



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

CARLOS GUTIERREZ FARIAS PEREIRA

**AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO HIDRÁULICO E DA RESISTÊNCIA AO
CISALHAMENTO DE MISTURAS ENTRE SOLO ARENOSO E ELEVADOS TEORES
DE EMULSÃO ASFÁLTICA PARA APLICAÇÕES EM BARRAGENS**

FORTALEZA

2018

CARLOS GUTIERREZ FARIAS PEREIRA

AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO HIDRÁULICO E DA RESISTÊNCIA AO
CISALHAMENTO DE MISTURAS ENTRE SOLO ARENOSO E ELEVADOS TEORES DE
EMULSÃO ASFÁLTICA PARA APLICAÇÕES EM BARRAGENS

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

Orientador: Prof. Dr. Silvrano Adonias Dantas Neto

FORTALEZA

2018

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)

P49a Pereira, Carlos Gutierrez Farias.
Avaliação do comportamento hidráulico e da resistência ao cisalhamento de misturas entre solo arenoso e elevados teores de emulsão asfáltica para aplicações em barragens / Carlos Gutierrez Farias Pereira. – 2018.
134 f. : il.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de PósGraduação em Engenharia Civil: Geotecnia, Fortaleza, 2018. Orientação: Prof. Dr. Silvrano Adonias Dantas Neto.

1. Barragem. 2. Solo-emulsão. 3. Permeabilidade. 4. Resistência ao cisalhamento. I. Título.

CDD 624.15

CARLOS GUTIERREZ FARIAS PEREIRA

AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO HIDRÁULICO E DA RESISTÊNCIA AO
CISALHAMENTO DE MISTURAS ENTRE SOLO ARENOSO E ELEVADOS TEORES
DE EMULSÃO ASFÁLTICA PARA APLICAÇÕES EM BARRAGENS

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

Aprovada em: 23 / 08 / 2018 .

BANCA EXAMINADORA

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

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

Prof. Dra. Michéle Dal Toé Casagrande (Examinadora Externa)
Universidade de Brasília (UnB)

A minha mãe,

Maria Alice Rodrigues Farias, que está sempre comigo. Ao meu irmão, Carlos Williamberg Farias Alves Pereira, que sempre me apoiou.

Aos meus Professores e amigos, que me motivam e me fazem feliz.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus pelas bênçãos derramadas na minha vida, em particular na minha jornada do curso de mestrado em Geotecnia na UFC. O percurso para chegar até aqui não foi fácil, porém, as dificuldades se minimizam na medida em que Deus coloca pessoas iluminadas em nosso caminho, que de alguma forma contribuíram para completar essa jornada. Por esse motivo, venho com os meus sinceros sentimentos de gratidão agradecer:

Ao Professor Dr. Silvrano Adonias Dantas Neto, pela excelente orientação e por sempre ter acreditado que a realização do trabalho fosse possível.

Aos professores participantes da banca examinadora Dr. Francisco Chagas da Silva Filho e Dra. Michéle Dal Toé Casagrande pelo tempo, pelas valiosas colaborações e sugestões.

À minha mãe, Maria Alice Rodrigues Farias, e ao meu irmão, Carlos Williamberg Farias Alves Pereira, por estarem sempre me apoiando na luta pelos meus sonhos.

À professora e amiga Ivone de Lima Silva, pela paciência, competência e presteza em ter realizado as devidas correções gramaticais da dissertação.

Aos colegas do Laboratório de Mecânica dos Solos e Pavimentação (LMSP) da UFC, entre eles: Anselmo, Siroga, Eugênio, Francisco Roberto e Ana.

À empresa Asfalto Nordeste, pela doação da emulsão asfáltica utilizada no trabalho.

Aos bolsistas de iniciação científica, Jordan Macedo e Ammanda Aragão Abreu, pelo apoio nos ensaios realizados.

À Escola de Ensino Fundamental e Médio CAIC Senador Carlos Jereissati, nela agradeço em especial ao professor Antônio Tavares Bittencourt, à Ondina e à secretária Erbenice Araújo por todo incentivo que estes me deram. Sem dúvida, o apoio que obtive através de seus esforços foi essencial na concretização do meu sonho de ingressar na faculdade.

Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará pela oportunidade de iniciar e concluir o curso de Licenciatura em Matemática, no qual me atribuiu requisito de cursar o mestrado na Universidade Federal do Ceará.

Aos meus amigos Daniel Souza e Dryelen Herminio, pelo apoio e tempo que se dispuseram em me ajudar.

Às minhas amigas Locrécia e Kika, por estarem sempre presentes apoiando e acreditando no resultado final deste curso.

Por fim, agradeço a todos que contribuíram direta, ou indiretamente para que meus sonhos pudessem se tornar realidade.

A PEDRA

O distraído nela tropeçou.
O bruto a usou como projétil.
O empreendedor, usando-a, construiu.
O camponês, cansado da vida, dela fez assento.
Para meninos, foi brinquedo.
Drummond a poetizou.
Já, Davi, matou Golias, e Michelangelo extraiu-lhe
a mais bela escultura.
E em todos esses casos, a diferença
não esteve na pedra, mas no homem!
Não existe “pedra” no seu caminho que você não
possa aproveitá-la para o seu próprio crescimento.

Antonio Pereira

RESUMO

Esta pesquisa foi realizada com o intuito de estudar o comportamento hidráulico e mecânico de misturas entre solo e elevados teores de emulsão asfáltica cujos resultados permitem sua utilização, por exemplo, na execução de obras em barragens. A metodologia empregada compreendeu a coleta e caracterização de um solo arenoso por meio de ensaios realizados em laboratório; na compactação das misturas utilizando-se diferentes metodologias de compactação, com teores de emulsão variando entre 13% a 28%; a realização de ensaios de permeabilidade à carga variável para a identificação das variáveis que influenciam no comportamento hidráulico das misturas estudadas; a realização de ensaios de cisalhamento direto para analisar o comportamento dos parâmetros de resistência ao cisalhamento das misturas solo-emulsão; e a realização de análises de fluxo e de estabilidade de taludes. Os resultados mostraram que a adição de emulsão asfáltica no solo contribuiu para a diminuição do coeficiente de permeabilidade das misturas solo-emulsão em relação à amostra de solo compactada e que para elevados teores de emulsão asfáltica os valores dos coeficientes de permeabilidade de todos os corpos de prova analisados convergiram para 10^{-8} m/s. Os resultados obtidos nos ensaios de resistência ao cisalhamento mostraram que a adição da emulsão asfáltica colaborou para a redução do ângulo de atrito interno e para o aumento da coesão das misturas solo-emulsão, considerando os baixos níveis de carregamento. As análises de fluxo e de estabilidade de taludes realizadas indicaram que as vazões e os gradientes máximos obtidos nas análises de fluxo das barragens homogêneas constituídas pelas misturas solo-emulsão foram inferiores aos valores obtidos nas barragens homogêneas constituídas pelo solo arenoso, e as análises feitas nos taludes barragens homogêneas formadas pelas misturas entre o solo e a emulsão asfáltica apresentaram uma inclinação inferior àqueles para as barragens homogêneas constituídas pelo solo arenoso, de forma que atendessem às condições mínimas de segurança necessárias. Para as barragens zonadas formadas com solo-emulsão, a avaliação das condições de fluxo e estabilidade dos taludes apresentaram um comportamento semelhante ao obtido considerando os núcleos formados por solos argilosos. De forma geral, os resultados obtidos nos ensaios foram satisfatórios, pois observa-se que houve a estabilização do solo, caracterizada pela diminuição do coeficiente de permeabilidade das misturas entre solo e emulsão em relação às amostras de solo compactadas e pela mudança de comportamento das propriedades de resistência ao cisalhamento.

Palavras-chave: Barragem. Solo – emulsão. Permeabilidade. Resistência ao cisalhamento.

ABSTRACT

This research was carried out with the aim of studying the hydraulic and mechanical behavior of soil mixtures with high asphalt emulsion contents. The results allow their use, for example, in the execution of works in dams. The methodology used included the collection and characterization of a sandy soil by means of laboratory tests; in the compaction of the mixtures using different compaction methodologies, with emulsion contents ranging from 13% to 28%; the performance of variable load permeability tests to identify the variables that influence the hydraulic behavior of the studied mixtures; the performance of direct shear tests to analyze the behavior of the shear strength parameters of the soil-emulsion mixtures; and the analysis of flow and slope stability. The results showed that the addition of asphalt emulsion in the soil contributed to the decrease of the permeability coefficient of the soil-emulsion mixtures in relation to the compacted soil sample and that, for high asphalt emulsion contents, the values of the permeability coefficients of all the bodies of analyzed converged to 10^{-8} m / s. The results obtained in the tests of shear strength showed that the addition of the asphalt emulsion contributed to the reduction of the internal friction angle and to increase the cohesion of the soil-emulsion mixtures, considering the low loading levels. Flow and slope stability analyzes showed that the flow rates and the maximum gradients obtained in the flow analysis of the homogeneous dams constituted by the soil-emulsion mixtures were lower than the values obtained in the homogeneous dams constituted by the sandy soil, and the analyzes made in the slopes homogeneous dams formed by the mixtures between the soil and the asphalt emulsion presented a lower slope than those for the homogeneous dams constituted by the sandy soil, so that they met the minimum necessary safety conditions. For the zoned dams formed with soil-emulsion, the evaluation of the conditions of flow and stability of the slopes presented a behavior similar to that obtained considering the nuclei formed by clayey soils. In general, the results obtained in the tests were satisfactory, since soil stabilization was observed, characterized by the decrease of the permeability coefficient of the mixtures between soil and emulsion in relation to the compacted soil samples and by the behavior change of the properties of shear strength.

Keywords: Dam. Soil-emulsion. Permeability. Shear Strength.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	– Curvas de compactação na energia Proctor Intermediária para o solo do tipo A-2-4 e suas misturas com emulsão.....	34
Figura 2.2	– Curvas de compactação com energia Proctor Normal para o solo do tipo SC e suas misturas com emulsão (RL – 1C).....	35
Figura 2.3	– Curvas de compactação com energia Proctor Normal para o solo do tipo SC e suas misturas com emulsão (RL – 1C dosada).....	35
Figura 2.4	– Curva de compactação do solo do tipo SM (areia siltosa) e de suas misturas com emulsão.....	36
Figura 2.5	– Curva de compactação do solo do tipo SC-SM (areia argilo – siltosa) e de suas misturas com emulsão.....	37
Figura 2.6	– Curva de compactação do solo do tipo CL (argila de baixa plasticidade arenosa) e de suas misturas com emulsão.....	37
Figura 2.7	– Curvas de compactação do solo do tipo SM e de suas misturas.....	40
Figura 2.8	– Curvas de compactação do solo do tipo SC e de suas misturas.....	41
Figura 2.9	– Curvas de compactação do solo do tipo CL e de suas misturas.....	41
Figura 2.10	– Curvas de compactação do solo do tipo SM e de suas misturas.....	42
Figura 2.11	– Curvas de compactação do solo do tipo SC e de suas misturas.....	43
Figura 2.12	– Curvas de compactação do solo do tipo CL e de suas misturas.....	43
Figura 2.13	– Variação da massa específica aparente seca do solo com o teor de umidade, do solo e das misturas entre o solo e elevados teores de emulsão.....	46
Figura 2.14	– Compactação imediata e 24 horas após a mistura na energia Proctor Normal..	47
Figura 2.15	– Influência da energia de compactação nos valores da massa específica aparente das misturas entre o solo e elevados teores de emulsão.....	48
Figura 2.16	– Compactação quente e 24 horas após a mistura na energia Marshall.....	48
Figura 2.17	– Variação do coeficiente de permeabilidade (k_{20}) com o teor de emulsão (Solo SM).....	51

Figura 2.18 – Variação do coeficiente de permeabilidade (k_{20}) com o teor de emulsão (Solo SC).....	51
Figura 2.19 – Variação do coeficiente de permeabilidade (k_{20}) com o teor de emulsão (Solo CL).....	52
Figura 2.20 – Classificação das fibras.....	54
Figura 2.21 – Envoltórias das tensões cisalhantes na ruptura em função da tensão normal efetiva.....	55
Figura 2.22 – Curvas de tensão de cisalhamento (τ) em função do deslocamento horizontal (δ_h) do solo reforçado com fibras kraft e do solo SC.....	57
Figura 2.23 – Envoltórias das tensões cisalhantes na ruptura em função da tensão normal efetiva.....	57
Figura 2.24 – Tensão desviadora (q) em função da deformação axial (ϵ_a) do solo natural e com fibras.....	58
Figura 2.25 – Trajetória de tensões efetivas do solo natural e do solo reforçado por fibras....	59
Figura 2.26 – Envoltórias das tensões cisalhantes na ruptura em função da tensão normal efetiva.....	60
Figura 2.27 – Curvas de tensão de cisalhamento (τ) em função do deslocamento horizontal (δ_h) dos solos reforçados com 0,5% de fibras de polipropileno e sem reforço..	61
Figura 2.28 – Envoltórias das tensões cisalhantes na ruptura em função da tensão normal efetiva.....	62
Figura 2.29 – Tensão desviadora (q) em função da deformação axial (ϵ_a) do solo natural e com fibras de polipropileno.....	63
Figura 2.30 – Trajetória de tensões efetivas do solo natural e do solo reforçado por fibras....	64
Figura 3.1 – Localização da área de coleta da amostra de solo para a preparação das misturas solo – emulsão.....	67
Figura 3.2 – Vista do local de coleta do solo no campus pici da UFC.....	67
Figura 3.3 – Comparação entre as curvas de distribuição granulométrica dos solos utilizados.....	69

Figura 3.4	– Curvas de compactação do solo.....	70
Figura 3.5	– Etapas das misturas entre solo e elevados teores de emulsão.....	72
Figura 3.6	– Compactação da mistura solo-emulsão – ensaio Proctor.....	73
Figura 3.7	– Compactação da mistura solo-emulsão – ensaio Marshall.....	74
Figura 3.8	– Curvas de compactação das misturas entre solo e elevados teores de emulsão com diferentes tipos de energia de compactação.....	74
Figura 3.9	– Etapas da execução do ensaio de permeabilidade.....	77
Figura 3.10	– Etapas da execução do ensaio de cisalhamento direto.....	79
Figura 4.1	– Variação do coeficiente de permeabilidade (k_{20}) em função do teor de emulsão asfáltica (%).....	86
Figura 4.2	– Variação do coeficiente de permeabilidade (k_{20}) em função da massa específica aparente.....	88
Figura 4.3	– Curvas de tensão de cisalhamento (τ) em função do deslocamento horizontal (δ_h) das misturas solo – emulsão e do solo SM.....	90
Figura 4.4	– Comparação entre o comportamento cisalhante das misturas solo – emulsão e do solo SM.....	91
Figura 4.5	– Envoltórias das tensões cisalhantes na ruptura em função da tensão normal efetiva.....	92
Figura 4.6	– Comportamento da mistura quando solicitada a baixos níveis de tensões.....	93
Figura 4.7	– Comportamento da mistura quando solicitada a altos níveis de tensões.....	93
Figura 4.8	– Seção genérica da barragem homogênea utilizada nas simulações numéricas de fluxo e análises de estabilidade de taludes.....	95
Figura 4.9	– Seção genérica da barragem zonada com o núcleo impermeável utilizada nas simulações numéricas de fluxo e análises de estabilidade de taludes.....	96
Figura 4.10	– Distribuição dos gradientes hidráulicos na barragem homogênea considerando o material do aterro como sendo a mistura solo-emulsão – Marshall imediato (16 % de emulsão).....	98

Figura 4.11 – Distribuição dos gradientes hidráulicos na barragem homogênea considerando o material do aterro como sendo a mistura solo-emulsão – Marshall 24 horas (22 % de emulsão).....	99
Figura 4.12 – Distribuição dos gradientes hidráulicos na barragem homogênea considerando o material do aterro como sendo o solo SM compactado na energia Proctor Modificada.....	99
Figura 4.13 – Distribuição dos gradientes hidráulicos na barragem zoneada com o núcleo de argila – Solo do tipo CL.....	100
Figura 4.14 – Distribuição dos gradientes hidráulicos na barragem zoneada com o núcleo de argila – Solo do tipo ML – CL.....	101
Figura 4.15 – Distribuição dos gradientes hidráulicos na barragem zoneada com o núcleo de solo-emulsão do procedimento Marshall imediato (16 % de emulsão).....	101
Figura 4.16 – Distribuição dos gradientes hidráulicos na barragem zoneada com o núcleo de solo-emulsão do procedimento Marshall 24 horas (22 % de emulsão).....	101

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	– Especificações dos Cimentos Asfálticos de Petróleo (CAP) – Classificação por penetração – Resolução ANP n° 19, de 11 de julho de 2005.....	26
Tabela 2.2	– Aplicações das emulsões asfálticas produzidas no Brasil.....	30
Tabela 2.3	– Características das emulsões asfálticas para pavimentação.....	31
Tabela 2.4	– Características das emulsões catiônicas modificadas por polímeros elastoméricos.....	32
Tabela 2.5	– Resultados do ensaio de permeabilidade dos solos e de suas misturas.....	38
Tabela 2.6	– Resumo dos procedimentos adotados para a compactação das misturas solo-emulsão por Lima (2016).....	45
Tabela 2.7	– Coesão e ângulo de atrito – Solo do tipo SM.....	53
Tabela 2.8	– Coesão e ângulo de atrito – Solo do tipo SC.....	53
Tabela 2.9	– Coesão e ângulo de atrito – Solo do tipo CL.....	53
Tabela 2.10	– Valores de coesão e ângulo de atrito – solo tipo CL.....	55
Tabela 2.11	– Valores de coesão e ângulo de atrito – solo com vetiver.....	56
Tabela 2.12	– Valores de coesão e ângulo de atrito – solo tipo CL.....	60
Tabela 2.13	– Valores de coesão e ângulo de atrito – solo arenoso.....	61
Tabela 3.1	– Resultados dos ensaios de caracterização da emulsão asfáltica.....	71
Tabela 3.2	– Resumo dos procedimentos adotados para a compactação das misturas entre solo e elevados teores de emulsão.....	73
Tabela 4.1	– Índices físicos dos corpos de prova utilizados nos ensaios de permeabilidade	86
Tabela 4.2	– Índices físicos dos corpos de prova do ensaio de resistência ao cisalhamento.	89
Tabela 4.3	– Coesão e ângulo de atrito efetivos – baixo níveis de carregamento.....	94
Tabela 4.4	– Coesão e ângulo de atrito efetivos – alto níveis de carregamento.....	95
Tabela 4.5	– Dimensões das seções e inclinações dos taludes das barragens homogêneas..	96
Tabela 4.6	– Dimensões das seções e inclinações dos taludes das barragens zoneadas.....	97

Tabela 4.7 – Fatores mínimos requeridos de segurança para barragens de terra e de enrocamento.....	97
Tabela 4.8 – Parâmetros dos materiais utilizados na simulação no <i>software Slide</i> com a finalidade de analisar o fluxo e a estabilidade de talude das barragens.....	98
Tabela 4.9 – Resumo dos resultados das análises de fluxo para barragens homogêneas.....	99
Tabela 4.10 – Resumo dos resultados das análises de fluxo para barragens zoneadas.....	102
Tabela 4.11 – Resultados das análises de estabilidade de taludes das barragens homogêneas.....	103
Tabela 4.12 – Resultados das análises de estabilidade de taludes das barragens zoneadas....	103

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A-2-4	Areia quartzosa
A-4	Silte
A-6	Argila
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABEDA	Associação Brasileira das Empresas Distribuidoras de Asfaltos
AEMA	Asphalt Emulsion Manufacturers Association
ANP	Agência Nacional de Petróleo
ASTM	<i>AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS</i>
CAP	Cimento Asfáltico de Petróleo
CBR	<i>California Bearing Ratio</i>
CBUQ	Concreto betuminoso usinado a quente
CL	Argila de baixa plasticidade
CID	Consolidado isotropicamente drenado
CU	<i>Consolidated Undrained</i>
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
E	Elastoméricos
EA	Emulsão Asfáltica
EM	Especificação de material
ER	Esvaziamento rápido
FC	Final de construção
HRB	<i>Highway Research Board</i>
LA	Lama asfáltica
LARC	Lama de ruptura controlada
LMSP	Laboratório de Mecânica dos Solos e Pavimentação
NL	Não líquido
NP	Não plástico
pH	Potencial hidrogeniônico
PN24	Proctor Normal compactado após 24 horas da mistura
PNI	Proctor Normal compactado imediatamente
PM24	Proctor Modificado compactado após 24 horas da mistura

PMI	Proctor Modificado compactado imediatamente
PMQ	Proctor Modificado compactado quente
PVC	policloreto de polivinila
NBR	Norma Brasileira Regulamentar
M24	Marshall compactado após 24 horas da mistura
MB	Normas relacionadas a métodos de ensaios da ABNT
ME	Método de ensaio
MI	Marshall compactado imeditamente
ML	Silte
ML-CL	Argila siltosa
MQ	Marshall compactado quente
PET	Politereftalato de Etileno
RCC	Resíduos de construção civil
RL	Rupturas Lentas
RM	Rupturas Médias
RO	Regime de operação
RR	Rupturas Rápidas
SC	Areia argilosa
SC-SM	Areia argilo – siltosa
SM	Areia siltosa
SP	Areia mal graduada
SP-SM	Areia siltosa mal graduada
SIRGAS	Sistema de Referência Geocêntrico para a América do Sul
SUCS	Sistema Unificado de Classificação dos Solos
TRB	<i>Transportation Research Board</i>
UFC	Universidade Federal do Ceará
UTM	Universal Transversa de Mercator

LISTA DE SÍMBOLOS

°	Graus
1C	Emulsão asfáltica de menor viscosidade
2C	Emulsão asfáltica de menor viscosidade
%	Porcentagem
°C	Graus Celsius
B	Porcentagem de betume, em massa
c'	Coesão efetiva
c	Coesão total
cm	Centímetro
cm^3	Centímetro cúbico
δ_{mist}	Densidade relativa da mistura solo-betume
ϕ'	Ângulo de atrito interno efetivo
ϕ	Ângulo de atrito interno total
e_{mist}	Índice de vazios
γ	Peso específico aparente
g	Gramas
g/cm^3	Gramas por centímetro cúbico
h	Horas
HCl	Ácido clorídrico
k	Coefficiente de permeabilidade
$k_{20^\circ\text{C}}$	Coefficiente de permeabilidade a 20°C
kN/m^3	QuiloNewton por metro cúbico
kPa	QuiloPascal
l/dia	Litro por dia
M	Massa da amostra total
m^3/m	Metro cúbico por metro
m/s	Metro por segundo
m_{ar}	Massa do asfalto residual (betume)
m_e	Massa de emulsão asfáltica
m_s	Massa de solo seco
mm	Milímetro

ρ	Massa específica aparente da mistura
ρ_b	Massa específica do betume
ρ_s	Massa específica do grão
$\rho_{s,mist}$	Massa específica do sólido da mistura
$\rho_{s,ap,mist}$	Massa específica aparente do sólido da mistura
σ	Tensão normal
s	Segundo
S	Porcentagem de solo na amostra
S_{mist}	Grau de saturação da amostra solo-emulsão
t_e	Teor de emulsão asfáltica
V	Volume total da amostra
V_b	Porcentagem de volume do betume
VGM	Porcentagem de vazios em relação aos grãos minerais
V_v	Porcentagem de vazios na mistura solo-emulsão
w	Umidade da mistura, descontada a porcentagem de água da emulsão, % em massa

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	21
1.1	Motivação da pesquisa	21
1.2	Objetivos da pesquisa	22
<i>1.2.1</i>	<i>Objetivo geral</i>	22
<i>1.2.2</i>	<i>Objetivo específicos</i>	22
1.3	Metodologia	23
1.4	Estrutura do trabalho	23
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	25
2.1	Introdução	25
2.2	Asfalto	25
2.3	Emulsão asfáltica	27
<i>2.3.1</i>	<i>Definições</i>	27
<i>2.3.2</i>	<i>Tipos de emulsões</i>	28
<i>2.3.3</i>	<i>Classificação das emulsões</i>	29
2.4	Estabilização de solos com emulsão asfáltica	33
<i>2.4.1</i>	<i>Empregos na pavimentação</i>	33
<i>2.4.1.1</i>	<i>Influência da adição de emulsão asfáltica na compactação dos solos</i>	33
<i>2.4.1.2</i>	<i>Influência da adição de emulsão asfáltica na permeabilidade dos solos</i>	38
<i>2.4.2</i>	<i>Empregos para barragem</i>	39
<i>2.4.2.1</i>	<i>Influência da adição de emulsão asfáltica na compactação dos solos</i>	39
<i>2.4.2.2</i>	<i>Influência da adição de emulsão asfáltica na permeabilidade dos solos</i>	49
<i>2.4.2.3</i>	<i>Influência da adição de emulsão asfáltica nos parâmetros de resistência ao cisalhamento das misturas solo-emulsão</i>	53
2.5	Reforço com fibras	54
<i>2.5.1</i>	<i>Influência da adição de fibras naturais nos parâmetros de resistência ao cisalhamento dos solos reforçados</i>	55
<i>2.5.2</i>	<i>Influência da adição de fibras artificiais nos parâmetros de resistência ao cisalhamento dos solos reforçados</i>	59
2.6	Conclusões parciais	64
3	MATERIAIS E MÉTODOS	66
3.1	Introdução	66

3.2	O solo utilizado no estudo das misturas solo-emulsão	66
3.3	Caracterização geotécnica do solo e sua classificação no SUCS	68
3.4	Emulsão asfáltica	71
3.5	Procedimentos de mistura entre solo e a emulsão asfáltica	71
3.6	Compactação das misturas solo-emulsão	72
3.7	Ensaio de permeabilidade	75
3.8	Ensaio de resistência ao cisalhamento	77
3.9	Índices físicos utilizados nos estudos de permeabilidade e de resistência ao cisalhamento das misturas entre solo e elevados teores de emulsão	80
3.9.1	<i>Massa específica aparente</i>	80
3.9.2	<i>Massa de emulsão asfáltica</i>	80
3.9.3	<i>Massa de solo seco</i>	80
3.9.4	<i>Massa específica do sólido da mistura</i>	81
3.9.5	<i>Massa específica aparente do sólido da mistura</i>	82
3.9.6	<i>Índice de vazios da amostra solo-emulsão</i>	82
3.9.7	<i>Grau de saturação da amostra solo-emulsão</i>	82
3.9.8	<i>Porcentagem de vazios da na mistura solo-emulsão</i>	83
3.9.9	<i>Porcentagem de volume do betume</i>	83
3.9.10	<i>Porcentagem de vazios em relação aos grãos minerais</i>	84
4	APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS E DISCUSSÕES	85
4.1	Introdução	85
4.2	Propriedades hidráulicas do solo e das misturas entre solo e elevados teores de emulsão	85
4.3	Resistência ao cisalhamento do solo e das misturas entre solo e elevados teores de emulsão	88
4.4	Análises de fluxo e estabilidades de taludes	95
5	CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE PESQUISA	105
5.1	Conclusões	105
5.1.1	<i>Ensaio de permeabilidade das misturas entre solo e elevados teores de emulsão asfáltica</i>	105
5.1.2	<i>Ensaio de cisalhamento direto das misturas entre solo e elevados teores de emulsão asfáltica</i>	106
5.1.3	<i>Análise de fluxo e estabilidade de taludes</i>	106

5.2	Sugestões para pesquisas futuras	107
	REFERÊNCIAS	109
	APÊNDICE A – PLANILHAS DOS ENSAIOS DE PENEIRAMENTO	
	DOS SOLOS	113
	APÊNDICE B – TABELAS DOS DADOS PARA A OBTENÇÃO DA	
	MASSA ESPECÍFICA DOS GRÃOS	115
	APÊNDICE C – PLANILHAS DOS DADOS DOS ENSAIOS DE	
	COMPACTAÇÃO	117
	APÊNDICE D – PLANILHAS DE DADOS E AS FIGURAS QUE	
	REPRESENTAM OS RESULTADOS DA FASE DE ADENSAMENTO	
	DO ENSAIO DE CISALHAMENTO DIRETO.....	120

1 INTRODUÇÃO

1.1 Motivação da pesquisa

As barragens de terra são obras construídas pelo homem desde a Antiguidade, com o intuito de armazenar e controlar a água para a irrigação (Marangon, 2004). Contudo, atualmente elas são construídas para as mais diversas finalidades, como navegabilidade nos rios, abastecimento de populações e indústrias, aproveitamento hidrelétrico, controle de cheias e recreação (Moreira, 2012). Dessa forma, o número de barragens de terra vem aumentando com o passar dos anos, causando, além dos benefícios à sociedade, prejuízos ao meio ambiente, como por exemplo aqueles relacionados à exploração de jazidas em uma dada região.

Uma forma de diminuir a exploração de jazidas para fins de construções de barragens seria a utilização de solos arenosos normalmente abundantes na região inundada. Entretanto, devido as suas características granulométricas, estes solos arenosos disponíveis apresentam elevada permeabilidade não sendo indicados para serem os únicos tipos de materiais empregados em uma barragem por não garantirem as condições de estanqueidade necessárias, sendo, portanto, necessária a sua estabilização. A estabilização de um solo consiste na alteração de qualquer de suas propriedades, com intuito de melhorar o seu comportamento e garantir que as novas características do material atendam às necessidades de uma obra de engenharia (Silva, 2007).

Existem diversas formas de estabilização de um solo, tais como: a estabilização mecânica, a estabilização granulométrica e a estabilização química. Dentre os produtos químicos utilizados na estabilização química, pode-se destacar a cal, o cimento e a emulsão asfáltica, pois são os mais utilizados para este fim (Rebelo, 2009).

Tendo em vista que o material para ser utilizado em um barramento necessita apresentar condições satisfatórias para os parâmetros geotécnicos de permeabilidade, resistência e deformabilidade, é cada vez mais comum o estudo da utilização de novos materiais em barragens, como por exemplo, o uso de materiais betuminosos. Em geral, esses estudos são mais direcionados às barragens com núcleo impermeável constituído por misturas asfálticas do tipo CBUQ (concreto betuminoso usinado a quente), a exemplo de Falcão (2007) e Guimarães (2012).

Além dos estudos citados anteriormente, também existem trabalhos de estabilização de solo com material asfáltico nas áreas de pavimentação e de barragens (Gondim (2008); Suarez (2008); Sampaio (2008); Sant'ana (2009); Santos (2009); Jacintho (2010); Dantas Neto

et al (2016); Lima (2016); etc). Porém, apenas o trabalho de Jacintho (2010) e de Lima (2016) abordaram a estabilização dos solos com emulsão asfáltica para aplicação em barragens. As demais foram desenvolvidas considerando a estabilidade de solos com emulsão asfáltica visando aplicações em pavimentos.

A pesquisa de Jacintho (2010) analisou o comportamento hidráulico e mecânico das misturas solo-emulsão, obtendo resultados inconclusivos ou inconsistentes sobre a estabilização dos solos com adição de emulsão. Isto pode estar relacionado à quantidade pequena de emulsão adicionada no solo, que variava até 8%, em peso. Os baixos teores de emulsão levaram a uma maior heterogeneidade das misturas, com um aumento da sua graduação devida à formação de grumos entre o asfalto residual e a parte mais fina do solo.

Diante disso, a presente pesquisa irá estudar o comportamento hidráulico e mecânico das misturas com teores de emulsão asfáltica variando entre 13% e 28%, em massa. Com isso, pretende-se verificar se a utilização de elevados teores de emulsão asfáltica produz uma maior homogeneidade nas misturas solo-emulsão, buscando, dessa forma, resultados conclusivos a respeito da possível estabilização dos solos.

1.2 Objetivos da pesquisa

1.2.1 Objetivo geral

Este trabalho tem por objetivo avaliar a influência da adição de elevados teores de emulsão asfáltica nas propriedades hidráulicas e na resistência ao cisalhamento de misturas entre solos arenosos e elevados teores de emulsão asfáltica.

1.2.2 Objetivos específicos

Como objetivos específicos podem ser citados:

- a) estudar a influência da adição de elevados teores de emulsão asfáltica nos coeficientes de permeabilidade das misturas ensaiadas;
- b) verificar como ocorre a variação do coeficiente de permeabilidade com a metodologia de compactação;
- c) estudar a influência da adição de elevados teores de emulsão asfáltica nos parâmetros de resistência ao cisalhamento das misturas estudadas;
- d) verificar como ocorre a variação do comportamento cisalhante com a

- metodologia de compactação das misturas estudadas;
- e) avaliar a influência da metodologia de compactação das misturas na sua deformabilidade;
 - f) avaliar a influência da adição de elevados teores de emulsão asfáltica nos solos no comportamento hidráulico de estruturas de barramentos (homogêneas e zonadas);
 - g) avaliar a influência da adição de elevados teores de emulsão asfáltica na estabilidade de taludes das estruturas de barramentos (homogêneas e zonadas).

1.3 Metodologia

O presente trabalho foi constituído por uma pesquisa bibliográfica e por uma pesquisa experimental. Para a pesquisa bibliográfica foram consultados livros, teses, dissertações, monografias, artigos, normas técnicas, etc. O objetivo dessa investigação foi buscar conhecimento sobre o assunto estudado, de forma a embasar os procedimentos laboratoriais a serem realizados e analisar os resultados obtidos.

A pesquisa experimental foi constituída através da realização de ensaios de laboratório com a caracterização dos solos e das misturas asfálticas. Com as amostras de solos coletadas e a emulsão asfáltica foram feitas a confecção e a compactação das misturas, os ensaios de permeabilidade e os ensaios de cisalhamento direto.

Foram realizadas análises de fluxo e análises de estabilidade de taludes para verificar o comportamento dos parâmetros hidráulicos e de resistência na barragem.

1.4 Estrutura do trabalho

Esta dissertação foi dividida em cinco capítulos. Os assuntos abordados em cada capítulo serão descritos a seguir para uma melhor compreensão.

O Capítulo 1 apresenta a introdução do assunto, evidenciando o objeto de estudo, bem como a justificativa da pesquisa. Também são apresentados neste capítulo os objetivos, a metodologia e a estrutura da pesquisa realizada.

O Capítulo 2 apresenta a Revisão Bibliográfica, mostrando os diversos conceitos, as classificações dos materiais asfálticos e os estudos realizados sobre o tema.

O Capítulo 3 apresenta a metodologia empregada no desenvolvimento da pesquisa, descrevendo o ensaio de caracterização dos materiais empregados, assim como os

procedimentos de misturas entre o solo e elevados teores de emulsão para os ensaios de compactação, de permeabilidade e de cisalhamento direto. Também são apresentados os índices físicos e os resultados dos ensaios de compactação realizados.

O Capítulo 4 apresenta os resultados obtidos dos ensaios de permeabilidade e de cisalhamento direto, bem como as análises de fluxo e de estabilidade de taludes, fornecendo elementos essenciais para que se tenha uma conclusão da pesquisa.

O Capítulo 5 apresenta as principais conclusões dos resultados obtidos na pesquisa, bem como as sugestões dos trabalhos futuros que possam complementá-la.

Por fim, são apresentados as Referências Bibliográficas e os Apêndices.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Introdução

Este capítulo apresenta informações sobre conceitos básicos de materiais asfálticos e estabilização dos solos com emulsão asfáltica empregada à pavimentação e para barragens. Tais informações são utilizadas na elaboração da metodologia empregada no desenvolvimento do trabalho e no auxílio da análise dos resultados obtidos.

