

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA**

**CAROLINE SALBEGO PINHEIRO**

**ESTABILIZAÇÃO DE UM SOLO ARENOSO FINO COM EMULSÃO ASFÁLTICA  
VISANDO FUTURA UTILIZAÇÃO EM ESTRADAS NÃO-PAVIMENTADAS**

**Alegrete  
2023**

**CAROLINE SALBEGO PINHEIRO**

**ESTABILIZAÇÃO DE UM SOLO ARENOSO FINO COM EMULSÃO ASFÁLTICA  
VISANDO FUTURA UTILIZAÇÃO EM ESTRADAS NÃO-PAVIMENTADAS**

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado ao Curso de Engenharia Civil  
da Universidade Federal do Pampa, como  
requisito parcial para obtenção do Título de  
Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Dr. Jaelson Budny

**Alegrete  
2023**

CAROLINE SALBEGO PINHEIRO

**ESTABILIZAÇÃO DE UM SOLO ARENOSO FINO COM EMULSÃO ASFÁLTICA VISANDO FUTURA UTILIZAÇÃO EM ESTRADAS NÃO-PAVIMENTADAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Civil.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: 23 de fevereiro de 2023.

Banca examinadora:

Prof. Dr. JELSON BUDNY - UNIPAMPA - Orientador

Prof. Me. MAURICIO SILVEIRA DOS SANTOS - UNIPAMPA

Eng. Me. FABIANO GARCIA OLIVEIRA - Membro Externo



Assinado eletronicamente por **JELSON BUDNY, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 24/02/2023, às 23:48, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **FABIANO GARCIA OLIVEIRA, Usuário Externo**, em 27/02/2023, às 15:05, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **MAURICIO SILVEIRA DOS SANTOS, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 27/02/2023, às 15:50, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **1064369** e o código CRC **32C2DF80**.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço à Deus por me abençoar e guiar todos os dias com sua proteção, amor e zelo.

Aos meus avós Miranda Salbego (*in memoriam*) e Percílio Salbego (*in memoriam*) por me ensinarem desde pequena a priorizar os estudos, ter seriedade e caráter em todas as ações para chegar aos meus objetivos.

À minha tia Claudet Dapieve Salbego, por ser minha maior referência e fonte de admiração, além de companheira, amiga e maior incentivadora desde a infância.

À minha mãe, Odete Dapieve Salbego por me incentivar e estar ao meu lado em todos os momentos.

Ao meu namorado William Henrique Reis, por trazer alegria, amor, confiança, serenidade e compreensão em meio a todas as tempestades que surgiram nessa jornada. Compartilhar a vida contigo é um privilégio, obrigada por tanto.

À minha psicóloga Terezinha Aurélio, que me acolheu e ajudou a reestruturar minha vida por meio de seu conhecimento. Obrigada por me ajudar a voltar a ser uma pessoa confiante, determinada e feliz com as minhas escolhas.

Ao meu orientador Dsc. Jaelson Budny, por toda sua atenção, paciência e generosidade em compartilhar seus conhecimentos, orientando meus passos durante todo esse trabalho da melhor forma possível se fazendo presente em todas as etapas.

Aos técnicos dos laboratórios, Msc. Jarbas Dalcin, Juliano Duarte e Marcelo Oliveira por disponibilizarem seu tempo e conhecimento contribuindo para que esse trabalho fosse realizado.

Ao Msc. Fabiano Oliveira, por ser guia, professor, crítico e amigo no laboratório. Aprendi contigo que existem as normas e as “diferenças de operador” e que nem todo ensaio precisa ser refeito, mas precisa ter critério, estudo e ser feito corretamente. Obrigada pela paciência e generosidade em compartilhar teus conhecimentos com todos.

À minha amiga e parceira de laboratório Luiza Dotta, que foi minhas mãos, olhos, ouvidos e voz do entretenimento musical durante todos os ensaios de laboratório. Sem ti e tua dedicação esse trabalho não seria possível. Obrigada por deixar tudo mais leve com a tua espontaneidade, inteligência e gentileza.

À minha amiga Tais Schneider, que não consigo pensar sem sorrir lembrando de tudo que vivemos. Entre alegrias, piadas, festas, dedos colados, canções no

caminho do RU, choros e jornadas de estudos não tenho uma memória da faculdade na qual tu não esteja. Obrigada pelo teu jeitinho bruto de cuidar de todos, por ser minha referência e inspiração desde o primeiro dia de aula.

Às amigas Tamires Rison e Luana Denardi, cantadeiras que trouxeram alegria aos meus dias, cada uma com seu jeitinho de incentivar e rir dos casos da vida. Sou grata por tudo que passamos juntas, pois amadurecemos com todos os desafios sem nunca perder a humildade de recomeçar e tentar fazer melhor.

Aos meus amigos, Gabriella Chagas por ser tranquilidade em meio as turbulências das semanas de provas com uma palavra amiga de “calma, eu te ajudo” e ao Lucas Tito por dividir comigo tantas histórias, risadas e estar sempre presente ao meu lado. Vocês são a minha dupla dinâmica das aulas e da vida, obrigada por todos esses anos de carinho e amizade.

À minha amiga Nayra Fontoura, que foi minha dupla desde que nos encontramos na faculdade e sempre pude dividir pensamentos e aprendizados. Obrigada pelo teu companheirismo, amizade e confiança.

Às “Marias Fifis” Gabriela Righi e Raquel Castro, pelos dois anos de aprendizados, reflexões, risadas e muito amadurecimento no período em que convivemos diariamente.

À minha amiga e supervisora Érica Gonçalves de Vargas, que guiou as “Marias Fifis” com educação, sabedoria, gentileza e conhecimento, contribuindo para o nosso crescimento pessoal e profissional. Obrigada por me ensinar a buscar conhecimento, ter senso crítico e responsabilidade e nunca renunciar a eles.

Aos demais amigos que fiz durante a graduação, alguns levarei para a vida e outros viverão apenas nas lembranças de uma época que passou, mas que tenho muito carinho, respeito e admiração. Obrigada por dividirem seus dias, conhecimentos e momentos memoráveis comigo.

Por fim, agradeço aos demais professores da UNIPAMPA que contribuíram com seus conhecimentos. Uma vez ouvi de um professor a seguinte frase: “vocês não irão se tornar engenheiros quando passarem em cálculo, física ou resistência. Vocês serão engenheiros quando passarem a pensar como engenheiros.” Essa foi a maior verdade que ouvi e vivenciei, obrigada por estarem presentes nesse processo.

## RESUMO

A estabilização química com emulsão asfáltica busca potencializar os parâmetros existentes no solo para fins específicos. O objetivo deste estudo é avaliar o comportamento da mistura de uma emulsão asfáltica RM-1C com um solo arenoso fino frente ao ensaio de Resistência a Compressão Simples (RCS) visando a utilização como alternativa de baixo custo em estradas não-pavimentadas. O estudo busca analisar junto a isso o incremento de Equações baseadas na granulometria do solo para determinação do teor ideal de emulsão asfáltica. Dentro desse contexto, foram realizados os ensaios de caracterização do solo, determinação da umidade ótima (Wótima) e massa específica aparente seca máxima (MEAS<sub>máx</sub>) para o solo puro e com a adição de 4%, 6% e 8% de emulsão asfáltica RM-1C como parâmetro de partida. Em seguida, a determinação do teor ideal de emulsão asfáltica e o ensaio de RCS para o tempo de aeração de 1h e 2h (ruptura da emulsão) e com 7 e 28 dias de tempo de cura em temperatura ambiente de 21°C. O ensaio de RCS foi realizado para os corpos-de-prova com imersão em água por 24h e sem imersão. Foi verificado um incremento na RCS para o valor de 4% de emulsão asfáltica adicionado a mistura, sendo este o mais próximo do teor ideal calculado. Enquanto para valores superiores ao teor ideal (6% e 8%) foi observado um decréscimo na RCS e aumento na impermeabilização dos grãos. Constatou-se ainda a necessidade da cura para que haja incremento na RCS. Portanto, o solo arenoso fino analisado apresentou resultados satisfatórios para utilização como base para fins rodoviários em um teor baixo, caracterizando assim a viabilidade de aplicação a baixo custo.

Palavras-chave: estabilização química; emulsão asfáltica; solo arenoso fino; estradas não-pavimentadas.

## ABSTRACT

Chemical stabilization with asphalt emulsion seeks to enhance existing parameters in the soil for specific purposes. The objective of this study is to evaluate the behavior of the mixture of an asphaltic emulsion RM-1C with a fine sandy soil against the Simple Compressive Strength (RCS) test, aiming at its use as a low-cost alternative on unpaved roads. The study seeks to analyze together with this the increment of equations based on soil granulometry to determine the ideal asphalt emulsion content. Within this context, soil characterization tests were carried out, determination of optimal moisture ( $W_{ótima}$ ) and maximum apparent dry specific mass ( $MEAS_{máx}$ ) for the pure soil and with 4%, 6% and 8% of asphaltic emulsion RM-1C as a starting parameter. Then, the determination of the ideal asphalt emulsion content and the RCS test for the aeration time of 1h and 2h for emulsion rupture, with 7 and 28 days of curing time at an ambient temperature of 21°C. The RCS test was carried out for the specimens with immersion in water for 24 hours and without immersion. An increase in RCS was verified for the value of 4% of asphaltic emulsion added to the mixture, which is the closest to the ideal content. While for values higher than the ideal content (6% and 8%) a decrease in RCS and an increase in the impermeability of the grains was observed. There was also a need for a cure to increase RCS. Therefore, the fine sandy soil analyzed showed satisfactory results for use as a base for road purposes at a low content, thus characterizing the feasibility of application at low cost.

Keywords: chemical stabilization; asphalt emulsion; fine sandy soil; unpaved roads.

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

ASTM - American Society for Testing and Materials

CAP - cimento asfáltico de petróleo

CAUQ - concreto asfáltico usinado a quente

CBUQ – concreto betuminoso usinado a quente

CCA - cinza da casca de arroz

CBR - California Bearing Ratio

CPs - corpos-de-prova

EA - emulsão asfáltica

IP - índice de plasticidade

LL - limite de liquidez

LP - limite de plasticidade

PMFA – pré-misturados a frio de granulometria aberta

PMQ – pré-misturados a quente

RCS - resistência a compressão simples

RL-1C - emulsão asfáltica catiônica de ruptura lenta

RL - emulsão asfáltica de ruptura lenta

RM - emulsão asfáltica de ruptura média

RR - emulsão asfáltica de ruptura rápida

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Malha Rodoviária: Comparativo entre rodovias pavimentadas, não pavimentadas e com pavimentação planejada no Brasil.....	20
Figura 2 - Terminologia das bases .....	22
Figura 3 - Fatores erosivos que causam a erosão .....	23
Figura 4 - Perfil esquemático da designação genética geral das camadas de solos nas regiões tropicais .....	24
Figura 5 - Correlação do coeficiente $c'$ com o comportamento granulométrico da classe laterítica na compactação .....	26
Figura 6 - Gráfico para a classificação MCT .....	28
Figura 7 - Propriedades e utilização dos grupos de solos da classificação MCT .....	30
Figura 8 - Tipos de estabilização de solos .....	33
Figura 9 - Modelo esquemático dos componentes de emulsões asfálticas.....	41
Figura 10 - Processo de fabricação da emulsão asfáltica .....	41
Figura 11 - Modelo esquemático dos fenômenos ocorridos nas emulsões asfálticas. ....	42
Figura 12 - Processo de ruptura da emulsão. ....	43
Figura 13 - Fluxograma dos procedimentos laboratoriais .....	53
Figura 14 - Localização do ponto de retirada do solo.....	54
Figura 15 - Preparação das amostras para análise.....	55
Figura 16 - Amostra 1 (defloculante), amostra 2 (defloculante), amostra 3 (água destilada).....	56
Figura 17 - Amostras 1, 2 e 3 durante o ensaio de sedimentação .....	56
Figura 18 - Jogo de peneiras para a granulometria fina.....	57
Figura 19 - Solo após o ensaio de sedimentação e peneiramento fino.....	57
Figura 20 - Curva granulométrica para as amostras com defloculante (AMOSTRAMéd) e sem defloculante com água destilada (AMOSTRA SEM DEFLOCULANTE) .....	58
Figura 21 - Preparação das amostras com água destilada para o ensaio de massa específica .....	59
Figura 22 - Amostras 1, 2 e 3 com ensaio de massa específica em andamento .....	60
Figura 23 - Execução do ensaio de limite de liquidez .....	61

Figura 24 - Execução do ensaio de limite de plasticidade.....	61
Figura 25 - Aparelhagem específica do ensaio Mini-Proctor.....	63
Figura 26 - Fluxograma do ensaio de compactação Mini-Proctor realizado em laboratório .....	63
Figura 27 - Fluxograma de execução do ensaio de compactação Mini-MCV .....	64
Figura 28 - Amostras em imersão para o ensaio de perda de massa por imersão ...	65
Figura 29 - Ensaio de perda de massa por imersão após 24h de imersão .....	65
Figura 30 - Classificação MCT .....	66
Figura 31 - Determinação da perda de massa por imersão .....	67
Figura 32 - Emulsão asfáltica utilizada na mistura solo-emulsão.....	68
Figura 33 - Mistura da água de diluição e emulsão asfáltica RM - 1C .....	69
Figura 34 - Procedimento de mistura e interação solo-emulsão .....	70
Figura 35 - Amostras aguardando o tempo de aeração .....	73
Figura 36 - Desmoldagem do CP com compressor e bomba.....	73
Figura 37 - CPs compactados e embalados para preservar a umidade ensaiada ....	74
Figura 38 - Ensaio de Resistência Compressão Simples.....	74
Figura 39 - Curvas de compactação para 0%, 4%, 6% e 8% para 1h de aeração....	76
Figura 40 - Curvas de compactação para 0%, 4%, 6% e 8% para 2h de aeração....	77
Figura 41 - Wotima e MEASmáx do solo puro 0% x 4% de emulsão RM – 1C.....	78
Figura 42 - Wotima e MEASmáx do solo puro 0% x 6% de emulsão RM – 1C.....	78
Figura 43 - Wotima e MEASmáx do solo puro 0% x 8% de emulsão RM – 1C.....	79
Figura 44 - Curvas tensão x deformação para CPs de solo-emulsão com imersão e sem imersão para o tempo de aeração de 1h e 2h ensaiados com 7 dias .....	87
Figura 45 - Curvas tensão x deformação para CPs de solo-emulsão com imersão e sem imersão para o tempo de aeração de 1h e 2h ensaiados com 28 dias .....	87
Figura 46 - Curvas tensão x deformação para CPs de solo-emulsão com imersão para o tempo de aeração de 1h e 2h ensaiados com 7 dias.....	88
Figura 47 - Curvas tensão x deformação para CPs de solo-emulsão com imersão para o tempo de aeração de 1h e 2h ensaiados com 28 dias.....	88
Figura 48 - Ruptura observada após o ensaio de RCS.....	90
Figura 49 - RCSméd para 1h e 2h de CPs com imersão (7 dias) .....	91
Figura 50 - RCSméd para 1h e 2h de CPs com imersão (28 dias) .....	92
Figura 51 - RCSméd para 1h e 2h de CPs sem imersão (7 dias) .....	93

Figura 52 - RCSméd para 1h e 2h de CPs sem imersão (28 dias) .....94

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Principais pontos da emulsão para a estabilização.....	45
Quadro 3 - Análise granulométrica do ensaio de sedimentação e peneiramento fino .....	59
Quadro 2 - Mapeamento da quantidade de CPs produzidos .....	72

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características dos principais tipos de estabilização química.....	40
Tabela 2 - Condições para estabilização pelo tipo de solo .....	46
Tabela 3 - Parâmetros de dosagem de solo-emulsão.....	49
Tabela 4 - Fator de correção para a Equação de Vogt .....	51
Tabela 5 - Valores de “k” usuais.....	52
Tabela 6 - Parâmetros encontrados para a classificação MCT.....	66
Tabela 7 - Resultados obtidos no processo do cálculo do teor de asfalto.....	80
Tabela 8 - Resultados para o ensaio de RCS solo puro 0% 7 dias.....	82
Tabela 9 - Resultados para o ensaio de RCS solo puro 0% 28 dias.....	82
Tabela 10 - Resultados para o ensaio de RCS solo-emulsão 4% 7 dias .....	83
Tabela 11 - Resultados para o ensaio de RCS solo-emulsão 6% 7 dias .....	84
Tabela 12 - Resultados para o ensaio de RCS solo-emulsão 8% 7 dias .....	84
Tabela 13 - Resultados para o ensaio de RCS solo-emulsão 4% 28 dias .....	85
Tabela 14 - Resultados para o ensaio de RCS solo-emulsão 6% 28 dias .....	85
Tabela 15 - Resultados para o ensaio de RCS solo-emulsão 8% 28 dias .....	86

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>16</b>
<b>1.1 Objetivos</b> .....	<b>18</b>
1.1.1 Objetivos Gerais .....	18
1.1.2 Objetivos Específicos .....	18
<b>1.2 Estrutura do trabalho</b> .....	<b>19</b>
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>20</b>
<b>2.1 Estradas Não Pavimentadas</b> .....	<b>20</b>
<b>2.2 Erosão em Estradas Não Pavimentadas</b> .....	<b>22</b>
<b>2.3 Solos Tropicais</b> .....	<b>24</b>
<b>2.4 Classificação de Solos pela Metodologia MCT (Miniatura, Compactado, Tropical)</b> .....	<b>25</b>
2.4.1 Coeficiente $c'$ .....	26
2.4.2 Coeficiente $d'$ .....	27
2.4.3 Parâmetro $Pi$ .....	27
2.4.4 Índice $e'$ .....	28
2.4.5 Utilização dos Grupos de Solos da Classificação MCT .....	29
<b>2.5 Solos para a Pavimentação</b> .....	<b>30</b>
<b>2.6 Estabilização de solos</b> .....	<b>31</b>
2.6.1. Estabilização Mecânica .....	34
2.6.2. Estabilização Física .....	35
2.6.3. Estabilização Química .....	35
<b>2.7 Solo-Emulsão Asfáltica</b> .....	<b>38</b>
2.7.1 Emulsões asfálticas .....	40
2.7.2 Tipos de emulsões .....	43
2.7.3 Estabilização de solos com emulsões asfálticas .....	45

<b>2.8 Método de dosagem.....</b>	<b>48</b>
<b>2.9 Determinação do teor de projeto de emulsão asfáltica para análise .....</b>	<b>49</b>
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>53</b>
<b>3.1 Solo .....</b>	<b>54</b>
3.1.1 Ensaio de Caracterização do Solo .....	55
<b>3.1.2 Granulometria .....</b>	<b>55</b>
<b>3.1.3 Massa Específica Aparente dos Grãos .....</b>	<b>59</b>
<b>3.1.4 Índices de Consistência .....</b>	<b>60</b>
<b>3.1.5 Compactação Mini-Proctor .....</b>	<b>62</b>
<b>3.1.6 Classificação MCT (Miniatura, Compactado, Tropical) .....</b>	<b>64</b>
<b>3.2 Emulsão Asfáltica .....</b>	<b>68</b>
3.3 Método de mistura solo-emulsão .....	68
<b>3.4 Determinação do teor de projeto de emulsão asfáltica para análise ...</b>	<b>70</b>
<b>3.5 Resistência a Compressão Simples.....</b>	<b>71</b>
<b>4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS .....</b>	<b>75</b>
<b>4.1 Compactação Mini-Proctor.....</b>	<b>75</b>
<b>4.2 Determinação do Teor de Projeto de Emulsão Asfáltica .....</b>	<b>80</b>
<b>4.3 Resistência a Compressão Simples (RCS) .....</b>	<b>81</b>
4.3.1 Resistência a Compressão Simples Solo Puro.....	81
4.3.2 Resistência a Compressão Simples Solo-Emulsão.....	83
4.3.3 Resistência a Compressão Simples – Análise Comparativa .....	89
<b>5 CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES .....</b>	<b>95</b>
<b>5.1 Considerações finais .....</b>	<b>95</b>
<b>5.2 Sugestões para trabalhos futuros .....</b>	<b>96</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O modal rodoviário é altamente relevante na matriz de transportes brasileira, pois é nele que ocorre a maior porcentagem de transporte de cargas e pessoas, de acordo com a Confederação Nacional de Transporte (2019). O transporte gera mobilidade e acessibilidade entre pessoas e mercadorias, desempenhando um grande papel na economia e avanço nos mais diversos setores do país. A infraestrutura que tange as rodovias é limitada a processos de investimentos de construção e manutenção.

Conforme o Sistema Nacional de Viação (2015), as estradas pavimentadas constituem na rede federal 54,2%, na rede estadual 43,5% e na rede municipal 2%, caracterizando assim 80,3% de estradas não pavimentadas perante a apenas 12,1% que são pavimentadas, considerando 7,6% de estradas planejadas para receber pavimentação.

Miceli (2006), pondera que devido as normas de conservação ambiental e fatores econômicos é recorrente a dificuldade em construir novas rodovias. No entanto, as pesquisas no âmbito da pavimentação têm buscado alternativas para contornar os problemas citados. Dentro desse contexto, ainda de acordo com o autor, três linhas de pesquisa têm avançado como alternativas que auxiliam nesses efeitos: 1) o estudo acerca da pavimentação com solos finos lateríticos, amplamente estudada no Brasil, mas essencialmente aplicada no estado de São Paulo; 2) a reutilização e reciclagem de materiais provenientes da própria construção, como resíduos de construção e demolição, sendo utilizado em camadas que não precisam de grande capacidade de suporte; 3) a estabilização de solos, que confere ao solo local que possui capacidade inadequada de resistência e durabilidade uma potencialização das suas propriedades afim de estabelecer segurança e conforto ao usuário.

A estabilização de solos passou por processos de aprimoração ao longo dos anos, estima-se que esta é uma prática milenar, executada antes pelo homem de forma rudimentar. Dentro desse contexto, os estudos acerca deste método têm fomentado as áreas de Geotecnia e Engenharia Civil no que tem tange soluções mais eficientes, adequadas e econômicas para as diversas situações de instabilidade que são propostas (MAKUSA, 2013).

A estabilização do solo com ligante betuminoso pode ser realizada por meio do concreto asfáltico de petróleo, asfalto diluído ou emulsão asfáltica. A emulsão tem a finalidade de recobrir as partículas de solo concedendo propriedades como o aumento da resistência, assim como o aumento de coesão e a impermeabilização contra agentes externos, como a umidade (PACHECO, 2011).

A estrutura dos pavimentos conta com suas camadas bem definidas, sendo geralmente utilizado para a base de pavimentos asfálticos materiais granulares seguido de compactação. Entretanto, há situações em que as jazidas de material pétreo estão localizadas em zonas muito distantes das obras, aumentando assim devido ao transporte, o custo final do produto e inviabilizando economicamente a construção. Nesse cenário, o estudo da substituição do material de base por solo-emulsão vem sendo difundido, pois a camada de base com este material proporciona ao pavimento menores deflexões, geradas pelo tráfego pesado, e potencializam o desempenho do pavimento (PACHECO, 2011).

A estabilização solo-emulsão é estudada como alternativa para vias de baixo volume de tráfego, como as estradas vicinais que fazem a interconexão entre zona rural e zona urbana. De acordo com o IBGE (2019) o município de Alegrete é o maior em extensão territorial do estado do Rio Grande do Sul. O potencial econômico da cidade está voltado para o setor agropecuário com números expressivos para a criação de bovinos, ovinos, equinos e bubalinos, que atendem ao mercado interno e externo. Ainda no âmbito rural está o setor agrícola, o qual possui alta relevância econômica devido ao percentual de hectares plantados que em 2017 foi de 89.401, gerando uma contribuição ao PIB da cidade de 479, 3 milhões de reais, os produtos plantados dividem-se em 63,5% arroz (em casca), 30,2% soja (em grão), 4,5% milho (em grão), 1,1 trigo (em grão) e 0,7% laranja (SEBRAE, 2019).

Portanto, é possível observar que a cidade se desenvolve em torno de atividades agrícolas e agropecuárias, caracterizando assim a forte conexão entre a zona urbana e rural. Entretanto as vias de acesso a zona rural da cidade encontram-se carentes de investimentos e manutenção, trazendo transtornos e custos para os usuários locais.

Para Balbo (2007), as boas condições de rolamento da pista proporcionam uma redução no tempo de transporte, além de observar que uma superfície aderente

transmite uma redução dos custos operacionais das vias e das rodovias, considerando que essa condição é um fator determinante para redução de acidentes.

Schneider (2013), analisa que a qualidade das estradas vicinais interfere diretamente em fatores indicadores de custo, como por exemplo, para vias de qualidade deficiente o combustível sofre um aumento, os pneus sofrem desgastes excessivos, ocorrem problemas mecânicos nos veículos e ainda interfere no fluxo de produtos. O autor ainda observa que em estradas de baixo padrão, ocorrem interferências significativas das intempéries do clima, como no caso das chuvas intensas que interrompem o tráfego devido a defeitos na pista, o que gera um aumento no valor do transporte e no custo final do produto.

Dentro desse contexto, o tema proposto busca trazer uma alternativa de potencialização de baixo custo para a estrutura das vias de baixo volume de tráfego que seja adequado as normas do DNIT com critérios abrangentes que impliquem em uma solução local, a qual agregará condições de segurança, rolamento e aumento da vida útil do pavimento.

## **1.1 Objetivos**

### **1.1.1 Objetivos Gerais**

Este estudo tem como objetivo analisar a aplicabilidade da estabilização com emulsão asfáltica de um solo arenoso fino proveniente da cidade de Alegrete – RS, buscando adequar as suas propriedades para uso em estradas não-pavimentadas da região.

### **1.1.2 Objetivos Específicos**

- Avaliar os efeitos da adição de diferentes teores de emulsão asfáltica (RM – 1C) por meio do ensaio mecânico de Resistência à compressão simples;
- Determinar as porcentagens adequadas de emulsão ao solo, visando a utilização em estradas não-pavimentadas.

## **1.2 Estrutura do trabalho**

A pesquisa realizada foi estruturada em cinco capítulos. O primeiro capítulo contempla os aspectos gerais do estudo e a motivação dele, desta forma contém a introdução, objetivos gerais e específicos proposta de análise.

O segundo capítulo traz a revisão bibliográfica acerca do tema proposto, considerando todos os aspectos abrangentes que culminam nos objetivos do estudo, utilizando como referência e posteriormente parâmetro de análise publicações anteriores de autores que obtiveram resultados para pesquisas semelhantes.

O terceiro capítulo apresenta uma descrição dos materiais e métodos que foram utilizados para alcançar os objetivos citados, junto ao mapeamento de realização das atividades.

Posteriormente de acordo com o fluxograma de atividades laboratoriais como complemento do estudo indicado, foram acrescentados mais dois capítulos referentes a análise dos resultados no capítulo quatro e considerações finais e sugestões para futuros trabalhos no capítulo cinco. Por fim, as referências bibliográficas consultadas para realização deste trabalho e o anexo encerram o estudo.

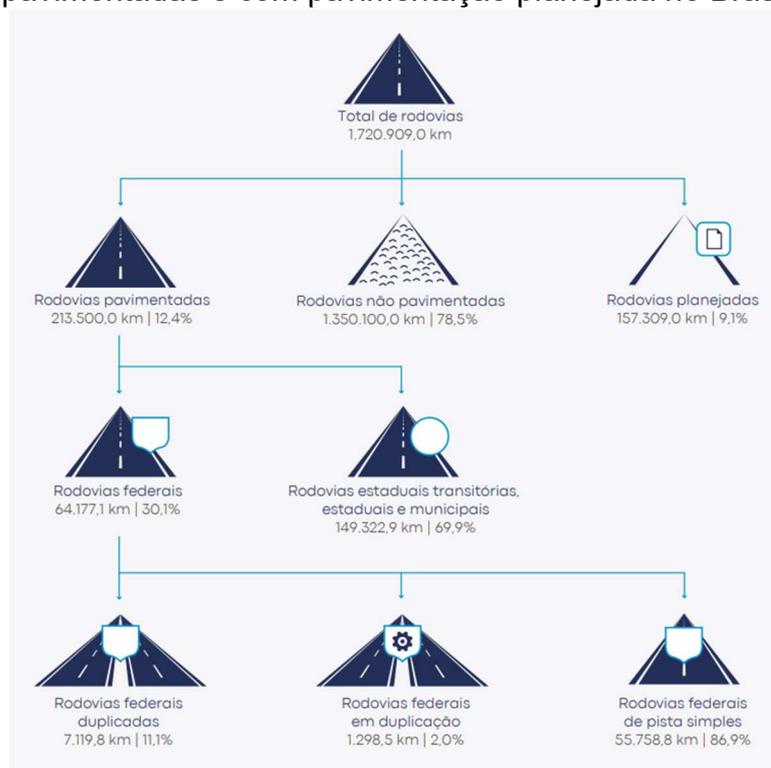
## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Estradas Não Pavimentadas

As vias com baixo volume de tráfego não pavimentadas são chamadas de estradas vicinais e são constituintes do sistema capilar de transporte. Na constituição do modal rodoviário no Brasil, as estradas não pavimentadas constituem a maior parte das vias. As estradas vicinais municipais possuem grande importância na economia, uma vez que caracterizam o principal meio de escoamento da produção agrícola, além de conectarem a população rural ao ambiente urbano (BAESSO e GONÇALVES, 2003).

