



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA HIDRÁULICA E AMBIENTAL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

FABIOLA COSTA DE LIMA

ESTUDO DOS PROCESSOS DE COMPACTAÇÃO E DOSAGEM DE MISTURAS
ENTRE SOLO ARENOSO E EMULSÃO ASFÁLTICA

FORTALEZA
2016

FABIOLA COSTA DE LIMA

ESTUDO DOS PROCESSOS DE COMPACTAÇÃO E DOSAGEM DE MISTURAS
ENTRE SOLO ARENOSO E EMULSÃO ASFÁLTICA

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Civil. Área de concentração: Geotecnia.

Orientador: Prof. Dr. Silvrano A. Dantas Neto

FORTALEZA
2016

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- L698e Lima, Fabiola Costa de.
Estudo dos processos de compactação e dosagem de misturas entre solo arenoso e emulsão asfáltica /
Fabiola Costa de Lima. – 2016.
96 f. : il. color.
- Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Civil: Geotecnia, Fortaleza, 2016.
Orientação: Prof. Dr. Silvrano Adonias Dantas Neto .
1. Solo-emulsão. 2. Barragem de terra. 3. Compactação. I. Título.

CDD 624.15

FABIOLA COSTA DE LIMA

ESTUDO DOS PROCESSOS DE COMPACTAÇÃO E DOSAGEM DE MISTURAS
ENTRE SOLO ARENOSO E EMULSÃO ASFÁLTICA

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Civil. Área de concentração: Geotecnia.

Aprovada em 29 / 07 / 2016

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Silvrano A. Dantas Neto (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Francisco Chagas da Silva Filho (Examinador interno)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dra. Suelly Helena de Araújo Barroso (Examinadora externo)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dra. Michele Dal Toe Casagrande (Examinadora externo)
Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC)

Dedico esta dissertação
à minha querida e amada filha,
Giovana Costa Ferreira Leme,
que todos os dias compartilha comigo
a doçura e a graciosidade da sua infância.

AGRADECIMENTOS

Se você está lendo isto, é porque consegui. Foi um longo caminho, e nem um pouco tranquilo. Mas na mesma proporção em que as dificuldades apareciam, surgia também o auxílio de pessoas especiais, que fizeram toda a diferença, e me ajudaram a completar essa jornada. Quero, com os meus sinceros sentimentos de agradecimento, agradecer a todos:

Primeiramente a Deus, por ter iluminando e por ter colocado as pessoas certas no meu caminho, que me ajudaram a superar tantos obstáculos.

Ao meu orientador Silvrano Adonias Dantas Neto, pela paciência que teve comigo, por não ter permitido que eu interrompesse o processo, por acreditar que a realização deste trabalho era possível, e pelo apoio pessoal que me deu, como amigo e como orientador.

À minha querida amiga, Amanda Vieira, que não só me aconselhou, compreendeu e incentivou, mas que também me deu enorme apoio para a conclusão deste trabalho.

Aos professores Francisco Chagas da Silva Filho e Alfran Sampaio Moura, pela solicitude e solidariedade diante das minhas dificuldades.

Aos membros da banca, por se disporem, mesmo diante de algumas restrições que tivemos. Suas análises e sugestões serão absolutamente valiosas e significativas para a versão definitiva do texto.

Aos colegas do Laboratório de Mecânica dos Solos da UFC, Anselmo, Francisco, Roberto, Ana e Carlos, pelo apoio, incentivo e disponibilização dos equipamentos laboratoriais para execução dos ensaios.

A todos do DEHA, em especial à Shirley e à Neuza, sempre tão pacientes ao resolver todos os impasses burocráticos e responder às minhas dúvidas.

À empresa Asfalto Nordeste, pela doação das emulsões asfálticas, e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo apoio financeiro que possibilitou a realização desta pesquisa.

Aos meus queridos pais e irmãos, que estiveram ao meu lado, me ajudaram e apoiaram com muito amor, paciência e carinho.

Em especial, ao meu querido Rosiel Ferreira Leme, por estar sempre presente nos momentos em que eu mais precisei, e pelo incentivo, apoio e principalmente paciência nos mais conturbados. Você é parte fundamental na história da minha vida, e eu agradeço por todo o amor dedicado a mim durante todos esses anos.

*“E aprendi que se depende sempre
De tanta, muita, diferente gente
Toda pessoa sempre é
as marcas das lições diárias
de outras tantas pessoas.
É tão bonito quando a gente entende
Que a gente é tanta gente onde quer que a
gente vá
É tão bonito quando a gente sente
Que nunca está sozinho por mais que pense
estar...”*

**Trecho da canção “Caminhos do coração”,
de Gonzaguinha**

RESUMO

Este trabalho tem por finalidade a avaliação do processo de compactação e dosagem das misturas solo-emulsão. A metodologia utilizada compreendeu, inicialmente, a coleta dos materiais estudados, especificamente amostras de solo arenoso (areia fina siltosa) e de emulsão asfáltica. Em seguida, foram definidas as misturas de diferentes proporções entre solo e emulsão asfáltica, com teores de emulsão variando entre 13% e 31% em relação à massa de solo. As misturas foram compactadas através da metodologia de compactação Marshall e Proctor (Normal e Modificado), e foram também definidos os índices físicos que melhor representassem as condições de compactação das misturas. Os resultados mostraram que as compactações da mistura solo-emulsão apresentam melhores resultados quando são feitas com elevadas energias. Outro aspecto importante a ser mencionado é que a compactação das misturas solo-emulsão não é afetada pelo teor de umidade, sendo os principais fatores influentes a energia de compactação e o teor de emulsão asfáltica na mistura. Além disto, observou-se que a utilização de parâmetros físicos utilizados nos processos de dosagem das misturas asfálticas utilizadas na compactação, como massa específica aparente, volume de vazios, relação betume-vazios, representam melhor a variação da estrutura da mistura compactada em função do teor de emulsão ao longo da compactação, do que, por exemplo, a massa específica aparente seca, utilizada como parâmetro determinante na definição da condição ótima de compactação dos solos. Os resultados obtidos se mostraram promissores, indicando que os mecanismos de compactação das misturas solo-emulsão são significativamente diferentes daqueles ligados à compactação dos solos de uma forma geral.

Palavras-chave: Solo-emulsão. Barragem de terra. Compactação.

ABSTRACT

This work aims to evaluate the compaction process and dosing of soil-emulsion mixtures. The methodology used in this work initially comprised the collection of the studied materials, specifically sandy soil samples (silty fine-grained sand) and asphalt emulsion. Then mixtures of different proportions of soil and asphalt emulsion were defined, with the contents of emulsion ranging between 13% and 31% relative to the soil mass. The mixtures were compacted using Marshall and Proctor (standard and modified) compaction methods, and the physical indexes that best represent the conditions of compaction of the mixtures were also defined. The results revealed that the compaction of soil-emulsion mixture show better results when done with high compaction energies. Another important aspect to be mentioned is that the compaction of soil-emulsion mixtures is not affected by the moisture content, but the main influential factors are the compaction energy and the asphalt emulsion content in the mixture. Furthermore, it was observed that, when the physical parameters usually applied in the dosing process of asphalt mixtures for compaction procedures, such as bulk density, void ratio, bitumen-void ratio, are used, they better represent the structure variation of the compacted mixture according to the emulsion content along the compaction, than, for example, the dry bulk density, used as a determining parameter to define the optimum condition of soil compaction. In general, the results were promising, indicating that the mechanisms of compaction for soil-emulsion mixtures are significantly different from those connected to the compaction of soils in general.

Keywords: Soil-emulsion. Earth dam. Compaction.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	– Barragem principal UHE Foz do Chapecó: (a) Vista de jusante e (b) Detalhes construtivos do núcleo asfáltico	26
Figura 2.2	– Esquema do processo industrial de fabricação de emulsão asfáltica: fase aquosa acidificada com emulsificantes aminados	30
Figura 2.3	– Vista microscópica de uma gota de emulsão asfáltica	31
Figura 2.4	– Aspecto visual da emulsão asfáltica antes da ruptura	32
Figura 2.5	– Distribuição das cargas elétricas em uma emulsão asfáltica do catiônica	33
Figura 2.6	– Revestimento da RJ-148, construída em 1979, com base de solo-emulsão	37
Figura 2.7	– Componentes e estrutura da mistura solo-emulsão	39
Figura 2.8	– Solos SC e SM, estabilizados com 8% de emulsão RL-1C, ampliados em 1.000x	48
Figura 2.9	– Solo GC estabilizado com 8% de emulsão RL-1C, ampliado em 1.000x	49
Figura 3.1	– Localização da área de coleta da amostra de solo para a confecção das misturas solo-emulsão	55
Figura 3.2	– Vista no nível do terreno da área de coleta do solo no campus da UFC	55
Figura 3.3	– Equipamento de Fluorescência de raios X Rigaku (ZSX Mini II)	58
Figura 3.4	– Difratorômetro de Raios X, Panalytical, modelo XPert Pro MPD	60
Figura 3.5	– Etapas das Mistura Solo-Emulsão	62
Figura 3.6	– Procedimento manual para definição do teor de emulsão inicial nas misturas solo-emulsão estudadas	63
Figura 3.7	– Detalhe do estereoscópio de pesquisa utilizado	69
Figura 4.1	– Aspecto visual do comportamento da água na mistura solo-emulsão	85
Figura 4.2	– Expulsão da água durante o processo de compactação para o 5º teor de água do procedimento PMA de compactação	86
Figura 4.3	– Estrutura das misturas solo-emulsão compactadas utilizando-se a metodologia Marshall com teor de emulsão igual a 13%	88
Figura 4.4	– Estrutura das misturas solo-emulsão compactadas utilizando-se a metodologia Marshall com teor de emulsão igual a 31%	89

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 2.1	–	Curvas de compactação com energia Proctor normal para o solo SC, com e sem a adição da emulsão	42
Gráfico 2.2	–	Curvas de compactação com energia Proctor normal para o solo SM, com e sem a adição da emulsão	42
Gráfico 2.3	–	Curvas de compactação com energia Proctor normal para o solo GC, com e sem a adição da emulsão	43
Gráfico 2.4	–	Curvas de compactação do solo ML e misturas com e sem aeração	44
Gráfico 2.5	–	Resultados de ensaios de ISC após imersão em água com aeração	46
Gráfico 2.6	–	Resultados de ensaios de ISC sem imersão em água, com aeração	46
Gráfico 4.1	–	Curva granulométrica do solo	72
Gráfico 4.2	–	Curva de compactação do solo	73
Gráfico 4.3	–	Difratograma das amostras de solo ensaiadas	75
Gráfico 4.4	–	Variação da massa específica aparente seca do solo e das misturas solo-emulsão	77
Gráfico 4.5	–	Compactação imediata e 24 horas após a mistura na energia Proctor Normal	78
Gráfico 4.6	–	Influência da energia de compactação nos valores da massa específica aparente das misturas solo-emulsão	79
Gráfico 4.7	–	Variação do volume de vazios (Vv) com o teor de emulsão, para as diferentes energias de compactação utilizadas	79
Gráfico 4.8	–	Variação de VGM com o teor de emulsão, para as diferentes energias de compactação utilizadas	80
Gráfico 4.9	–	Variação dos resultados da compactação PM24	82
Gráfico 4.10	–	Variação dos resultados da compactação M24	82
Gráfico 4.11	–	Curvas de compactação das misturas M24 e MQ	83
Gráfico 4.12	–	Variação de Vv das misturas M24 e MQ	83
Gráfico 4.13	–	Variação de VGM das misturas M24 e MQ	84
Gráfico 4.14	–	Massa específica aparente resultante do procedimento PMA de compactação	86
Gráfico 4.15	–	Percentagem de vazios em relação ao grão mineral resultante do procedimento PMA de compactação	87
Gráfico 4.16	–	Percentagem de vazios em relação ao grão mineral resultante do procedimento PMA de compactação	87

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Aplicações das emulsões asfálticas	34
Tabela 2.2 – Características das emulsões catiônicas modificadas por polímeros elastoméricos	35
Tabela 2.3 – Características das emulsões asfálticas para a pavimentação	36
Tabela 2.4 – Resumo dos estudos realizados sobre a estabilização dos solos com emulsão asfáltica	40
Tabela 3.1 – Resumo dos procedimentos adotados para a compactação das misturas solo-emulsão	65
Tabela 4.1 – Propriedades geotécnicas da amostra de solo	73
Tabela 4.2 – Resultados das análises químicas no solo	74
Tabela 4.3 – Elementos químicos presentes na composição do solo utilizado na confecção das misturas	75

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AD	Asfalto diluído
ANDA	Associação Nacional para Difusão de Adubos
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CAP	Cimento asfáltico de petróleo
CBDB	Comitê Brasileiro de Barragens
CBR	<i>California Bearing Ratio</i>
CBUQ	Concreto betuminoso usinado a quente
CCA	Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Ceará
CCR	Concreto compactado a rolo
CL	Argila de baixa plasticidade
CNP	Conselho Nacional de Petróleo
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CTC	Capacidade de troca catiônica
DRX	Difração de raios X
EA	Emulsões asfálticas.
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
FURNAS	Furnas Centrais Elétricas S.A.
GC	Pedregulho argiloso
ICOLD	<i>International Committee on Large Dams</i>
ISC	Índice de Suporte Califórnia
LA	Lama Asfáltica
LA'	Areia laterítica
LG'	Argila laterítica
LMSP	Laboratório de Mecânica dos Solos e Pavimentação
M24	Compactação por Marshall 24 horas após a mistura
MB	Normas relacionadas a métodos de ensaios da ABNT
ME	Método de Ensaio
ML	Silte de baixa plasticidade
MO	Matéria Orgânica
MQ	Compactação por Marshall feita com emulsão asfáltica a quente

NA'	Areia não-laterítica
NBR	Normas brasileira de referência
NG'	Argila não-laterítica
NL	Solo não-líquido
NP	Solo não-plástico
pH	Potencial hidrogeniônico
PM24	Compactação por Proctor Modificado 24 horas após a mistura
PMA	Compactação por Proctor Modificado com adição de água
PMQ	Compactação por Proctor Modificado com emulsão asfáltica a quente
PN24	Compactação por Proctor Normal 24 horas após a mistura
PNI	Compactação por Proctor Normal imediatamente após a mistura
PNQ	Compactação por Proctor Normal com emulsão asfáltica a quente
RL	Emulsão asfáltica de Ruptura Lenta
RM	Emulsão asfáltica de Ruptura Média
RR	Emulsão asfáltica de Ruptura Rápida
RSC	Resistência à compressão simples
SC	Areia argilosa
SM	Areia siltosa
SIRGAS	Sistema de referência geocêntrico para as Américas (<i>datum</i>)
SUCS	Sistema Unificado de Classificação dos Solos
UFC	Universidade Federal do Ceará
UHE	Usina Hidrelétrica
UnB	Universidade de Brasília
UTM	Sistema de coordenadas Universal Transversa de Mercator

LISTA DE SÍMBOLOS

1C	Emulsão asfáltica de menor viscosidade
2C	Emulsão asfáltica de maior viscosidade
Al%	Percentagem de Saturação com Alumínio
Al ³⁺	Íon alumínio
B%	Percentagem de betume na amostra
Ca ²⁺	Íon cálcio
cmol _c /kgm	Centimol de carga por quilograma, unidade de medida molar
Co	Cobalto
Counts	Unidade de medida de feixes difratados (na difração de raios X)
CU _{sat}	Ensaio triaxial do tipo consolidado não-drenado
d	Densidade aparente
d _b	Densidade do betume
d _s	Densidade do solo
D _t	Densidade máxima teórica,
E%	Teor de emulsão
H ⁺	Íon de hidrogênio
K ⁺	Íon de Potássio
KCl	Cloreto de Potássio
kPa	Quilopascal, unidade padrão de pressão e tensão
kV	Quilovolt, unidade de medida de tensão elétrica
μm	Micrômetro
M	Massa do corpo de prova
mA	Miliampère
M _{ar}	Massa do corpo de prova ao ar
Mg ²⁺	Íon de Magnésio
M _i	Massa do corpo de prova imerso
Na ⁺	Íon de Sódio
NaOH	Hidróxido de Sódio
θ	Ângulo de variação horizontal e vertical de emissão do feixe de luz, efetuando a varredura do objeto analisado na difração de raios X
ρ	Massa específica aparente

ρ_d	Massa específica seca
Pa-s	Pascal-segundo, unidade de medida de viscosidade
pH_{H_2O}	pH em água
pH_{KCl}	pH em cloreto de potássio
S	Soma das bases
S%	Percentagem de solo na amostra
Sol%	Teor de solvente na presente na emulsão (%), em peso
T	Capacidade de Troca de Cátions Total
V	Volume do corpo de prova
Va	Volume do corpo de prova
VAM	Percentagem de volume de vazios no agregado mineral
VB	Percentagem de volume de betume
VGM	Percentagem de vazios em relação aos grãos minerais
Vv	Percentagem de volume de vazios
V%	Percentagem de Saturação de Bases
W%	Teor de umidade
w_1	Umidade no cálculo do peso específico aparente seco, considerando o material asfáltico como sólido

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	19
1.1	Motivação da pesquisa	19
1.2	Objetivos da pesquisa	21
1.2.1	<i>Objetivo geral</i>	21
1.2.3	<i>Objetivos específicos</i>	21
1.3	Metodologia empregada	22
1.4	Estrutura do trabalho	23
2	REVISÃO BIBLIOGRAFICA	24
2.1	Introdução	24
2.2	Breve histórico das barragens com núcleo asfáltico	24
2.3	Experiências brasileiras de construções de barragens com material asfáltico	25
2.4	Vantagens da utilização do material asfáltico em barragens	26
2.5	Materiais asfálticos	28
2.5.1	<i>Betume e asfalto</i>	28
2.5.2	<i>Emulsões asfálticas</i>	30
2.6	Misturas solo-emulsão	36
2.6.1	<i>Compactação e dosagem das misturas solo-emulsão</i>	40
2.6.2	<i>Resistência ao cisalhamento das misturas solo-emulsão</i>	44
2.6.3	<i>Influência no Índice de Suporte Califórnia</i>	44
2.6.4	<i>Resistência à compressão simples das misturas solo-emulsão</i>	47
2.6.5	<i>Microestrutura das misturas solo-emulsão</i>	48
2.6.6	<i>Influência da adição de emulsão na permeabilidade do solo</i>	50
2.7	Principais fatores que influenciam a estabilidade betuminosa	51
2.8	Considerações Parciais	53
3	MATERIAIS E MÉTODOS	54
3.1	Introdução	54
3.2	O solo empregado no estudo das misturas solo-emulsão.....	54
3.2.1	<i>Amostragem dos solos</i>	54
3.2.2	<i>Caracterização geotécnica e classificação do solo</i>	56

3.2.3	<i>Caracterização química do solo coletado</i>	56
3.2.4	<i>Caracterização mineralógica do solo</i>	57
3.2.4.1	<i>Fluorescência de raios X</i>	57
3.2.4.2	<i>Difração de raios X</i>	58
3.3	A emulsão asfáltica empregada na mistura solo-emulsão	60
3.4	Misturas solo-emulsão	60
3.4.1	<i>Procedimentos de mistura do solo com a emulsão asfáltica</i>	61
3.4.2	<i>Determinação dos teores de emulsão das misturas solo-emulsão</i>	62
3.4.3	<i>Ensaio de compactação</i>	63
3.4.4	Índices físicos utilizados nos estudos de compactação das misturas solo-emulsão	66
3.4.4.1	<i>Massa específica seca</i>	66
3.4.4.2	<i>Massa específica aparente</i>	67
3.4.4.3	<i>Densidade aparente</i>	67
3.4.4.4	<i>Densidade máxima teórica</i>	67
3.4.4.5	<i>Percentagem de volume de vazios</i>	68
3.4.4.6	<i>Percentagem de volume de betume</i>	68
3.4.4.7	<i>Percentagem de vazios em relação aos grãos minerais</i>	69
3.4.5	<i>Visualização da estrutura das misturas solo-emulsão compactadas</i>	69
3.5	Considerações parciais	70
4	APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS	71
4.1	Introdução	71
4.2	Caracterização do solo utilizado na confecção das misturas solo-emulsão	71
4.2.1	<i>Caracterização geotécnica e classificação</i>	71
4.2.2	<i>Caracterização química do solo</i>	73
4.2.3	<i>Caracterização mineralógica</i>	74
4.3	Emulsão asfáltica	76
4.3.1	<i>Caracterização mineralógica</i>	74
4.4	Compactação das misturas solo-emulsão	76
4.4.1	<i>Influência da ruptura da emulsão na compactação das misturas solo-emulsão</i>	76
4.4.2	<i>Influência da energia de compactação</i>	78

4.4.3	<i>Estudo da variabilidade dos índices físicos representativos da compactação solo-emulsão</i>	81
4.4.4	<i>Influência da temperatura do filme betuminoso na compactação das misturas solo-emulsão</i>	83
4.4.5	<i>Verificação da ação da água como agente lubrificante nas misturas solo-emulsão</i>	84
4.4.6	<i>Visualização da estrutura solo-emulsão</i>	88
4.5	Considerações parciais	89
5	CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE PESQUISA	90
5.1	Conclusões	90
5.1.1	<i>Caracterização química, geotécnica e mineralógica do solo</i>	90
5.1.2	<i>Compactação das misturas solo-emulsão</i>	90
5.1.3	<i>Visualização da estrutura compactada das misturas solo-emulsão</i>	91
5.2	Sugestões para pesquisas futuras	91
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS	93

1 INTRODUÇÃO

1.1 Motivação da pesquisa

A escolha da seção típica de um barramento depende, dentre outros fatores, do tipo de fundação, da geologia e topografia locais, e da disponibilidade de materiais com características geotécnicas adequadas e em quantidade suficiente para a execução da obra.

É comum ocorrer, em algumas situações de campo, a escassez de jazidas de empréstimo com materiais de características adequadas para a construção da barragem que estejam localizadas próximo ao sítio da obra, o que leva à necessidade de se buscar jazidas mais distantes (com aumento dos custos financeiros) ou, ainda, novas jazidas, implicando no enfrentamento de todo o processo de obtenção de licenças ambientais para sua correta exploração. Uma outra opção é o emprego de materiais mais caros, tais como o concreto compactado a rolo (CCR), os enrocamentos e as misturas betuminosas (concreto asfáltico), podendo, inclusive, chegar a afetar, de modo mais contundente, a viabilidade econômica da obra.

Restrições, quantitativas ou qualitativas, quanto à disponibilidade de materiais adequados para a execução de maciços de terra, fazem com que desponte a necessidade de se desenvolver metodologias técnica e economicamente mais apropriadas, assim como de se utilizar novos materiais, que confirmem ao barramento condições satisfatórias de impermeabilização, resistência e deformabilidade. Além disto, mesmo quando existe a disponibilidade de material de empréstimo para execução do maciço, preocupações de cunho ambiental impulsionam a busca por alternativas eficientes e que provoquem o mínimo de degradação ao meio ambiente.

A tecnologia de execução de barragens tendo as misturas betuminosas como único elemento de vedação já é bastante consolidada na Europa, mas os estudos a respeito do potencial de aplicação desta técnica no Brasil são relativamente recentes. Como exemplo, pode ser citada a parceria entre a Universidade de Brasília (UnB) e Furnas Centrais Elétricas S.A. (FURNAS), que, em 2003, deram início a um projeto cujo objetivo era estudar a aplicação de misturas betuminosas à impermeabilização de maciços de barragens. Os principais resultados desses estudos foram apresentados por Falcão (2003), Jacintho (2005), Falcão (2007), Jacintho (2010) e Guimarães (2012).

Diante da necessidade premente de que as obras de barragens sejam tecnicamente adequadas, economicamente viáveis e com o menor impacto ambiental possível, estudos acerca

de materiais não convencionalmente utilizados em barragens brasileiras se tornam bastante atrativos.

Neste sentido, a proposta de utilização da estabilização solo-emulsão em barragens se configura em alternativa bastante promissora, dada a crescente dificuldade de exploração de áreas para empréstimo de materiais com características apropriadas para o emprego em núcleos impermeáveis de barragens zonadas (JACINTHO, 2005, 2010).

Jacinto (2005) cita como possíveis vantagens da técnica de estabilização de solos com emulsão asfáltica para emprego em barragens:

- (a) aumento das opções de materiais utilizáveis na execução de barragens, como, por exemplo, a utilização de solos de aluvião de rio em núcleos de impermeabilização, alternativa até então não considerada em razão da granulometria deste tipo de solo;
- (b) a utilização de equipamentos simples, comumente encontrados em obras de engenharia, para a confecção da mistura e sua compactação em campo;
- (c) possibilidade da redução da espessura do núcleo impermeável do barramento, gerando economia e menor impacto ambiental, resultado da exploração de uma área menor de jazidas naturais; e
- (d) diminuição das distâncias de transporte, devido à utilização de materiais que antes não satisfariam às condições exigidas de permeabilidade e/ou resistência.