2.2 Asfalto

O asfalto é considerado um dos materiais mais utilizados pelo homem desde a Antiguidade até aos dias atuais. Este material é empregado principalmente na área da pavimentação, mas outros setores também o utilizam devido a sua versatilidade.

Os asfaltos originam-se do petróleo, sendo obtidos pela evaporação natural de depósitos localizados na superfície terrestre (asfaltos naturais), ou produzidos em unidades industriais denominadas refinarias de petróleo (ABEDA, 2010).

No Brasil, o termo técnico utilizado para asfalto é Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP). Ele é definido como um líquido viscoso, semissólido ou sólido à temperatura ambiente, que possui comportamento termoplástico, tornando-se líquido quando aquecido suficientemente (Micheluzzi, 2016).

Segundo Guimarães (2012), no Brasil, o CAP é especificado pela Agência Nacional de Petróleo (ANP) através da resolução ANP nº 19, de 11 de julho de 2005. Moreira (2010) afirma que a classificação do CAP é obtida pelo teste de penetração, em que uma agulha padrão colocada verticalmente penetra no asfalto (com distância em décimos de milímetro) sob condições de carga, tempo e temperatura, respectivamente, 100 g, 5 s e 25°C. Dessa forma, classifica-se o CAP em: CAP 30 – 45, CAP 50 – 70, CAP 85 – 100 e CAP 150 – 200. Na Tabela 2.1 são mostradas as especificações completas para esse material.

Tabela 2.1 – Especificações dos Cimentos Asfálticos de Petróleo (CAP) – Classificação por penetração – Resolução ANP nº 19, de 11 de julho de 2005.

CARACTERÍSTICAS	UNIDADES	LIMITES				MÉTODOS	
		CAP 30/45	CAP 50/70	CAP 85/100	CAP 150/200	ABNT	ASTM
Penetração (100 g, 5 s, 25°C)	0,1 mm	30-45	50-70	85-100	150-200	NBR 6576	D 5
Ponto de amolecimento, mín	°C	52	46	43	37	NBR 6550	D 36
Viscosidade Saybolt-Furol	s					NBR 14950	E 102
- a 135°C, mín		192	141	110	80		
- a 150°C, mín		90	50	43	36		
- a 177°C, mín		40-150	30-150	15-60	15-60		
OU							
Viscosidade Brookfield	cP					NBR 15184	D 4402
- a 135°C, SP 21...20 rpm, mín		374	274	214	155		
- a 150°C, SP 21, mín		203	112	97	81		
- a 177°C, SP 21		76-285	57-285	28-114	28-114		
Índice de susceptibilidade térmica		(-1,5) a (+0,7)	(-1,5) a (+0,7)	(-1,5) a (+0,7)	(-1,5) a (+0,7)		
Ponto de fulgor, mín.	°C	235	235	235	235	NBR 11341	D 97
Solubilidade em tricloroetileno, mín.	% massa	99,5	99,5	99,5	99,5	NBR 14855	D 2042
Ductibilidade a 25°C, mín.	cm	60	60	100	100	NBR 6293	D 113
Efeito do calor e do ar (RTFOT) a 163°C, 85 mín.							D 2872
Variação em massa, máx.	% massa	0,5	0,5	0,5	0,5		
Aumento do ponto de amolecimento, máx.	°C	8	8	8	8	NBR 6560	D 36
Penetração retida, mín.	%	60	55	55	50	NBR 6576	D 5

Fonte: Adaptado de ABEDA, 2010.

2.3 Emulsão Asfáltica

2.3.1 Definições

A Emulsão Asfáltica (EA) é definida como uma dispersão de pequenas partículas de asfalto em um líquido. Assim, a emulsão pode ser formada por dois líquidos não miscíveis em que, geralmente, a fase contínua é a água (ABEDA, 2010).

No ano 1951, na França, a empresa do ramo do petróleo ESSO começou a disponibilizar ao mercado as emulsões catiônicas. Esse produto servia como uma das formas de liquefazer o CAP para poder utilizá-lo. Elas destacam-se em relação às outras formas de liquefazer o CAP devido a sua versatilidade, pois tem como características:

- a) a possibilidade de manusear à temperatura ambiente;
- b) o emprego na produção de misturas asfálticas;
- c) facilidade em armazenamento.

A Asphalt Emulsion Manufacturers Association (AEMA) citada por ABEDA (2010) define a emulsão asfáltica como uma:

Combinação de três componentes básicos: cimento asfáltico, água e emulsificante. Na emulsificação, esses componentes são introduzidos em um mecanismo conhecido como moinho coloidal, que cisalha o asfalto em pequenos glóbulos. O emulsificante, que é um agente tensoativo, mantém os glóbulos em uma suspensão estável, além de conferir estabilidade à ruptura. O resultado é um produto líquido de coloração marrom, com consistência variando entre a água e um creme, sendo usado em processo a frio de construção e manutenção de estradas (ABEDA, 2010, p. 47).

Segundo Suarez (2008), na fabricação das emulsões asfálticas utilizam-se pequenas quantidades de emulsificantes, em torno de 0,5 a 1,5% em peso sobre a emulsão. Desse modo, eles agem nos seguintes fatores na emulsão:

- a) produzem uma redução da tensão superficial entre o asfalto e a água;
- b) estabilizam a emulsão, fixando-se na periferia dos glóbulos dispersos de asfalto, impedindo assim a sua aglomeração (coalescência), o que provocaria a ruptura da emulsão.

Quando a emulsão entra em contato com o agregado pétreo, inicia-se o processo de ruptura da emulsão, que é a separação do CAP e da água, o que permite o recobrimento do agregado por uma película de asfalto. A água é liberada e evapora. A ruptura da emulsão consiste na anulação da camada de envolvimento dos glóbulos de asfalto dispersos na água, com a consequente união desses glóbulos (coagulação ou floculação) (Bernucci et. al, 2008).

Suarez (2008) relata que uma característica visual da ruptura é a mudança de coloração, que passa de marrom a preta, ou seja, a cor marrom indica que a emulsão não está rompida e a cor preta indica que a emulsão está rompida.

Outro conceito importante a definir é a cura da emulsão asfáltica. Segundo Lima (2012), a cura é uma combinação de fenômenos que tem como consequência a remoção da água do material asfáltico após a ação de quebra total da emulsão, ou quando esse processo encontra-se avançado. O processo de cura possui como resultado final a formação de um filme betuminoso que contribui em manter o agregado fixo e com forte adesividade. Jacintho (2010) também relaciona a cura como evaporação da água da emulsão asfáltica na mistura, na qual em sua pesquisa utilizou alguns procedimentos para alcançá-la, dentre eles, pôr a mistura solo-emulsão em estufa a 40°C durante 24 horas e deixá-la ao ar em um ambiente interno por 30 dias.

2.3.2 Tipos de emulsões

Segundo Lima (2016), as emulsões asfálticas podem ser aniônicas ou catiônicas, isso vai depender do tipo de emulsificante utilizado na fabricação. A emulsão asfáltica é dita aniônica quando as partículas de asfalto são carregadas negativamente, e é dita catiônica quando as partículas de asfalto são carregadas positivamente.

Os emulsificantes aniônicos são sabões em que um ânion orgânico está associado a um álcali. O emulsificante catiônico é, geralmente, o produto da reação de ácidos inorgânicos fortes, tipo HCl, com aminas graxas, e tem uma molécula do tipo $R-HClNH_3$ que se dissocia em água (Sant'ana, 2009).

Segundo Lima (2016), no Brasil, o tipo de emulsão de maior aceitação foi a que possui o emulsificante catiônico na sua composição, pois ela tem uma boa adesividade, tanto aos agregados eletronegativos, quanto aos eletropositivos.

Segundo ABEDA (2010), podem ser listadas como as principais vantagens do emprego das emulsões catiônicas:

- a) levam a uma maior economia de energia, pois são empregadas praticamente sem necessidade de aquecimento;
- b) apresentam excelente afinidade com todos os tipos de agregados, eliminando o uso de aditivos melhoradores de adesividade (dope), normalmente empregados para melhorar a adesividade do cimento asfáltico de petróleo (CAP) em misturas a quente com agregados;

- c) possibilitam a utilização de agregados úmidos evitando a necessidade de combustíveis para a sua secagem;
- d) permitem estocagem à temperatura ambiente em instalações simples que não requerem fonte de aquecimento, combustíveis derivados de petróleo e isolamento térmico;
- e) eliminam os riscos de incêndio e explosões, uma vez que não são utilizados solventes de petróleo em seu emprego;
- f) evitam os riscos de acidentes por queimaduras;
- g) não geram vapores tóxicos e poluentes mitigando impactos ao meio ambiente e à saúde ocupacional dos trabalhadores e da população lindeira às obras;
- h) instalações industriais (usinas) necessárias possibilitam a produção de grandes volumes de misturas em equipamentos de baixo custo de aquisição e manutenção, bem como fácil operação/distribuição, resultando em menores custos em relação às misturas a quente;
- i) a utilização de emulsões modificadas por polímeros tem possibilitado o uso de serviços asfálticos em vias de alto tráfego, melhorando as condições de segurança e de desempenho dos pavimentos frente às ações do tráfego e do clima.

2.3.3 Classificação das emulsões

Gandolfi e Cardoso (2013) afirmam que para garantir o transporte e armazenagem, as emulsões devem ter um mínimo de estabilidade à ruptura, que é garantida pela quantidade e qualidade do emulsificante empregado. Lima (2016) relata que as emulsões podem ser classificadas em função da velocidade de ruptura em três tipos:

- a) Rupturas Rápidas (RR): têm uma porcentagem relativamente baixa de emulsificante e são menos estáveis. Nelas, a água e o ligante se separam logo após a aplicação sobre o agregado, sendo indicadas para tratamentos superficiais, pinturas de ligação, imprimação e macadames betuminosos;
- b) Rupturas Médias (RM): são utilizadas, principalmente, para misturas com agregados limpos e sem pó, na confecção de pré-misturados a frio;
- c) Rupturas Lentas (RL): são utilizadas em estabilizações de solos e no preparo de lamas asfálticas.

Na Tabela 2.2 são apresentadas as principais aplicações para os tipos de emulsão

asfáltica produzidas no Brasil. Além disso, a Tabela 2.3 apresenta a especificação de emulsões asfálticas para a pavimentação, segundo a norma do DNIT 165/2013 – EM, e na Tabela 2.4 são mostradas as especificações para emulsões asfálticas catiônicas modificadas por polímeros elastoméricos, conforme a resolução ANP nº32, de 14 de outubro de 2009 e anexo.

Tabela 2.2 – Aplicações das emulsões asfálticas produzidas no Brasil.

Tipo	
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-misturado a frio, areia-asfalto.
RM - 2C	Pintura de ligação, pré-misturado a frio, areia-asfalto.
RL - 1C	Pintura de ligação, pré-misturado 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: Adaptado de Lima, 2016.

Notas:

La – Lama asfáltica; 1C – Menor viscosidade; 2C – Maior viscosidade; E = Elastoméricos; LARC – Lama de ruptura controlada.

Tabela 2.3 – Características das emulsões asfálticas para pavimentação.

EMULSÕES ASFÁLTICAS PARA PAVIMENTAÇÃO										
CARACTERÍSTICAS	MÉTODOS DE ENSAIO (ABNT)	RUPTURA RÁPIDA		RUPTURA MÉDIA		RUPTURA LENTA				RUPTURA CONTROLADA
		RR-1C	RR-2C	RM-1C	RM-2C	RL-1C	LA-1C	LAN	EAI	LARC
ENSAIOS SOBRE EMULSÃO										
Viscosidade sobre Saybolt-Furol, S, a 25°C	NBR 14491	90 máx	-	-	-	90 máx	90 máx	90 máx	90 máx	90 máx
Viscosidade sobre Saybolt-Furol, S, a 50°C	NBR 14491	-	100-400	20 - 200	100 - 400	-	-	-	-	-
Sedimentação, % em massa, máx.	NBR 6570	5	5	5	5	5	5	5	5	5
Peneiração, 0,84 mm, % massa, máx	NBR 14393	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Resistência à água, % de cobertura, mín.	NBR 14249	80	80	80	80	80	-	-	-	-
Adesividade em agregado miúdo, % mín.	NBR 14757	-	-	-	-	-	75	-	-	75
Carga de partícula	NBR 6567	positiva	positiva	positiva	positiva	positiva	Positiva	neutra	-	positiva
pH, máx.	NBR 6299	-	-	-	-	6,5	-	6,5	8	6,5
Destilação: solvente destilado, % em vol.	NBR 6568	-	-	0 - 12	0 - 12	-	-	-	0 - 15	-
Resíduo seco, % em massa, mín./h	NBR 14376	62	67	62	65	60	60	60	45	60
Desemulsibilidade, % em massa	NBR 6569	50 mín	50 mín	50 mín	50 mín	-	-	-	-	-
Mistura com filler silícico, %	NBR 6302	-	-	-	-	2 mín	1,2 - 2,0	-	-	2 mín
Mistura com cimento, %	NBR 6297	-	-	-	-	2 mín	2 máx	-	-	2 mín
Ensaio sobre o resíduo da emulsão obtido pela ABNT NBR 14896										
Penetração a 25°C, 100 g, 5 s, 0,1 mm	NBR 6576	40 - 150	40-150	40-150	40-150	40-150	40-150	40-150	40-250	40-150
Teor de betume, % mín	NBR 14855	97	97	97	97	97	97	97	97	97
Ductilidade a 25°C, cm, mín.	NBR 6293	40	40	40	40	40	40	40	40	40

Fonte: adaptado de ABEDA, 2010.

Tabela 2.4 – Características das emulsões catiônicas modificadas por polímeros elastoméricos.

CARACTERÍSTICAS	UNIDADE	LIMITE					MÉTODO ¹	
		RUPTURA RÁPIDA		RUPTURA MÉDIA	RUPTURA CONTROLADA	RUPTURA LENTA	ABNT NBR	ASTM
		RR1C - E	RR2C - E	RM1C - E	RC1C - E	RL1C - E		
ENSAIOS SOBRE A EMULSÃO								
Viscosidade Saybolt-Furol, S, a 50°C	s	70 máx.	100 - 400	20 - 200	70 máx.	70 máx.	14491	D 244
Sedimentação, máx.	% massa	5	5	5	5	5	6570	D 6930
Peneiração, 0,84 mm, máx	% massa	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	14393	D 6933
Resistência à água, mín. de cobertura ²							6300	D 244
Agregado seco	%	80	80	80	80	80	6300	D 244
Agregado úmido	%	80	80	60	60	60	6300	D 244
Carga de partícula	-	positiva	positiva	positiva	positiva	positiva	6567	D 244
pH, máx.	-	-	-	-	6,5	6,5	6299	D 244
Destilação: solvente destilado a 360°C, % em vol.	% volume	0 - 3	0 - 3	0 - 12	0	0	6568	D 244
Resíduo seco, mín.	% massa	62	67	62	62	60	14376	D 6934
Desemulsibilidade:								
mín.	% massa	50	50	-	-	-	6569	D 6936
máx.	% massa	-	-	50	-	-	6569	D 6936
Ensaio sobre o resíduo da emulsão obtido pela ABNT NBR 14896								
Penetração a 25°C, 100 g, 5 s	0,1 mm	45 - 150	45 - 150	45 - 150	45 - 150	45 - 150	6576	D 5
Ponto de amolecimento, mín	°C	50	55	55	55	55	6560	D 36
Viscosidade Brookfield a 135°C, SP 21, 20 rpm, mín.	cP	550	600	600	600	600	15184	D 4402
Recuperação elástica a 25°C, 20 cm, mín	%	65	70	70	70	70	15086	D 6084

Fonte: Adaptado de ABEDA, 2010.

1 – Os ensaios devem ser realizados, preferencialmente, pelas normas NBR.

2 – O distribuidor deverá indicar a natureza do agregado usado no ensaio de Certificado de Qualidade quando não houver o envio de amostra ou a informação da natureza do agregado pelo consumidor final.

2.4 Estabilização de solos com emulsão asfáltica

Segundo Gondim (2008), o processo de estabilização consiste da aplicação de um fator estabilizante ao solo, visando modificar as suas propriedades, tornando-o capaz de atender satisfatoriamente a uma dada necessidade prevista em projeto. O fator estabilizante pode ser um aditivo químico, um material granular, ou até mesmo a aplicação de uma energia dinâmica. Além disso, a autora destaca que a expansibilidade, a resistência mecânica, a durabilidade e a permeabilidade são as propriedades de um solo que se busca melhorar, a fim de possibilitar seu uso em obras de engenharia.

Diante disso, neste tópico, será abordada a estabilização de solos com o agente químico, ou seja, com a emulsão asfáltica, a fim de que se possa compreender melhor as suas propriedades, e o estado da arte do tema.

2.4.1 Empregos na pavimentação

Segundo Sant'ana (2009), a estabilização de solo com materiais asfálticos para fins de pavimentação é justificada pela possibilidade de utilização de materiais locais e métodos de mistura na pista, o que é realçado quando há reflexos positivos nos orçamentos das obras.

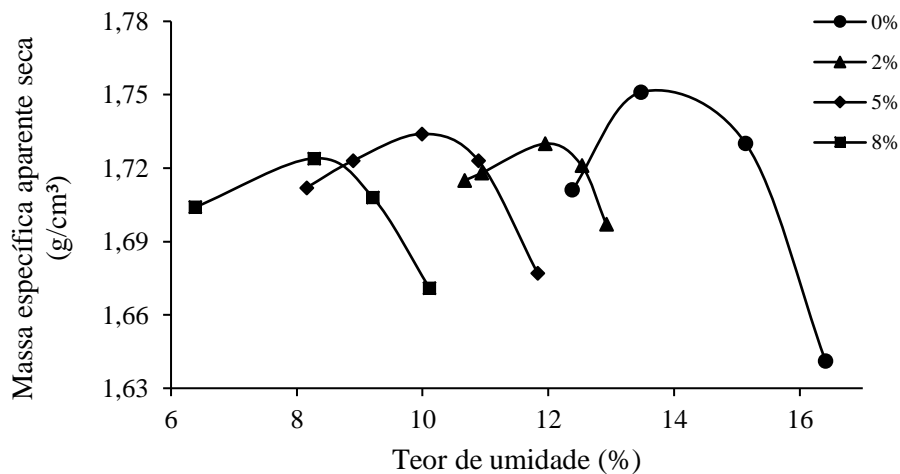
Conforme Gandolfi e Cardoso (2013), os parâmetros a serem determinados para o uso do solo na pavimentação são: compactação, expansão, Índice de Suporte Califórnia e resistência à compressão simples. Desses ensaios, serão apresentados alguns resultados recentes que tenham uma ligação com a presente pesquisa. A seguir, têm-se resultados dos autores Gondim (2008), Suarez (2008) e Santos (2009) que fizeram ensaios de compactação com solo e com solo-emulsão voltados para a pavimentação. Também, neste tópico, serão apresentados os resultados de Sampaio (2008) que realizou em sua pesquisa vários ensaios laboratoriais, dentre eles o ensaio de permeabilidade para avaliar a influência da adição da emulsão nas propriedades hidráulicas dos solos.

2.4.1.1 Influência da adição de emulsão asfáltica na compactação dos solos

Gondim (2008) determinou as curvas de compactação com energia Proctor Intermediário para um solo do tipo A-2-4 (areia quartzosa) na classificação do *Transportation Research Board* (TRB) com, e sem a adição de emulsão (Figura 2.1). No preparo da mistura solo-emulsão, Gondim (2008) diluiu a emulsão asfáltica com água antes de misturar com o solo

porque a emulsão asfáltica pura tem muita dificuldade em se dispersar no solo devido a sua viscosidade. Além disso, Gondim (2008) adicionou água ao solo antes da aplicação da emulsão diluída, pois o solo é considerado um material hidrófilo, que tem capacidade de absorver ou adsorver a água, dessa forma ao colocar a emulsão asfáltica no solo seco ou com baixo teor de umidade pode acelerar o processo de ruptura da emulsão. As curvas foram obtidas a partir da variação do teor de umidade em misturas solo-emulsão confeccionadas com a adição de 2%, 5% e 8% de emulsão asfáltica de ruptura lenta (RL-1C).

Figura 2.1 – Curvas de compactação na energia Proctor Intermediária para o solo do tipo A-2-4 e suas misturas com emulsão.



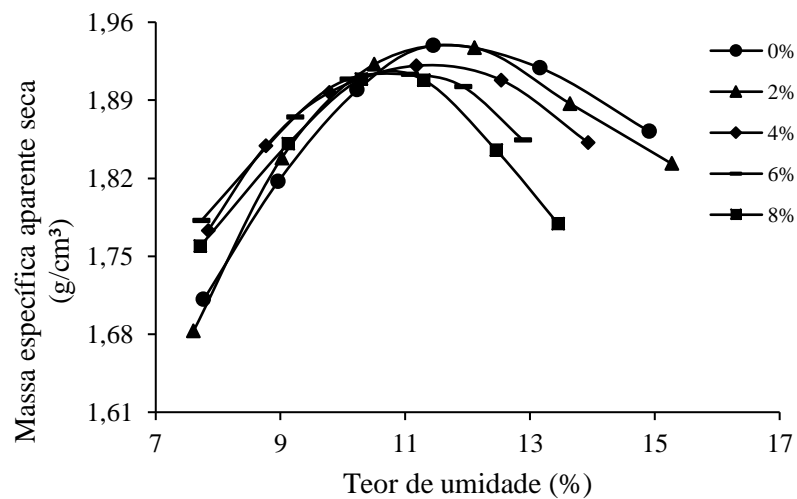
Fonte: Adaptado de Gondim, 2008.

Gondim (2008) verificou que, para o solo A-2-4 (areia quartzosa), à medida que se aumenta o teor de emulsão, a umidade ótima da mistura decresce, de forma que a umidade ótima para a mistura do solo com 8% de emulsão é cerca de 5% mais baixa que a areia quartzosa. Além disso, observa-se que o valor da massa específica aparente seca das misturas com emulsão praticamente permaneceu constante. É possível que isso tenha acontecido pelo fato que a adição da emulsão no solo contribuiu para o aumento da granulometria da mistura resultante.

Suarez (2008) também analisou o comportamento de misturas solo-emulsão. No entanto, utilizou para o ensaio a energia Proctor Normal de compactação para a análise de dois solos, um do tipo SC (areia argilosa) e outro do tipo ML (argiloso) na classificação SUCS. Com metodologia similar a de Gondim (2008), embora não tenha diluído a emulsão asfáltica e nem adicionado água no solo, as curvas foram obtidas a partir da variação do teor de umidade em

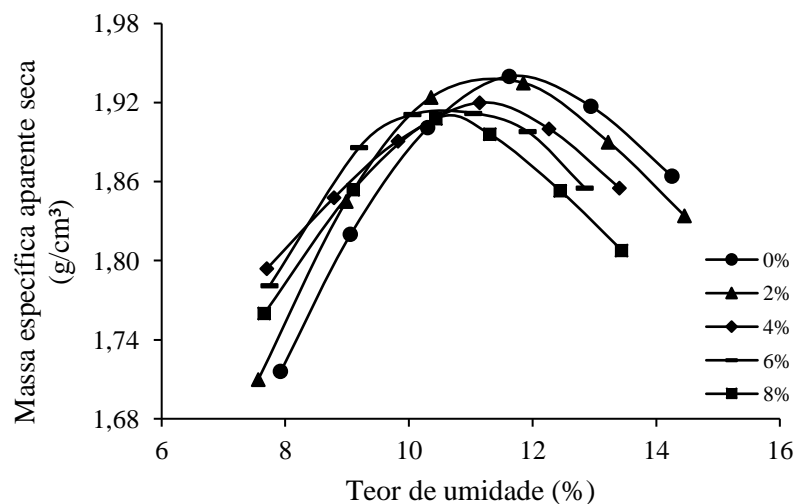
misturas solo-emulsão confeccionadas com a adição de 2%, 4%, 6% e 8% de emulsão asfáltica de ruptura lenta (RL-1C) e dosada (RL-1C dosada), como visto nas Figuras 2.2 e 2.3, respectivamente. Suarez (2008) relata apenas que a emulsão dosada possui propriedades especiais que melhora ainda mais a dispersão e a trabalhabilidade das misturas, sem mais detalhes. Como os resultados de suas análises foram similares a ambos os solos, então será apresentado nas figuras a seguir o resultado apenas do solo do tipo SC.

Figura 2.2 – Curvas de compactação com energia Proctor Normal para o solo do tipo SC e suas misturas com emulsão (RL-1C).



Fonte: Adaptado de Suarez, 2008.

Figura 2.3 – Curvas de compactação com energia Proctor Normal para o solo do tipo SC e suas misturas com emulsão (RL-1C dosada).

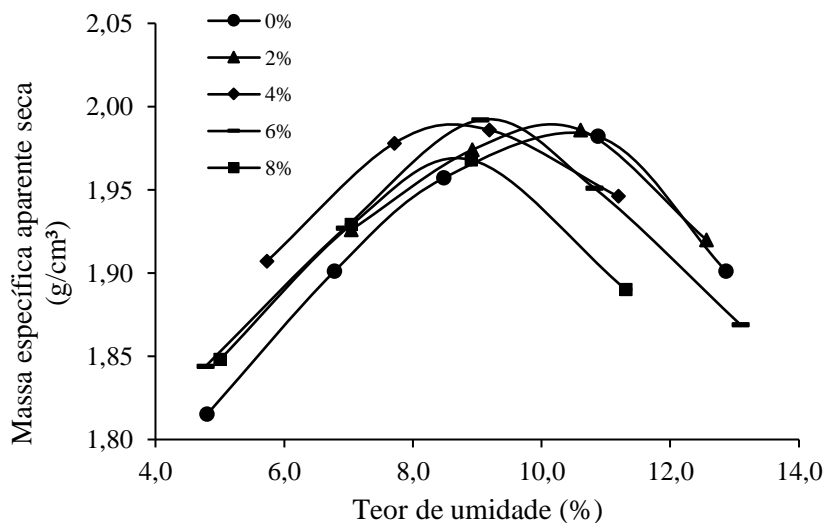


Fonte: Adaptado de Suarez, 2008.

De forma geral, os resultados de Suarez (2008) revelam que a adição de emulsão faz com que haja uma diminuição do teor de umidade e da massa específica aparente seca. Vale ressaltar que os resultados mostram que em ambos os casos a umidade ótima da mistura solo-emulsão decresce com o aumento do teor de emulsão, de forma semelhante ao que ocorre no trabalho de Gondim (2008).

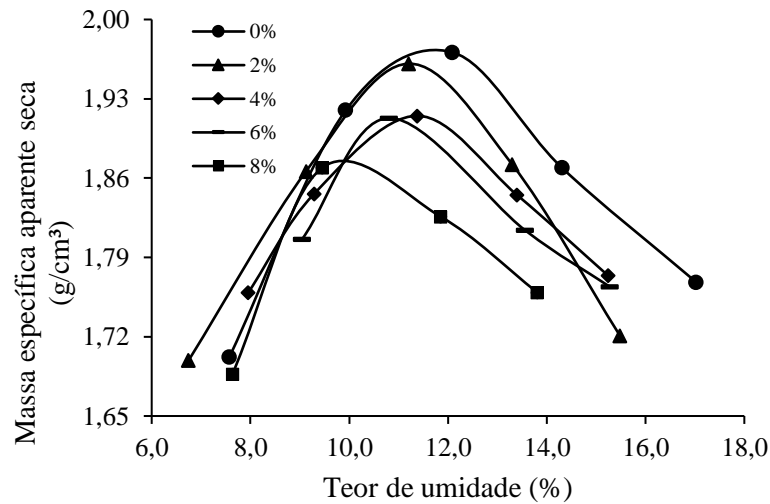
Santos (2009) estudou o comportamento do solo no que se refere à influência da adição da emulsão asfáltica. No trabalho, Santos (2009) utilizou os solos do tipo: SM, SC-SM e CL, da classificação SUCS. Os ensaios foram realizados com a energia Proctor Intermediário, onde foram determinadas a umidade ótima (w_{ot}) e o peso específico aparente seco máximo ($\gamma_{dm\acute{a}x}$) para cada solo em seu estado natural e para as misturas solo-emulsão nos teores 2%, 4%, 6% e 8% em peso de emulsão. A metodologia de preparo das misturas solo-emulsão foi a mesma de Gondim (2008), ou seja, foi adicionada água tanto na emulsão asfáltica quanto no solo por causa dos mesmos motivos citados por Gondim (2008). A emulsão utilizada em sua pesquisa foi a do tipo ruptura lenta de carga elétrica de partículas positivas, ou seja, RL-1C. As Figuras 2.4, 2.5 e 2.6 mostram os resultados obtidos por Santos (2009) em sua pesquisa, em que se têm os gráficos de teor de umidade *versus* massa específica aparente seca das misturas preparadas com 0%, 2%, 4%, 6% e 8% em peso de emulsão asfáltica.

Figura 2.4 – Curva de compactação do solo do tipo SM (areia siltosa) e de suas misturas com emulsão.



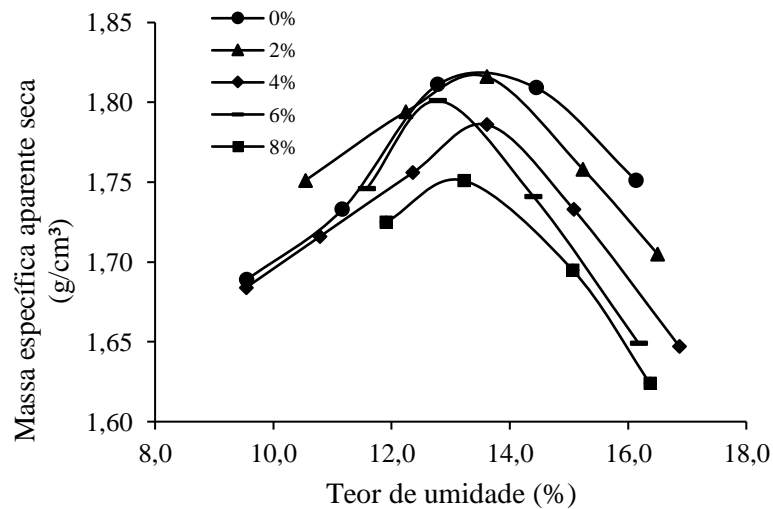
Fonte: Adaptado de Santos, 2009.

Figura 2.5 – Curva de compactação do solo do tipo SC-SM (areia argilo – siltosa) e de suas misturas com emulsão.



Fonte: Adaptado de Santos, 2009.

Figura 2.6 – Curva de compactação do solo do tipo CL (argila de baixa plasticidade arenosa) e de suas misturas com emulsão.



Fonte: Adaptado de Santos, 2009.

Santos (2009) relata que para o solo do tipo SM a umidade ótima diminui à medida que se acrescenta emulsão asfáltica. Por outro lado, a massa específica aparente seca máxima das misturas com emulsão apresentou valores muito próximos do solo sem emulsão, ou seja, praticamente não alterou essa propriedade para esse solo. Para o solo do tipo SC-SM, Santos (2009) verificou que os valores da umidade ótima não variaram muito em relação à adição da emulsão na amostra. Diante disso, pode-se concluir que as curvas de compactação praticamente se mantiveram constantes. Enquanto isso, a massa específica aparente seca máxima apresentou

uma queda à medida que aumentava o teor de emulsão. Para o solo do tipo CL, as curvas de compactação mostram que os valores de umidade ótima praticamente se mantiveram constantes com o aumento de teor de emulsão na amostra. Quanto à massa específica aparente seca máxima, ressalta-se que ela apresentou um comportamento de decréscimo com o aumento do teor de emulsão na amostra.

2.4.1.2 Influência da adição de emulsão asfáltica na permeabilidade dos solos

Sampaio (2008) analisou o comportamento do coeficiente de permeabilidade de três solos das duas formas: sem e com adição de emulsão. Os solos foram classificados segundo a metodologia HRB (*Highway Research Board*) como: Solo 1 – A-6, Solo 2 – A-6 e Solo 3 – A-4. A emulsão utilizada foi a mesma dos demais autores citados anteriormente, ou seja, emulsão do tipo RL-1C e para a confecção das amostras foi utilizada energia Proctor Intermediária.

Os teores de emulsão utilizados nas amostras estão apresentados na Tabela 2.5. Eles foram advindos do ensaio mini-CBR que a autora realizou em sua pesquisa. Esses teores foram os que se obtiveram os melhores comportamentos da emulsão asfáltica para cada solo neste ensaio, pois o CBR foi cerca de 20%, dessa forma, segundo Sampaio (2008), para viabilizar um material para a pavimentação, esse é o valor do CBR desejável para as camadas de base e sub-bases.

Sampaio (2008) relata que a realização do ensaio de permeabilidade na mistura solo-emulsão foi com o intuito de verificar o comportamento hidráulico do solo, analisando a infiltrabilidade de água e o efeito de impermeabilização dos grãos gerados pela emulsão asfáltica, através da estabilização química do solo. A autora afirma ainda que a susceptibilidade à água é um fator que interfere diretamente na resistência e durabilidade de uma base de pavimento, sendo assim, a diminuição do coeficiente de permeabilidade pode modificar substancialmente o comportamento da mistura.

Tabela 2.5 – Resultados do ensaio de permeabilidade dos solos e de suas misturas.

Material	Teor de emulsão (%)	k (cm/s)
Solo 1	0	$6,1 \times 10^{-5}$
Solo 1 + emulsão	7	$1,0 \times 10^{-7}$
Solo 2	0	$1,6 \times 10^{-6}$
Solo 2 + emulsão	6	$8,4 \times 10^{-8}$
Solo 3	0	$1,5 \times 10^{-5}$
Solo 3 + emulsão	5	$1,06 \times 10^{-6}$

Fonte: Adaptado de Sampaio, 2008.

Segundo Sampaio (2008), observa-se que o Solo 1 o seu coeficiente de permeabilidade variou da ordem de 10^{-5} cm/s na mistura de solo sem emulsão asfáltica para 10^{-7} cm/s na mistura de solo-emulsão. No Solo 2, ocorreu uma diminuição no coeficiente de permeabilidade de 10^{-6} cm/s na mistura de solo sem emulsão asfáltica para 10^{-8} cm/s na mistura de solo-emulsão. Para o Solo 3 novamente houve uma diminuição do coeficiente de permeabilidade que variou de 10^{-5} cm/s na mistura sem emulsão asfáltica para 10^{-6} cm/s na mistura de solo-emulsão.

Diante disso, Sampaio (2008) concluiu que houve uma grande melhora no comportamento hidráulico das misturas de solo-emulsão se comparadas com as misturas de solo sem emulsão asfáltica, ou seja, a autora se refere a esta “grande melhora” devido a adição da emulsão asfáltica na mistura ter diminuído o coeficiente de permeabilidade, fato este que segundo Sampaio (2008) era esperado, pois a emulsão asfáltica por se tratar de um agente coesivo permite um melhor rearranjo das partículas no ato da compactação, contribuindo para a diminuição do número de vazios da amostra analisada, e com isso ocorreu-se um efeito impermeabilizante nas partículas no solo, evitando assim a infiltração da água.

Portanto, em suma, os resultados mostraram que a adição da emulsão asfáltica diminuiu a permeabilidade dos materiais e o aumento do teor de emulsão produziu uma diminuição do valor do coeficiente de permeabilidade (k).