A NBR 7207/82 caracteriza uma estrada que tenha apenas revestimento primário como não pavimentada, devido ao fato de não atenderem ao item C da norma em relação a capacidade de resistir aos esforços horizontais provenientes do tráfego. Na Figura 1 é retratado o cenário da pavimentação no âmbito nacional e as dimensões não-pavimentadas com valores muito superiores as pavimentadas.

Figura 1 – Malha Rodoviária: Comparativo entre rodovias pavimentadas, não pavimentadas e com pavimentação planejada no Brasil



Fonte: Elaboração CNT (2022).

Outra característica determinante das estradas vicinais é o baixo volume de tráfego quando comparada as rodovias arteriais ou de classe I. Portanto, devido a este fato não é justificável um alto investimento econômico nessas estradas, mas é esperado que apresentem boa capacidade de suporte, boa condição de rolamento e aderência (SANT'ANA, 2009).

O baixo volume de tráfego, de acordo com Pinto e Preussler (2002), é considerado em vias em que há circulação média com até 700 veículos por dia, nos dois sentidos da via, levando em conta ainda que 20% são comerciais. Já para Bernucci (1995), caracteriza o baixo volume de tráfego em um número N (número de eixos-padrão equivalentes a 8,2 t que irão trafegar sobre a rodovia durante o período de projeto) da ordem de  $10^4$  a  $10^6$  para um período de projeto de 10 anos. Outra consideração estudada é a de Nogami e Villibor (1995), na qual desenvolvem que o baixo volume de tráfego é caracterizado por um VDM inicial inferior a 1000 veículos por dia, com no máximo 35% de caminhões e  $N < 10^6$ . Estas considerações são aplicáveis para a estrada vicinal da cidade de Alegrete-RS, no distrito do Caverá, a qual terá o solo submetido a análise de estabilização solo-emulsão.

O impacto econômico e social causado pela potencialização das propriedades de solos locais para utilização na pavimentação é um fator determinante a ser estudado devido ao baixo custo envolvido para realização da obra (VILLIBOR, 1982).

As solicitações suportadas pela base, sub-base e reforço do subleito, tem a função de proteger o subleito das cargas excedentes atuantes na estrutura. Os materiais utilizados para composição destas camadas podem ser de natureza granular, solos estabilizados quimicamente ou cimentados e materiais asfálticos, a terminologia para as bases está disposta na Figura 2. Os solos granulares não resistem aos esforços de tração por ser um solo não coesivo. No entanto, solos coesivos resistem essencialmente a compressão, ainda que uma pequena parcela resista a tração devido a presença da fração fina (MOREIRA *et. al*, 2006; BERNUCCI *et al.*, 2008).

Figura 2 - 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 (2001).

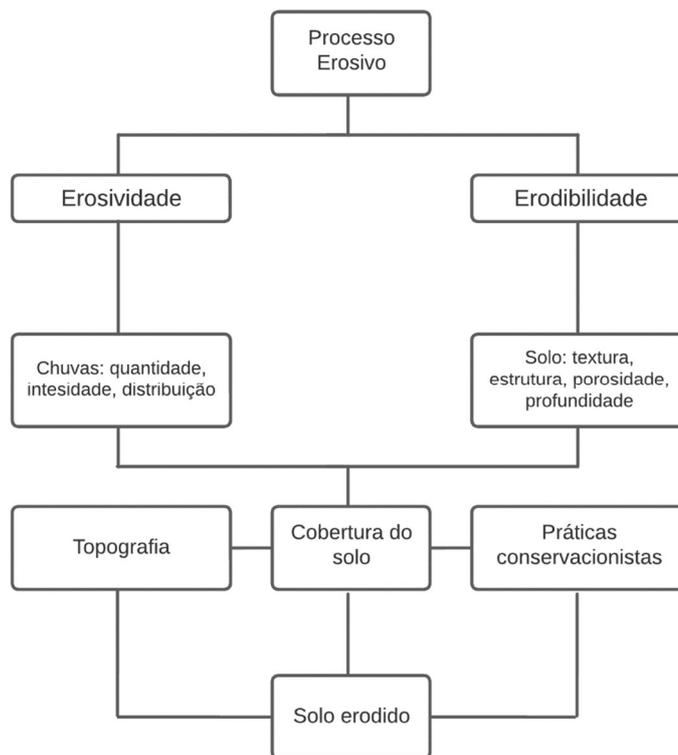
Para o revestimento, geralmente este é solicitado por esforços de compressão e tração, devido a flexão, e as outras camadas só estão sujeitas a compressão. Entretanto, em alguns casos a camada abaixo do revestimento é solicitada também por esforços de tração, neste caso é viável utilizar nesta camada materiais estabilizados quimicamente, de forma a aumentar a rigidez e coesão para resistir ao esforço de tração (BERNUCCI *et al.*, 2006).

## 2.2 Erosão em Estradas Não Pavimentadas

De acordo com o Manual de Geotecnia fornecido pelo Departamento de Estradas e Rodagem (DER, 1991), a erosão é um processo que culmina na deterioração do solo por meio da destruição da sua estrutura e sua remoção devido a ação das águas de escoamento superficial, transportando suas partículas para áreas mais baixas do relevo. O manual ainda pondera que este é processo singular no qual a velocidade de movimentação das partículas de solo é lenta, todavia contínua e ao longo do tempo de caráter agressivo.

As erosões são podem ser desencadeadas por agentes eólicos, hídricos, glaciais e organogênicos. Nas estradas vicinais de baixo volume de tráfego, um fator importante que deve ser levado em consideração é a erosão por agentes hídricos. Neste processo a ação da água interfere na estrutura do pavimento, pois quando a umidade do solo excede sua capacidade de absorver a água acaba saturando as partículas dando início ao processo de escoamento superficial onde ocorre o transporte de partículas e sedimentos. A partir do escoamento superficial são formadas erosões laminares, nas quais o solo é removido de forma uniforme, e as ravinas no solo, estas são rachaduras profundas ou buracos causados pela ação da erosão (PITTELKOW, 2013). Os fatores condicionantes para os processos erosivos que culminam na erosão são apresentados na Figura 3.

Figura 3 - Fatores erosivos que causam a erosão



Fonte: Ramos (1982) apud Pittelkow (2013).

Nogami e Villibor (1995), avaliam que a erodibilidade é um fator preponderante na escolha do projeto para controlar a erosão, embora este seja de difícil mensuração devido aos fatores físicos, químicos, biológicos e mecânicos envolvidos. Pittelkow (2013) ainda salienta que outros fatores são determinantes no processo de erosão

das estradas vicinais, como o tráfego que impede a presença de vegetação e a localização do eixo da estrada levando em consideração o nível do terreno, sendo que a direção do corte deve estar de acordo com as linhas de fluxo do terreno devido a influência na drenagem das águas pluviais.

### 2.3 Solos Tropicais

As características que determinam o comportamento de um solo são determinadas em função do clima, fauna, topografia e tempo. Em regiões de clima tropical tem como principais características altas temperaturas, altos índices pluviométricos, ausência de congelamento do subsolo, lixiviação entre outras (BARROSO, 2002).

Nogami (1996), destacou que para um solo ser considerado tropical precisa ter duas condições bem definidas. A primeira é possuir comportamento e propriedades distintos de solos tradicionais, ou seja, dentro dos sistemas tradicionais de classificação SUCS e HBR apresentam classificações que não condizem com seu desempenho real. A segunda característica, de acordo com o autor, está essencialmente ligada ao ambiente, este deve ser quente e úmido.

Em regiões tropicais são encontrados três comportamentos de solos classificados em lateríticos, não-lateríticos (saprolíticos) e transportados, sendo as duas primeiras de maior incidência no Brasil (Villibor *et al.*, 2000). A Figura 4 apresenta as principais áreas de ocorrência dos comportamentos citados.

Figura 4 - Perfil esquemático da designação genética geral das camadas de solos nas regiões tropicais



Fonte: Nogami e Villibor (1995).

As características dos solos de comportamento laterítico e não-laterítico, de acordo com Nogami e Villibor (1995), são:

- Solos lateríticos: são decorrentes da atuação dos processos de laterização, de partes bem drenadas em regiões tropicais úmidas. Esses solos possuem características bem definidas em função dos minerais presentes, como por exemplo o enriquecimento da parte fina, em especial a argila, devido a ação de hidróxidos e óxidos de ferro e/ou alumínio e a permanência do argilo-mineral caulinita. Já a parte arenosa geralmente é formada por quartzo. Possuem aspecto uniforme, estrutura porosa e coloração (vermelho, amarelo, marrom e alaranjado) bem definida devido aos óxidos presentes;
- Solos não-lateríticos (saprolíticos): apresentam uma mineralogia complexa, pois resultam da desagregação/decomposição da rocha matriz, mantendo a estrutura herdada. Podem ser descritos como solos residuais jovens. Possuem argilo-minerais individualizados, devido a sua composição mineralógica bastante variada, possuindo coloração cinzenta e esbranquiçada. Apesar de o quartzo ser um mineral comumente encontrado nas frações de silte e argila, estes apresentam uma constituição mineralógica muito variada.

A partir da dificuldade em classificar e identificar solos tropicais, Nogami e Villibor (1995) propuseram por meio de conhecimentos geológicos e pedológicos a classificação MCT, na qual o comportamento dos solos é dividido em laterítico e não-laterítico.

#### **2.4 Classificação de Solos pela Metodologia MCT (Miniatura, Compactado, Tropical)**

A metodologia MCT utiliza corpos de prova de dimensões reduzidas compactados, sendo destinada a classificação de solos tropicais de uma forma que abrange amplamente as peculiaridades desse tipo de solo. Esta classificação traz valores estimativos das características de grupos de solos tropicais, em condições compactadas, permitindo orientar, classificar e estimar os valores numéricos das propriedades dos grupos da MCT, que auxiliam preliminarmente os estudos geotécnicos definitivos para diversas aplicações práticas na área rodoviária (Villibor e Alves, 2019).

Nogami e Villibor (1981), durante 10 anos elaboraram e aprimoraram o cronograma de ensaios que utiliza equipamento específico de compactação, mini-Proctor com energia intermediária, e consiste em classificar o solo analisado em duas classes de acordo com seu comportamento, podendo ser este um comportamento laterítico (classe L) ou de comportamento não laterítico (classe N). Dentro delas, têm-se três grupos da classe L e quatro da classe N.

Villibor e Alves (2019) descrevem os principais elementos da classificação MCT, sendo estes os coeficientes  $c'$  (coeficiente de argilosidade),  $d'$  (curva de compactação) e os valores de  $P_i$  (perda de massa por imersão), que permitem obter o parâmetro  $P_i$ . De forma que com os valores  $d'$  e o parâmetro  $P_i$ , calcula-se o índice de laterização  $e'$ .

#### 2.4.1 Coeficiente $c'$

Nogami e Villibor (1995) descrevem o coeficiente  $c'$  que os fatores que interferem em seu valor são a graduação, formato dos grãos, mineralogia das diversas frações entre outros. Portanto,  $c'$  está correlacionado diretamente com o comportamento granulométrico na compactação. Os autores apresentam a correlação de  $c'$  com a granulometria típica dos solos da classe L (comportamento laterítico) de acordo com a classificação MCT na Figura 5.

Figura 5 - Correlação do coeficiente  $c'$  com o comportamento granulométrico da classe laterítica na compactação

Coeficiente $c'$ Classe L	Comportamento granulométrico
$0 < c' < 0,7$	Areia
$0,7 < c' < 1,5$	Arenoso
$1,5 < c' < 3,0$	Argiloso

Fonte: NOGAMI E ALVES, pg 61, 2019.

Em relação a coesão dos solos compactados, Nogami e Villibor (1995) associaram o valor de  $c'$  dos solos da classe L (laterítico) e N (saprolíticos) sabendo:

- Solos  $c' > 1,5$  são caracterizados por serem argilas e solos argilosos coesivos;
- Solos com valor no intervalo  $1,0 < c' < 1,5$  são caracterizados por diferentes granulometrias sendo constituídos de areias, areais siltosas, siltes

arenosos, argila arenosa, areias argilosas, argilas siltosas etc. Esses solos quando compactados apresentam coesão média (semi-coesivos);

- Solos com  $c' < 1,0$  são caracterizados por areias e siltes não plásticos. Suas camadas são consideradas de baixa ou nenhuma coesão.

#### **2.4.2 Coeficiente $d'$**

Conforme Nogami e Villibor (1995) apresentam, o coeficiente  $d'$  é composto com uma família de curvas de compactação para várias energias obtidas a partir do ensaio de compactação Mini-MCV, este é utilizado para o cálculo do índice de laterização  $e'$ .

Nogami e Alves (2019), descrevem alguns grupos característicos de solos conforme suas curvas de compactação, deste modo:

- Areias argilosas bem graduadas possuem curvas de compactação com picos bem acentuados e ramo seco retilíneo, cuja inclinação acentua-se, sensivelmente quando a argila presente é de natureza laterítica (valor  $d'$  elevado). Argilas lateríticas possuem curvas similares, porém com menor inclinação (valores de  $d'$  baixo);
- Alguns siltes saprolíticos e areias pouco coesivas não possuem picos acentuados e, frequentemente, têm encurvamento no ramo seco, dificultando a determinação do  $d'$ ;
- As argilas lateríticas, em geral, possuem  $d' > 20$  ( $\text{kg/m}^3$ ) /%, ao passo que as argilas não lateríticas não atingem esse valor;
- As areias possuem  $d'$  baixo, ao passo que areias finas argilosas tendem a ter  $d'$  elevado, ultrapassando 100 ( $\text{kg/m}^3$ ) %.

#### **2.4.3 Parâmetro $P_i$**

De acordo com Nogami e Alves (2019), sendo o parâmetro  $P_i$  utilizado para o cálculo do índice de laterização ( $e'$ ), junto do coeficiente  $d'$ , é possível definir se o solo possui comportamento laterítico ou não laterítico, de forma a se observar:

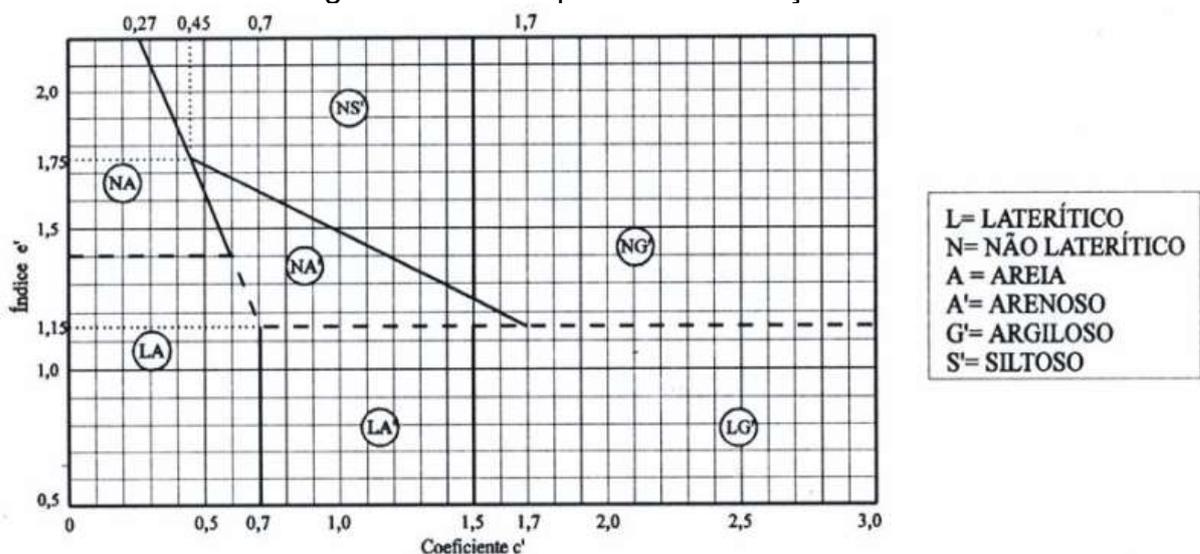
- Para os solos lateríticos, geralmente, com exceção das areias, a curva "Pi versus Mini-MCV" é descendente, ou seja, o parâmetro Pi diminui com o aumento do Mini-MCV;
- Em geral, nos solos saprolíticos, têm-se valores de Pi muito superiores aos dos solos lateríticos ( $P_i > 100\%$ ). Esse valor é acentuado nas variedades siltosas micáceas e/ou caulíníficas, que apresentam frequentemente  $P_i > 250\%$ .

#### 2.4.4 Índice $e'$

O índice  $e'$ , apresentado por Nogami e Villibor (1995) foi introduzido a fim de indicar o comportamento laterítico ou não laterítico dos solos. Os autores verificaram os resultados obtidos empiricamente com diversos ensaios de campo, analisando o seguinte:

- O comportamento laterítico começa a se manifestar quando  $d' > 20$  ( $\text{kg/m}^3$ ) /% e  $P_i < 100\%$ , desta forma que permitiu a delimitação da linha horizontal principal correspondente a  $e' = 1,15$  (linha tracejada da Figura 6) que separa os solos "L" dos solos "N".
- Para os solos com baixa quantidade de finos (areias), a transição das classes L e N, ocorre para valores mais altos de  $P_i$  e menores de  $d'$ , o que levou a estabelecer a linha horizontal secundária, correspondente a  $e' = 1,40$ .

Figura 6 - Gráfico para a classificação MCT



Fonte: Nogami e Villibor (1995).

Nogami e Villibor (1995) apontam que a linha tracejada no gráfico da classificação MCT foi utilizada para indicar os solos próximos a ela que, muitas vezes, podem gerar dúvidas sobre seu comportamento laterítico (L) ou não (N). Segundo os autores, nesse caso, para obter o comportamento do solo, devem-se verificar as seguintes condições:

- Condição para verificação do comportamento L: Quando o  $P_i$  decrescer sensivelmente, no intervalo de Mini-MCV de 10 a 15, podendo atingir valor zero ou muito baixo; e quando a curva Mini-MCV, em função do teor de umidade de compactação, apresentar concavidade para cima;
- Condição para verificação do comportamento N: quando não atender as duas condições anteriores;
- Condições para definição de solos considerados transicionais: quando uma das condições acima não ocorrer, o solo é considerado transicional, representado por símbolos dos grupos adjacentes. Exemplo, solo LA'-NA' localizado no LA', próximo à linha tracejada.

#### **2.4.5 Utilização dos Grupos de Solos da Classificação MCT**

Nogami e Villibor (1995) propuseram uma Tabela (Figura 7) na qual resumidamente relacionaram a granulometria obtida na compactação com as granulometrias típicas T1-71 do DER – SP.

Figura 7 - Propriedades e utilização dos grupos de solos da classificação MCT

Designação		Granulometrias típicas Designações do T1-71 do DER-SP						
		areias siltos (q, s)	areias siltosas	siltos (k, m) siltos arenosos	argilas argilas arenosas argilas siltosas siltos argilosos	areias	areias argilosas	argilas argilas arenosas argilas siltosas siltos argilosos
k=caulínítico m=micáceo s=serícítico q=quartzoso								
COMPORTAMENTO		N = Não Laterítico				L = Laterítico		
GRUPO MCT		NA	NA'	NS'	NG'	LA	LA'	LG'
Propriedades	MINI-CBR (%) sem imersão perda por imersão	M, E B, M	E B	M, E E	E E	E B	E, EE B	E B
	EXPANSÃO (%)	B	B	E	M, E	B	B	B
	CONTRAÇÃO (Ct)	B	B, M	M	M, E	B	B, M	M, E
	COEF. DE PERMEABILIDADE (k)	M, E	B	B, M	B, M	B, M	B	B
	COEFICIENTE DE SORÇÃO (s)	E	B, M	E	M, E	B	B	B
Corpos de prova compactados na massa específica aparente seca máxima da energia normal		EE = Muito Elevado E = Elevado			M = Médio B = Baixo			
Utilização*	Base de pavimento	n	4°	n	n	2°	1°	3°
	Reforço do subleito compactado	4°	5°	n	n	2°	1°	3°
	Subleito compactado	4°	5°	7°	6°	2°	1°	3°
	Aterro (corpo) compactado	4°	5°	6°	7°	2°	1°	3°
	Proteção à erosão	n	3°	n	n	n	2°	1°
	Revestimento primário	5°	3°	n	n	4°	1°	2°
* A "utilização" é representada em prioridade de escolha (1°, 2°, 3°...), sendo "n" não recomendado								
REPRESENTAÇÃO GRÁFICA								

Fonte: adaptado de Nogami e Villibor (1995).

## 2.5 Solos para a Pavimentação

O solo representa um elemento de grande importância na análise de todas as etapas do dimensionamento de um pavimento, pois será a fundação ou ainda pode ser utilizado em diferentes camadas que o constituem. Dentro desse contexto, é fundamental estudar e caracterizar o comportamento do solo antes de sua aplicação na estrutura (SENÇO, 2008).

De acordo com Balbo (2007), no solo que será utilizado para fins rodoviários deve-se conhecer parâmetros fundamentais do material, são estes: granulometria, limites de Atterberg (plasticidade e liquidez), massa específica, umidade, índice de suporte Califórnia e classificação geotécnica.

A granulometria do solo respeita determinadas faixas que o caracterizam, de acordo com DNIT (2006), esta são:

- Pedregulho: é a fração do solo que é retida na peneira nº 10;
- Areia: é a fração do solo que passa na peneira nº 10 e é retida na peneira nº 200;

- Areia grossa: é a fração que passa na peneira nº 10 e é retida na peneira nº 40;
- Areia fina: é a fração que passa na peneira nº 40 e é retida na peneira nº 200;
- Silte: é a fração com tamanho de grãos entre a peneira 0,075mm (nº 200) e 0,005 mm;
- Argila: é a fração com tamanho de grãos abaixo de 0,005 mm.

A partir da faixa granulométrica do solo é determinado seu comportamento, de modo que para uma fração granulométrica maior como em pedregulhos e areias são caracterizados por serem mais permeáveis e sua resistência a deformação depende da força normal aplicada no solo e do entrosamento e atrito entre as partículas. Já para solos argilosos, por serem coesivos, apresentam comportamento perante a água diferenciado, a coesão varia de acordo com o teor de umidade que para baixos teores apresenta maior coesão. Os siltes apresentam comportamento entre argilas e areias, sendo geralmente parte constituinte de outras faixas e dependem essencialmente da composição granulométrica, forma e mineralogia de suas partículas (DNIT, 2006).

As principais características dos solos perante a pavimentação são a permeabilidade, capilaridade, compressibilidade, elasticidade, contratilidade e expansibilidade e resistência ao cisalhamento (DNIT, 2006).

## **2.6 Estabilização de solos**

O comportamento do solo está diretamente ligado as suas características e propriedades mecânicas, desta maneira para verificar se este atenderá aos requisitos técnicos estabelecidos é de fundamental importância o conhecimento acerca destes parâmetros no solo existente para a execução de um projeto de pavimentação. Entretanto, normalmente é encontrado uma gama de solos disponíveis que não suportam as cargas impostas ao pavimento devido as suas propriedades. Logo, para cumprir os requisitos mínimos para a execução do projeto, uma das soluções mais consistentes é a procura por outros materiais diferentes que possam complementar as propriedades do material existente. No entanto, esta alternativa eleva os custos da construção, como por exemplo o transporte do material a ser utilizado, o que por diversas vezes torna inviável a concepção do projeto (BENTO, 2006; LOPES, 2011).

O solo é definido como o material mais utilizado na construção civil e ainda o mais abundante na superfície terrestre. No caso da pavimentação e da terraplanagem, o solo faz parte da camada do subleito, sub-base e ocasionalmente revestimento primário. Nas situações nas quais os solos locais não estiverem de acordo total ou parcialmente com os requisitos estabelecidos, o profissional de engenharia deverá tomar uma das seguintes providências (MEDINA, 1987):

- Evitar ou contornar o terreno mau;
- Remover o solo ruim e substituí-lo por outro de qualidade superior;
- Projetar a obra para situação de terreno de fundação ruim (conviver com a situação difícil);
- Estabilizar o solo existente.

O fundamento da estabilização tem como característica suplementar as propriedades de resistência do solo, potencializando a utilização deste para fins específicos. A estabilização do solo pode ser executada por vários métodos, os quais podem ser separados em duas categorias amplas: mecânicas ou químicas (GUIMARÃES, 2012; MAKUSA, 2013; MOUSAVI et al., 2017).

- Estabilização Mecânica: a estabilização do solo pode ser realizada por meio de processos físicos, logo ocorre a adequação da granulometria e plasticidade do solo com adição ou subtração de certas quantidades de frações constituintes, além da compactação (MAKUSA, 2013; MALKO, 2015);

- Estabilização Química: mistura com aditivos orgânicos ou inorgânicos, como materiais betuminosos, resinas, compostos de fósforo, silicatos de sódio, cal, cimento Portland, entre outros, e posterior compactação. A estabilização do solo depende principalmente de reações químicas entre estabilizador e minerais do solo para alcançar o efeito desejado (MAKUSA, 2013; MALKO, 2015).

O processo de estabilização pode ser descrito como todo método que visa aumentar resistência do material as solicitações desenvolvidas pelo tráfego e a durabilidade e vida útil, de forma resistente as intempéries. Assim, define-se como qualquer alteração nas propriedades do material para melhorar seu comportamento sob o ponto de vista da engenharia. Consiste em um tratamento artificial, de forma mecânica, química ou físico-química (ambos os métodos), na qual torna o solo estável para os limites de utilização aos quais são submetidos, mantendo a estabilização

mesmo sob a ação de agentes externos, como por exemplo ações climáticas distintas, e ainda cargas exteriores (VOGT, 1971; SOLIZ, 2007; MAKUSA, 2013).

Na pavimentação, o procedimento de estabilizar o solo tem por objetivo tornar a estrutura adequada para receber as cargas de veículos, sem que ocorra deformações ou deslocamentos horizontais/verticais, suportando as condições atmosféricas (OLIVEIRA, 2010).

Medina e Motta (2004) citam as principais características que são modificadas com a estabilização do solo, assim como sua situação esperada após o processo, estas são:

- Resistência ao Cisalhamento, deixando-a mais resistente as alterações ambientais e intempéries, principalmente a umidade, tendo ainda a finalidade de deixá-la compatível com as cargas que a estrutura será submetida;
- Permeabilidade, tomando a estrutura mais ou menos permeável;
- Compressibilidade, diminuindo-a.

Brito e Paranhos (2017), resumem os métodos de estabilização em compactação, correção granulométrica e adição de estabilizante químico, o que divide as duas grandes categorias da estabilização em três segmentos: mecânico, físico e químico. Na Figura 8 são apresentados os principais métodos de estabilização e materiais utilizados. As soluções adotadas para as mais diversas situações estão correlacionadas ao tipo e as propriedades do solo, propriedades esperadas do solo após a estabilização, finalidade de aplicação do solo e exigências de projeto, além dos custos envolvidos. Entretanto, mesmo sendo viável a utilização de apenas um método, o mais recorrente é o complemento entre mais de um método para a estabilização (BRITO e PARANHOS, 2017).

Figura 8 - Tipos de estabilização de solos



Fonte: Cristelo, (2001).

