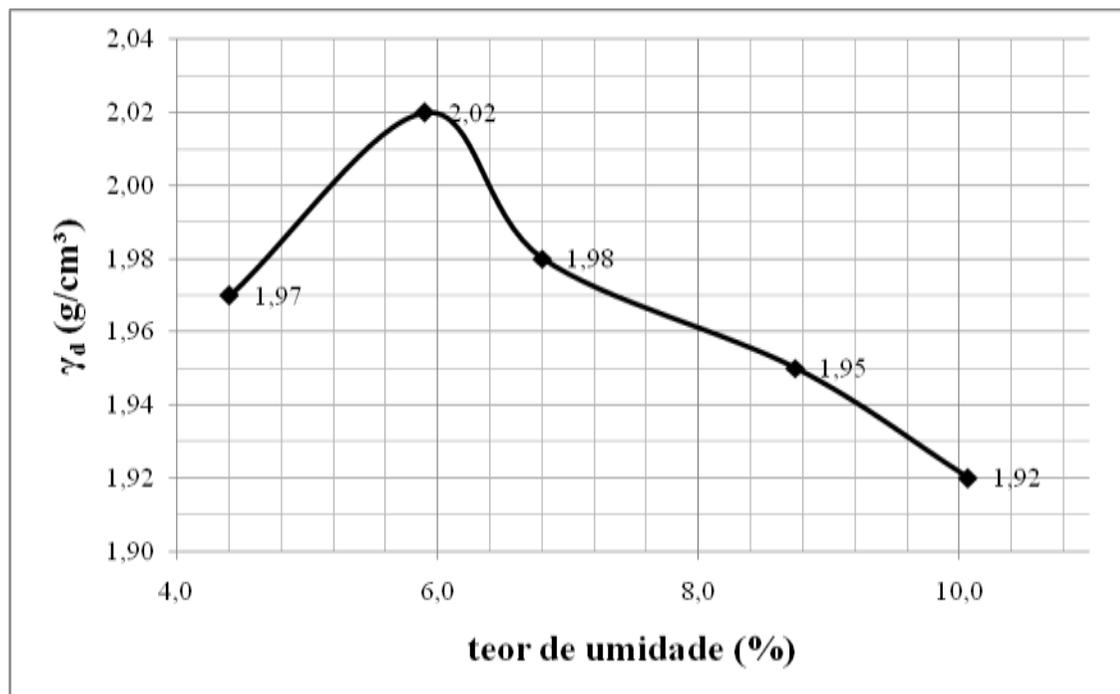
## **APÊNDICE A – Curvas de compactação**

Figura A.1 – Curva de compactação do solo 1



(fonte: elaborada pela autora)

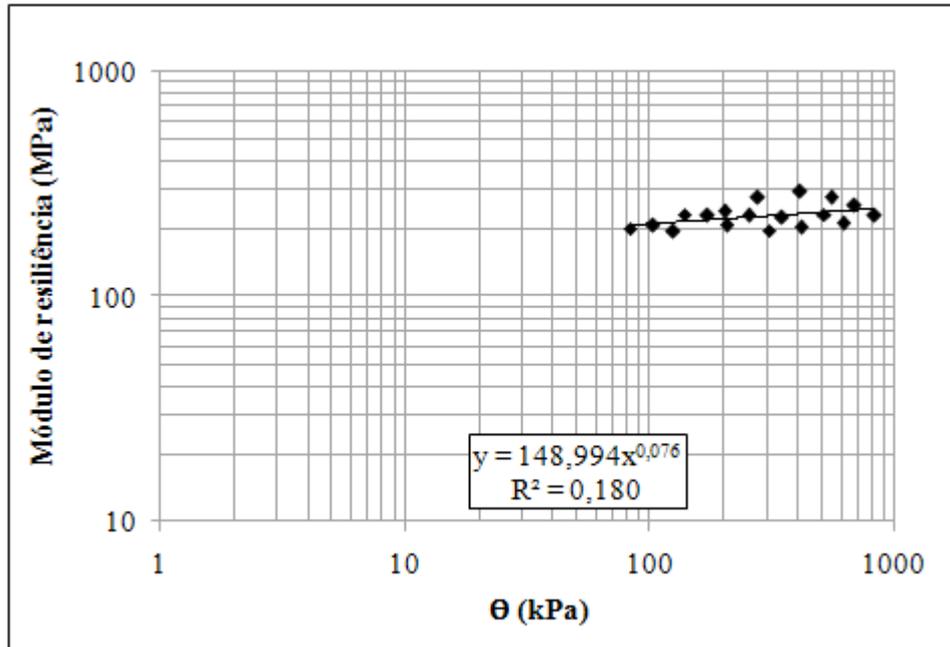
Figura A.2 – Curva de compactação do solo 2