2.4.2 Empregos para barragens

Neste tópico serão abordadas pesquisas recentes de autores que estudaram o comportamento mecânico e hidráulico do solo-emulsão voltados a aplicações em barragens. Aqui, apresentam-se as análises e os resultados de Jacintho (2010) e Lima (2016), autores responsáveis pelas pesquisas mais atuais voltadas ao emprego de misturas solo-emulsão em barragens no Brasil.

2.4.2.1 Influência da adição de emulsão asfáltica na compactação dos solos

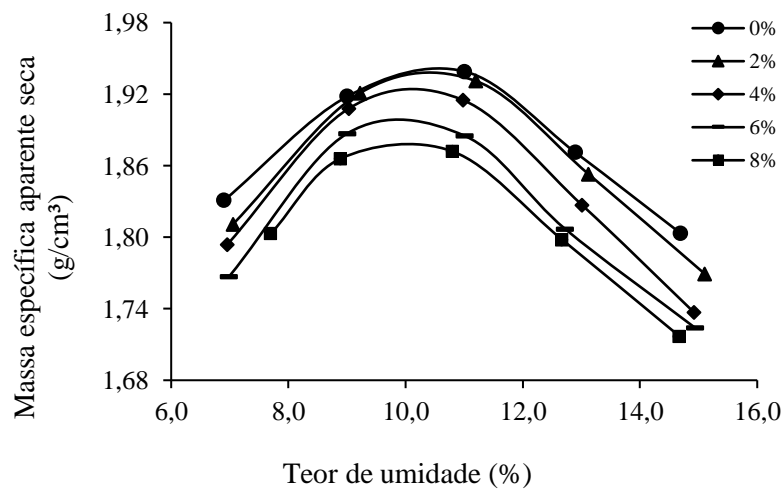
Jacintho (2010) apresentou as curvas de compactação com energia Proctor Normal para os solos do tipo SM (areia siltosa), SC (areia argilosa) e CL (argila de baixa plasticidade) da classificação SUCS, utilizando o cilindro pequeno de compactação Proctor. Na preparação das misturas solo-emulsão foi adicionada água na emulsão, chamada água de diluição, conforme relatado no procedimento de Gondim (2008) e Santos (2009).

As curvas foram geradas a partir da variação do teor de umidade em misturas solo-emulsão confeccionadas com a adição de 2%, 4%, 6% e 8% de emulsão asfáltica de ruptura lenta (RL-1C). Jacintho (2010) utilizou duas formas diferentes para analisar os resultados de compactação a fim de compreender o papel da emulsão asfáltica no processo e nos resultados de compactação, foram elas:

- Procedimento 1: Foi considerado que a fase líquida da mistura no ato da compactação é composta apenas pela água, ou seja, o asfalto residual (CAP) foi considerado como pertencente à fase sólida da mistura;
- Procedimento 2: Foi considerado que a fase líquida da mistura no ato da compactação é constituída pela água e pelo asfalto residual (CAP), ou seja, dessa vez o CAP não fazia parte integrante da fase sólida uma vez que não ocorreu a completa ruptura da emulsão asfáltica.

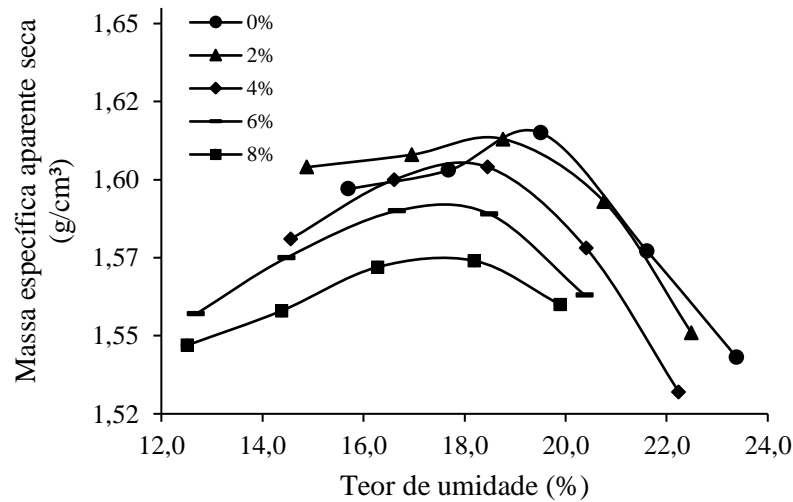
As Figuras 2.7, 2.8 e 2.9 apresentam as curvas de compactação dos solos e de suas misturas pelo procedimento 1, e as Figuras 2.10, 2.11 e 2.12 mostram as curvas de compactação dos solos e de suas misturas pelo procedimento 2.

Figura 2.7 – Curvas de compactação do solo do tipo SM e de suas misturas.



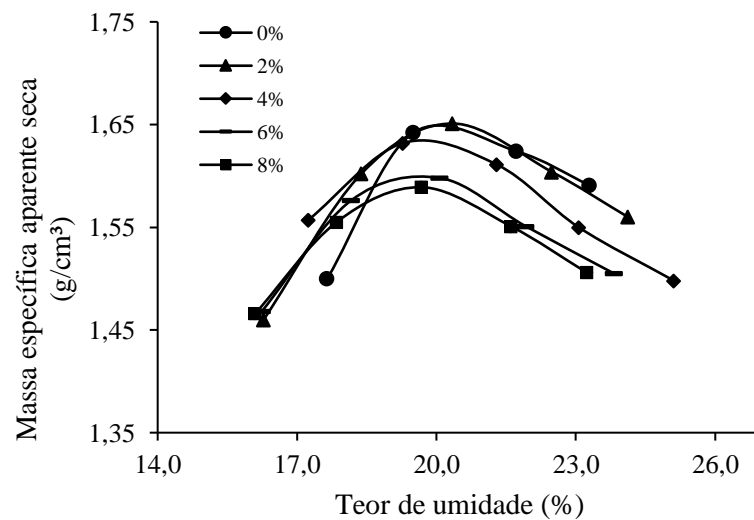
Fonte: Adaptado de Jacintho, 2010.

Figura 2.8 - Curvas de compactação do solo do tipo SC e de suas misturas.



Fonte: Adaptado de Jacintho, 2010.

Figura 2.9 - Curvas de compactação do solo do tipo CL e de suas misturas.



Fonte: Adaptado de Jacintho, 2010.

Na Figura 2.7, Jacintho (2010) observou que o solo do tipo SM praticamente não variou a umidade ótima (w_{ot}) com a adição de emulsão asfáltica, ou seja, sofreu apenas uma pequena redução. Entretanto, o peso específico aparente seco reduziu consideravelmente com a adição da emulsão asfáltica.

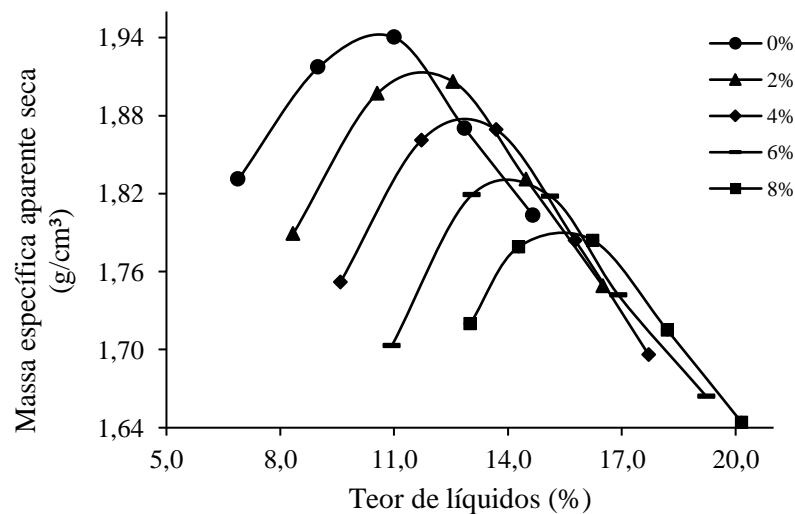
Na Figura 2.8, a autora concluiu que a adição da emulsão fez com que reduzisse até 2% da umidade quando comparada ao solo natural. Ela afirma que isso é devido à emulsão asfáltica substituir parte da água necessária para a compactação, gerando a redução da umidade. Além disso, o peso específico aparente seco também reduziu com a adição do material asfáltico.

Na Figura 2.9, Jacintho (2010) notou que para o tipo de solo CL, os valores de 2% de emulsão asfáltica não provocaram mudanças significativas no material se comparado com o solo natural. No entanto, a partir de 4% até o 8% de emulsão, as mudanças ocorreram de forma mais significativas. Sendo assim, foi observada a redução da umidade e do peso específico aparente seco.

Portanto, de maneira geral, os resultados obtidos por Jacintho (2010) utilizando esta primeira forma, onde considera para o cálculo do teor de umidade a fase líquida da mistura ser composta apenas pela água, mostram que o teor de umidade ótima decresce com o aumento do teor de emulsão na mistura, fato este observado também nos resultados de Gondim (2008), Suarez (2008) e Santos (2009).

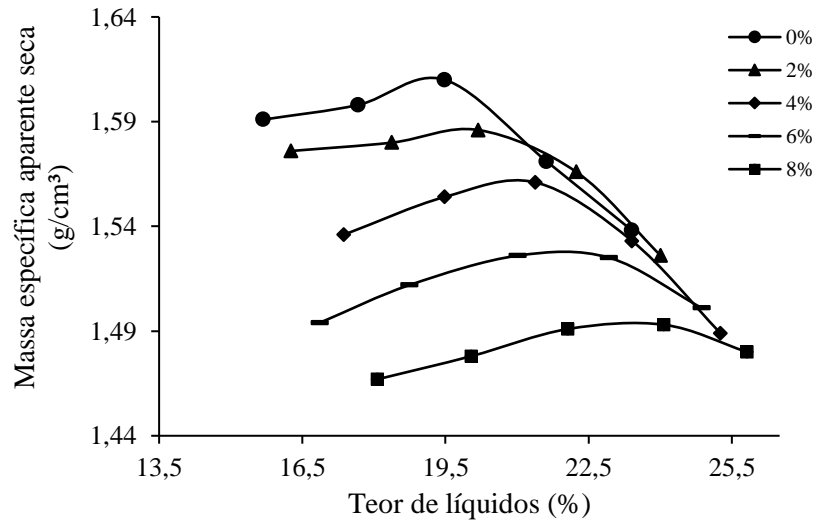
As Figuras 2.10 a 2.12 mostram os resultados dos ensaios de compactação, sendo que dessa vez a análise será feita considerando a fase líquida da mistura sendo composta pela água e pelo asfalto residual (CAP) para o cálculo do teor de umidade, lembrando que o CAP é considerado líquido, neste caso, apenas no momento da compactação, como bem explicado anteriormente. Dessa forma, os resultados serão expostos por teor de líquidos *versus* massa específica aparente seca, onde o teor de líquidos é a razão entre a soma das massas de água mais o asfalto pela a massa de solo.

Figura 2.10 – Curvas de compactação do solo do tipo SM e de suas misturas.



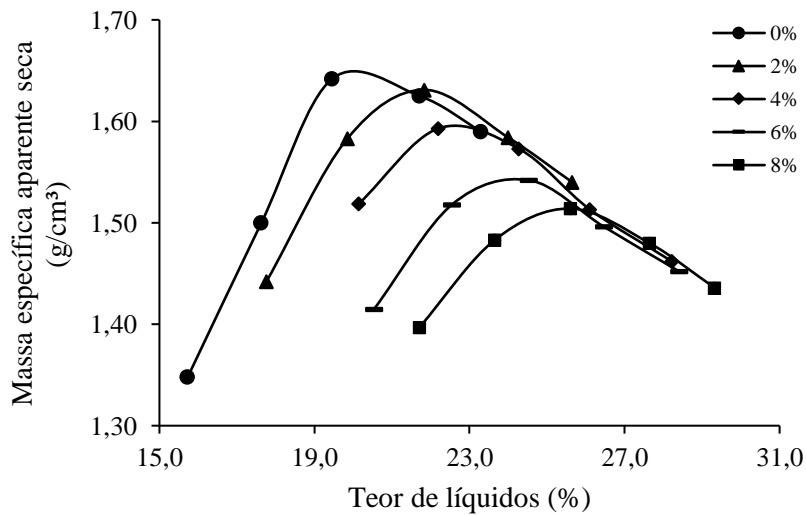
Fonte: Adaptado de Jacintho, 2010.

Figura 2.11 – Curvas de compactação do solo do tipo SC e de suas misturas.



Fonte: Adaptado de Jacintho, 2010.

Figura 2.12 – Curvas de compactação do solo do tipo CL e de suas misturas.



Fonte: Adaptado de Jacintho, 2010.

Jacintho (2010) concluiu que os três tipos de solos formaram uma linha ótima de compactação, ou seja, uma linha que liga os pontos ótimos que venha ser a massa específica aparente seca máxima e o teor de líquido ótimo das curvas. Desse modo, Jacintho (2010) acredita que parte da energia não foi transmitida à estrutura dos grãos devido à presença do asfalto adicionado, pois ele altera o potencial eletroquímico e a viscosidade do fluido.

Segundo Jacintho (2010), de forma geral, em relação às curvas de compactação, foi observado que as mesmas apresentaram pouco deslocamento no ramo úmido para as misturas com solo-emulsão, isto é, como se fossem um prolongamento do ramo úmido do solo natural.

Assim, Jacintho (2010) acredita que isso seja causado pelo fato de que no ramo úmido da mistura solo-emulsão, o efeito do asfalto na compactação é semelhante ao efeito da água, pois tanto a água quanto o asfalto agem possibilitando o surgimento de pressão neutra positiva e dissipando a energia aplicada na compactação. Sendo assim, Jacintho (2010) afirma que esta pequena variação no deslocamento no ramo úmido da curva de compactação à medida que se aumenta a adição do teor de asfalto na mistura deve estar relacionado à alteração da natureza eletroquímica do meio e a mudança da viscosidade do fluido.

Em sua pesquisa, Lima (2016) analisou o comportamento de um solo do tipo SP-SM (uma areia siltosa mal graduada) através do ensaio de compactação com objetivo geral de avaliar o processo de compactação e dosagem das misturas solo-emulsão com elevados teores.

A sua metodologia consistiu em misturar a emulsão asfáltica (RL-1C) com o solo, após o mesmo ser submetido ao processo de secagem em estufa, a 100°C, sem adicionar água na emulsão e nem ao solo, ou seja, usou um procedimento diferente dos demais autores, pois a emulsão asfáltica não foi diluída e nem o solo umedecido. Lima (2016) afirma que utilizou tal procedimento pelo fato dos ligantes asfálticos serem materiais hidrófobos, ou seja, a presença da água na superfície dos grãos minerais poderia prejudicar a adesividade do asfalto residual às partículas de solo. Portanto, prejudicando assim o processo de estabilização da mistura. Os teores de emulsão asfáltica adotados por Lima (2016) em sua pesquisa foram de 13% a 31%.

Lima (2016) denominou o Procedimento 1 de Proctor Normal Imediato (PNI), no qual se avaliou a influência da presença da emulsão asfáltica na compactação e as misturas solo-emulsão foram compactadas com as mesmas condições a que o solo escolhido para as análises também é submetido, a única exceção é a substituição da água pela emulsão asfáltica. Além disso, denominou o Procedimento 2 de Proctor Normal após 24 horas (PN24), onde avaliou a influência da ocorrência de ruptura da emulsão asfáltica na compactação das misturas solo-emulsão, isto é, a compactação foi realizada 24 horas após a mistura com intuito de que a ruptura do solo-emulsão ocorresse.

A autora denominou os Procedimentos 3 e 4, respectivamente, de Proctor Modificado após 24 horas (PM24) e Marshall após 24 horas, objetivando avaliar a influência do aumento da energia e o tipo de compactação das misturas solo-emulsão, que foram preparadas e compactadas utilizando o mesmo Procedimento 2, citado anteriormente. Nessa perspectiva, denominou os Procedimentos 5, 6 e 7, respectivamente, de Proctor Normal Quente (PNQ), Proctor Modificado Quente (PMQ) e Marshall Quente (MQ), com intuito de avaliar a influência do aumento da temperatura das misturas solo-emulsão (material termoviscoelástico) no processo de compactação, onde as misturas solo-emulsão foram submetidas a um período

de secagem ao ar livre de 24 horas, e em seguida, a um período de 1 hora de aquecimento, em estufa a 100°C. Na Tabela 2.6 são apresentados os procedimentos adotados por Lima (2016) de forma simplificada.

Tabela 2.6 – Resumo dos procedimentos adotados para a compactação das misturas solo-emulsão por Lima (2016).

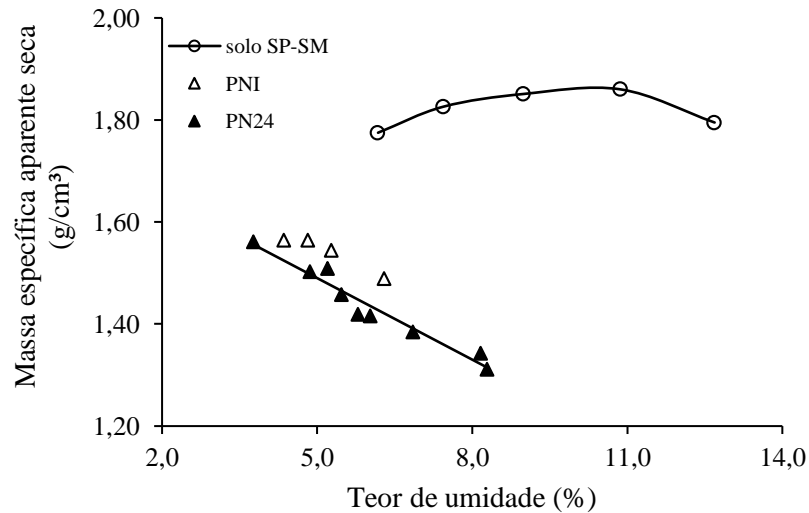
Metodologia de Compactação	Código	Temperatura de compactação	Condições de compactação
Proctor Normal	PNI	aprox. 25°C	Imediata
Proctor Normal	PN24	aprox. 25°C	Após 24 horas da preparação da mistura
Proctor Modificado	PM24	aprox. 25°C	Após 24 horas da preparação da mistura
Marshall	M24	aprox. 25°C	Após 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

Fonte: Adaptado de Lima, 2016.

Lima (2016) afirma que a escolha da metodologia Proctor foi por ser tradicionalmente utilizada na compactação de solos e de outros materiais empregados na execução de barragens, e por ter as suas energias de compactação bem definidas. Quanto à metodologia Marshall, Lima (2016) afirma que ela foi escolhida por causa do aumento dos teores de emulsão nas misturas solo-emulsão executadas em sua pesquisa e por ser uma metodologia de compactação largamente utilizada nos estudos de dosagem de misturas asfálticas convencionais, empregadas em obras de pavimentação.

Lima (2016) observou em seus resultados que a metodologia de avaliar a compactação utilizando a massa específica aparente seca e o teor de umidade não se mostra eficaz para as misturas entre o solo e elevados teores de emulsão, como visto na Figura 2.13. Segundo Dantas et al (2016), tal fato deve ser ocasionado pela dificuldade em se obter com precisão o teor de umidade das misturas entre solo e elevados teores de emulsão e, também, pelas dúvidas sobre a consideração do estado do ligante asfáltico residual no cálculo da massa específica aparente seca, que pode ser considerado como sólido ou não. É importante lembrar que não foi adicionada água na mistura, isto é, o teor de umidade aferido é proveniente apenas da própria água constituída da emulsão asfáltica.

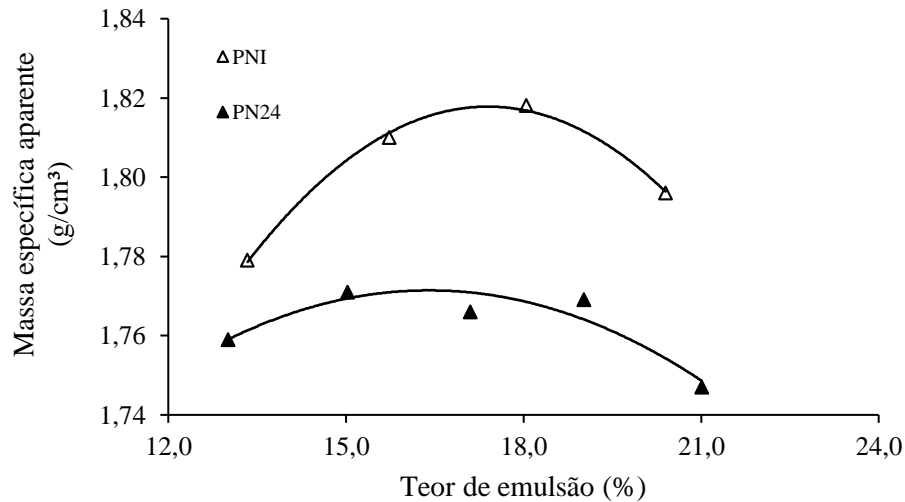
Figura 2.13 – Variação da massa específica aparente seca do solo com o teor de umidade, do solo e das misturas entre o solo e elevados teores de emulsão.



Fonte: Adaptado de Lima, 2016.

Em virtude disso, Lima (2016) sugeriu apresentar as curvas de compactação para as misturas entre o solo e elevados teores de emulsão do Proctor Normal compactadas imediatamente (PNI) e 24 horas após as misturas (PN24), na forma de variação da massa específica aparente (ρ) pelo teor de emulsão asfáltica em termos de percentagens da massa total das misturas, como visto na Figura 2.14. Após apresentar dessa forma, Lima (2016) mostra que a definição do teor ótimo de emulsão asfáltica, como o valor de teor de emulsão da mistura que apresenta a massa específica aparente máxima, torna-se mais clara. Dessa maneira, Lima (2016) concluiu que a massa específica aparente das misturas entre o solo e elevados teores de emulsão asfáltica torna-se um parâmetro mais eficiente na avaliação do processo de compactação das misturas solo-emulsão do que a massa específica aparente seca, que comumente é empregada na definição da condição ótima de compactação dos solos.

Figura 2.14 – Compactação imediata e 24 horas após a mistura na energia Proctor Normal.



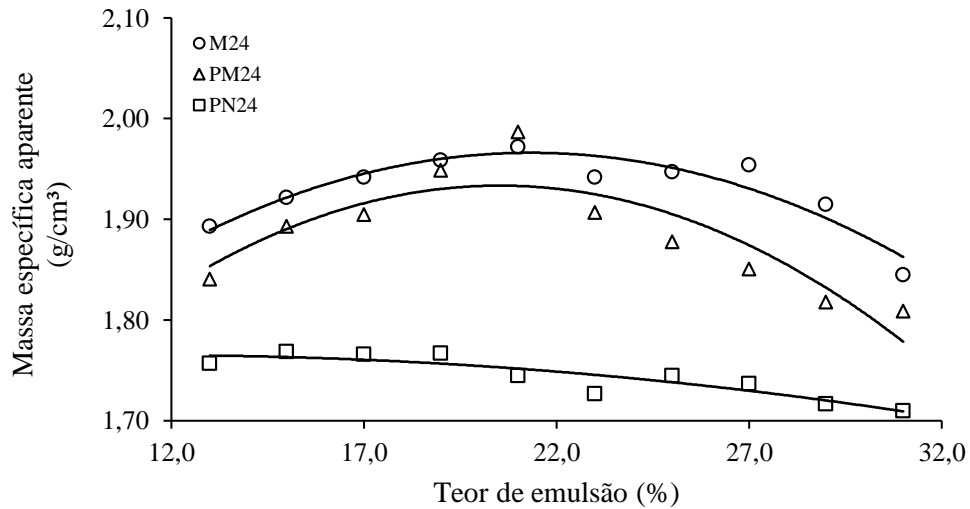
Fonte: Adaptação de Lima, 2016.

Lima (2016) observou que houve uma diminuição dos valores da massa específica aparente para a mistura compactada na energia Proctor Normal após 24 horas (PN24) em relação à compactação na energia Proctor Normal compactado imediatamente após a mistura (PNI). Isso pode ter acontecido pela dificuldade de aproximação dos grãos minerais do solo, visto que após 24 horas da mistura tenha ocorrido a ruptura da emulsão, o que produz um aumento da rigidez do filme betuminoso quando comparada à compactação imediata após a mistura entre o solo e a emulsão asfáltica.

Lima (2016) ainda estudou a influência do aumento da energia de compactação. Para isso, utilizou três energias de compactação diferentes na mistura solo-emulsão. Desse modo, obtiveram-se as curvas de compactação mostradas na Figura 2.15.

Segundo Lima (2016), o aumento da energia de compactação levou a uma definição mais clara da curva de compactação das misturas entre o solo e elevados teores de emulsão para todo o intervalo de emulsão estudado, em que se nota que o valor da massa específica aparente das misturas compactadas na energia Proctor Modificada (PM24) e Marshall (M24) são superiores àqueles obtidos para as misturas compactadas na energia Proctor Normal (PN24). Lima (2016) afirma 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, com isso consegue que os corpos de prova ensaiados apresentem um estado mais compacto.

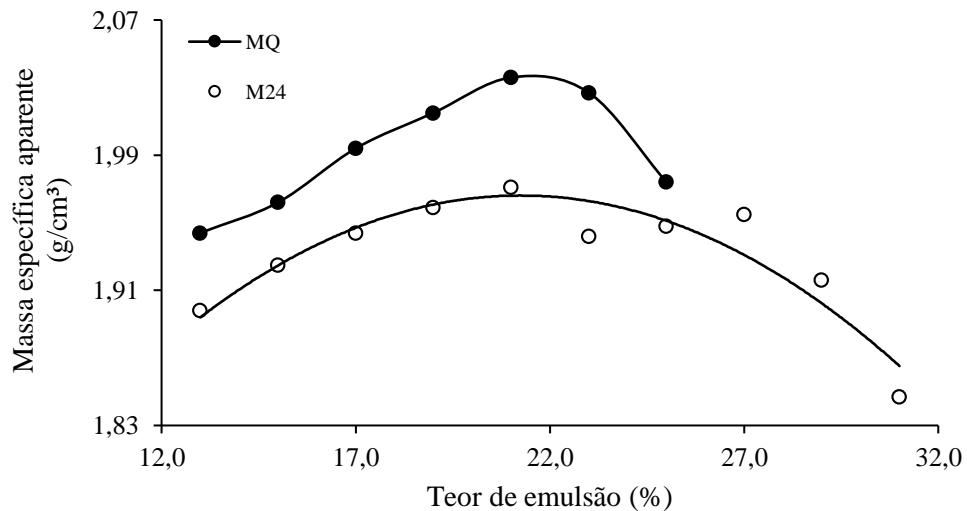
Figura 2.15 – Influência da energia de compactação nos valores da massa específica aparente das misturas entre o solo e elevados teores de emulsão.



Fonte: Adaptado de Lima, 2016.

Outro fato estudado por Lima (2016) foi a temperatura de compactação das misturas entre solo e elevados teores de emulsão. Para isso, analisou o comportamento das curvas de compactação para as misturas M24 (compactadas a temperatura ambiente de aproximadamente 25°C) e MQ (compactadas a uma temperatura de 100°C) mostrado na Figura 2.16.

Figura 2.16 – Compactação quente e 24 horas após a mistura na energia Marshall.



Fonte: Adaptado de Lima, 2016.

Segundo Lima (2016), a massa específica aparente obtida no ensaio executado na energia Marshall compactada a quente (MQ) ser maior do que o Marshall 24 horas (M24) ocorre

em virtude do aumento da temperatura do filme betuminoso, pois a mistura foi aquecida em estufa a 100°C antes da compactação. Dessa maneira, nota-se que a rigidez do filme betuminoso dificulta a compactação das misturas solo-emulsão com elevados teores de emulsão asfáltica, visto que quando aplicado um aumento de temperatura na mistura a rigidez é diminuída ocasionando um estado mais compacto da mistura.

2.4.2.2 Influência da adição de emulsão asfáltica na permeabilidade dos solos

Poucos são os trabalhos que tratam do estudo das propriedades hidráulicas das misturas solo-emulsão. Dentre os trabalhos existentes, pode-se citar a contribuição de Jacintho (2010), que estudou a influência da adição de até 8%, em massa, de emulsão asfáltica do tipo RL-1C a diferentes tipos de solos na permeabilidade das misturas solo-emulsão obtidas.

Para a realização do ensaio de permeabilidade, Jacintho (2010) utilizou três formas diferentes:

- Metodologia 1: Foi empregada para a compactação a energia Proctor Normal para o solo natural e para o solo-emulsão. Após a compactação, o corpo de prova era posto no permeâmetro sobre uma pedra porosa e papel filtro, além disso, a sua base era revestida com areia grossa e uma “saia” de plástico com intuito de evitar a erosão (Jacintho, 2010). O espaço entre o molde do permeâmetro e o corpo de prova foi preenchido com bentonita para que o fluxo da água ocorresse apenas pela amostra, pois a bentonita tem a função de vedar o possível percurso que a água poderia percorrer entre o molde do permeâmetro e o corpo de prova, devido a sua baixíssima permeabilidade. Em seguida, foi colocado o papel filtro e uma pedra porosa no topo do corpo de prova. Após esses passos, foram colocados seixos rolados com objetivo de facilitar a distribuição do fluxo (Jacintho, 2010). Por fim, o permeâmetro foi fechado e colocado num tanque, onde o corpo de prova era saturado por imersão por um período de 24 horas, depois passava pelo processo de saturação através do fluxo ascendente.
- Metodologia 2: Iniciou-se com a compactação feita no tubo de PVC e, em seguida, fez-se a montagem do permeâmetro. Para isso, foi colocado um círculo de tela da peneira nº 200 (0,074 mm) nos dois lados do tubo em contato com a amostra. No espaço restante do tubo foi preenchido com cascalho. Logo após ser fechado, o permeâmetro foi conectado a buretas calibradas para que pudesse dar início ao ensaio de permeabilidade.

- Metodologia 3: Foi moldado e montado o ensaio de permeabilidade adaptando ao suporte e ajustando as pedras e o papel filtro na célula triaxial. Após isso, procedeu-se a saturação da amostra por percolação. A consolidação foi realizada através da aplicação de pressão de 50 kPa e ligando duas buretas de tamanho médio (uma na base e outra no topo) por um período de 24 horas, com a finalidade de retirar todo o ar contido nos vazios do corpo de prova. Em seguida, iniciou-se o processo da medição da permeabilidade, onde foi necessário pôr uma bureta de 1,0 m na mangueira que sai da base do corpo de prova, enchê-la de água e deixar livre a ponta da mangueira que sai do topo. Manteve-se na câmara água sob pressão de 50 kPa e realizaram dez leituras. Após isso, repetiu-se o procedimento com pressões de 100 kPa e de 200 kPa.

No entanto, será exposto e discutido mais adiante apenas os resultados obtidos da Metodologia 1, pois a presente pesquisa utilizou uma metodologia semelhante a esta. Além disso, Jacintho (2010) utilizou nos ensaios de permeabilidade para os solos que foram misturados com a emulsão asfáltica, amostras que foram submetidas a processos de cura, dentre eles:

- Sem cura: os corpos de prova foram ensaiados logo após a compactação;
- Estufa: os corpos de prova foram deixados em estufa 40°C durante 24 horas e, em seguida, foram ensaiados;
- Estufa e imersão: os corpos de prova foram deixados em estufa 40°C durante 24 horas, depois foram imersos em água por mais 24 horas e, em seguida, foram ensaiados.

Para os ensaios de permeabilidade, Jacintho (2010) fez a moldagem de seus corpos de prova para cada teor de emulsão e tipo de solo, considerando o teor de umidade ótima e o peso específico aparente seco máximo, obtidos nos ensaios de compactação com a utilização da energia Proctor Normal.

Segundo Jacintho (2010), a permeabilidade dos solos varia com diversos fatores como o índice de vazios, a umidade, a distribuição dos poros, a viscosidade da água, entre outros. Além disso, as forças eletrostáticas que atuam entre a água de percolação e os grãos também podem fazer parte desses fatores, pois a adição da emulsão altera tais forças, podendo assim interferir na permeabilidade dos solos.

Jacintho (2010) realizou o ensaio de permeabilidade para os três tipos de solos sem emulsão asfáltica com corpos de provas de aproximadamente 10,0 cm de diâmetro e 12,6 cm

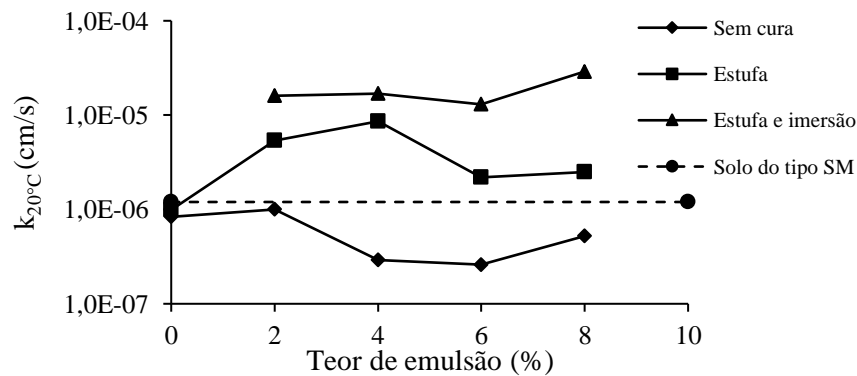
de altura, e para as misturas solo-emulsão foram moldados corpos de provas de aproximadamente 5,0 cm de diâmetro e 10,0 cm de altura, com intuito de economizar o material e reduzir o tempo de ensaios.

Jacintho (2010) obteve do ensaio de permeabilidade para os solos no estado natural (compactado na energia Proctor Normal) os seguintes valores do coeficiente de permeabilidade:

- Solo do tipo SC: $k_{20} = 1,8 \times 10^{-5}$ cm/s;
- Solo do tipo SM: $k_{20} = 1,2 \times 10^{-6}$ cm/s;
- Solo do tipo CL: $k_{20} = 1,2 \times 10^{-7}$ cm/s.

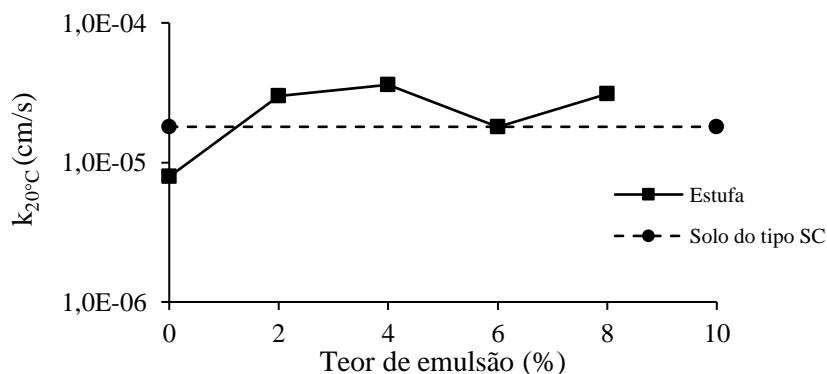
As Figuras 2.17, 2.18 e 2.19 mostram, respectivamente, os resultados obtidos por Jacintho (2010) dos valores do coeficiente de permeabilidade ($k_{20^{\circ}\text{C}}$) por teor de emulsão (%) dos solos do tipo SM com a adição de emulsão asfáltica, do tipo SC com adição de emulsão asfáltica e do tipo CL com adição de emulsão asfáltica.

Figura 2.17 – Variação do coeficiente de permeabilidade (k_{20}) com o teor de emulsão (Solo SM).