### 2.6.1. Estabilização Mecânica

Gondim (2008) caracteriza a estabilização mecânica como aquela em que não há nenhum tipo de aditivo, desta forma descreve o processo como aquele em que altera o arranjo das partículas de solo ou sua granulometria, ou ainda interfira no nível de água da estrutura.

Para Soliz (2007), considera-se o processo de compactação do solo até atingir a estabilização granulométrica como estabilização mecânica.

A estabilização granulométrica, caracterizada por correções granulométricas, resulta em um material densamente graduado e de parcela fina limitada, com a mistura apropriada de dois os mais solos para sua posterior compactação (SOLIZ, 2007). Para Cristelo (2001), a correção granulométrica, essencialmente a fração argilo-siltosa, é adquirida ao misturar um solo menos plástico a um solo de alto teor plástico, promovendo uma redução do índice de plasticidade e limite de liquidez do solo.

A compactação é feita por meio da energia mecânica aplicada a estrutura, tendo o objetivo de reduzir os vazios no solo e rearranjar suas partículas. Este procedimento geralmente é realizado por meio de equipamento mecânico, por exemplo um rolo compactador que pode ser do tipo pé-de-carneiro para a maioria dos solos, exceto areias, ou liso para solos arenosos, pedregulhos ou pedra britada e tendo ainda a função de selar o solo após a passagem do rolo pé-de-carneiro. (SAMPAIO, 2008). Nesse processo estima-se que a redução do volume de vazios está diretamente ligada ao aumento da resistência mecânica. O procedimento tem por objetivo acrescentar ao solo uma qualidade de densificação máxima, a qual está relacionada a uma energia de compactação específica, um peso específico seco e uma umidade ótima. Portanto, ao realizar esse procedimento busca-se diminuir o índice de vazios, aumentar a resistência ao cisalhamento, aumentar a densidade e a capacidade de suporte do solo, diminuindo ainda a contração e a compressibilidade dos solos (SANTOS *et al.*, 1995; SANTOS, 2009).

Conforme Villibor (1982) sintetiza, a compactação é uma parte essencial e obrigatória para as construções rodoviárias, e ainda ressalta que a compactação é parte constituinte de diferentes métodos de estabilização, sendo executada ao final de cada processo.

### **2.6.2. Estabilização Física**

Os tratamentos que possuem reações físicas são utilizados como métodos alternativos de estabilização para casos específicos nos quais deseja-se obter um resultado para a aplicação do solo. Existem situações nas quais apenas a estabilização mecânica não é suficiente, seja por motivos de tempo (aceleração da estabilização) ou quando é necessário um alto valor de resistência e rigidez do solo, tornando viável os tratamentos com reações físicas para esses casos (CRISTELO, 2001).

Oliveira (1994) determina que são processos físicos as técnicas que envolvem tratamentos térmicos de secagem ou congelamento, tratamento elétrico e eletro-osmose. Esses procedimentos melhoram o desempenho estrutural e de drenagem dos solos

Sampaio (2008) constata que a estabilização física é um processo economicamente custoso e geralmente não é utilizado para pavimentação. Portanto, não será aprofundado neste estudo.

### **2.6.3. Estabilização Química**

A estabilização química pode ser descrita como a modificação da estrutura solo pelo acréscimo de um ou mais produtos químicos que ao se solidificarem ou reagirem com as partículas de solo influenciam nas suas propriedades de resistência mecânica, deformabilidade e permeabilidade, a fim de estabilizá-lo (MEDINA, 1979).

As alterações nas propriedades mecânicas do solo acontecem por meio da das partículas que se aglomeram ou vedam os poros devido a reações químicas (CRISTELO, 2001). Existe a possibilidade quando ocorre a mistura de que o estabilizador forme uma matriz contínua com o solo ou não. No caso da formação da matriz contínua os poros são preenchidos pelo agente estabilizador, logo as propriedades mecânicas da estrutura são essencialmente oferecidas pelo estabilizador. As várias reações entre o solo e o estabilizador geram reações físicas (variação de temperatura, hidratação, evaporação e adsorção) e químicas (troca catiônica, precipitação, polimerização, oxidação, solução e carbonatação) (MEDINA, 1987). Entretanto, no caso da matriz ser descontínua os poros não são completamente preenchidos pelo estabilizador e as principais consequências são a

modificação das características superficiais das partículas, vedação inativa dos poros e a interconexão entre as partículas do solo.

O tipo de aditivo estabilizador a ser utilizado varia de acordo com a utilização desejada da estrutura e as propriedades naturais do solo. Para potencializar ou controlar as propriedades de resistência, deformação e permeabilidade as reações químicas mais usuais são as de troca catiônica com partículas de argilas, as reações pozolânicas e cimentícias. Os estabilizantes químicos comumente utilizados são a cal, o cimento Portland, cinza volante, emulsões betuminosas ou ainda combinações destes (MICELI, 2006; SANDRONI e CONSOLI, 2010).

A estabilização com o aglomerante obtido a partir da calcinação do calcário é um dos métodos mais antigos conhecidos na engenharia. O processo se dá por meio da mistura do solo, cal e água em proporções adequadas e verificadas em laboratório, pois não existe um teor ótimo de cal para todos os solos. A cal tende a reagir quimicamente com os finos por troca de cátions. É utilizada em solos argilosos ou siltosos, os quais possuem baixa capacidade de suporte e contém elevada plasticidade e expansão (LIMA, 1984).

Medina (1987) caracterizou as reações entre o solo e a cal em duas categorias, as rápidas ou imediatas (floculação e troca iônica) e as lentas (pozolânicas, carbonatação e formação de novos compostos cristalinos).

De acordo com Bastos (2005), as reações químicas ocorrem entre a parcela fina do solo (reações pozolânicas), tendo como características principais do solo influenciadas pela cal a distribuição granulométrica (agregação ou floculação, quanto mais fino o solo maior a consequência), a plasticidade (elevada nas argilas expansivas e reduzida nas não-expansivas, o LP aumenta e o LL diminui), a variação volumétrica (eleva o limite de contração e reduz a sua capacidade de expansão), a característica na compactação tendo na floculação um ganho de resistência, a resistência na qual possui um aumento imediato e também crescente (devido a reação da pozolana) e a diminuição da absorção de água pela argila.

A estabilização com cimento Portland, tem seus parâmetros de dosagem determinados pela “NBR 12253/2012 - Solo-cimento – Dosagem” para uso em pavimentos de acordo com o solo. A mistura tem a finalidade de atuar reduzindo o índice de plasticidade (quanto mais cimento, menor a plasticidade), aumentando o limite de contração, reduzindo alterações de volume do solo, reduzindo a coesão,

aumentando a resistência e aumentando o módulo de resiliência. Para a densidade máxima e o teor ótimo de umidade não ocorrem mudanças significativas. No entanto, pode ocorrer influência na mistura do cimento de fatores como impurezas, proporção água-cimento, temperatura de cura e presença de aditivos (MEDINA e MOTTA, 2004; MAKUSA, 2012).

Para utilização do cimento como estabilizante, por questões econômicas o solo deve ser mais arenoso do que argiloso, e ainda se constata que o ideal é que seja utilizado para agregados bem graduados com teor de finos suficiente para preencher os vazios, formando uma matriz contínua (MEDINA e MOTTA, 2004; LITTLE e NAIR, 2009).

Alsafi *et. al*, (2017) caracteriza a cinza volante como um resíduo mineral (subproduto) de estrutura amorfa resultado das instalações de energia elétrica a carvão. Ainda de acordo com o autor a cinza volante pode ser obtida pela precipitação eletrostática ou ainda de forma manual por meio da captação mecânica das partículas produzidas na queima de combustível das termoelétricas a carvão. Alsafi *et. al* (2017) conclui que esse método pode ser utilizado com estabilizante para bases, sub-bases ou taludes onde diminui as pressões laterais, contribuindo ainda para um ganho significativo de resistência a compressão de solos expansivos.

As cinzas volantes precisam ser misturadas com um ativador, este pode ser a cal ou cimento Portland, para assim formar um composto cimentício. A escolha do ativador dependerá da composição química das cinzas volantes e do componente ao qual será misturado posteriormente (MAKUSA, 2012).

Nos solos que não são bem graduados e uniformes, com pouca ou inexistente fração de finos, os procedimentos mais comuns de estabilização não são aplicáveis. Nesse tipo de solo a cimentação fica comprometida devido a uniformidade das partículas, pois o contato entre os grãos é baixo e os vazios entre eles elevados. (NARDI, 1975). Portanto, para solos arenosos a estabilização com cal não é adequada, entretanto ao adicionar a cinza volante ao solo, esta substitui a parcela de finos antes insatisfatória, tornando o sistema reativo e eficaz. Quanto maior o teor de cinza volante na mistura solo-cal-cinza volante, o peso específico máximo aparente seco reduz e há um aumento na umidade ótima para ambas as energias de compactação. Ocorre que a estabilização é realizada pela cimentação dos grãos de

areia, através da reação pozolânica entre a cal e a cinza quando umedecidas (NARDI, 1975; ROSA, 2009).

## **2.7 Solo-Emulsão Asfáltica**

O material que resulta da mistura de solos locais com adição de emulsão asfáltica, podendo haver ou não a presença de filers minerais ativos, com equipamentos adequados, espalhado e compactado a frio é denominado como mistura solo-emulsão. A emulsão asfáltica pode ser descrita como uma combinação heterogênea de dois ou mais fluídos, que geralmente não se misturam, mas que, no entanto, quando mantidos em suspensão por agitação, ou normalmente por quantidades conhecidas de emulsificantes desenvolvem uma mistura estável que pode ser utilizado em bases ou sub-bases de pavimentos (ABEDA, 2010).

Para Miceli (2006), a estabilização por esse método é caracterizada pelo acréscimo a um solo de um ligante asfáltico. Vizcarra (2010) pondera que o ligante é determinado sobretudo pelo tipo de solo presente no local e o tipo da mistura que será realizada, estando submetida a alterações determinadas por novas tecnologias de ligantes disponíveis.

De acordo com GUIMARÃES (2012), a utilização de materiais asfálticos para a construção e impermeabilização de obras rodoviárias já possui uma longa data.

O método solo-emulsão pode ser aplicado tanto em solos de granulometria fina quanto em areias afim de melhorar propriedades como a coesão, impermeabilização e resistência ao cisalhamento para resistir as solicitações de tráfego e intempéries. Os solos que possuem resistência coesiva no estado seco, solos de granulometria fina, a partir da adição da emulsão passam a ter função impermeabilizante na sua estrutura. Já para os solos arenosos, a emulsão promove a ligação entre as partículas conferindo coesão ao solo. Os efeitos da emulsão no solo são formados pelo bloqueio dos poros e a partir de filmes que se formam ao redor dos grãos e tem a capacidade de impedir a absorção e entrada de água na estrutura, essencialmente em solos argilosos. No entanto, esses filmes devem ter espessura adequada, de modo que deve ter espessuras finas para não diminuir efetivamente a resistência por atrito, e ainda, espesso o suficiente para cimentar os grãos (INGLÊS e METCALF, 1972; CRISTELO, 2001; MICELI 2006).

O teor ótimo de material asfáltico, oferece a máxima resistência a estrutura. Entretanto é um processo delicado, pois um teor acima do ótimo reduz a resistência, mas também contribui para a impermeabilização, impedindo que ocorra a entrada excessiva de água na estrutura. Desta forma, a máxima impermeabilização ocorre para um teor acima do ótimo. Portanto, é um processo ambíguo no qual busca-se obter um teor adequado que atenda às necessidades locais, considerando que uma lâmina espessa de emulsão reduz a resistência diminuindo o entrosamento entre os grãos, mas potencializa a impermeabilização preenchendo os poros da estrutura (INGLÊS e METCAF, 1972; GONDIM, 2008; MOREIRA, 2010).

Outro fator diretamente ligado ao teor de emulsão é a densidade máxima da mistura, na qual o teor que caracteriza a máxima resistência, as vezes não condiz com a máxima densidade (GONDIM, 2008).

Para Momm (1983) apud Soliz (2007), as propriedades esperadas de solos estabilizados com emulsão asfáltica podem ser resumidas em:

- A resistência a compressão uniaxial é elevada para um determinado teor ótimo de emulsão;
- O teor ótimo em relação a resistência cresce progressivamente quanto maior o tempo de cura;
- Quanto maior a temperatura de compactação mais elevado serão os valores máximos, elevando os valores de resistência a compressão e módulo de elasticidade;
- Quanto mais elevado for o teor de emulsão, menor será a densidade máxima;
- Maior impermeabilização com o aumento do teor de emulsão.

Conforme Medina e Motta (2005), ao misturar a emulsão com outro estabilizante o efeito é de maior importância na mistura com a cal, relatando ainda que na mistura com cimento Portland, ocorre tanto reação química quanto física.

De acordo com a *Asphalt Academy* (2009), o fato de o índice de vazios da mistura ser semelhante a uma camada de agregado ou solo na estrutural final é a principal característica que distingue o solo-emulsão dos outros processos estabilizantes.

Sampaio (2008) comparou as principais características de cada tipo de estabilizante citado anteriormente, colocando os pontos de maior relevância, a Tabela

1 apresenta as principais características das misturas solo-cal, solo-cimento, solo-cinzas e solo-emulsão.

Tabela 1 - Características dos principais tipos de estabilização química

	CAL	CIMENTO PORTLAND	CINZAS VOLANTES	EMULSÃO ASFÁLTICA
Processo de estabilização	a curto prazo, há a troca de cátions entre solo e a cal que gera a aglomeração / floculação das partículas. A longo prazo, a pozolana reage com o solo.	através da reação de cimentação que ocorre com a hidratação do cimento Portland	necessitam de um ativador para formar um composto cimentado (cal ou cimento Portland)	confere coesão e impermeabilização ao solo
Aplicação com bom comportamento	solos finos e argilas plásticas	todos os tipos de solos, exceto os orgânicos	todos os tipos de solos, exceto os orgânicos	efeito coesivo em solos arenosos e impermeabilizante em solos argilosos
Desvantagens na estabilização	solos orgânicos ou solos com alta compressibilidade não apresentam bom comportamento	se a mistura não for bem controlada, podem ocorrer problemas referentes às fissuras por contração	quando utilizadas sem o ativador não há aumento no comportamento	teores de emulsão asfáltica acima do especificado em projeto lubrificam os grãos diminuindo o comportamento

Fonte: Sampaio (2008).

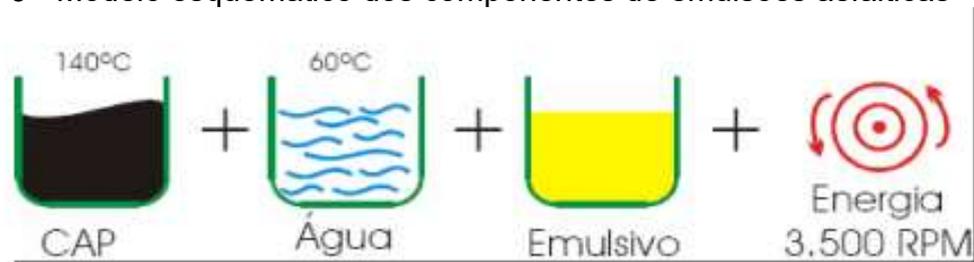
### 2.7.1 Emulsões asfálticas

As emulsões asfálticas são misturas heterogêneas constituídas de uma fase asfáltica dispersa em uma fase aquosa, junto com a ação de um agente emulsificante. A mistura é obtida combinando água com o cimento asfáltico de petróleo (CAP) aquecido em um meio agitado junto a um emulsificante. O agente emulsificante deverá dar estabilidade ao conjunto, ajudar na dispersão e revestir os glóbulos de betume com uma lâmina protetora, deixando-os em suspensão. As partículas da mistura são carregadas eletricamente, podendo ser classificadas quanto a ruptura em rápida, média e lenta (PINTO, 1998).

De acordo com James (2006), as emulsões asfálticas possuem de 40% a 75% de CAP, 0,1% a 2,5% de emulsificante, 25% a 60% de água, 0% a 10% de solvente e ainda possui uma parcela reduzida de outros elementos. Conforme o autor, no Brasil é determinado um CAP mínimo de 60% de acordo com a normatização de emulsões para a pavimentação.

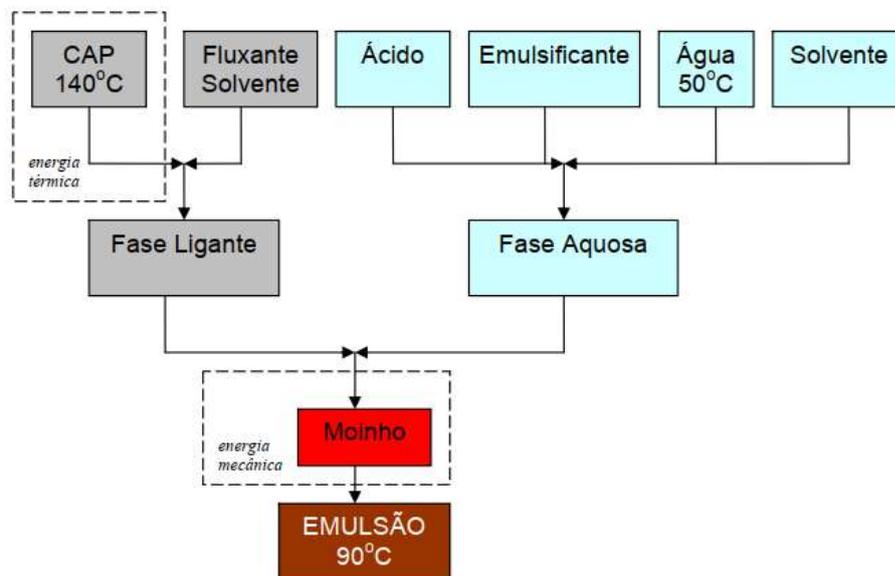
Conforme Miceli (2006), o processo de fabricação é realizado por equipamentos que tendem a produzir uma agitação intensa, de modo que resultam em dispersões mais finas e estáveis. Esses equipamentos de acordo com o DNER (2006) podem ser moinhos de bola, moinhos coloidais, homogeneizadores, agitadores mecânicos e misturadores emulsionadores por injeção. Na Figura 9 é ilustrado o processo de mistura de Costa (2004) e na Figura 10 é apresentada a esquematização do processo de fabricação da emulsão.

Figura 9 - Modelo esquemático dos componentes de emulsões asfálticas



Fonte: Costa, 2004.

Figura 10 - Processo de fabricação da emulsão asfáltica.



Fonte: Sant'ana (2009).

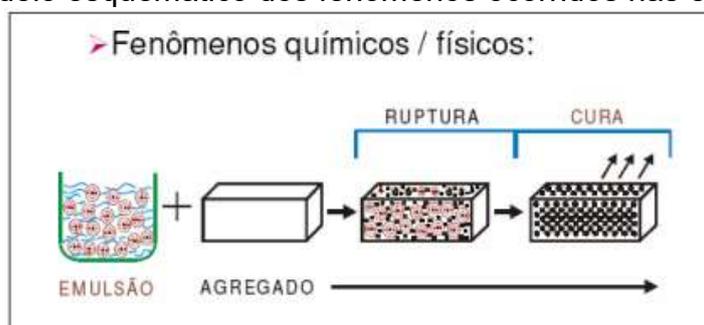
As misturas são constituídas de duas fases, uma de natureza polar e outra apolar. A emulsão é dita catiônica (onde o emulsificante é um sal de amina) quando os glóbulos são carregados positivamente e dita aniônica (onde o emulsificante é um

sabão com um ânion orgânico ligado a um álcali) quando os glóbulos de asfalto são carregados negativamente (GONDIM, 2008; SANTOS, 2009).

Santos (2008), descreve as emulsões aniônicas com boa adesividade a agregados eletropositivos, como rochas de natureza calcária. O autor ainda cita que para emulsões catiônicas, a boa adesividade se dá para agregados que possuam carga negativa, assim como arenitos e granitos por possuírem grande porcentagem de sílica.

A ruptura é caracterizada pela desestabilização da emulsão, isso ocorre quando os glóbulos de asfalto, os quais estão dispersos na fase aquosa, são ionizados (reação emulsificante) quando entram em contato com as superfícies de substratos ou do agregado mineral, nesse processo ambos se fundem, formando uma película contínua que cobre a superfície, ocorre então a expulsão da água pela reação química ou por evaporação física (MICELE, 2006). A esquematização do processo pode ser observada na Figura 11 de Costa (2004).

Figura 11 - Modelo esquemático dos fenômenos ocorridos nas emulsões asfálticas.



Fonte: Costa (2004).

A ruptura de emulsões asfálticas catiônicas ocorre por adsorção da parcela polar da molécula de emulsificante pelo agregado mineral que entra em contato com ela. É formada uma lâmina graxo hidrófoba, que ao expulsar água atuará como fixador do ligante asfáltico, independente das condições do agregado (COSTA, 2004).

Durante a ruptura da emulsão asfáltica ocorrem duas fases distintas de grande relevância, a floculação, na qual os glóbulos de CAP são aproximados e interagem entre si, e a coalescência, que ocorre quando a água entre os glóbulos de CAP se movimenta quebrando o filme emulsificante ocasionando a união dos glóbulos de CAP

(SANT'ANA, 2009). De acordo com James (2006) esse processo ocorre conforme é mostrado na Figura 12.

Figura 12 - Processo de ruptura da emulsão.



Fonte: James (2006).

Miceli (2006) determina que a velocidade de ruptura das emulsões depende da composição química do emulsificante, origem mineralógica do agregado (fator preponderante para determinar reatividade) e superfície específica do agregado.

### 2.7.2 Tipos de emulsões

As emulsões são classificadas quanto a sua velocidade de ruptura e a carga elétrica presente na estrutura (MICELI, 2006). Conforme o autor, quanto a velocidade as emulsões são classificadas como:

- Ruptura Rápida – RR: Indicadas principalmente para pinturas de ligação em substituição aos asfaltos diluídos e em tratamentos superficiais;
- Ruptura Média – RM: Indicadas para misturas com agregados graúdos;
- Ruptura Lenta – RL: Indicadas para misturas com agregados miúdos.

Conforme Miceli (2006), quanto as cargas elétricas são classificadas como:

- Não-iônicas: As partículas de asfalto possuem cargas neutras;
- Aniônicas: Partículas de asfalto são carregados eletronegativamente. Apresentam boa adesividade em agregados do tipo eletropositivo, principalmente os de natureza calcária;

- Catiônicas: Os glóbulos de asfalto são carregados eletropositivamente. Apresentam boa adesividade em agregados de arenitos e granitos.

Na estabilização com solo-emulsão, a escolha do tipo de emulsão depende do solo ao qual será aplicado. As emulsões RM e RL catiônicas são comumente utilizadas. Entretanto, as emulsões RR não são aplicáveis pois correm o risco de sofrer ruptura prematuramente ou que ainda a parcela volátil não deixe a mistura após a compactação, diminuindo a capacidade de suporte do solo (YODER e WITCZAK, 1975; CRISTELO, 2001).

Outra denominação para as reações catiônicas e aniônicas estão relacionadas a sua viscosidade. A nomenclatura é dada por duas letras, as quais informam o tipo de ruptura da emulsão, seguidas por um número que pode ser 1 ou 2, que informam a viscosidade (quanto maior o número, maior a viscosidade); pode ainda vir acompanhada da letra “C” que indica emulsões catiônicas (MICELI, 2006). O autor ainda descreve a nomenclatura como:

- RR-1C, RR-2C: Emulsões de ruptura rápida catiônicas;
- RR-1, RR-2: Emulsões de ruptura rápida aniônicas;
- RM-1C, RM-2C, RM-1, RM-2: Emulsões de ruptura média;
- RM-1, RM-2: Emulsões de ruptura média aniônicas;
- RL-1C: Emulsões de ruptura lenta catiônicas.

Miceli (2006), ainda cita as emulsões de caráter especial muito utilizadas para lamas asfálticas, estas são denominadas pela sigla LA, com a adição de identificação quanto aos critérios de ruptura e a carga de partícula.

Conforme Ferreira (1980), as emulsões asfálticas do tipo catiônicas em relação as aniônicas aderem melhor a uma ampla gama de agregados de diferentes constituições químicas.

As emulsões catiônicas do tipo RM-1C e RL-1C possuem as características mais adequadas para utilização na estabilização solo-emulsão devido ao fato de apresentarem melhor trabalhabilidade, permitem a utilização de materiais finos na mistura e ainda possuem tempo adequado de ruptura para o solo estabilizado (SOLIZ, 2007; SANTOS, 2009; PACHECO, 2011).

De acordo com os autores citados no Quadro 1, os pontos importantes a serem observados na emulsão utilizada para estabilização estão descritos abaixo.

Quadro 1 - Principais pontos da emulsão para a estabilização

<b>Ruptura</b>	É caracterizada pelo fenômeno que separa as fases constituintes. A reação química equivale a absorção do emulsificante e a reação física a evaporação da água (ABEDA, 2001; COSTA, 2004).
<b>Velocidade de Ruptura</b>	Depende da composição e quantidade de emulsificante, da natureza mineralógica e reatividade do agregado, da superfície específica do agregado, da limpeza do agregado (COSTA, 2004).
<b>Viscosidade</b>	Depende de dois fatores: teor de asfalto e origem do asfalto (COSTA, 2004).
<b>Cura</b>	Ocorre após a ruptura pelo processo físico da evaporação. Geralmente depende das condições climáticas (COSTA, 2004). Não há estabilização solo-emulsão sem que ocorra secagem (MATTOS, 1991).
<b>Adesividade</b>	É o que permite a fixação da emulsão ao agregado. Pode ser ativa quando o agregado está úmido e a emulsão desloca a película de água ou passiva quando a emulsão resiste a ação da água (COSTA, 2004).

Fonte: Elaborado pelo autor.

### 2.7.3 Estabilização de solos com emulsões asfálticas

De acordo com Ferreira (1980) e Soliz (2007), os principais fatores que influenciam no desenvolvimento da estabilização por solo-emulsão são o tipo de solo, o teor de água, tempo de aeração, a cura e o teor de emulsão e o tipo de emulsão.

A estabilização do solo para essa mistura está diretamente ligada a granulometria e características físico-químicas do solo (MOREIRA, 2010). Para Ferreira (1980) e Moreira (2010), as principais características do tipo de solo que devem ser levadas em consideração são:

- Quanto maior a parcela de finos no solo, mais quebradiço será a estrutura estabilizada;
- Para solos com granulometria aberta estão sujeitos a menores resistências a fadiga;
- Para a mistura areia-emulsão é mais fácil controlar a qualidade do resultado do processo, logo é a mistura mais difundida;
- Em materiais britados, com proporção maior de 30% de areia e pelo menos 15% de material passante na peneira nº 200 possuem resultados satisfatórios para a estabilização;
- Para índices de plasticidade inferior a 10% tenta-se com a emulsão gerar esforços coesivos na mistura;

- Em solos coesivos a emulsão atua como impermeabilizante, procurando manter uma constância no teor de umidade da mistura depois da compactação. Miceli (2006) comparou os Limites de Atterberg e as características granulométricas entre alguns estudos realizados que delimitam o uso do solo para estabilização solo-emulsão e está disposto na Tabela 2.

Tabela 2 - Condições para estabilização pelo tipo de solo

Tipo de solo	LL/LP do solo	% passante # 0,075 mm	Fonte
Areias	IP máximo de 12%	25% máximo	YODER e WITCZACK (1975)
Pedregulhos e areias 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%	10 a 50%	KÉZDI (1979)
Solos em geral	IP máximo de 14%	5% mínimo	VOGT (1971)
Solos arenosos	-	35% máximo	DER 3.07 (1988)
Solos argilosos	IP máximo de 6% LL máximo de 30%	35% máximo	
Materiais britados	-	15% máximo	ABEDA (2001)
Solos em geral	IP máximo de 8%	20% máximo	ABEDA (2001)
Solos em geral	-	25% máximo	ASTM (2006)

Fonte: Miceli (2006).

O teor de água possui grande influência no processo de estabilização, sendo este para Ferreira (1980) o maior causador de falhas no processo de aderência entre os materiais. Conforme Vogt (1971), devem ser analisados três teores de água críticos:

- Teor de água de dispersão – existe um teor mínimo de água que determina a capacidade de dispersão da água na mistura, no qual abaixo desta a dispersão da emulsão não ocorre. O teor está entre 3% e 5%, sendo preponderante umedecer o solo antes da mistura;
- Teor de água de diluição – está relacionado a viscosidade da emulsão e ao fato de emulsões diluídas sofrerem ruptura de forma mais lenta, facilitando a dispersão na estrutura do solo;

- Teor de água de compactação – seria o teor de umidade ótima levando em consideração que corresponde ao fluido como um todo (emulsão e água).