(fonte: elaborada pela autora)

## **APÊNDICE B – Módulos de resiliência**

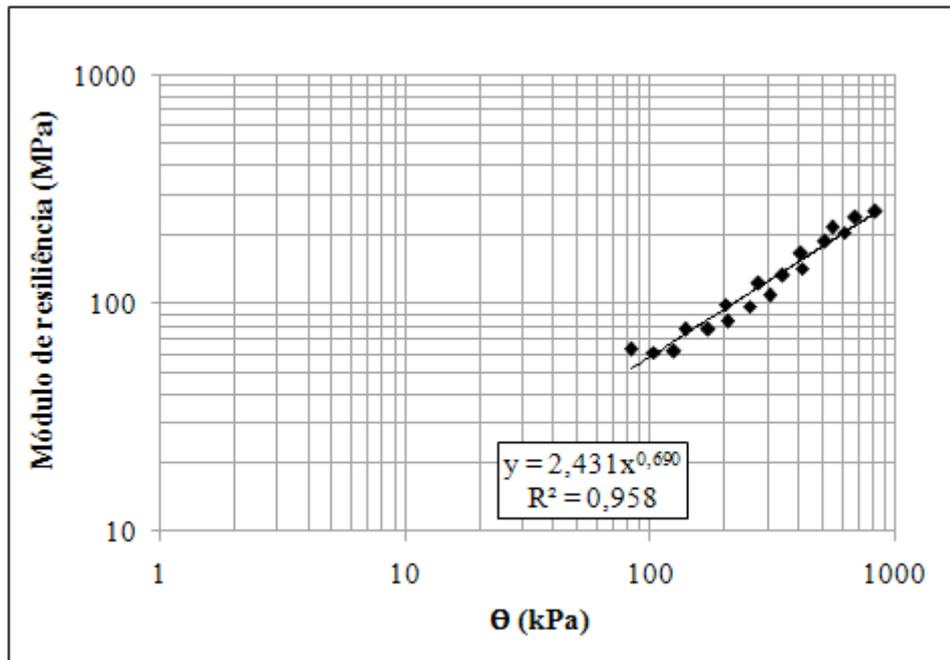
Figura B.1 – Módulo de resiliência solo 1



Parâmetros			
umidade (%)	9,92	$k_1$	<b>148,994</b>
$\gamma_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	1,860	$k_2$	<b>0,076</b>
GC (%)	97,6	$R^2$	0,180

(fonte: elaborada pela autora)

Figura B.2 – Módulo de resiliência solo 2



Parâmetros			
umidade (%)	6,18	$k_1$	<b>2,431</b>
$\gamma_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	2,054	$k_2$	<b>0,690</b>
GC (%)	101,7	$R^2$	0,958

(fonte: elaborada pela autora)

## **APÊNDICE C – Umidades de compactação**

Quadro C.1 – Umidade de compactação ensaio de RT

Solo	CP	umidade (%)
1	1-0	10,00
	1-1a	7,99
	1-3a	6,99
	1-4	11,65
	1-5	10,99
	1-6	10,97
	1-7	14,71
	1-8	14,63
	1-9	14,65
	1-M	12,73
	1-N	11,29
	1-O	11,34
	1-a	12,54
	1-b	9,14
2	2-0	5,90
	2-4	9,27
	2-5	9,08
	2-6	9,13
	2-7	10,73
	2-8	11,05
	2-9	10,52
	2-M	7,98
	2-a	6,21
	2-b	3,55

(fonte: elaborado pela autora)

Quadro C.2 – Umidade de compactação ensaio de RCS

Solo	CP	umidade (%)
1	1-0	10,00
	1-1a	7,56
	1-4	12,26
	1-M	11,38
	1-N	12,34
2	2-0	5,90
	2-8	8,77
	2-M	7,72

(fonte: elaborado pela autora)

Quadro C.3 – Umidade de compactação ensaio de MR

Solo	CP	umidade (%)
1	1-4	12,07
2	2-8	8,39

(fonte: elaborado pela autora)