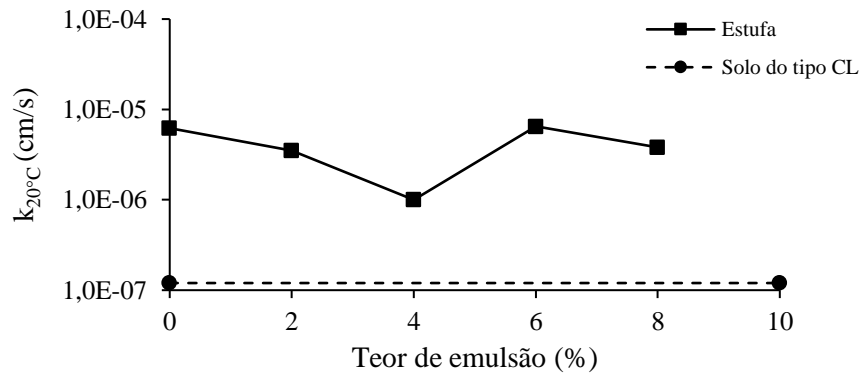
Fonte: Adaptado de Jacintho, 2010.

Figura 2.18 – Variação do coeficiente de permeabilidade (k_{20}) com o teor de emulsão (Solo SC).



Fonte: Adaptado de Jacintho, 2010.

Figura 2.19 – Variação do coeficiente de permeabilidade (k_{20}) com o teor de emulsão (Solo CL).



Fonte: Adaptado de Jacintho, 2010.

Jacintho (2010) afirma que a umidade final do ensaio reflete a permeabilidade obtida, por isso que foram postos apenas os resultados dos ensaios para a condição estufa dos solos do tipo SC e do tipo CL. Dessa forma, a autora explica que para os três tipos de solos as maiores permeabilidades são verificadas para os ensaios com maior umidade e conclui que uma maior umidade final vai indicar que o corpo de prova encontra-se com maior índice de vazios, ou seja, será mais permeável.

De forma geral, Jacintho (2010) verificou nos ensaios de permeabilidade para solos SM, SC e CL com adição de emulsão asfáltica que não obteve uma diminuição do coeficiente de permeabilidade. Este caso é explicado, segundo a autora, pelo fato de os finos dos solos estarem vedando os vazios do solo natural e quando se uniram ao asfalto no processo da mistura, gerou uma quantidade maior de macroporos, e isso facilitaria o fluxo da água.

Observa-se nos resultados obtidos por Jacintho (2010) que não há uma conclusão exata sobre a influência da adição da emulsão asfáltica na permeabilidade das misturas solo-emulsão, o que pode ter ocorrido pela macroporosidade causada pela formação de grumos das misturas com até 8% de emulsão incorporada. Dessa forma, isso foi um dos motivadores da presente pesquisa, e como para o intervalo de emulsão empregado por Jacintho (2010) gerou uma quantidade maior de macroporos na mistura, então, com o intuito de diminuir a quantidade de macroporos foram utilizados nesta pesquisa elevados teores de emulsão, como empregados na pesquisa de Lima (2016).

2.4.2.3 Influência da adição da emulsão asfáltica nos parâmetros de resistência ao cisalhamento das misturas solo-emulsão

Jacintho (2010) realizou ensaios triaxiais com os solos do tipo SM, SC e CL na classificação SUCS. Os ensaios foram do tipo CU (*consolidated undrained*), saturados e com medição de poropressão. Foram realizados ensaios com quatro diferentes tensões confinantes (σ_3): 50 kPa, 100 kPa, 200 kPa e 400 kPa, lembrando que um ensaio foi realizado com o solo natural e o outro com adição de 8% de emulsão asfáltica, utilizando como referência a umidade ótima e o peso específico aparente seco máximo que foram obtidos no ensaio de Proctor Normal. Dessa forma, obtiveram-se os valores de coesão e ângulo de atrito do solo e da mistura em termos de parâmetros totais e efetivos como visto nas tabelas a seguir.

Tabela 2.7 – Coesão e ângulo de atrito – Solo do tipo SM.

Teor de emulsão (%)	Parâmetros totais		Parâmetros efetivos	
	c (kPa)	ϕ (°)	c' (kPa)	ϕ' (°)
0	156	36,4	2	35,8
8	103	19,1	2	35,7

Fonte: Adaptado de Jacintho, 2010.

Tabela 2.8 – Coesão e ângulo de atrito – Solo do tipo SC.

Teor de emulsão (%)	Parâmetros totais		Parâmetros efetivos	
	c (kPa)	ϕ (°)	c' (kPa)	ϕ' (°)
0	70	16,8	10	35
8	65	18,1	0	38,2

Fonte: Adaptado de Jacintho, 2010.

Tabela 2.9 – Coesão e ângulo de atrito – Solo do tipo CL.

Teor de emulsão (%)	Parâmetros totais		Parâmetros efetivos	
	c (kPa)	ϕ (°)	c' (kPa)	ϕ' (°)
0	39	24,5	31	33,9
8	62	17,5	32	31,1

Fonte: Adaptado de Jacintho, 2010.

De forma geral, os resultados obtidos por Jacintho (2010) mostraram que dos três casos analisados, em dois deles houve uma diminuição da coesão ao adicionar um agente coesivo no solo. Isso parece ser inconsistente, pois se espera que ao adicionar emulsão asfáltica

ocorresse um aumento na coesão e não o contrário, como visto anteriormente. Logo, observa-se também que não há nada conclusivo a respeito do efeito da adição da emulsão asfáltica na resistência ao cisalhamento dos solos-emulsão.

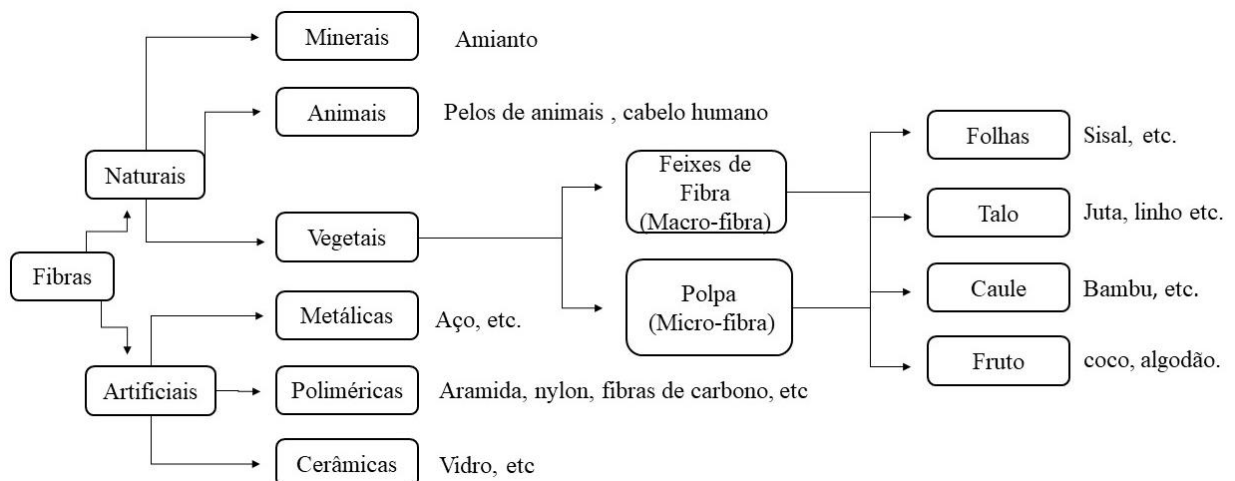
2.5 Reforço de solos com fibras

De acordo com Santiago (2011), o uso de fibras no reforço de solos é uma prática milenar. A pirâmide de Ziggurat e a torre de Agar Quf, na Mesopotâmia (1400 A.C), foram construídas empregando-se camadas intercaladas de solo e mantas de raízes.

Compreende-se por reforço ou melhoria de solo a utilização de processos físicos, químicos ou mecânicos que visem o melhoramento das propriedades dos solos, a fim de desenvolver os parâmetros tais como a resistência ao cisalhamento, compressão, densidade e condutividade hidráulica (Castilho, 2017). Segundo Bianchini et al (2013), em substituição a estabilização química, vem sendo estudada a adição de fibras ao solo, com capacidade de suportar a tração.

Segundo Santiago (2011), as fibras utilizadas para reforçar um determinado tipo de solo podem ser classificadas em dois grupos: naturais e artificiais. A Figura 2.20 mostra, esquematicamente, as principais classificações para as fibras de cada classe. As fibras naturais provêm de minerais, animais ou vegetais, enquanto as fibras artificiais são fabricadas, podendo ser metálicas, poliméricas ou cerâmicas.

Figura 2.20 – Classificação das fibras.



Fonte: Adaptado de Santiago, 2011.

2.5.1 Influência da adição de fibras naturais nos parâmetros de resistência ao cisalhamento dos solos reforçados

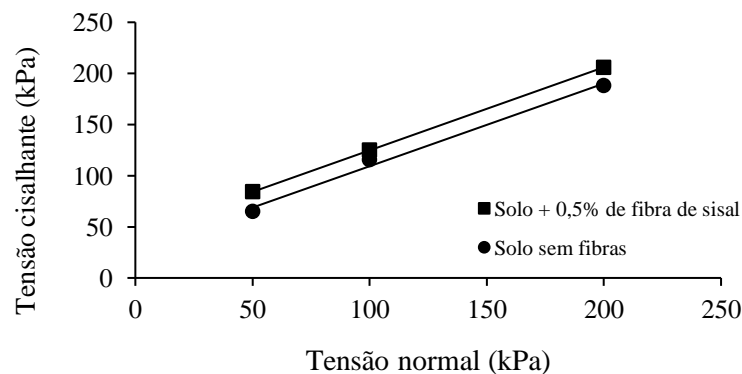
Santiago et al (2007), utilizando um solo do tipo CL analisou a influência da adição de fibra de sisal neste solo. Os corpos de prova foram confeccionados com um teor de 0,5% de fibras de sisal e de comprimento 15 mm. A energia utilizada para a compactação dos corpos de prova foi Proctor normal. Os ensaios de cisalhamento direto foram realizados com três diferentes tensões normais (σ): 50 kPa, 100 kPa e 200 kPa. A Tabela 2.10 e a Figura 2.21 mostram, respectivamente, os valores dos parâmetros de resistência e as envoltórias de resistência obtidos dos ensaios de cisalhamento direto.

Tabela 2.10 – Valores de coesão e ângulo de atrito – solo tipo CL.

Teor de fibra de sisal (%)	Parâmetros totais	
	c (kPa)	ϕ (°)
0	28,46	38,84
0,5	44,78	38,66

Fonte: Adaptado de Santiago et al, 2007.

Figura 2.21 – Envoltórias das tensões cisalhantes na ruptura em função da tensão normal efetiva.



Fonte: Adaptado de Santiago et al, 2007.

Segundo Santiago et al (2007), verifica-se que a adição de 0,50% de fibras de 15 mm promoveu ganho significativo no parâmetro coesão de intercepto da ordem de 57,34% para o fibrossolo com fibras naturais e, praticamente, não causou alterações no parâmetro ângulo de atrito interno. Também, observa-se que a envoltória das tensões cisalhantes em função da tensão normal para o solo com fibras de sisal manteve a linearidade do solo.

Barbosa (2016), utilizou o solo tipo SM (areia siltosa) para analisar a influência da adição de vetiver (tipo de planta herbácea) nesse solo. Os corpos de prova foram confeccionados obedecendo a seguinte metodologia: foram retirados amostras deformadas e indeformadas de solos, na posição que existissem raízes do vetiver. As coletas de materiais foram retiradas de regiões de solos cobertos com vetiver na idade de 1, 2 e 3 anos, sem vegetação e com aproximadamente 7 anos. Os ensaios de cisalhamento direto foram realizados com quatro diferentes tensões normais (σ): 25 kPa, 50 kPa, 100 kPa e 200 kPa. A Tabela 2.11 mostra os valores dos parâmetros de resistência obtidos dos ensaios de cisalhamento direto.

Tabela 2.11 – Valores de coesão e ângulo de atrito – solo com vetiver.

solo	Parâmetros totais	
	c (kPa)	ϕ (°)
Sem vegetação	22,0	15,1
1 ano de plantio de vetiver	24,6	14,3
2 anos de plantio de vetiver	24,1	15,3
3 anos de plantio de vetiver	68,9	34,3
7 anos de plantio de vetiver	78,4	36,7

Fonte: Adaptado de Barbosa, 2016.

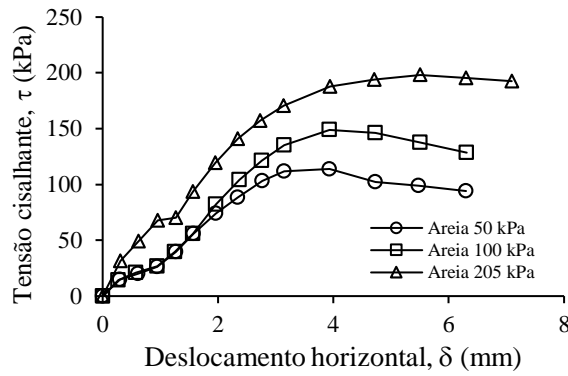
Os resultados mostram que a utilização de fibras em um determinado solo faz com que aumentem os coeficientes de resistência. Barbosa (2016), conclui que a utilização da planta é eficiente no reforço do solo, pois proporcionou um aumento dos parâmetros de resistência ao solo, principalmente em relação ao aumento de intercepto de coesão aparente do solo. Barbosa (2016) afirma que o vetiver é uma planta adequada no processo de estabilização em longo prazo, isto é, quanto mais idade estiver a planta maiores são os parâmetros de resistência ao cisalhamento. Isso foi comprovado nos ensaios, pois o aumento dos parâmetros de resistência do solo só foi evidenciado após 3 anos de plantio.

Mogrovejo (2013), também, realizou ensaios de cisalhamento direto, utilizando fibras de kraft juntamente com o solo. O material empregado na confecção dos corpos de prova foi um solo do tipo SC (areia argilosa), empregando na construção dos corpos de prova a energia de compactação Proctor Normal.

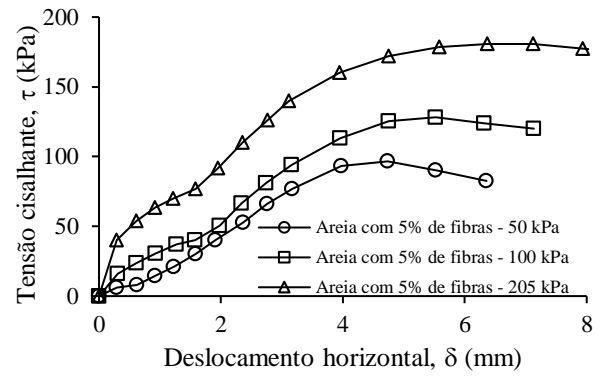
Os ensaios de cisalhamento direto foram realizados com três diferentes tensões normais (σ): 50 kPa, 100 kPa e 205 kPa para o solo natural e para o solo reforçado com fibras kraft. As Figura 2.22 e 2.23 mostram, respectivamente, as curvas de tensão de cisalhamento (τ) em função do deslocamento horizontal (δ_h) do solo reforçado com fibras kraft e do solo SC, e

as envoltórias de resistência ao cisalhamento, obtidos no ensaio de cisalhamento direto.

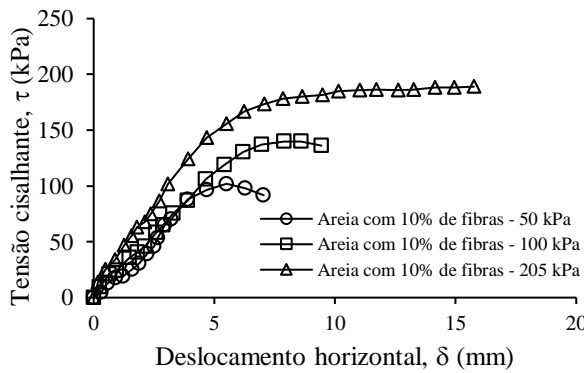
Figura 2.22 – Curvas de tensão de cisalhamento (τ) em função do deslocamento horizontal (δ_h) do solo reforçado com fibras kraft e do solo SC.



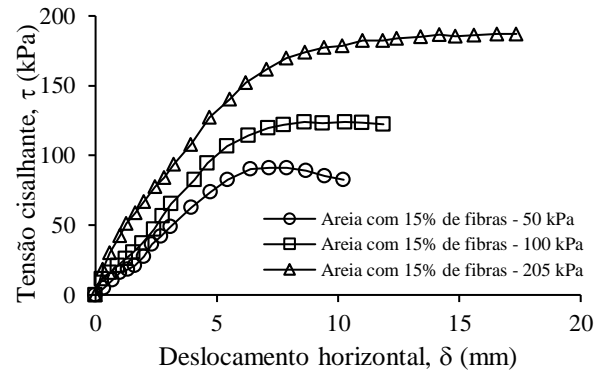
(a) Solo SC.



(b) Solo reforçado com fibras de kraft.



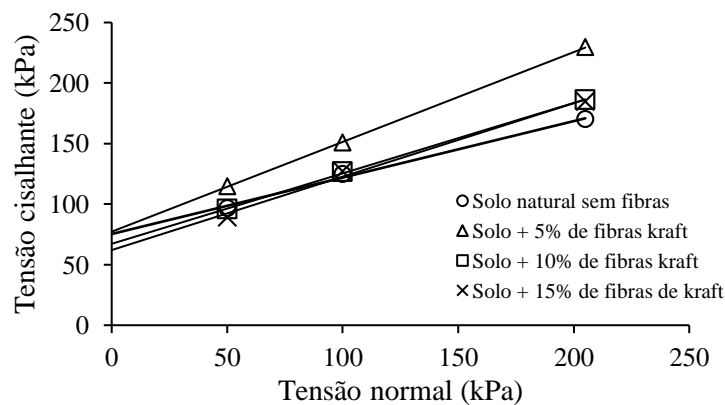
(c) Solo reforçado com fibras de kraft.



(d) Solo reforçado com fibras de kraft.

Fonte: Adaptado de Mogroveje, 2013.

Figura 2.23 – Envoltórias das tensões cisalhantes na ruptura em função da tensão normal efetiva.



Fonte: Adaptado de Mogroveje, 2013.

Conforme os resultados apresentados na Figura 2.22, Mogrovejo (2013) afirma que a deformação cisalhante específica horizontal aumenta conforme eleva-se a porcentagem de fibras no solo estudado, ressaltando que os maiores valores de deformação foram obtidos quando aplicada a tensão normal de 205 kPa. Na Figura 2.23 é apresentado os resultados das envoltórias de resistência ao cisalhamento obtido por Mogrovejo (2013), mostrando que houve um aumento do ângulo de atrito e uma diminuição do intercepto coesivo com a inclusão das fibras de kraft em relação ao solo natural.

Silveira (2018), realizou ensaios triaxiais do tipo consolidado isotropicamente drenado (CID), utilizando para a confecção dos corpos de prova, respectivamente, o solo com 0,5 % de fibras de sisal e de curauá. O solo empregado na confecção dos corpos de prova foi classificado como uma areia mal graduada (SP) pelo SUCS.

Os ensaios de triaxiais foram realizados com três diferentes tensões confinantes: 50 kPa, 100 kPa e 150 kPa para o solo natural e para o solo reforçado com fibras de sisal e de curauá. Assim sendo, a Figura 2.24 e a Figura 2.25 mostram, respectivamente, os resultados dos valores de tensões desviadora em função da deformação axial e as trajetória de tensões efetivas do solo natural e do solo reforçado por fibras, obtidos no ensaio triaxial.

Figura 2.24 – Tensão desviadora (q) em função da deformação axial (ϵ_a) do solo natural e com fibras.

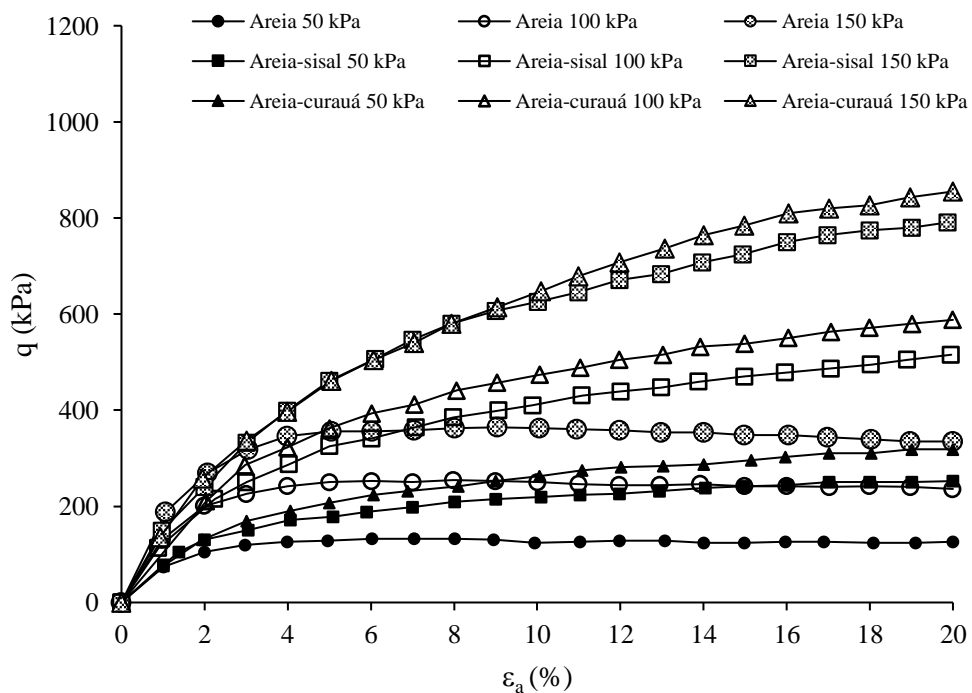
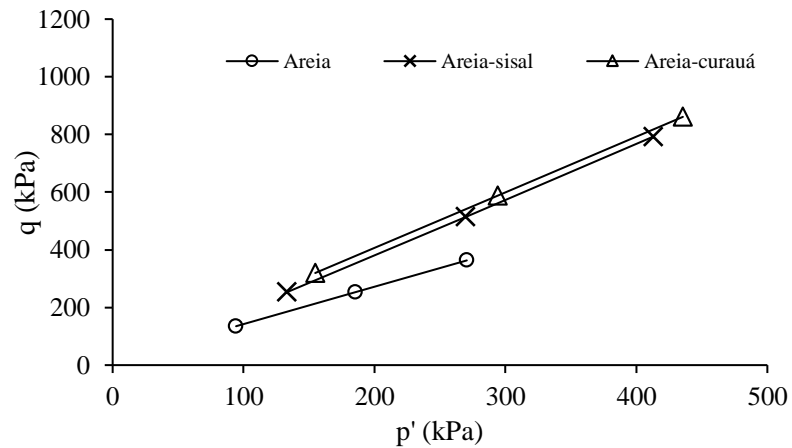


Figura 2.25 – Trajetória de tensões efetivas do solo natural e do solo reforçado por fibras.



Fonte: Adaptado de Silveira, 2018.

É observado na Figura 2.24 que, para todos os materiais ensaiados, a resistência ao cisalhamento e a rigidez inicial aumentam com o incremento da tensão confinante efetiva. Para a deformação axial em torno de 2,5%, há uma diferença entre o comportamento entre as curvas, indicando um acréscimo de resistência ao cisalhamento, sem a formação de pico, para os solos reforçado por fibras em relação ao solo sem fibras. Tal diferença continua notória até o limite de deformação axial analisado de 20 %. Ao comparar os resultados das duas fibras, visto na Figura 2.25, compreende-se que os corpos de prova reforçados com fibras de curauá apresentam resistência ao cisalhamento maior do que os corpos de prova reforçado com sisal. Para as tensões de confinamento empregadas observou-se que as trajetórias das tensões de cisalhamento apresentaram-se lineares.

2.5.2 Influência da adição de fibras artificiais nos parâmetros de resistência ao cisalhamento dos solos reforçados

Bianchini et al (2013) realizou ensaios de cisalhamento direto com o solo do tipo CL (argila de baixa plasticidade arenosa) na classificação SUCS. Aqui cabe uma ressalva já que a autora havia classificado de forma errônea o seu material. Foram realizados ensaios com quatro diferentes tensões normais (σ): 25 kPa, 50 kPa, 100 kPa e 200 kPa.

Os corpos de prova foram moldados, em uma única camada diretamente na célula bipartida superior da célula de ensaio, utilizando duas formas de preparo: uma utilizando apenas o solo e a outra adicionando teores de 0,25% e 0,50% de fibras de polipropileno ao solo ensaiado. Segundo Bianchini et al (2013), a umidade ótima da amostra acrescida de fibras

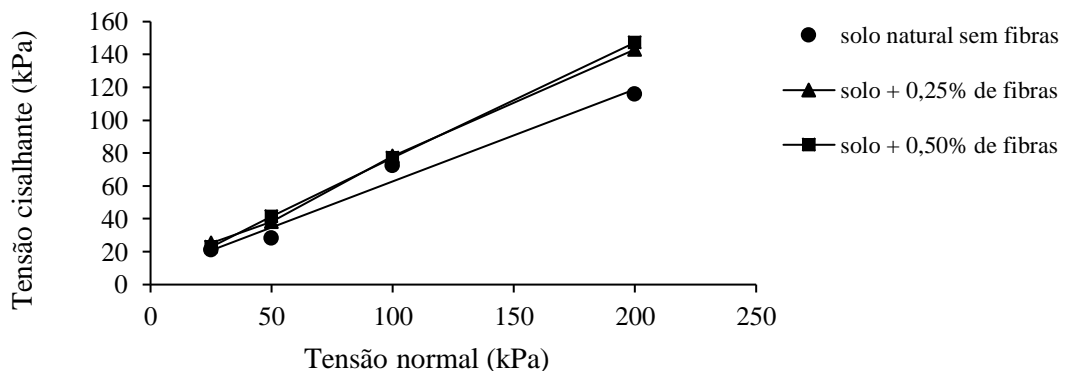
manteve-se igual a amostra de solo natural, que foi de 14%, e o mesmo ocorreu para a massa específica aparente seca máxima, sendo de $\gamma_d = 1,69 \text{ g/cm}^3$, empregando na construção dos corpos de prova a energia Proctor normal. Dessa maneira, a Tabela 2.12 e a Figura 2.26 mostram, respectivamente, os valores de coesão e de ângulo de atrito do solo natural e do solo acrescido de fibras de polipropileno e as envoltórias de resistência ao cisalhamento, obtidos no ensaio de cisalhamento direto.

Tabela 2.12 – Valores de coesão e ângulo de atrito – solo tipo CL.

Teor de fibra (%)	Parâmetros totais	
	c (kPa)	ϕ (°)
0	8	29,64
0,25	7	35,27
0,50	9	35,31

Fonte: Adaptado de Bianchini et al, 2013.

Figura 2.26 – Envoltórias das tensões cisalhantes na ruptura em função da tensão normal efetiva.



Fonte: Adaptado de Bianchini et al, 2013.

De forma geral, os resultados obtidos por Bianchini et al (2013) mostraram que houve um aumento nos parâmetros de resistência ao cisalhamento nas amostras com a inclusão das fibras de polipropileno em relação ao solo natural. Bianchini et al (2013) afirma que o método utilizado na preparação das amostras foi eficiente, gerando amostras homogêneas. Isso é justificado pelo fato da similaridade entre as envoltórias de resistência de Mohr – Coulomb obtidas.

Castilho (2017) avaliou a influência da adição de fibras sintéticas em um solo nos parâmetros de resistência ao cisalhamento, adicionando as fibras em um solo arenoso. A Tabela 2.13 mostra os valores dos parâmetros de resistência obtidos dos ensaios de cisalhamento direto.

Tabela 2.13 – Valores de coesão e ângulo de atrito – solo arenoso.

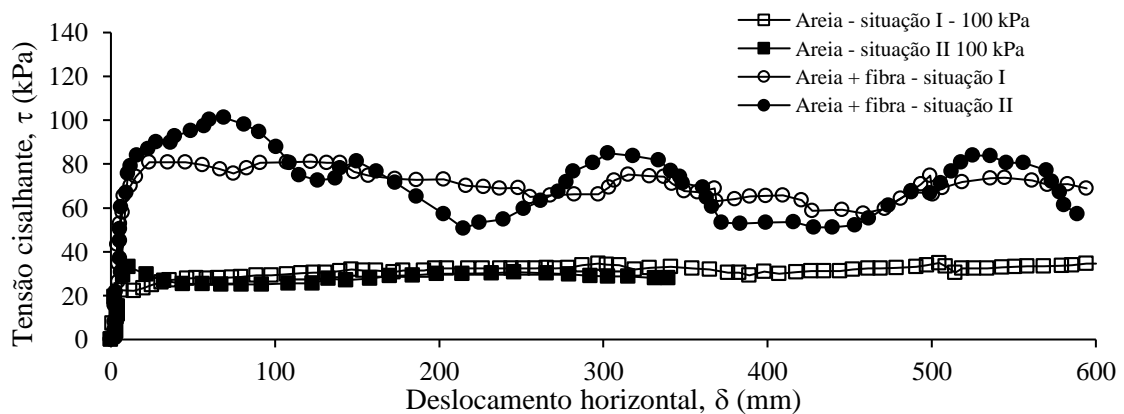
Teor de fibra de Politereftalato de Etileno (PET) (%)	Parâmetros totais	
	c (kPa)	ϕ (°)
0	11,7	31,4
1,5	19,5	30,3

Fonte: Adaptado de Castilho, 2017.

Os resultados obtidos dos ensaios de cisalhamento direto, por Castilho (2017), mostraram, de forma geral, que ao adicionar fibras artificiais em um determinado solo os parâmetros de resistência ao cisalhamento aumentam, de forma semelhante ao que ocorre nos resultados obtidos por Bianchini et al (2013).

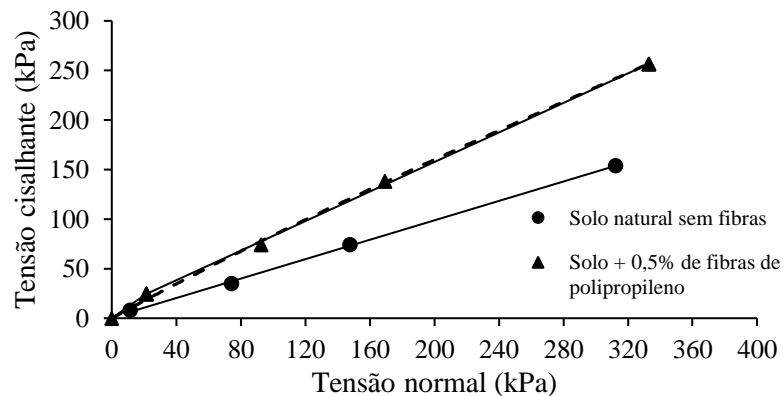
Casagrande (2005), realizou ensaios de cisalhamento *Ring Shear* adicionando fibras de polipropileno a um solo arenoso. Foram realizados ensaios com quatro diferentes tensões normais (σ): 20 kPa, 100 kPa, 200 kPa e 400 kPa. Os corpos de prova foram moldados adicionando teor de 0,50% de fibras. As Figuras 2.27 e 2.28 mostram, respectivamente, os valores de tensões de cisalhamento em função do deslocamento horizontal de um corpo de prova contendo 0,5% de fibras de polipropileno sob a ação de um carregamento de 100 kPa de aplicação com repetição, e as envoltórias de resistência ao cisalhamento, obtidos no ensaio de *Ring shear*.

Figura 2.27 – Curvas de tensão de cisalhamento (τ) em função do deslocamento horizontal (δ_h) dos solos reforçados com 0,5% de fibras de polipropileno e sem reforço.



Fonte: Adaptado de Casagrande, 2005.

Figura 2.28 – Envoltórias das tensões cisalhantes na ruptura em função da tensão normal efetiva.



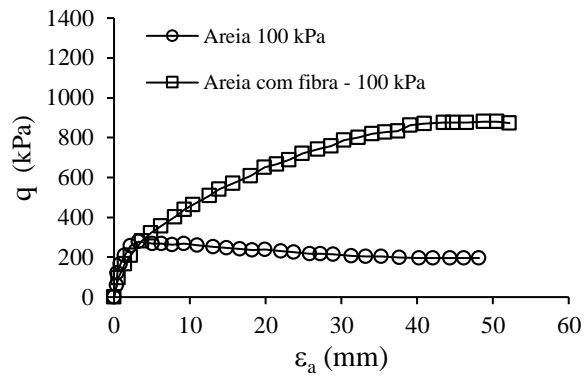
Fonte: Adaptado de Casagrande, 2005.

Os resultados apresentados na Figura 2.27 mostram que a adição de fibras no solo arenoso aumenta a tensão cisalhante se comparado ao solo sem fibras. Casagrande (2005) afirma que se levar em conta a dispersão dos valores de coesão obtidos, pode-se afirmar que a envoltória de resistência obtida através de ensaios *ring shear* para a areia reforçada pode seguir uma tendência curvilínea ou bi-linear, cruzando a origem para baixas tensões verticais médias iniciais aplicadas, podendo provavelmente atingir um patamar de resistência onde as envoltórias podem ser consideradas paralelas (através da extrapolação das regressões), como ilustrado na Figura 2.28.

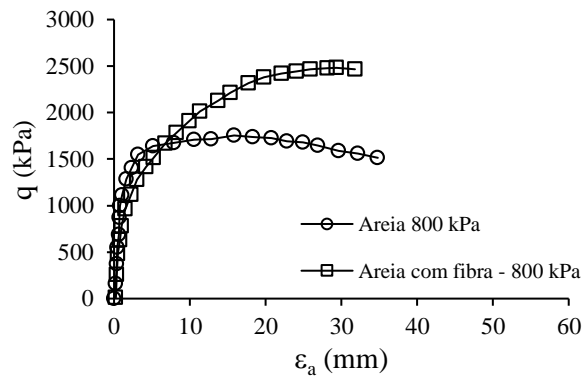
Silva dos Santos et al (2010) realizou ensaios triaxiais do tipo consolidado isotropicamente drenado (CID), utilizando para a confecção dos corpos de prova, respectivamente, o solo com 0,5 % de fibras de polipropileno. O solo empregado na confecção dos corpos de prova foi denominado apenas de areia quartzosa.

Os ensaios de triaxiais foram realizados com três diferentes tensões confinantes: 100 kPa, 800 kPa e 5400 kPa para o solo natural e para o solo reforçado com fibras de polipropileno. Assim sendo, a Figura 2.29 e a Figura 2.30 mostram, respectivamente, os resultados dos valores de tensões desviadora em função da deformação axial e as trajetórias de tensões efetivas do solo natural e do solo reforçado por fibras, obtidos no ensaio triaxial.

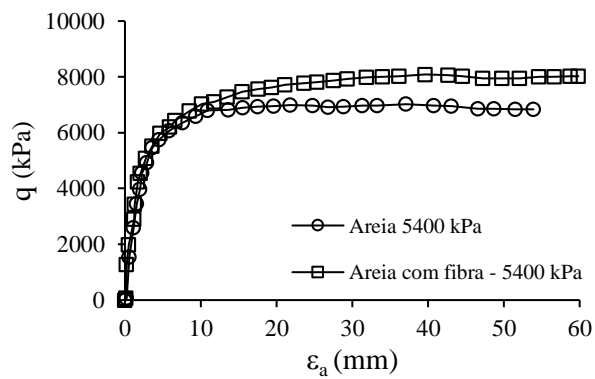
Figura 2.29 – Tensão desviadora (q) em função da deformação axial (ϵ_a) do solo natural e com fibras de polipropileno.