Pesquisas relacionadas à estabilização de solos com emulsão asfáltica para aplicação na área de pavimentação são poucas, como exemplos pode-se citar: Pessoa (2004), Miceli Jr. (2006), Soliz (2007), Gondim (2008), Sampaio (2008), Rebelo (2009), Sant'ana (2009), Pacheco (2011), dentre outros. As misturas asfálticas tem especial importância em pavimentação, pois são a principal forma de revestimento de rodovias em todo o mundo, em função de suas vantagens relacionadas à durabilidade, impermeabilidade, ação coesiva e capacidade de resistir às ações de ácidos, sais e álcalis.

De uma forma geral, estudos sobre o uso de materiais betuminosos em obras de barragens são mais direcionados a barramentos com núcleo impermeável composto por misturas asfálticas do tipo CBUQ (concreto betuminoso usinado a quente), a exemplo de Falcão (2003), Guimarães (2012), Melo (2012) e Ramos (2009).

No caso específico das misturas solo-emulsão em obras de barragens, poucos são os estudos realizados no Brasil, muitos deles ainda inconclusivos ou deixando de abordar aspectos importantes, tais como, por exemplo, os mecanismos de compactação apropriados ao tipo particular de material empregado.

Esta gama de resultados inconclusivos muito provavelmente é resultante do teor de emulsão normalmente utilizado, sempre menor que 8%. É possível que este teor de emulsão utilizado não seja suficiente para dar ao material as características pretendidas para uso em barragens.

Por se tratar de um material inteiramente novo para o emprego em barragens, a mistura solo-emulsão, sendo um compósito, pode apresentar, por exemplo, mecanismos de compactação diferentes daqueles responsáveis pela compactação dos solos.

Disto resulta que se faz necessário um estudo prévio da melhor técnica de compactação, assim como a definição do procedimento de dosagem das misturas solo-emulsão, o que deve ocorrer antes mesmo da avaliação de qualquer propriedade geotécnica. Assim sendo, o entendimento dos mecanismos de compactação e do procedimento de mistura é o ponto de partida para a compreensão do comportamento das misturas solo-emulsão e das demais propriedades deste material.

1.2 Objetivos da pesquisa

1.2.1 *Objetivo geral*

Este trabalho tem por finalidade a avaliação do processo de compactação e dosagem das misturas solo-emulsão.

1.2.2 *Objetivos específicos*

Como objetivos específicos deste trabalho podem ser citados:

- (a) avaliar procedimentos de preparação e compactação de misturas solo-emulsão em laboratório;
- (b) definir a metodologia de compactação mais adequada para a mistura solo-emulsão;
- (c) estudar os mecanismos de interação entre o solo e emulsão asfáltica, por meio de análises químicas e mineralógicas do solo;

- (d) avaliar a influência do material betuminoso (emulsão asfáltica) no mecanismo de compactação das misturas solo-emulsão, em comparação com o mecanismo de compactação dos solos;
- (e) avaliar a influência da temperatura das misturas no processo de compactação.

1.3 Metodologia empregada

A primeira etapa deste trabalho foi a pesquisa bibliográfica em livros, teses, artigos, normas técnicas etc. O objetivo era melhor compreender as abordagens de diferentes autores em relação ao tema proposto, obtendo, assim, informações que servissem de base para o desenvolvimento da metodologia empregada, bem como para as análises e interpretação dos dados.

Devido à escassez de literatura disponível, surgiu aqui a dificuldade de obtenção de material bibliográfico a respeito da aplicação da técnica de estabilização de solo-emulsão em projetos de barragens. Desta forma, grande parte dos dados obtidos foi interpretada e avaliada principalmente a partir de estudos da aplicação de solo-emulsão na área de pavimentação.

Para a realização deste estudo, o tipo de solo utilizado foi definido a partir das características geotécnicas consideradas apropriadas para execução do núcleo de uma barragem, sendo o mesmo um material considerado inadequado para este fim, de fácil obtenção no sítio escolhido para a obra. Outra característica buscada no solo a ser empregado nesta pesquisa foi sua classificação como expurgo.

Os materiais coletados (solo e emulsão asfáltica) foram submetidos à caracterização individual, e posteriormente, foi realizada a definição dos processos de mistura e de compactação do solo-emulsão. A emulsão asfáltica foi submetida aos ensaios de caracterização, e o solo, aos ensaios geotécnicos convencionais, de caracterização química e mineralógica, para uma avaliação satisfatória dos fatores que influenciam o tipo de mistura e o processo de compactação das amostras de solo-emulsão.

Em seguida, foram realizados: a confecção das misturas solo-emulsão, os ensaios de compactação e a visualização da microestrutura compactada, esta efetuada com o auxílio de um estereoscópio eletrônico. As compactações foram executadas em grupos com características distintas no que diz respeito: ao tempo decorrido após o procedimento de mistura, à energia de compactação empregada, à temperatura e à adição de água às amostras.

Os parâmetros físicos utilizados para a avaliação da compactação das misturas solo-emulsão foram os tradicionais parâmetros empregados nos ensaios de compactação Proctor, a

saber: massa específica aparente seca (ρ_d) e teor de umidade, e alguns dos parâmetros físicos tradicionalmente utilizados nos procedimentos de dosagem das misturas asfálticas: massa específica aparente (ρ), percentagem de volume de vazios (V_v), percentagem de vazios em relação aos agregados minerais (VAM).

1.4 Estrutura do trabalho

Este trabalho foi dividido em cinco capítulos. No Capítulo 1, o tema investigado foi apresentado de forma resumida, evidenciando o objeto de estudo, assim como a justificativa da escolha do referido tema, e os objetivos, metodologia e estrutura geral adotados para o trabalho.

No Capítulo 2, é apresentada a Revisão Bibliográfica, abordando os variados pontos de vista sobre o tema de diferentes autores, as definições e classificações sobre os materiais asfálticos, e também considerações importantes relacionadas ao desenvolvimento do estudo.

No Capítulo 3, Materiais e Métodos, é descrita a metodologia de ensaio adotada para a caracterização dos materiais utilizados, bem como os procedimentos de mistura do solo à emulsão asfáltica e de compactação da mesma, apresentando também os índices físicos utilizados na avaliação da estrutura compactada.

No Capítulo 4, são apresentados os resultados obtidos nos ensaios realizados com os materiais estudados, e uma análise destes, fornecendo elementos essenciais para as conclusões do trabalho.

No Capítulo 5, são apresentadas as principais conclusões obtidas com a metodologia empregada, além de sugestão para futuros trabalhos que possam complementar a presente pesquisa. E por último, são apresentadas as referências bibliográficas citadas no texto.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Introdução

O presente capítulo apresenta o histórico e a técnica de construção de barragens de núcleo asfáltico, descrevendo as vantagens deste método construtivo e alguns conceitos básicos sobre materiais betuminosos, seu processo de formação e sua composição química. Também são explicitadas as observações e princípios mais importantes relativos à estabilização de solo com emulsão asfáltica.

O capítulo foi dividido em três principais assuntos: o histórico acerca da utilização de materiais asfálticos como elemento de vedação de barragens, as experiências brasileiras com utilização deste tipo de tecnologia e as principais vantagens da construção de barragens com núcleo asfáltico.

São descritos ainda algumas considerações básicas a respeito de materiais betuminosos, tipos de emulsão, sua composição química e processo de formação. Por último, são apresentados conceitos sobre misturas solo-emulsão, avaliando critérios de estabilização de solos utilizando emulsão asfáltica.

2.2 Breve histórico das barragens com núcleo asfáltico

Historicamente, foram as dificuldades de obtenção de materiais adequados para a construção de barragens que propiciaram o desenvolvimento de novas tecnologias no que se refere à estabilização de materiais granulares, conferindo a eles as propriedades de resistência e estanqueidade necessárias ao seu aproveitamento.

Dantas Neto (2001) e Guimarães (2012) afirmaram que o emprego de materiais asfálticos na construção e impermeabilização de barragens data de, pelo menos, cinco mil anos. Segundo relata Melo (2012), no ano de 1.300 a.C., foi construída, na Antiga Mesopotâmia, a barragem de Assur, uma das primeiras obras de barramento a empregar um tipo de concreto asfáltico primitivo como elemento de vedação.

Segundo o Boletim 114 do *International Committee on Large Dams* (ICOLD), a utilização de materiais asfálticos como elemento impermeabilizante se deu em 1910, com a construção da Barragem Central nos Estados Unidos (CBDB, 1999 *apud* Guimarães, 2012).

Segundo Sousa Neto (2013), na década de 1950, os núcleos de concreto asfáltico executados em barragens de terra consistiam apenas de uma medida de segurança adicional nas obras. Na Noruega, somente em 1970, devido à escassez de jazidas de argilas, é que tiveram

início os estudos mais aprofundados sobre este tipo de tecnologia. Atualmente, cinco das seis grandes barragens ali construídas possuem núcleo de concreto asfáltico, sendo a Barragem de Storglomvatn, localizada no estreito Svartisen, na região norte do país, a maior delas, com 125 m de altura, e um núcleo asfáltico de 0,95 m de espessura na base, que gradualmente se estreita até 0,5 m na crista.

Desde então, o uso de materiais betuminosos como elementos impermeabilizantes em barragens começou a se disseminar nos países da Europa, em especial na Alemanha, Noruega e Itália. O bom comportamento desses tipos de barramentos levou outros países, além daqueles já citados, a aprimorarem e utilizarem essa tecnologia. Atualmente, existem mais de 100 barragens construídas com núcleo de concreto asfáltico ao redor do mundo (FALCÃO, 2003; GUIMARÃES, 2012; SOUZA NETO, 2013).

2.3 Experiências brasileiras de construção de barragens com material asfáltico

No Brasil, a utilização da tecnologia com núcleo de concreto asfáltico em barramentos é bem recente. A primeira barragem deste tipo construída no país foi o reservatório principal da Usina Hidrelétrica (UHE) Foz do Chapecó, localizada no Rio Uruguai, na divisa entre os Estados de Santa Catarina e Rio Grande do Sul. Esta barragem possui altura média de 48 m, e um núcleo asfáltico com 0,55 m de espessura (GUIMARÃES, 2012; MELO, 2012). A Figura 2.1, mais adiante, mostra a vista da barragem principal UHE Foz do Chapecó, com alguns detalhes do processo executivo do núcleo asfáltico.

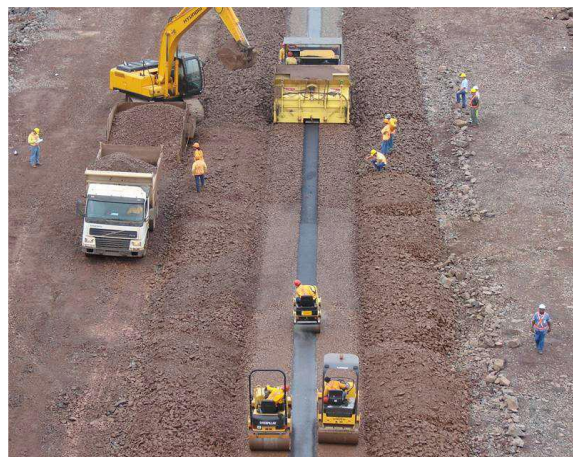
O estudo de viabilidade indicava a opção de construção de uma barragem em concreto compactado a rolo (CCR), o que implicaria em um custo muito alto para o empreendimento. Com o objetivo de otimizá-lo economicamente, fez-se opção pela barragem de enrocamento com núcleo argiloso.

No entanto, devido ao clima da região ser considerado pouco favorável a esse tipo de construção, em razão do regime de precipitações com grande intensidade e constância, a demora na retomada das obras após o período chuvoso representaria um risco ao cronograma, tornando a barragem de enrocamento com núcleo asfáltico a melhor opção (SOUZA NETO, 2013).

Figura 2.1 – Barragem principal UHE Foz do Chapecó:



(a) Vista de jusante da barragem



(b) Execução do núcleo asfáltico

Fonte: Ramalho *et al.* (2013).

Segundo Sousa Neto (2013), o sucesso na construção da UHE Foz de Chapecó motivou o desenvolvimento do projeto da UHE Jirau, para o barramento do rio Madeira. Situada no Estado de Rondônia, na região Amazônica, e com condições climáticas semelhantes às da UHE Foz de Chapecó, a UHE Jirau foi projetada para ter uma altura de 60 m, e núcleo de concreto asfáltico com espessura de 0,60 m. Os detalhes construtivos da UHE Jirau são apresentados por Sousa Neto (2013) e Ramalho *et al.* (2013).

2.4 Vantagens da utilização do material asfáltico em barragens

Uma das vantagens atribuídas às barragens de enrocamento com núcleo asfáltico é a capacidade de cicatrização do núcleo, decorrente do comportamento viscoelástico da mistura asfáltica. Isto torna-se particularmente importante nos casos de maciços que apresentem recalques diferenciais, causados pela compressibilidade da fundação, pela formação do efeito arco (penduramento) ou pela ocorrência de sismos.

Além disso, o uso do núcleo de concreto asfáltico leva vantagem em relação aos núcleos argilosos, no que se refere às operações de terraplenagem necessárias para a execução destes, dificultadas em áreas com forte incidência de chuvas (SOUZA NETO, 2013; RAMALHO *et al.*, 2013).

De acordo com Sousa Neto (2013), a gama e qualidade dos equipamentos utilizados na aplicação do núcleo asfáltico em camadas têm sido gradativamente aperfeiçoadas ao longo dos anos, possibilitando a construção de núcleos com largura entre 0,4 m e 1,5 m, além de ajustes ao longo da construção, quando necessário. Assim, permitem maior mobilidade, redução

dos procedimentos manuais, simplificação do transporte e da carga, aumentando também a produtividade e, conseqüentemente, a qualidade da aplicação do núcleo asfáltico.

Ramalho *et al.* (2013) apontam as seguintes vantagens da escolha de barragens de núcleo asfáltico em relação às barragens de núcleo argiloso:

- (a) sistema simplificado de filtro e transição a jusante, resultando em uma redução na quantidade de material utilizado;
- (b) o núcleo de concreto asfáltico tem maior capacidade de resistir a uma erosão regressiva, em caso de uma eventual deficiência no sistema de filtro e transição; e
- (c) o núcleo asfáltico, por ser mais dúctil, reduz consideravelmente o risco de fissuramento.

Já em relação às vantagens das barragens de núcleo asfáltico em comparação com barragens de face de concreto, Ramalho *et al.* (2013) afirmam que:

- (a) barragens de núcleo asfáltico permitem que ocorra a incorporação da ensecadeira de montante ao corpo do barramento, o que se torna extremamente atraente em termos econômicos e de prazo construtivo, nos casos de ensecadeiras muito altas e/ou muito volumosas;
- (b) barragens de núcleo asfáltico permitem o início do primeiro represamento do reservatório antes mesmo da conclusão da barragem, o que é bem interessante nos casos de reservatórios muito volumosos, que requerem muitos meses para o primeiro enchimento;
- (c) barragens de núcleo asfáltico são alternativas mais econômicas em relação a barragens de face de concreto, uma vez que as estruturas de concreto necessitam da implantação de juntas perimetrais e verticais, tornando a obra mais onerosa e com maior tempo construtivo; e
- (d) barragens de núcleo asfáltico proporcionam a facilidade construtiva de se criar pistas de acesso provisórias ao longo do talude de montante, o que é obviamente inviável no caso de barragens com face de concreto, que restringem os acessos somente ao talude de jusante.

2.5 Materiais asfálticos

2.5.1 Betume e Asfalto

Segundo Balbo (2007), betume pode ser definido como uma substância composta por hidrocarbonetos pesados, com propriedades ligantes, inflamáveis, de elevada viscosidade em temperatura ambiente, que pode ser encontrado na natureza, presente em rochas ou depósitos lacustres (a exemplo dos asfaltos de Trinidad e de Bermudez), ou ser obtido a partir da destilação de petróleo, carvão, madeira ou resinas.

Balbo (2007) relata ainda que, atualmente, a teoria mais aceita para a origem do petróleo é de que o mesmo tem natureza orgânica, sendo gerado pela ação de bactérias anaeróbicas que consumiram os microrganismos do plâncton marinho e, em combinação com a pressão e a temperatura, transformaram-se em hidrocarbonetos, cujas moléculas podem conter de 20 a 30 átomos de carbono. Os hidrocarbonetos pesados constituintes do petróleo bruto são, em sua maioria, ciclanos, ciclano-aromáticos, alcanos, benzoides, contendo também traços de oxigênio, enxofre e outros elementos.

Na análise química do betume, são utilizados métodos modernos como a cromatografia líquida de alto desempenho. A falta de procedimentos universalmente consagrados, associado ao alto custo da tecnologia, a exigência de técnicos altamente especializados e de equipamentos sofisticados, tornam onerosas as análises químicas de asfalto para pavimentação. Em consequência, não existe correlação clara entre a composição química do asfalto e seu desempenho como material de pavimentação (BALBO, 2007; BERNUCCI *et al.*, 2006).

Para Bernucci *et al.* (2006), asfalto é um material betuminoso, proveniente da destilação do petróleo, e que se apresenta como um adesivo termoviscoplastico – semissólido a temperaturas baixas, viscoelástico à temperatura ambiente, e líquido a altas temperaturas –, impermeável à água e pouco reativo. No Brasil, o material é denominado no meio técnico como *cimento asfáltico de petróleo (CAP)*.

Em termos simplificados, o CAP é composto por hidrocarbonetos alifáticos, e no material, desempenham grande importância as frações de asfaltenos e de maltenos. Os asfaltenos são moléculas que não se dissolvem em presença de heptano ou éter, e constituem a parte sólida do CAP, que lhe confere a rigidez e a coloração típica. Os maltenos constituem a parte oleosa do CAP, funcionando como o veículo da “solução” asfáltica, e conferindo a ele propriedades plásticas e de viscosidade (BALBO, 2007).

O CAP, como material ligante ou aglutinante, possui boa aderência aos agregados (exceção feita a minerais argilosos, moscovita e alguns quartzos), além de apresentar propriedades impermeabilizantes, o que torna seu uso bastante popular em engenharia civil sob formas diversas.

O CAP apresenta, favoravelmente a seu uso, propriedades como: flexibilidade, relativa durabilidade e grande resistência à maior parte dos ácidos, sais e álcalis, além de ser insolúvel em água. É, no entanto, um material de comportamento reológico complexo e dependente de temperatura, que se altera sob ação de intempéries, perdendo suas propriedades iniciais, tornando-se mais viscoso e frágil (BALBO, 2007).

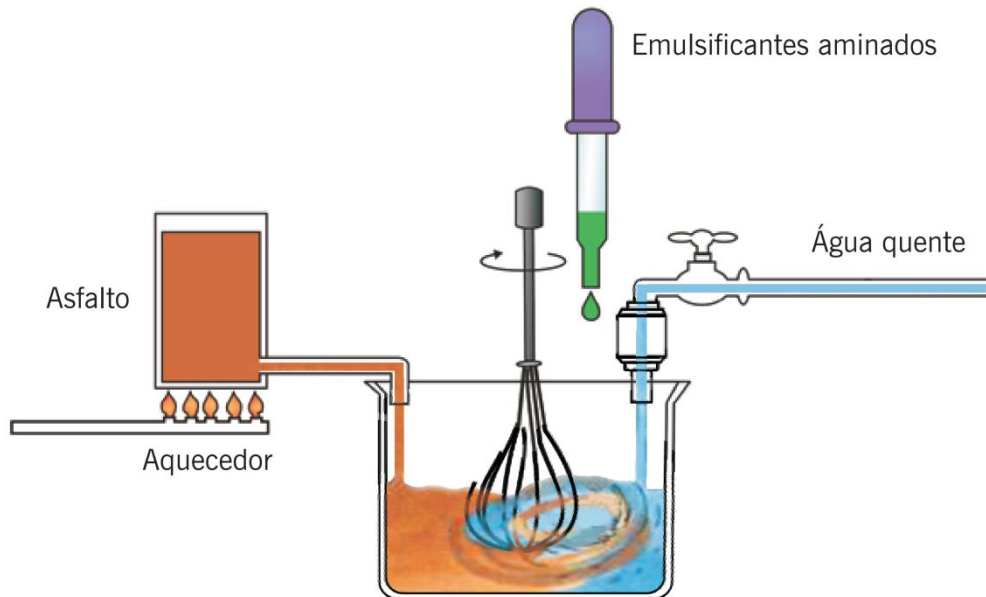
Bernucci *et al.* (2006) relatam que, para o CAP recobrir um agregado, é necessário que apresente uma viscosidade em torno de 0,2 Pa.s, obtida através do aquecimento de ambos (CAP e agregado), ou da modificação de sua consistência por meio de um dos seguintes processos de preparação:

- a) Diluindo-se o CAP em um solvente (nafta, querosene ou óleo diesel), obtendo-se, assim, os asfaltos diluídos (AD); ou
- b) Emulsificando-se o CAP em água, obtendo-se as emulsões asfálticas (EA).

De acordo com Bernucci *et al.* (2006), as emulsões asfálticas são obtidas por meio da ação mecânica de um moinho coloidal, especialmente preparado para a “quebra” do asfalto aquecido em porções minúsculas, que devem ter um tamanho especificado, normalmente variando entre 1 e 20 μ m, dimensões estas que dependem do moinho empregado e da viscosidade do asfalto original.

A Figura 2.2 mostra um exemplo de moinho coloidal. O asfalto aquecido entra no misturador junto com a água, também aquecida, já misturada com o agente emulsificante e com os aditivos e adições particulares, utilizados para obter efeitos diferenciados, tanto em relação ao tempo de separação das fases quanto ao uso final que se pretende para a emulsão produzida.

Figura 2.2 – Esquema do processo industrial de fabricação de emulsão asfáltica: fase aquosa acidificada com emulsificantes aminados.



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

2.5.2 Emulsões asfálticas

Por definição, emulsão é a dispersão de dois ou mais líquidos imiscíveis. Para Bernucci *et al.* (2006) e Suarez (2008), a emulsão asfáltica representa uma classe particular de emulsão óleo-água, pois a fase óleo apresenta uma elevada viscosidade e os dois materiais não formam uma emulsão por simples mistura, sendo necessária a utilização de um produto auxiliar que promova a estabilidade da emulsão formada.

Esse produto auxiliar é chamado de agente emulsionante (ou emulsificante), que tem por objetivo reduzir a tensão superficial da água e se fixar na periferia dos glóbulos de asfalto, fazendo com que permaneçam em suspensão por algum tempo, que pode ser de semanas ou meses, dependendo da formulação da emulsão.

A Figura 2.3 mostra a microscopia de uma gota de emulsão asfáltica, na qual, segundo Gewehr (2012), as pequenas esferas são os glóbulos de betume dispersos em água, devido à ação do emulsificante.

Figura 2.3 – Vista microscópica de uma gota de emulsão asfáltica.



Fonte: Gewehr (2012).

Para Balbo (2007), o emulsificante deve ter afinidade tanto com o asfalto como com a água. Em geral, são utilizados o sal de amina (uma base fraca) ou o sal de amônia, para que a água de dispersão fique livre de íons de cálcio e magnésio, pois eles tendem a reagir com os emulsificantes, formando compostos insolúveis em água. Após a fabricação, as emulsões apresentam uma coloração marrom-escuro e o teor do ligante varia de 60% a 70% em volume.

Balbo (2007) comenta ainda que a viscosidade da emulsão dependerá fundamentalmente da porcentagem de CAP, que é chamada, neste caso, de resíduo do ligante. O processo de separação das esferas de CAP da água é conhecido como ruptura, que é a quebra da estabilidade química do sistema CAP-emulsificante-água. Essa instabilidade é causada pela neutralização das cargas elétricas que mantêm o sistema.

O processo de ruptura é auxiliado também pela evaporação da água presente na emulsão e a coloração inicialmente marrom torna-se preta. A velocidade de ruptura é influenciada por alguns fatores, tais como: tipo e quantidade de emulsificante, quantidade e viscosidade de asfalto, superfície específica dos agregados, temperatura de aplicação, umidade da superfície de aplicação e temperatura dos agregados.