Para Ferreira (1980), é preponderante que a emulsão não seja misturada ao solo seco ou que possua baixo teor de umidade, considerando que para que melhores resultados sejam obtidos é necessário que ocorra uma homogeneização entre a água e o solo antes de misturar a emulsão. De acordo com o autor, esse processo impedirá a ruptura prematura da emulsão.

Outro fator relevante de acordo com Soliz (2007) é o tempo de descanso ou período de aeração após a mistura solo-emulsão ser realizada e antes da compactação para que ocorra a ruptura da emulsão.

No processo de cura é considerado que se não ocorrer secagem, não há estabilização, pois é nessa etapa que o teor de água diminui e passa a ocorrer a cobertura da superfície mineral com a estrutura, ocorrendo também o aumento de resistência (MATTOS, 1991).

A quantidade de emulsão utilizada está relacionada com a granulometria do solo, de forma que quanto mais fino for maior será o teor de emulsão. No entanto, é importante que a quantidade não exceda os vazios do solo compactado, pois a emulsão passa a atuar com lubrificante. O método de dosagem adequado relaciona-se com dois processos chamados de mistura íntima e vedação modificada (MOREIRA, 2010).

De acordo com Moreira (2010), a mistura íntima ocorre quando cada partícula de solo está envolvida em emulsão, no qual esta atua como ligante dando coesão a estrutura. Moreira (2010) ainda cita que na mistura da emulsão que irá envolver o material pulverizado, é dada a coesão entre os materiais sem interferência no atrito, de maneira que a quantidade adequada de emulsão garanta apenas a coesão sem que ocorra lubrificação das partículas.

Entretanto, essa teoria se torna ineficiente para solos coesivos como as argilas pelo fato de não ser possível individualizar os grãos. Então para esse tipo de solo, é utilizado a teoria da vedação modificada, na qual a emulsão tem a função de vedar os poros do solo e atuar como matriz impermeabilizante e cimentante (MOREIRA, 2010).

Yoder e Witczak (1975) em seu estudo relatam que as emulsões RR, RM e RL catiônicas poderiam ser usadas na mistura solo-emulsão levando em consideração o comportamento do solo empregado. Entretanto, os autores ponderam que as

emulsões RR não são adequadas devido a possibilidade de uma reação de ruptura prematura com o solo, e ainda, avaliam que as emulsões RL não se aplicam a solos plásticos devido ao risco de que os materiais voláteis não deixem a mistura após a compactação, caracterizando uma redução na capacidade de suporte da estrutura.

A aplicação do solo estabilizado com emulsão asfáltica pode constituir tanto bases quanto sub-bases de pavimentos. No caso das bases, pode ser aplicada uma camada de revestimento de mistura a quente ou ainda para vias com baixo volume de tráfego pode ser realizado um tratamento anti-pó, lama asfáltica, capa selante, microrevestimento ou tratamento superficial. No entanto, desde que atenda as exigências em relação ao desgaste em vias de baixo volume de tráfego a mistura solo-emulsão serve tanto para base como para camada de rolamento (ABEDA, 2001).

Finberg *et al.* (2008), afirma que a aplicação de emulsão asfáltica como estabilizante constitui bases flexíveis, resistentes a fadiga e com uma menor probabilidade de abertura de fissuras nos pavimentos. O autor ainda pondera que os efeitos estabilizantes a longo prazo reagem melhor para solos granulares do que solos finos em relação as propriedades de coesão e resistência mecânica. SABITA (1996), determina que o principal agente causador de danos é a entrada de água na estrutura, logo a baixa permeabilidade influencia na durabilidade do pavimento.

## **2.8 Método de dosagem**

O método de dimensionamento para a estabilização solo-emulsão não possui amparo normativo, uma vez que os estudos acerca do tema são relativamente novos e dependem bastante de parâmetros externos, como por exemplo, a forma de fabricação da emulsão e características do solo. Portanto, assim como para os pavimentos tradicionais constituídos de bases e sub-bases granulares em sua origem, este tipo de dimensionamento atualmente é puramente empírico (SOLIZ, 2007; GONDIM, 2008).

Para encontrar um teor ótimo de emulsão, é necessário que seja determinado qual parâmetro deseja-se avaliar, como por exemplo resistência ou desgaste. A partir dessa premissa, torna-se necessário ensaiar vários teores de emulsão e moldar corpos-de-prova para que o parâmetro avaliado esteja de acordo com a dosagem. Alguns ensaios que têm os resultados geralmente utilizados como ponto de partida

dos pesquisadores para encontrar o teor ótimo são o módulo de resiliência, estabilidade Marshall, resistência a tração por compressão diametral, resistência a compressão simples, ensaios triaxiais UU, CBR, mini-CBR e estabilidade Hubbard-Field conforme disposto na Tabela 3 (MICELI, 2006).

Tabela 3 - Parâmetros de dosagem de solo-emulsão

Fonte	Parâmetro de Dosagem
DER 3.07/1991 (1991)	MVS (Moisture Vapor Susceptibility) e Hubbard – Field
ASTM D 4223 (2006)	Estabilidade Marshall, Módulo de Resiliência e Resistência à tração indireta
Lucena <i>et al.</i> (1982)	Resistência à compressão simples e Resistência à tração indireta
Guarçoni et al. (1988); Mattos et al. (1991)	CBR e Mini-CBR
Araújo <i>et al.</i> (1983)	Ensaio triaxiais UU

Fonte: Adaptada de Miceli, 2006.

Entretanto, de acordo com Gondim (2008), alguns destes ensaios encontram-se ultrapassados para o estudo de reações físico-químicas.

## 2.9 Determinação do teor de projeto de emulsão asfáltica para análise

De acordo com Sant'ana (2009) o teor de asfalto para a mistura solo-emulsão está diretamente relacionado a quantidade percentual de finos que o solo possui, pois estes possuem uma superfície específica maior e necessitam de uma maior quantidade de asfalto para a sua cobertura. Desta forma, para a dosagem inicial de análise o parâmetro adotado para estudo foi proposto por Kézdi (1979) e posteriormente encontrado nos estudos de Sant'ana (2009) e Pacheco (2011).

Kézdi (1979) desenvolveu um método matemático (Equação 1) que leva em consideração a granulometria de cada solo estudado para determinar um teor teoricamente ideal de betume, demonstrando assim uma alternativa interessante principalmente para a análise de solos tropicais. No entanto, a quantidade de asfalto deve ser transformada em quantidade de emulsão asfáltica a partir do resíduo

existente. O mesmo autor propôs ainda uma simplificação do modelo (Equação 2) que leva em consideração apenas a fração de solo passante na peneira n°. 200.

$$P = 0,015a + 0,02b + 0,03c + 0,09d \quad (\text{Equação 1})$$

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 (%).

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

Onde:

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

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

Santana (1992) ponderou que a superfície do agregado é fundamental para a dosagem. A partir disso, o mesmo autor propôs um modelo no qual considera a superfície do agregado totalmente esférica. Sant'ana (2009) observou que nessa proporção matemática a espessura do filme de asfalto residual que envolve o agregado é crescente com o aumento do teor de CAP, porém decrescente com o aumento da superfície específica. No caso da mistura solo-emulsão, Sant'ana (2009) avalia que o filme de asfalto presente envolto nas partículas de solos tende a ser mais espesso pois a superfície específica tende a ser elevada, enquanto o teor de asfalto é baixo. De acordo com Sant'ana (2009), há mais uma consideração relevante a partir desse conceito, na qual pode-se observar que devido a sua maior superfície específica, quanto mais teor de finos houver presente no solo, mais elevado será o teor de CAP a ser utilizado para estabilização. Dentro desse contexto, o autor faz uso da Equação 3 denominada Equação de Vogt para determinar a superfície específica do agregado. A Equação de Vogt (Equação 3) leva em consideração o jogo de peneiras utilizadas no Brasil para granulometria, e ainda, determina que para análise a massa específica dos grãos seja em torno de  $2,65 \text{ g/cm}^3$ . Para valores distintos de

massa específica dos grãos, o cálculo deve sofrer uma correção matemática na Equação apresentada na Tabela 4 de Sant'Ana (2009).

Tabela 4 - Fator de correção para a Equação de Vogt

Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	Fator Corretivo
2,35	1,13
2,45	1,08
2,55	1,02
2,65	1,00
2,75	0,97
2,85	0,93
2,95	0,90

Fonte: adaptado de Sant'ana (2009).

$$100\Sigma = 0,07P4 + 0,14P3 + 0,33P2 + 0,81P1 + 2,7S3 + 9,15S2 + 21,95S1 + 135F \text{ (Equação 3)}$$

Onde:

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

P4 - fração entre as peneiras 50 e 25 mm (%);

P3 - fração entre as peneiras 25 e 12,5 mm (%);

P2 - fração entre as peneiras 12,5 e 4,76 mm (%);

P1 - fração entre as peneiras 4,76 e 2,00 mm (%);

S3 - fração entre as peneiras 2,00 e 0,42 mm (%);

S2 - fração entre as peneiras 0,42 e 0,177 mm (%);

S1 - fração entre as peneiras 0,177 e 0,075 mm (%);

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

Para Santana (1992), a demonstração experimental de que o teor ótimo do filme de asfalto é produto entre a superfície específica e uma variável denominada “módulo de riqueza – k” que leva em consideração aspectos físicos da partícula de solo e parâmetros da emulsão como a viscosidade, adsorção do agregado e tráfego da via.

A mistura de solo-emulsão quando realizada em temperatura ambiente pode ser considerada como uma mistura a frio. Desta forma podem ser utilizados métodos de dosagem de pré-misturados a frio (PMAF). Os valores de k (módulo de riqueza)

mais usuais, de acordo com procedimentos experimentais foram Tabelados conforme disposto na Tabela 5. (SANTANA, 2009)

Tabela 5 - Valores de “k” usuais

<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: Adaptado de Santana 1992 *apud* Sant’ana 2009.

No entanto, para Santana (2009) as vias com baixo volume de tráfego comportam valores de “k” abaixo de 2,5 tendo em vista a pavimentação a baixo custo, buscando então a minimização do custo em material investido para a estabilização.

Portanto, de acordo com Sant’ana (2009), o valor de asfalto residual pode ser estimado na mistura solo-emulsão a partir da sua granulometria, na qual é retirada a sua superfície específica, e pelo módulo de riqueza (k). Para isso, o autor utiliza a Equação 4 de Duriez para que seja conhecida a porcentagem de CAP necessária para recobrir os grãos do solo analisado.

$$p = k \cdot (\Sigma)^{0.2} \quad \text{(Equação 4)}$$

Onde:

p: % teor de asfalto residual;

$\Sigma$ : superfície específica do agregado (m<sup>2</sup>/kg);

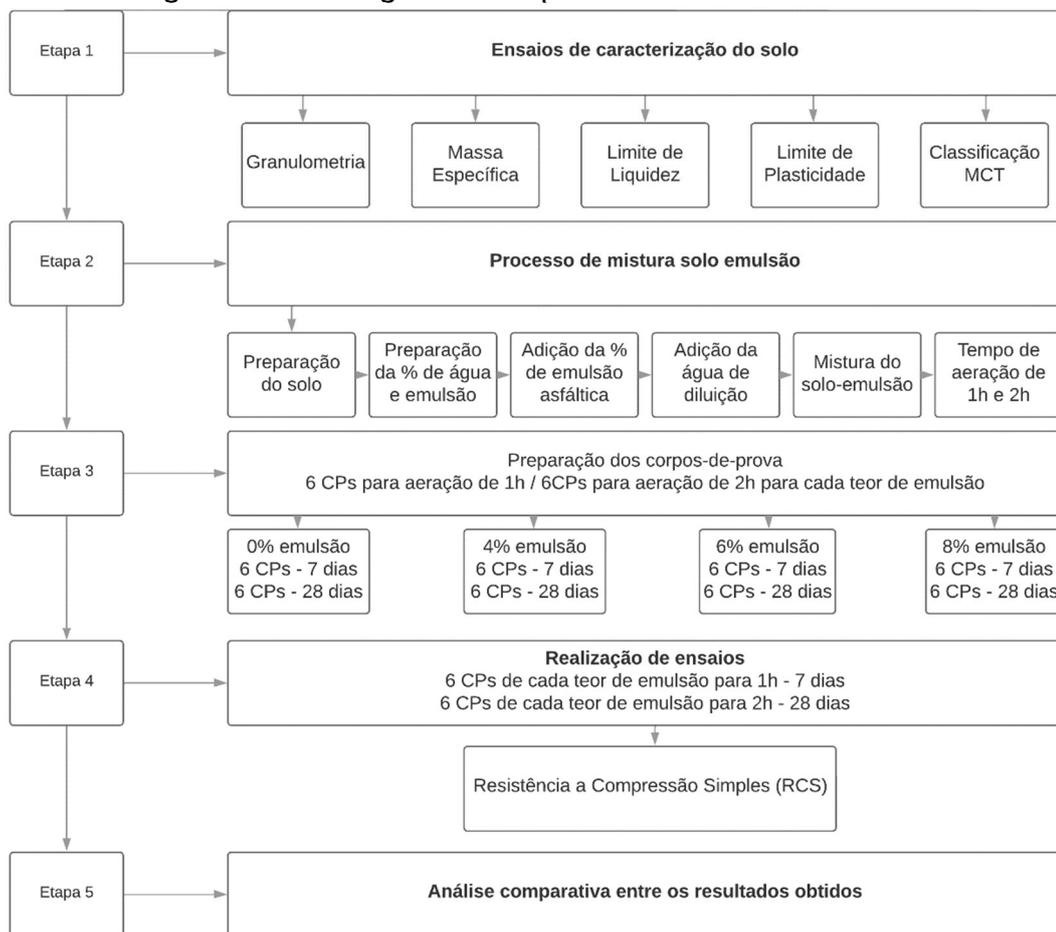
k: coeficiente de “módulo de riqueza”.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Na estabilização de solos, é fundamental a realização de ensaios de laboratório e posteriores testes de campo. É considerável que os resultados de resistência sejam ligeiramente superiores em laboratório do que o material do campo, entretanto é essa análise com o material estabilizado em campo que permite a escolha adequada do tipo e quantidade de estabilizante a ser utilizado.

Neste capítulo serão apresentados os materiais utilizados para o desenvolvimento do estudo com suas principais características relevantes. Posteriormente serão apresentados os ensaios que serão realizados para complementar este trabalho. Os ensaios serão sucintamente citados levando em consideração apenas aspectos relevantes para o estudo, de forma que o passo a passo completo para cada procedimento está descrito nas suas respectivas normas regulamentadoras. A perspectiva da sequência de ensaios é descrita no fluxograma contido na Figura 13.

Figura 13 - Fluxograma dos procedimentos laboratoriais



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os materiais e métodos utilizados para o desenvolvimento do estudo são abordados nesse capítulo e estão embasados na bibliografia de referência. Desta forma, a estabilização química por se tratar de um procedimento, até então, essencialmente empírico evidencia que a metodologia utilizada esteja diretamente ligada aos resultados obtidos.

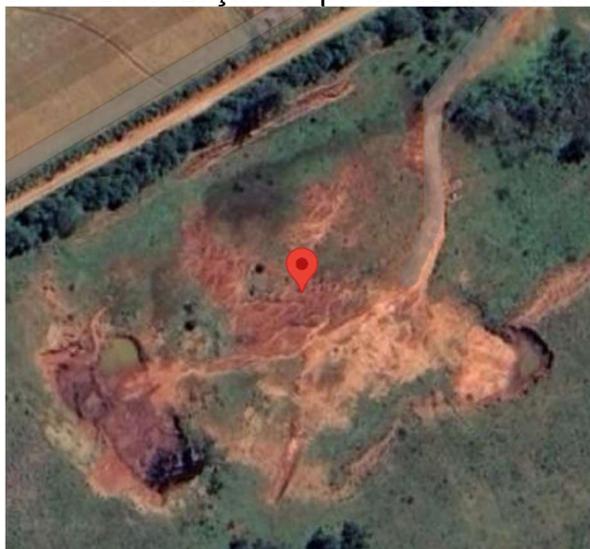
Na análise de caracterização do solo buscou-se definir os principais parâmetros presentes no solo puro de acordo com as normativas citadas para cada ensaio.

Já para a mistura solo-emulsão devido a ausência de uma normativa vigente direcionada a esse método, o estudo foi direcionado de acordo com a metodologia de autores da bibliografia de referência, assim como, utilizou-se de parâmetros de ensaios aplicados a outros materiais para análise do comportamento da mistura.

### 3.1 Solo

O material analisado para estabilização é proveniente da jazida da Pedra Rosada, localizada no distrito do Caverá na cidade de Alegrete – RS, com coordenadas: -29.837152, -55.774296 conforme a Figura 14.

Figura 14 - Localização do ponto de retirada do solo



Fonte: Google Maps (2022).

Foram coletadas amostras deformadas do solo e armazenadas no laboratório de Geotecnia e Pavimentação da Universidade Federal do Pampa, campus Alegrete, para posterior análises e trabalhos.

### 3.1.1 Ensaio de Caracterização do Solo

Em todos os ensaios realizados, foi seguida a orientação conforme a norma do Departamento Nacional de Estradas de Rodagem DNER - ME 041/94 "Solos – Preparação de amostras para ensaio de caracterização". Partindo do conceito descrito na norma, o solo foi seco ao ar, destorroado e peneirado em uma peneira de abertura de malha de 2,0mm. Posteriormente, o solo foi armazenado em bolsas e para cada uma das amostras que eram utilizadas nos ensaios, uma amostra de aproximadamente 30g era separada em capsulas de alumínio e levadas a uma estufa com temperatura entre 100°C e 105°C por 24h para que a umidade higroscópica fosse conhecida antes de dar seguimento aos procedimentos.

### 3.1.2 Granulometria

O ensaio de granulometria foi realizado conforme a descrição da norma NBR 7181/16 – "Solo – Análise Granulométrica".

A partir deste ensaio foi determinada a curva granulométrica característica do solo por meio do processo de peneiramento para a fração grossa (partículas com diâmetro maior ou igual a 0,075mm) e sedimentação para a fração fina (partículas menores que 0,075mm). As Figuras 16, 17, 18, 19 e 20 apresentam alguns passos da execução do procedimento em laboratório.

Figura 15 - Preparação das amostras para análise



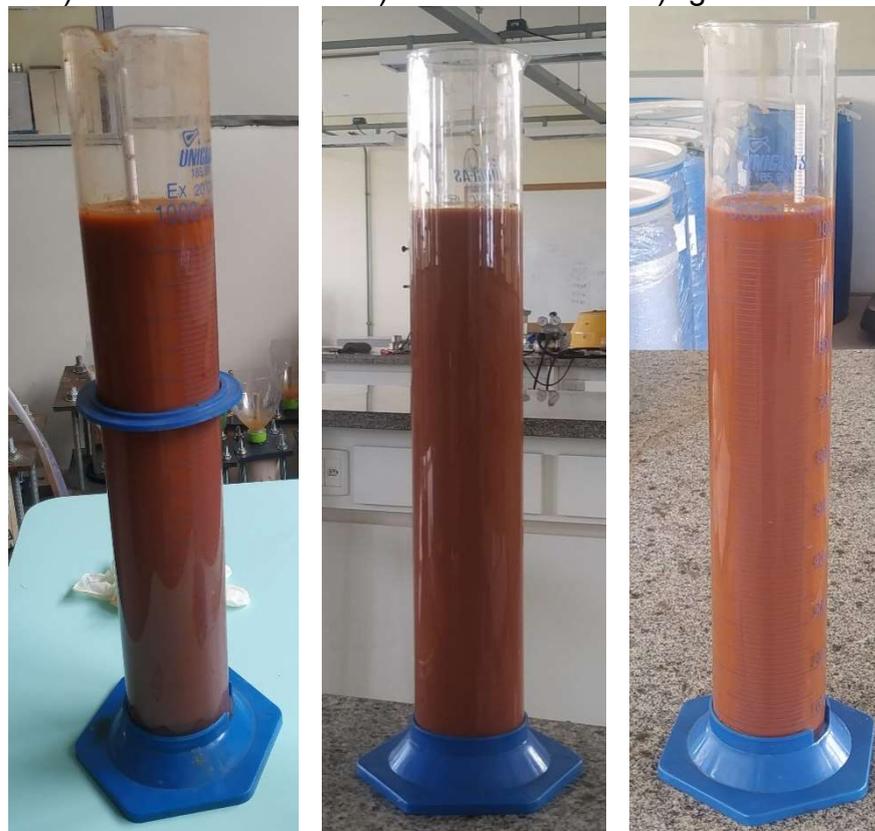
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 16 - Amostra 1 (defloculante), amostra 2 (defloculante), amostra 3 (água destilada)



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 17 - Amostras 1, 2 e 3 durante o ensaio de sedimentação  
1)Defloculante 2)Defloculante 3)Água Destilada



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 18 - Jogo de peneiras para a granulometria fina



Fonte: Elaborado pelo autor.

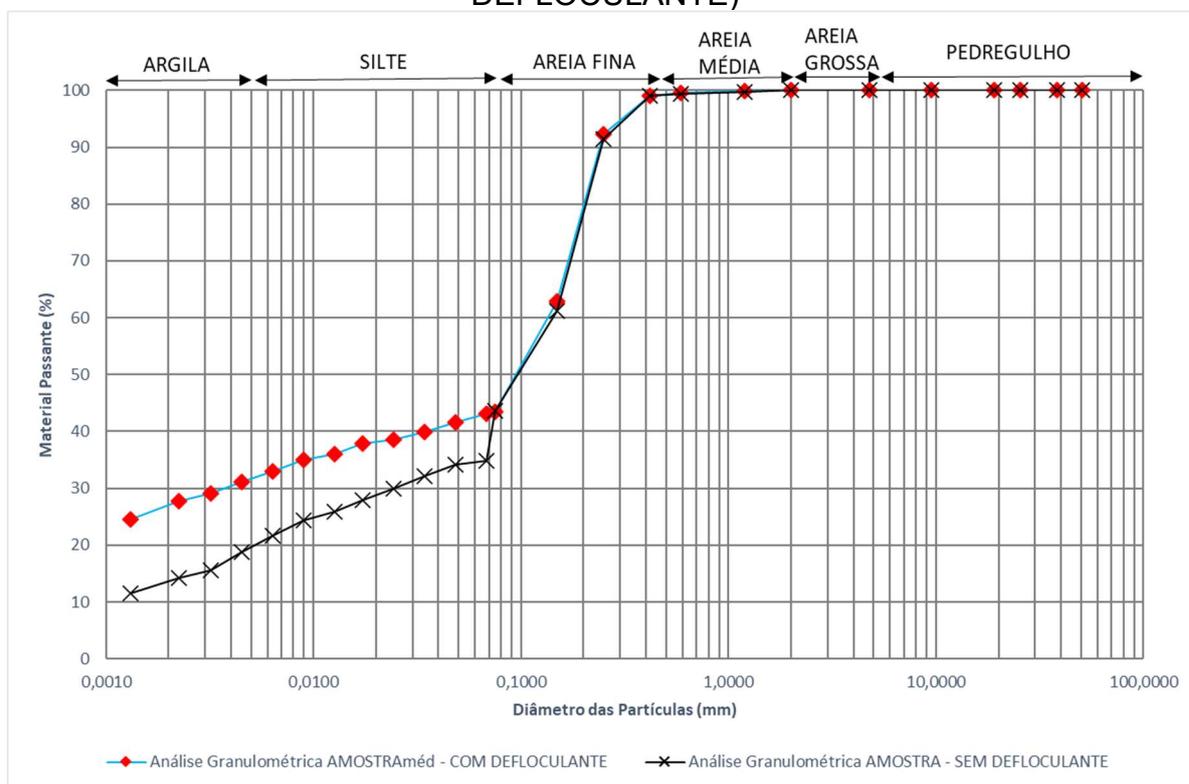
Figura 19 - Solo após o ensaio de sedimentação e peneiramento fino



Fonte: Elaborado pelo autor.

A curva granulométrica foi traçada para o solo puro, sendo este submetido a três análises: duas com a adição de defloculante e uma sem defloculante para o ensaio de sedimentação das partículas e peneiramento fino, conforme Figura 20 que apresenta a curva granulométrica encontrada para as amostras ensaiadas. O peneiramento grosso não foi realizado devido a constatação de que todo o solo estudado foi passante na peneira #2,00mm.

Figura 20 - Curva granulométrica para as amostras com defloculante (AMOSTRAMéd) e sem defloculante com água destilada (AMOSTRA SEM DEFLOCULANTE)



Fonte: Elaborado pelo autor.

De acordo com as curvas plotadas na Figura 20, na qual a “AMOSTRAMéd” é caracterizada pela média dos valores obtidos das amostras 1 e 2 (Figura 17). Foi possível analisar, que as amostras que foram ensaiadas com defloculante possuem semelhanças nas porcentagens de areia média, areia fina, silte e argila. Portanto, conforme o Quadro 3, a partir desses resultados é possível constatar que há uma predominância de areia fina no solo, seguido da fração fina de silte e argila que se somadas ficam em torno de 43,37% das amostras, caracterizando assim uma certa plasticidade ao solo.

No caso da “Amostra – sem defloculante”, o ensaio foi realizado sem defloculante para simular a condição mais próxima da realidade que o solo é encontrado em campo. A partir da curva granulométrica, da Figura 20 e os dados do Quadro 3, foi possível observar que houve uma aglomeração das partículas finas (silte+argila) conforme o esperado, uma vez que a função do defloculante é

proporcionar a desagregação química das partículas finas. No Quadro 3 é apresentado um resumo dos valores encontrados.

Quadro 2 - Análise granulométrica do ensaio de sedimentação e peneiramento fino

Tipo de solo Amostra	Argila (%)	Silte (%)	Areia Fina (%)	Areia Média (%)	Areia Grossa (%)	Pedregulho (%)
Amostraméd (com defloculante)	32,93	10,44	55,67	0,96	-	-
Amostra (sem defloculante)	21,61	22,02	55,48	0,89	-	-

Fonte: Elaborado pelo autor.

### 3.1.3 Massa Específica Aparente dos Grãos

O ensaio de massa específica é determinado pela relação entre a massa total e o volume total de solo, a partir deste é possível determinar o índice de vazios, entre outros índices físicos. A normatização que serviu de suporte para realização deste ensaio foi a DNER-ME 093/94.

O procedimento foi realizado por meio de picnômetros de vidro, estes foram pesados vazios e logo após preenchidos com solo. Logo após foi adicionada a água destilada afim de saturar o solo, utilizando na sequência uma bomba de vácuo para retirar o ar contido nas partículas da amostra, e então foi adicionado ao conjunto água para que fosse pesado o conjunto conforme as Figuras 21 e 22.

Figura 21 - Preparação das amostras com água destilada para o ensaio de massa específica



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 22 - Amostras 1, 2 e 3 com ensaio de massa específica em andamento



Fonte: Elaborado pelo autor.

Por meio da relação entre o peso específico do solo e o peso específico da água foi possível determinar a densidade relativa dos grãos ( $G_s$ ), característica que é associada a natureza mineralógica dos componentes do material de análise. O valor encontrado para essa característica foi de  $2,60 \text{ g/cm}^3$ .

De acordo com Gondim (2009), valores que tangenciam o resultado encontrado tendem a indicar a predominância de minerais secundários, resultantes da fragmentação de rochas pela ação do intemperismo, assim como a presença de minerais mais leves. No entanto, a caracterização mineralógica do solo não é o foco deste estudo, servindo esse resultado apenas como referência para a análise do comportamento do solo em seu estado natural.

### 3.1.4 Índices de Consistência

O ensaio para determinação do limite de liquidez foi executado conforme os procedimentos descritos na NBR 6459/16 – “Solo – Determinação do limite de liquidez”. Na Figura 23 é apresentada a execução deste ensaio com o solo estudado.

Figura 23 - Execução do ensaio de limite de liquidez



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para determinação do limite de plasticidade foi executado o ensaio conforme os procedimentos descritos na NBR 7180/16– “Solo – Determinação do limite de plasticidade”. Na Figura 24 é apresentada a execução deste ensaio com o solo estudado.