(a) Solo natural e solo reforçado.



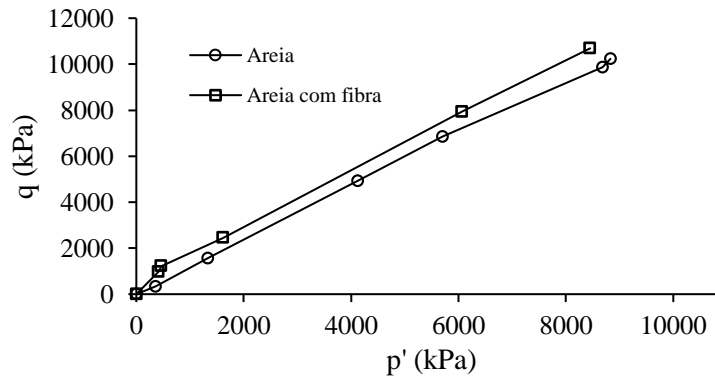
(b) Solo natural e solo reforçado.



(c) Solo natural e solo reforçado.

Fonte: Silva dos Santos et al, 2010.

Figura 2.30 – Trajetória de tensões efetivas do solo natural e do solo reforçado por fibras.



Fonte: Adaptado de Silva dos Santos et al, 2010.

É observado na Figura 2.29 que, para todos os materiais ensaiados, a resistência ao cisalhamento aumentam com o incremento da tensão confinante efetiva. Para a deformação axial em torno de 5%, há uma diferença entre o comportamento entre as curvas, indicando um acréscimo de resistência ao cisalhamento, sem a formação de pico, para os solos reforçado por fibras em relação ao solo sem fibras, chegando a ser similar aos resultados de Silveira (2018). Os resultados apresentados na Figura 2.30 mostra que o material reforçado com fibra de polipropileno possui uma bilinearidade. Para baixos carregamentos o intercepto coesivo é zero e há um ângulo de atrito interno maior do que o solo sem reforço. Porém, a partir do carregamento de 800 kPa o comportamento da trajetória de tensões do solo reforçado torna-se, praticamente, similar ao solo natural, pois é possível observar que o ângulo de atrito interno diminui, tornando a inclinação na reta paralela a reta do solo natural. O mesmo comportamento é encontrado nos trabalhos de Casagrande (2005) e Consoli et al (2009). Isso pode ser explicado pelo fato de que para baixos níveis de carregamentos o grão de areia consegue se movimentar entre as fibras com maior facilidade. Enquanto, para altos níveis de carregamentos o grão de quartzito se encontra mais compactado no corpo de prova, fazendo com que as fibras sejam tracionadas e, desta forma, o material passar ter um intercepto coesivo diferente de zero e uma diminuição do ângulo de atrito interno.

2.6 Conclusões parciais

A revisão bibliográfica apresentada neste capítulo contribuiu para que fosse adquirido conhecimento de conceitos básicos a respeito dos materiais asfálticos e sobre a técnica de estabilização química que utiliza a emulsão asfáltica no solo. Esta técnica é utilizada por muitos autores em suas pesquisas, especialmente na área da pavimentação, já que ela é

considerada uma solução alternativa à pavimentação, principalmente em regiões onde existe a ausência de agregados pétreos e elevado custo de transporte desses materiais granulares.

Além disso, foram expostos os resultados e as conclusões de algumas pesquisas recentes e importantes ao tema, dando ênfase nos ensaios de compactação e dosagem, permeabilidade e resistência ao cisalhamento dos materiais estudados.

De acordo com os resultados apresentados nos ensaios de compactação, pode-se observar que o aumento do teor de emulsão provoca uma diminuição do teor de umidade e uma constância da massa específica aparente seca, que pode estar ocorrendo pelo fato que em baixos teores de emulsão asfáltica há formação dos grumos que se unem tornando uma mistura mais grossa, tais misturas necessitam menos água para ser compactadas.

Já para elevados teores de emulsão asfáltica, observa-se que não se pode utilizar os mesmos parâmetros físicos de um solo no ensaio de compactação para a mistura solo-emulsão, ou seja, massa específica aparente seca e teor de umidade. De uma forma geral, observa-se que ao usar energia de compactação baixa, como Proctor Normal, ela não é suficiente para deformar o filme asfáltico e esta deformação que produz na compactação só ocorre com o aumento da energia ou com a diminuição da viscosidade da emulsão obtida compactando-se a mistura entre solo e elevados teores de emulsão após a sua preparação ou diminuindo-se a rigidez do filme asfáltico aumentando-se a temperatura de compactação das misturas.

Nos ensaios de permeabilidade, os resultados pesquisados das autoras mostraram que a adição de emulsão asfáltica diminuiu o coeficiente de permeabilidade para alguns solos e outros não. Desta maneira, as pesquisas desenvolvidas não apresentam consenso em relação à diminuição do coeficiente de permeabilidade com a adição da emulsão asfáltica.

Os ensaios de resistência ao cisalhamento mostraram que a adição de emulsão asfáltica provocou, de forma geral, uma diminuição da coesão e do ângulo de atrito. Entretanto, este comportamento não é o esperado, já que a emulsão é um agente aglomerante, assim, o que se espera é um aumento da coesão ao adicionar emulsão asfáltica.

Em relação aos solos reforçados, os resultados mostraram que a adição de fibras em um solo, de forma geral, tende a aumentar o ângulo de atrito interno e a coesão, e que as envoltórias das tensões cisalhantes na ruptura apresentam-se de forma linear semelhante a envoltória do solo sem a adição de fibras. Porém, existe a possibilidade da envoltória ser bilinear como mostrado na pesquisa desenvolvida por Casagrande (2005), Silva dos Santos et al (2010) e Consoli et al (2009).

Portanto, os principais agentes motivadores desta pesquisa foram os resultados desses trabalhos já realizados acerca do tema que, de forma geral, mostraram-se inconclusivos.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Introdução

O presente capítulo tem como intuito apresentar as principais informações dos procedimentos e metodologias realizados no desenvolvimento do estudo sobre as misturas solo-emulsão. De início, serão apresentadas as informações do solo utilizado e descritos todos os ensaios laboratoriais realizados com esse material. Depois, serão descritas detalhadamente as características da emulsão asfáltica utilizada nesta pesquisa. Por fim, serão apresentados os procedimentos de preparação e dosagem das misturas solo-emulsão e as metodologias que foram utilizadas nos ensaios laboratoriais realizados para o estudo das propriedades hidráulicas e da resistência ao cisalhamento destes materiais.

3.2 O solo utilizado no estudo das misturas solo-emulsão

Este estudo é continuidade da pesquisa desenvolvida por Lima (2016), dessa forma foi utilizado um material similar, ou seja, um solo inadequado para a construção do núcleo de uma barragem.

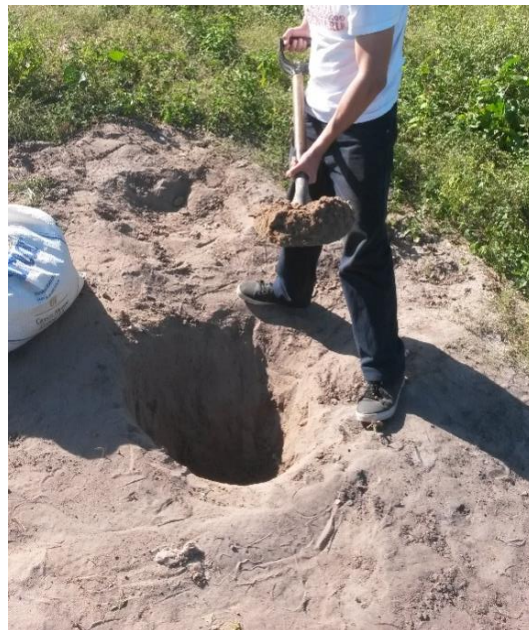
A amostra de solo utilizada na presente pesquisa foi coletada dentro dos limites do *Campus* da Universidade Federal do Ceará – UFC, no sítio de coordenadas UTM 3°45'7,5"S e 38°34'21,9W (datum SIRGAS 2000), no município de Fortaleza, Estado do Ceará. As Figuras 3.1 e 3.2, a seguir, mostram as imagens do local onde foi realizada a coleta do solo utilizado para a preparação das misturas solo-emulsão. Foram feitas três coletas em períodos diferentes devido ao grande número de ensaios realizados, e misturas solo-emulsão confeccionadas neste trabalho.

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



Fonte: Adaptado de Flightradar24, 2018.

Figura 3.2 – Vista do local de coleta do solo no Campus do Pici da UFC.



Fonte: Elaborado pelo autor.

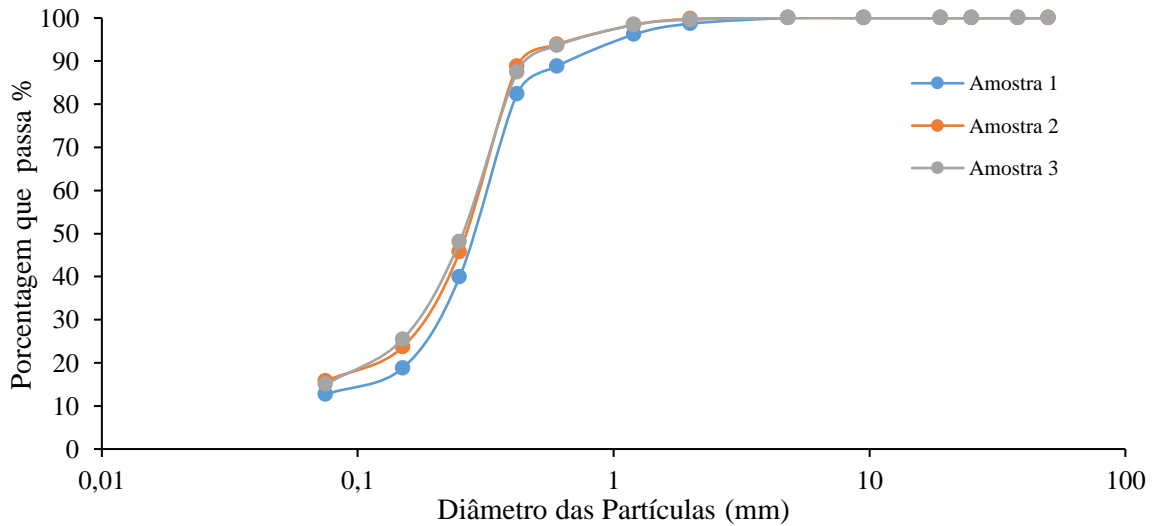
3.3 Caracterização geotécnica do solo e sua classificação no SUCS

Foram realizados no Laboratório de Mecânica dos Solos e Pavimentação (LMSP) da UFC os ensaios de caracterização geotécnica do solo, empregando-se os métodos de ensaios especificados nas seguintes normas técnicas:

- NBR 6457/1986 – Amostras de Solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização (Método de Ensaio);
- NBR 6459/1984 – Solo – Determinação do limite de liquidez (Método de Ensaio);
- DNER – ME 093/94 – Solos – Determinação da densidade real;
- NBR 7180/1984 – Solo – Determinação do limite de plasticidade (Método de ensaio);
- NBR 7181/1984 – Solo – Análise granulométrica (Método de ensaio);
- NBR 7182/1986 – Solo – Ensaio de compactação (Método de ensaio);
- NBR 14545/2000 – Solo – Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos a carga variável;
- ASTM D3080 – 98 – Standard test method for direct shear test of soil under consolidated drained conditions;
- DNER – ME 107/94 – Mistura betuminosa a frio, com emulsão asfáltica – ensaio Marshall.

Na Figura 3.3 tem-se o resultado das curvas granulométricas dos solos obtidas nos ensaios de peneiramento. Por meio desses resultados foram obtidas as seguintes porcentagens médias de materiais: 0,65% de areia grossa, 13,11% de areia média, 71,74 % areia fina e 14,5% de silte e argila, segundo a classificação da ABNT (Pinto, 2006). No Apêndice A são apresentados os valores da porcentagem passante nas peneiras das três amostras obtidos dos ensaios de peneiramento.

Figura 3.3 – Comparação entre as curvas de distribuição granulométrica dos solos utilizados.



Fonte: Elaborado pelo autor.

As curvas de distribuição granulométrica das três amostras de solo apresentam características muito semelhantes. O solo empregado para confeccionar as amostras dos corpos de prova das misturas solo-emulsão é classificado pelo Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS), como SM (areia siltosa). Dessa maneira, é sabido que esse tipo de material pode apresentar propriedades mecânicas semelhantes às areias, em que pode ser citado como características: baixa resistência coesiva, ângulo de atrito interno elevado, alta permeabilidade e baixa compressibilidade (Lima, 2016).

Portanto, devido ao caráter granular do material, a adição da emulsão asfáltica visa diminuir a permeabilidade e aumentar a parcela coesiva da resistência.

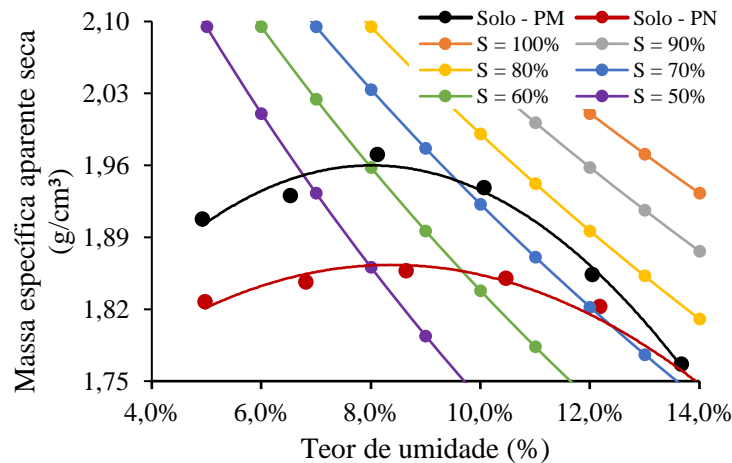
A massa específica dos grãos foi de 2,65, em que se obtém um valor de 25,99 kN/m³ para o peso específico dos grãos desse material, isso indica que o solo é composto pelo mineral quartzo. No Apêndice B são mostrados os cálculos das determinações das massas específicas dos grãos.

Nos ensaios para a obtenção dos índices de consistência, o solo ensaiado foi classificado como não líquido (NL) e não plástico (NP), o que corrobora que se trata de um material arenoso.

Nos ensaios de compactação do solo, foi obtida uma massa específica aparente seca máxima de 1,97 g/cm³, com um teor de umidade ótima de 8,1%, entre o intervalo de grau de saturação de 60% e 70%, na energia Proctor Modificada (Solo – PM) e uma massa específica aparente seca máxima de 1,86 g/cm³, com um teor de umidade ótima de 8,6%, entre o intervalo de grau de saturação de 50% e 60%, na energia Proctor Normal (Solo – PN), conforme mostrado

na Figura 3.4. As planilhas em que mostram os dados referentes ao ensaio de compactação estão no Apêndice C.

Figura 3.4 – Curvas de compactação do solo.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para fins comparativos foram utilizados nesta pesquisa os parâmetros geotécnicos de um solo obtidos de um relatório técnico proveniente dos ensaios realizados no Laboratório de Mecânica dos Solos e Pavimentação (LMSP) da UFC. A amostra utilizada é denominada de V-1, trata-se de um solo tipo ML – CL na classificação SUCS, em que a massa específica aparente seca máxima foi de $1,63 \text{ g/cm}^3$, com um teor de umidade ótima de 20,5% em massa, entre o intervalo de grau de saturação de 80% e 90%, na energia Proctor Normal. Os parâmetros de resistência ao cisalhamento foram de 10 kPa para a coesão efetiva e de $35,9^\circ$ para o ângulo de atrito efetivo obtidos do ensaio de compressão triaxial tipo tipo CU (*consolidated undrained*), e o coeficiente de permeabilidade dessa amostra foi de $k_{20} = 1 \times 10^{-9} \text{ m/s}$ (Filho, 2013).

Além disso, foram utilizados para fins comparativos nesta pesquisa os parâmetros geotécnicos de um solo obtidos da pesquisa de Jacintho (2010). A amostra utilizada é denominada de Solo Goiânia, trata-se de um solo tipo CL na classificação SUCS, em que a massa específica aparente seca máxima foi de $1,67 \text{ g/cm}^3$, com um teor de umidade ótima de 21,1% em massa, entre o intervalo de grau de saturação de 80% e 90%, na energia Proctor Normal. Os parâmetros de resistência ao cisalhamento foram de 31 kPa para a coesão efetiva e de $33,9^\circ$ para o ângulo de atrito efetivo obtidos do ensaio de compressão triaxial tipo CU (*consolidated undrained*), e o coeficiente de permeabilidade dessa amostra foi de $1,20 \times 10^{-9} \text{ m/s}$ (Jacintho, 2010).

3.4 Emulsão Asfáltica

A emulsão asfáltica empregada nesta pesquisa foi a mesma utilizada por Lima (2016), ou seja, uma emulsão do tipo catiônica de ruptura lenta (RL-1C), fornecida pela empresa Asfalto Nordeste. A Tabela 3.1 mostra os resultados obtidos nos ensaios de caracterização da emulsão. Os ensaios foram realizados no laboratório da empresa Asfalto Nordeste e seguiram os procedimentos descritos nas seguintes normas:

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

Tabela 3.1 – Resultados dos ensaios de caracterização da emulsão asfáltica.

Ensaio Realizado	IBP/ABNT Especificações	Resultados
Viscosidade “Saybolt – Furol”, sSF, a 50°C	Máx. 70	44
Peneiração, 0,84 mm, % em peso	Máx. 0,10	0,01
Resíduo, % em peso	Mín. 60	63,2

Fonte: Adaptado de Lima, 2016.

3.5 Procedimentos de mistura entre o solo e a emulsão asfáltica

Será descrito, a seguir, o passo a passo do procedimento adotado e a Figura 3.5 ilustra as etapas realizadas:

- i. destorroamento do solo com auxílio do almofariz e mão de gral (Figura 3.5a);
- ii. homogeneização da amostra;
- iii. utilização do repartidor de amostras para a redução do material até que se obtenha uma amostra representativa (Figura 3.5b);
- iv. secagem em estufa a 100°C por um período, no mínimo, de 24 horas;
- v. resfriamento do solo à temperatura ambiente (Figura 3.5c);
- vi. pesagem da emulsão asfáltica adequada na balança digital para ser utilizada na mistura na porcentagem desejada (Figura 3.5d);
- vii. colocação da emulsão asfáltica no solo (Figura 3.5e);
- viii. mistura do solo com a emulsão asfáltica por aproximadamente 5 (cinco) minutos através da manipulação manual (Figura 3.5f).

Figura 3.5 – Etapas das misturas entre solo e elevados teores de emulsão.



(a) Destorroamento do solo.



(b) Repartidor de amostras.



(c) Solo seco em estufa a 100°C esfriando.



(d) Pesagem da emulsão asfáltica.



(e) Adição da emulsão ao solo.



(f) Homogeneização da mistura.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Todas as amostras solo-emulsão utilizadas nos ensaios de compactação, de permeabilidade e de resistência ao cisalhamento passaram pelas etapas citadas anteriormente. Os teores de emulsão asfáltica utilizado neste estudo foram 13%, 16%, 19%, 22%, 25% e 28% em massa. O teor inicial de emulsão asfáltica foi determinado a partir de um procedimento tátil – visual, utilizando como teor de emulsão inicial aquele que conferisse à mistura solo-emulsão alguma coesão, quando submetido ao procedimento de amassamento manual. Tal procedimento foi definido com base no trabalho de Lima (2016).

3.6 Compactação das misturas solo-emulsão

Para a realização dos ensaios de compactação das misturas entre solo e elevados teores de emulsão foram empregados dois tipos de procedimentos, um utilizou a metodologia Proctor, baseado na NBR 7182/86 – Solo – Ensaio de compactação, nas energias Normal e Modificada, e o outro a metodologia Marshall, conforme a norma DNER – ME 107/94 – Mistura betuminosa a frio, com emulsão asfáltica – ensaio Marshall.

Como forma de comprovar as conclusões dos resultados de compactação obtidos

por Lima (2016), foram realizados alguns dos mesmos procedimentos da pesquisa dessa autora com intuito de se avaliar a influência da presença da emulsão asfáltica e das diferentes energias de compactação utilizadas no processo de compactação das misturas entre solo e elevados teores de emulsão.

As amostras foram compactadas com temperatura aproximada de 27°C. Foram realizados cinco procedimentos de compactação com energias e condições do material diferentes. As compactações foram realizadas imediatamente após a preparação da mistura e 24 horas com o objetivo de se analisar o comportamento da mistura em função da rigidez do ligante asfáltico. A Tabela 3.2 mostra o resumo dos procedimentos adotados de forma simplificada e as Figuras 3.6 e 3.7 mostram os procedimentos de compactação das misturas solo-emulsão estudadas.

Tabela 3.2 – Resumo dos procedimentos adotados para a compactação das misturas entre solo e elevados teores de emulsão.

Procedimento	Metodologia de compactação	Código	Condições de compactação
1	Proctor Normal	PNI	Imediata
2	Proctor Modificado	PMI	Imediata
3	Marshall	MI	Imediata
4	Proctor Modificado	PM24	Após 24 horas da preparação da mistura
5	Marshall	M24	Após 24 horas da preparação da mistura

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 3.6 – Compactação da mistura solo-emulsão – ensaio Proctor.



Fonte: Elaborado pelo autor.

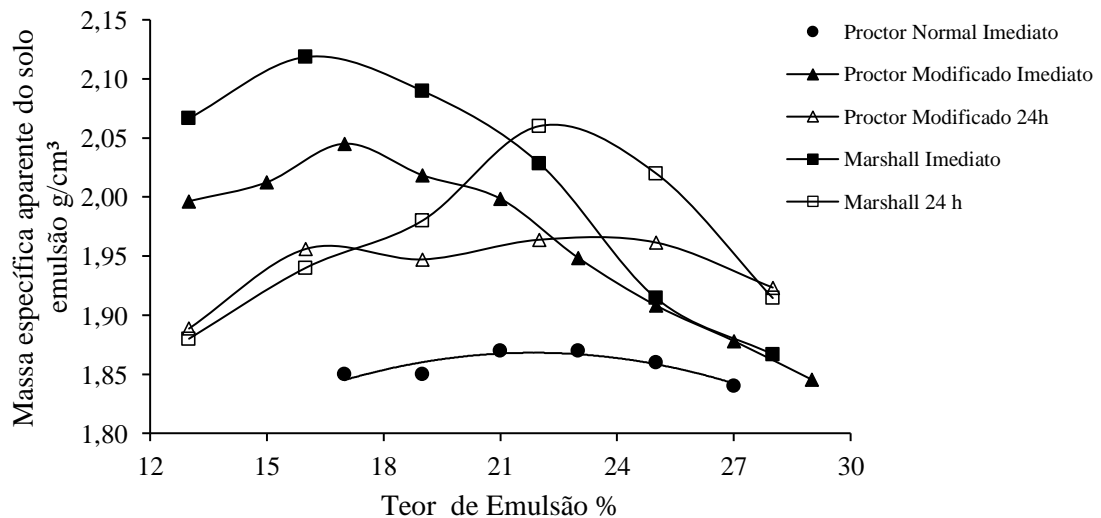
Figura 3.7 – Compactação da mistura solo-emulsão – ensaio Marshall.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 3.8 mostra as curvas de compactação das misturas entre solo e elevados teores de emulsão com diferentes tipos de energia de compactação. Observa-se ao comparar os resultados do Proctor Normal imediato (PNI), do Proctor Modificado imediato (PMI) e do Marshall imediato (MI), que o aumento da energia de compactação gera uma melhor definição da curva de compactação das misturas solo-emulsão para todo o intervalo de teor de emulsão utilizado, resultado inclusive similar ao encontrado por Lima (2016). Além disso, observa-se que quanto maior a energia de compactação utilizada maior é a massa específica aparente da mistura solo-emulsão.

Figura 3.8 – Curvas de compactação das misturas entre solo e elevados teores de emulsão com diferentes tipos de energia de compactação.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Analisando os resultados das misturas que foram compactadas com a mesma metodologia, porém com procedimentos diferentes, por exemplo, Marshall compactado imediatamente (MI) com o Marshall compactado após 24 horas (M24), observa-se que a massa específica aparente máxima do procedimento MI é maior do que a massa específica aparente do procedimento M24 no mesmo intervalo do teor de emulsão empregado. Isso ocorreu pelo fato de que a compactação torna-se mais difícil para a mistura após 24 horas devido à rigidez do filme betuminoso após a ruptura da emulsão asfáltica, dessa forma, a compactação vai ocorrer pela deformação desse filme betuminoso. Por esse motivo, tem-se um valor menor da massa específica aparente para o procedimento M24 em relação ao procedimento MI. Além disso, é notório que o teor ótimo de emulsão do procedimento M24 é maior do que no procedimento MI pelo fato da rigidez ser maior do filme betuminoso e por isso necessita de maior quantidade de ligante para se atingir a condição de máxima compactação.

Quanto às análises da curva de compactação Proctor Modificado imediato (PMI) em comparação com a curva de compactação Proctor Modificado após 24 horas da preparação da mistura (PM24), observa-se que o comportamento de ambas as metodologias são similares aos resultados das curvas de compactação Marshall. Porém, para o procedimento PM24 tem-se uma variação bem menor da massa específica aparente em relação ao procedimento PMI. Isto é explicado pelo fato de que a energia Proctor Modificada não ser suficiente para deformar o filme betuminoso da mistura.

Uma das vantagens da utilização da condição imediata na compactação é devido a sua praticidade, pois após misturar o solo com a emulsão asfáltica formando o produto solo-emulsão, o mesmo já pode ser utilizado. Já a utilização da condição 24 horas após a mistura na temperatura ambiente na compactação seria útil, pois o material solo-emulsão pode ser confeccionado em um outro lugar e estocado em quantidade necessária a ser utilizada na obra.

3.7 Ensaios de permeabilidade

Os ensaios de permeabilidade foram realizados utilizando um permeâmetro de carga variável, de acordo com norma NBR 14545/2000 – Solo – Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos a carga variável, para as amostras de solo e das misturas entre solo e elevados teores de emulsão asfáltica.

As amostras solo-emulsão dos ensaios de permeabilidade foram confeccionadas utilizando como base os parâmetros obtidos das curvas de compactação. Para isso, foram utilizados o teor de emulsão asfáltica de 13%, o teor ótimo e o teor de 28% com as suas

respectivas massas específicas aparentes das curvas de compactação Marshall imediato (MI) e após 24 horas da preparação da mistura (M24) e da curva de compactação Proctor Modificado imediato (PMI), pois, dessa forma, se pode analisar a influência da adição da emulsão asfáltica no solo num intervalo de teor de emulsão que represente toda a curva de compactação.

As amostras das misturas solo-emulsão foram moldadas no cilindro com 9,95 cm de diâmetro e 4,95 cm de altura, compactadas dinamicamente em três camadas. Para uma melhor compreensão será detalhado, a seguir, o passo a passo do preparo do corpo de prova utilizado no ensaio de permeabilidade (Figura 3.9):

- i. confecção da mistura com o teor de emulsão asfáltica desejado (Figura 3.9a e 3.9b);
- ii. compactação da mistura para atingir a massa específica aparente desejada (Figura 3.9c);
- iii. colocação do corpo de prova no permeâmetro (Figura 3.9e);
- iv. saturação do corpo de prova (Figura 3.9h).

Figura 3.9 – Etapas da execução do ensaio de permeabilidade.



(a) Pesagem do solo seco.



(b) Pesagem da emulsão asfáltica.



(c) Compactação da mistura.



(d) Colocação do papel filtro.



(e) Colocação da amostra.



(f) Colocação da argila ao redor da amostra.



(g) Camada de brita.



(h) Aplicação da pressão de ar.



(i) Início do ensaio de permeabilidade.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Foi utilizado um compressor de ar para que pudesse diminuir o tempo empregado na saturação dos corpos de prova. Foram feitos repetidos processos de enchimento de água no permeâmetro e aplicação de ar através do compressor por um período de 30 minutos.

3.8 Ensaio de resistência ao cisalhamento

Os parâmetros de coesão e ângulo de atrito interno foram obtidos através do ensaio de cisalhamento direto de deformação controlada. A norma utilizada como base para o ensaio foi a ASTM D3080 – 98 – *Standard test method for direct shear test of soil under consolidated*

drained conditions, para a amostra de solo e das misturas entre solo e elevados teores de emulsão.

As amostras solo-emulsão empregadas nos ensaios de resistência ao cisalhamento foram confeccionadas utilizando como base os parâmetros obtidos das curvas de compactação. Para isso, foram utilizadas as massas específicas aparentes máximas e os seus respectivos teores de emulsão asfáltica das curvas de compactação Marshall imediato (MI) e após 24 horas da preparação da mistura (M24), pois, dessa forma, pode-se analisar a influência da adição da emulsão asfáltica nos parâmetros de resistência ao cisalhamento em misturas compactadas com diferentes rigidezes para o ligante asfáltico.

As amostras das misturas solo-emulsão foram moldadas na caixa de cisalhamento quadrada de dimensões 5,1 cm x 5,1 cm bipartida e 3,3 cm de altura, compactadas dinamicamente, golpeando com auxílio de uma marreta, em três camadas no próprio molde. Os equipamentos utilizados para este ensaio foram: caixa bipartida dotadas de placa dentada e perfurada, pedra porosa e quepe para transmissão de carga; prensa equipada com motores sistema de transmissão de carga (pendural); extensômetros mecânicos; e anel de carga.

No ensaio de cisalhamento direto na compactação Marshall foram utilizadas as seguintes etapas (Figura 3.10) para a sua realização:

- i. confecção da mistura no teor ótimo de emulsão asfáltica desejado (Figura 3.10a, 3.10b e 3.10c);
- ii. moldagem do corpo de prova na caixa bipartida de forma que o mesmo fique com a massa específica aparente máxima correspondente ao teor de emulsão utilizado (3.10d e 3.10e);
- iii. inundação do corpo de prova para a mistura compactada na energia Marshall no procedimento de compactação imediatamente (3.10g), que consistiu na colocação de água na caixa de cisalhamento para a saturação do corpo de prova no sentido ascendente por um período de no mínimo 48 horas;
- iv. aplicação da tensão normal para a fase de adensamento e posteriormente para a ruptura do corpo de prova (3.10h e 3.10i), sendo utilizadas quatro diferentes tensões normais (σ): 50 kPa, 100 kPa, 200 kPa e 400 kPa;
- v. ruptura do corpo de prova;

Os valores das velocidades dos ensaios de cisalhamento direto variaram entre 0,04 0,1 mm/min. A velocidade utilizada para romper os corpos de prova, tanto do solo quanto da mistura entre solo e elevados teores de emulsão asfáltica, foi baseada na metodologia de Head

(1994). No Apêndice D são apresentadas as planilhas de dados e as figuras dos estágios da fase de adensamento do ensaio de cisalhamento direto.

Foram realizados, também, ensaios de cisalhamento direto na compactação Marshall imediato e após 24 horas da preparação da mistura sem inundação a fim de comparar os resultados entre si.

Figura 3.10 – Etapas da execução do ensaio de cisalhamento direto.



(a) Pesagem do solo seco.



(b) Pesagem da emulsão asfáltica.



(c) Homogeneização da mistura.



(d) Colocação da placa dentada.



(e) Amostra compactada.



(f) Colocação da pedra porosa.



(g) Inundação da amostra.



(h) Colocação do pendural.



(i) Início do ensaio de cisalhamento direto.

Fonte: Elaborado pelo autor.

3.9 Índices físicos utilizados nos estudos de permeabilidade e de resistência ao cisalhamento das misturas entre solo e elevados teores de emulsão

A seguir, são apresentados os índices físicos utilizados para a caracterização das misturas estudadas.

3.9.1 Massa específica aparente

A massa específica aparente (ρ) é a relação da massa total da mistura pelo volume total, obtida de acordo com a Equação 3.1.

$$\rho = \frac{M}{V} \quad (3.1)$$

Onde:

ρ : massa específica aparente (g/cm^3);

M: massa da amostra total (solo seco + emulsão asfáltica), em g;

V: volume total da amostra (cm^3).

3.9.2 Massa de emulsão asfáltica

A massa de emulsão asfáltica (m_e) é a quantidade de emulsão a ser adicionada ao corpo de prova, obtida de acordo com a Equação 3.2.

$$m_e = \frac{t_e}{100} \times M \quad (3.2)$$

Onde:

m_e : massa de emulsão asfáltica, em g;

t_e : teor de emulsão asfáltica, % em massa;

M: massa da amostra total (solo seco + emulsão asfáltica), em g.

3.9.3 Massa de solo seco

A massa de solo seco (m_s) é a quantidade de solo seco utilizada na preparação da mistura, obtida de acordo com a Equação 3.3.

$$m_s = M - m_e \quad (3.3)$$

Onde:

m_s : massa de solo seco, em g;

M : massa da amostra total (solo seco + emulsão asfáltica), em g;

m_e : massa de emulsão asfáltica, em g.

3.9.4 Massa específica do sólido da mistura

A massa específica do sólido da mistura ($\rho_{s,mist}$) é definida como sendo a relação entre a massa seca da mistura pelo volume ocupado da amostra desconsiderando os vazios, obtida de acordo com as Equações 3.4 ou 3.5. Para a determinação da massa específica do sólido da mistura foi considerado para o cálculo que o betume constitui também a parte sólida da mistura.

$$\rho_{s,mist} = \frac{100}{\frac{B}{\rho_b} + \frac{S}{\rho_s}} \quad (3.4)$$

Onde:

$\rho_{s,mist}$: massa específica do sólido da mistura solo-emulsão, em g/cm³;

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

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

ρ_b : massa específica do betume, adotado 1 g/cm³; e

ρ_s : massa específica dos grãos obtido por meio de ensaio, em g/cm³.

Ou

$$\rho_{s,mist} = \frac{m_s + m_{ar}}{V_s + V_{ar}} \quad (3.5)$$

Onde:

$\rho_{s,mist}$: massa específica do sólido da mistura solo-emulsão, em g/cm³;

m_s : massa do solo seco, em g;

m_{ar} : massa do asfalto residual (betume), em g;

V_s : volume do solo seco, em cm³; e

V_{ar} : volume do asfalto residual, em cm³.

3.9.5 Massa específica aparente sólido da mistura

A massa específica aparente do sólido da mistura ($\rho_{s,ap,mist}$) é a relação entre a soma da massa seca do solo com a massa do asfalto residual pelo volume total, obtida de acordo com a Equação 3.6. Para o cálculo foi considerado que o betume constitui também a parte sólida da mistura.

$$\rho_{s,ap,mist} = \frac{m_s + m_{ar}}{V} \quad (3.6)$$

Onde:

$\rho_{s,ap,mist}$: massa específica aparente do sólido da mistura solo-emulsão, em g/cm³;

m_s : massa do solo seco, em g;

m_{ar} : massa do asfalto residual (betume), em g; e

V : volume total da amostra, em cm³.