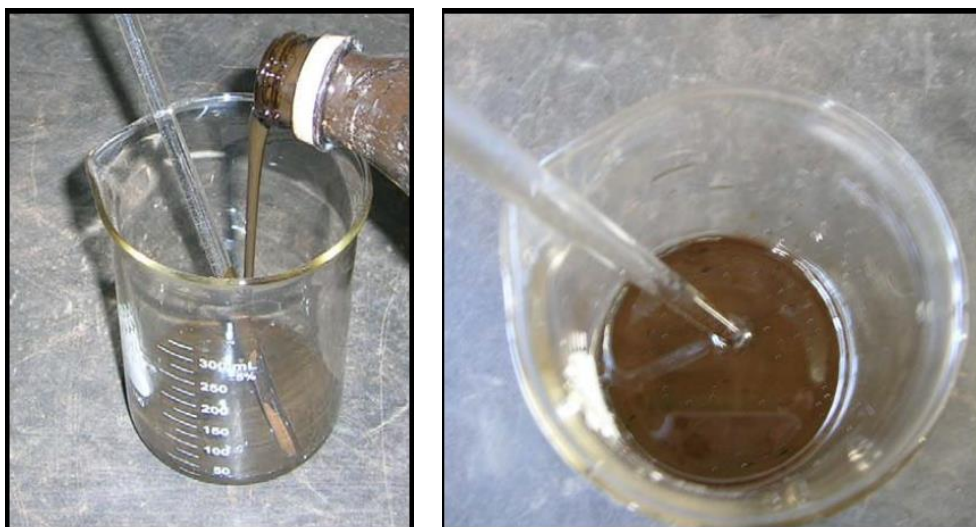
Na Figura 2.4, é possível observar a coloração marrom, típica de uma emulsão antes da ruptura, onde a estabilidade química do sistema CAP-emulsificante-água ainda se mantém.

Em função da velocidade de ruptura, as emulsões são classificadas em três tipos:

- (a) Ruptura Rápida (RR): têm uma porcentagem relativamente baixa de emulsificante e são menos estáveis. Nelas, a água e o ligante se separam logo

- após aplicação sobre o agregado, sendo indicadas para tratamentos superficiais, pinturas de ligação, imprimação e macadames betuminosos;
- (b) Ruptura Média (RM): são utilizadas principalmente para misturas com agregados limpos e sem pó, na confecção de pré-misturados a frio; e
- (c) Ruptura Lenta (RL): utilizadas em estabilizações de solos e no preparo de lamas asfálticas.

Figura 2.4 – Aspecto visual da emulsão asfáltica antes da ruptura.

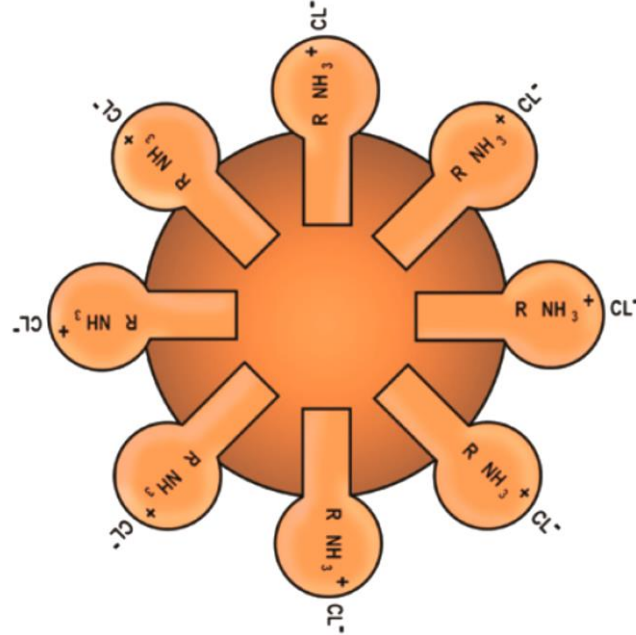


Fonte: Sampaio (2008).

Dependendo do emulsificante utilizado na fabricação, as emulsões asfálticas podem ser aniônicas, quando as partículas de asfalto são carregadas negativamente, ou catiônicas, quando as partículas são carregadas positivamente (ver Figura 2.5).

Santana (1992) comenta que, devido a esta característica química, pensava-se que as emulsões asfálticas aniônicas apresentavam boa adesividade aos agregados eletropositivos, ou seja, rochas de natureza calcária, e as emulsões asfálticas catiônicas, aos agregados eletronegativos, tais como arenitos e granitos, que possuem elevada porcentagem de sílica. No entanto, as emulsões catiônicas tiveram grande aceitação no Brasil em razão de sua boa adesividade, tanto aos agregados eletronegativos quanto aos eletropositivos.

Figura 2.5 – Distribuição das cargas elétricas em uma emulsão asfáltica do catiônica.



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

As emulsões asfálticas são produzidas conforme as exigências para o uso, sendo, no Brasil, encontradas as emulsões convencionais, as emulsões modificadas por polímeros elastoméricos, e as emulsões de ruptura controlada. Na Tabela 2.1, são indicadas as emulsões especificadas no Brasil e suas aplicações correntes em obras de pavimentação.

A Tabela 2.2 mostra as especificações brasileiras para as emulsões asfálticas convencionais e de ruptura controlada, segundo a norma DNIT 165/2013-EM. E a Tabela 2.3 apresenta a especificação para as emulsões asfálticas modificadas por polímeros elastoméricos, segundo a DNIT 128/2010-EM.

Tabela 2.1 – Aplicações das emulsões asfálticas

Tipo	Aplicação
Emulsões convencionais	
RR-1C	Pintura de ligação, tratamento superficiais, macadame betuminoso.
RR-2C	Pintura de ligação, tratamento superficiais, macadame betuminoso.
RM-1C	Pintura de ligação, pré-misturados a frio, areia-asfalto.
RM-2C	Pintura de ligação, pré-misturados a frio, areia-asfalto.
RL-1C	Pintura de ligação, pré-misturados a frio, areia-asfalto, solo-betume.
LA-1C	Lama asfáltica, solo-betume.
LA-2C	Lama asfáltica, solo-betume.
Emulsões modificadas por polímeros elastoméricos	
RR-1C-E	Pintura de ligação.
RR-2C-E	Tratamento superficiais simples, duplos e triplos.
RM-1C-E	Pré-misturados a frio.
RL-1C-E	Areia-asfalto a frio, Lama asfáltica
RC-1C-E	Microrrevestimento asfáltico a frio.
Emulsões de ruptura controlada	
LARC	Lama asfáltica.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2016.

Legenda: LA – Lama Asfáltica; 1C – Menor viscosidade; 2C – Maior viscosidade; E – Elastoméricos; LARC – Lama de ruptura controlada.

Tabela 2.2 – Características das emulsões catiônicas modificadas por polímeros elastoméricos.

Características	Unidade	Limite					Método
		Ruptura Rápida		Ruptura Média	Ruptura Controlada	Ruptura Lenta	NBR
		RR1C-E	RR2C-E	RM1C-E	RC1C-E	RL1C-E	
Ensaio para emulsão							
Viscosidade Saybolt-Furol, s, 50 C	S	70 máx.	100-400	20-200	70 máx.	70 máx.	14491
Sedimentação, máx.	% massa	5					6570
Peneiração 0,84mm, máx.	% massa	0,1					14393
Resistência a água, % min. de cobertura (1)							6300
Agregado seco	%	80					
Agregado úmido		80	80	60	60	60	
Carga da partícula	-	Positiva					6567
pH, máx.	-	-	-	-	6,5	6,5	6299
Destilação – Solvente destilado a 360 c, máx.	% volume	3	3	12	0	0	6568
Resíduo seco, min.	% massa	62	67	62	62	60	14376
Desemulsibilidade, min. máx.	% massa	50	50	-	-	-	6569
		-	-	50	-	-	
Ensaio para o resíduo da emulsão obtido pela NBR 14896							
Penetração a 25 C, 100g, 5s	0,1mm	45-150					6576
Ponto de amolecimento, min.	C	50	55			6560	
Viscosidade Brookfield a 135 C, spindle 21, 20 rpm, min.	cP	550	600				15184
Recuperação Elástica a 25 C, 20 cm, min.	%	65	70			15086	

(1) Se não houver envio de amostra ou informação da natureza do agregado pelo executante, o laboratório deve indicar, no Certificado da Qualidade, a natureza do agregado usado no ensaio.

Fonte: Adaptado, DNIT 128\2010 EM.

Tabela 2.3 – Características das emulsões asfálticas para pavimentação.

Característica	Unidade	Limite									Método de Ensaio (1)	
		Ruptura rápida		Ruptura média		Ruptura lenta				Ruptura controlada	ABNT NBR	DNIT
		RR-1C	RR-2C	RM-1C	RM-2C	RL-1C	RL-2C	LAN	EAI	LARC		
Ensaio para emulsão												
Viscosidade Saybolt-Furol a 25C, máx.	s	90	-	-	-	90	90	90	90	90	14491:2007	
Viscosidade Saybolt-Furol a 50C, máx.	s	-	100-400	20-200	100-400	-	-	-	-	-	14491:2007	
Sedimentação, máx.	% m/m	5	5	5	5	5	5	5	10	5	6570:2010	
Peneiração (0,84 mm), máx.	5 m/m	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	14393:2012	
Resistencia a agua (cobertura), min. (2)	%	80	80	80	80	-	-	-	-	-	14249:2007	
Adesividade em agregado miúdo, min.	%	-	-	-	-	-	75	-	-	75	14757:2001	
Carga da partícula	-	Positiva	Positiva	Positiva	Positiva	Positiva	Positiva	Neutra	-	Positiva	6567:2009	156/2011
pH, máx.	-	-	-	-	-	6,5	-	6,5	8	6,5	6299:2012	
Destilação												
Solvente destilado	% v/v	-	-	0-12	0-12	-	-	-	0-15	-	6568:2005	
Resíduo seco, min.	% m/m	62	67	62	65	60	60	60	45	60	14376:2007	
Desemulsibilidade												
Min.	% m/m	50	50	-	-	-	-	-	-	-	6569:2008	157/2011
Max.	% m/m	-	-	50	50	-	-	-	-	-		
Mistura com filer silício	%	-	-	-	-	máx. 2,0	1,2-2,0	-	-	min. 2,0	6302:2008	
Mistura com cimento	%	-	-	-	-	máx. 2,0	máx. 2,0	-	-	min. 2,0	6297:2012	
Ensaio para resíduo da emulsão obtido pela NBR 14896: 2012												
Penetração a 25C (100g e 5s)	mm	4,0-15,0	4,0-15,0	4,0-15,0	4,0-15,0	4,0-15,0	4,0-15,0	4,0-15,0	-	4,0-15,0	6576:2007	155/2010
Teor de betume, min.	%	97	97	97	97	97	97	97	97	97	14855:2002	
Ductibilidade a 25C	cm	40	40	40	40	40	40	40	40	40	6293:2001	

(1) Os ensaios devem ser realizados pelas normas vigentes e, preferencialmente pelas normas DNIT de métodos de ensaios. (2) Se não houver envio de amostras ou informação da natureza do agregado pelo executante final, o distribuidor/fornecedor deve indicar a natureza do agregado usado no certificado da qualidade.

Fonte: Adaptado, DNIT 128\2010 EM.

2.6 Misturas solo-emulsão

Ferreira (1980) *apud* Gondim (2008) relata que a estabilização betuminosa de solos começou a ser empregada quando engenheiros rodoviários, trabalhando nas proximidades de campos petrolíferos, notaram que ao espalharem óleo cru sobre as estradas de terra conseguiram reduzir o pó existente, tornando-as mais aptas a resistirem aos rigores do tráfego e do intemperismo. Essa prática começou a ser difundida, e com o aprimoramento da técnica, houve a substituição do óleo cru pelo petróleo destilado.

Thuler (2005) relata que, na rodovia RJ-148, uma base foi construída com solo-emulsão por volta de 1979, e que esta, mesmo tendo estado por seis meses sem nenhum revestimento por motivos não-técnicos, apresentou um ótimo comportamento. Após este período, recebeu apenas um revestimento superficial com lama asfáltica. A Figura 2.6 mostra a referida base estabilizada com emulsão após 25 anos de uso, ainda que com o revestimento bastante degradado.

Figura 2.6 – Revestimento da RJ-148, construída em 1979, com base de solo-emulsão.



Fonte: Thuler (2005).

Soliz (2007) relata que estabilização de solo com asfalto começou com a utilização de asfalto diluído de curas rápida e média, posto que as emulsões asfálticas catiônicas foram colocadas à disposição do mercado mundial somente em 1951, na França, pela Esso, marca da *Standard Oil Company*. No Brasil, a Shell lançou, em 1952, as emulsões aniônicas, e somente dez anos mais tarde, as emulsões catiônicas apareceram no mercado nacional. As pesquisas sobre a estabilização de solos com asfalto diluído realizadas nas décadas de 1950 e 1960, não

forneceram informações suficientes que permitissem estabelecer especificações e normas para as misturas de solo com asfalto. No entanto, em 1976, foi iniciado, no Brasil, um programa de construção de rodovias de baixo custo, no qual foi incluído o estudo de estabilização de solo com emulsão asfáltica.

De 2007 a 2010 foram retomados os estudos acerca do uso da técnica do solo-emulsão para a aplicação em rodovias norte nordeste. Foi desenvolvido um projeto intitulado “Avaliação do uso de ligantes betuminosos e rejeitos ambientais para a estabilização de bases e sub-bases de pavimentos asfálticos”. Esse projeto foi financiado pela FINEP/PETROBRAS e contou com a participação da UFC, UFS, UFBA, UEMA e UFAM.

Suarez (2008) descreve que o solo-emulsão é um processo de estabilização pelo qual as propriedades mecânicas e físico-químicas do solo são melhoradas por meio da incorporação de emulsão, proporcionando ao solo as características mecânicas almejadas para determinado uso. A estabilização do solo mediante a adição de emulsão asfáltica pode ser aplicada na construção de barragens, estradas e aeroportos, pois nesses tipos de construções estão envolvidas amplas áreas, onde o aproveitamento do solo local se torna muito importante para a redução das distâncias de transporte.

A principal função do material asfáltico na mistura solo-emulsão é conferir coesão e impermeabilização ao solo com ela estabilizado. Esta elevação da resistência ao cisalhamento de solos arenosos pela estabilização solo-emulsão muito provavelmente está relacionada ao aumento da coesão entre partículas, promovida pelo filme betuminoso que as envolve, além do atrito próprio deste tipo de solos. Porém, acima de determinado teor de asfalto, ocorre o aumento do espessamento do filme betuminoso ao redor das partículas de solo, afastando-as umas das outras, e promovendo, contrariamente, a perda de resistência ao cisalhamento devido a esta redução no atrito interno (SANT’ANA, 2009).

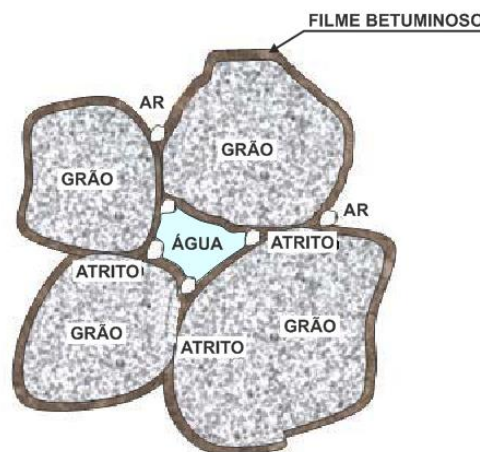
A impermeabilização dos solos, promovida pelo material asfáltico, pode ser explicada por: (a) vedação dos vazios entre os grãos de solo, impedindo o fluxo de água; e (b) formação de um filme de material asfáltico que envolve as partículas de solo, protegendo-as da ação da água. Presume-se que, na realidade, haja uma ação conjunta dos dois mecanismos (SANT’ANA, 2009).

O consenso entre pesquisadores que estudaram a estabilização solo-emulsão é que ela não deve ser adicionada diretamente ao solo seco (e nem com baixo teor de umidade), devendo o mesmo ser umedecido e a emulsão diluída antes do processo de mistura. Esse procedimento tem o objetivo de evitar a ruptura da emulsão antes de sua completa mistura com o solo, garantindo, assim, que ocorra a formação do filme betuminoso ao redor das partículas

de solo (GONDIM, 2008; JACINTHO, 2005, 2010). Entretanto, é possível que o umedecimento do solo ou diluição da emulsão antes do processo de mistura prejudique a adesividade entre os grãos e o ligante residual das misturas solo-emulsão.

A Figura 2.7 mostra a estrutura e os componentes presentes no sistema solo-emulsão. Observa-se que todas as partículas de solo estão igualmente envolvidas por um filme betuminoso, que, acredita-se, promove o aumento da coesão nos contatos grão a grão, favorecendo o aumento da resistência juntamente com o atrito interno já existente no solo. Entretanto, para que ocorra a formação do filme betuminoso de forma satisfatória, além de ser necessário que não haja a ruptura da emulsão antes da completa mistura entre os materiais, o asfalto deve também apresentar condições de adesividade satisfatórias entre os grãos e o ligante.

Figura 2.7 – Componentes e estrutura da mistura solo-emulsão.



Fonte: Adaptado de Kezdi (1979, apud Miceli Jr, 2006).

Caso ocorra ruptura da emulsão antes do envolvimento completo das partículas de solo pelo material betuminoso, haverá a formação de aglomerados (entre os grãos e o asfalto residual) dentro da massa de solo, fazendo com que a mistura solo-emulsão, quando compactada, apresente propriedades diferentes das que apresentaria caso ocorresse a formação adequada do filme betuminoso.

A ocorrência de ruptura antes ou após a mistura deve ser considerada como quesito de extrema importância no estudo das misturas solo-emulsão, pois esta ruptura não é provocada somente pela ausência da água, mas também pela interação química entre o solo e a emulsão. Dependendo dos componentes químicos presentes na mistura, eles podem funcionar como catalisadores do processo de coalescência da emulsão, acelerando a união entre os glóbulos de CAP dispersos no emulsificante, e portanto, influenciar a adesividade do betume aos grãos de solo, o que é de fundamental importância no processo de estabilização da mistura.

De maneira geral, até o presente momento, os estudos e aplicações mais proeminentes sobre estabilizações solo-emulsão foram realizados na área de pavimentação, com os critérios utilizados para a estabilização com solo emulsão sendo, em sua maioria, baseados apenas nas características físicas dos solos, as quais dão um indicativo se um tipo específico de solo tem (ou não) potencial de estabilização com a adição da emulsão asfáltica (MICELI JR., 2006)

Autores como Nascimento *et al.* (2013), Pessoa (2004), Jacintho (2005), Miceli Jr (2006), Gouveia *et al.* (2007), Soliz (2007), Gondim (2008), Sampaio (2008), Suarez (2008), Rebelo (2009), Jacintho (2010), dentre outros, avaliaram, em seus trabalhos, aspectos como a resistência ao cisalhamento, resistência à compressão simples e permeabilidade das misturas, sua influência nos resultados do Índice de Suporte Califórnia, e a microestrutura das misturas solo-emulsão.

A Tabela 2.3 apresenta um resumo dos resultados dos trabalhos dos autores anteriormente citados, a respeito do comportamento das misturas solo-emulsão no que se refere ao tipo de solo, ao tipo e teor de emulsão utilizada, e às condições de ensaio, compreendendo os tipos de dosagem, e os métodos e energias de compactação empregados, com o objetivo de facilitar a compreensão dos resultados apresentados nos itens a seguir.

Tabela 2.4 – Resumo dos estudos realizados sobre a estabilização solo-emulsão.

Autor	Tipo de solo	Tipo de emulsão	Teores de emulsão	Condições de ensaio
Jacintho (2005)	SM, SC, GC	RL-1C	0 a 8%	Corpos de prova compactados com energia Proctor normal, com aeração prévia da mistura, e ensaiados logo após a compactação.
Miceli Jr (2006)	A-2-4 (NA'), A-7-5 (LG'), A-7 (LG')	RM e RL-1C	0 a 8%	Corpos de prova compactados com energia Proctor normal, e submetidos à cura ao ar livre, por 7 e 28 dias.
Gondim (2008)	A-2-4 (NA'), A-4 (LA'), A-4 (NG')	RL-1C	2%, 5% e 8%	Corpos de prova compactados com energia Proctor intermediária, e submetidos a tempos de cura de 7 e 28 dias.
Sampaio (2008)	A-6 (LG'), A-6 (NG'), A-4 (LA')	RL-1C	4 a 8%	Corpos de prova compactados com energia Proctor intermediária, submetidos a 7 dias de cura armazenados

Autor	Tipo de solo	Tipo de emulsão	Teores de emulsão	Condições de ensaio
				em sacos plásticos (preservação da umidade).
Cavalcante <i>et al.</i> (2009)	A-2-4 (SM), A-4 (SC), A-7-6 (CL)	RL-1C	2% e 8%	Corpos de prova compactados com energia Proctor intermediária, submetidos a 7 dias de cura em câmara úmida, e a 4 h de submersão para os ensaios de CBR.
Rebello (2009)	A-4 (ML)	RL-1C	0 a 8%	Corpos de prova compactados com energia Proctor intermediária (com misturas submetidas aos tempos de aeração de 0h e 1h), e submetidos a tempos de cura ao ar livre de 0 e 7 dias.
Jacinto (2010)	SM, SC, CL	RL-1C	0 a 8%	Corpos de prova compactados com energia Proctor Normal, com controle da umidade de compactação (misturas com umidade ótima e umidade do ramo seco), ensaiados logo após a mistura e após os processos de cura em estufa (40°C por 24h), imerso (24h), ao ar (30 dias), e úmida (sacos plásticos e câmara úmida por 30 dias).

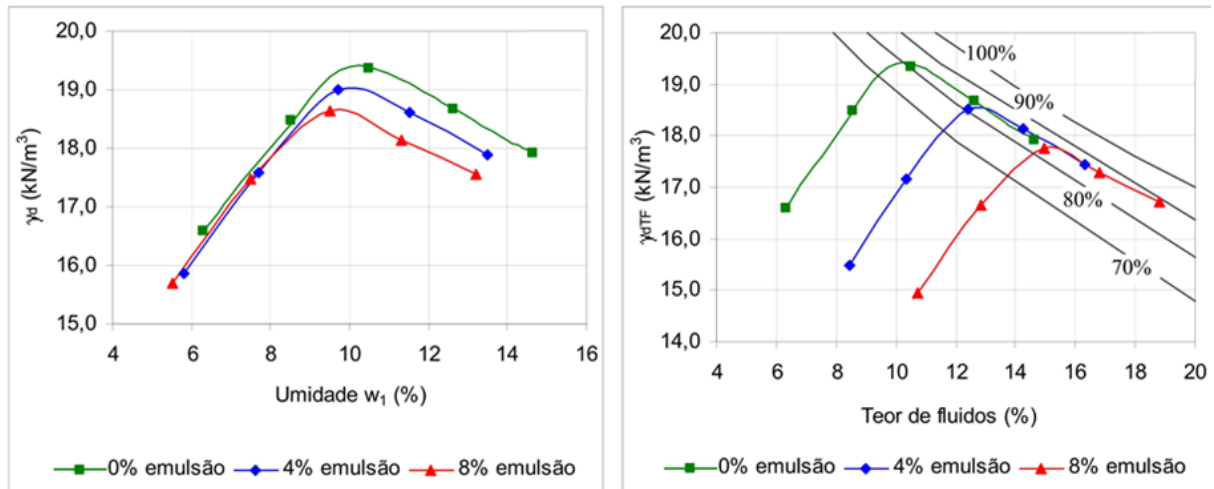
Fonte: Elaborado pela autora.

2.6.1 Compactação e Dosagem das Misturas Solo-Emulsão

Jacinto (2005) determinou curvas de compactação com energia Proctor normal para solos do tipo SC (areia argilosa), SM (areia siltosa) e GC (pedregulho argiloso), com e sem a adição de emulsão (ver Gráficos 2.1 e 2.2). Cada curva foi gerada a partir da variação de umidade para um teor de emulsão constante (0%, 4% e 8%), considerando-se o material asfáltico no cálculo da umidade como um sólido (Gráficos 2.1a e 2.2a), obtendo-se, assim, a umidade w_1 , e como um fluido (Gráficos 2.1b e 2.2b), obtendo-se, neste caso, o teor de fluidos.

A autora verificou que, para o solo SC, o teor umidade ótima da mistura se aproxima do teor de umidade ótima do solo sem a adição de emulsão, e para o caso do solo SM, o teor de umidade ótima da mistura é um pouco inferior ao teor de umidade ótima do solo sem emulsão.