Figura 24 - Execução do ensaio de limite de plasticidade



Fonte: Elaborado pelo autor.

O resultado encontrado para o limite de liquidez (LL%) foi de 28%, enquanto o limite de plasticidade (LP%) foi de 18% e o índice de plasticidade (IP) foi de 9.

O índice de plasticidade é geralmente utilizado como indicador da maior ou menor plasticidade de um solo. Logo, quanto maior o teor de argila em um solo, maior o valor do IP e, por consequência, caracterizando um material mais compressivo (IAEG, 1973).

O comportamento do solo em relação a plasticidade, conforme o mesmo autor, pode ser considerado com um solo de plasticidade moderada por possuir um índice de plasticidade de  $7 < IP < 17$ .

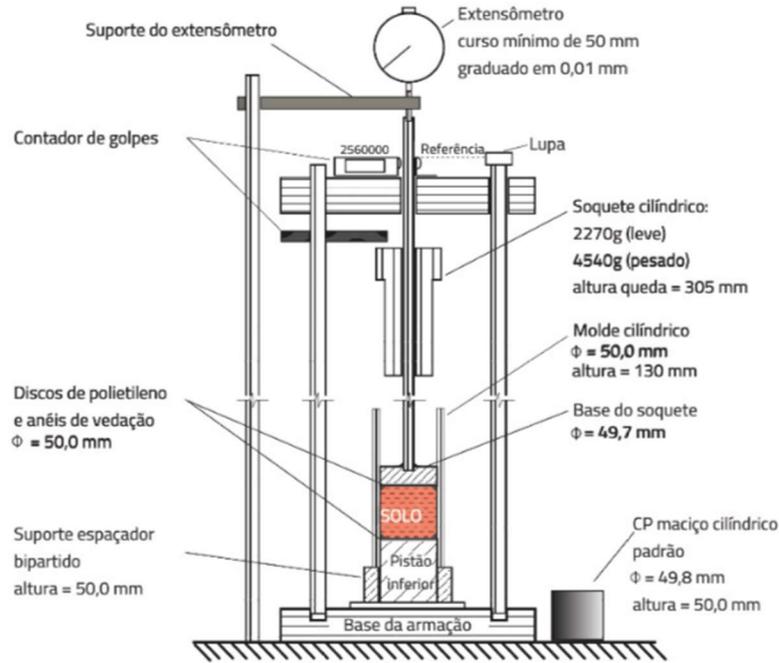
Foi analisado o índice de atividade da argila (IA), sendo este o quociente entre o IP% e a fração de argila. Para essa análise optou-se por usar como parâmetro o valor de granulometria Amostraméd com defloculante, de acordo com a normativa. A partir deste, o resultado para a IA foi 0,30, caracterizando assim uma argila inativa.

Miceli (2006) relacionou os resultados de ensaios de solo-emulsão com os limites de consistência de Atterberg e granulometria (Tabela 2 do item 2.7.3 deste trabalho). Desta forma, o solo analisado fica dentro do limite de LL até 40% e IP de até 18% proposto pelo autor para um comportamento aceitável da mistura solo-emulsão.

### **3.1.5 Compactação Mini-Proctor**

No ensaio de compactação com o Mini-Proctor são obtidos o peso aparente específico seco e a umidade ótima do material, seguindo a instrumentação normativa da NBR 7182/16 – “Solo – Ensaio de compactação” e do DNER – ME 228/94: “Solos – compactação em equipamento miniatura”. A aparelhagem utilizada está descrita na Figura 25 de Villibor e Alves (2015).

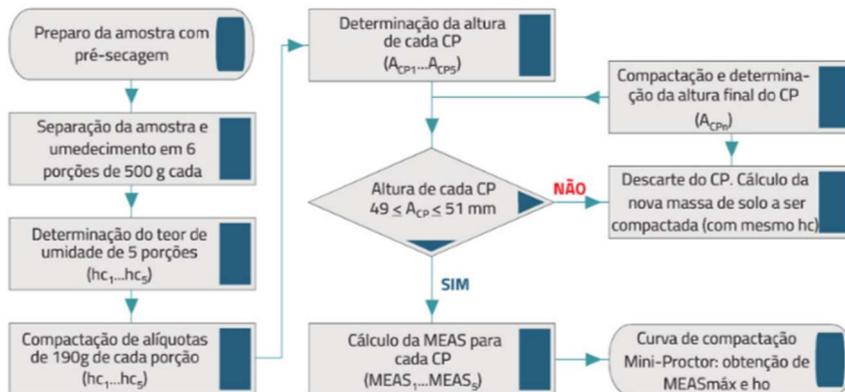
Figura 25 - Aparelhagem específica do ensaio Mini-Proctor



Fonte: NOGAMI E ALVES, pg 432 (2019).

O ensaio foi realizado com a energia intermediária, aplicando 5 golpes de cada lado de um corpo de prova (CP) de 5cm de altura, variando os teores de umidade e determinando para cada um o seu respectivo peso específico aparente. No fluxograma da Figura 26 é exemplificada a sequência de passos adotada em laboratório.

Figura 26 - Fluxograma do ensaio de compactação Mini-Proctor realizado em laboratório



Fonte: NOGAMI E ALVES, pg 433 (2019).

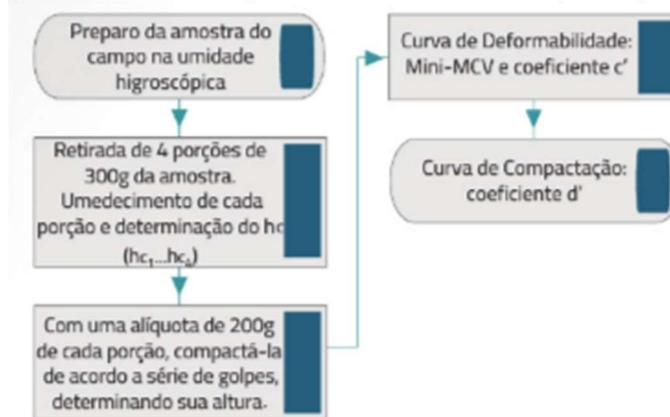
O ensaio foi realizado para o solo puro e para as misturas com 4%, 6% e 8% de emulsão asfáltica com tempo de aeração de 1h e 2h para que as propriedades da mistura e comportamento da emulsão fossem conhecidas e analisadas.

A partir destes valores, foi traçada a curva peso específico aparente seco x teor de umidade, obtendo-se assim o ponto correspondente a umidade ótima ( $W_{ótima}$ ) e a densidade máxima aparente seca. Foram ensaiados 6 CPs para 0%, 4%-1h, 6%-1h, 8%-1h, 4%-2h, 6%-2h e 8%-2h.

### 3.1.6 Classificação MCT (Miniatura, Compactado, Tropical)

A classificação do solo conforme a metodologia MCT foi realizada de acordo com o prescrito na norma DER/SP M196/89 – “Classificação de solos tropicais segundo a metodologia MCT”. Na Figura 27 é apresentado o fluxograma do ensaio.

Figura 27 - Fluxograma de execução do ensaio de compactação Mini-MCV



Fonte: NOGAMI E ALVES, pg 488 (2019).

Neste caso, o ensaio foi realizado apenas com o solo puro para determinar as propriedades esperadas do solo de acordo com a metodologia de classificação MCT, uma vez que uma análise da mistura solo-emulsão seria inviável de ser estudada e classificada corretamente por esse método.

O ensaio consistiu em moldar e compactar no Mini-Proctor com energia intermediária 5 CPs. As amostras foram preparadas previamente sendo:

- Ensaio um CP de 200g na umidade ótima, dois CPs de 200g acima e dois abaixo da umidade ótima conhecida para o solo puro.

Posteriormente foi realizado o ensaio de perda de massa por imersão, no qual para cada CP recém compactado foi desmoldado 1cm para fora do molde e a amostra colocada em imersão em água potável por 24h (Figura 28).

Figura 28 - Amostras em imersão para o ensaio de perda de massa por imersão



Fonte: Elaborado pelo autor.

A partir disso foi verificada a forma com que os grãos de solo iriam se comportar sob esse ambiente. Por fim, após 24h as amostras foram retiradas da água (Figura 29), colocadas por mais 24h na estufa e depois levadas até a balança para medir sua massa.

Figura 29 - Ensaio de perda de massa por imersão após 24h de imersão



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os coeficientes obtidos a partir do ensaio estão dispostos na Tabela 6.

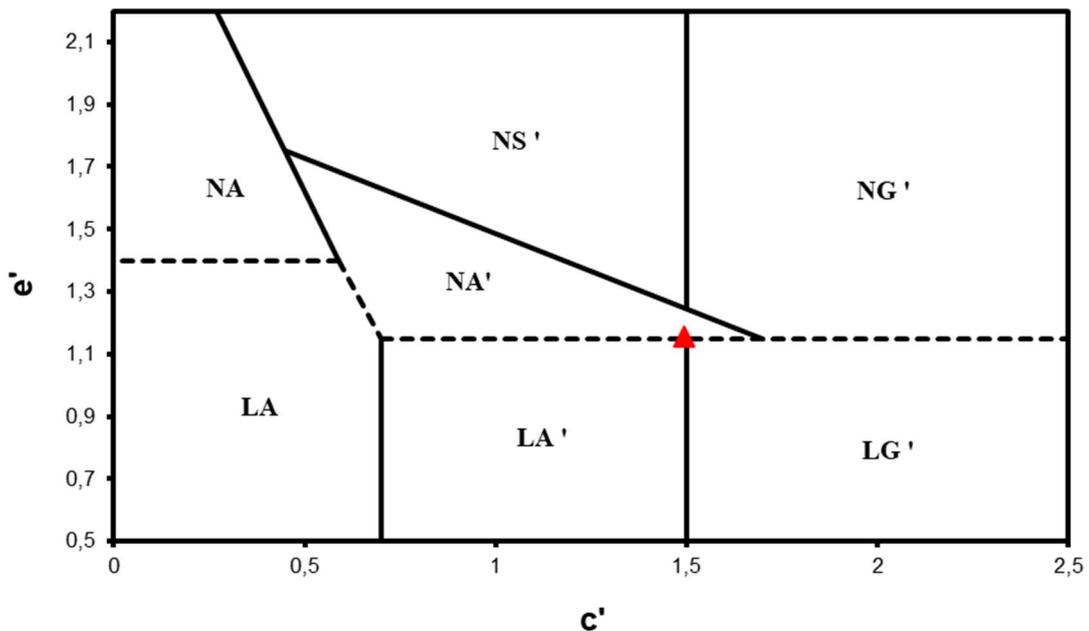
Tabela 6 - Parâmetros encontrados para a classificação MCT

Solo Analisado	Coeficiente Pi (%)	Coeficiente c'	Coeficiente d'	Coeficiente e'	Classificação MCT
	75	1,49	25	1,16	NA'

Fonte: Elaborado pelo autor.

A partir dos coeficientes apresentados na Tabela 6, o gráfico da Figura 30 foi formado para a classificação do solo analisado. O resultado apresentou uma singularidade na amostra coletada, o ponto de determinação para a classificação do solo ficou no limite entre NA', LA', LG'.

Figura 30 - Classificação MCT



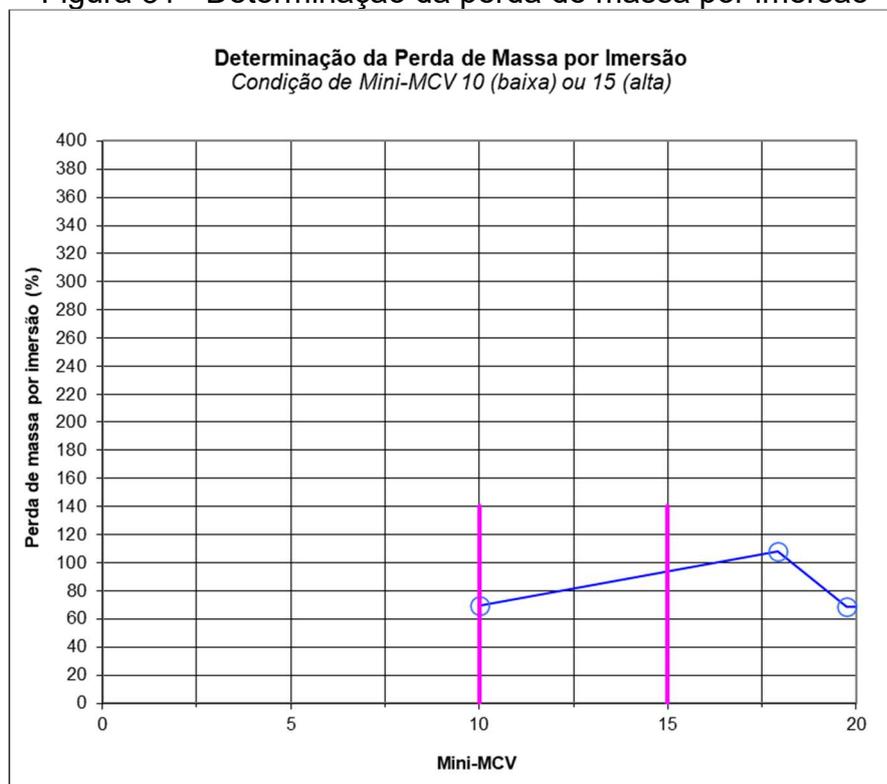
Fonte: Elaborado pelo autor.

De acordo com Nogami e Villibor (1995), o comportamento laterítico de um solo começa a se manifestar quando os parâmetros  $d > 20$  e  $P_i < 100$  ( $e' = 1,15$ ). Os autores definem que o comportamento laterítico e não-laterítico está diretamente ligado ao resultado do ensaio perda de massa por imersão ( $P_i$ ), de forma que os solos saprolíticos (não-lateríticos) em geral tendem a apresentar valores de  $P_i$  nitidamente superiores aos solos de comportamento laterítico. Em relação as amostras, aquelas classificadas como não-lateríticas apresentam valores de  $P_i$  muito superiores às

outras amostras. Por fim, os autores ponderam que o  $P_i$  (%) pode ser utilizado também na análise da erodibilidade do material, sendo a relação de que quanto maior  $P_i$  (%) maior a erodibilidade.

Portanto, dada a importância do parâmetro de  $P_i$  (%) analisado criteriosamente, na Figura 31 é ilustrado o gráfico que foi utilizado para determinar seu valor a partir dos resultados obtidos. Conforme Nogami e Villibor (1995), uma curva levemente retilínea e concavidade para baixo, pode ser considerada como uma característica determinante de solos com comportamento não-laterítico. Logo, a classificação mais adequada é de solo não-laterítico arenoso (NA').

Figura 31 - Determinação da perda de massa por imersão



Fonte: Elaborado pelo autor.

Outro fator analisado a partir do ensaio de perda de massa por imersão foi a erodibilidade do solo no estado puro. Para todos os CPs ensaiados ao sofrerem imersão de 24h em água houve uma perda considerável de material por desagregação dos grãos. Este comportamento é característico de solos com comportamento não laterítico devido a sua composição mineralógica.

### 3.2 Emulsão Asfáltica

A mistura foi realizada com um apenas um tipo de emulsão asfáltica, a fim de correlacionar os dados com a literatura conhecida. A emulsão utilizada é denominada como catiônica de ruptura média (RM-1C), a qual foi enviada pela empresa “cbb Asfaltos” no ano de 2017 e estava armazenada em local adequado em um galão lacrado de 5 litros no laboratório de Geotecnia e Pavimentação da UNIPAMPA – campus Alegrete, conforme a Figura 30.

Figura 32 - Emulsão asfáltica utilizada na mistura solo-emulsão



Fonte: Elaborado pelo autor.

As características da emulsão relacionadas as suas propriedades foram fornecidas pela empresa “cbb Asfaltos” com seu respectivo certificado de qualidade (Anexo 1).

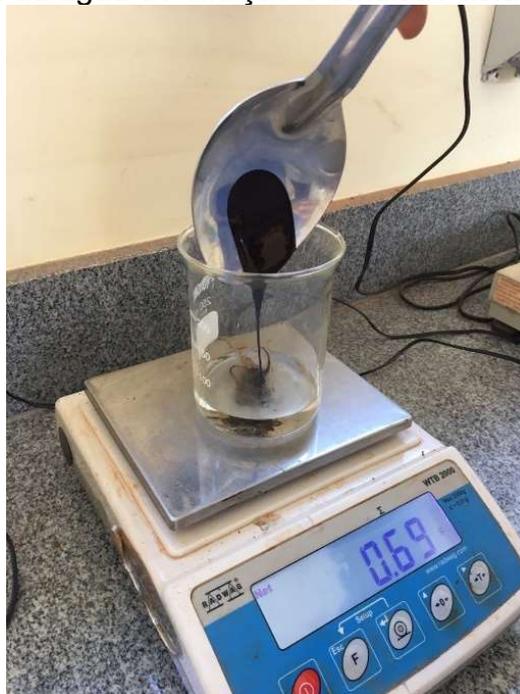
### 3.3 Método de mistura solo-emulsão

O processo de análise da estabilização do solo consiste na mistura do solo, emulsão asfáltica e água. A mistura solo-emulsão foi feita em uma argamassadeira que serviu como misturador mecânico. No entanto, devido ao fato de cada teor de

emulsão analisado apresentar uma trabalhabilidade diferente os seguintes passos foram realizados anteriormente a mistura:

- Calculou-se a umidade do solo previamente (optou-se por não usar amostras com teor de umidade inferior a 4,00% devido ao receio da emulsão romper prematuramente, conforme relatado na bibliografia por Soliz, 2007);
- Calculou-se a quantidade em massa (g) de água a ser adicionada para que o teor de umidade ótima do solo puro fosse atingido (considerou-se 0,5% a mais de umidade para todas as misturas devido a perda de água para o ambiente e perdas na mistura);
- Calculou-se a porcentagem de água presente na emulsão asfáltica RM-1C;
- Calculou-se a quantidade necessária em massa (g) para a água de diluição;
- Em um béquer de 100ml foram misturadas a emulsão asfáltica RM-1C com a água de diluição e a água necessária para atingir a umidade desejada. Foram realizadas misturas de água-emulsão para 4%, 6% e 8% proporcionais a 800g de solo seco (quantidade máxima para que houvesse uma mistura homogênea do material). Na Figura 32 é apresentado o procedimento descrito.

Figura 33 - Mistura da água de diluição e emulsão asfáltica RM - 1C



Fonte: Elaborado pelo autor.

- No misturador mecânico, primeiro foi adicionado o solo e em seguida a mistura água-emulsão com cuidado para que não houvesse perda de material na espátula ou nas paredes do recipiente. A Figura 32 exemplifica a mistura relatada.

Figura 34 - Procedimento de mistura e interação solo-emulsão



Fonte: Elaborado pelo autor.

- Para todos os teores de emulsão o tempo de mistura foi de 3 minutos;
- Posteriormente, o solo-emulsão misturado era removido do recipiente para que houvesse o tempo de aeração de 1h e 2h antes da compactação.

### **3.4 Determinação do teor de projeto de emulsão asfáltica para análise**

De acordo com o citado na bibliografia, por se tratar de um método empírico foi necessário encontrar um teor ótimo de emulsão a ser utilizado como parâmetro de partida. O teor ótimo analisado foi proposto pelo resultado obtido via Excel para a Equação 4, presente no item 2.9 deste trabalho, a qual leva em consideração a granulometria do solo estudado propondo como ideal que haja impermeabilização das partículas do solo sem que ocorra perda de resistência. Portanto, inicialmente foi realizado o ensaio de granulometria por sedimentação (com e sem defloculante) e

posteriormente aplicado o método de dosagem do teor ideal de projeto de emulsão asfáltica.

As duas outras porcentagens analisadas tiveram por pressuposto a validação da Equação 4, levando em consideração a proposta de pavimentação a baixo custo na qual o ideal é o melhor desempenho para a menor porcentagem de emulsão asfáltica acrescentada ao solo.

### **3.5 Resistência a Compressão Simples**

As normas do DNER – ME 201/94 e DNER – ME 202/94, junto a NBR 12024, descrevem o ensaio de resistência a compressão simples (RCS) para amostras de solo-cimento. No entanto, de acordo com Miceli (2006) e Pacheco (2011), desde que seja utilizado o mesmo tamanho de corpo-de-prova e a mesma sequência de análise é possível utilizar o mesmo ensaio para misturas solo-emulsão.

Para a realização do ensaio de RCS foram confeccionados CPs de 10cm de altura x diâmetro 5cm, na proporção 2:1, e compactados no mini-Proctor com energia intermediária, sendo realizados 10 golpes em cada face do CP. Cada teor de emulsão analisado teve 6 CPs divididos em 3 CPs para análise com imersão em água potável por 24h antes do ensaio e 3CPs sem imersão. Portanto, a quantidade de CPs foi para 0% - 6CPs, 4%/1h - 6CPs, 6%/1h – CPs, 8%/1h – 6 CPs, 4%/2h - 6CPs, 6%/2h – CPs e 8%/2h – 6 CPs, para o tempo até o ensaio de 7 e 28 dias. A quantidade de CPs produzidos está disposta no Quadro.

O tempo de cura dos CPs para a realização dos ensaios foi de 7 e 28 dias. Este tempo foi estipulado de forma que houvesse um intervalo para análise inicial do comportamento da mistura frente a adição da emulsão ao solo e a perda de umidade, e, uma idade de cura mais longa na qual fosse possível observar o incremento ou decréscimo de resistência ao longo do tempo frente as mesmas condições. O mesmo parâmetro foi seguido para o solo puro – 0% a fim de analisar se o comportamento da RCS do CP foi efeito da perda de umidade e o quanto foi de fato causa da adição da emulsão asfáltica ao solo. O Quadro 2 apresenta o mapeamento de CPs confeccionados.

Quadro 3 - Mapeamento da quantidade de CPs produzidos

Solo Puro 0%	Nome do CP	Condição de Imersão	Tempo de Aeração	4% - 7 dias	6% - 7 dias	8% - 7 dias	4% - 28 dias	6% - 28 dias	8% - 28 dias	Condição de Imersão
				Nome do CP	Nome do CP	Nome do CP	Nome do CP	Nome do CP	Nome do CP	
7 dias	CP1 4%	c/ imersão	1h	CP1 4%	CP1 6%	CP1 8%	CP1 4%	CP1 6%	CP1 8%	c/ imersão
	CP2 4%	c/ imersão		CP2 4%	CP2 6%	CP2 8%	CP2 4%	CP2 6%	CP2 8%	c/ imersão
	CP3 4%	c/ imersão		CP3 4%	CP3 6%	CP3 8%	CP3 4%	CP3 6%	CP3 8%	c/ imersão
	CP4 4%	s/imersão		CP4 4%	CP4 6%	CP4 8%	CP4 4%	CP4 6%	CP4 8%	s/imersão
	CP5 4%	s/imersão		CP5 4%	CP5 6%	CP5 8%	CP5 4%	CP5 6%	CP5 8%	s/imersão
	CP6 4%	s/imersão		CP6 4%	CP6 6%	CP6 8%	CP6 4%	CP6 6%	CP6 8%	s/imersão
28 dias	CP1 4%	c/ imersão	2h	CP1 4%	CP1 6%	CP1 8%	CP1 4%	CP1 6%	CP1 8%	c/ imersão
	CP2 4%	c/ imersão		CP2 4%	CP2 6%	CP2 8%	CP2 4%	CP2 6%	CP2 8%	c/ imersão
	CP3 4%	c/ imersão		CP3 4%	CP3 6%	CP3 8%	CP3 4%	CP3 6%	CP3 8%	c/ imersão
	CP4 4%	s/imersão		CP4 4%	CP4 6%	CP4 8%	CP4 4%	CP4 6%	CP4 8%	s/imersão
	CP5 4%	s/imersão		CP5 4%	CP5 6%	CP5 8%	CP5 4%	CP5 6%	CP5 8%	s/imersão
	CP6 4%	s/imersão		CP6 4%	CP6 6%	CP6 8%	CP6 4%	CP6 6%	CP6 8%	s/imersão
Quantidade	6 CPs - 7 dias		Quantidade	1h - 36 CPs - 7dias			1h - 36 CPs - 28 dias			
	6 CPs - 28 dias			2h - 36 CPs - 7dias			2h - 36 CPs - 28 dias			
				Total de 72 CPs p/ 7 dias			Total de 72 CPs p/ 28 dias			

Fonte: Elaborado pelo autor.

O procedimento do ensaio consistiu em:

- Realizar a mistura conforme o item 3.4 deste trabalho;
- Aguardar o tempo de aeração de 1h e 2h, deixando o solo em um recipiente com uma toalha umedecida em cima para que a mistura não perdesse umidade (Figura 35);

Figura 35 - Amostras aguardando o tempo de aeração



Fonte: Elaborado pelo autor.

- Compactar cada CP de dimensão 2:1 no Mini-Proctor com energia intermediária, sendo 10 golpes em cada face;
- Desmoldar o CP, com o auxílio de um compressor e bomba (Figura 36) para preservar a integridade da amostra a ser ensaiada futuramente.

Figura 36 - Desmoldagem do CP com compressor e bomba



Fonte: Elaborado pelo autor.

- Conferir com um paquímetro se a proporção 2:1 (10cm de altura x diâmetro 5cm) foi atendida, mantendo assim o parâmetro do ensaio;
- Envolver o CP em plástico filme e guardar em sala com climatização controlada a 21°C para tentar preservar a umidade atingida (Figura 35).

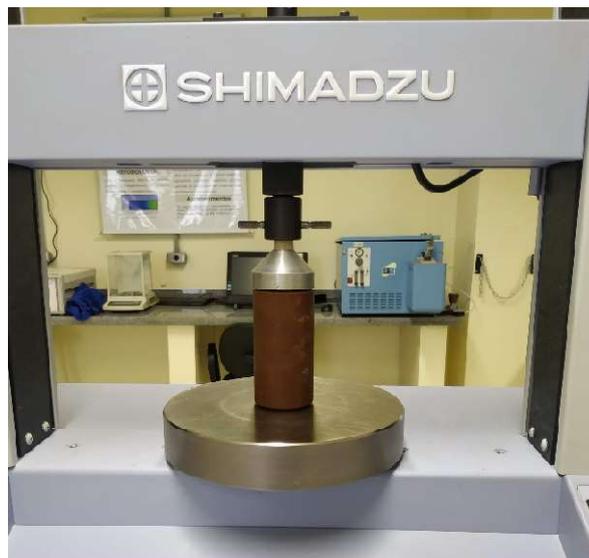
Figura 37 - CPs compactados e embalados para preservar a umidade ensaiada



Fonte: Elaborado pelo autor.

- Para todos os CPs foi retirado três amostras de aproximadamente 30g, colocadas em cápsulas, pesadas e levadas até a estufa na temperatura de 100°C a 105°C para que a umidade fosse conferida após a mistura e o tempo de aeração transcorrido;
- O ensaio foi realizado no equipamento Shimadzu, Figura 36, com velocidade de 1mm/min.

Figura 38 - Ensaio de Resistência Compressão Simples



Fonte: Elaborado pelo autor.

## **4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS**

Os resultados obtidos experimentalmente em laboratório a partir dos ensaios de caracterização do solo, classificação e análise mecânica do comportamento da mistura solo-emulsão são apresentados nesse capítulo.

Inicialmente, por meio de ensaios com o solo puro buscou-se analisar de uma forma preliminar os parâmetros existentes no material que poderiam sofrer influência da mistura com a emulsão. Em seguida, para o estudo definitivo com a mistura solo-emulsão foi analisado seu comportamento perante a curva de compactação afim de encontrar o teor de umidade ótimo para a mistura dos materiais. Desta forma, conhecidos tais características de material na forma pura e da mistura, partiu-se para o estudo da resistência a compressão simples. Portanto, os resultados estão dispostos de forma a seguir a sequência dos ensaios realizados.

No entanto, devido ao fato de que para o estudo solo-emulsão ainda não exista um método comum de dosagem e as análises sejam restritas essencialmente ao tipo de solo estudado, levando em consideração suas influências mineralógicas locais entre outros fatores que interagem com a mistura, optou-se por apresentar análises que buscam preferencialmente embasamento teórico de outros autores citados nesta bibliografia afim de correlacionar dados que possam vir a ser característicos para esse tipo de estudo.