3.9.6 Índice de vazios da amostra solo-emulsão

O índice de vazios é definido como o volume de vazios da amostra dividido pelo volume ocupado pelas partículas sólidas, que por meio de algumas manipulações algébricas pode se expressar de acordo com a Equação 3.7.

$$e_{mist} = \frac{\rho_{s,mist}}{\rho_{s,ap,mist}} - 1 \quad (3.7)$$

Onde:

e_{mist} : índice de vazios da mistura, adimensional;

$\rho_{s,mist}$: massa específica da parte sólida da mistura solo-emulsão (solo e asfalto residual), em g/cm³; e

$\rho_{s,ap,mist}$: massa específica aparente do sólido da mistura solo-emulsão, em g/cm³.

3.9.7 Grau de saturação da amostra solo-emulsão

O grau de saturação é definido como a relação entre o volume de água e o volume de vazios, que por meio de algumas manipulações algébricas pode se expressar de acordo com a Equação 3.8.

$$S_{\text{mist}} = \frac{w \cdot \delta_{\text{mist}}}{e_{\text{mist}}} \quad (3.8)$$

Onde:

S_{mist} : grau de saturação da mistura, % em volume;

w: umidade da mistura, descontada a porcentagem de água da emulsão, % em massa;

δ_{mist} : densidade relativa da mistura solo-betume, adimensional.

3.9.8 Porcentagem de vazios na mistura solo-emulsão

A porcentagem de vazios na mistura (V_v) é a relação entre o volume de vazios pelo volume total, que por meio de algumas manipulações algébricas pode se expressar de acordo com a Equação 3.9.

$$V_v = \frac{\rho_{s,\text{mist}} - \rho_{s,\text{ap,mist}}}{\rho_{s,\text{mist}}} \times 100 \quad (3.9)$$

Onde:

V_v : porcentagem de vazios da mistura, %;

$\rho_{s,\text{mist}}$: massa específica da parte sólida da mistura solo-emulsão (solo e asfalto residual), em g/cm³; e

$\rho_{s,\text{ap,mist}}$: massa específica aparente do sólido da mistura solo-emulsão, em g/cm³.

3.9.9 Porcentagem de volume do betume

A porcentagem de volume do betume (V_b) é a relação entre o volume de betume pelo volume total, que por meio de algumas manipulações algébricas pode se expressar de acordo com a Equação 3.10.

$$V_b = \frac{B}{\rho_b} \times \rho_{s,\text{ap,mist}} \quad (3.10)$$

Onde:

V_b : porcentagem de betume, % em massa;

B: porcentagem de betume %, em massa;

ρ_b : massa específica do betume, adotado 1 g/cm³; e

$\rho_{s,\text{ap,mist}}$: massa específica aparente do sólido da mistura solo-emulsão, em g/cm³.

3.9.10 Porcentagem de vazios em relação aos grãos minerais

A porcentagem de vazios em relação aos grãos minerais na mistura (VGM) é definido como a soma dos vazios da mistura solo-emulsão com o volume de betume, obtida de acordo com a Equação 3.11.

$$\text{VGM} = V_v + V_b \quad (3.11)$$

Onde:

VGM: porcentagem de vazios do agregado mineral, em %;

V_v : porcentagem de vazios da mistura, %;

V_b : porcentagem de volume de betume, %.

4 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Introdução

Neste capítulo serão apresentados os resultados dos ensaios de permeabilidade, de cisalhamento direto e as análises de fluxo e estabilidade de taludes realizados de forma a se estudar a influência de elevados teores de emulsão nas propriedades hidráulicas, na resistência ao cisalhamento dos solos, e no comportamento das barragens constituídas por misturas entre solo e elevado teores de emulsão asfáltica.

4.2 Propriedades hidráulicas do solo e das misturas entre solo e elevados teores de emulsão

A seguir são apresentados os resultados obtidos dos ensaios realizados de acordo com a metodologia apresentada no tópico 3.7 do capítulo anterior. Na Tabela 4.1 são mostrados os índices físicos dos corpos de prova das misturas solo-emulsão ensaiadas. As misturas ensaiadas consistiram:

- mistura compactada, na metodologia Marshall, imediatamente após a operação de mistura entre o solo e a emulsão, denominada deste ponto em diante como Marshall imediato (MI);
- mistura compactada, na metodologia Marshall, 24 horas após a operação de mistura entre o solo e a emulsão, denominada deste ponto em diante como Marshall 24h (M24);
- mistura compactada, na metodologia Proctor Modificado, imediatamente após a operação de mistura entre o solo e a emulsão, denominada deste ponto em diante como Proctor Modificado Imediato (PMI).

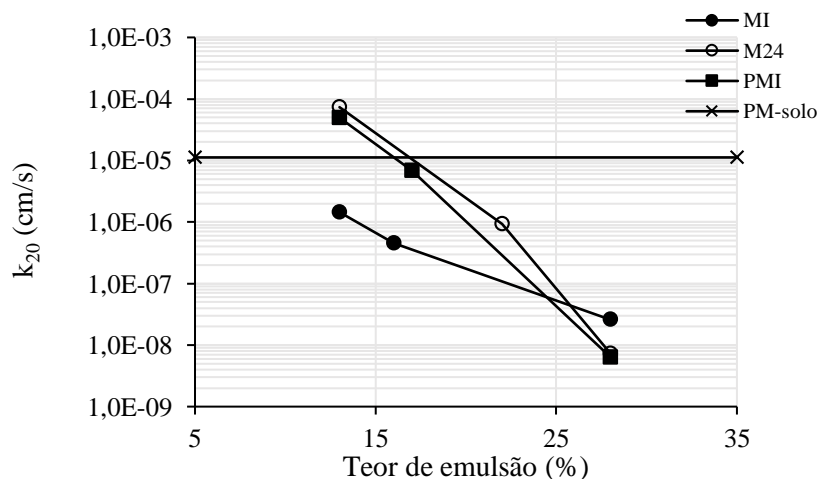
Tabela 4.1 – Índices físicos dos corpos de prova utilizados nos ensaios de permeabilidade.

	Marshall Imediato			Marshall 24 horas			Proctor Modificado Imediato		
Teor de emulsão (%)	13	16	28	13	22	28	13	17	28
ρ (g/cm ³)	2,07	2,12	1,87	1,88	2,06	1,91	2,00	2,05	1,86
$\rho_{s,ap,mist}$ (g/cm ³)	1,97	2,00	1,68	1,79	1,89	1,71	1,90	1,92	1,67
$\rho_{s,mist}$ (g/cm ³)	2,32	2,25	2,00	2,32	2,12	2,00	2,32	2,23	2,00
e_{mist}	0,2	0,1	0,2	0,3	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2
w (%)	7,5	5,6	8,0	12,2	5,1	5,9	9,3	6,9	6,4
S_{mist} (%)	98,4	99,9	84,1	95,9	89,2	69,2	97,8	95,0	65,0
V_v (%)	15,0	11,4	16,1	22,8	10,7	14,3	17,9	13,8	16,6
V_b (%)	17,0	21,4	33,1	15,4	28,6	33,8	16,4	22,0	32,9
VGM (%)	32,0	32,8	49,2	38,3	39,4	48,1	34,3	35,8	49,5

Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 4.1 são apresentados os resultados dos ensaios de permeabilidade das misturas confeccionadas na metodologia MI, M24 e PMI. Também, é apresentado o resultado do coeficiente de permeabilidade do solo tipo SM para fins comparativos. O corpo de prova do solo tipo SM foi preparado para o ensaio de permeabilidade utilizando-se o teor ótimo de umidade e a massa específica aparente seca máxima obtidos do ensaio de compactação na energia Proctor Modificada.

Figura 4.1 – Variação do coeficiente de permeabilidade (k_{20}) em função do teor de emulsão asfáltica (%).



Fonte: Elaborado pelo autor.

De forma geral, pode-se observar que os resultados dos coeficientes de permeabilidade (k_{20}) da amostra compactada utilizando o procedimento MI são menores do que os coeficientes de permeabilidade da amostra preparada pelo procedimento M24. Isso pode ser explicado pelo fato de que no procedimento M24, a energia de compactação não é suficiente para diminuir os vazios da mistura devido à rigidez do filme betuminoso que envolve os grãos de solo. Por outro lado, no procedimento MI o k_{20} é menor, pois no ato da compactação a energia é suficiente para aproximar as partículas da mistura solo-emulsão. Desta forma, os vazios da amostra diminuem, conforme mostrado na Tabela 4.1, uma vez que no procedimento MI não se teve ainda tempo para a ocorrência da ruptura da emulsão asfáltica na mistura, e portanto o filme betuminoso sobre os grãos apresenta uma baixa viscosidade.

Também, pode-se observar que somente houve uma diminuição do coeficiente de permeabilidade da mistura em relação ao solo para a amostra preparada pelo procedimento Marshall 24 horas (M24) e pelo procedimento Proctor Modificado imediato (PMI), a partir de um certo teor de emulsão asfáltica. Isso ocorre pelo fato da energia de compactação não ter sido elevada o suficiente para promover a deformação da mistura, mesmo utilizando a compactação na energia Proctor Modificada realizada imediatamente após a preparação da mistura.

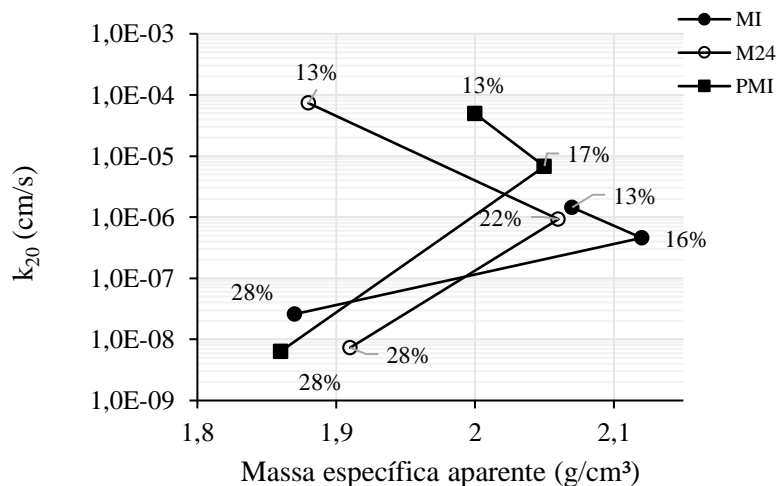
Observa-se ainda que em todas as misturas estudadas, os valores do coeficiente de permeabilidade convergem para um valor único, em torno de 10^{-8} cm/s, mostrando que para teores muito elevados de emulsão asfáltica, a metodologia de compactação não influencia nos valores do coeficiente de permeabilidade. Além disso, as diferenças observadas nos valores do coeficiente de permeabilidade das misturas com teores de emulsão de 28% são consideradas insignificantes face a escala necessária para que seja considerada uma mudança significativa nos valores dos coeficientes de permeabilidade dos materiais.

Na Figura 4.2 são mostradas as variações dos coeficientes de permeabilidade das misturas solo-emulsão em função da massa específica aparente. De acordo com estes resultados, observa-se que há uma grande dependência do coeficiente de permeabilidade (k_{20}) com a massa específica aparente das misturas estudadas. Inicialmente, verifica-se que um aumento da massa específica aparente até o teor ótimo de emulsão produz uma diminuição nos valores do k_{20} das misturas. Em seguida, ocorre uma redução do k_{20} , mesmo com a diminuição da massa específica aparente das misturas.

A diminuição da massa específica aparente das misturas com os teores de emulsão de 28%, provavelmente, se dá pelo fato do baixo peso específico da emulsão que se encontra em grande quantidade. Nestas situações, o volume de ar presente nas misturas são menores mesmo com menores valores de massa específica aparente, fazendo com que o coeficiente de

permeabilidade continue diminuindo com os teores de emulsão elevados. Vale ressaltar que este valor do k_{20} ainda pode ser menor em virtude do corpo de prova não está saturado, conforme mostrado na Tabela 4.1. Esta dificuldade de saturação dos corpos de prova, confeccionados com 28% de emulsão asfáltica, pode estar relacionada aos baixos valores do coeficiente de permeabilidade, que dificultam o fluxo de água mesmo quando sob pressão.

Figura 4.2 – Variação do coeficiente de permeabilidade (k_{20}) em função da massa específica aparente.



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.3 Resistência ao cisalhamento do solo e das misturas entre solo e elevados teores de emulsão

Para a determinação da coesão e do ângulo de atrito interno da mistura entre solo e elevados teores de emulsão foi utilizado o ensaio de cisalhamento direto, em que os corpos de prova confeccionados com as misturas foram submetidos à ruptura com e sem inundação por água com o intuito de verificar se havia diferenças dos valores dos parâmetros de resistência obtidos. Estas diferenças poderiam expressar a influência da saturação nos parâmetros de resistência obtidos nos ensaios realizados.

Quanto ao corpo de prova confeccionado com o solo do tipo SM foi realizado o ensaio padrão, ou seja, com a saturação do corpo de prova antes da aplicação da tensão normal.

Foram utilizadas para a confecção dos corpos de prova as massas específicas aparentes máximas das misturas com os seus respectivos teores de emulsões obtidos com a compactação nas metodologias MI e M24. Para o solo foi utilizada a massa específica aparente

seca máxima com o seu correspondente teor de umidade ótimo na energia Proctor Modificada para a moldagem do corpo de prova. As misturas foram ensaiadas nos valores de $\rho_{\text{máx}}$ e correspondente volume de vazios mínimos, que representa, provavelmente, a condição que deva ser aplicada no campo. Na Tabela 4.2 são apresentados apenas os índices físicos de umidade e grau de saturação dos corpos de prova ensaiados com as misturas solo-emulsão do procedimento Marshall imediato inundado. Os resultados mostram que o processo de inundação foi capaz de elevar o grau de saturação a um valor muito próximo de 100%.

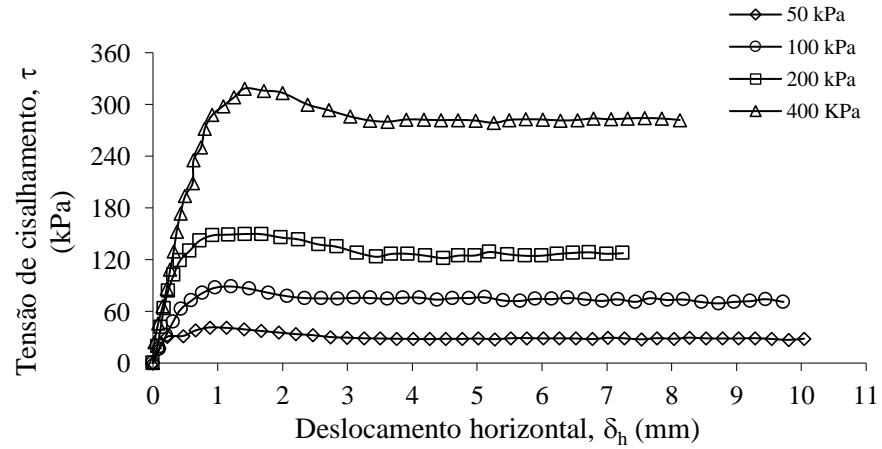
Tabela 4.2 – Índices físicos dos corpos de prova do ensaio de resistência ao cisalhamento.

	Marshall Imediato (Inundado)			
Tensão Normal (kPa)	50	100	200	400
w (%)	5,52	5,49	5,55	5,51
S _{mist} (%)	99,3	99,0	99,9	99,2

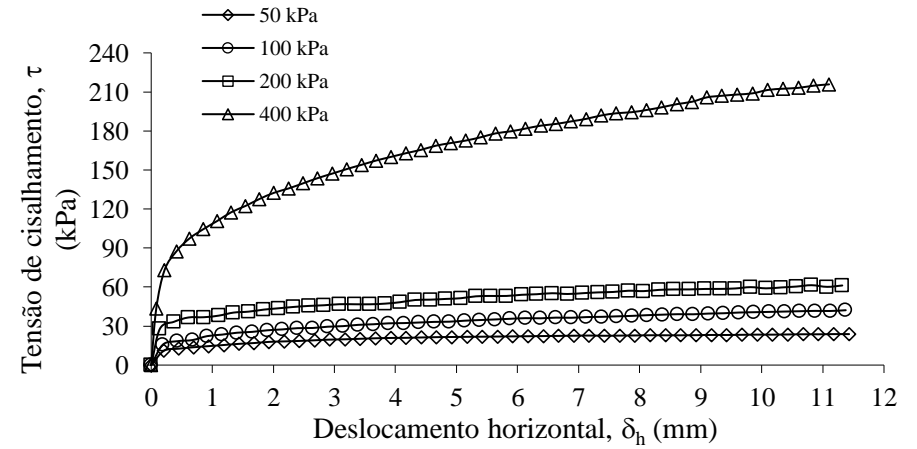
Fonte: Elaborado pelo autor.

Nas Figuras 4.3 e 4.4 são apresentados os resultados obtidos no ensaio de cisalhamento direto para a mistura Marshall imediato (MI) com inundação e sem inundação, da amostra Marshall 24 horas após a preparação da mistura (M24) sem inundação e do solo – SM, respectivamente, para a tensão normal de 50 kPa, 100 kPa, 200 kPa e 400 kPa de cada mistura e do solo separadamente e comparando cada mistura solo-emulsão e do solo em que foram aplicado a mesma tensão normal.

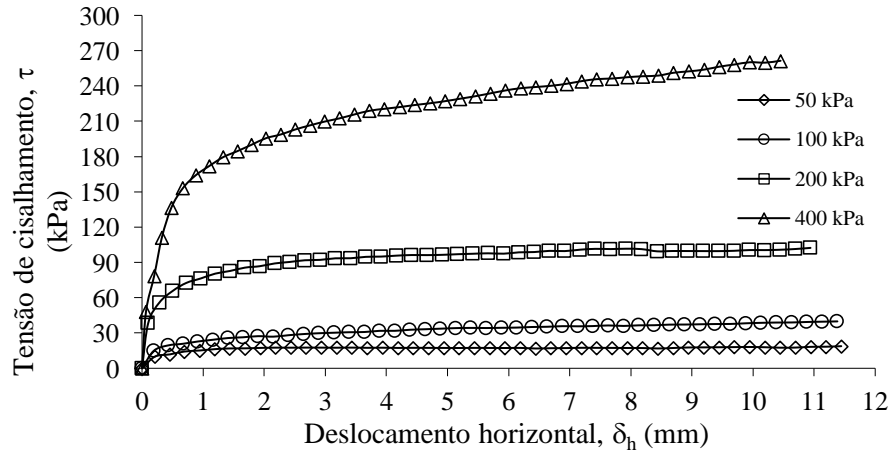
Figura 4.3 – Curvas de tensão de cisalhamento (τ) em função do deslocamento horizontal (δ_h) das misturas solo-emulsão e do solo SM.



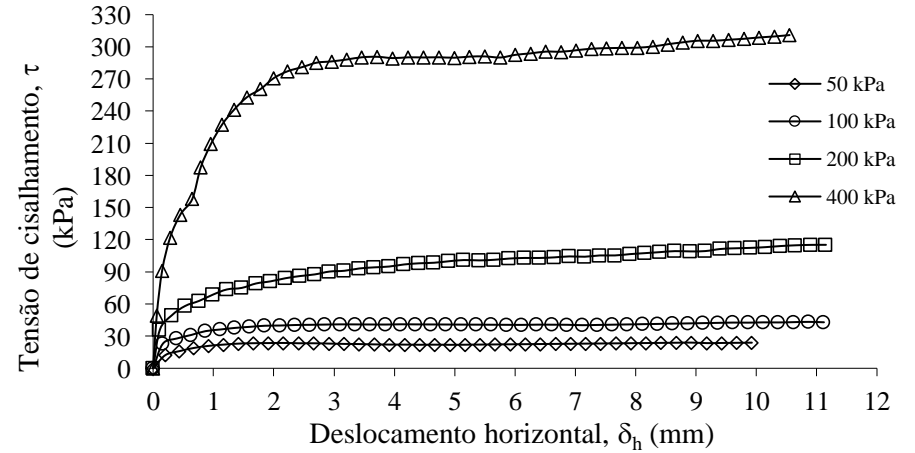
(a) Solo SM.



(b) Mistura solo-emulsão Marshall 24 horas.



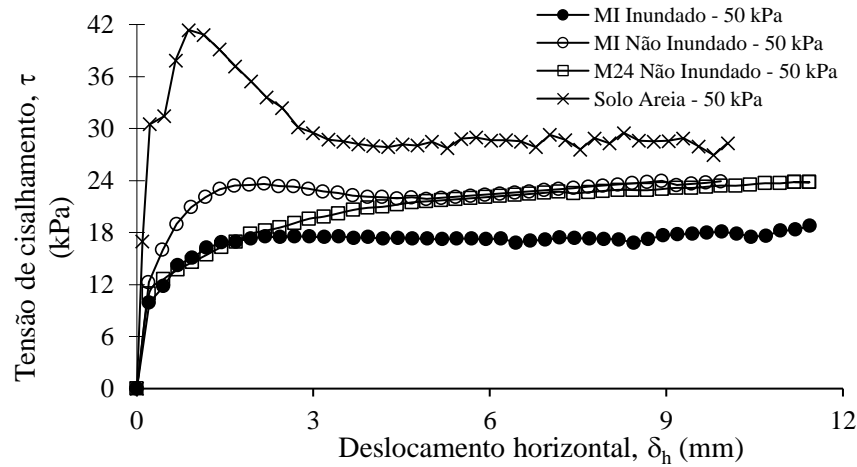
(c) Mistura solo-emulsão Marshall imediato inundado.



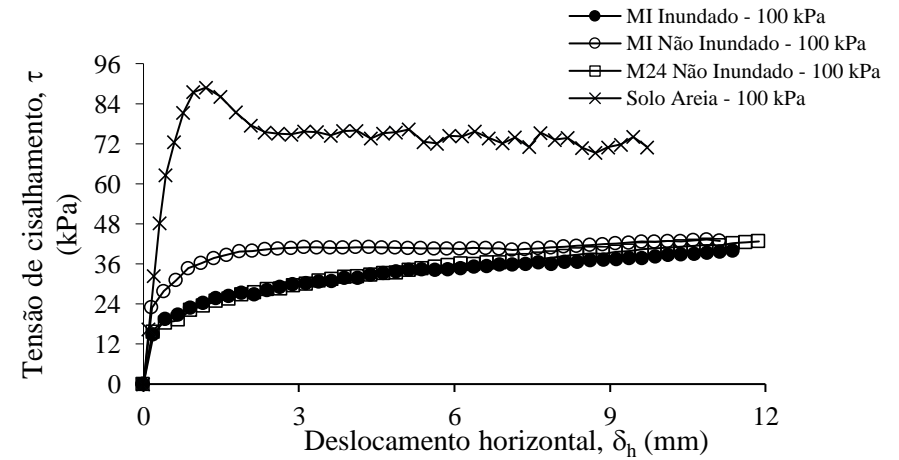
(d) Mistura solo-emulsão Marshall imediato Não - inundado.

Fonte: Elaborado pelo autor.

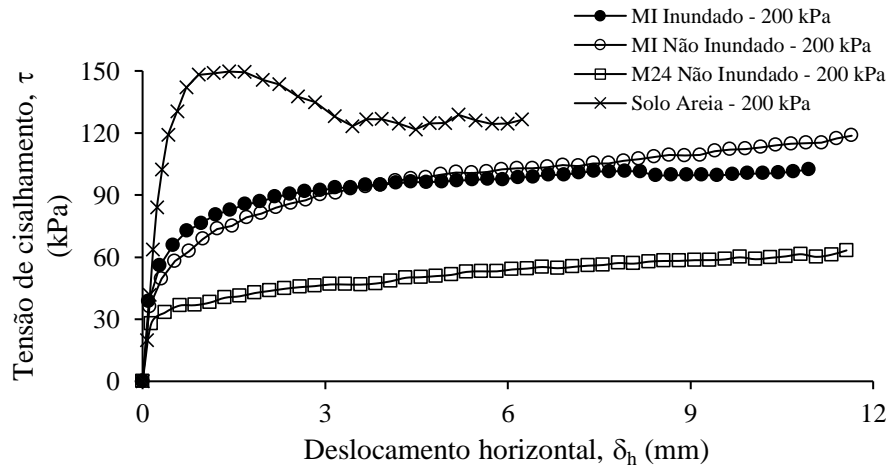
Figura 4.4 – Comparação entre o comportamento cisalhante das misturas solo-emulsão e do solo SM.



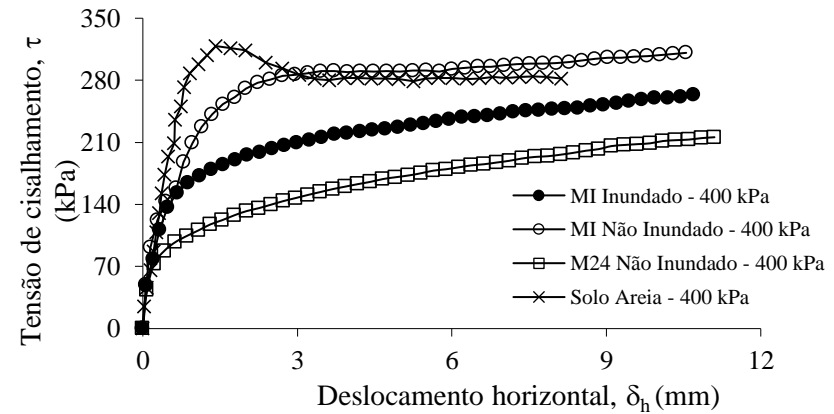
(a) Tensão normal de 50 kPa.



(b) Tensão normal de 100 kPa.



(c) Tensão normal de 200 kPa.



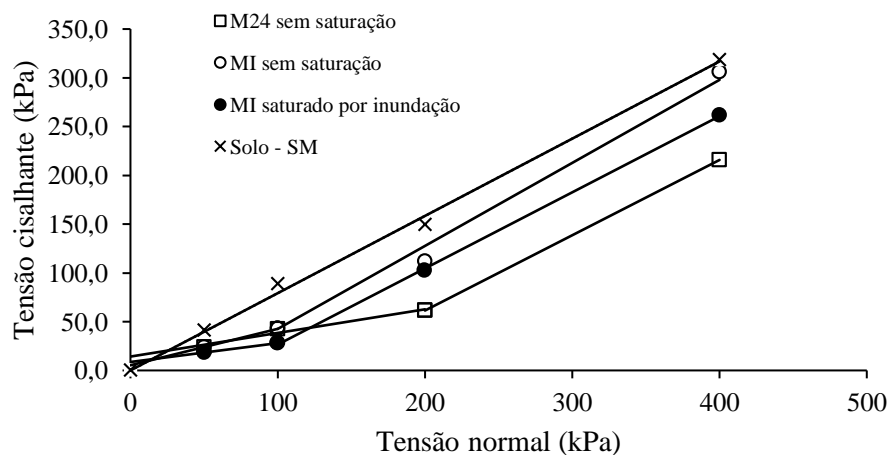
(d) Tensão normal de 400 kPa.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Conforme os resultados mostrados na Figuras 4.3, constata-se que o solo SM (areia siltosa) compactado apresenta resistência de pico bem definida em todos os níveis de tensões normais aplicadas. Observa-se ainda para as misturas solo-emulsão, que à exceção daquela compactada na metodologia Marshall após 24 horas e submetida a uma tensão normal igual a 400 kPa, em todos os corpos de prova não há um aumento significativo da resistência após a ruptura, sendo inclusive semelhante aos resultados obtidos por Mogrovejo (2013) e Silva dos Santos et al (2010) de solos reforçados com fibras.

Na Figura 4.4 é observado que as misturas solo-emulsão apresentam em geral resistência ao cisalhamento de pico e rigidezes cisalhantes inferiores aos obtidos para o solo SM compactado. A diminuição das rigidezes das misturas solo-emulsão em relação ao solo SM compactado, observada principalmente nos deslocamentos horizontais pré-pico, pode ser atribuída ao caráter viscoso do filme de asfalto residual. A comparação entre o comportamento cisalhante das misturas solo-emulsão e do solo compactado SM pode ser melhor entendida a partir da análise das envoltórias de resistência mostradas na Figura 4.5, a qual foi construída a partir das tensões normais aplicadas e dos máximos valores obtidos para as tensões cisalhantes durante o ensaio, que no caso das misturas solo-emulsão ocorreram para deslocamentos horizontais de 10 mm. Os resultados apresentados na Figura 4.5 indicam haver uma bilinearidade das envoltórias de resistência das misturas solo-emulsão, o que permite definir o comportamento destes materiais para dois níveis de carregamentos distintos.

Figura 4.5 – Envoltórias das tensões cisalhantes na ruptura em função da tensão normal efetiva.

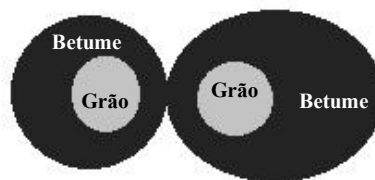


Fonte: Elaborado pelo autor.

De um modo geral, os resultados mostram que para aplicação de baixos níveis de

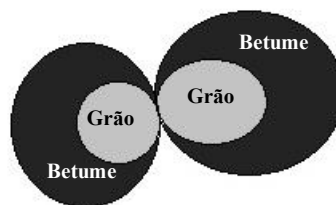
carregamento nas misturas entre solo e elevados teores de emulsão, o que comanda o mecanismo de cisalhamento das misturas é o filme de asfalto residual que confere ao material um intercepto coesivo pela ação ligante da emulsão e atrito pelo intertravamento dos grãos devidamente envolvidos pelo filme de asfalto residual, como ilustrado na Figura 4.6. Nas misturas MI, o nível de tensão a partir do qual ocorre a bilinearidade é menor do que nas misturas M24, ensaiadas sob a mesma condição de inundação, pelo fato de que nas misturas MI o filme de asfalto residual apresenta uma menor espessura devido ao menor teor de emulsão empregado na sua confecção, fazendo com que o contato grão a grão ocorra em menores níveis de tensões normais. Considerando a aplicação de altos de níveis de carregamentos nas misturas ensaiadas, observa-se que a resistência ao cisalhamento das misturas se dá pelo atrito entre os grãos minerais, pois neste intervalo de tensões, provavelmente, há uma completa remoção do filme asfáltico nos contatos, fazendo com que o atrito grão a grão se sobressaia em relação à eventual ação ligante conferida pelo asfalto residual, como ilustrado a Figura 4.7.

Figura 4.6 – Comportamento da mistura quando solicitada a baixos níveis de tensões.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 4.7 – Comportamento da mistura quando solicitada a altos níveis de tensões.



Fonte: Elaborado pelo autor

De acordo com os resultados apresentados na Figura 4.4, observa-se ainda que a inundação tem influência na resistência ao cisalhamento das misturas estudadas. De uma forma geral, tem-se que as misturas ensaiadas sem inundação apresentam uma maior rigidez cisalhante e resistência ao cisalhamento que aquelas ensaiadas após a inundação dos corpos de prova. Tal aumento da rigidez e da resistência ao cisalhamento pode ser atribuído à sucção mátrica

presente nos corpos de prova ensaiados sem inundação. Convém salientar, que esta é apenas uma avaliação preliminar, uma vez que os ensaios foram conduzidos sem medição das sucções durante a ruptura.

Vale ressaltar que o comportamento observado nas envoltórias de resistência das misturas solo-emulsão é diferente daquele obtido para solos reforçados com outros materiais, como por exemplo, por fibras naturais e sintéticas (Santiago et al (2007); Mogrovejo (2013); Silveira (2018); Bianchini et al (2013); Casagrande (2005); Silva dos Santos et al (2010); Consoli et al (2009); etc). Os resultados obtidos para estes materiais, ou seja, solos reforçados com fibras, indicam que as envoltórias de ruptura apresentam em alguns casos uma linearidade bem definida, e em outros, um comportamento curvilíneo, ou bilinear, no qual as misturas entre solo e fibra apresentam um intercepto coesivo apenas para elevados níveis de carregamento, devido à uma maior interação solo-fibra, como, por exemplo, os resultados apresentados por Silva dos Santos et al (2010), Consoli et al (2009) e Casagrande (2005). Entretanto, entende-se, neste trabalho, que de acordo com as envoltórias das Figuras 2.28 e 2.30 apresentadas no capítulo 2, esta bilinearidade das curvas é discutível, uma vez que todos os seus pontos repousam sobre uma mesma reta. No caso das misturas entre solo e elevados teores de emulsão asfáltica, os mecanismos responsáveis pelo intercepto coesivo e mobilização do atrito ocorrem de forma inversa ao dos solos reforçados por fibra pelas razões já apresentadas e discutidas anteriormente.

As Tabelas 4.3 e 4.4 apresentam, respectivamente, os parâmetros das misturas que foram obtidos do intervalo de tensões denominado baixo nível de carregamento e alto nível de carregamento. Para o intervalo de tensões denominado alto nível de carregamento, observa-se na Figura 4.5 uma tendência ao paralelismo entre as envoltórias obtidas, indicando que as misturas apresentam, praticamente, um mesmo ângulo de atrito do solo compactado, confirmando a hipótese de deslocamento do filme de asfalto residual e mobilização do atrito grão a grão nas misturas solo-emulsão.

Tabela 4.3 – Coesão e ângulo de atrito efetivos – baixo níveis de carregamento.

Procedimento utilizado	Teor de emulsão (%)	Parâmetros efetivos	
		c' (kPa)	ϕ' (°)
Solo – tipo SM	0	3,2	38
MI (sem inundação)	16	5,3	20,5
MI (com inundação)	16	8,7	10,9
M24 (sem inundação)	22	14,2	13,6

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 4.4 – Coesão e ângulo de atrito efetivos – alto níveis de carregamento.

Procedimento utilizado	Teor de emulsão (%)	Parâmetros efetivos	
		c' (kPa)	ϕ' (°)
MI (sem inundação)	16	0	40,4
MI (com inundação)	16	0	38
M24 (sem inundação)	22	0	37,7

Fonte: Elaborado pelo autor.

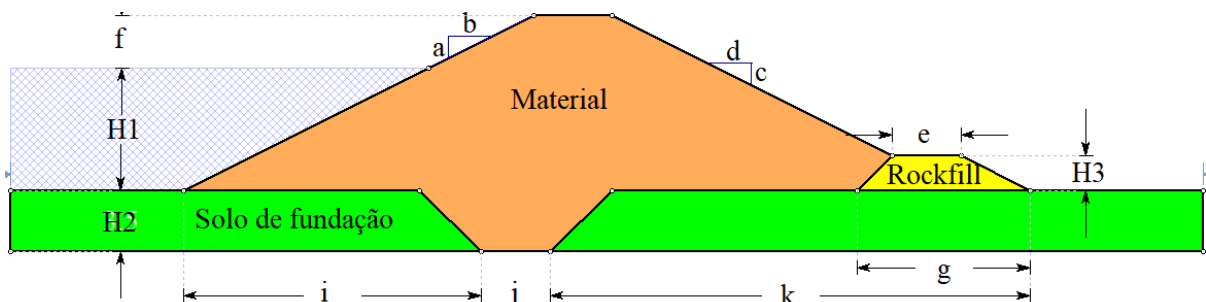
4.4 Análises de fluxo e estabilidades de taludes

Neste trabalho, a influência da adição de elevados teores de emulsão asfáltica no comportamento de uma barragem foi definida a partir dos resultados obtidos em análises de fluxo e estabilidade de taludes, considerando as propriedades hidráulicas e de resistência ao cisalhamento dos materiais envolvidos, apresentados e discutidos anteriormente. Para tanto, foram consideradas as seguintes configurações para a estrutura do barramento:

- Barragem homogênea composta de material granular (solo SM);
- Barragem homogênea composta de solo-emulsão (misturas Marshall imediato e Marshall 24 horas);
- Barragem zoneada composta de material granular nos espaldares (solo SM) e material argiloso no núcleo; e
- Barragem zoneada composta de material granular nos espaldares (solo SM) e solo-emulsão (Marshall imediato e Marshall 24 horas) no núcleo.