Gráfico 2.1 – Curvas de compactação com energia Proctor normal para um SC (areia argilosa), com e sem a adição da emulsão.

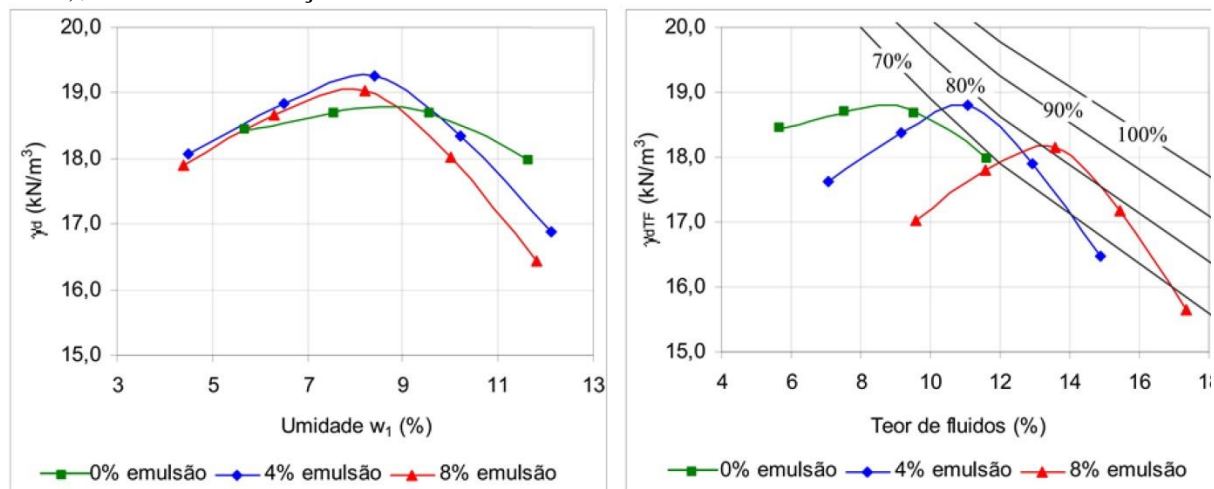


(a) Peso específico aparente seco x Umidade w_1 (%)

(b) Peso específico aparente seco x Teor de fluidos (%)

Fonte: Jacintho (2005).

Gráfico 2.2 – Curvas de compactação com energia Proctor normal para o solo SM (areia siltosa), com e sem a adição da emulsão.



(a) Peso específico aparente seco x Umidade w_1 (%)

(b) Peso específico aparente seco x Teor de fluidos (%)

Fonte: Jacintho (2005).

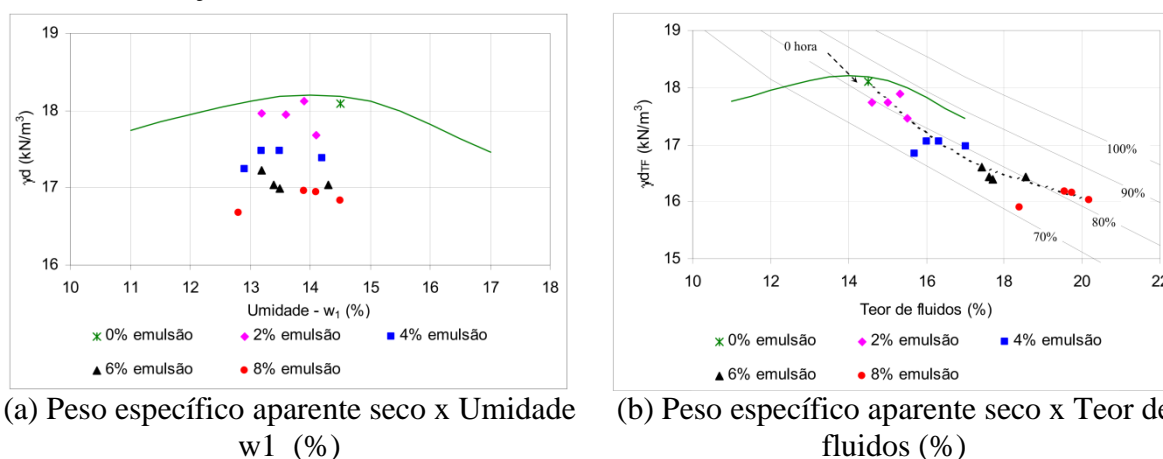
O Gráfico 2.3 apresenta, para o solo GC analisado por Jacintho (2005), os valores de peso específico aparente seco em relação à umidade w_1 (considerando material asfáltico como sólido) (Gráfico 2.3a), e ao teor de fluidos (considerando material asfáltico como fluido) (Gráficos 2.3b), para diferentes teores de emulsão e tempos de aeração.

Para este solo GC por ele analisado, a heterogeneidade do material dificultou o controle do teor de umidade, visto que partículas de tamanhos diferentes têm absorção de água

distintas. Com isto, os pontos apresentaram-se mais dispersos, dificultando a interpretação dos resultados.

Para pontos com mesmo teor de emulsão asfáltica, submetidos a diferentes tempos de aeração, a variação de peso específico aparente seco resultou muito pequena, indicando que o tempo de aeração não interfere de modo significativo nesta propriedade. Muito provavelmente, isto ocorre por que as curvas de compactação para este tipo de solo são bem abertas, em que pequenas variações de umidade não são capazes de afetar de forma significativa o peso específico. Jacintho (2005) observou ainda que, com a adição de emulsão asfáltica, ocorreu uma redução do peso específico aparente seco.

Gráfico 2.3 – Curvas de compactação com energia Proctor normal para o solo GC, com e sem a adição da emulsão.



Fonte: Jacintho (2005).

Jacyntho (2005) observou também que, para os solos SC e GC, a adição de emulsão provocou redução do peso específico aparente seco, e que, no caso do solo SM, ocorreu um aumento do peso específico aparente seco até o teor de 4% de emulsão. Para teores mais altos, o peso específico aparente seco apresentou uma redução.

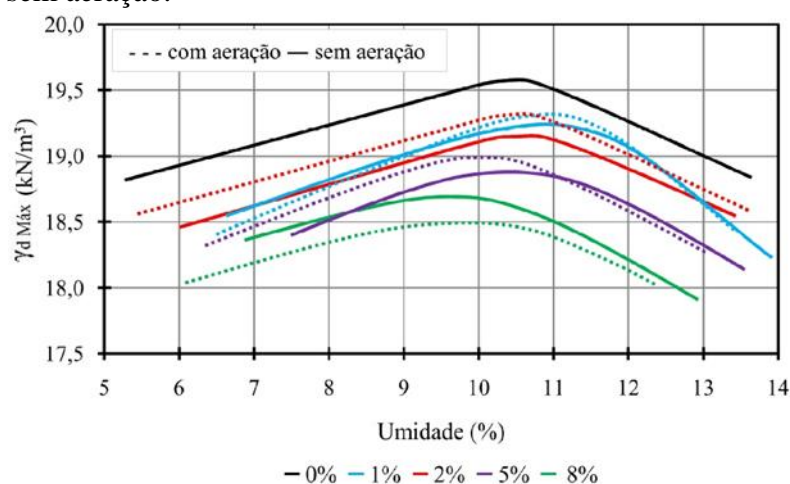
Em síntese, os resultados mostraram que a influência da emulsão no comportamento da mistura depende do tipo de solo, podendo aumentar ou reduzir o peso específico aparente seco, e manter ou reduzir o teor de umidade ótima.

Em suas análises, Gondim (2008) observou não haver um padrão de variação do peso específico seco máximo ou do teor de umidade ótima, com a modificação dos teores de emulsão aplicados. Verificou ainda não existirem correlações entre os padrões de variação dos parâmetros de Proctor e as características físicas, químicas e mineralógicas dos solos estudados, indicando não ser possível prever o comportamento da curva de compactação das misturas solo-emulsão a partir da curva de compactação do solo sem emulsão.

Já Rebelo (2009) observou que a adição da emulsão ao solo do tipo ML (silte de baixa plasticidade) por ele estudado não alterou significativamente o teor de umidade ótima de compactação, com a variação ficando em torno de +/- 0,6% em relação ao teor de umidade ótima do solo sem emulsão.

Os resultados deste autor também mostraram que o acréscimo percentual de emulsão não implicou em mudanças significativas nos valores do peso específico aparente seco, mas que o tempo de 1 h de aeração suscitou alterações discretas nos parâmetros de compactação das misturas (em relação ao solo natural), indicando que a ruptura da emulsão tem sua parcela de contribuição, decorrente da exposição das amostras ao ar livre (Gráfico 2.4).

Gráfico 2.4 – Curvas de compactação do solo ML e misturas com e sem aeração.



Fonte: Rebelo (2009).

As curvas de compactação com e sem aeração das misturas de Rebelo (2009) não apresentaram alterações em sua forma, indicando, assim, que a emulsão não ocasiona modificações na estrutura do solo. Esta conclusão foi, no entanto, antagônica àquelas a que chegaram Jacintho (2005) e Gondim (2008).

2.6.2 Resistência ao Cisalhamento das Misturas Solo-Emulsão

Em relação à resistência ao cisalhamento, Jacintho (2005) observou que o grau de intemperismo do solo utilizado na confecção das misturas solo-emulsão tem influência neste parâmetro. No estudo, foram utilizadas amostras de solo intemperizado e não-intemperizado, e a resistência ao cisalhamento foi aferida por meio de ensaios triaxiais do tipo consolidado não-drenado (CU_{sat}).

Para as amostras de solo SC mais intemperizadas, a adição da emulsão asfáltica ocasionou um ganho maior de coesão e uma redução do ângulo de atrito em relação às amostras não-intemperizadas. Para as amostras do solo residual GC, pouco intemperizadas, não foram constatadas variações nos parâmetros de resistência, em decorrência da adição da emulsão.

Por meio de ensaios triaxiais, Jacintho (2010) obteve os parâmetros de resistência ao cisalhamento dos solos (coesão e ângulo de atrito) para a condição saturada de solos SM (areia siltosa), SC (areia argilosa) e CL (argila de baixa plasticidade). Para o solo SM, a adição da emulsão asfáltica não alterou os valores de coesão e ângulo de atrito. Para o solo SC, a adição de material asfáltico promoveu pequeno aumento do ângulo de atrito (de 35° para 38,2°) e uma redução da coesão (de 10 kPa para 0 kPa), não ficando muito clara a influência da emulsão na resistência ao cisalhamento do solo. Para o solo CL, a adição de emulsão não teve grande influência nos parâmetros de resistência ao cisalhamento.

Considerando estes resultados, é possível notar que a redução da coesão do solo SC com adição de emulsão não condiz com o que seria esperado para um solo naturalmente coesivo que recebeu adição de emulsão asfáltica. Isto aponta para a necessidade de obtenção de mais dados, com outros tipos de solos e condições de ensaio, a fim de obter uma avaliação mais satisfatória da influência da adição de emulsão aos solos na resistência ao cisalhamento.

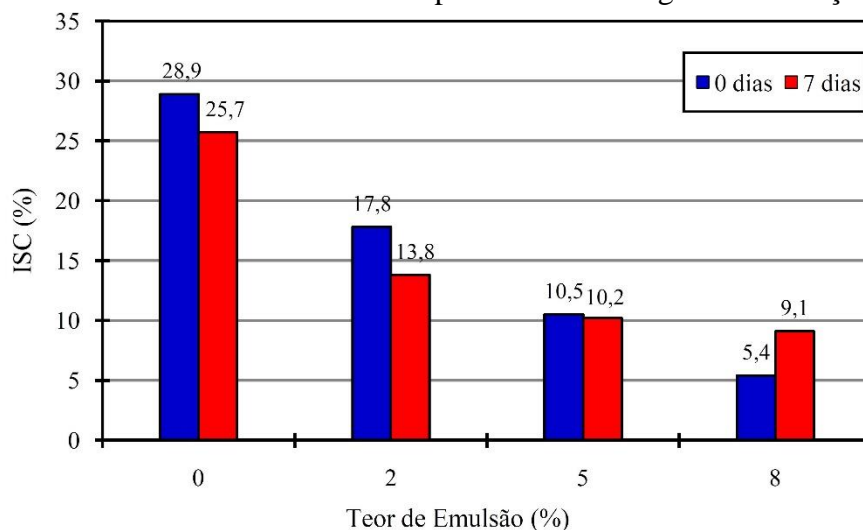
2.6.3 Influência no Índice de Suporte Califórnia

Jacintho (2005) observou, nos ensaios de Índice de Suporte Califórnia (ISC), que, para os solos SC e GC, não ocorreu aumento da capacidade de suporte. Entretanto, para o solo SM, o valor de ISC passou de 7,4% (solo puro) para 12,9% (solo estabilizado com emulsão), ou seja: ocorreu um ganho da capacidade de suporte, mas não com valores expressivos.

Através de ensaios com solos LG' (argiloso laterítico), NG' (argiloso não-lateríticos) e LA (areia laterítica), Sampaio (2008) observou um pequeno aumento do valor obtido nos resultados dos ensaios de ISC para todas as misturas de solo-emulsão por ele avaliadas, com corpos de prova analisados após serem submetidos à imersão. Nos solos sem emulsão, após a imersão, houve uma perda da capacidade de suporte, e nas misturas solo-emulsão, a capacidade praticamente se manteve constante em relação aos resultados encontrados quando analisados em condições não-imersas.

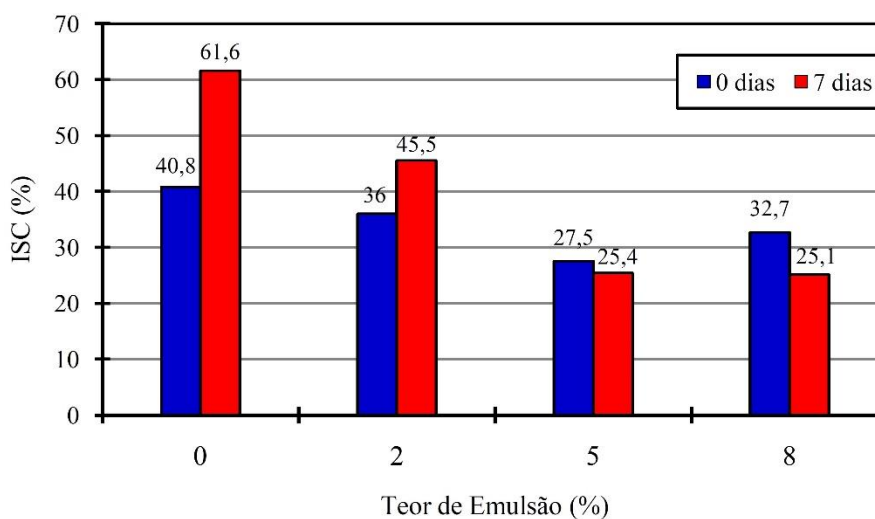
Rebello (2009), no entanto, observou as misturas solo-emulsão estudadas mostraram-se prejudicadas pela imersão, apresentando valores de ISC inferiores àqueles alcançados pelas amostras com o solo sem emulsão, como são mostrados nos Gráficos 2.5 e 2.6.

Gráfico 2.5 – Resultados de ISC após imersão em água com aeração.



Fonte: Rebelo (2009).

Gráfico 2.6 – Resultados dos ensaios de ISC sem imersão em água, com aeração.



Fonte: Rebelo (2009).

Gondim (2008), analisando os resultados de ensaios de Índice de Suporte Califórnia de misturas confeccionadas a partir de areias e pedregulhos lateríticos e não-lateríticos (NA', LA' e NG'), observou que as amostras de solo-emulsão por ela estudadas, se comportaram de maneiras distintas em presença de água, indicando que a aderência entre a emulsão asfáltica e as partículas de solo diferiu para elas.

As amostras estabilizadas de solos NA' e LA' mostraram-se prejudicadas pela saturação, apresentando ISC iguais ou inferiores aos índices alcançados pelas amostras de solos puros, enquanto que as amostras de solo NG' tiveram grande aumento no ISC. A amostra que

apresentou a maior concentração de sílica foi a mais prejudicada pela imersão em água, enquanto que a amostra com menor concentração de sílica mostrou-se pouco susceptível à saturação.

Gondim (2008) afirma, ainda, que há indícios de que uma maior concentração de sílica nas amostras influencie na aderência entre a emulsão asfáltica e as partículas, tornando-as mais susceptíveis à ação da água. Em se confirmando esta hipótese, o teor de sílica nas amostras de solo poderá se tornar um critério limitador para a escolha de materiais a ser estabilizados com emulsão asfáltica.

2.6.4 Resistência à Compressão Simples das Misturas Solo-Emulsão

Jacinto (2005) observou, em termos de resistência à compressão simples (RCS), comportamentos semelhantes para o solo SC e GC estabilizados com emulsão, ou seja: a RCS tende a diminuir com o aumento do teor de emulsão. Já para o solo SM, com a adição da emulsão asfáltica, foi verificado um aumento da RCS de aproximadamente 20kPa para o teor de 8% de emulsão em relação ao solo sem emulsão. Com relação ao tempo de aeração, nos três solos, a autora constatou que as alterações de resistência estavam em geral associadas a variações do teor de umidade.

Gondim (2008) observou que os corpos de prova de solo-emulsão ensaiados imediatamente após a moldagem não apresentaram aumento na RCS, quando comparados às amostras de solo sem emulsão, indicando que a adição de emulsão asfáltica não influencia de forma imediata na resistência dos solos. Com o início do processo de ruptura da emulsão asfáltica, foram observadas melhorias expressivas na RCS das misturas por ele analisadas.

Com respeito à influência do teor de emulsão sobre a RCS das misturas, Gondim (2008) verificou a existência de um teor ótimo de emulsão que conduziu à máxima RCS em cada amostra de solo, e que a aplicação de teores maiores de emulsão conduz a uma redução da RCS. Verificou, também, que, para uma estabilização satisfatória, a amostra de solo mais granular necessitou de uma quantidade maior de emulsão asfáltica do que os solos coesivos.

Rebelo (2009) observou que o solo ML sem emulsão e suas misturas solo-emulsão, com aeração e ensaiados de imediato, mostraram-se superiores às amostras sem aeração, ocorrendo uma inversão de comportamento após 7 dias de cura. As misturas solo-emulsão para o teor de 1% de emulsão, em condições de aeração e com ensaios realizados após sete dias de cura, apresentaram uma ligeira superioridade em relação às amostras sem emulsão. A adição de emulsão asfáltica se mostrou como fator de influência no ganho de resistência durante o

período de cura de 7 dias. Neste estudo, as amostras solo-emulsão também apresentaram um excelente comportamento no que concerne à deformação.

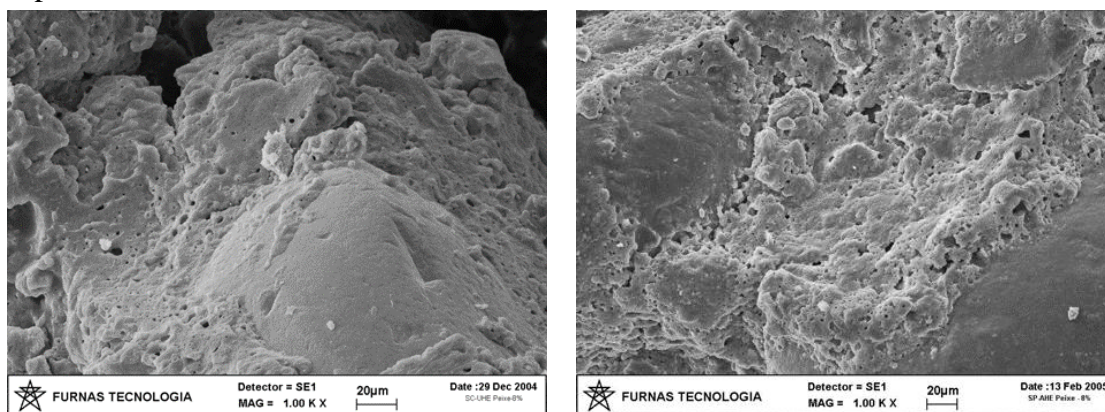
Cavalcante *et al.* (2009), ensaiando corpos de provas após um período de 7 dias após a confecção, observou que todos os solos analisados ganharam resistência com a presença da emulsão em sua matriz. Todavia, para o solo mais arenoso avaliado, um SM, os aumentos de resistência mais expressivos só ocorreram para teores de emulsão na faixa de 4% a 8%, merecendo, portanto, um maior banco de dados, a fim de definir o teor de emulsão mais adequado para estabilização desse tipo de solo.

2.6.5 Microestrutura das misturas solo-emulsão

Pesquisas sobre a microestrutura das misturas solo-emulsão são relativamente escassas. Podem ser aqui citados os trabalhos de Jacintho (2005) e Jacintho (2010), que focaram no estudo da avaliação da microestrutura das misturas solo-emulsão por meio da visualização das amostras através de microscopia eletrônica de varredura.

Jacintho (2005) observou que, em solos SC e SM estabilizados com emulsão, ocorreu uma formação de macroporos. Isto ocorreu em razão de os finos, que antes preenchiam os vazios entre os grãos de solo, passarem a formar grumos compostos pelas partículas de finos e asfalto, que envolveu os grãos maiores. A formação destes grumos dificultou o contato grão a grão, além de propiciar a formação de microporos. Com o aumento do teor de emulsão, observa-se uma diminuição dos macroporos e um aumento dos microporos, conforme pode ser visualizado na Figura 2.8.

Figura 2.8 – Solos SC e SM, estabilizados com 8% de emulsão RL-1C, ampliados em 1.000x.



(a) Solo SC (areia argilosa)

(b) Solo SM (areia siltosa)

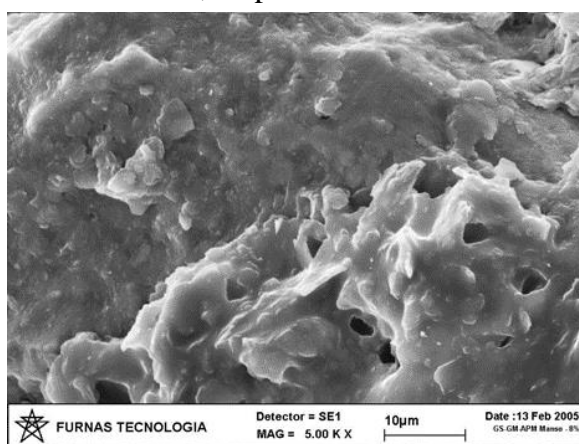
Fonte: Jacintho (2005).

Jacinto (2005) realizou uma análise química dos grumos formado nos solos com adição de emulsão, utilizando difração de raios X, e verificou que, os grumos presentes no solo são aglomerados entre a fração fina, provenientes do solo, com o asfalto residual, proveniente da emulsão asfáltica. No caso do solo SC, foi identificado a presença de caulinita nos grumos de finos-asfalto, e nos grumos presentes no solo SM, foi verificado a presença de ilita e clorita. Nos dois casos, os grumos envolviam parcialmente os grãos de quartzo presentes nos solos analisados, isto é: parte da superfície dos grãos de quartzo permaneciam limpas, sem envolvimento de material asfáltico.

Para solo o GC, Jacinto (2005) observou que, para um teor de 4% de adição de emulsão, em alguns trechos da amostra não foi observada a presença de material asfáltico, indicando que alguns fragmentos não chegam a ser por ele envolvidos. Para um teor de 8% de adição de emulsão, a estrutura é aparentemente bem fechada, mas a microscopia de varredura revelou a presença de pequenos grumos de finos e asfalto, e também alguns poros.

Na análise química dos grumos finos-asfalto presentes no solo GC estabilizado com emulsão, foi novamente identificada a aglomeração entre o asfalto residual, proveniente da emulsão, com a ilita, fração fina proveniente do solo. Outra constatação foi que a presença de microporos nos grumos formados no solo GC, é bem menos marcante que nos solos SC e SM (ver Figura 2.9), posto que a percentagem de finos no solo GC é menor.

Figura 1.9 – Solo GC estabilizado com 8% de emulsão RL-1C, ampliado em 1.000x.



Fonte: Jacinto (2005).

Jacinto (2010) observou que a microestrutura dos solos SM, SC e CL, estabilizados com emulsão RL-1C, revelou a formação de grumos para os três tipos, mas o CL apresentou uma aglutinação maior. Com relação aos processos de secagem e imersão, as misturas compactadas não apresentaram mudanças na estrutura em consequência dos mesmos.