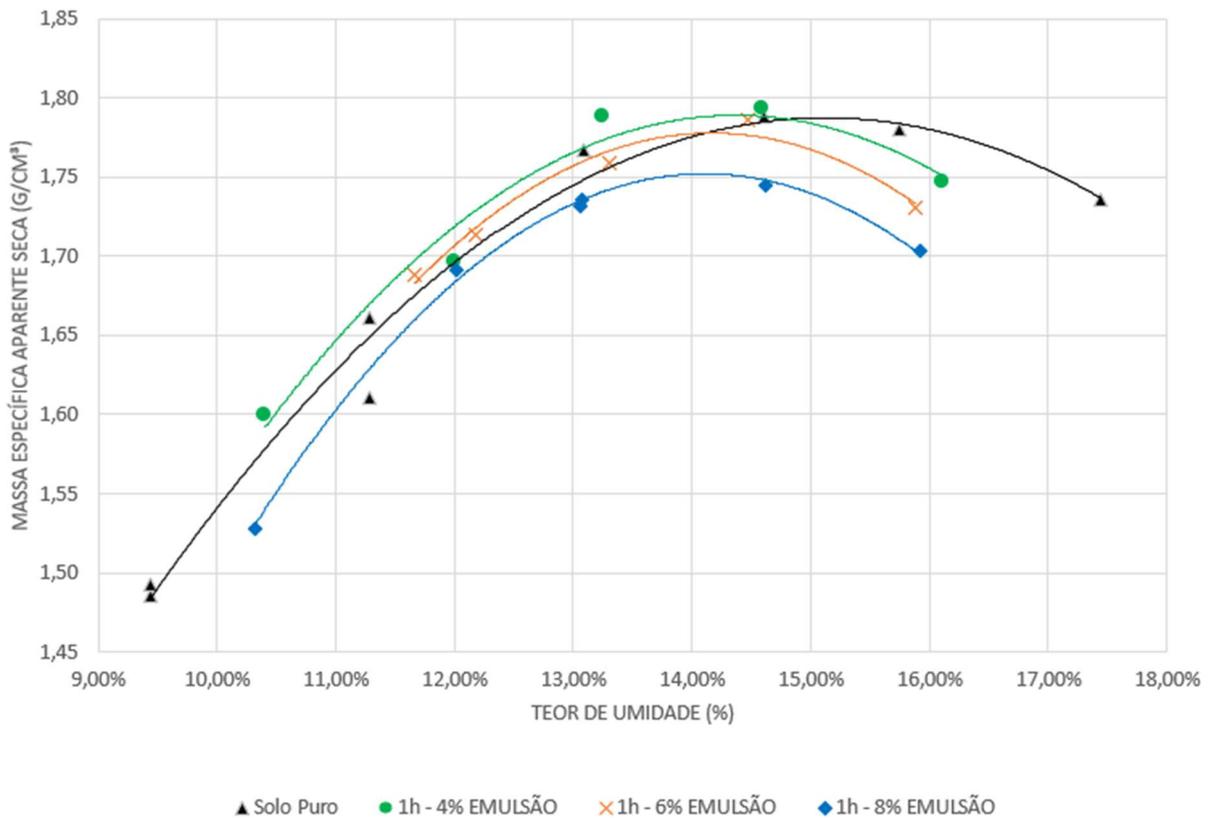
A caracterização para o solo puro foi realizada por meio da granulometria, limites de consistência, compactação e classificação MCT, apresentados no capítulo 3 deste trabalho. Já para a mistura solo-emulsão foram conhecidos os parâmetros de compactação (umidade ótima e massa específica aparente seca máxima) para todos os teores de 4%, 6% e 8%.

### **4.1 Compactação Mini-Proctor**

A compactação com o mini-Proctor foi realizada para encontrar a umidade ótima ( $W_{ótima}$ ) e massa específica aparente seca máxima ( $MEAS_{máx}$ ) para o solo no estado puro e para as misturas de 4%, 6% e 8%.

Na Figura 39 é apresentado o gráfico das curvas de compactação para o tempo de aeração de 1h com os respectivos valores encontrados para a análise.

Figura 39 - Curvas de compactação para 0%, 4%, 6% e 8% para 1h de aeração

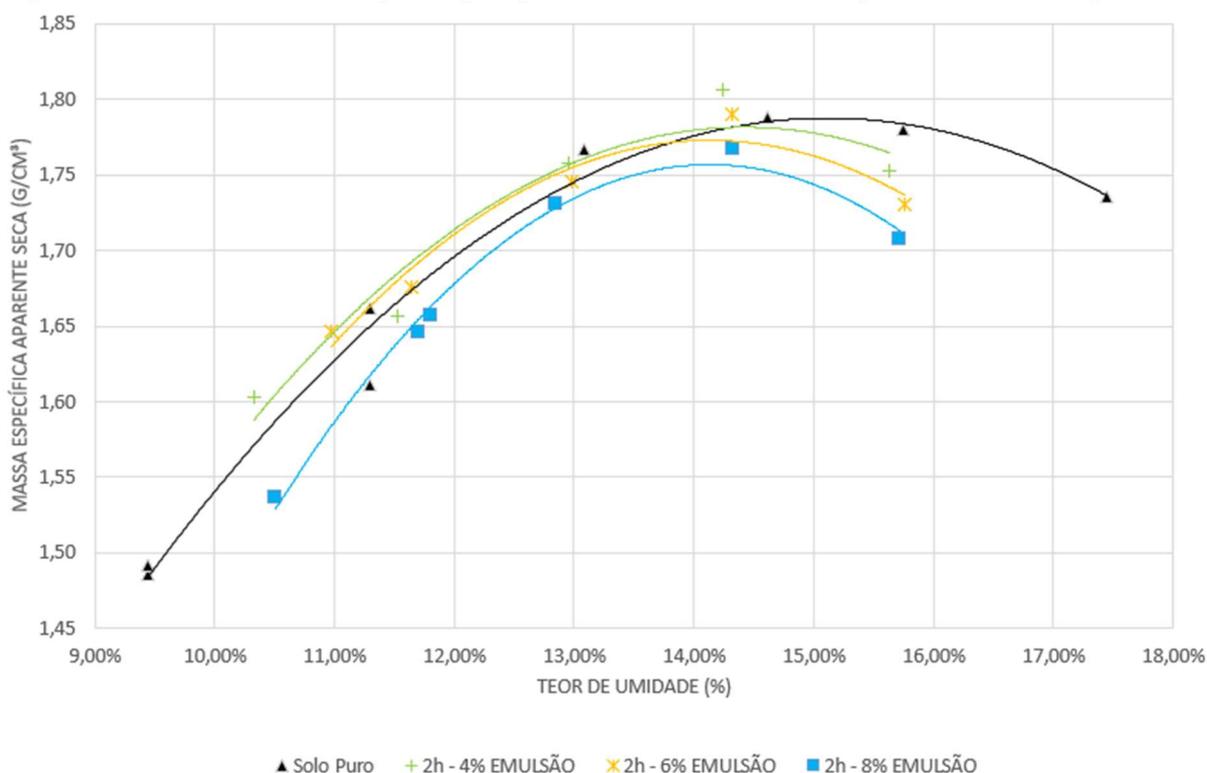


Fonte: Elaborado pelo autor.

A comparação entre os valores encontrados para o solo puro e a mistura solo-emulsão com tempo de aeração de 1h resultou em uma diminuição em sua maioria da  $W_{otima}$  e  $MEAS_{máx}$  das porcentagens estudadas em relação ao solo puro.

Na Figura 40 é apresentado o gráfico das curvas de compactação para o tempo de aeração de 2h com os respectivos valores encontrados para a análise.

Figura 40 - Curvas de compactação para 0%, 4%, 6% e 8% para 2h de aeração



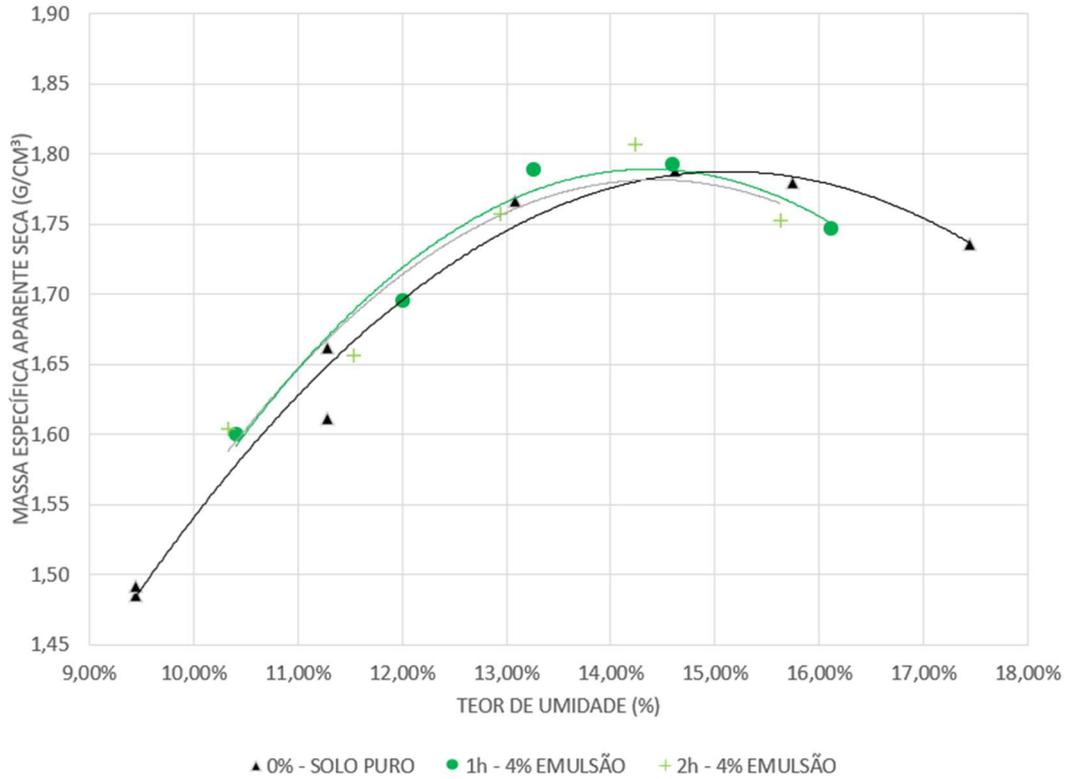
Fonte: Elaborado pelo autor.

A comparação entre os valores encontrados para o solo puro e a mistura solo-emulsão com tempo de aeração de 2h resultou em uma diminuição em sua maioria da  $W_{otima}$  e  $MEAS_{máx}$  das porcentagens estudadas em relação ao solo puro.

A partir dos gráficos da Figuras 39 e 40, nas quais é apresentado um comparativo das curvas de compactação de todos os CPs (solo puro + solo/emulsão), é possível observar um pequeno deslocamento no ramo úmido à medida que o teor de emulsão asfáltica é aumentado. De acordo com Jacintho (2005), essa alteração na curva pode estar ligada a alteração da natureza eletroquímica do meio e a mudança de viscosidade do fluido. No caso das partículas de argila presentes no solo, essas diferenças podem causar uma alteração nas forças de repulsão das partículas sob essa condição em certos arranjos estruturais.

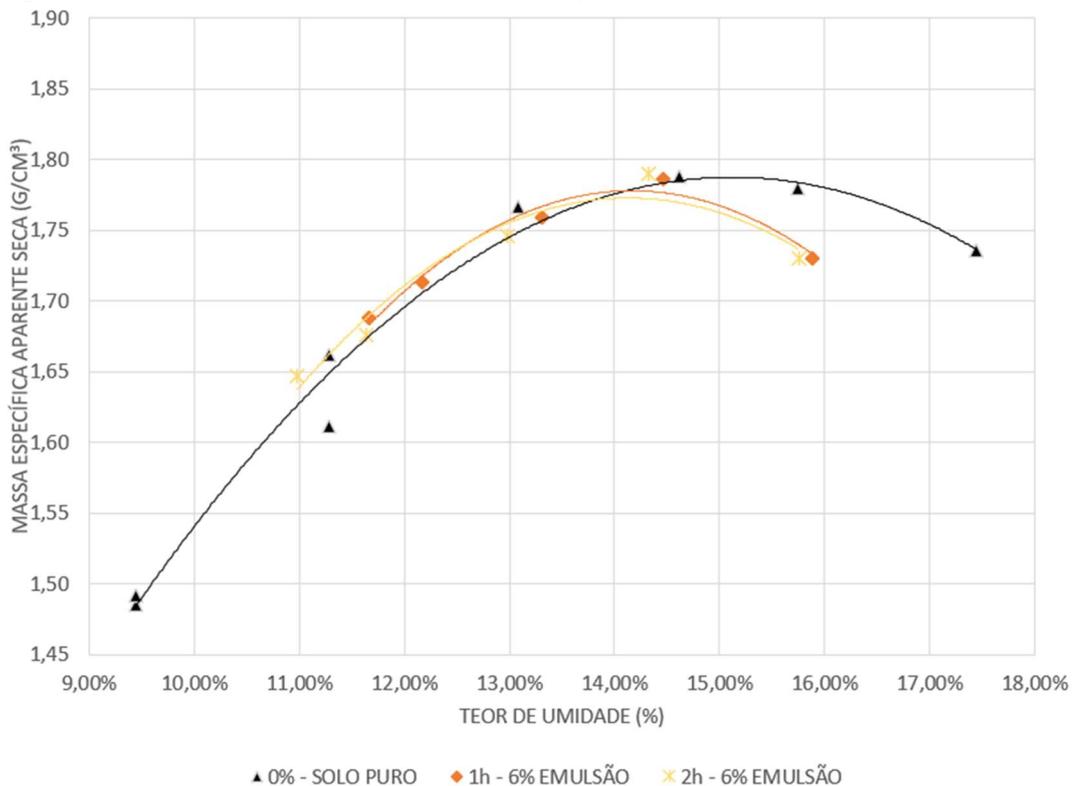
Nos gráficos presentes nas Figuras de 41 a 43 são apresentados os valores encontrados para todos os ensaios separadamente, desta forma é possível visualizar com maior clareza o comportamento da mistura solo-emulsão com o tempo de aeração de 1h e 2h e suas respectivas  $W_{otima}$  (%) e  $MEAS_{máx}$ .

Figura 41 - Wotima e MEASmáx do solo puro 0% x 4% de emulsão RM – 1C



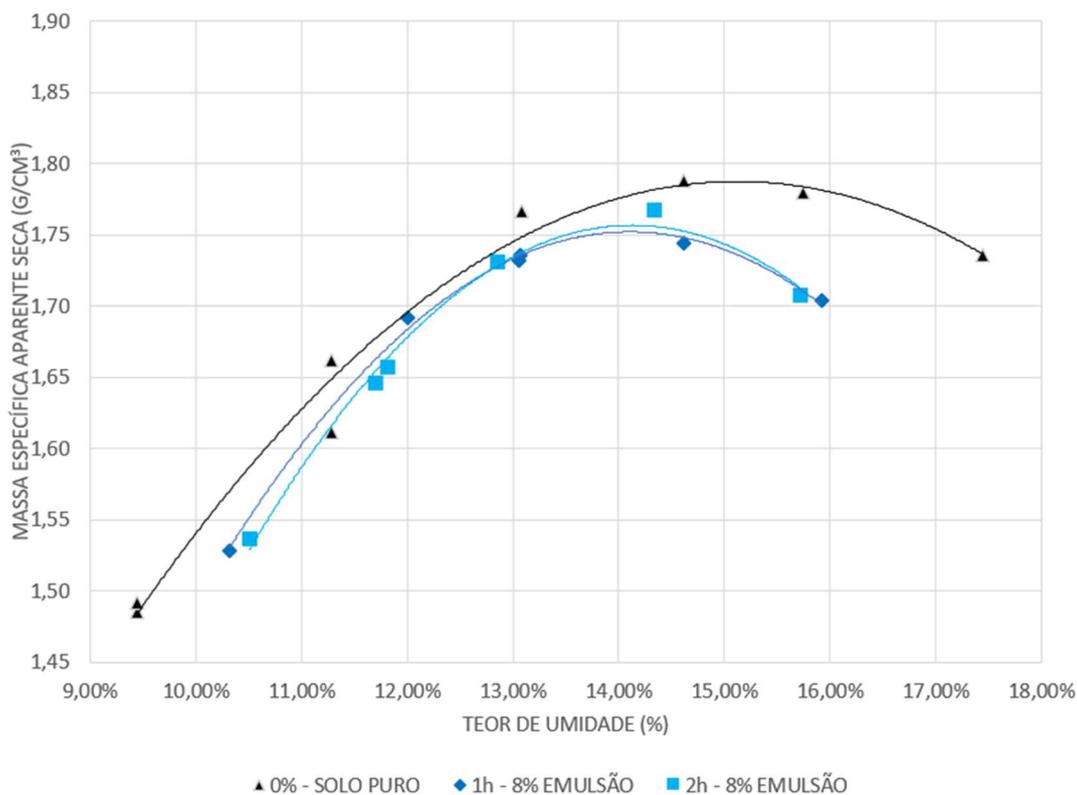
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 42 - Wotima e MEASmáx do solo puro 0% x 6% de emulsão RM – 1C



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 43 - Wotima e MEASmáx do solo puro 0% x 8% de emulsão RM – 1C



Fonte: Elaborado pelo autor.

Foi possível analisar com base no resultado encontrado para o solo puro que o tempo de aeração de 1h para todas as porcentagens têm uma diminuição tanto na Wotima (%) quanto na MEASmáx. Enquanto para o tempo de aeração de 2h os valores se mantiveram acima dos valores de 1h, mas abaixo da Wotima (%) e MEASmáx do solo puro para quase todas as misturas. No entanto, para a mistura de 4% com tempo de aeração de 2h foi possível observar que houve uma diminuição da Wotima(%) e um aumento da MEASmáx.

A faixa de variação da Wotima (%) e MEASmáx foi constante para todos os CPs ensaiados, sendo menor que  $\pm 1\%$ . Jacintho (2005) avalia que curvas de compactação abertas, como as apresentadas, tendem a apresentar solos com comportamento não-laterítico, uma vez que as variações na umidade resultam em pequenas variações na massa específica aparente seca.

A redução na MEASmáx para a mistura solo-emulsão foi encontrada pelos autores Inglês e Metacalf (1972), Ferreira (1980) e Gondim (2009), os quais atribuem esse comportamento ao menor peso específico da emulsão asfáltica que passa a

fazer parte da mistura, até certo momento atuando como aglutinante, favorecendo a compactação.

#### 4.2 Determinação do Teor de Projeto de Emulsão Asfáltica

O teor de projeto foi definido a partir do ensaio de granulometria do solo, levando em consideração as três amostras ensaiadas para que houvesse um comparativo entre os valores encontrados. Os valores encontrados foram calculados a partir do método disposto no item 2.9 deste trabalho e os resultados obtidos podem ser observado na Tabela 7.

Tabela 7 - Resultados obtidos no processo do cálculo do teor de asfalto

<b>Amostraméd (com defloculante)</b>	<b>Amostra (sem defloculante)</b>
Fórmula de Kézdi	Fórmula de Kézdi
3,39	4,58
Fórmula de Kézdi SIMPLIFICADA	Fórmula de Kézdi SIMPLIFICADA
3,96	4,81
Fórmula de Vogt	Fórmula de Vogt
33,08	50,75
Fórmula de Duriez	Fórmula de Duriez
3,01	3,29

Fonte: Elaborado pelo autor.

O cálculo do teor de asfalto (%) foi a partir da fórmula de Duriez foi convertido em EAP. Desta forma, a Amostraméd com defloculante de 3,01% proporcionou um valor de emulsão um pouco inferior a 4%. Já para o cálculo utilizando o teor de asfalto da amostra sem defloculante de 3,29% ocasionou em um teor de asfalto de aproximadamente 4%.

No entanto, devido à dificuldade de trabalhabilidade de mistura para teores baixos, as perdas de material durante a mistura solo-emulsão e aos parâmetros comparativos com a literatura nos quais os autores usam porcentagens exatas, optou-se por usar como teor ideal de projeto para análise a porcentagem de 4% de emulsão asfáltica.

### **4.3 Resistência a Compressão Simples (RCS)**

O ensaio de resistência a compressão simples (RCS) foi realizado para o solo no estado puro e para as misturas com 4%, 6% e 8% de emulsão asfáltica.

Existe um consenso na literatura de que é necessário haver um tempo de cura entre a moldagem e os ensaios aos quais os corpos-de-prova serão submetidos. Dentro desse contexto, dois aspectos foram explorados: 1) a influência da perda de umidade na resistência, de forma a separar o ganho de resistência por perda natural de umidade e apenas pelo acréscimo de emulsão ao solo; 2) o comportamento do solo puro e a mistura solo-emulsão após a cura quando há imersão em água pelo período de 24h.

Os corpos-de-prova foram ensaiados com tempo de cura de 7 e 28 dias, com e sem imersão. O ensaio sem imersão para o solo puro somente com tempo de cura e a mistura solo-emulsão teve ainda o critério de tempo de aeração de 1h e 2h antes da compactação e posterior tempo de cura antes do ensaio aos 7 e 28 dias. Já as condições de ensaio para os corpos-de-prova com imersão seguiram os mesmos critérios, no entanto 24h antes do ensaio estes foram submetidos a imersão em água e retirados 1h antes do ensaio para secagem. O solo puro também foi submetido as mesmas condições de imersão por 24h e secagem de 1h pré-ensaio.

Todos os corpos-de-prova tiveram sua umidade de compactação ( $W_{compact}$ ) medida antes de compactar e depois novamente medida após os ensaios aos 7 e 28 dias como umidade residual ( $W_{res}$ ). Desta forma, a partir desses dados foi possível encontrar um parâmetro de análise uma vez que a umidade residual se manteve em uma faixa de variação estável para todos os corpos-de-prova.

Portanto, para fins comparativos foi utilizado o valor médio da resistência a compressão simples ( $RCS_{méd}$ ) para cada teor de emulsão e comparado com o valor obtido para o solo sem emulsão asfáltica.

#### **4.3.1 Resistência a Compressão Simples Solo Puro**

O comportamento do solo puro frente ao ensaio de RCS foi estudado como parâmetro de partida para análise comparativa. Os resultados obtidos estão dispostos no Tabela 8 para 7 dias e no Tabela 9 para 28 dias.

Tabela 8 - Resultados para o ensaio de RCS solo puro 0% 7 dias

0% 7 DIAS								RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO SIMPLES (RCS)		
Tempo de Cura	Nome do CP	Diâmetro (cm)	Volume (cm <sup>3</sup> )	Altura do CP (cm)	Wcompac	Imersão (24h na água)	Wres	Desloc. (mm)	RCS (kPa)	RCSméd (kPa)
7 dias	CP1 0%	5,04	199,50	10,25	14,41%	NÃO	13,46%	2,01	394,68	414,10
	CP2 0%	5,04	199,50	10,22	14,41%	NÃO	13,46%	2,22	413,98	
	CP3 0%	5,04	199,50	10,18	14,41%	NÃO	13,36%	1,85	417,04	
	CP4 0%	5,04	199,50	10,05	14,41%	NÃO	13,54%	2,65	429,90	
	CP5 0%	5,04	199,50	10,15	14,41%	NÃO	13,51%	2,02	414,48	
	CP6 0%	5,04	199,50	10	14,41%	NÃO	13,42%	2,15	414,52	

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 9 - Resultados para o ensaio de RCS solo puro 0% 28 dias

0% 28 DIAS								RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO SIMPLES (RCS)		
Tempo de Cura	Nome do CP	Diâmetro (cm)	Volume (cm <sup>3</sup> )	Altura do CP (cm)	Wcompac	Imersão (24h na água)	Wres	Desloc. (mm)	RCS (kPa)	RCSméd (kPa)
28 dias	CP1 0%	5,04	199,50	10,05	14,57%	NÃO	10,31%	3,95	2506,42	2000,54
	CP2 0%	5,04	199,50	10,08	14,57%	NÃO	10,55%	3,79	2225,91	
	CP3 0%	5,04	199,50	10	14,57%	NÃO	11,04%	3,67	1903,38	
	CP4 0%	5,04	199,50	10,2	14,57%	NÃO	10,86%	2,94	1895,65	
	CP5 0%	5,04	199,50	10,2	14,57%	NÃO	11,28%	3,32	1470,07	
	CP6 0%	5,04	199,50	10	14,57%	NÃO	11,03%	3,53	2001,79	

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os CPs de solo puro com imersão não suportaram o esforço do ensaio e por isso foram considerados sem valor. Já para o ensaio de RCS sem imersão foram ensaiados 6 CPs, sendo três a mais que a quantidade pré-determinada devido a divergência de resultados em função da perda de umidade e aumento de resistência principalmente para porcentagens de Wres abaixo de 11%. Os resultados encontrados para o ensaio de RCS para o solo puro sem imersão caracterizam essencialmente a importância do processo de cura no ganho de resistência. Foi possível observar um ganho de 383,1% no período entre 7 e 28 dias.

O deslocamento apresentado nas Tabelas 8 e 9 está relacionado ao comportamento do solo puro sem imersão em relação a tensão x deformação. Foi possível observar que o deslocamento máximo ocorreu para a maior carga aplicada e que o deslocamento foi proporcionalmente maior para o tempo maior de cura. Esse

comportamento para o solo puro sem imersão no ensaio de RCS está associado a característica de solos finos em geral, nos quais há plasticidade suficiente para que ocorra uma preparação sem alteração considerável ao volume, visto que há o remanejo das partículas finas e o preenchimento dos vazios até um ponto máximo no qual há ruptura do CP. No entanto, essa condição torna o solo bastante dependente da interação controlada de solo-água.

#### 4.3.2 Resistência a Compressão Simples Solo-Emulsão

A mistura solo-emulsão foi analisada para os tempos de aeração de 1h e 2h nos tempos de cura de 7 e 28 dias. O comportamento do solo com a adição da emulsão teve um incremento de resistência significativo para todos os teores analisados para os CPs com imersão e sem imersão.

Conforme as Tabelas de 10 a 15 dispostos foi possível observar a influência da emulsão no que tange o acréscimo de resistência e o deslocamento em relação ao solo puro.