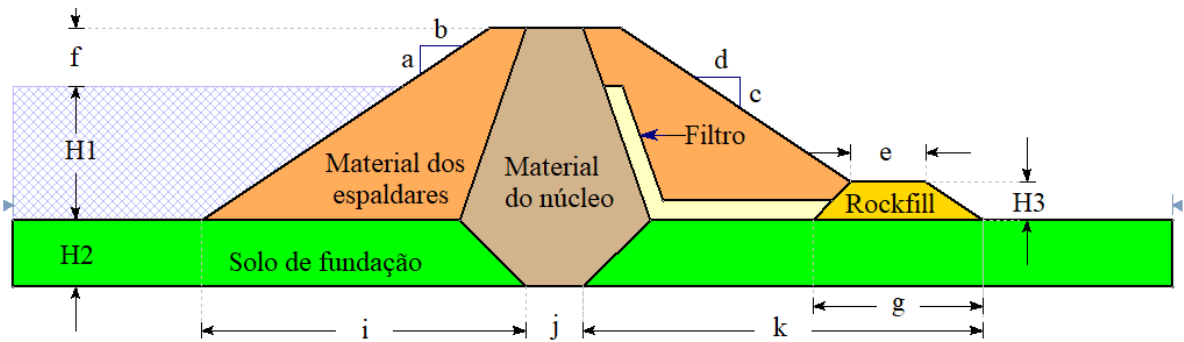
Nas Figuras 4.8 e 4.9 são apresentadas, respectivamente, as seções genéricas para a barragem homogênea e para a barragem zoneada.

Figura 4.8 – Seção genérica da barragem homogênea utilizada nas simulações numéricas de fluxo e análises de estabilidade de taludes.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 4.9 – Seção genérica da barragem zoneada com o núcleo impermeável utilizada nas simulações numéricas de fluxo e análises de estabilidade de taludes.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para a fundação de todas as barragens foi considerado um solo com permeabilidade menor do que os demais materiais empregados. Desta forma, é possível induzir que a maior parte do fluxo de água fluísse pelo corpo do barramento.

Nas Tabelas 4.5 e 4.6 são apresentados os valores das dimensões adotados nas seções das barragens empregadas nas análises de fluxo e estabilidade de taludes. A definição dos taludes foi obtida de forma a se garantir condições mínimas de estabilidade recomendadas pelo manual publicado pelo *US ARMY CORPS OF ENGINEERS* (2003) apresentado na Tabela 4.7.

Tabela 4.5 – Dimensões das seções e inclinações dos taludes das barragens homogêneas.

BARRAGENS HOMOGÊNEAS											
MATERIAL	INCLINAÇÃO		DIMENSÃO DAS SEÇÕES								
	Montante (a:b)	Jusante (c:d)	e (m)	f (m)	g (m)	H1 (m)	H2 (m)	H3 (m)	i (m)	j (m)	k (m)
Areia Siltosa	1v:1.5h	1v:2h	4,0	3,0	10,0	7,1	3,6	2,0	12,1	4,0	27,8
Marshall 24h (Não Inundado)	1v:3h	1v:3h	4,0	3,0	15,0	7,1	3,6	2,0	42,4	4,0	53,0
Marshall Imediato (Não Inundado)	1v:3.5h	1v:3h	4,0	3,0	12,0	7,1	3,6	2,0	32,3	4,0	37,9
Marshall Imediato (Inundado)	1v:4.5h	1v:4.5h	4,0	3,0	12,0	7,1	3,6	2,0	27,3	4,0	37,9

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 4.6 – Dimensões das seções e inclinações dos taludes das barragens zoneadas.

BARRAGENS ZONEADAS											
MATERIAL	INCLINAÇÃO		DIMENSÃO DAS SEÇÕES								
	Montante (a:b)	Jusante (c:d)	e (m)	f (m)	g (m)	H1 (m)	H2 (m)	H3 (m)	i (m)	j (m)	k (m)
Marshall Imediato (Inundado)	1v:1.5h	1v:2h	4,0	3,0	10,0	7,1	3,6	2,0	17,2	3,0	26,2
Marshall Imediato (Não Inundado)	1v:1.5h	1v:1.5h	4,0	3,0	9,0	7,1	3,6	2,0	17,2	3,0	21,2
Marshall 24h (Não Inundado)	1v:1.5h	1v:1.5h	4,0	3,0	9,0	7,1	3,6	2,0	17,2	3,0	21,2
Núcleo Argiloso - CL	1v:1.5h	1v:1.5h	4,0	3,0	9,0	7,1	3,6	2,0	17,2	3,0	21,2
Núcleo Argiloso – ML-CL	1v:1.5h	1v:1.5h	4,0	3,0	9,0	7,1	3,6	2,0	17,2	3,0	21,2

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 4.7 – Fatores mínimos requeridos de segurança para barragens de terra e de enrocamento.

Condição de análise	Requisitos mínimos do fator de segurança	Talude
Final de construção	1,3	A montante
Final de construção	1,3	A jusante
Regime de operação	1,4	A jusante
Esvaziamento rápido	1,1	A montante

Fonte: Adaptado do *Us Army Corps Engineer*, 2003.

Para a realização das simulações numéricas foram adotados os parâmetros apresentados na Tabela 4.8. Os valores, para o solo e para a mistura solo-emulsão, foram obtidos dos corpos de prova confeccionados com o teor de emulsão de 16%, em massa, para a metodologia Marshall (MI) e daqueles confeccionados com o teor de emulsão de 22%, em massa, para a metodologia Marshall 24 horas (M24) na condição de massa específica aparente máxima. Os valores dos parâmetros da argila CL e ML-CL considerada na análise das barragens zonadas foram obtidos da pesquisa de Jacintho (2010) e do relatório técnico (Filho, 2013) proveniente de ensaios realizados no Laboratório de Mecânica dos solos e Pavimentação (LMSP) da UFC, em 2013, respectivamente.

Tabela 4.8 – Parâmetros dos materiais utilizados na simulação no *software Slide* com a finalidade de analisar o fluxo e a estabilidade de talude das barragens.

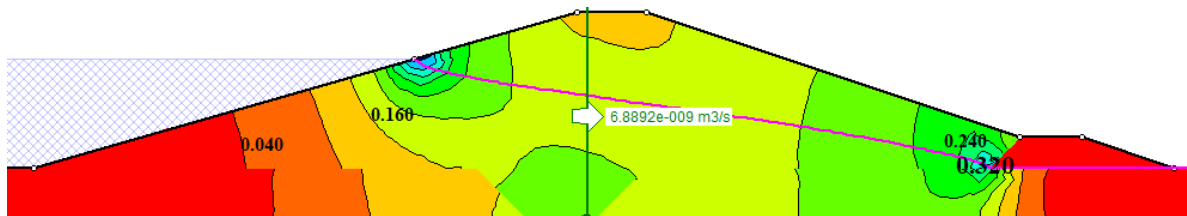
Materiais	k (m/s)	γ (kN/m³)	c' (kPa)	ϕ' (graus)
Areia Siltosa	$1,12 \times 10^{-7}$	20,9	3,2	38
Argila – tipo ML - CL	$1,00 \times 10^{-9}$	19,27	10	35,9
Argila – tipo CL	$1,20 \times 10^{-9}$	19,82	31	33,9
Marshall Imediato (Inundado)	$4,55 \times 10^{-9}$	20,8	8,66	10,9
Marshall Imediato (Não Inundado)	$4,55 \times 10^{-9}$	20,8	5,3	20,5
Marshall 24h (Não inundado)	$9,28 \times 10^{-9}$	20,2	14,2	13,6
Solo de fundação	$8,13 \times 10^{-9}$	19,5	2	30
Rock-Fill	$1,00 \times 10^{-2}$	26	0	45
Areial	$1,63 \times 10^{-4}$	19	0	30

Fonte: Elaborado pelo autor.

Todos os materiais (exceto as argilas) foram considerados como isotrópicos, e as equações de fluxo foram resolvidas utilizando-se o Método dos Elementos Finitos pelo *software Slide 6.0*. Para o cálculo do fator de segurança foi adotado o método Morgenstern-Price (1965) por ser um método menos conservador, pois as condições de estabilidade satisfazem simultaneamente às condições de equilíbrio de forças e de momentos (Silva, 2013). Além disso, este método considera que a relação entre as forças interfatias cisalhantes não é constante ao longo da massa deslizando, o que tende a ser mais realista.

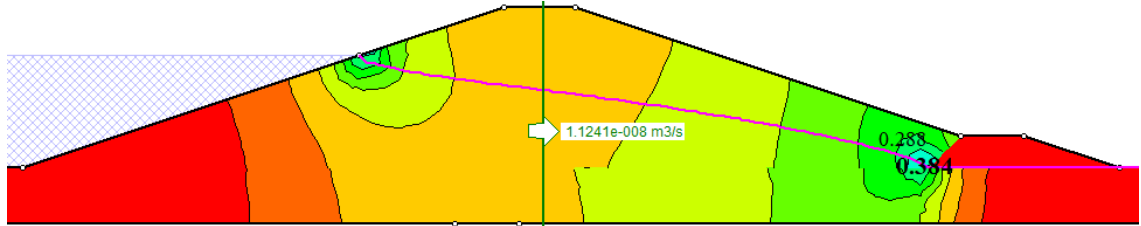
As Figuras 4.10, 4.11 e 4.12 mostram as vazões de percolação e as distribuições dos gradientes hidráulicos para barragens homogêneas, considerando o corpo do aterro formado pela mistura MI e M24, e pelo solo SM, respectivamente. A Tabela 4.9 mostra o resumo dos principais parâmetros obtidos nas análises de fluxo para as situações analisadas.

Figura 4.10 – Distribuição dos gradientes hidráulicos na barragem homogênea considerando o material do aterro como sendo a mistura solo-emulsão – Marshall imediato (16 % de emulsão).



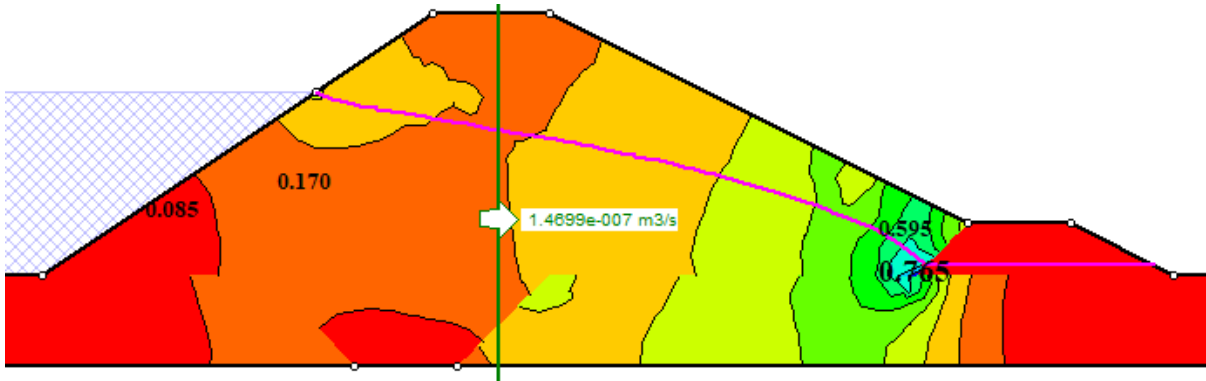
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 4.11 – Distribuição dos gradientes hidráulicos na barragem homogênea considerando o material do aterro como sendo a mistura solo-emulsão – Marshall 24 horas (22 % de emulsão).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 4.12 – Distribuição dos gradientes hidráulicos na barragem homogênea considerando o material do aterro como sendo o solo SM compactado na energia Proctor Modificada.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 4.9 – Resumo dos resultados das análises de fluxo para barragens homogêneas.

Parâmetros	Solo tipo SM	Mistura MI	Mistura M24
Vazão (l/dia)	12,7	0,59	0,97
Gradiente máximo	0,765	0,320	0,384

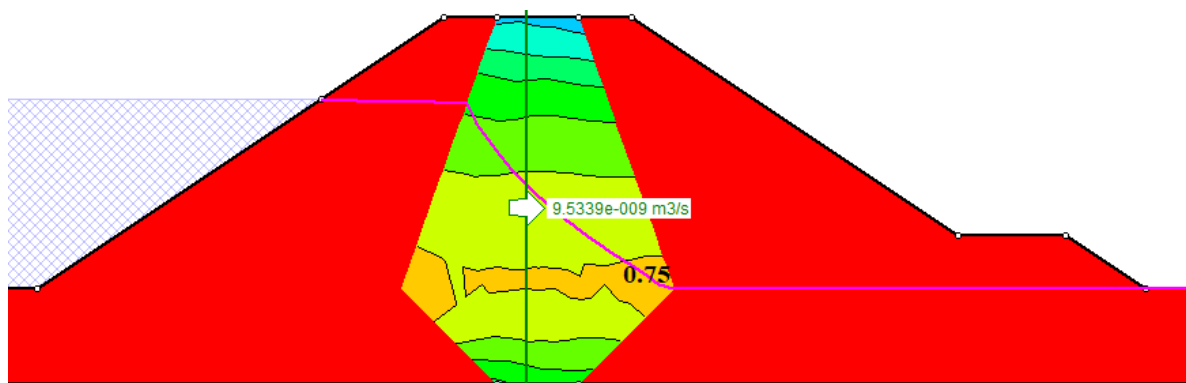
Fonte: Elaborado pelo autor.

Os resultados das análises de fluxo em barragens homogêneas mostram que a utilização da mistura entre o solo e 16% de emulsão asfáltica (MI) levou a uma redução significativa na vazão de percolação em comparação ao solo SM, e também em relação à mistura M24, que utilizou 22% em massa de emulsão asfáltica na sua confecção. A redução da vazão das barragens com solo e emulsão em relação à barragem constituída por solo se deu em função da sua redução no coeficiente de permeabilidade. Os resultados entre a mistura MI e M24 podem ser considerados similares, pois estas pequenas diferenças ocorrem devida às diferenças na parte inteira nos valores adotados para o coeficiente de permeabilidade.

Em relação aos gradientes hidráulicos máximos, os resultados mostram que há uma melhoria do comportamento hidráulico do barramento representado pela grande diminuição nos valores do gradiente. Tal melhoria, se dá basicamente pela grande redução provocada no coeficiente de permeabilidade da mistura MI em relação ao valor obtido para o solo SM, mostrando assim, um dos benefícios da estabilização do solo com a utilização de um elevado teor de emulsão asfáltica, se comparado aos valores utilizados em trabalhos anteriores, como os de Jacintho (2010), etc. Vale ainda destacar que com a redução do gradiente hidráulico máximo minimiza as chances de ocorrer o “*piping*” ou erosão interna progressiva, isto é, o processo em que a água percola pelo interior do maciço com elevado gradiente hidráulico carreando, inicialmente, os materiais mais finos no interior do solo. Convém salientar que estudos específicos sobre a possibilidade de lixiviação do filme residual devem ser realizados.

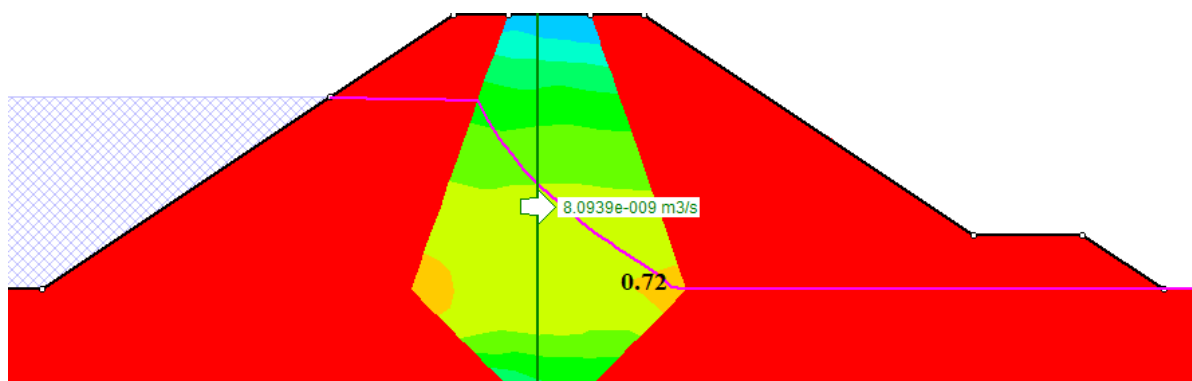
As Figuras 4.13, 4.14, 4.15 e 4.16 mostram as vazões de percolação e as distribuições dos gradientes hidráulicos para barragens zoneadas. A Tabela 4.10 mostra o resumo dos principais parâmetros obtidos nas análises de fluxo para as situações analisadas.

Figura 4.13 – Distribuição dos gradientes hidráulicos na barragem zoneada com o núcleo de argila – Solo do tipo CL.



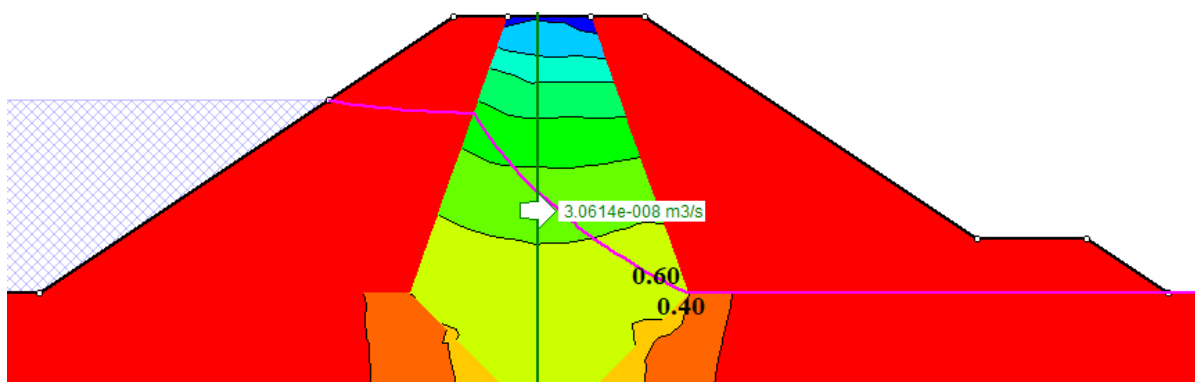
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 4.14 – Distribuição dos gradientes hidráulicos na barragem zoneada com o núcleo de argila – Solo do tipo ML – CL.



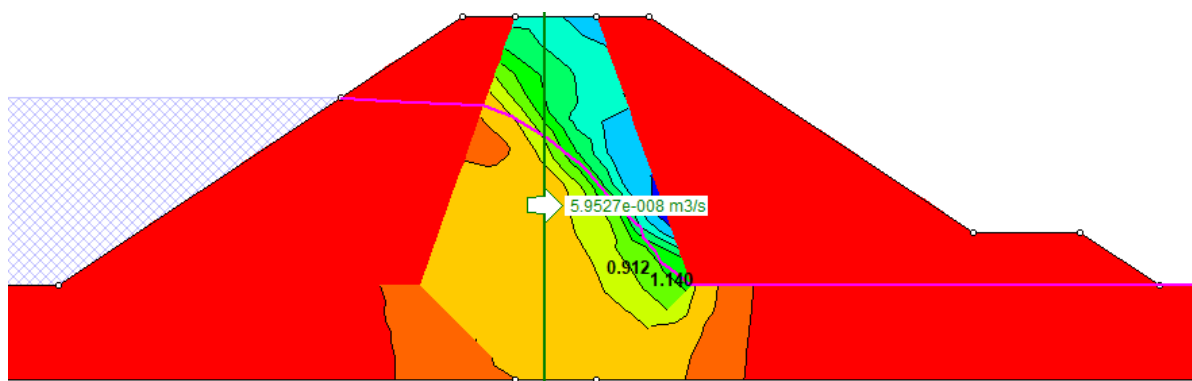
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 4.15 – Distribuição dos gradientes hidráulicos na barragem zoneada com o núcleo de solo-emulsão do procedimento Marshall imediato (16 % de emulsão).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 4.16 – Distribuição dos gradientes hidráulicos na barragem zoneada com o núcleo de solo-emulsão do procedimento Marshall 24 horas (22 % de emulsão).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 4.10 – Resumo dos resultados das análises de fluxo para barragens zoneadas.

Parâmetros	Argila tipo CL	Argila tipo ML – CL	Mistura MI	Mistura M24
Vazão (l/dia)	0,82	0,70	2,64	5,14
Gradiente máximo	0,75	0,72	0,6	1,14

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os resultados das análises de fluxo em barragens zonadas mostram que a utilização da mistura MI e M24 têm praticamente a mesma vazão de percolação, uma vez que possuem a mesma ordem de grandeza 10^{-8} m/s. Em relação aos gradientes hidráulicos máximos, os resultados apresentam uma pequena melhoria do comportamento hidráulico do barramento da mistura MI em relação às demais. Isso pode ter ocorrido pelo fato do coeficiente de permeabilidade da mistura MI ser aproximadamente igual ao coeficiente de permeabilidade dos solos CL e ML – CL, respectivamente. Assim sendo, observa-se que pode-se considerar que a utilização das misturas em barragens zonadas leva a um comportamento semelhante àquele obtido com a utilização dos solos. Assim, mostra-se que a substituição dos solos argilosos por misturas solo com emulsão é tecnicamente viável, fazendo com que sejam minimizados os problemas como exploração de jazidas de solos argilosos, uma vez que os materiais arenosos utilizados na confecção das misturas podem estar disponíveis nas áreas alagadas pelo barramento.

As Tabelas 4.11 e 4.12 apresentam os resultados obtidos das análises feitas nas barragens homogêneas e zoneadas de todos os cenários respeitando os fatores mínimos de segurança apresentados na Tabela 4.7.

Tabela 4.11 - Resultados das análises de estabilidade de taludes das barragens homogêneas.

BARRAGENS HOMOGENEAS							
MATERIAL	FATOR DE SEGURANÇA				VAZÃO (x10 ⁻⁸ m ³ /s)	VOLUME (m ³ /m)	
	RO (Jusante)	FC (Jusante)	FC (Montante)	ER (Montante)		M. Principal	Rock Fill
Areia Siltosa	1,6	1,9	1,5	1,5	14,67	244,77	14,00
Marshall 24h (Não Inundado)	1,6	1,4	1,4	1,6	1,12	370,28	16,00
Marshall Imediato (Não Inundado)	1,6	1,3	1,4	1,8	0,69	395,72	16,00
Marshall Imediato (Inundado)	1,5	1,3	1,3	1,6	0,52	520,30	19,00

Fonte: Elaborado pelo autor.

Notas:

RO – Regime de operação; FC – Final de construção; ER – Esvaziamento rápido.

Tabela 4.12 – Resultados das análises de estabilidade de taludes das barragens zoneadas.

BARRAGENS ZONEADAS									
MATERIAL	FATOR DE SEGURANÇA				VAZÃO (x10 ⁻⁸ m ³ /s)	VOLUME (m ³ /m)			
	RO Jusante	FC Jusante	FC Montante	ER Montante		Solo - emulsão	Rock Fill	Areia Siltosa	Areial
Marshall Imediato (Inundado)	1,7	1,7	1,3	1,3	2,8	89,41	14,00	156,61	20,45
Marshall Imediato (Não Inundado)	1,5	1,5	1,3	1,3	3,1	89,41	13,00	137,22	15,34
Marshall 24h (não inundado)	1,5	1,3	1,3	1,3	6,0	89,41	13,00	137,22	15,34
Núcleo Argiloso - CL	1,5	1,3	1,3	1,3	0,95	89,41	13,00	137,22	15,34
Núcleo Argiloso – ML – CL	1,5	1,3	1,3	1,3	0,81	89,41	13,00	137,22	15,34

Fonte: Elaborado pelo autor.

Notas:

RO – Regime de operação; FC – Final de construção; ER – Esvaziamento rápido.

Os resultados, obtidos após as análises das barragens homogêneas, mostram que a vazão é da mesma ordem de grandeza para as misturas MI inundado e não inundado, e ambas com vazões menores em relação à barragem formada com o material granular (solo SM), mostrando que adição da emulsão asfáltica ao solo contribui para a redução deste parâmetro. Porém, foi apenas a mistura MI inundada que apresentou na simulação a menor quantidade de material a ser empregado para se obter a menor vazão dentre as barragens homogêneas estudadas.

As análises de fluxo e de estabilidade de taludes feitas nas barragens zoneadas mostraram resultados semelhantes aos obtidos das barragens homogêneas, ou seja, os resultados da vazão foi praticamente o mesmo para as misturas MI inundado e não inundado. No entanto, os resultados das vazões para essas metodologias foram maiores do que os valores das vazões de barragens cujos os núcleos são de materiais argilosos.

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE PESQUISA

São apresentadas neste capítulo as principais conclusões e sugestões para pesquisas futuras sobre o tema abordado. As conclusões basearam-se na análise dos resultados advindos dos ensaios laboratoriais e análises de fluxo e estabilidade de taludes realizadas, conforme detalhado a seguir.

5.1 Conclusões

5.1.1 Ensaios de permeabilidade das misturas entre solo e elevados teores de emulsão asfáltica

Os resultados obtidos dos ensaios de permeabilidade mostraram que as misturas confeccionadas com o solo e elevados teores de emulsão asfáltica apresentaram uma redução do coeficiente de permeabilidade (k_{20}) em relação ao solo utilizado. Esta diminuição do k_{20} foi maior com o aumento do teor de emulsão empregado. Observa-se ainda que a diminuição do coeficiente de permeabilidade ocorre com o aumento da massa específica aparente até o teor ótimo de emulsão, e também em situações com teores de emulsão muito elevados, mesmo nessas situações as misturas apresentando uma diminuição da massa específica aparente. Com isso, conclui-se que o principal fator que produz uma diminuição do coeficiente de permeabilidade é o teor de emulsão empregado.

Além disso, observou-se que a utilização de elevados teores de emulsão asfáltica contribuiu para uma melhor distribuição do ligante na massa de solo, que por sua vez levou a uma maior homogeneidade, promovendo uma redução da permeabilidade do material em relação ao solo e melhorando o comportamento hidráulico das barragens analisadas.

Verifica-se também que para todos os teores de emulsão investigados o procedimento de compactar as misturas imediatamente após a sua confecção levou a uma maior redução do coeficiente de permeabilidade do que nas misturas compactadas 24 horas após a confecção.

Para teores de emulsão iguais a 28%, observou-se que o procedimento de compactação não influenciou nos valores do coeficiente de permeabilidade obtidos para as misturas. Os resultados mostraram que o teor de emulsão é o parâmetro físico que mais influenciou o comportamento hidráulico das misturas ensaiadas. A compactação pela

metodologia marshall foi a que produziu uma maior redução nos valores dos coeficientes de permeabilidade das misturas ensaiadas.

5.1.2 Ensaios de cisalhamento direto das misturas entre solo e elevados teores de emulsão asfáltica

A partir dos resultados obtidos na fase de aplicação das tensões normais nos ensaios de cisalhamento direto, observa-se que a deformabilidade da mistura depende do nível de tensão, e também da rigidez ou viscosidade do filme de asfalto que envolve os grãos.

Os resultados obtidos dos ensaios de cisalhamento direto mostraram que a não saturação por inundação provocou um aumento da resistência ao cisalhamento das misturas ensaiadas. Além disso, verifica-se que as misturas com maior valor da massa específica aparente – mistura MI – apresentaram uma resistência ao cisalhamento de pico bem definida, o mesmo não sendo observado em misturas com menores massas específicas aparente – mistura M24.

É possível concluir com os resultados obtidos dos ensaios de cisalhamento direto, que as misturas MI não inundadas possuíram resistência ao cisalhamento maiores do que as misturas M24 não inundadas.

Conclui-se que o aumento do teor de emulsão asfáltica provocou uma redução do ângulo de atrito interno e um aumento da coesão das misturas, na metodologia Marshall, embora isso tenha ocorrido para um determinado intervalo de tensões normais aplicadas, denominado de baixos níveis de tensões. Isso comprova que a emulsão asfáltica contribui para a ocorrência de tal fenômeno, uma vez que a mesma é um agente coesivo. Diferentemente dos resultados encontrados por Jacintho (2010).

Por outro lado, para as tensões normais aplicadas, denominado de elevados níveis de tensões, conclui-se que os ângulos de atrito interno das misturas são iguais ao ângulo de atrito interno do solo do tipo SM.

5.1.3 Análise de fluxo e estabilidade de taludes

Conclui-se que as vazões e os gradientes máximos obtidos nas análises de fluxo das barragens homogêneas constituídas pelas misturas solo-emulsão foram inferiores aos valores obtidos nas barragens homogêneas constituídas pelo solo – tipo SM. Isto se deu pela redução da permeabilidade dos materiais devido à inclusão da emulsão asfáltica em relação ao solo –

tipo SM.

Os taludes das barragens homogêneas formadas pelas misturas entre o solo e a emulsão asfáltica apresentaram uma inclinação inferior àqueles para as barragens homogêneas constituídas pelo solo arenoso (tipo SM) para que fossem atendidas as condições mínimas de segurança necessárias. Tal comportamento se deu pela coesão conferida ao solo pela adição da emulsão asfáltica, uma vez que em materiais coesivos é esperado que os taludes tenham uma menor inclinação que para materiais não coesivos. Dentre as barragens homogêneas analisadas, conclui-se que a mistura MI – inundada foi a que melhor apresentou economia em relação aos custos de materiais a ser utilizado na construção de barragens, pois ela apresentou a menor seção de barragem em função da menor vazão a ser empregada, contribuindo conseqüentemente de menos materiais para a sua construção.

Quanto à avaliação das condições de fluxo e estabilidade dos taludes das barragens zonadas, observa-se que as estruturas avaliadas, considerando as propriedades hidráulicas e os parâmetros de resistência ao cisalhamento das misturas entre solo e emulsão, apresentaram um comportamento semelhante ao obtido considerando os núcleos formados por solos do tipo CL e ML – CL.

De uma forma geral, conclui-se que a utilização de misturas entre solo e elevados teores de emulsão asfáltica é viável para o emprego em barragens homogêneas ou zonadas. A inclusão dos elevados teores de emulsão aos solos produziu um ganho nas suas propriedades hidráulicas e um acréscimo de coesão, para baixos níveis de carregamento. Em elevados níveis de carregamento, a diminuição da permeabilidade pode ser associada a um ganho de resistência por atrito, fazendo com que o comportamento das barragens seja também satisfatório.

Por fim, verifica-se que a confecção das misturas entre solo e emulsão compactadas imediatamente apresentam propriedades ligeiramente superiores às misturas compactadas 24 horas após a sua confecção. Mesmo assim, observa-se que as misturas compactadas 24 horas após a confecção apresentam propriedades que permitem considerar que há uma estabilização do solo com a adição da emulsão. A vantagem das misturas compactadas 24 horas após a sua confecção se dá pela possibilidade de haver a sua estocagem para posterior utilização.

5.2 Sugestões para pesquisas futuras

A seguir, serão apresentadas algumas sugestões de pesquisas futuras que possam dar continuidade ao que foi realizado neste trabalho:

- Estudo da contaminação do solo e da água nas estruturas dos barramentos executados com misturas solo-emulsão;
- Estudar o comportamento hidráulico de misturas entre solos argilosos e elevados teores de emulsão;
- Estudar o comportamento cisalhante das misturas entre solo e emulsão para diversos teores de emulsão considerando a mesma metodologia de compactação;
- Estudar as características de deformabilidade das misturas entre solo e emulsão, considerando as propriedades viscosas conferidas pelo material asfáltico;
- Estudar a susceptibilidade, ou tendência, ao lixiviamento do asfalto residual durante o fluxo;
- Estudar o comportamento tensão *versus* deformação das misturas entre solo e elevados teores via ensaios triaxiais;
- Estudar a estabilização de solos arenosos de diferentes graduações (bem graduado, uniforme, mal graduado, etc);
- Estudar misturas com elevados teores de emulsão e solos submetidos a uma pré-umidificação;

REFERÊNCIAS

- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **ASTM D3080 – 98 – Standard test method for direct shear test of soil under consolidated drained conditions.** Estados Unidos da América, 1998.
- 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.
- _____. **NBR 6459/1984: Solo – Determinação do limite de liquidez.** Rio de Janeiro, 1984.
- _____. **NBR 7181/1984: Solo – Análise granulométrica.** Rio de Janeiro, 1984.
- _____. **NBR 7182/86: Solo – Ensaio de Compactação.** Rio de Janeiro, 1986.
- _____. **NBR 7180/1984: Solo – Determinação do limite de plasticidade.** Rio de Janeiro, 1984.
- _____. **NBR 6568/1984: Emulsão Asfáltica – Determinação do resíduo de destilação de emulsão asfáltica.** Rio de Janeiro, 1984.
- _____. **MB 581/1971: Emulsão Asfáltica – Viscosidade “Saybolt-Furol” de emulsões asfálticas.** Rio de Janeiro, 1971.
- _____. **NBR 609/1971: Emulsão Asfáltica – Determinação da peneiração de emulsões asfálticas.** Rio de Janeiro, 1971.
- _____. **NBR 14545/2000 – Solo – Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos a carga variável.** Rio de Janeiro, 2000.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER – ME 093/94 – Solos – Determinação da densidade real.** 1994.
- _____. **DNER – ME 107/94 – Mistura betuminosa a frio, com emulsão asfáltica – ensaio Marshall.** 1994.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTE. **DNIT 165/2013 – EM – Emulsões asfálticas para pavimentação – especificação de material.** 2013.
- ABEDA - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS EMPRESAS DISTRIBUIDORAS DE ASFALTOS. **Manual Básico de Emulsões Asfálticas.** 2 ed. Rio de Janeiro: ABEDA, 2010.
- BARBOSA, M. C. R. LIMA, H. M. **Análise da utilização do vetiver no reforço de solos e estabilização de taludes.** XVIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos solos e Engenharia Geotécnica (COBRAMSEG), 2016.

BERNUCCI, L. B. et al. **Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros**. Rio de Janeiro: PETROBRAS, ABEDA, 2008.

BIANCHINI, M. K. et al. **Estudo da resistência ao cisalhamento do solo com a inclusão de fibras de polipropileno**. XXV Congresso Regional de Iniciação Científica e Tecnológica em Engenharia (CRICTE), 2013.

CASAGRANDE, M. T. **Comportamento de solos reforçados com fibras submetidos a grandes deformações**. Tese (Doutorado em Engenharia). Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, Porto Alegre, 2005.

CASTILHO, T. W. L. **Resistência ao cisalhamento de solos com fibras de politereftalato de etileno reciclado**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental). Universidade Estadual Paulista – Unesp, Bauru, 2017.

CONSOLI, N. C. FESTUGATO, L. HEINECK, K. S. (2009). **Strain-hardening behavior of fibre-reinforced sand in view of filament geometry**. *Geosynthetics International*, 16, N° 2.

DANTAS NETO, S. A. LIMA, F. C. LEME, R. F. **Estudo da compactação de misturas solo-emulsão para emprego em núcleo de barragens zoneadas**. XVIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos solos e Engenharia Geotécnica (COBRAMSEG), 2016.

DAS, B. M. **Fundamentos de engenharia geotécnica**. Tradução: All Tasks. Revisão técnica: Pérsio Leister de Almeida Barros. 6ª edição. São Paulo: Thomson Learning, 2007.