Jacinto (2010) também afirmou que o asfalto facilmente se une às partículas de tamanho de silte e argila, formando uma massa finos-asfalto que envolve os grãos maiores do solo. A autora novamente verificou, assim como em seu trabalho de 2005, que os grãos de quartzo da fração areia, para os teores de emulsão por ela estudados, permanecem com parte de sua superfície limpa, sem envolvimento de material asfáltico.

2.6.6 Influência da Adição de Emulsão na Permeabilidade do Solo

Jacinto (2005) percebeu uma redução da permeabilidade de forma efetiva para a areia argilosa (SC) estudada. Para a areia siltosa (SM), a redução só foi significativa para teores maiores de emulsão (6 e 8%), e, para o pedregulho argiloso (GC), a permeabilidade permaneceu praticamente constante.

Entretanto, Jacinto (2010), realizando ensaios de permeabilidade para solos SM, SC, e CL com a adição de emulsão asfáltica, verificou que não houve diminuição da permeabilidade nestes solos, o que, segundo a autora, foi explicado pelo fato de os finos, que antes vedavam os vazios do solo, se unirem ao asfalto, proporcionando uma quantidade maior de macroporos no solo, o que facilitaria o fluxo de água.

Observou-se, pelos resultados apresentados por Jacinto (2005) e Jacinto (2010), que, para baixos teores de emulsão (entre 0 e 8%), não ocorre a formação do filme betuminoso em torno dos grãos de solo de uma forma satisfatória, resultando na formação de agrupamentos entre finos e asfalto (os grumos), resultando em uma mistura heterogênea. Essa heterogeneidade, dependendo da sua proporção, pode influenciar significativamente as propriedades geotécnicas apresentadas pela mistura, gerando variações significativas nos resultados obtidos.

No que tange à aplicação da mistura solo emulsão em barragens, a presença destes grumos influenciam negativamente a estabilização do solo com emulsão, pois promovem a formação de macroporos na estrutura compactada, resultando em um aumento da permeabilidade (e portanto, do fluxo de água), podendo até gerar instabilidade da estrutura quando submetida a altas poropressões de água.

Sendo assim, acredita-se que o aumento desta faixa de teores de emulsão utilizados possa promover uma redução da formação desses macroporos, fazendo com que as misturas solo-emulsão apresentem propriedades geotécnicas mais satisfatórias para o uso em barragens.

Em relação aos custos, da utilização de elevados teores de emulsão em construções de barragens, a expectativa é que sejam equivalentes ou até menos menores quando comparados com outras opções de projetos. Pois as barragens de núcleo asfálticos possibilitam

a adoção de núcleos mais estreitos (0,5 a 0,9 m de espessura), elevada velocidade de construção e pequenas limitações das condições meteorológicas, sob as quais pode ser lançado e compactado.

2.7 Principais fatores que influenciam a estabilização betuminosa

Segundo Amaral (2000), os principais fatores que influenciam na relação agregado e CAP são: as diferentes composições químicas e mineralógicas, e as superfícies específicas dos agregados. Na relação solo e emulsão, além destes fatores citados por Amaral (2000), pode-se incluir também: (a) a composição química do emulsificante utilizado na fabricação da emulsão; e (b) a água presente na composição da emulsão e no solo.

Para uma estabilização betuminosa satisfatória, é de grande importância que ocorra uma boa adesividade entre o agregado e o material betuminoso. A adesividade, propriedade apresentada pelo agregado de se aderir ao material betuminoso, pode ser fortemente influenciada pelas características físicas da superfície do mesmo (textura, porosidade, impurezas etc.), e pela estrutura cristalina e química do agregado (WHITEOAK, 1990; AMARAL, 2000; BERNUCCI *et al.*, 2006).

Com relação às características físicas da superfície do agregado, Amaral (2000) cita que os fatores que influenciam na adesividade são:

- (a) Textura: quanto mais irregular for à superfície, maior será a área de contato e, portanto, maior a adesividade;
- (b) Porosidade: havendo porosidade, haverá adsorção do tipo físico em relação ao ligante betuminoso, devido às forças capilares, e assim sendo, maior será a adesividade; e
- (c) Impurezas: a presença de finos ou de água na superfície ou nos poros dos agregados é altamente prejudicial à adesividade, pois aumenta a tensão superficial, e dificulta o perfeito envolvimento da superfície do agregado pelo asfalto.

Já em relação à estrutura cristalina e química dos agregados, Amaral (2000) descreve que os minerais têm seus átomos dispostos em uma rede cristalina, com forças livres (não aplicadas). Essas forças livres podem exercer atração sobre átomos de gases, líquidos ou sólidos que, uma vez em contato com eles, mantêm uma camada monomolecular dessas

substâncias fortemente aderidas, por adsorção química. E é este tipo de adsorção é o principal fator que influencia a adesividade entre o agregado e os ligantes betuminosos.

Amaral (2000) também afirma que, devido ao fato de a composição química dos minerais variar muito, podendo conter vários elementos químicos diferentes, em proporções diversas e em um número de arranjos quase infinito, é difícil definir o comportamento que essas forças livres apresentarão em relação aos ligantes betuminosos – se atração, repulsão ou uma condição de neutralidade. O autor afirma ainda que pode-se, no entanto, reconhecer a variedade dessas forças livres na superfície dos agregados, e tentar realizar uma previsão da influência das mesmas na adesividade do agregado ao betume.

Em relação à previsão da influência destas forças livres dos agregados em sua adesividade ao betume, Whiteoak (1990) afirma que os agregados ácidos ou eletronegativos (altamente silicosos, a exemplo de granitos, gnaisses, quartzitos etc.) são hidrofílicos, e portanto, atraídos mais fortemente pela água do que pelo material betuminoso, ao contrário do ocorre com os agregados básicos ou eletropositivos, tais como basaltos, diabásicos, calcários etc.

Com base no que foi dito por Amaral (2000), é possível afirmar que, no caso das misturas solo-emulsão, as substâncias químicas livres presentes no solo e na emulsão, geram interações químicas diferentes daquelas ocorridas na mistura agregado-ligantes betuminosos, podendo estas interações afetar benéficamente, ou não, a estabilização dos solos.

Neste caso, considerando que grande parte das reações químicas ocorrem em presença da água, por ser um solvente universal, esta pode influenciar diretamente a estabilização da mistura solo-emulsão, diferentemente do que acontece nos processos de mistura entre o agregado e o CAP, onde os componentes de mistura são submetidos a elevadas temperaturas (entre 121°C e 163°C), eliminando totalmente a presença de água e, em consequência, sua influência na adesividade entre o agregado e o betume.

Amaral (2000) comenta ainda que, para uma adesão perfeita do filme asfáltico (apolar) à superfície do agregado, é necessário dar ao asfalto condições de atender à demanda de energia da superfície do agregado. Para tanto, pode ser adicionada ao asfalto uma substância altamente polar, capaz de dar a este uma carga superior à de qualquer agregado (e até mesmo superior à da água), sem modificar suas propriedades, com o objetivo de melhorar a adesividade entre o agregado e o asfalto. Uma vez presente no asfalto, o melhorador de adesividade asfalto-agregado quebra as forças retráteis (forças que provocam a união dos glóbulos de betume) do ligante, facilitando a formação de um filme betuminoso sobre a superfície do agregado.

Existem também aditivos que podem ser adicionados aos agregados, modificando suas características de superfície e, deste modo, melhorando a adesividade asfalto-agregado. No caso das misturas solo-emulsão, algumas substâncias químicas presentes no solo, como o íon cálcio (Ca^{2+}), dependendo da concentração, e compostos de ferro e alumínio, podem funcionar como melhoradores de adesividade, facilitando a estabilização solo-emulsão.

De um modo geral, para a obtenção do sucesso dos processos de estabilização solo-emulsão, os principais fatores de influência a ser avaliados estão diretamente ligados à adesividade entre os grãos e o material asfáltico.

2.8 Considerações Parciais

A revisão bibliográfica apresentada neste capítulo possibilitou o conhecimento de conceitos básicos sobre materiais asfálticos e sobre a técnica de estabilização solo-emulsão, muito utilizada e pesquisada, principalmente para aplicações na área de pavimentação, tendo como objetivo principal melhorar a capacidade de suporte do solo.

O capítulo apresentou também um breve histórico acerca de barragens com núcleo asfáltico, e das experiências brasileiras de construção deste tipo de obras. Em relação aos materiais asfálticos, foram feitas algumas considerações sobre betume, asfalto e emulsões asfálticas.

No que concerne às misturas solo-emulsão, foram relatadas as conclusões de alguns trabalhos importantes no tema, com enfoque na compactação e dosagem, resistência ao cisalhamento das misturas, na influência no Índice de Suporte Califórnia, e na resistência à compressão simples, reportando também aspectos referentes à influência da emulsão na permeabilidade dos solos estabilizados, à microestrutura das misturas e aos fatores que têm influência sobre o processo de estabilização das mesmas. Ainda não existe uma metodologia capaz de gerar parâmetros confiáveis aos quais a estabilização solo-emulsão possa ser enquadrada de acordo com um determinado tipo de solo ou para um determinado tipo de uso. Muitas ainda são lacunas existentes sobre esse tipo de estabilização. Entretanto, a possibilidade de sua utilização se mostra bastante promissora.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Introdução

Este capítulo tem como objetivo apresentar as principais informações acerca dos procedimentos e metodologias adotados no desenvolvimento do presente estudo sobre misturas solo-emulsão. Uma descrição da metodologia utilizada para os ensaios de caracterização física da emulsão é realizada, assim como para os ensaios de caracterização geotécnica, química e mineralógica do solo empregado na confecção da mistura.

Também neste capítulo são relatados os procedimentos de preparação e de compactação das misturas solo-emulsão, de visualização da estrutura compactada, e a descrição dos índices físicos utilizados na avaliação dos resultados da compactação das misturas solo-emulsão.

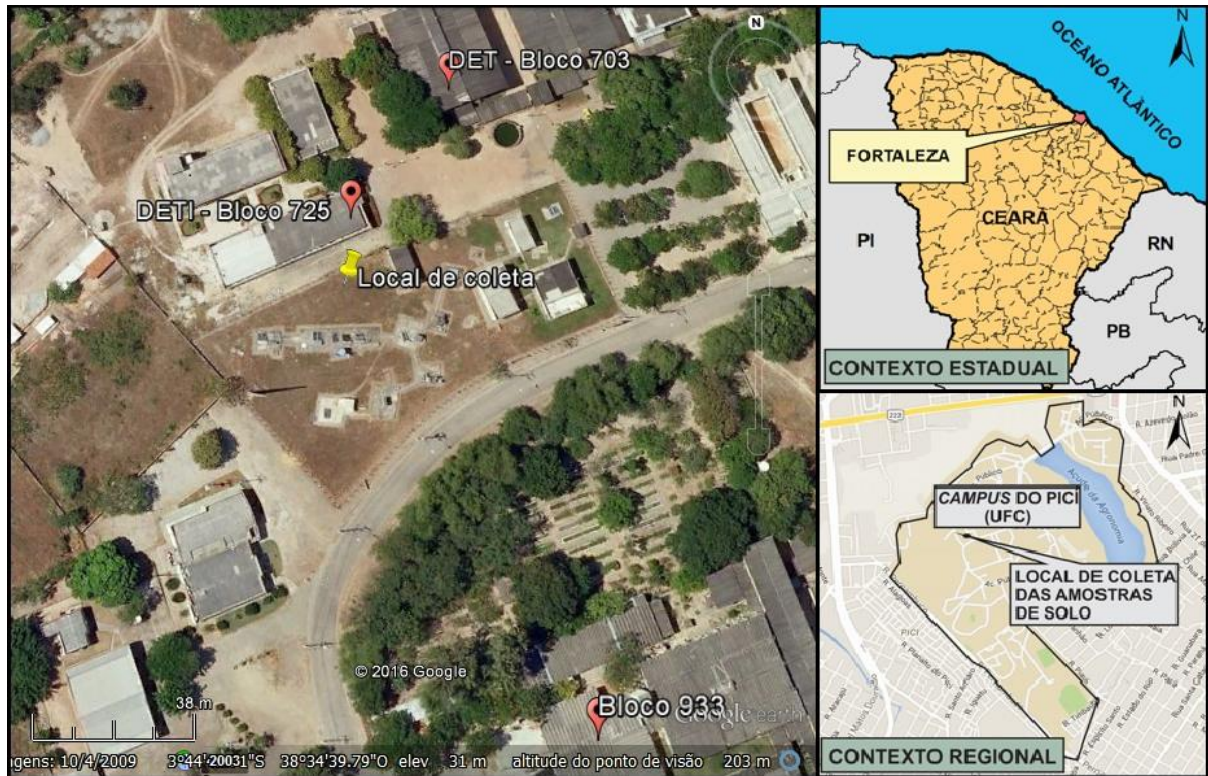
3.2 O solo empregado no estudo das misturas solo-emulsão

Na escolha do solo a ser utilizado neste estudo, foi feita a opção por um solo considerado inadequado para a execução de obras de barragens, que também apresentasse características similares aos solos (solos arenosos, sem coesão e com alta permeabilidade) encontrados em abundância nos sítios de construção deste tipo de obra.

3.2.1 Amostragem dos solos

A amostra de solo utilizada no presente estudo foi coletada dentro dos limites do *campus* da Universidade Federal do Ceará (UFC), no sítio de coordenadas UTM 3°44'42,8"S e 38°34'40,3"W (*datum* SIRGAS 2000), no município de Fortaleza, Estado do Ceará. As Figuras 3.1 e 3.2, mais adiante, mostram imagens da área onde foi realizada a coleta do solo utilizado para a preparação das misturas solo-emulsão.

Figura 3.1 – Localização da área de coleta da amostra de solo para a preparação das misturas solo-emulsão.



Fonte: Adaptado de Google Earth (2016).

Figura 3.2 – Vista no nível do terreno da área de coleta do solo no campus da UFC.



Fonte: Elaborado pela autora.

3.2.2 Caracterização geotécnica e classificação do solo

A caracterização geotécnica do solo foi realizada no Laboratório de Mecânica dos Solos e Pavimentação (LMSP) da UFC, utilizando os métodos de ensaio especificados nas normas técnicas listadas a seguir:

- NBR 6457/1986 – Amostras de Solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização (Método de Ensaio);
- NBR 6508/1984 – Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm - Determinação da massa específica (Método de Ensaio);
- NBR 7181/1984 – Solo – Análise granulométrica (Método de ensaio);
- NBR 6459/1984 – Solo – Determinação do limite de liquidez (método de Ensaio);
- NBR 7180/1984 – Solo – Determinação do limite de plasticidade (Método de Ensaio); e
- NBR 7182/1986 – Solo – Ensaio de compactação (Método de Ensaio).

A classificação do solo coletado foi realizada de acordo com o Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS).

3.2.3 Caracterização química do solo coletado

A caracterização química do solo coletado foi realizada nas dependências do Laboratório de Solos e Água, do Departamento de Ciências do Solo, do Centro de Ciências Agrárias (CCA) da UFC. Esta caracterização teve o objetivo de verificar em maiores detalhes a composição química do solo, e sua possível influência nas misturas solo-emulsão avaliadas.

Para o solo selecionado para este estudo, foram determinadas as seguintes características: pH em água ($\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$), pH em cloreto de potássio (pH_{KCl}), Acidez Trocável ($\text{H}^+ + \text{Al}^{3+}$), Capacidade de Troca Catiônica (CTC), Soma das Bases (S), Capacidade de Troca de Cátions Total (T), Percentagem de Saturação com Alumínio ($\text{Al}\%$) e Percentagem de Saturação de Bases ($\text{V}\%$) e Teor de Matéria Orgânica (MO) seguindo os procedimentos estabelecidos pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA, 1997).

O pH em água e o pH em KCl são obtidos por medição eletrônica, através de um eletrodo combinado, imerso em uma suspensão de solo+água ($\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$) e em suspensão de solo+solução de KCl (pH_{KCl}).

A acidez trocável ($H^+ + Al^{3+}$) é determinada através de soluções não-tamponadas de sais neutros com o KCl, que não produzem acidez por dissociação de radicais carboxílicos (H^+). Assim, os espécimes ($H^+ + Al^{3+}$) detectados correspondem às formas trocáveis. As determinações de ($H^+ + Al^{3+}$) são feitas por titulação com hidróxido de sódio (NaOH), em presença de fenolftaleína como indicador ácido-base.

A capacidade de troca de cátions (CTC) do solo é definida como sendo a soma total de cátions que ele pode reter. Estes cátions adsorvidos são removidos por soluções salinas de amônia, cálcio, bário, e por soluções de ácidos diluídas, sendo posteriormente determinados por métodos volumétricos, de emissão ou absorção atômica.

A partir dos resultados do pH_{H_2O} , pH_{KCl} , Acidez Trocável e CTC são obtidas:

- A soma das bases (S), definida como a soma dos íons Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ e Na^+ ;
- A capacidade de troca de cátions total (T), resultante da adição entre a soma das bases (S) e a acidez trocável ($H^+ + Al^{3+}$);
- A percentagem de saturação com alumínio ($Al\%$), definida como o quociente entre a concentração de íons Al^{3+} e a capacidade de troca de cátions total (T); e
- A percentagem de saturação por bases ($V\%$), definida como o quociente entre a soma das bases (S) e a capacidade de troca de cátions total (T).

O teor de matéria orgânica (MO) é obtido através da oxidação da matéria orgânica com dicromato de potássio em meio sulfúrico, empregando como fonte de energia o calor despreendido do ácido sulfúrico e/ou aquecimento. O excesso de dicromato após a oxidação é titulado com a solução-padrão de sulfato ferroso amoniacal (sal de Mohr).

3.2.4 Caracterização mineralógica do solo

A seguir, são descritas em maior detalhe as técnicas utilizadas para a caracterização mineralógica do solo selecionado para a confecção das misturas solo-emulsão: (a) fluorescência de raios X; e (b) difração de raios X.

3.2.4.1 Fluorescência de Raios X

A Fluorescência de Raios X é uma técnica de análise quantitativa e qualitativa da composição química do material, baseada na absorção de energia por parte dos átomos,

provocando uma excitação, seguida de uma liberação de radiação secundária, chamada de fluorescência.

Os raios liberados pelos átomos têm um comprimento de onda típico associado a cada tipo de elemento químico, de acordo com sua proporção presente na amostra. Este ensaio foi executado no Laboratório de Raios X do Departamento de Física da UFC, utilizando o equipamento Rigaku (ZSX Mini II), mostrado na Figura 3.3.

Os resultados deste ensaio serão usados principalmente para auxiliar no processo de identificação dos minerais presentes no solo, utilizando o programa X'Pert High Score Plus em conjunto com resultados da difratometria de raios X, descrita adiante.

Figura 3.3 – Equipamento de fluorescência de raios X Rigaku (ZSX Mini II).



Fonte: Elaborado pela autora.

3.2.4.2 Difração de raios X

A difração de raios X (DRX) é uma técnica baseada na incidência de radiação X na amostra analisada, permitindo a definição da forma básica dos cristais, as distâncias interatômicas e as fases cristalinas.

Diferentemente da radiação gama e das radiações corpusculares (alfa, beta, nêutrons etc.), que são geradas nos núcleos atômicos e podem ser obtidas naturalmente por decaimento radioativo de radionuclídeos, os raios X são provenientes das camadas de elétrons dos átomos, e são, em geral, obtidos por meio de tubos que promovem a produção da radiação

X. Estes tubos consistem basicamente de um cilindro a vácuo, contendo um anodo fixo ou giratório.

Os valores de comprimento de onda das radiações características dependem do material do qual o anodo é feito. Após colidirem com o material, os raios X mudam a sua direção de propagação (difração), porém, mantêm o comprimento de onda da radiação incidente. O detector tem a função de identificar essa difração, e realizar a contagem do número de fótons X difratados da amostra, apresentando, desta forma, informações acerca da intensidade do feixe difratado.

O detector depende, principalmente, do comprimento de onda da radiação de interesse, e da intensidade máxima de fótons a ser medida. A fonte de radiação utilizada no ensaio foi do tipo monocromática $K\alpha_1$ do elemento cobalto (Co), de comprimento igual a 1,7889 Å (a 40 kV e 30mA), e o detector a gás, do tipo proporcional a uma intensidade a ser medida em função do ângulo de varredura de 2θ , variando de 10 a 80 graus.

As amostras analisadas foram previamente moídas e homogeneizadas. Em seguida, foram coletadas alíquotas de aproximadamente 600 mg, as quais foram prensadas em um porta-amostra do tipo vazado, utilizando-se o método de montagem denominado de *back loading*.

Esta análise também foi realizada no Laboratório de Raios X do Departamento de Física da UFC. O equipamento utilizado para realização das análises foi o difratômetro X'Pert Pro MPD, da marca PANalytical, mostrado na Figura 3.4.

Os dados gerados durante a leitura das amostras no difratômetro foram coletados, processados e armazenados pelo *software Data Collector* da PANalytical, e sua interpretação/caracterização foi realizada utilizando o programa X'Pert High Score Plus 2006.

Figura 3.4 – Difratorômetro de raios X, Panalytical, modelo XPert Pro MPD.



Fonte: Elaborado pela autora.

3.3 A emulsão asfáltica empregada na mistura solo-emulsão

A emulsão asfáltica utilizada para o desenvolvimento do presente estudo, foi do tipo fabricada, fornecida pela empresa Asfalto Nordeste. Os ensaios de especificação da emulsão asfáltica empregada foram realizados no Laboratório da Asfalto Nordeste e seguiram os procedimentos descritos nas normas:

- ABNT MB 581/1971– Viscosidade “Saybolt-Furol” de emulsões asfálticas;
- ABNT MB 609/1971 – Determinação da peneiração de emulsões asfálticas;
- ABNT NBR 6568/1984 – Determinação do resíduo de destilação de emulsão asfáltica.

3.4 Misturas solo-emulsão

Neste item, serão detalhadamente descritos os procedimentos adotados para a preparação das misturas solo-emulsão, e os procedimentos de pré-compactação a que as misturas foram submetidas, a fim de prepará-las para a compactação propriamente dita.

3.4.1 Procedimento de mistura do solo com a emulsão asfáltica

É importante destacar que, na presente pesquisa, a emulsão utilizada na preparação da mistura não foi diluída, e nem o solo umedecido, como realizado nos trabalhos de Gondim (2008), Jacintho (2005, 2010), Miceli Jr (2006), Rebelo (2009), Soliz (2007), Sant'Ana (2009), dentre outros.

O procedimento adotado pelos autores citados tinha o intuito de evitar a ruptura prematura da emulsão asfáltica durante a mistura com o solo, favorecendo a formação do filme betuminoso sobre as partículas de solo. No entanto, apesar de todos estes estudos anteriores sugerirem a implementação de tal procedimento, fez-se a opção por não realizar o umedecimento do solo (nem a diluição da emulsão asfáltica), pelo fato de que, sendo os ligantes asfálticos materiais sabidamente hidrófobos, a presença da água na superfície dos grãos minerais poderia prejudicar a adesividade do asfalto residual às partículas de solo, prejudicando o processo de estabilização da mistura.

Por isso, a fim de eliminar ao máximo a influência que a água pudesse exercer sobre a estabilização da mistura solo-emulsão, antes do processo de mistura propriamente dito, o solo foi submetido à secagem em estufa, a 100°C. E somente após seu completo esfriamento, ele foi misturado à emulsão, sem nenhum tipo de adição de água no processo, a não ser a água já presente na própria emulsão.

Os itens abaixo descrevem a ordem sequencial do procedimento de mistura solo-emulsão, e a Figura 3.5 ilustra as etapas deste processo.

- A amostra de solo foi destorroada, e logo após, submetida à secagem em estufa a 100°C, por um período de 24 horas (ver Figura 3.5a);
- Ao fim destas 24 horas, o material foi retirado da estufa e deixado à temperatura ambiente, para seu completo esfriamento;
- O volume apropriado de emulsão asfáltica para a mistura foi pesado em balança digital (Figura 3.5b);
- Ao atingir a temperatura ambiente, o solo foi gradualmente misturado à emulsão asfáltica, através de manipulação manual (Figura 3.5c);
- A mistura foi submetida à homogeneização por manipulação manual, por um tempo de, pelo menos, 5 minutos (Figura 3.5d); e
- Quando visualmente homogeneizada (Figura 3.5e), a mistura solo-emulsão foi submetida aos procedimentos de compactação (Figura 3.5f).

Figura 3.5 – Etapas das mistura solo-emulsão.



(a) Solo seco em estufa a 100°C.



(b) Pesagem da emulsão asfáltica.



(c) Adição da emulsão asfáltica ao solo.



(d) Homogeneização da mistura solo-emulsão.



(e) Aspecto final da mistura solo-emulsão.