Tabela 10 - Resultados para o ensaio de RCS solo-emulsão 4% 7 dias

4% 7 DIAS								RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO SIMPLES (RCS)		
Tempo de Cura	Nome do CP	Diâmetro (cm)	Volume (cm <sup>3</sup> )	Altura do CP (cm)	Wcompac	Imersão (24h na água)	Wres	Desloc. (mm)	RCS (kPa)	RCSméd (kPa)
1h	CP1 4%	5,04	199,50	9,66	-	SIM	13,92%	3,25	168,73	142,68
	CP2 4%	5,04	199,50	9,73	-	SIM	14,75%	3,84	164,80	
	CP3 4%	5,04	199,50	10	-	SIM	14,10%	3,24	94,50	
	CP4 4%	5,04	199,50	9,8	-	NÃO	11,16%	3,25	708,63	694,38
	CP5 4%	5,04	199,50	9,9	-	NÃO	11,94%	4,50	680,13	
	CP6 4%	5,04	199,50	9,75	-	NÃO	11,36%	3,87	694,38	
2h	CP1 4%	5,04	199,50	9,89	-	SIM	13,92%	10,13	145,99	198,35
	CP2 4%	5,04	199,50	9,9	-	SIM	14,10%	7,91	145,72	
	CP3 4%	5,04	199,50	10	-	SIM	14,75%	3,91	303,33	
	CP4 4%	5,04	199,50	10	-	NÃO	11,68%	3,79	1198,75	1243,55
	CP5 4%	5,04	199,50	10,01	-	NÃO	11,46%	4,18	1355,53	
	CP6 4%	5,04	199,50	9,89	-	NÃO	11,68%	3,80	1176,38	

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 11 - Resultados para o ensaio de RCS solo-emulsão 6% 7 dias

6% 7 DIAS								RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO SIMPLES (RCS)		
Tempo de Cura	Nome do CP	Diâmetro (cm)	Volume (cm <sup>3</sup> )	Altura do CP (cm)	Wcompac	Imersão (24h na água)	Wres	Desloc. (mm)	RCS (kPa)	RCSméd (kPa)
1h	CP1 6%	5,04	199,50	10,09	13,74%	SIM	14,73%	4,66	120,40	121,82
	CP2 6%	5,04	199,50	9,95	13,74%	SIM	14,52%	5,66	171,69	
	CP3 6%	5,04	199,50	10,18	13,81%	SIM	13,52%	4,71	73,37	
	CP4 6%	5,04	199,50	10	13,81%	NÃO	10,87%	4,38	1113,72	973,13
	CP5 6%	5,04	199,50	10	15,00%	NÃO	11,96%	6,21	902,06	
	CP6 6%	5,04	199,50	10	15,00%	NÃO	12,20%	5,94	903,62	
2h	CP1 6%	5,04	199,50	10,1	14,74%	SIM	13,67%	6,48	241,79	229,32
	CP2 6%	5,04	199,50	9,93	14,74%	SIM	14,19%	4,25	233,74	
	CP3 6%	5,04	199,50	10,02	14,89%	SIM	14,43%	3,74	212,43	
	CP4 6%	5,04	199,50	10	14,89%	NÃO	12,75%	2,38	526,36	637,25
	CP5 6%	5,04	199,50	9,83	14,72%	NÃO	13,29%	8,71	731,90	
	CP6 6%	5,04	199,50	10	14,72%	NÃO	12,94%	7,82	653,49	

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 12 - Resultados para o ensaio de RCS solo-emulsão 8% 7 dias

8% 7 DIAS								RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO SIMPLES (RCS)		
Tempo de Cura	Nome do CP	Diâmetro (cm)	Volume (cm <sup>3</sup> )	Altura do CP (cm)	Wcompac	Imersão (24h na água)	Wres	Desloc. (mm)	RCS (kPa)	RCSméd (kPa)
1h	CP1 8%	5,04	199,50	10,01	14,43%	NÃO	11,89%	4,71	623,06	562,50
	CP2 8%	5,04	199,50	10	14,43%	NÃO	12,82%	7,20	450,82	
	CP3 8%	5,04	199,50	10,02	14,16%	NÃO	11,49%	5,27	613,61	
	CP4 8%	5,04	199,50	9,47	13,12%	SIM	13,50%	7,80	270,46	239,19
	CP5 8%	5,04	199,50	9,8	13,12%	SIM	13,20%	5,54	242,60	
	CP6 8%	5,04	199,50	10	13,12%	SIM	13,42%	4,82	204,51	
2h	CP1 8%	5,04	199,50	10,02	14,65%	NÃO	11,95%	5,10	729,34	528,33
	CP2 8%	5,04	199,50	10	14,65%	NÃO	14,70%	2,70	378,95	
	CP3 8%	5,04	199,50	10,04	13,72%	NÃO	12,44%	4,84	476,69	
	CP4 8%	5,04	199,50	10	13,72%	SIM	13,46%	6,08	201,03	187,83
	CP5 8%	5,04	199,50	10,1	13,89%	SIM	14,15%	6,28	169,42	
	CP6 8%	5,04	199,50	10,05	13,89%	SIM	13,67%	6,02	193,03	

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 13 - Resultados para o ensaio de RCS solo-emulsão 4% 28 dias

4% 28 DIAS								RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO SIMPLES (RCS)		
Tempo de Cura	Nome do CP	Diâmetro (cm)	Volume (cm <sup>3</sup> )	Altura do CP (cm)	Wcompac	Imersão (24h na água)	Wres	Desloc. (mm)	RCS (kPa)	RCSméd (kPa)
1h	CP1 4%	5,04	199,50	9,85	15,10%	SIM	13,80%	3,73	187,07	163,27
	CP2 4%	5,04	199,50	9,8	15,10%	SIM	14,76%	4,37	139,46	
	CP3 4%	5,04	199,50	9,9	15,46%	SIM	13,81%	4,93	163,27	
	CP4 4%	5,04	199,50	9,8	15,46%	NÃO	9,26%	6,07	2615,59	2416,09
	CP5 4%	5,04	199,50	10	15,35%	NÃO	9,42%	2,89	2125,83	
	CP6 4%	5,04	199,50	10	15,35%	NÃO	8,77%	4,88	2506,87	
2h	CP1 4%	5,04	199,50	9,89	15,09%	SIM	13,42%	6,65	224,35	203,96
	CP2 4%	5,04	199,50	9,8	15,09%	SIM	14,70%	5,75	145,27	
	CP3 4%	5,04	199,50	9,8	15,11%	SIM	13,47%	6,41	242,24	
	CP4 4%	5,04	199,50	10	15,11%	NÃO	9,36%	5,91	2503,36	2516,98
	CP5 4%	5,04	199,50	9,95	14,77%	NÃO	9,12%	3,89	2397,95	
	CP6 4%	5,04	199,50	9,9	14,77%	NÃO	8,74%	4,26	2649,63	

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 14 - Resultados para o ensaio de RCS solo-emulsão 6% 28 dias

6% 28 DIAS								RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO SIMPLES (RCS)		
Tempo de Cura	Nome do CP	Diâmetro (cm)	Volume (cm <sup>3</sup> )	Altura do CP (cm)	Wcompac	Imersão (24h na água)	Wres	Desloc. (mm)	RCS (kPa)	RCSméd (kPa)
1h	CP1 6%	5,04	199,50	9,83	14,16%	SIM	14,00%	4,96	100,78	105,95
	CP2 6%	5,04	199,50	9,86	14,16%	SIM	13,61%	3,83	107,28	
	CP3 6%	5,04	199,50	10,1	14,04%	SIM	13,99%	2,82	109,78	
	CP4 6%	5,04	199,50	10	14,04%	NÃO	8,65%	3,14	2006,78	1905,86
	CP5 6%	5,04	199,50	9,9	14,64%	NÃO	8,66%	3,61	1897,91	
	CP6 6%	5,04	199,50	9,9	14,64%	NÃO	9,02%	3,63	1812,90	
2h	CP1 6%	5,04	199,50	10	14,32%	SIM	16,34%	2,92	71,69	90,95
	CP2 6%	5,04	199,50	9,9	14,32%	SIM	13,67%	3,40	103,88	
	CP3 6%	5,04	199,50	9,9	14,46%	SIM	13,94%	3,96	97,27	
	CP4 6%	5,04	199,50	9,9	14,46%	NÃO	8,75%	3,14	1778,86	1850,31
	CP5 6%	5,04	199,50	9,93	14,43%	NÃO	7,83%	2,42	2071,39	
	CP6 6%	5,04	199,50	9,94	14,43%	NÃO	8,93%	2,93	1700,67	

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 15 - Resultados para o ensaio de RCS solo-emulsão 8% 28 dias

8% 28 DIAS								RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO SIMPLES (RCS)		
Tempo de Cura	Nome do CP	Diâmetro (cm)	Volume (cm <sup>3</sup> )	Altura do CP (cm)	Wcompac	Imersão (24h na água)	Wres	Desloc. (mm)	RCS (kPa)	RCSméd (kPa)
1h	CP1 8%	5,04	199,50	9,97	14,36%	SIM	14,05%	5,02	83,04	81,06
	CP2 8%	5,04	199,50	10,2	14,36%	SIM	15,25%	2,85	62,26	
	CP3 8%	5,04	199,50	10,1	14,36%	SIM	13,84%	3,88	97,88	
	CP4 8%	5,04	199,50	10,2	14,36%	NÃO	9,30%	3,31	1537,42	1507,93
	CP5 8%	5,04	199,50	10,1	14,36%	NÃO	10,12%	3,75	1401,33	
	CP6 8%	5,04	199,50	10	14,36%	NÃO	9,75%	3,62	1585,03	
2h	CP1 8%	5,04	199,50	9,74	14,27%	SIM	12,43%	7,38	199,25	122,55
	CP2 8%	5,04	199,50	10	14,27%	SIM	13,64%	4,80	90,08	
	CP3 8%	5,04	199,50	9,92	14,58%	SIM	14,00%	6,09	78,33	
	CP4 8%	5,04	199,50	10	14,58%	NÃO	8,65%	4,00	1404,74	1441,01
	CP5 8%	5,04	199,50	10	14,38%	NÃO	8,51%	2,99	1469,35	
	CP6 8%	5,04	199,50	10,05	14,38%	NÃO	8,38%	3,07	1448,95	

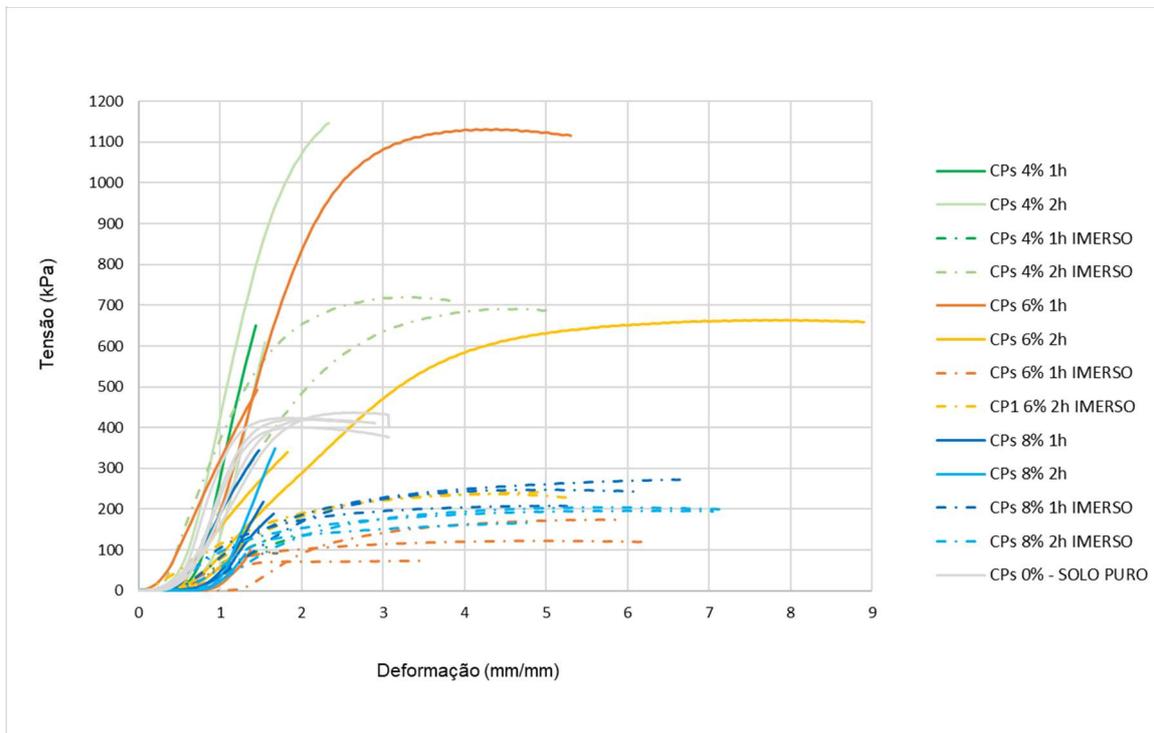
Fonte: Elaborado pelo autor.

Para o teor mais próximo ao de projeto de 4% houve o maior incremento de resistência em valor absoluto, no entanto observou-se também o aumento excessivo de deslocamento para atingir tal valor.

O comportamento da curva de tensão x deformação para solos finos tende a ser retilíneo na deformação elástica em função da plasticidade, porém pouco resiliente. No entanto, o acréscimo da emulsão ao solo prolongou esse patamar inicial, tornando todos os CPs sem imersão relativamente mais resilientes em função da carga aplicada.

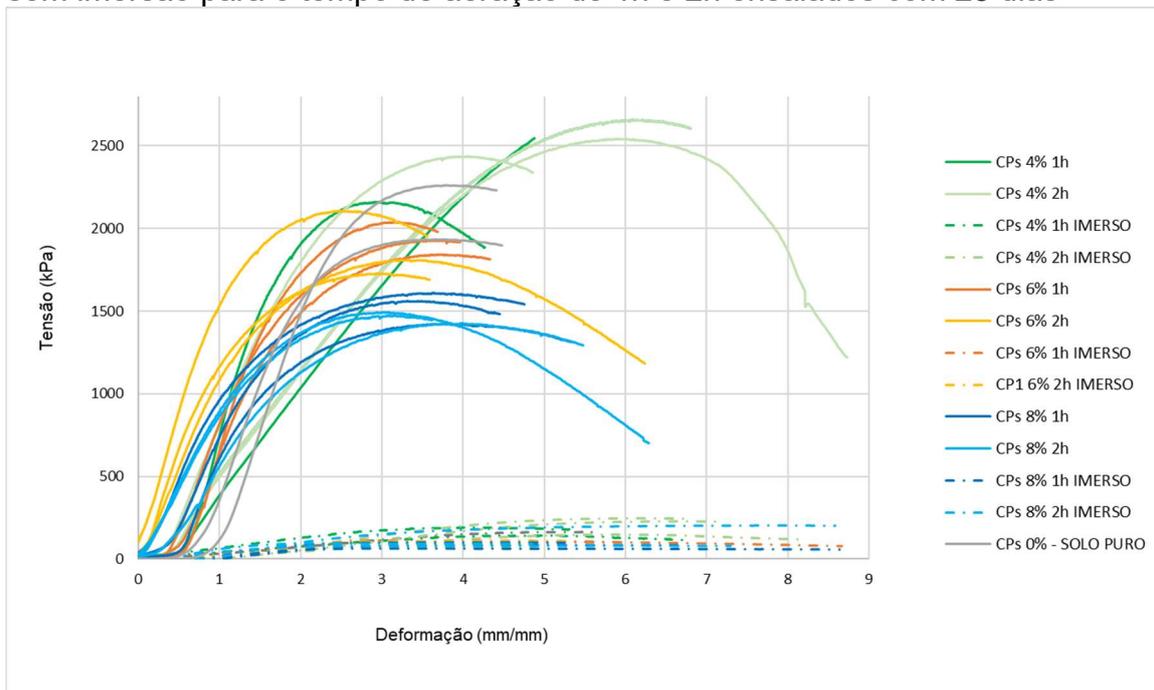
Nas imagens 44 e 45 são apresentadas as curvas de tensão x deformação geradas a partir dos resultados obtidos no ensaio de RCS com 7 e 28 dias (1h e 2h) sem imersão e com imersão tem objetivo de apenas mostrar o modelo de curvatura apresentado pela mistura solo-emulsão.

Figura 44 - Curvas tensão x deformação para CPs de solo-emulsão com imersão e sem imersão para o tempo de aerção de 1h e 2h ensaiados com 7 dias



Fonte: Elaborado pelo autor.

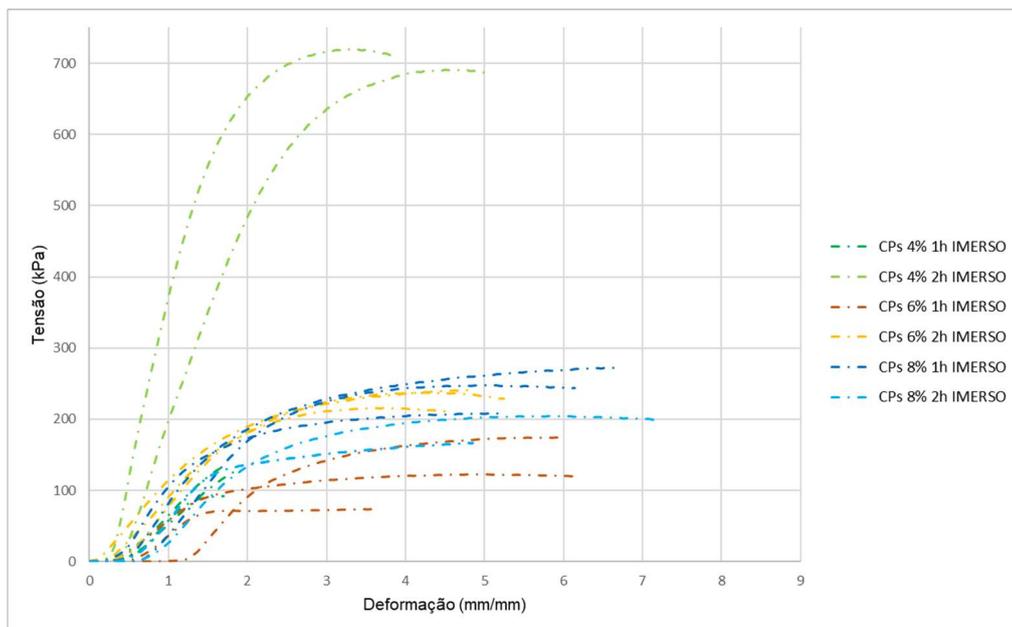
Figura 45 - Curvas tensão x deformação para CPs de solo-emulsão com imersão e sem imersão para o tempo de aerção de 1h e 2h ensaiados com 28 dias



Fonte: Elaborado pelo autor.

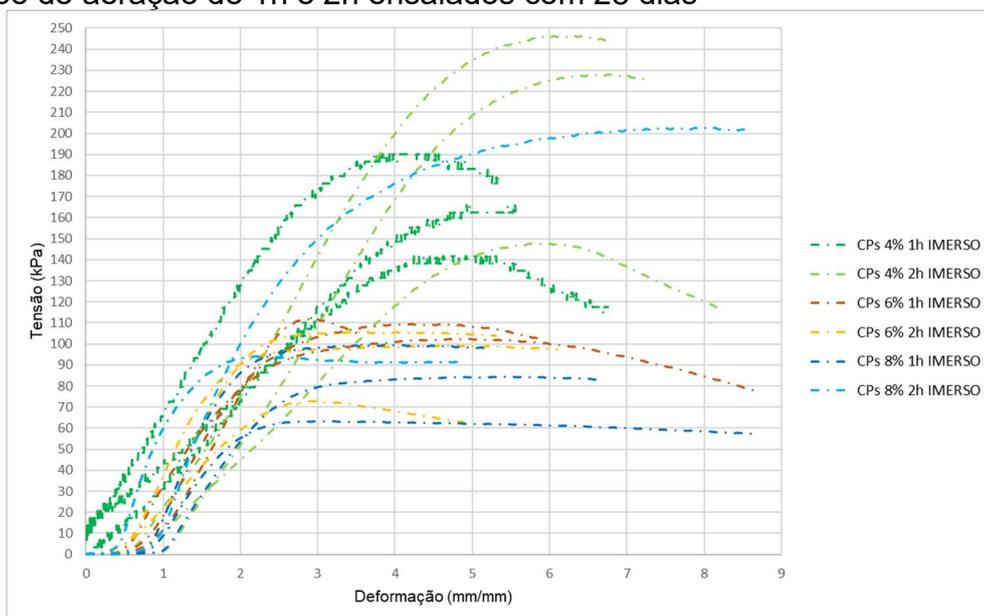
Já para os CPs com imersão houve a mesma reação prolongada da deformação, porém com a grandeza de valores absolutos consideravelmente inferior. Nas imagens 46 e 47 são apresentas as curvas geradas a partir dos valores obtidos no ensaio de RCS com imersão, tempo de cura de 7 e 28 dias e tem objetivo de mostrar o patamar elástico adicionado a curva da mistura solo-emulsão a condição imersa.

Figura 46 - Curvas tensão x deformação para CPs de solo-emulsão com imersão para o tempo de aeração de 1h e 2h ensaiados com 7 dias



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 47 - Curvas tensão x deformação para CPs de solo-emulsão com imersão para o tempo de aeração de 1h e 2h ensaiados com 28 dias



Fonte: Elaborado pelo autor.

Contudo, o comportamento da mistura solo-emulsão com imersão apesar de apresentar valores absolutos inferiores pode ser considerado um ganho no potencial de utilização do material para fins rodoviários, uma vez que não foi possível realizar o ensaio de RCS para o solo puro com imersão. Tal característica para a análise com imersão retrata a interação solo-emulsão de maneira intrínseca. Isto é, conforme a literatura (item 2.5 deste trabalho), a emulsão asfáltica proporciona impermeabilização a parcela arenosa e coesão aos finos quando aplicada de forma a vedar os poros e a criar uma lâmina ao redor dos grãos impedindo a absorção de água.

#### **4.3.3 Resistência a Compressão Simples – Análise Comparativa**

Os parâmetros de análise estabelecidos de tempo de aeração (1h e 2h) e tempo de cura (7 e 28 dias) permitiram que o comportamento do solo puro e solo-emulsão (RM-1C) para os teores de 4%, 6% e 8% fosse observado comparativamente com base no critério de ganho de resistência. A partir dos tempos distintos de aeração buscou-se observar o tempo de ruptura da emulsão em função da interação com o solo e a sua influência na resistência. Desta forma, foi possível verificar qual teor e tempo de aeração seria mais adequado para o tipo de solo estudado.

Para todos os CPs o ensaio de RCS foi realizado com velocidade de 1mm/min e o critério de parada foi o decréscimo na força aplicada.

Conforme Miceli (2006), devido ao fato desse ensaio ser diferente do usualmente empregado, de forma que neste a altura do CP é o dobro do diâmetro, viabiliza a condição de ruptura por cisalhamento. Todavia, assim como Miceli (2006) e Jacinto (2005), o padrão de ruptura observado para a mistura solo-emulsão foi vertical e com poucas fissuras a 45° graus que caracterizam a ruptura por cisalhamento. O padrão de ruptura para os CPs com 28 dias pode ser observado na Figura 48.

Figura 48 - Ruptura observada após o ensaio de RCS

CPs com 4% de RR-1C e tempo de aeração de 1h (28 dias)



CPs com 4% de RR-1C e tempo de aeração de 2h (28 dias)



CPs com 6% de RR-1C e tempo de aeração de 1h (28 dias)



CPs com 6% de RR-1C e tempo de aeração de 2h (28 dias)



CPs com 8% de RR-1C e tempo de aeração de 1h (28 dias)



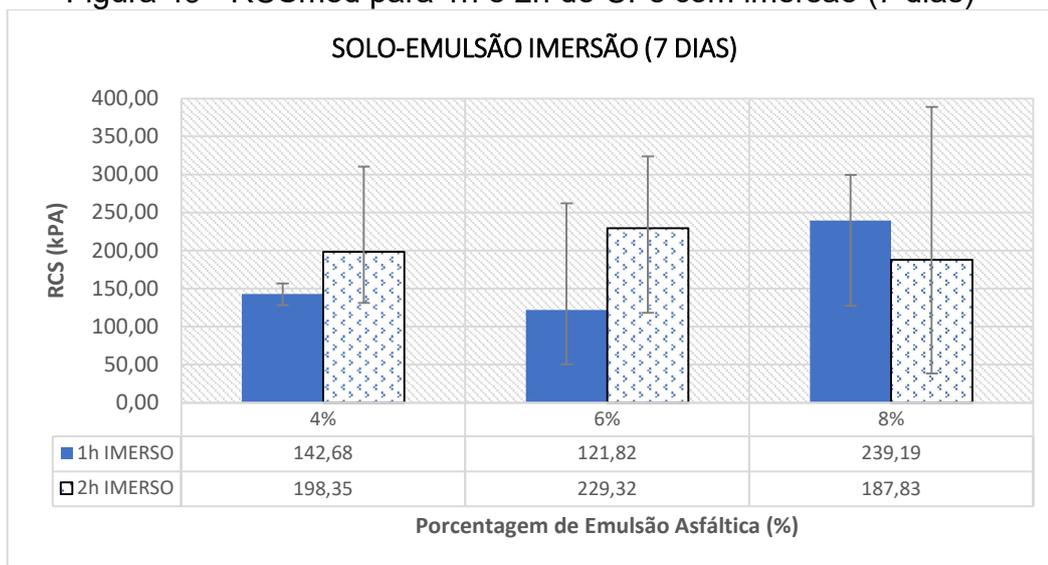
CPs com 8% de RR-1C e tempo de aeração de 2h (28 dias)



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os CPs para o solo puro (0%) com imersão foram considerados com valor zero por não suportarem as solicitações mínimas de carga do ensaio de RCS. No gráfico da Figura 49 é apresentada a RCS<sub>méd</sub> para os CPs de solo-emulsão para os teores analisados com tempo de aeração de 1h e 2h com imersão para o tempo de cura de 7 dias.

Figura 49 - RCS<sub>méd</sub> para 1h e 2h de CPs com imersão (7 dias)



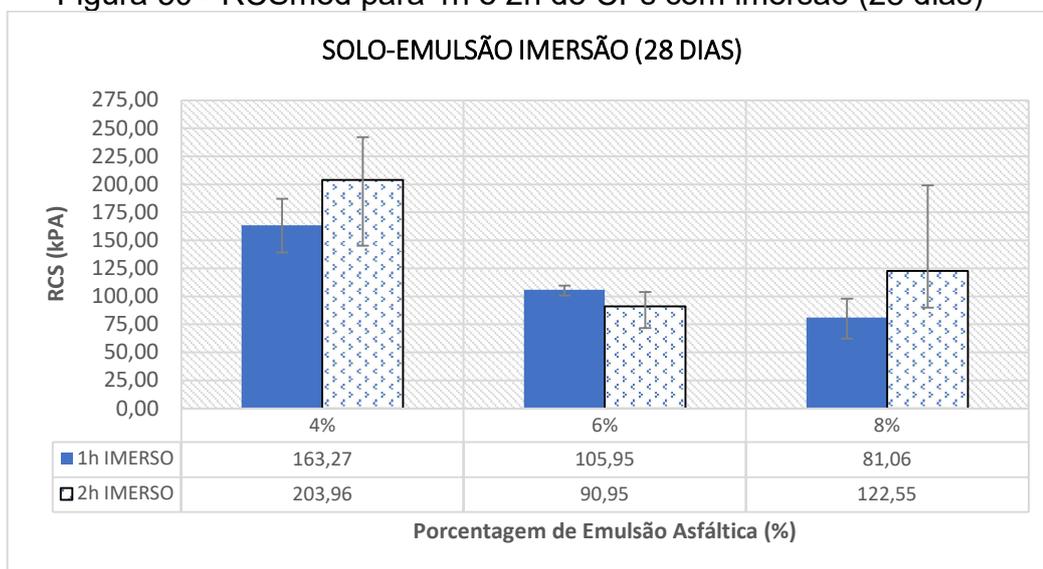
Fonte: Elaborado pelo autor.

A partir do gráfico da Figura 49 foi possível observar que o teor de 8% com 1 hora de aeração obteve um desempenho melhor em relação aos demais teores. Este foi o teor que mais se distanciou do teor de projeto calculado em função da granulometria do solo (item 3.1.2). No entanto, de acordo com literatura (item 2.5) os autores ponderam que para essa forma de estabilização química é possível que um teor ótimo de impermeabilização esteja acima de um teor ótimo de resistência.

Ainda com base no gráfico da Figura 49, é interessante analisar como existe um aumento progressivo na resistência para os CPs com imersão de 4% para 6% com 2h de aeração. Entretanto, para 8% houve uma divergência nessa progressão e o valor de 1h foi superior em relação aos demais, o ocorrido tende a estar ligado a ruptura precoce da emulsão asfáltica RM – 1C ainda na fase de compactação devido a W<sub>compac</sub> estar abaixo da W<sub>ótima</sub>. Conforme a Tabela 12, foi possível verificar que a faixa de W<sub>res</sub> foi de 13% a 14%.

No gráfico da Figura 50 é apresentada a RCS<sub>méd</sub> para os CPs de solo-emulsão para os teores analisados com tempo de aeração de 1h e 2h com imersão para o tempo de cura de 28 dias.