Fonte: Elaborado pela autora.



(f) Compactação da mistura solo-emulsão.

3.4.2 Determinação dos teores de emulsão das misturas solo-emulsão

O teor de emulsão inicial utilizado para a preparação das misturas solo-emulsão foi definido a partir de um procedimento táctil-visual, com o teor de emulsão inicial sendo aquele

que conferiu à mistura solo-emulsão alguma coesão, quando submetida a um procedimento de amassamento manual, conforme pode ser visualizado na Figura 3.6.

A partir do teor inicial de emulsão, definido conforme o procedimento acima descrito, foram confeccionadas misturas solo-emulsão, com 10 teores de emulsão diferentes, definidos a partir do teor inicialmente obtido, com aumentos gradativos de 2% em relação à massa total da mistura. Desta forma, os teores de emulsão asfáltica utilizados neste estudo foram: 13%, 15%, 17%, 19%, 21%, 23%, 25%, 27%, 29% e 31%.

Figura 3.6 – Procedimento manual para definição do teor de emulsão inicial nas misturas solo-emulsão estudadas.



Fonte: Elaborado pela autora.

3.4.3 Ensaios de compactação

No estudo da compactação das misturas solo-emulsão, foram adotados dois procedimentos: o primeiro empregou a metodologia Proctor, conforme definido pela NBR 7182/86 – Solo - Ensaio de compactação, nas energias Normal e Modificada, e o segundo, a metodologia Marshall, conforme a norma DNER ME 043/1995 – Misturas betuminosas a quente – ensaio Marshall, tradicionalmente utilizada nos procedimentos de compactação em laboratório e em dosagens de misturas asfálticas para aplicações em pavimentação.

A metodologia Proctor foi escolhida por ser tradicionalmente utilizada na compactação de solos e outros materiais empregados na execução de barragens, tendo suas energias de compactação muito bem definidas, sendo também amplamente utilizada por diversos autores no estudo de misturas solo-emulsão: Nascimento *et al.* (2013), Pessoa (2004),

Jacinto (2005 e 2010), Miceli Júnior (2006), Soliz (2007), Gondim (2008), Sampaio (2008), Suarez (2008), Rebelo (2009), entre outros.

A metodologia Marshall foi escolhida devido ao aumento dos teores de emulsão nas misturas solo-emulsão executado nesta pesquisa, quando comparado àqueles utilizados por: Nascimento *et al.* (2013), Pessoa (2004), Miceli Júnior (2006), Gouveia *et al.* (2007), Soliz (2007), Gondim (2008), Sampaio (2008), Suarez (2008), Rebelo (2009), entre outros. Além disso, por ser uma metodologia de compactação mundialmente utilizada nos estudos de dosagem de misturas asfálticas convencionais, empregadas em obras de pavimentação.

A seguir, são apresentados os oito procedimentos que foram estabelecidos a fim de se avaliar a influência da presença da emulsão, da elevação da temperatura das misturas até 100°C, da secagem (e eventual ruptura) da emulsão, da função da água como lubrificante, e das diferentes energias de compactação empregadas no processo de compactação das misturas solo-emulsão.

O Procedimento 1, denominado de Proctor Normal Imediato (PNI), foi realizado para avaliar a influência da presença da emulsão na compactação. As misturas solo-emulsão foram compactadas mantendo-se todas as condições a que o solo eleito para as análises foi submetido, a menos da substituição da água (utilizada para lubrificar os grãos no processo de compactação) pela emulsão asfáltica, a única modificação implementada neste Procedimento.

O Procedimento 2, denominado Proctor Normal após 24 horas (PN24), foi realizado com o objetivo de avaliar a influência da ocorrência de ruptura da emulsão asfáltica na compactação das misturas solo-emulsão. Isto foi feito realizando-se a compactação somente 24 horas após a mistura, a fim de que a ruptura do solo-emulsão pudesse ocorrer.

Os Procedimentos 3 e 4, Proctor Modificado após 24 horas (PM24) e Marshall após 24 horas (M24), respectivamente, foram realizados para avaliar a influência do aumento da energia na compactação das misturas solo-emulsão, preparadas e compactadas nas mesmas condições do Procedimento 2 (PN24).

Os Procedimentos 5, 6, 7, Proctor Normal Quente (PNQ), Proctor Modificado Quente (PMQ), e Marshall Quente (MQ), respectivamente, foram realizados almejando avaliar a influência do aumento da temperatura das misturas solo-emulsão (material termoviscoelástico) no processo de compactação. Estas foram submetidas a um período de secagem ao ar livre por 24 horas, e em seguida, submetidas a um período de 1 hora de aquecimento, em estufa a 100°C, para só então serem submetidas ao correspondente processo de compactação (Proctor ou Marshall).

O Procedimento 8, Proctor Modificado com Água (PMA), tinha o intuito de avaliar a influência da água como agente lubrificante das misturas solo-emulsão, na compactação das mesmas. Neste procedimento, foi escolhido um teor de emulsão, entre os resultados das compactações anteriores, para o qual a mistura solo-emulsão apresentou o máximo valor de massa específica seca. Porções de 3kg de solo foram preparadas e misturadas ao teor de emulsão escolhido, e submetidas a um período de 24 horas de espera entre a mistura e a compactação (tempo para a ocorrência da ruptura da emulsão asfáltica). Só então, após esse período de 24 horas após a misturas é que foram feitos os acréscimos sucessivos de 2% de água, em relação à massa da mistura. Em seguida, as misturas foram submetidas a compactação, na energia Proctor Modificada.

Todos os procedimentos descritos anteriormente são apresentados resumidamente na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Resumo dos procedimentos adotados para a compactação das misturas solo-emulsão.

Metodologia de compactação	Código	Temperatura de compactação	Condições de Compactação
Proctor Normal	PNI	Temperatura ambiente (aprox. 25°C)	Imediata
Proctor Normal	PN24	Temperatura ambiente (aprox. 25°C)	Após 24 horas da preparação da mistura
Proctor Modificado	PM24	Temperatura ambiente (aprox. 25°C)	Após 24 horas da preparação da mistura
Marshall	M24	Temperatura ambiente (aprox. 25°C)	Após 24 horas da preparação da mistura
Proctor Normal	PNQ	100°C	Após 24 horas da preparação da mistura
Proctor Modificado	PMQ	100°C	Após 24 horas da preparação da mistura
Marshall	MQ	100°C	Após 24 horas da preparação da mistura
Proctor Modificado	PMA	Temperatura ambiente (aprox. 25°C)	Após 24 horas da preparação da mistura, com acréscimo de água

Fonte: Elaborado pela autora.

3.4.4 Índices físicos utilizados nos estudos de compactação das misturas solo-emulsão

Inicialmente, os parâmetros físicos utilizados na avaliação da compactação das misturas solo-emulsão foram os parâmetros tradicionais, empregados nos ensaios de compactação Proctor, como massa específica aparente seca e teor de umidade. Em virtude das características das misturas solo-emulsão confeccionadas, que continham elevados teores de emulsão asfáltica, optou-se, também, pela consideração de outros parâmetros físicos, usualmente utilizados nos procedimentos de dosagem das misturas asfálticas convencionais, tais como: a massa específica aparente (ρ), a percentagem de volume de vazios (Vv), a percentagem de vazios em relação aos agregados minerais (VAM) e a relação betume-vazios.

Devido à peculiaridade das misturas solo-emulsão, o termo Percentagem de volume de vazios no agregado mineral (VAM) foi alterado para Percentagem de vazios em relação ao grão mineral (VGM).

A seguir, serão apresentados todos os índices físicos utilizados, com suas respectivas equações de determinação.

3.4.4.1 Massa específica seca

Para a determinação da Massa específica seca (ρ_d) dos corpos de prova, foi utilizada a expressão apresentada na Equação 3.1:

$$\rho_d = \frac{M}{\left(1 + \frac{w\%}{100}\right) \cdot \left\{\left(1 + \frac{E\%}{100}\right) \cdot Sol\%\right\} \cdot V_a} \quad (3.1)$$

Onde:

ρ_d = massa específica seca (g/cm³);

M = massa do corpo de prova (g);

w = teor de umidade (%), em peso;

E = teor de emulsão (%), em peso;

Sol = teor de solvente presente na emulsão (%), em peso; e

V_a = volume do corpo de prova (cm³).

3.4.4.2 Massa específica aparente

Para a determinação da massa específica aparente (ρ) dos corpos de prova submetidos aos ensaios de compactação com energias de Proctor, foi utilizada a Equação 3.2:

$$\rho = \frac{M}{V} \quad (3.2)$$

Onde:

ρ = massa específica aparente (g/cm³);

M = massa do corpo de prova (g); e

V = volume do corpo de prova (cm³).

3.4.4.3 Densidade aparente

A densidade aparente (d) é determinada utilizando-se uma balança hidrostática, sendo calculada através da Equação 3.3:

$$d = \frac{M_{ar}}{M_{ar} - M_i} \quad (3.3)$$

Onde:

d = densidade aparente, adimensional;

M_{ar} = massa do corpo de prova ao ar (g); e

M_i = massa do corpo de prova imerso (g).

3.4.4.4 Densidade máxima teórica

Para a determinação da densidade máxima teórica (D_t) dos corpos de prova, foi empregada a Equação 3.4:

$$D_t = \frac{100}{\frac{B\%}{d_b} + \frac{S\%}{d_s}} \quad (3.4)$$

Onde:

D_t = densidade máxima teórica, adimensional;

B = percentagem de betume na amostra (%), em peso;

S = percentagem de solo na amostra (%), em peso;

d_b = densidade do betume, adotado 1, adimensional; e

d_s = densidade do solo, adimensional, obtido por meio de ensaio.

3.4.4.5 Percentagem volume de vazios

Para determinar a percentagem de volume de vazios (V_v) presente nos corpos de prova compactados, foi adotada a Equação 3.5:

$$V_v = \frac{d - D_t}{D_t} \cdot 100 \quad (3.5)$$

Onde:

V_v = percentagem de vazios (%), em peso;

d = densidade aparente, adimensional; e

D_t = densidade máxima teórica, adimensional.

3.4.4.6 Percentagem de volume de betume

Para o cálculo da Percentagem de volume de betume (VB) presente nos corpos de prova ensaiados, foi utilizada a Equação 3.6:

$$VB = \frac{B_{\%}}{d_b} \cdot d_b \quad (3.6)$$

Onde:

VB = percentagem de volume de betume (%), em peso;

B = percentagem de betume (%), em peso;

d_b = densidade do betume, adotado como sendo igual a 1,0, adimensional; e

d = densidade aparente, adimensional.

3.4.4.7 Percentagem de vazios em relação aos grãos minerais

A Percentagem de vazios em relação aos grãos minerais (VGM) foi determinada utilizando-se a Equação 3.7:

$$VGM = Vv + VB \quad (3.7)$$

Onde:

VGM = percentagem de vazios em relação aos grãos minerais (%);

Vv = percentagem de vazios (%), em peso; e

VB = percentagem de betume (%), em peso.

3.4.5 Visualização da estrutura das misturas solo-emulsão compactadas

Para a visualização da estrutura compactada das misturas solo-emulsão, foi utilizado um estereoscópio de pesquisa SMZ18, da Nikon (ver Figura 3.7), com taxa de zoom de 18:1 (manual), e um alcance de 0,75-13,5x. As imagens foram capturadas utilizando o sistema digital de câmeras do próprio equipamento (Digital Sight DS-Ri1), com resolução de 12,7 megapixels. A realização deste ensaio teve o objetivo de investigar a ligação entre a emulsão asfáltica e o solo, assim como avaliar a estrutura final das misturas solo-emulsão após o processo de compactação.

Figura 3.7 – Detalhe do estereoscópio de pesquisa utilizado.



Fonte: Elaborado pela autora.

3.5 Considerações Parciais

No presente capítulo, foram apresentados os processos de escolha do solo e da emulsão asfáltica, dos procedimentos e dos métodos utilizados nos ensaios. Foi realizado uma descrição de todo o programa experimental, incluindo a caracterização dos materiais

empregados, os métodos de ensaio, e os procedimentos adotados na fase de mistura entre o solo e a emulsão asfáltica. Foram descritos os equipamentos utilizados para a visualização do aspecto final da mistura solo-emulsão, e o detalhamento das expressões utilizadas nos cálculos dos índices físicos utilizados.

Todo o programa experimental foi desenvolvido com o intuito de alcançar o cumprimento do que foi proposto nos objetivos gerais e específicos, apresentados no capítulo 1. Buscou-se incluir, por meio dos procedimentos descritos, o estudo da influência: (a) da energia de compactação; (b) dos teores de emulsão utilizados na preparação das misturas; (c) da capacidade lubrificante da água no favorecimento do processo de compactação; (d) da temperatura das misturas no momento da compactação; (e) da ruptura da emulsão quando decorridas 24 horas entre a mistura e a compactação; (f) e dos índices físicos utilizados na avaliação da compactação das misturas solo-emulsão.

4 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

4.1 Introdução

Neste capítulo, são apresentados e discutidos os resultados dos ensaios de compactação das misturas solo-emulsão confeccionadas para este estudo, executados de acordo com as metodologias descritas no capítulo 3.

Primeiramente, são apresentados e discutidos os resultados dos ensaios de caracterização do solo utilizado, tais como: granulometria, densidade relativa dos grãos, e limites de consistência, e sua classificação, segundo o Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS), e análise química e mineralógica. São apresentados, também, os resultados dos ensaios de caracterização da emulsão empregada na mistura.

4.2 Caracterização do solo utilizado na confecção das misturas solo-emulsão

4.2.1 Caracterização geotécnica e classificação

O peso específico dos grãos do solo ensaiado foi de 25,86 kN/m³. Esse valor foi obtido por meio da média de 5 determinações individuais e diferentes, com um desvio padrão de 0,0159. O solo apresenta, portanto, um peso específico dos grãos muito próximo ao do mineral quartzo (25,99 kN/m³).

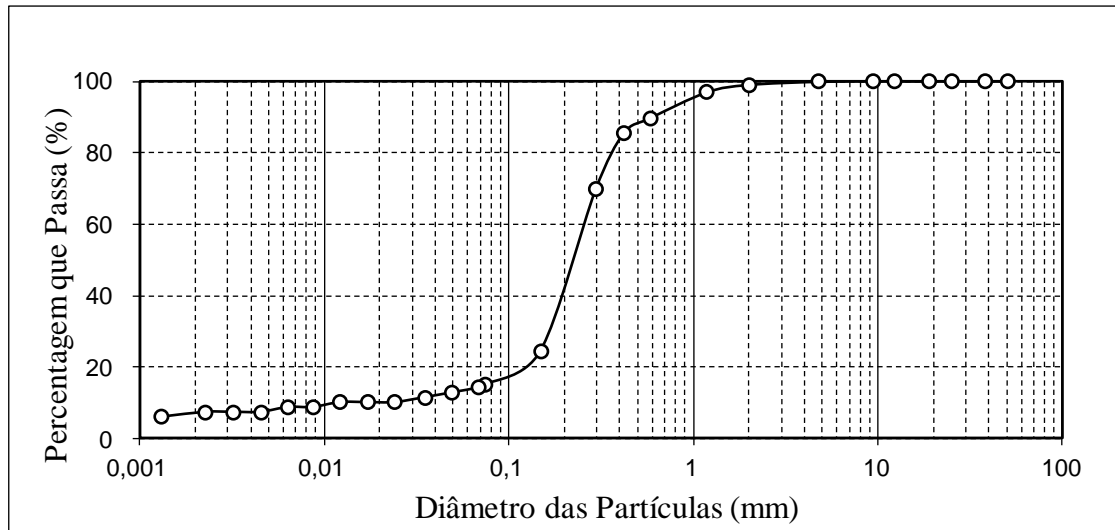
Destarte, considerando que este valor representa a média dos pesos específicos dos minerais presentes na amostra de solo analisada, pode-se assumir, então, que o solo é composto basicamente por quartzo, contendo também uma pequena percentagem de outros minerais com um valor de peso específico menor que a do quartzo.

Em relação aos índices de consistência, o solo ensaiado foi classificado como não líquido (NL) e não Plástico (NP). Os resultados de consistência apresentados pelo solo em análise são, por conseguinte, característicos de materiais arenosos, sendo um indicativo de que a consistência deste material é fortemente influenciada pela fração areia (quartzo) presente na composição granulométrica.

Por meio do ensaio de granulometria do solo, foram obtidas as seguintes percentagem de materiais: 1% de areia grossa, 14% de areia média, 70% de areia fina, 8% de silte e 7% da fração argila. No Gráfico 4.1, é apresentado a curva granulométrica resultante dos ensaios de peneiramento e de sedimentação com adição de defloculante (solução de hexametáfosfato de sódio).

Tomando os resultados da granulometria para determinar o Grau de Uniformidade (U) e o Coeficiente de Curvatura do solo, foram obtidos os resultados de 14,4 e 5,9, respectivamente, sendo o solo ensaiado, dessa forma, definido como muito uniforme e mal graduado.

Gráfico 4.1 – Curva granulométrica do solo.

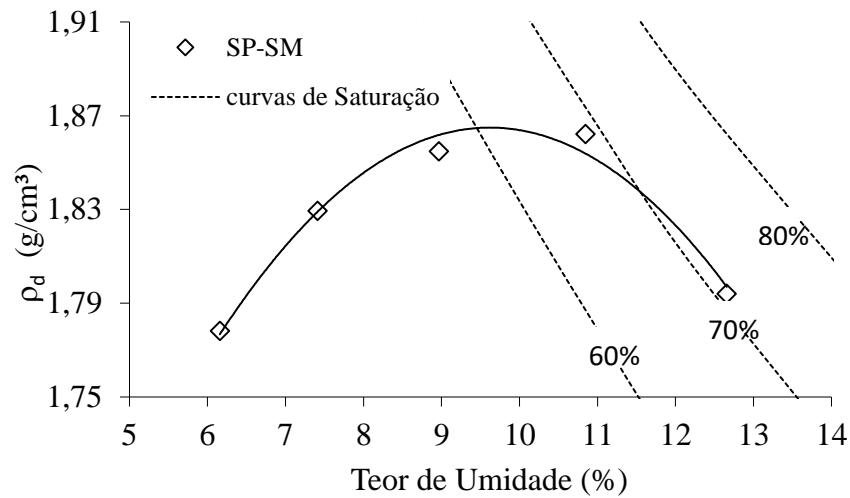


Fonte: Elaborado pela autora.

Levando-se em consideração os resultados obtidos nos ensaios de caracterização, observa-se que o solo utilizado na confecção das misturas solo-emulsão é classificado, de acordo com o Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS), como SP-SM (uma areia mal graduada com silte), e segundo a classificação TBR, o solo é classificado com A-3 (areia fina). Sendo assim, é muito provável que o solo ensaiado apresente propriedades mecânicas características das areias, tais como alta permeabilidade, baixa compressibilidade e baixa resistência coesiva, pouco apropriadas para a utilização em obras de barragens, justificando a opção pelo melhoramento de suas propriedades com a adição da emulsão asfáltica.

Nos resultados dos ensaios de compactação, a massa específica aparente seca máxima obtida foi de $1,86 \text{ g/cm}^3$, com um teor de umidade ótima de 10%, próximo ao grau de saturação de 60%, conforme mostra o Gráfico 4.2.

Gráfico 4.2 – Curva de compactação do solo.



Fonte: Elaborado pela Autora.

A Tabela 4.1 apresenta os resultados obtidos por meio dos ensaios realizados na amostra de solo coletada, resumindo os aspectos da caracterização geotécnica e da classificação do solo realizadas.

Tabela 4.1 – Propriedades geotécnicas da amostra de solo.

Parâmetro	Valor
Massa específica seca máx. (g/cm³)	1,86
Umidade Ótima (%)	9,7
Limite de Liquidez (%)	NL
Índice de Plasticidade (%)	NP
Densidade Relativa dos grãos	2,64
Classificação SUCS	SP-SM
Classificação TBR	A-3

Fonte: Elaborado pela Autora.

4.2.2 Caracterização química do solo

Na Tabela 4.2, são apresentados os resultados dos ensaios de caracterização química do solo estudado. De acordo com os resultados obtidos, o solo apresentou baixo valor de CTC (3,8 cmol_c/kgm), ou seja, baixa capacidade de reter cátions. Segundo o Boletim técnico de Interpretação de Análise de Solo da ANDA (1992), este valor está relacionado aos solos que são levemente ácidos, e que possuem alta percentagem de quartzo, baixo teor de matéria orgânica, e menor capacidade de reter umidade.

Tabela 4.2 – Resultados das análises químicas no solo.

Macronutrientes						
Ca ²⁺ (*)	Mg ²⁺ (*)	Na ⁺ (*)	K ⁺ (*)	Al ³⁺ (*)	H ⁺ + Al ³⁺ (*)	Mat. Orgânica (g/kg)
1,40	1,10	0,24	0,11	0,10	0,99	8,69
Propriedades Químicas						
pH			S (*)	CTC (*)	Al (%)	V (%)
em água	em KCl	ΔpH				
5,6	5,1	-0,5	2,9	3,8	72	76

(*)Valores em cmol/kgm

Fonte: Elaborado pela autora.

Segundo ANDA (1992), de acordo com os valores obtidos de pH em água (5,6) e em KCl (5,1), o solo estudado pode ser considerado ácido em solução de KCl 1N e moderadamente ácido em água, o que evidencia um baixo potencial de floculação natural do solo e baixo teor de argila na amostra analisada.

Um valor de ΔpH negativo indica que grande parte da quantidade de alumínio presente na amostra é trocável (ANDA, 1992), sendo esta afirmação confirmada pelo o resultado de Al% de 72%.

Outro fator a considerar é que, quanto mais negativo for o ΔpH, menor será a presença de óxidos de ferro e alumínio na amostra (ANDA, 1992). Estes compostos são considerados facilitadores da estabilização asfáltica. Sendo assim, de acordo com o resultado apresentado em relação ao ΔpH (igual a -0,5), pode-se afirmar que o solo utilizado na preparação das misturas solo-emulsão deste estudo apresenta moderada facilidade de estabilização.

4.2.3 Caracterização mineralógica

Na Tabela 4.3, são apresentados os resultados da caracterização mineralógica do solo utilizado na confecção das misturas solo-emulsão, obtidos a partir dos ensaios de difração de raios X.

Tabela 4.3 – Elementos químicos presentes na composição do solo utilizado na confecção das misturas.

Si (*)	Al (*)	Fe (*)	K (*)	Ti (*)	Ca (*)	Zr (*)	S (*)
86,246	5,9203	3,2949	2,2920	1,0052	0,9772	0,1730	0,0911

* Percentagem em massa.

Fonte: Elaborado pela autora.

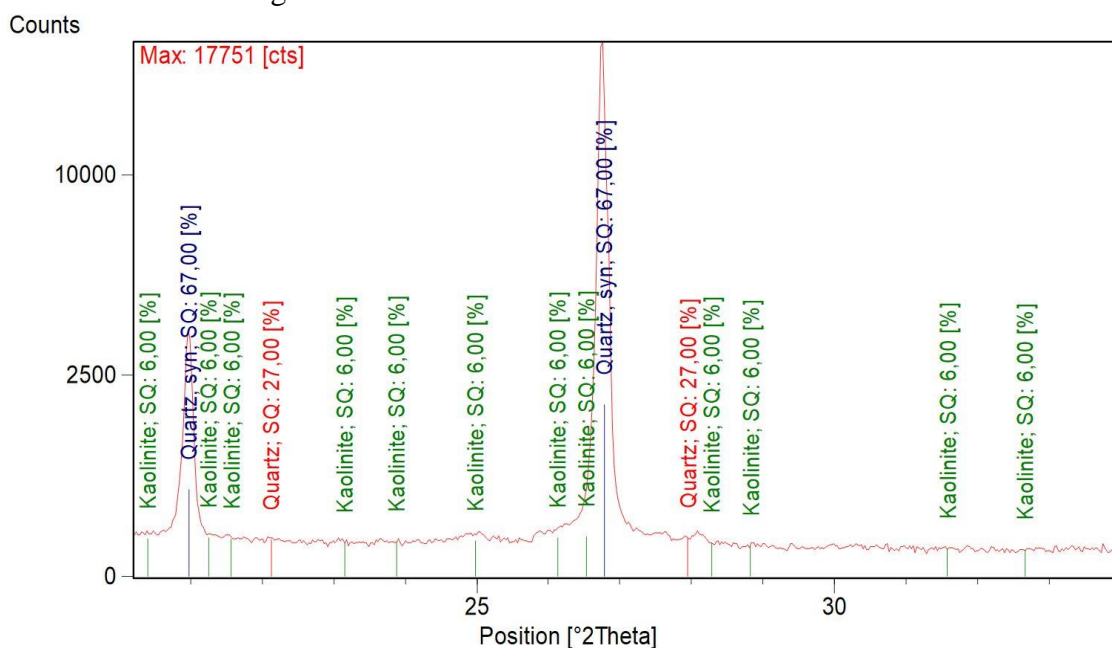
O Gráfico 4.3 apresenta o difratograma de todos os minerais identificados nas amostras de solo ensaiado. Observa-se, de acordo com os resultados obtidos, que os principais minerais presentes nas amostras de solo foram quartzo e caulinita.

A presença do quartzo foi identificada por picos bem definidos, estreitos, simétricos e intensos (com intensidade de até 17.751 *counts*), o que indica que o material quartzo tem estrutura cristalina bem definida e com alto percentual (94%) de presença na amostra.

A caulinita foi identificada por meio de picos poucos intensos e mais largos, o que indica pequeno percentual (6%) de sua presença na composição da amostra ensaiada.

Ambos os resultados (em relação ao quartzo e à caulinita) se mostram compatíveis com os resultados dos ensaios de caracterização química e geotécnica do material.

Gráfico 4.3 – Difratograma das amostras de solo ensaiadas.



Fonte: Elaborado pela autora.

Em resumo, com base nos resultados obtidos nas caracterizações química, geotécnica e mineralógica do solo, observa-se que o solo ensaiado é basicamente uma areia com poucos finos.

Neste aspecto, o solo analisado não é compatível com o conjunto de características desejadas para a execução de uma obra de barragem, justificando, assim, a necessidade de estabilização do mesmo pela adição do agente ligante, a emulsão asfáltica.

4.3 Emulsão asfáltica

4.3.1 Caracterização da emulsão asfáltica

Na Tabela 4.4, são apresentados os resultados de caracterização da emulsão asfáltica utilizada na preparação das misturas solo-emulsão. Os resultados mostraram que a emulsão é do tipo catiônica de ruptura lenta (RL-1C), o mesmo tipo de emulsão utilizada pelos diferentes autores anteriormente citados na revisão bibliográfica: Jacintho (2005, 2010), Miceli Jr (2006), Gondim (2008), Cavalcante *et al.* (2009), Rebelo (2009), Rebelo *et al.* (2014).

Tabela 4.4 – Resultados dos ensaios de caracterização da emulsão asfáltica utilizada.

Ensaio Realizado	IBP/ABNT Especificações	Resultados
Viscosidade Saybolt Furol, sSF, a 50°C	Máx. 70	44
Peneiração, 0,84mm, % em peso	Máx. 0,1	0,01
Resíduo, % em peso	Mín. 60	63,2

Fonte: Elaborado pela autora.

4.4 Compactação das misturas solo-emulsão

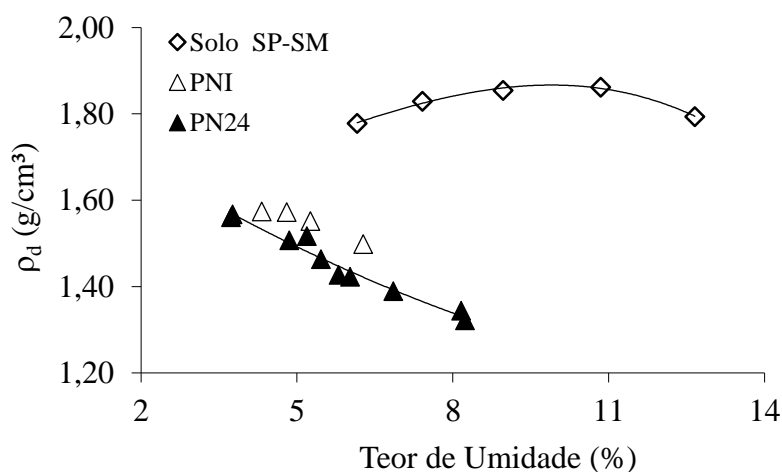
4.4.1 Influência da ruptura da emulsão na compactação das misturas solo-emulsão

O Gráfico 4.4 mostra as curvas de compactação do solo SP-SM sem emulsão, para as misturas de solo com emulsão compactadas imediatamente (PNI) e para as misturas de solo e emulsão compactadas 24 horas após a mistura (PN24). As curvas de compactação foram expressas em termos de massa específica seca *versus* teor de umidade. Para as amostras compactadas das misturas entre o solo e a emulsão, é importante ressaltar que não houve acréscimo de água, o teor de umidade aferido é resultante da água proveniente da própria emulsão. Observa-se que a metodologia de avaliação da compactação utilizando a massa

específica aparente seca e o teor de umidade não se mostra eficaz para as misturas solo-emulsão elaboradas.

Isto pode ser atribuído tanto à dificuldade de se determinar com precisão o teor de umidade das misturas solo-emulsão, quanto às dúvidas sobre a consideração do estado (sólido ou não) do ligante asfáltico residual no cálculo da massa específica aparente seca, para as duas situações consideradas: a compactação imediatamente após a mistura dos materiais (PNI), ou a compactação 24 horas após a mistura entre o solo seco em estufa e a emulsão asfáltica à temperatura ambiente.

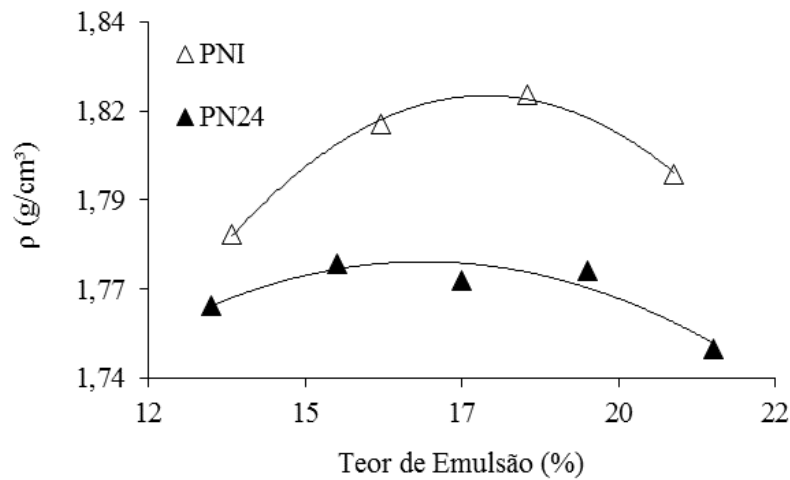
Gráfico 4.4 – Variação da massa específica aparente seca do solo e das misturas solo-emulsão.



Fonte: Elaborado pela autora.

O Gráfico 4.5 mostra as curvas de compactação para as misturas solo-emulsão compactadas imediatamente após a mistura (PNI), e 24 horas após a mistura (PN24), expressas pela variação da massa específica aparente (ρ) com o teor de emulsão em termos de porcentagem da massa total das misturas. Neste gráfico são utilizados os mesmos resultados utilizados no gráfico anterior (Gráfico 4.4), sendo que devido aos pontos tenderem a valores aproximados, foram utilizados somente os primeiros pontos que apresentaram maiores variações.

Gráfico 4.5 – Compactação imediata e 24 horas após a mistura na energia Proctor Normal.



Fonte: Elaborado pela autora.

Analisando estes resultados, observa-se que, em ambos os casos, é possível definir o teor ótimo de emulsão asfáltica como aquele para o qual a mistura apresenta a massa específica aparente máxima. Assim, verifica-se que a massa específica aparente pode ser considerada como um parâmetro mais eficiente na avaliação do processo de compactação das misturas solo-emulsão do que a massa específica aparente seca, normalmente utilizada na definição da condição ótima de compactação dos solos.

Os resultados mostrados no Gráfico 4.5 também indicam que, para a compactação 24 horas após a mistura na energia Proctor Normal das misturas solo-emulsão, houve uma diminuição dos valores da massa específica aparente. Esta diminuição na massa específica aparente pode ser atribuída à dificuldade de aproximação dos grãos minerais do solo, devido ao aumento da rigidez do filme betuminoso após a ruptura da emulsão asfáltica, quando comparada à compactação feita imediatamente após a mistura entre o solo e o material betuminoso.

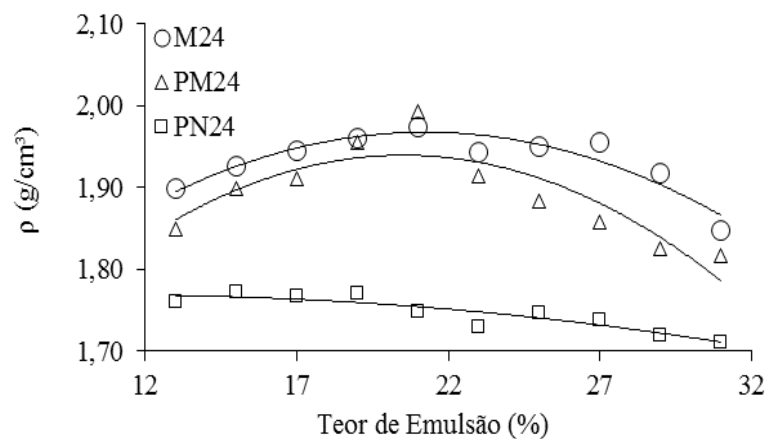
4.4.2 Influência da energia de compactação

Baseado nos resultados anteriores, de que a energia Proctor Normal não foi suficiente para promover a compactação das misturas solo-emulsão em condições nas quais a ruptura da emulsão já tenha ocorrido, as referidas misturas foram então compactadas com a utilização de energias de compactação mais elevadas, especificamente: a Proctor Modificada e a energia correspondente à compactação Marshall (75 golpes/face do corpo de prova).

No Gráfico 4.6, são apresentados os resultados das curvas de compactação das misturas. Estes expressam a influência da energia de compactação nos valores médios da massa específica aparente para cada teor de emulsão utilizado. O aumento da energia de compactação levou a uma definição mais clara da curva de compactação das misturas solo-emulsão para todo o intervalo de teores de emulsão investigado.

Os valores obtidos para a massa específica aparente das misturas compactadas na energia Proctor Modificada e Marshall são significativamente superiores àqueles obtidos para as misturas compactadas na energia Proctor Normal. Isto comprova a hipótese levantada anteriormente, de que o aumento na energia de compactação é capaz de produzir uma maior deformação no filme betuminoso residual que envolve os grãos de solo presentes na mistura solo-emulsão, levando as mesmas a um estado mais compacto.

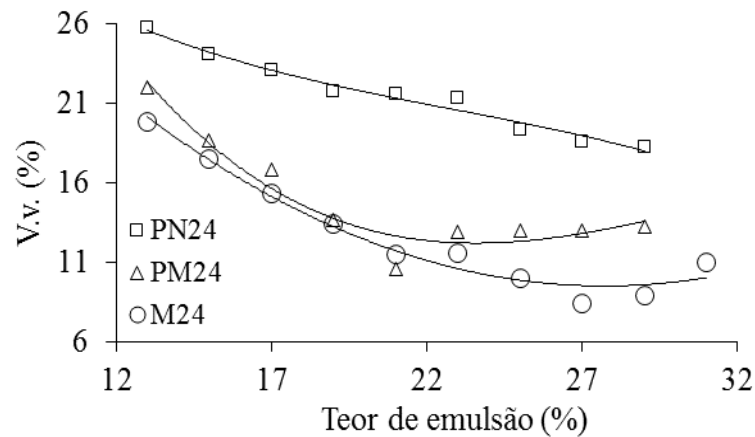
Gráfico 4.6 – Influência da energia de compactação nos valores da massa específica aparente das misturas solo-emulsão.



Fonte: Elaborado pela autora.

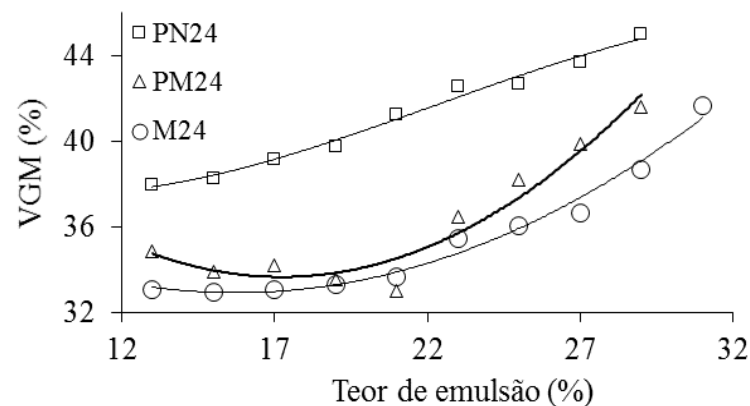
Os Gráficos 4.7 e 4.8 mostram os valores médios da variação da Percentagem do volume de vazios (V_v) e da Percentagem de vazios em relação aos grãos minerais (VGM), respectivamente, em função dos teores de emulsão utilizados nas misturas.

Gráfico 4.7 – Variação do volume de vazios (Vv) com o teor de emulsão, para as diferentes energias de compactação utilizadas.



Fonte: Elaborado pela autora.

Gráfico 4.8 – Variação de VGM com o teor de emulsão, para as diferentes energias de compactação utilizadas.



Fonte: Elaborado pela autora.

Os resultados obtidos mostraram que, ao atingir a condição máxima de compactação, representada pelo máximo valor para a massa específica aparente, a compactação da mistura solo-emulsão nas energias Proctor Modificado e Marshall não mais ocorre. Isto se reflete na constância observada para as porcentagens de volume de vazios, em cujo cálculo o betume residual foi considerado como pertencendo à fase sólida da mistura.

No caso, as misturas compactadas na energia Proctor Normal não apresentaram uma condição ótima de compactação bem definida, e demonstraram uma tendência de diminuição da porcentagem do volume de vazios, para todos os teores de emulsão investigados.

No caso da percentagem de vazios em relação ao grão mineral, observa-se que, ao se atingir a condição ótima de compactação, qualquer acréscimo de emulsão asfáltica irá contribuir para o aumento da espessura do filme betuminoso presente nas misturas solo-emulsão, o qual, devido à sua rigidez, tende a afastar os grãos minerais, aumentando, assim, os vazios no esqueleto mineral.

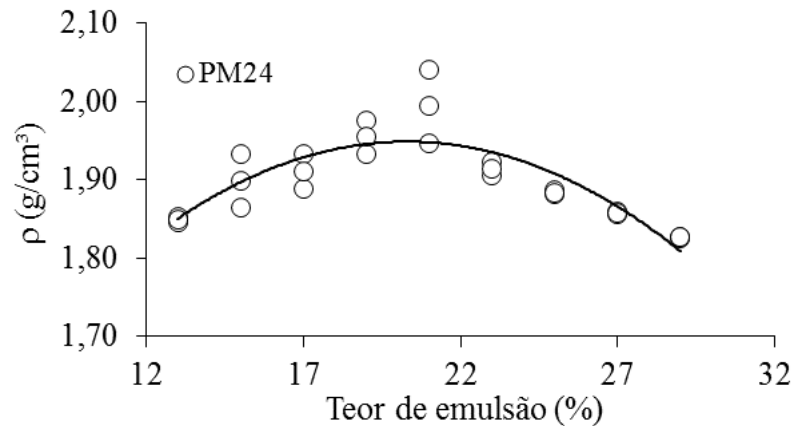
Verificou-se que a compactação Marshall apresentou uma melhor condição em termos de maior massa específica aparente, e menores percentagens de volumes de vazios, apresentando-se como um método mais eficiente na compactação de misturas solo-emulsão com elevados teores de emulsão asfáltica. Isto pode ser explicado pela similaridade entre este tipo de mistura e as misturas asfálticas convencionais utilizadas em pavimentação, para as quais a metodologia Marshall foi desenvolvida.

4.4.3 Estudo da variabilidade dos índices físicos representativos da compactação solo-emulsão

Os Gráficos 4.9 e 4.10 apresentam as curvas de compactação das misturas solo-emulsão confeccionadas 24 horas após a mistura, com as energias Proctor modificada (PM24) e Marshall 75 golpes (M24) respectivamente. Nelas são apresentados os valores de massa específica aparente seca obtidos nos três corpos de prova compactados para cada teor de emulsão avaliado. A curva de compactação apresentada se refere aos valores médios da massa específica aparente obtida.

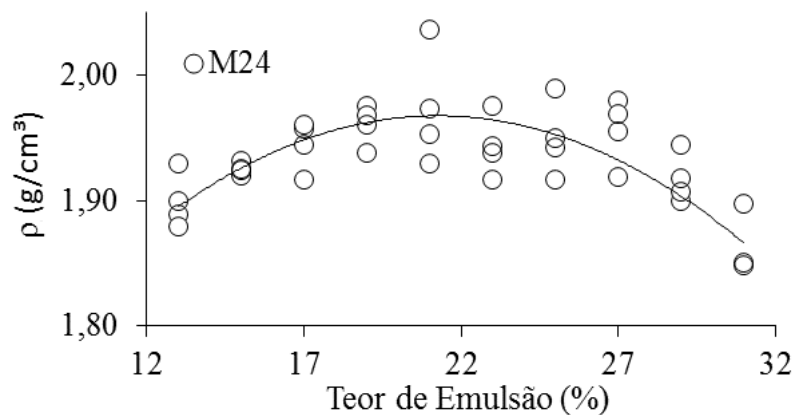
Os resultados mostraram uma variação significativa entre os resultados obtidos para cada teor de emulsão utilizado em relação à massa específica aparente. Esta variação, nos dois casos de compactação PM24 e M24, é menor nas situações em que a mistura é mais homogênea, isto é: para os teores de emulsão correspondentes aos pontos extremos da curva de compactação. Assim sendo, para uma representação adequada da curva de compactação obtida, é imperativo que os ensaios de compactação sejam sempre realizados em pelo menos 3 corpos de prova para cada teor de emulsão utilizado.

Gráfico 4.9 – Variação dos resultados da compactação PM24.



Fonte: Elaborado pela autora.

Gráfico 4.10 – Variação dos resultados da compactação M24.



Fonte: Elaborado pela autora.

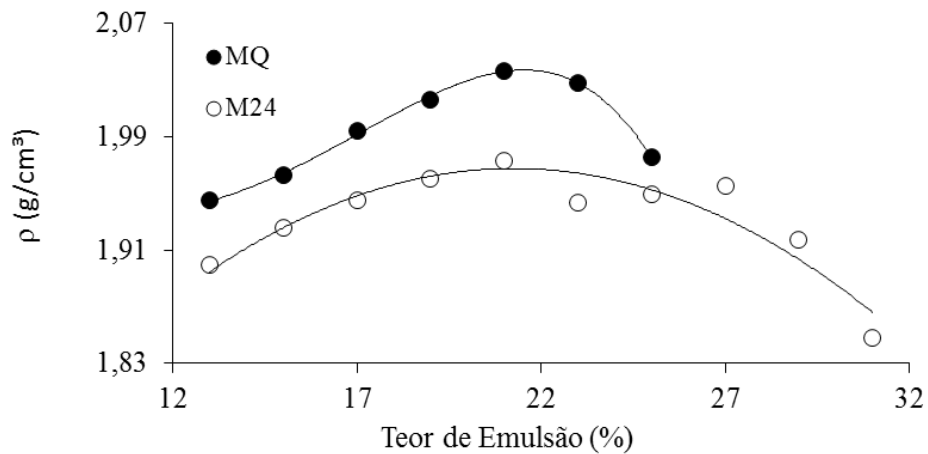
A variação dos resultados detectada pode estar associada ao modo como as misturas foram confeccionadas. No procedimento PM24, as misturas foram confeccionadas individualmente, enquanto que, para o procedimento M24, as misturas para a confecção dos três corpos de prova foram realizadas conjuntamente, e só após o processo de mistura, as três porções de 1.200 g foram separadas para a compactação.

Esse procedimento objetivou tornar as misturas dos três corpos de prova estruturalmente mais uniformes, na tentativa de se obter um padrão aproximadamente igual para os três pontos em cada teor de emulsão estudado. No entanto, esse procedimento resultou em uma variação ainda mais significativa para a mistura M24, o que pode estar associado à dificuldade de se realizar uma adequada mistura entre o solo e o betume quando a quantidade a ser trabalhada é muito grande.

4.4.4 Influência da temperatura do filme betuminoso na compactação das misturas solo-emulsão

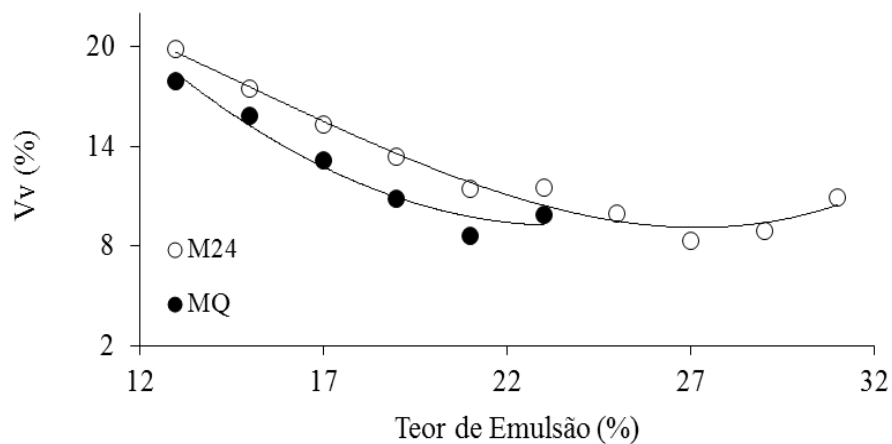
No Gráfico 4.11, são apresentadas as curvas de compactação das misturas M24 (compactadas a temperatura ambiente de aprox. 25°C) e MQ (compactadas a uma temperatura de 100°C). Observa-se que o aumento da temperatura do filme betuminoso, promovido pelo aquecimento da mistura em estufa a 100°C antes da compactação, levou a um aumento na massa específica aparente das misturas solo-emulsão, e a uma diminuição no volume de vazios (Vv e VGM), como mostram os Gráficos 4.12 e 4.13.

Gráfico 4.11 – Curvas de compactação das misturas M24 e MQ.



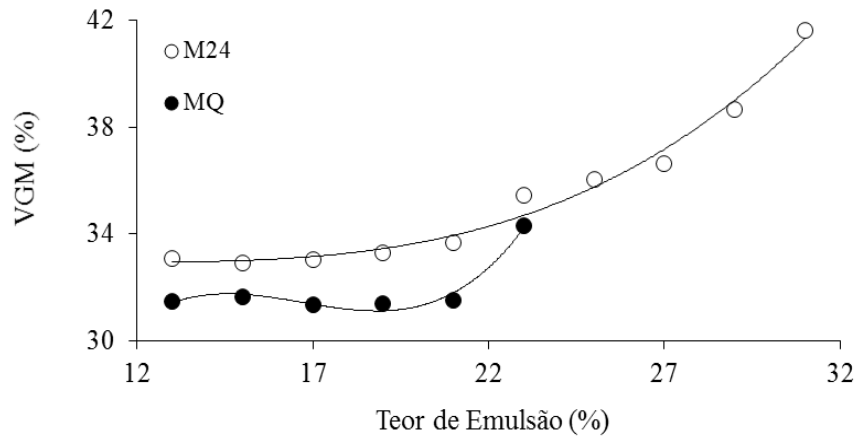
Fonte: Elaborado pela autora.

Gráfico 4.12 – Variação de Vv das misturas M24 e MQ.



Fonte: Elaborado pela autora.

Gráfico 4.13 – Variação de VGM das misturas M24 e MQ.



Fonte: Elaborado pela autora.

Isto comprova a hipótese de que a rigidez do filme betuminoso dificulta a compactação das misturas solo-emulsão com elevados teores de emulsão asfáltica, pois uma vez que a rigidez é diminuída pelo aumento da temperatura, as misturas alcançaram uma condição mais compacta.

4.4.5 Verificação da ação da água como agente lubrificante nas misturas solo-emulsão

A avaliação da ação da água como lubrificante nas misturas foi feita através do procedimento PMA. As misturas solo-emulsão foram confeccionadas com teor de emulsão constante de 21%, e somente 24 horas após a mistura, a água foi acrescentada e as misturas submetidas a compactação. Observou-se que após a formação do filme betuminoso, o asfalto que envolve os grãos, impede (ou no mínimo, dificulta) a molhagem dos mesmos. Isto é explicado pelo fato de que o material asfáltico repele a água adicionada, em razão de ser hidrófugo (material que repele a água), como mostra a Figura 4.1.