Figura 50 - RCS<sub>méd</sub> para 1h e 2h de CPs com imersão (28 dias)

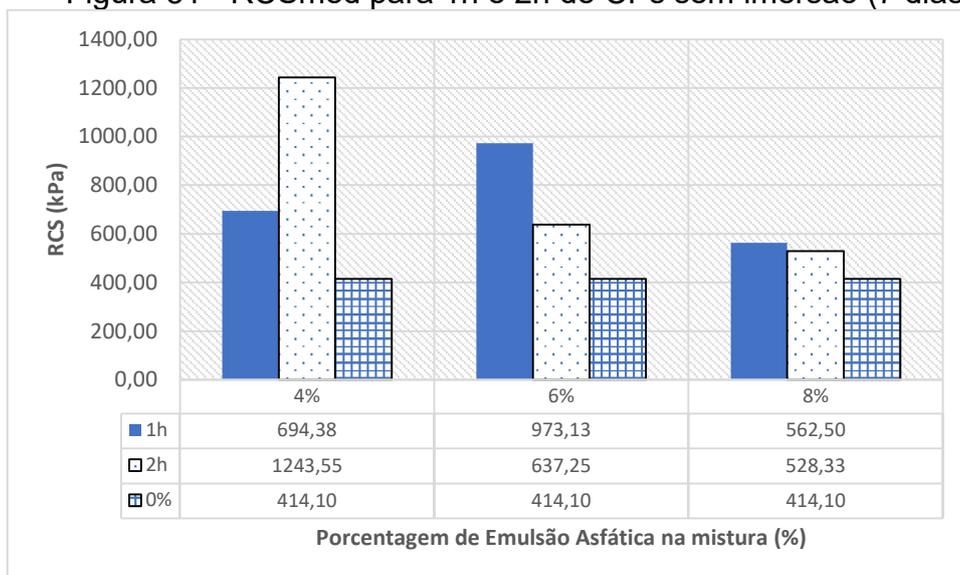


Fonte: Elaborado pelo autor.

Na análise dos CPs com imersão para o tempo de cura de 28 dias, a partir do gráfico da Figura 50, foi observado que o teor de 4% com 2h de aeração obteve o maior valor de RCS<sub>méd</sub>. Esse resultado pode ser analisado sob viés estudado por Miceli (2006), no qual é caracterizada a importância do tempo de cura na estabilização da mistura solo-emulsão. Logo, conforme o autor, após a compactação existe um tempo no qual a mistura deixa de estar somente sob a influência da umidade trabalhada e passa ser influenciada também pelas propriedades da emulsão asfáltica. Dentro desse contexto, um teor acima do ideal apesar de proporcionar maior impermeabilização às partículas, tende a diminuir sua resistência também.

No gráfico da Figura 51 é apresentada a RCS<sub>méd</sub> para os CPs de solo puro (0%) e solo-emulsão para os teores analisados com tempo de aeração de 1h e 2h sem imersão para o tempo de cura de 7 dias.

Figura 51 - RCSméd para 1h e 2h de CPs sem imersão (7 dias)



Fonte: Elaborado pelo autor.

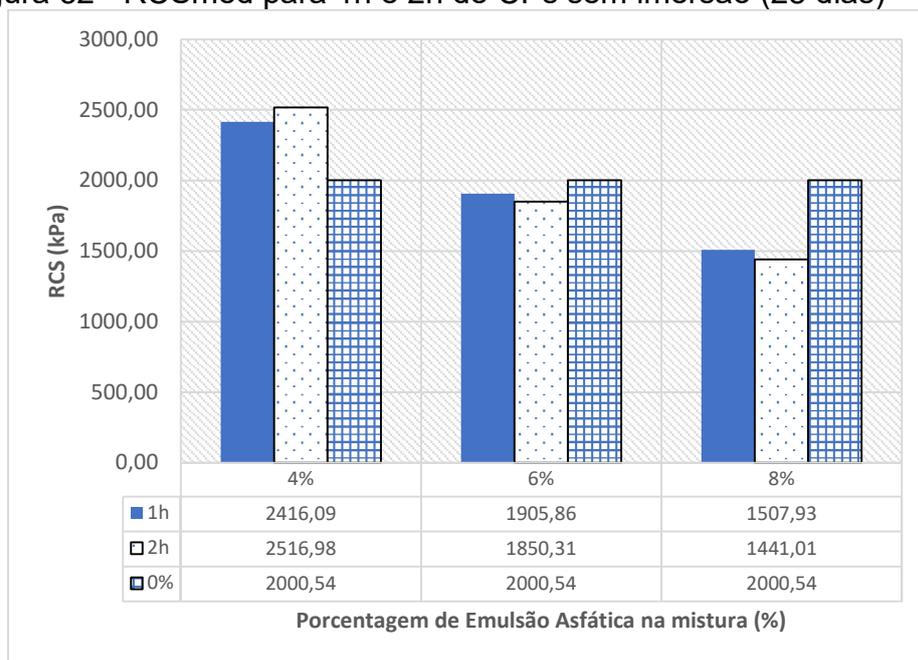
De acordo com o gráfico da Figura 51 foi verificado que para o período de 7 dias houve um ganho de resistência para o teor 4% de 67,7% para o tempo de aeração de 1h e de 200,1% para o tempo de aeração de 2h em relação ao solo em seu estado puro. Já para o teor de 6% o acréscimo na RCS foi para o tempo de aeração de 1h foi de 135% e de 53,89% para o tempo de aeração de 2h. Por fim, o teor de 8% teve o ganho de RCS de 35,83% para o tempo de aeração de 1h e de 27,59% para o tempo de aeração de 2h.

A Wres variou bastante entre todos os teores analisados, conforme pode ser observado nas Tabelas 10, 11 e 12. A partir dessa variação foi constatado que para teores maiores de emulsão a Wres é maior. E ainda, observou-se que quanto menor a Wres maior será a RCS, reiterando a influência do tempo de cura no ganho de RCS devido a perda de umidade.

Portanto, em relação a mistura foi possível analisar que o teor de 4%, sendo este o que mais se aproximou do teor de projeto, obteve o melhor desempenho em valores absolutos de aumento na RCS.

No gráfico da Figura 52 é apresentada a RCSméd para os CPs de solo puro (0%) e solo-emulsão para os teores analisados com tempo de aeração de 1h e 2h sem imersão para o tempo de cura de 28 dias.

Figura 52 - RCSméd para 1h e 2h de CPs sem imersão (28 dias)



Fonte: Elaborado pelo autor.

Conforme o gráfico da Figura 52 para 28 dias de cura o comportamento da mistura solo-emulsão foi distinto para cada teor em relação ao solo puro. O único teor no qual houve ganho de RCS foi o de 4%, sendo este equivalente a 20,77% para o tempo de aeração de 1h e de 25,82% para o tempo de aeração de 2h. No caso do teor de 6% houve um decréscimo na RCS, para o tempo de 1h de aeração essa perda foi de 4,73% e de 7,50% para o tempo de aeração de 2h. A maior perda de RCS foi para o teor de 8%, no qual para o tempo de aeração de 1h teve o decréscimo de 24,62% e para o tempo de aeração de 2h essa perda foi equivalente a 27,97% em relação ao solo puro.

A Wes para 28 dias ficou na faixa de 7% a 10% com valores superiores de RCS para Wres mais baixas tanto no solo puro quanto na mistura, conforme Tabelas 13, 14 e 15. De acordo com a literatura (item 2.5) a perda de RCS para os teores de 6% e 8% estão relacionadas ao excesso de emulsão na mistura que tende a criar uma lâmina muito espessa que ocasiona a perda de resistência, sendo o aumento caracterizado pela interação na quantidade adequada de emulsão para a granulometria do solo arenoso fino deste estudo.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES

O estudo deste trabalho foi desenvolvido em laboratório com base na literatura de referência. Dentro desse contexto, alguns pontos foram observados e são passíveis de considerações finais, assim como, sugestões para futuros trabalhos.

### 5.1 Considerações finais

A análise do solo teve início a partir de sua caracterização física, na qual seus índices de consistência apontaram um solo fino de plasticidade moderada.

A classificação de acordo com a metodologia MCT apontou solo arenoso fino de comportamento não-laterítico (NA'). No entanto, houve uma singularidade aparente nos resultados encontrados para a classificação. Os coeficientes desse método de classificação buscam abranger a diversidade de cada solo estudado, além de relacionar as características presentes na composição a qual o solo pertence, servindo assim, para melhor orientar a sua aplicação na engenharia rodoviária.

Conforme Nogami e Alves (2019), os solos de comportamento NA' são totalmente dependentes de seus componentes mineralógicos para um desempenho adequado como camada de pavimentos. Desta forma, os autores apontam o solo puro com apenas 4ª opção para utilização e alertam sobre o elevado índice de expansividade possivelmente presente.

Por meio do ensaio de compactação Mini-Proctor foi possível observar que o comportamento da MEAS<sub>máx</sub> e Wótima da mistura solo-emulsão foi semelhante ao encontrado na literatura, no qual há essencialmente uma redução no resultado obtido em relação ao solo puro, mas essa variação fica em torno de  $\pm 1\%$ .

O solo puro apresentou no ensaio de RCS um comportamento satisfatório quando ensaiado com CPs sem imersão, em torno de 0,41MPa para 7 dias e 2,00MPa para 28 dias. Entretanto, os CPs com imersão em água por 24h não suportaram a carga do ensaio. Portanto, o solo estudado possui propensão a sofrer com a ação de intempéries, tornando o uso deste como base de pavimentos em seu estado puro um risco potencial em relação a erodibilidade que pode ocorrer em campo. Verificou-se nesse ponto também que a resistência está diretamente ligada a umidade do solo, caracterizando o tempo de cura como essencial para que a resistência seja elevada.

O resultado obtido para o ensaio de RCS com solo puro apesar de satisfatório seria inviável de utilização como base de pavimentos. De acordo com o DNIT 143/2010, o valor mínimo de resistência é de 2,5 MPa.

O ensaio de RCS com o solo-emulsão asfáltica (RM – 1C) apresentou um acréscimo de resistência significativo. Os teores de 4%, 6% e 8% foram analisados, sendo o teor de 4% foi definido como teor de projeto ideal em função da granulometria do solo. Foi constatado que teores acima do ideal tendem a acrescentar ao solo melhor desempenho de impermeabilização, porém diminuem a resistência devido a lubrificação das partículas e conseqüente diminuição do atrito entre elas.

Em relação ao comportamento da emulsão RM – 1C, observou-se a influência do tempo de aeração, no qual há a ruptura da emulsão, na resistência dos CPs. Dessa forma, o tempo de 2h para um teor ideal tende a ganhar resistência progressivamente durante o tempo de análise.

Já para teores acima do ideal, o tempo de aeração de 1h tende a variar podendo até ser superior a 2h em valores absolutos, todavia não ultrapassam o teor ideal.

Desta forma, constatou-se que o teor de 4% de emulsão apresentou os melhores resultados para o tempo de aeração de 2h, atingindo o valor de RCS<sub>méd</sub> de 2,51MPa e ficando no limite mínimo estabelecido pelo DNIT para o uso em bases de estradas não-pavimentadas.

Portanto, tendo em vista o viés econômico ligado a estabilização química com emulsão asfáltica para desenvolver uma pavimentação de baixo custo, pondera-se que o teor de 4% satisfaz a essa condição proporcionando um acréscimo de resistência junto a impermeabilização. Essa condição em laboratório aponta para uma baixa manutenção da via, devido ao controle da erodibilidade com a impermeabilização, assim como, uma camada de rolamento mais estável ao suporte dos veículos com a potencialização da RCS.

## **5.2 Sugestões para trabalhos futuros**

- Avaliar o comportamento do solo do mesmo local desta pesquisa com uma mistura solo-emulsão de RL-1C;

- Caracterizar a composição mineralógica do solo e a influência dos minerais na interação solo-emulsão;
- Realizar os ensaios de Módulo de Resiliência e Triaxial (resistência ao cisalhamento) para as mesmas dosagens, tempo de aeração e tempo de cura;
- Para solos finos, avaliar a possibilidade de potencializar os ganhos em resistência e impermeabilização se for aplicada uma estabilização granulométrica granular junto a estabilização química com emulsão;
- Para amostras de solo do mesmo local, variar os teores de emulsão e tempos de cura para valores abaixo do ideal desta pesquisa e avaliar seu comportamento.

## REFERÊNCIAS

ALSAFI, S.; FARZADNIA, N.; ASADI, A.; HUAT, B. K. **Collapsibility potential of gypseous soil stabilized with fly ash geopolymer; characterization and assessment.** Construction and Building Materials, v. 137, p. 390–409, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS EMPRESAS DISTRIBUIDORAS DE PETRÓLEO - ABEDA, **Manual básico de emulsões asfálticas.** Soluções para pavimentar sua cidade. Rio de Janeiro, 2001.

\_\_\_\_\_. **ABEDA. Manual básico de emulsões asfálticas.** 2ª. ed. Rio de Janeiro: ABEDA, 144 p., 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7207/82:** Terminologia e classificação de pavimentação. Rio de Janeiro: ABNT, 1982. 3 p.

\_\_\_\_\_. **NBR 12253/12:** Solo-cimento - dosagem para emprego como camada de pavimento - Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2012. 3 p.

\_\_\_\_\_. **NBR 7180/16:** Solo - determinação do Limite de Plasticidade. Rio de Janeiro: ABNT, 2016. 3 p.

\_\_\_\_\_. **NBR 6459/16:** Solo - determinação do Limite de Liquidez. Rio de Janeiro: ABNT, 2016. 5 p.

\_\_\_\_\_. **NBR 7181/16:** Solo – Análise Granulométrica. Rio de Janeiro, 2016. 12 p.

\_\_\_\_\_. **NBR 7182/2016:** Solo – Ensaio de compactação. Rio de Janeiro: ABNT, 2016. 10 p.

\_\_\_\_\_. **NBR 15087/2012:** Misturas asfálticas - Determinação da resistência à tração por compressão diametral. Rio de Janeiro, 2012. 5p.

\_\_\_\_\_. **NBR 12024: Solo-cimento — Moldagem e cura de corpos de prova cilíndricos — Procedimento.** Rio de Janeiro, 2012. 6p.

ASPHALT ACADEMY. **Technical Guideline: Bitumen Stabilised Materials.** 2<sup>a</sup>. ed. Pretoria: Asphalt Academy, 2009.

BAESSO, D. P.; GONÇALVES, F. L. R. **Estradas Rurais: Técnicas Adequadas de Manutenção.** Florianópolis: DER/SC, 2003, 236 p.

BALBO, J. T. **Pavimentação asfáltica: materiais, projeto e restauração.** São Paulo, 2007.

BERNUCCI, L. B; MOTTA, L. M. G; CERATI, J. A. P; SOARES, J. B. **Pavimentação asfáltica.** Rio de Janeiro, 2006.

BENTO, P. F., **Uso de cal e fibras na melhoria de materiais para utilização em estruturas de pavimentos.** Dissertação (Mestre em Engenharia). Universidade de Brasília, 2006).

BRITO, L. C.; PARANHOS, H. S., **Estabilização de Solos.** Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento. Edição 06. Ano 02, Vol. 01. pp 425-438, setembro de 2017.

CAPUTO, H. P., **Mecânica dos Solos e suas Aplicações.** V. 1, ed. Livros Técnicos e Científicos. Rio de Janeiro, 1977. 350p.

COSTA, C. A., **Emulsões asfálticas e suas aplicações em engenharia rodoviária.** Curso de Especialização em Engenharia Rodoviária. Escola Politécnica da Universidade Federal da Bahia, Salvador, BA, 2004.

CRISTELO, N., **Estabilização de Solos Residuais Graníticos Através da Adição de Cal.** Dissertação de mestrado, Escola de Engenharia da Universidade do Minho. Guimarães - Portugal, 2001.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER - ME 041/94:** Solos – Preparação de amostras para ensaio de caracterização. Rio de Janeiro, 1994.

\_\_\_\_\_. **DNER-ME 093/94** – Determinação da densidade real. Rio de Janeiro, 1994. 4p.

\_\_\_\_\_. **DNER – ME 228/94:** Solos – compactação em equipamento miniatura. Rio de Janeiro, 1994. 14p.

\_\_\_\_\_. **DNER – ME 202/94:** Solo Cimento – moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 1994. 7p.

\_\_\_\_\_. **DNER – ME 201/94:** Solo Cimento – compressão axial de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 1994. 4p.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM – SÃO PAULO. **DER/SP M196/89** – Classificação de solos tropicais segundo a metodologia MCT. São Paulo, 1989.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 136/2010 – ME:** Pavimentação asfáltica - Misturas asfálticas – Determinação da resistência à tração por compressão diametral – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2010.

FERREIRA, A. M., **Estudo de Três Solos Estabilizados com uma Emulsão Asfáltica Catiônica.** Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação de Engenharia do Centro de Ciências e Tecnologias da Universidade Federal da Paraíba. Paraíba, 1980.

FINBERG, C., QUIRE, D., THOMAS, T., **Granular Base Stabilization with Emulsion en Las Vegas, Nevada.** Transportation Research Board 2008 Annual Meeting; Washington, D.C., 2008.

GOMES DE MATTOS, A.B., **Estabilização de solo com betume**. In: 25° Reunião anual de pavimentação, São Paulo. Outubro, 1991.

GONDIM, L. M., **Estudo experimental de misturas solo-emulsão aplicado às rodovias do agropólo do Baixo Jaguaribe - Estado do Ceará**. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia de Transportes) – Programa de Mestrado de Engenharia dos Transportes, Universidade Federal do Ceará. Fortaleza – CE, 2008.

GUIMARÃES, R.C., **Barragens com Núcleo de Concreto Asfáltico – Análise do Comportamento Mecânico e Hidráulico do Núcleo**. Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. Universidade de Brasília, Brasília - DF, 2012.

IAEG, Rock. **Soil description and classification for engineering geological mapping**. Report by the IAEG Commission on Eng. Geol. Mapping. Bull. of the IAEG, n. 24, p. 235– 274, 1979.

INGLÊS, O.G. e METCALF, J.B., **Soil Stabilization: Principles and Practice**. Butterworths, Sydney, 1972.

JACINTHO, E.C., **Estudo do comportamento de misturas solo-emulsão para uso em barragens**. Dissertação de M.Sc., Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília. Brasília, DF, 2005.

JAMES, A., **Overview of Asphalt Emulsion**. E-C102 Circular. Transport Research Board. Washington, 2006.

KÉZDI, A., **Stabilized earth roads**. Elsevier Scientific Publishing Company. Amsterdam – Oxford – New York, 1979.

LIMA, D. C. **Estabilização Solo-Cal**. In: 19ª REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, Rio de Janeiro. Anais, p.67-82, 1984.

LITTLE, D. N.; NAIR, S. **Recommended practice for stabilization of subgrade soils and base materials**. National Cooperative Highway Research Program. Transportation Research Board of the National Academies. Washington D.C, 2009.

LOPES, L. D. S. E., **Análise do Comportamento Mecânico e Ambiental de Misturas Solo-Cinzas de Carvão Mineral para Camadas de Base de Pavimentos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Rio de Janeiro - RJ: Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2011.

MAKUSA, G. P., **Soil stabilization methods and materials in engineering practice: State of the art review**. Sweden: Lulea° University of Technology, 2013.

MALKO, J. A. C., **Aplicabilidade de Enzimas para Melhoramento de Solos em Pavimentação**. Dissertação (Mestrado Ciências em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Departamento de Engenharia Civil da PUC-Rio. Rio de Janeiro – RJ, 2015.

MEDINA, J.; MOTTA, L.M.G. **Mecânica dos Pavimentos**. 3 ed. Rio de Janeiro: Coppe/UFRJ, 2015.

MEDINA, J.; MOTTA, L.M.G. **Mecânica dos Pavimentos**. 2 ed. Rio de Janeiro: Coppe/UFRJ, 2005.

MEDINA, J., MOTTA, L. M. G., **Apostila de estabilização de solos**. Escola de Engenharia, UFRJ, Rio de Janeiro, 2004.

MEDINA, J., **Apostila de estabilização de solos**. Escola de Engenharia. Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ. Rio de Janeiro, 1979.

MEDINA, J., **Apostila de estabilização de solos**. Escola de Engenharia. Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ. Rio de Janeiro, 1987.

MICELI, G., **Comportamento de solos do estado do Rio de Janeiro estabilizados com emulsão asfáltica**. Instituto Militar de Engenharia. Dissertação de Mestrado em Ciências em Engenharia de Transportes. Rio de Janeiro, p. 256., 2006.

MOUSAVI, S.E., KARAMVAND, A., **Assessment of strength development in stabilized soil with CBR PLUS and silica sand**. Journal of Traffic and Transportation Engineering, (English Edition), JTTE: 142, 2017, doi: 10.1016/j.jtte.2017.02.002.

MOREIRA, E. D., **Desempenho de dois trechos de solo emulsão em vias de baixo volume de tráfego**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Ouro Preto, 2010.

MOREIRA, J. P. V; GOMES, A. C; PEREIRA, P. **Contribuição para a reutilização de material fresado em camadas estruturais de pavimento**. Departamento de Engenharia Civil, Escola de Engenharia, Universidade do Minho. Lisboa, 2006.

NARDI, J.V., **Estabilização de Areia com Cinza Volante e Cal; Efeito do Cimento como Aditivo e de Brita na Mistura**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ. Rio de Janeiro, 1975.

OLIVEIRA, E., **Emprego da cal na estabilização de solos finos de baixa resistência e alta expansão: estudo de caso no município de Ribeirão das Neves/MG**. Dissertação (Mestre em Engenharia). Universidade Federal de Santa Catarina, 2010.

OLIVEIRA, L. C., **A Estabilização de Solos Aplicada a Habitação, Um Estudo de Misturas Solo Cimento**. Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 1994.

PACHECO, L. M., **Solos Estabilizados com Emulsão Asfáltica para Uso em Pavimentação: Estudo Laboratorial**. Trabalho de Diplomação para o Departamento de Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre – RS, 2011.

PASSOS, M. C. F., **Metodologia MCT Aplicada aos Solos Arenoso Finos Lateríticos do Rio Grande do Sul Visando a Pavimentação**. Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação de Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2000.

PINTO, C. D. S., **Curso Básico de Mecânica dos Solos**. 3ª. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2006. 367 p.

PINTO, S., **Materiais betuminosos – Conceituação, especificação e utilização**. Apostila do Curso de Engenharia de Fortificação e Construção. Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 1998.

PINTO, S., PREUSSLER, E., **Pavimentação Rodoviária: Conceitos Fundamentais Sobre Pavimentos Flexíveis**. 2ª ed., Rio de Janeiro: Copiadora e Artes Gráficas. Rio de Janeiro, 2002.

ROSA, A. D., **Estudos dos Parâmetros-Chave no Controle da Resistência de Misturas Solo-Cinza-Cal**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul- UFRGS. Porto Alegre, 2009.

SABITA; **GEMS - The design and use of granular emulsion mixes**. Manual 14. South África, 1996.

SAMPAIO, G.M., **Comportamento Mecânico e Hídrico de Solos Estabilizados com Emulsão Asfáltica**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Universidade Estadual de Campinas. Campinas – SP, 2008.

SANDRONI, S., CONSOLI, N.C., **Sobre a Prática da Engenharia Geotécnica com Dois Solos Difíceis: Os Extremamente Moles e os Expansivos**. COBRAMSEG 2010. Anais. PP. 97–186. 2010.

SANT'ANA, W. C., **Contribuição ao Estudo de Solo-Emulsão em Pavimentos de Rodovias de Baixo Volume de Tráfego para o Estado do Maranhão**. Dissertação de Doutorado, Departamento de Engenharia Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo – SP, 2009.

SANTOS, M. F., LIMA, D. C., BUENO, B. S, **Estabilização dos Solos com Cal e Betume**. In: 6º Reunião de pavimentação urbana, p.74 – 97, Santos – São Paulo, abril, 1995.

SANTOS, M. N. **Análise do Efeito da Estabilização Mecânica em Matrizes de Terra**. PUC – Relatório de iniciação científica, Rio de Janeiro, 2012.

SANTOS, W. J., **Avaliação do uso de emulsão asfáltica na estabilização química de três solos de Sergipe**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, 2009.

SCHNEIDER, R. G. S., **Estabilização de Solos Finos Utilizando Cal Hidratada**. Trabalho de conclusão de curso apresentado a Universidade Federal do Pampa, campus Alegrete. Alegrete – RS, 2013.

SENÇO, W. D., **Manual de Técnicas de Pavimentação - Volume I**. 1ª. ed. São Paulo: Editora PINI, v. II, 2001. 761 p.

\_\_\_\_\_, **Manual de Técnicas de Pavimentação - Volume II**. 1ª. ed. São Paulo: Editora PINI, v. I, 2008. 671 p.

SILVA, E. S., **Utilização de Resíduo de Fresagem de Pavimentos Asfálticos em Bases Estabilizadas Granulometricamente e em Revestimentos Asfálticos na Cidade de Manaus**. Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Amazonas. Manaus, 2013.

SOLIZ, V. V. P., **Estudo de três solos estabilizados com emulsão asfáltica**. Dissertação (Mestrado Ciências em Engenharia Civil) - Programas de pós-graduação de engenharia da Universidade Federal do rio de janeiro – UFRJ. Rio de Janeiro – RJ, 2007.

VIZCARRA, G. O. C., **Aplicabilidade de Cinzas de Resíduo Sólido Urbano para Base de Pavimentos**. Dissertação (Mestrado Ciências em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Departamento de Engenharia Civil da PUC-Rio. Rio de Janeiro – RJ, 2010.

VOGT, J.C., **Estabilização Betuminosa**. In: 7º Simpósio sobre pesquisas rodoviárias, Rio de Janeiro. Julho, 1971.

YODER, E. J.; WITCZAK, M. W. **Principles of pavement design**. 2ª. ed. New York: John Wiley & Sons, 1975.

## ANEXO

### Anexo 1 – Certificado da emulsão asfáltica de ruptura média fornecido pela “cbb Asfaltos”.



## RM1C CERTIFICADO DE ANÁLISE

RESOLUÇÃO ANP Nº 36, 13 DE NOVEMBRO DE 2012

CONTROLE DE QUALIDADE Nº 1

DATA DE EMISSÃO: 31/01

PRODUTO: Emulsão Asfáltica Catiônica de Ruptura Média

DATA DE FABRICAÇÃO: 06/11/2017

PONTO DE COLETA: Tanque 10

DATA DE COLETA: 07/11/2017 9:00 AM

TEMPERATURA DE CARREGAMENTO: 50 °C

#### ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DA EMULSÃO ASFÁLTICA

	CARACTERÍSTICAS	UNIDADE	MÉTODO DE ENSAIO	RESULTADOS	LIMITES	
					MÍNIMO	MÁXIMO
1	Resíduo Asfáltico	% (m/m)	NBR 14376	62,6	62,0	-
2	Viscosidade Saybolt Furol, 50°C	ssf	NBR 14491	78	20	200
3	Peneiramento, retido na peneira 0,84 mm	% (m/m)	NBR 14393	0	-	0,1
4	Sedimentação, 5 dias, diferença do resíduo entre topo e fundo	% (m/m)	NBR 6570	1,9	-	5
5	Carga da Partícula	-	NBR 6567	Positiva	Positiva	
6	Desemulsibilidade	% (m/m)	NBR 6569	35,1	-	50

#### ORIENTAÇÕES DE ARMAZENAMENTO

- A tancagem deve ser limpa a cada 6 meses.
- A cada 5 dias não trabalhados a emulsão deve ser circulada dentro do tanque por 1h.
- Não deixar lastro no tanque.

#### ORIENTAÇÕES DE UTILIZAÇÃO

- Não aquecer a emulsão.
- Não executar misturas asfálticas com temperaturas ambientes iguais ou inferiores a 10°C.
- Manter agregados limpos e isentos de material argiloso ou pó aderido.

#### ORIENTAÇÕES DE RECEBIMENTO DE CARRETAS

- O recipiente do veículo transportador foi devidamente vistoriado e a carreta segue lacrada.
- A contraprova deverá ser obrigatoriamente coletada na presença do cliente, ou responsável.
- Uma cópia do certificado deve ser entregue juntamente com a nota fiscal e a outra deve retornar para a CBB devidamente preenchida.
- Estes dados refletem os resultados dos controles realizados sobre uma amostra representativa e não eximem o cliente de realizar seu controle no momento do recebimento deste material.
- Este certificado foi emitido eletronicamente pela Garantia de Qualidade e não necessita ser assinado.

#### ENTREGA DO CERTIFICADO (PREENCHIMENTO OBRIGATÓRIO)

DATA	HORÁRIO	FROTA
NOME LEGÍVEL E ASSINATURA DO MOTORISTA		
NOME LEGÍVEL, ASSINATURA E RG/CPF DO RESPONSÁVEL PELO RECEBIMENTO		

#### RESPONSÁVEIS TÉCNICOS

Eng.º Luiz Henrique Teixeira - CREA: 39735/D

Eng.ª Aline Sendeski - CRQ: 9302996/IX | CREA: 15558/D PR

#### ASSISTÊNCIA TÉCNICA

+55 41 3091 2243

aline.sendeski@cbbasfaltos.com.br