Figura 4.1 – Aspecto visual do comportamento da água na mistura solo-emulsão.



Fonte: Elaborado pela autora.

Ocorreu que a água acrescentada à mistura se aderiu à bandeja metálica de mistura e aos equipamentos de compactação, mais do que propriamente à mistura solo-emulsão. Além disso, durante o processo de compactação, foi detectada uma exsudação da água adicionada, processo que se acentuou à medida que a quantidade de água adicionada foi aumentada (nos diferentes corpos de prova confeccionados), como mostrado na Figura 4.2.

Por esta razão, foram obtidos apenas 5 pontos na avaliação deste acréscimo de água à mistura. A partir deste 5º acréscimo, a compactação se tornou impraticável por conta da exsudação da água, que se tornou considerável.

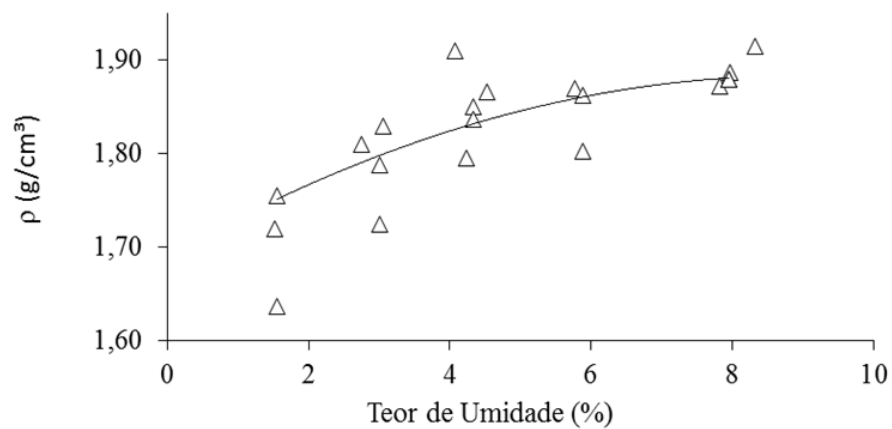
Figura 4.2 – Expulsão da água durante o processo de compactação para o 5º teor de água do procedimento PMA de compactação.



Fonte: Elaborado pela autora.

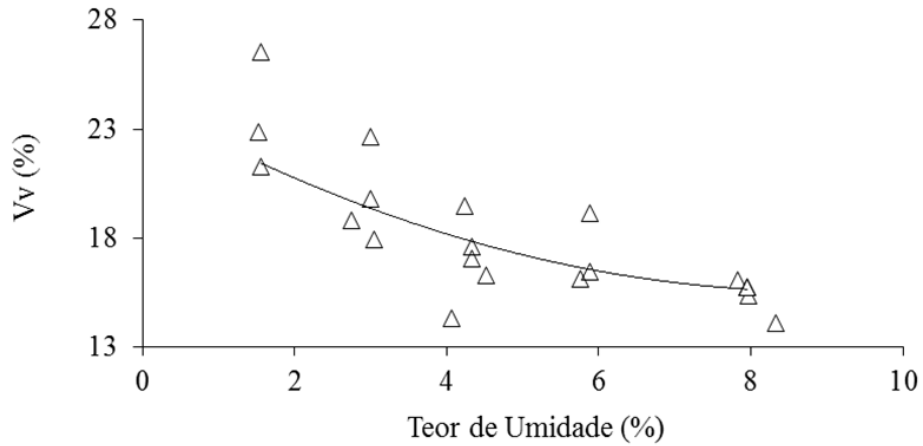
Nos resultados dessa compactação, foram observadas grandes variações dos valores obtidos para cada um dos índices físicos analisados, como mostram os Gráficos 4.14, 4.15 e 4.16.

Gráfico 4.14 – Massa específica aparente resultante do procedimento PMA de compactação.



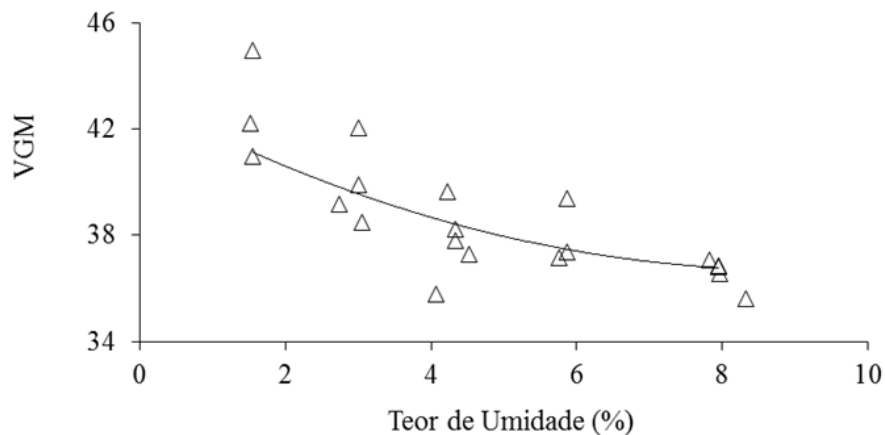
Fonte: Elaborado pela autora.

Gráfico 4.15 – Percentagem de vazios em relação ao grão mineral resultante do procedimento PMA de compactação.



Fonte: Elaborado pela autora.

Gráfico 4.16 – Percentagem de vazios em relação ao grão mineral resultante do procedimento PMA de compactação.



Fonte: Elaborado pela autora.

Observa-se que os resultados são inconclusivos, pois não há um ponto de valor máximo para a massa específica seca, e nem um ponto mínimo de volume de vazios, a partir dos quais passe a existir uma constância no volume de vazios. Os pontos apresentam-se bastante dispersos, dificultando, assim, a interpretação dos resultados.

Os valores da massa específica aparente seca obtidos no procedimento PMA de compactação, entretanto, ficaram bem abaixo dos valores obtidos para o teor de emulsão de 21% da compactação PM24, cujo valor médio foi de 1,99 g/cm³, em relação ao valor máximo de 1,90 g/cm³.

Pode-se afirmar, portanto, que, neste caso específico, a água não funciona com um agente lubrificante de forma semelhante ao que ocorre no processo de compactação dos solos,

quando, além de diminuir o atrito entre os grãos, a água também diminui a sucção, favorecendo a ação dos golpes da energia de compactação empregada. A presença do ligante asfáltico envolvendo os grãos mostrou ter muito maior influência na compactação das misturas solo-emulsão do que a água.

4.4.6 Visualização da estrutura solo-emulsão

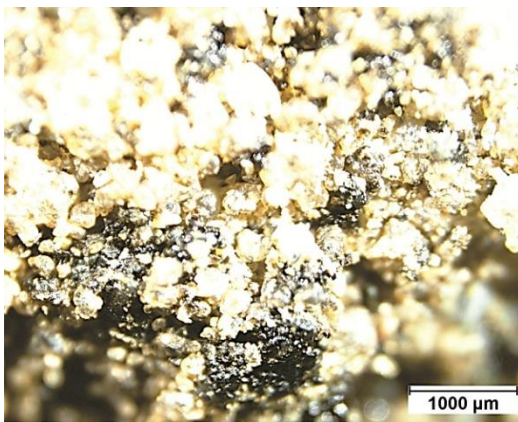
As Figuras 4.3 e 4.4 mostram as estruturas das misturas solo-emulsão M24 (energia Marshall, 24 horas após a misturas, a temperatura ambiente) e MQ (energia Marshall, 24 horas após a mistura, aquecida a 100°C), nos teores de 13% e 31%, respectivamente, obtidas por microscopia (conforme descrito no capítulo 3).

Observa-se que houve um melhor envolvimento dos grãos de solo pelo asfalto residual nas misturas compactadas após o período de 1 horas em estufa a 100°C, do que naquelas compactadas à temperatura ambiente (cerca de 25°C).

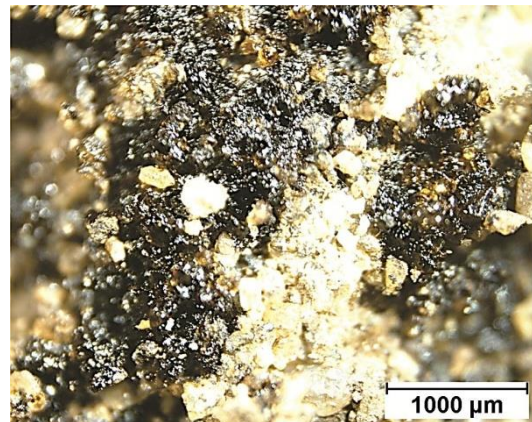
O aumento da temperatura das misturas antes da compactação, além de promover a diminuição da viscosidade do ligante asfáltico, contribuindo para uma melhor compactação, promoveu uma distribuição mais apropriada do asfalto residual no interior da massa de solo.

Isto sugere que o procedimento de aquecimento da emulsão favoreça o comportamento das misturas solo-emulsão, uma vez que, estando a mistura solo-emulsão numa condição de maior homogeneidade, a possibilidade da formação de grumos é minorada, podendo melhorar o desempenho do material em termos de comportamento mecânico e hidráulico.

Figura 4.3 – Estrutura das misturas solo-emulsão compactadas utilizando-se a metodologia Marshall com teor de emulsão igual a 13%.



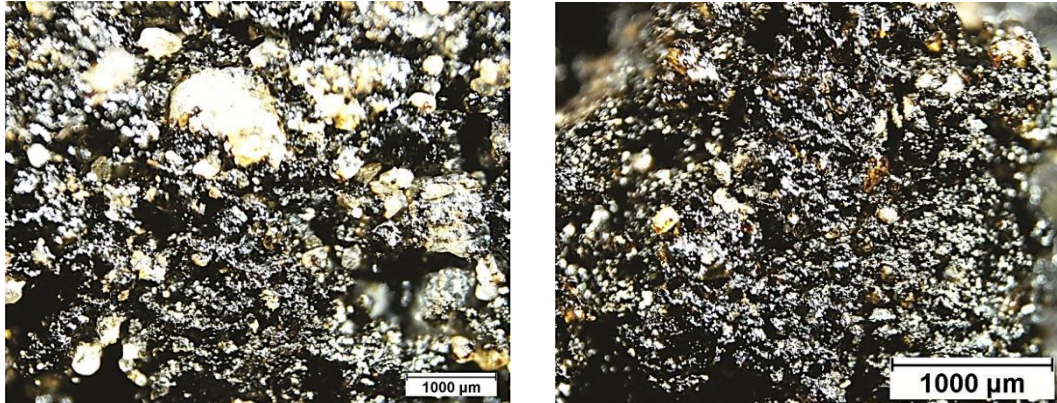
(a) Compactação à temperatura ambiente.



(b) Compactação a 100°C.

Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 4.4 – Estrutura das misturas solo-emulsão compactadas utilizando-se a metodologia Marshall com teor de emulsão igual a 31%.



(a) Compactação à temperatura ambiente.

(b) Compactação a 100°C.

Fonte: Elaborado pela autora.

4.5 Considerações Parciais

Por meio dos resultados obtidos, pôde-se verificar que a adição da emulsão asfáltica ao solo influencia significativamente o processo de compactação. Devido às características viscoelásticas do asfalto residual após a ruptura da emulsão, a rigidez do filme betuminoso faz com que se torne necessária a diminuição da viscosidade do ligante asfáltico, ou o aumento da energia de compactação, a fim de promover um melhor envolvimento dos grãos de solo pelo asfalto residual, além de uma distribuição mais harmoniosa do asfalto no interior da massa de solo.

Sumarizando, as energias de compactação e os parâmetros tradicionalmente utilizados para os solos, em função de sua granulometria, para a avaliação da estrutura compactada, se mostraram ineficientes no processo de compactação das misturas solo-emulsão com elevados teores de emulsão.

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE PESQUISA

5.1 Conclusões

5.1.1 Caracterização química, geotécnica e mineralógica do solo

Os resultados de caracterização do solo utilizado na confecção das misturas solo-emulsão mostraram que se trata de uma areia mal graduada, com silte, classificada como SP-SM segundo o SUCS. Outros ensaios e análises realizados mostraram que a mesma é composta por elevadas proporções de quartzo (94%) e por uma pequena fração de caulinita (6%).

As areias dificilmente apresentam propriedades de resistência ao cisalhamento, estanqueidade e deformabilidade adequadas quando compactadas, sendo consideradas inadequadas à execução de barragens de terra, mostrando que a escolha de um solo arenoso para o estudo da estabilização solo-emulsão foi bastante apropriada.

Entretanto, os resultados obtidos nos ensaios de caracterização química e mineralógica indicaram que o solo apresentava constituintes químicos que dificultam o processo de estabilização.

5.1.2 Compactação das misturas solo-emulsão

A utilização de parâmetros físicos como a massa específica aparente, a percentagem do volume de vazios, e a percentagem do volume de vazios em relação aos grãos minerais, que são parâmetros tradicionalmente utilizados nos estudos de dosagem de misturas asfálticas, apresentaram-se como parâmetros mais eficientes na avaliação do processo de compactação das misturas solo-emulsão, do que os normalmente utilizados na definição da condição ótima de compactação dos solos.

Em relação à compactação das misturas solo-emulsão, foi constatado que a utilização da metodologia Marshall promoveu: (a) aumento na massa específica aparente da mistura solo-emulsão compactada; (b) diminuição da percentagem do volume de vazios (V_v) na estrutura compactada da mistura solo-emulsão; e (c) redução da percentagem de volume de vazios em relação aos grãos minerais (VGM), quando comparados com os resultados obtidos por meio da metodologia Proctor nas energias Normal e Modificada.

Foi possível observar que o aumento da rigidez do filme betuminoso dificulta a compactação das misturas solo-emulsão com elevados teores de emulsão asfáltica. E, a diminuição da viscosidade do filme betuminoso, através do aumento da temperatura das

misturas, provoca uma melhoria das características finais das misturas solo-emulsão submetidas à compactação, o que é expresso pelo aumento da massa específica aparente e pela redução das percentagens de volume de vazios (V_v) e de volume de vazios em relação aos grãos minerais (VGM) na estrutura compactada da mistura solo-emulsão.

Quando comparados os procedimentos de compactação de Marshall e Proctor (Normal e Modificado) para as misturas solo-emulsão confeccionadas, a metodologia Marshall associada ao aquecimento da mistura a 100°C (para diminuir a viscosidade do filme betuminoso residual que envolve os grãos) apresentou melhores resultados finais da compactação das misturas solo-emulsão confeccionadas com elevados teores de emulsão asfáltica.

Em relação ao acréscimo de água às misturas solo-emulsão antes da compactação, observou-se que ela não teve a mesma influência que tem na compactação de solos, onde atua como agente lubrificante, diminuindo o atrito entre os grãos e a sucção, favorecendo a ação dos golpes da energia de compactação empregada. Durante o processo de compactação, foi detectada uma exsudação da água adicionada, o que se acentuou à medida que a quantidade de água adicionada foi aumentada. A presença do ligante asfáltico aquecido mostrou ter muito maior influência na qualidade da compactação das misturas solo-emulsão do que a água.

5.1.3 Visualização da estrutura compactada das misturas solo-emulsão

Os resultados dos ensaios de microscopia realizados nas misturas solo-emulsão compactadas mostraram que o aquecimento do material antes do processo de compactação produziu uma distribuição mais satisfatória do ligante betuminoso na massa de solo. O que resultou em aumento da homogeneidade da mistura, e conseqüentemente, uma estrutura mais compactada, em comparação às misturas compactadas a temperatura ambiente, nas quais é possível observar a formação de aglomerados (grumos) entre o ligante betuminoso e a fração mais fina do solo.

5.3 Sugestões para pesquisas futuras

A seguir, são listadas algumas sugestões para pesquisas futuras, que possam dar continuidade ao que nesta foi realizado.

- Avaliar a influencias da variação de números de golpes no processo de compactação Marshall das misturas solo-emulsão.

- Estudos sobre a influência da adição de aditivos químicos que melhorem a estabilização solo-emulsão;
- Avaliação da influência da adição da emulsão nas características mecânicas, como na resistência à compressão simples, na permeabilidade e deformabilidade dos solos;
- Estudar outros tipos de estabilização;
- Estudo acerca das possíveis alterações químicas dos lagos de barragens, eventualmente geradas pela utilização das misturas solo-emulsão, avaliando as águas segundo os critérios estabelecidos na resolução n° 357/2005 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA);
- Análise das possíveis alterações no ecossistema aquático de lagos barrados, através de uma avaliação ecotoxicológica, realizada por meio de ensaios de toxicidade aguda e crônica, avaliando os resultados segundo os critérios estabelecidos pela resolução n° 430/2011 do CONAMA;
- Estudos de viabilidade econômica do uso do material asfáltico em obras de barragens; e
- Avaliação de outros impactos ambientais gerados pela utilização do material asfáltico nas obras de construção de barragens.

Entende-se que estudos adicionais a respeito do tema ora discutido, e a definição de uma metodologia de dosagem e compactação das misturas solo-emulsão confeccionadas com materiais mais granulares são imprescindíveis, e que estes devem ser realizados, a fim de dar continuidade a este trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMARAL, Simonne da Costa. **Estudo de misturas asfálticas densas com agregado do estado do Pará, utilizando asfalto convencional (CAP-40) e asfalto modificado com polímero SBS (Betuflex B 65/60)**. 2000. 218 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000. Cap. 6.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **Mb 581/1971: Emulsão Asfáltica – Viscosidade “saybolt-furol” de Emulsões Asfálticas**. Rio de Janeiro, 1971.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **Mb 609/1971: Emulsão Asfáltica – Determinação da Peneiração de Emulsões Asfálticas**. Rio de Janeiro, 1971.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **Nbr 6457/1986: Amostras de Solo – Preparação Para Ensaios de Compactação e Ensaios de Caracterização**. Rio de Janeiro, 2000.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **Nbr 6459/1984: Solo – Determinação do Limite de Liquidez**. Rio de Janeiro, 1984.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **Nbr 6508/1984: Solo – Grãos de Solos Que Passam na Peneira de 4,8 Mm - Determinação da Massa Específica**. Rio de Janeiro, 1984.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **Nbr 6568/1984: Emulsão Asfáltica – Determinação do Resíduo de Destilação de Emulsão Asfáltica**. Rio de Janeiro, 1984.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **Nbr 7180/1984: Solo – Determinação do Limite de Plasticidade**. Rio de Janeiro, 1984.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **Nbr 7181/84: Solo – Análise Granulométrica**. Rio de Janeiro, 1984.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **Nbr 7182/86: Solo – Ensaio de Compactação**. Rio de Janeiro, 1986.
- ASSOCIAÇÃO NACIONAL PARA DIFUSÃO DE ADUBOS (ANDA). **Boletim técnico 2: Interpretação de análise do solo – conceitos e aplicações**. 3. ed. São Paulo: Anda, 1992. 50 p.
- BALBO, José Tadeu. **Pavimentação asfáltica: materiais, projetos e restauração**. São Paulo: Oficina de Textos, 2007. 558 p.
- BERNUCCI, Liedi Bariane et al. **Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros**. Rio de Janeiro: Petrobras; Abeda, 2008. 504 p.
- CAVALCANTE, Erinaldo Hilário et al. **Uso de emulsão asfáltica na estabilização química de três solos de Sergipe**. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE AVALIAÇÃO DE PAVIMENTOS E PROJETOS DE REFORÇO, 4., 2009, Fortaleza. **Anais do IV SINAPPRE**. Rio de Janeiro: Abpv, 2009. p. 0 - 0. CD-ROM.

DANTAS NETO, Silvrano Adonias. **Materiais Asfálticos Alternativos para Uso em Pavimentação**. 2001. 170 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2001. Cap. 6.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). **Manual de métodos de análise de solo**.: Centro Nacional de Pesquisa do Solo. 2. ed. Rio de Janeiro: Embrapa, 1997. 212 p.

FALCÃO, Paulo Roberto Farias. **Aplicação de misturas betuminosas em barragens de terra e enrocamento**. 2003. 106 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2003.

FALCÃO, Paulo Roberto Farias. **Estudo das propriedades mecânicas e hidráulicas de concretos asfálticos para aplicação em barragens**. 2007. 167 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2007.

GEWEHR, Juliano. Métodos de reciclagem a frio. In: XXVIII REUNIÃO DE PAVIMENTAÇÃO URBANA., 18., 2012, São Luiz. **Anais da 18.ª RPU**. Rio de Janeiro: Abpv, 2012. p. 0 - 0. CD-ROM.

GONDIM, Lilian Medeiros. **Estudo experimental de misturas solo-emulsão aplicado às rodovias do agropólo do baixo Jaguaribe – Estado do Ceará**. 2008. 213 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Transporte, Departamento de Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2008.

GOUVEIA, Lilian Tais de; FERNANDES JÚNIOR, José Leomar; SOARES, Jorge Barbosa. Influência da energia de compactação no comportamento volumétrico e mecânico de misturas asfálticas. **Transportes**, São Paulo, v. , n. 1, p.34-41, jul. 2007. Quadrimestral.

GUIMARÃES, Renato Cabral. **Barragens com núcleo de concreto asfáltico – Análise do comportamento mecânico e hidráulico**. 2012. 189 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2012.

JACINTHO, Elza Conrado. **Estudo de propriedades e comportamentos de misturas solo-emulsão aplicado a barragens**. 2010. 311 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2010.

JACINTHO, Elza Conrado. **Estudo do comportamento de misturas solo-emulsão para uso em barragens**. 2005. 160 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2005.

MELO, Rodrigo. **Comportamento de percolação em barragens de enrocamento com núcleo em concreto asfáltico**. 2012. 94 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Transporte, Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2012.

MICELI JUNIOR, Giuseppe. **Comportamento de solos do estado do Rio de Janeiro estabilizados com emulsão asfáltica**. 2006. 267 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Transporte, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2006.

NASCIMENTO, Maria das Vitórias do et al. Comportamento mecânico de misturas asfálticas recicladas com uso de compactação por impacto e por amassamento. **Ciência & Engenharia**, Uberlândia, v. 22, n. 2, p.115-120, jul. 2013. Semestral.

PACHECO, Lysiane Menezes. **Solos estabilizados com emulsão asfáltica para uso em pavimentação: estudo laboratorial**. 2011. 94 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul, 2011.

PESSOA, Francisco Hélio Caitano. **Análise dos solos de Urucu para fins de uso rodoviário**. 2004. 151 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2004.

RAMALHO, Marcelo Carlos et al. Barragem de enrocamento com núcleo asfáltico na UHE Jirau. In: XXIX SEMINÁRIO NACIONAL DE GRANDES BARRAGENS, 29., 2013, Porto de Galinhas. **Anais do 29º SNGB**. Porto de Galinhas: Comitê Brasileiro de Barragens, 2013. p. 0 - 0. CD-ROM.

RAMOS, Pedro Paulo Meireles. **Análise de deformação transientes em misturas asfálticas aplicadas como elemento impermeabilizante em barragens de enrocamento**. 2009. 182 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2009.

REBELO, Eude de Paula. **Estudo de mistura solo-emulsão para a região de Urucu (Coari-AM)**. 2009. 115 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2009.

SAMPAIO, Mirian Guillen. **Comportamento mecânico e hídrico de solos estabilizados com emulsão asfáltica**. 2008. 157 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2008.

SANT'ANA, Walter Canales. **Contribuição ao estudo de solo-emulsão em pavimentos de rodovias de baixo volume de tráfego para o estado do Maranhão**. 2009. 341 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

SANTANA, Humberto. **Manual de pré-misturados a frio**. Rio de Janeiro, RJ: Ibp/comissão de Asfalto, 1992.

SILVA, Amanda Luzia da. **Caracterização mineralógica por difração de raios x e determinação de terras raras por ICP-MS de rochas da região sul da Bahia**. 2013. 100 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Nuclear, Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013.

SOLIZ, Valeria Vaca Pereira. **Estudo de três solos estabilizados com emulsão asfáltica**. 2007. 166 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

SOUZA NETO, Francisco Alberto David Duarte de. **Concreto asfáltico para núcleo de barragem - Caso da UHE Jirau, RO**. 2013. 131 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.

SUÁREZ, David Alex Arancibia. **Estudo do comportamento mecânico de dois solos lateríticos do Estado de São Paulo com adição de emulsão asfáltica**. 2008. 144 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.

THULER, Raphael Barbetto. **Estudo de solos do estado do Rio de Janeiro para aplicação em rodovias de baixo volume de tráfego**. 2005. 125 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

WHITEOAK, David. **Shell bitumen handbook**. 4. ed. Chertsey, Inglaterra: Shell Bitumen Uk, 1990.