FALCÃO, P. R. F. **Estudo das propriedades mecânicas e hidráulicas de concretos asfálticos para a aplicação em barragens**. Tese (Doutorado em Geotecnia). Universidade de Brasília – UNB, Brasília, 2007.

FILHO, F. C. S. **Projeto da barragem Tambor: Estudos Geotécnicos**. Laboratório de mecânica dos solos e pavimentação (LMSP) – UFC. Fortaleza, 2013.

FLIGHTRADAR24. Disponível em: < <https://www.flightradar24.com/-3.75,-38.57/15>>. Acesso em: 26 Mai. 2018.

GANDOLFI, G. G. CARDOSO, L. S. **Estudo da estabilização química do tipo solo-emulsão em solo tropical laterítico granular utilizado em obras de pavimentação**. Monografia (Graduação em Engenharia Civil). Universidade Federal de Goiás – UFG, 2013.

GONDIM, L. M. **Estudo experimental de misturas solo-emulsão aplicado às rodovias do agropolo do baixo Jaguaribe – Estado do Ceará**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes). Universidade Federal do Ceará – UFC, Fortaleza, 2008.

GUIMARÃES, R. C. **Barragens com núcleo de concreto asfáltico – Análise do comportamento mecânico e hidráulico do núcleo**. Tese (Doutorado em Geotecnia). Universidade de Brasília – UNB, Brasília, 2012.

HEAD, K.H. **Manual of Soil Laboratory Testing. Permeability, Shear Strength and Compressibility Tests**. 2ª edition. Volume 2, editora: John Wiley & Sons, Newe York – Toronto, 1994.

- JACINTHO, E. C. **Estudos de propriedades e comportamentos de misturas solo-emulsão aplicado a barragens**. Tese (Doutorado em Geotecnia). Universidade de Brasília – UNB, Brasília, 2010.
- LIMA, C. K. M. **Obtenção de emulsões asfálticas modificadas utilizando resíduos industriais**. Tese (Doutorado em Engenharia Química). Universidade Federal do Rio Grande do Norte – UFRN, Natal, 2012.
- LIMA, F. C. **Estudo dos processos de compactação e dosagem de misturas entre solo arenoso e emulsão asfáltica**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil, área de concentração em Geotecnia). Universidade Federal do Ceará – UFC, Fortaleza, 2016.
- MARANGON, Márcio. **Tópicos em geotecnia e obras de terra**. Universidade Federal de Juiz de Fora – UFJF, Minas Gerais, 2004.
- MICHELUZZI, A. G. **Controle de qualidade de uma barragem de enrocamento com núcleo asfáltico caso UHE Jirau**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Geotécnica). Universidade Federal de Ouro Preto - UFOP, Minas Gerais, 2016.
- MOGROVEJO, D. R. L. **Avaliação das propriedades geotécnicas de um solo argiloso e outro arenoso com adição de fibras de papel kraft**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Geotécnica). Universidade Estadual de Campinas - Unicamp, Campinas, 2013.
- MOREIRA, A. R. P. **Método de execução de uma barragem**. Dissertação (Mestrado em Engenharia na Área de Estrutura). Instituto Superior de Engenharia de Lisboa – ISEL, Lisboa, 2012.
- MOREIRA, E. D. **Desempenho de dois trechos de solo emulsão em vias de baixo volume de tráfego**. Dissertação (Mestrado Profissional em Engenharia Geotécnica). Universidade Federal de Ouro Preto – UFOP, Ouro Preto, 2010.
- MORGENSTERN, N. R. PRICE, V. E. (1965). *The analysis of the stability of general slip surfaces*. Géotechnique, Vol 15(1), pp.79-93.
- PINTO, C. S. **Curso básico de mecânica dos solos em 16 aulas**. 3ª edição. São Paulo: Oficina de textos, 2006.
- REBELO, E. P. **Estudo de mistura solo-emulsão para a região de urucu (Coari-Am)**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Amazonas – UFAM, Manaus, 2009.
- SAMPAIO, M. G. **Comportamento mecânico e hídrico de solos estabilizados com emulsão asfáltica**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Estadual de Campinas - Unicamp, Campinas, 2008.
- SANT’ANA, W. C. **Contribuição ao estudo de solo-emulsão em pavimentos de rodovias de baixo volume de tráfego para o estado do Maranhão**. Tese (Doutorado em Engenharia). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

SANTIAGO, G. A. BOTARO, V. R. RIBEIRO, L. F. M. **Estabilização de um solo com fibras de sisal impermeabilizadas com EPS reciclado.** 9º Congresso Brasileiro de Polímeros, 2007.

SANTIAGO, G. A. **Estudo do comportamento mecânico de compósitos solo-fibras vegetais impermeabilizadas com solução de poliestireno expandido (EPS) e cimento asfáltico de petróleo (CAP).** Tese (Doutorado em Engenharia de Materiais). Universidade Federal de Ouro Preto – UFOP, Ouro Preto, 2011.

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

SILVA, C. C. **Comportamento de solos siltosos quando reforçados com fibras e melhorados com aditivos químicos e orgânicos.** Dissertação (Mestrado em Construção Civil – Programa de Pós-graduação em Construção Civil). Universidade Federal do Paraná - Curitiba, 2007.

SILVA, V. C. **Métodos analíticos para avaliar a contribuição de estacas para o fator de segurança de taludes.** Monografia (Graduação em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, Rio de Janeiro, 2013.

SILVA DOS SANTOS, A. P. CONSOLI, N. C. BAUDET, B. A. (2010). *The mechanics of fibre-reinforced sand.* Geotechnique 60, N° 10, 791-799.

SILVEIRA, M. V. **Análise do comportamento mecânico e da durabilidade em compósitos de areia reforçada com fibras naturais de curauá e sisal.** Tese (Departamento de Engenharia civil e Ambiental). Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro – PUC-Rio Rio de Janeiro, 2018.

SUAREZ, D. A. A. **Estudo do comportamento mecânico de dois solos lateríticos do estado de São Paulo com adição de emulsão asfáltica.** Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo – UFSCar, São Carlos, 2008, 144p.

U.S ARMY CORPS OF ENGINEERS (Estados Unidos). *Slope stability. Engineer Manual.* Washington, 2003.

APÊNDICE A – PLANILHAS DOS ENSAIOS DE PENEIRAMENTO DOS SOLOS

Tabela A.1 – Resultados do ensaio de peneiramento da amostra 1.

	Abertura da peneira (mm)	Porcentagem passante de solo (%)
PENEIRAMENTO GROSSO	50	100
	38	100
	25	100
	19	100
	9,5	100
	4,8	100
	2,00	98,68
PENEIRAMENTO FINO	1,2	96,17
	0,6	88,8
	0,42	82,4
	0,25	39,9
	0,15	18,8
	0,075	12,7
	Fundo	12

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela A.2 – Resultados do ensaio de peneiramento da amostra 2.

	Abertura da peneira (mm)	Porcentagem passante de solo (%)
PENEIRAMENTO GROSSO	50	100
	38	100
	25	100
	19	100
	9,5	100
	4,8	100
	2,00	99,76
PENEIRAMENTO FINO	1,2	98,4
	0,6	93,85
	0,42	88,8
	0,25	45,7
	0,15	23,7
	0,075	15,8
	Fundo	15,6

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela A.3 – Resultados do ensaio de peneiramento da amostra 3.

	Abertura da peneira (mm)	Porcentagem passante de solo (%)
PENEIRAMENTO GROSSO	50	100
	38	100
	25	100
	19	100
	9,5	100
	4,8	100
	2,00	99,6
	1,2	98,4
	0,6	93,6
	PENEIRAMENTO FINO	0,42
0,25		48,1
0,15		25,5
0,075		15,0
Fundo		14,9

Fonte: Elaborado pelo autor.

APÊNDICE B – TABELAS DOS DADOS PARA A OBTENÇÃO DA MASSA ESPECÍFICA DOS GRÃOS

Tabela B.1 – Dados do ensaio da determinação da massa específica dos grãos da amostra 1 do solo.

	Amostra 5	Amostra 12	Amostra 17
P1 (Picnômetro Vazio - seco e limpo) [g]	30,67	34,15	31,27
P2 (Picnômetro + Amostra seca) [g]	40,74	44,33	41,32
T1 (Temperatura do 1º Banho) [°C]	27,5	27,5	27,5
P3 (Picnômetro + Amostra + Água Dest.) [g]	88,14	91,32	87,66
T2 (Temperatura do 2º Banho) [°C]	27,5	27,5	27,5
P4 (Picnômetro + Água Dest.) [g]	81,89	84,99	81,41
Massa específica dos grãos	2,636	2,644	2,645
Massa específica dos grãos (média)		2,642	
k ₂₀ (obtido por interpolação linear)		0,99815	
Massa específica dos grãos Ajustada		2,64	
Diferença entre o maior e o menor		0,009	

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela B.2 – Dados do ensaio da determinação da massa específica dos grãos da amostra 2 do solo.

	Amostra 14	Amostra 22	Amostra 12
P1 (Picnômetro Vazio - seco e limpo) [g]	30,61	31,88	34,53
P2 (Picnômetro + Amostra seca) [g]	40,77	43,32	46,43
T1 (Temperatura do 1º Banho) [°C]	29,5	29,5	29,5
P3 (Picnômetro + Amostra + Água Dest.) [g]	87,29	90,1	92,56
T2 (Temperatura do 2º Banho) [°C]	29,5	29,5	29,5
P4 (Picnômetro + Água Dest.) [g]	80,96	82,87	85,15
Massa específica dos grãos	2,653	2,717	2,650
Massa específica dos grãos (media)		2,6515	
k ₂₀ (obtido por interpolação linear)		0,997550	
Massa específica dos grãos Ajustada		2,65	
Diferença entre o maior e o menor		0,067	

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela B.3 – Dados do ensaio da determinação da massa específica dos grãos da amostra 3 do solo.

	Amostra 5	Amostra 12	Amostra 17
P1 (Picnômetro Vazio - seco e limpo) [g]	31,97	34,2	31,2
P2 (Picnômetro + Amostra seca) [g]	43,91	46	43,21
T1 (Temperatura do 1º Banho) [°C]	28,5	28,5	28,5
P3 (Picnômetro + Amostra + Água Dest.) [g]	90,57	92,6	88,82
T2 (Temperatura do 2º Banho) [°C]	28,5	28,5	28,5
P4 (Picnômetro + Água Dest.) [g]	83,13	85,25	81,33
Densidade da Amostra	2,653	2,652	2,657
Densidade Real		2,6540	
k20 (obtido por interpolação linear)		0,997850	
Densidade Real Ajustada		2,65	
Diferença entre o maior e o menor		0,005	

Fonte: Elaborado pelo autor.

APÊNDICE C – PLANILHAS DOS DADOS DOS ENSAIOS DE COMPACTAÇÃO

Tabela C.1 – Dados para a obtenção dos teores de umidades na compactação Proctor Modificado.

Nº	massa caps. (g)	caps + solo úmido (g)	caps + solo seco (g)	solo seco (g)	Água (g)	umidade	média da Umidade
53	5,94	28,68	27,63	21,69	1,05	4,8%	4,9%
111	6,32	31,44	30,24	23,92	1,2	5,0%	
56	6,47	28,95	27,55	21,08	1,4	6,6%	6,5%
115	5,4	23,3	22,22	16,82	1,08	6,4%	
91	6,17	31,29	29,42	23,25	1,87	8,0%	8,1%
110	6,04	30,06	28,24	22,2	1,82	8,2%	
105	6,5	32,8	30,4	23,9	2,4	10,0%	10,1%
99	5,21	30,54	28,22	23,01	2,32	10,1%	
8	6,27	25,79	23,68	17,41	2,11	12,1%	12,0%
s13	5,24	27,21	24,86	19,62	2,35	12,0%	
s10	5,68	35,85	32,23	26,55	3,62	13,6%	13,7%
106	6,27	27,76	25,17	18,9	2,59	13,7%	

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela C.2 – Dados para a obtenção das massas específicas aparentes secas do solo na compactação Proctor Modificado.

Ensaio	Cilindro + solo (g)	solo (g)	massa esp. ap. (g/cm ³)	massa esp. ap. Seca (g/cm ³)
1	4074	1961	2,002	1,908
2	4128	2015	2,057	1,931
3	4200	2087	2,130	1,970
4	4203	2090	2,133	1,938
5	4148	2035	2,077	1,854
6	4080	1967	2,008	1,766
massa do cilindro (g):		2113		
volume do cilindro (cm ³):		979,73		

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela C.3 – Dados para a obtenção das curvas de saturação.

Umidade	Grau S = 100%	Grau S = 90%	Grau S = 80%	Grau S = 70%	Grau S = 60%
4%	2,40	2,37	2,34	2,30	2,25
5%	2,34	2,31	2,27	2,23	2,17
6%	2,29	2,25	2,21	2,16	2,09
7%	2,24	2,20	2,15	2,09	2,02
8%	2,19	2,14	2,09	2,03	1,96
9%	2,14	2,09	2,04	1,98	1,90
10%	2,09	2,05	1,99	1,92	1,84
11%	2,05	2,00	1,94	1,87	1,78
12%	2,01	1,96	1,90	1,82	1,73
13%	1,97	1,92	1,85	1,78	1,68
14%	1,93	1,88	1,81	1,73	1,64
15%	1,90	1,84	1,77	1,69	1,59

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela C.4 – Dados para a obtenção dos teores de umidades na compactação Proctor Normal.

Nº	massa caps.	caps +solo úmido (g)	caps +solo seco (g)	solo seco (g)	Água (g)	umidade	média da Umidade
53	5,94	38,34	36,8	30,86	1,54	5,0%	5,0%
111	6,3	39,99	38,4	32,1	1,59	5,0%	5,0%
56	6,46	35,53	33,65	27,19	1,88	6,9%	6,8%
115	5,41	24,78	23,56	18,15	1,22	6,7%	6,8%
91	6,16	30,75	28,8	22,64	1,95	8,6%	8,6%
110	6,04	32,35	30,25	24,21	2,1	8,7%	8,6%
105	6,56	31,1	28,81	22,25	2,29	10,3%	10,5%
99	5,22	30,26	27,85	22,63	2,41	10,6%	10,5%
8	6,26	35,46	32,28	26,02	3,18	12,2%	12,2%
s13	5,26	32,61	29,65	24,39	2,96	12,1%	12,2%
s10	5,67	42,17	37,69	32,02	4,48	14,0%	14,0%
106	6,27	37,31	33,48	27,21	3,83	14,1%	14,0%

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela C.5 – Dados para a obtenção das massas específicas aparentes secas do solo na compactação Proctor Normal.

Ensaio	Cilindro + solo (g)	solo (g)	massa esp. ap. (g/cm ³)	massa esp. ap. Seca (g/cm ³)
1	3992	1879	1,918	1,827
2	4045	1932	1,972	1,846
3	4090	1977	2,018	1,857
4	4115	2002	2,043	1,850
5	4116	2003	2,044	1,822
6	4055	1942	1,982	1,738
massa do cilindro (g):			2113	
volume do cilindro (cm ³):			979,73	

Fonte: Elaborado pelo autor.

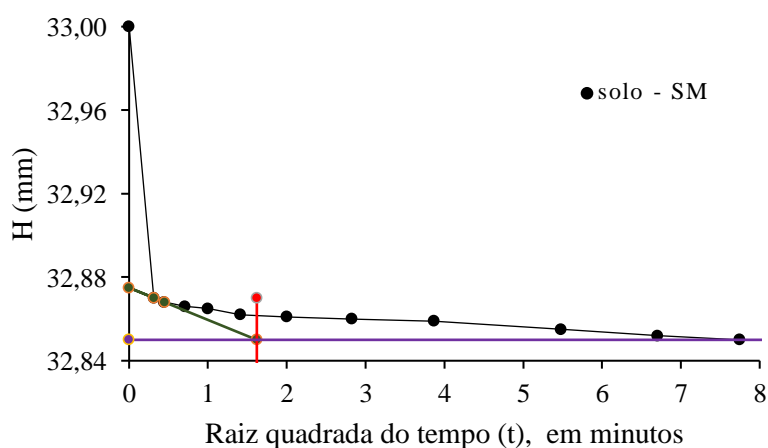
APÊNDICE D – PLANILHAS DE DADOS E AS FIGURAS QUE REPRESENTAM OS RESULTADOS DA FASE DE ADENSAMENTO DO ENSAIO DE CISALHAMENTO DIRETO

Tabela D.1 – Dados da fase de adensamento do solo tipo SM no ensaio de cisalhamento direto.

CARGA	50 kPa			INUNDAÇÃO		
Tempo	Raiz (t)	Leitura	ΔH (mm)	H (mm)	Δe	e
0	0,00	9,540	0,000	33,000	0,0000	0,3450
0,10	0,32	9,410	0,130	32,870	0,0053	0,3397
0,20	0,45	9,408	0,002	32,868	0,0001	0,3396
0,50	0,71	9,406	0,002	32,866	0,0001	0,3395
1	1,00	9,405	0,001	32,865	0,0000	0,3395
2	1,41	9,402	0,003	32,862	0,0001	0,3394
4	2,00	9,401	0,001	32,861	0,0000	0,3393
8	2,83	9,400	0,001	32,860	0,0000	0,3393
15	3,87	9,399	0,001	32,859	0,0000	0,3393
30	5,48	9,395	0,004	32,855	0,0002	0,3391
45	6,71	9,392	0,003	32,852	0,0001	0,3390
60	7,75	9,390	0,002	32,850	0,0001	0,3389
ΔH total (mm)			0,150			

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura D.1 – Curva da variação de altura (mm) em função da raiz quadrada do tempo em minutos da fase de adensamento do ensaio de cisalhamento direto para o solo do tipo SM, com a aplicação de tensão normal de 50 kPa, utilizado para a determinação da velocidade de ruptura.



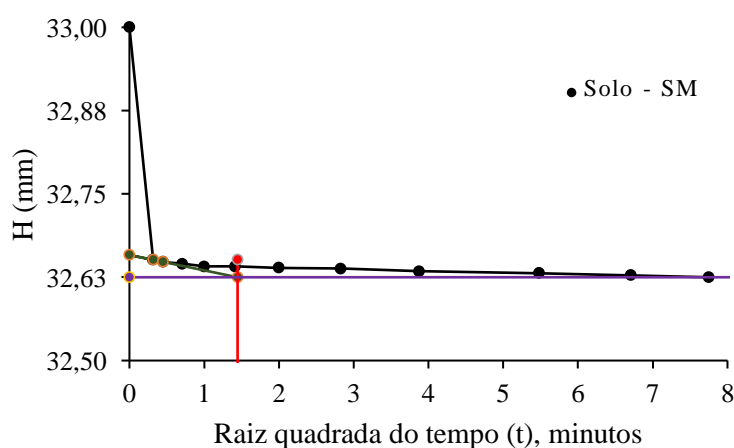
Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela D.2 – Dados da fase de adensamento do solo tipo SM no ensaio de cisalhamento direto.

CARGA	100 kPa			INUNDAÇÃO		
	Tempo	Raiz (t)	Leitura	ΔH (mm)	H (mm)	Δe
0	0,00	8,820	0,000	33,000	0,0000	0,3450
0,10	0,32	8,471	0,349	32,651	0,0142	0,3308
0,20	0,45	8,468	0,003	32,648	0,0001	0,3307
0,50	0,71	8,465	0,003	32,645	0,0001	0,3305
1	1,00	8,461	0,004	32,641	0,0002	0,3304
2	1,41	8,461	0,000	32,641	0,0000	0,3304
4	2,00	8,459	0,002	32,639	0,0001	0,3303
8	2,83	8,458	0,001	32,638	0,0000	0,3302
15	3,87	8,454	0,004	32,634	0,0002	0,3301
30	5,48	8,451	0,003	32,631	0,0001	0,3300
45	6,71	8,448	0,003	32,628	0,0001	0,3298
60	7,75	8,445	0,003	32,625	0,0001	0,3297
ΔH total (mm)			0,375			

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura D.2 – Curva da variação de altura (mm) em função da raiz quadrada do tempo em minutos da fase de adensamento do ensaio de cisalhamento direto para o solo do tipo SM, com a aplicação de tensão normal de 100 kPa, utilizado para a determinação da velocidade de ruptura.



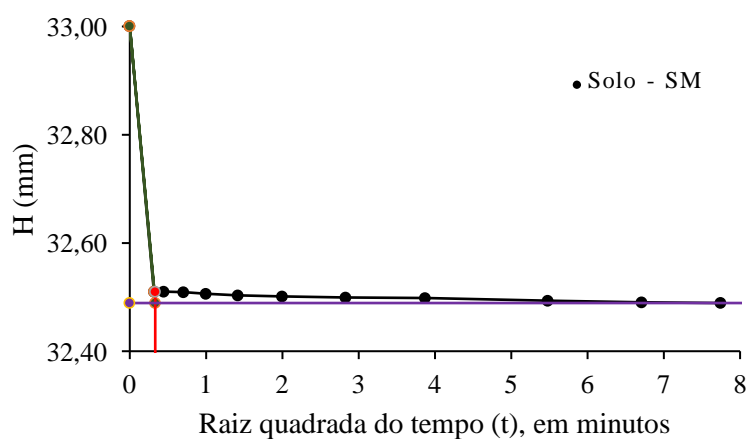
Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela D.3 – Dados da fase de adensamento do solo tipo SM no ensaio de cisalhamento direto.

CARGA	200 kPa			INUNDAÇÃO		
Tempo	Raiz (t)	Leitura	ΔH (mm)	H (mm)	Δe	e
0	0,00	6,250	0,000	33,000	0,0000	0,3450
0,10	0,32	5,760	0,490	32,510	0,0200	0,3250
0,20	0,45	5,760	0,000	32,510	0,0000	0,3250
0,50	0,71	5,759	0,001	32,509	0,0000	0,3250
1	1,00	5,756	0,003	32,506	0,0001	0,3249
2	1,41	5,753	0,003	32,503	0,0001	0,3247
4	2,00	5,751	0,002	32,501	0,0001	0,3247
8	2,83	5,749	0,002	32,499	0,0001	0,3246
15	3,87	5,748	0,001	32,498	0,0000	0,3245
30	5,48	5,743	0,005	32,493	0,0002	0,3243
45	6,71	5,740	0,003	32,490	0,0001	0,3242
60	7,75	5,739	0,001	32,489	0,0000	0,3242
ΔH total (mm)			0,511			

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura D.3 – Curva da variação de altura (mm) em função da raiz quadrada do tempo em minutos da fase de adensamento do ensaio de cisalhamento direto para o solo do tipo SM, com a aplicação de tensão normal de 200 kPa, utilizado para a determinação da velocidade de ruptura.



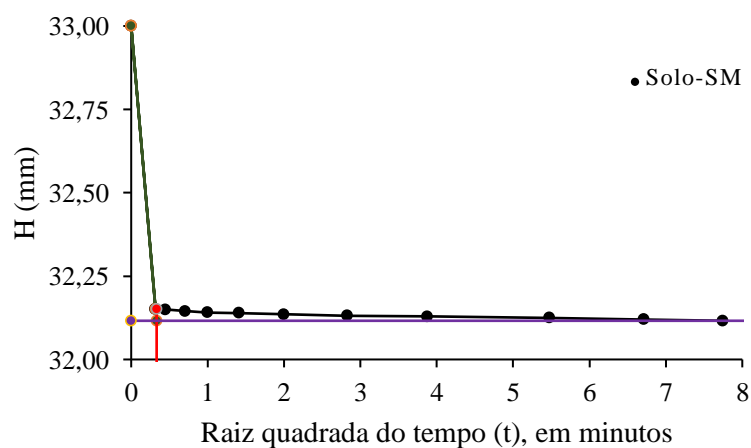
Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela D.4 – Dados da fase de adensamento do solo tipo SM no ensaio de cisalhamento direto.

CARGA	400 kPa			INUNDAÇÃO		
Tempo	Raiz (t)	Leitura	ΔH (mm)	H (mm)	Δe	e
0	0,00	6,300	0,000	33,000	0,0000	0,3450
0,10	0,32	5,451	0,849	32,151	0,0346	0,3104
0,20	0,45	5,450	0,001	32,150	0,0000	0,3104
0,50	0,71	5,445	0,005	32,145	0,0002	0,3102
1	1,00	5,441	0,004	32,141	0,0002	0,3100
2	1,41	5,439	0,002	32,139	0,0001	0,3099
4	2,00	5,435	0,004	32,135	0,0002	0,3097
8	2,83	5,431	0,004	32,131	0,0002	0,3096
15	3,87	5,429	0,002	32,129	0,0001	0,3095
30	5,48	5,425	0,004	32,125	0,0002	0,3093
45	6,71	5,420	0,005	32,120	0,0002	0,3091
60	7,75	5,416	0,004	32,116	0,0002	0,3090
ΔH total (mm)			0,884			

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura D.4 – Curva da variação de altura (mm) em função da raiz quadrada do tempo em minutos da fase de adensamento do ensaio de cisalhamento direto para o solo do tipo SM, com a aplicação de tensão normal de 400 kPa, utilizado para a determinação da velocidade de ruptura.



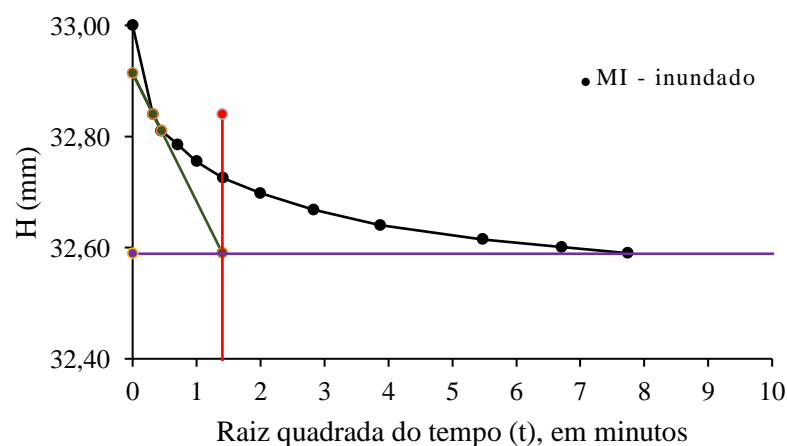
Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela D.5 – Dados da fase de adensamento da mistura entre solo e elevados teores de emulsão asfáltica do ensaio de cisalhamento direto com o uso da metodologia Marshall imediato com inundação e aplicação de carga de 50 kPa.

CARGA	50 kPa			INUNDAÇÃO		
	Tempo	Raiz (t)	Leitura	ΔH (mm)	H (mm)	Δe
0	0,00	8,760	0,000	33,000	0,000	0,1250
0,10	0,32	8,600	0,160	32,840	0,005	0,1195
0,20	0,45	8,570	0,030	32,810	0,001	0,1185
0,50	0,71	8,545	0,025	32,785	0,001	0,1177
1	1,00	8,515	0,030	32,755	0,001	0,1166
2	1,41	8,485	0,030	32,725	0,001	0,1156
4	2,00	8,458	0,027	32,698	0,001	0,1147
8	2,83	8,428	0,030	32,668	0,001	0,1137
15	3,87	8,400	0,028	32,640	0,001	0,1127
30	5,48	8,375	0,025	32,615	0,001	0,1119
45	6,71	8,361	0,014	32,601	0,000	0,1114
60	7,75	8,350	0,011	32,590	0,000	0,1110
ΔH total (mm)			0,410			

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura D.5 – Curva da variação de altura (mm) em função da raiz quadrada do tempo em minutos da fase de adensamento da mistura entre solo e elevados teores de emulsão asfáltica do ensaio de cisalhamento direto com o uso da metodologia Marshall imediato com inundação para carga de 50 kPa.



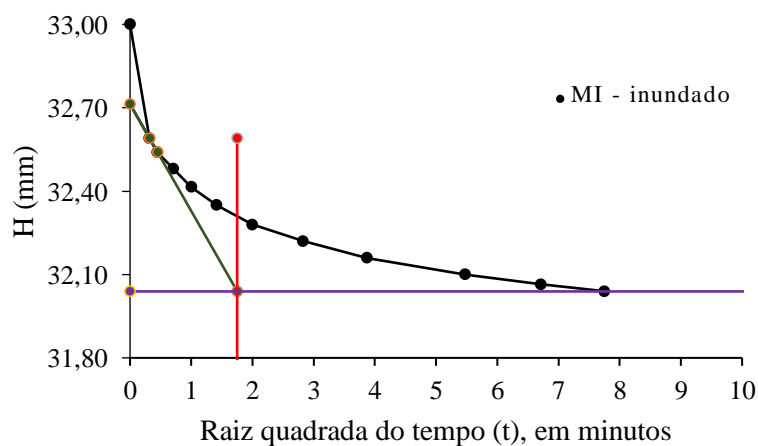
Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela D.6 – Dados da fase de adensamento da mistura entre solo e elevados teores de emulsão asfáltica do ensaio de cisalhamento direto com o uso da metodologia Marshall imediato com inundação e aplicação de carga de 100 kPa.

CARGA	100 kPa			INUNDAÇÃO		
	Tempo	Raiz (t)	Leitura	ΔH (mm)	H (mm)	Δe
0	0,00	11,000	0,000	33,000	0,000	0,1250
0,10	0,32	10,590	0,410	32,590	0,014	0,1110
0,20	0,45	10,540	0,050	32,540	0,002	0,1093
0,50	0,71	10,480	0,060	32,480	0,002	0,1073
1	1,00	10,415	0,065	32,415	0,002	0,1051
2	1,41	10,350	0,065	32,350	0,002	0,1028
4	2,00	10,280	0,070	32,280	0,002	0,1005
8	2,83	10,220	0,060	32,220	0,002	0,0984
15	3,87	10,160	0,060	32,160	0,002	0,0964
30	5,48	10,100	0,060	32,100	0,002	0,0943
45	6,71	10,065	0,035	32,065	0,001	0,0931
60	7,75	10,040	0,025	32,040	0,001	0,0923
ΔH total (mm)			0,960			

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura D.6 – Curva da variação de altura (mm) em função da raiz quadrada do tempo em minutos da fase de adensamento da mistura entre solo e elevados teores de emulsão asfáltica do ensaio de cisalhamento direto com o uso da metodologia Marshall imediato com inundação para carga de 100 kPa.



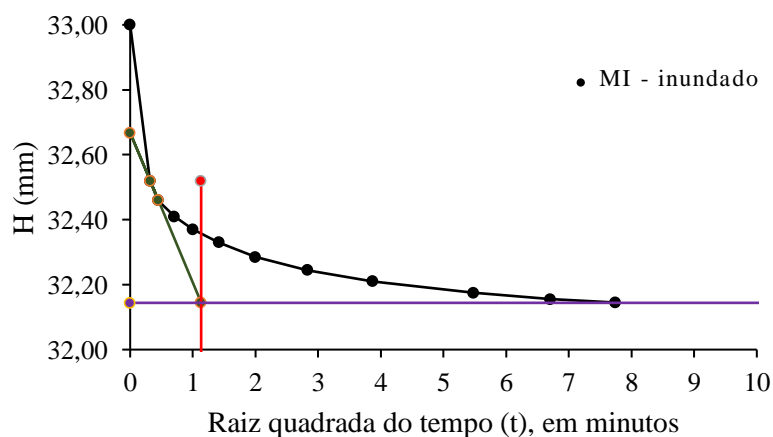
Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela D.7 – Dados da fase de adensamento da mistura entre solo e elevados teores de emulsão asfáltica do ensaio de cisalhamento direto com o uso da metodologia Marshall imediato com inundação aplicação de carga de 200 kPa.

CARGA	200 kPa			INUNDAÇÃO		
Tempo	Raiz (t)	Leitura	ΔH (mm)	H (mm)	Δe	e
0	0,00	7,250	0,000	33,000	0,000	0,1250
0,10	0,32	6,770	0,480	32,520	0,016	0,1086
0,20	0,45	6,710	0,060	32,460	0,002	0,1066
0,50	0,71	6,660	0,050	32,410	0,002	0,1049
1	1,00	6,620	0,040	32,370	0,001	0,1035
2	1,41	6,580	0,040	32,330	0,001	0,1022
4	2,00	6,535	0,045	32,285	0,002	0,1006
8	2,83	6,495	0,040	32,245	0,001	0,0993
15	3,87	6,460	0,035	32,210	0,001	0,0981
30	5,48	6,425	0,035	32,175	0,001	0,0969
45	6,71	6,405	0,020	32,155	0,001	0,0962
60	7,75	6,395	0,010	32,145	0,000	0,0959
ΔH total (mm)			0,855			

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura D.7 – Curva da variação de altura (mm) em função da raiz quadrada do tempo em minutos da fase de adensamento da mistura entre solo e elevados teores de emulsão asfáltica do ensaio de cisalhamento direto com o uso da metodologia Marshall imediato com inundação para carga de 200 kPa.



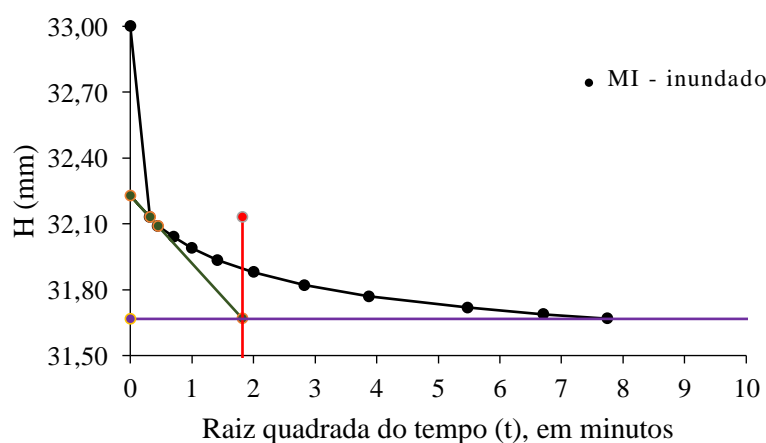
Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela D.8 – Dados da fase de adensamento da mistura entre solo e elevados teores de emulsão asfáltica do ensaio de cisalhamento direto com o uso da metodologia Marshall imediato com inundação aplicação de carga de 400 kPa.

CARGA	400 kPa			INUNDAÇÃO		
Tempo	Raiz (t)	Leitura	ΔH (mm)	H (mm)	Δe	e
0	0,00	10,890	0,000	33,000	0,000	0,1250
0,10	0,32	10,020	0,870	32,130	0,030	0,0953
0,20	0,45	9,980	0,040	32,090	0,001	0,0940
0,50	0,71	9,930	0,050	32,040	0,002	0,0923
1	1,00	9,880	0,050	31,990	0,002	0,0906
2	1,41	9,825	0,055	31,935	0,002	0,0887
4	2,00	9,770	0,055	31,880	0,002	0,0868
8	2,83	9,710	0,060	31,820	0,002	0,0848
15	3,87	9,660	0,050	31,770	0,002	0,0831
30	5,48	9,609	0,051	31,719	0,002	0,0813
45	6,71	9,578	0,031	31,688	0,001	0,0803
60	7,75	9,558	0,020	31,668	0,001	0,0796
ΔH total (mm)			1,332			

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura D.8 – Curva da variação de altura (mm) em função da raiz quadrada do tempo em minutos da fase de adensamento da mistura entre solo e elevados teores de emulsão asfáltica do ensaio de cisalhamento direto com o uso da metodologia Marshall imediato com inundação para carga de 400 kPa.



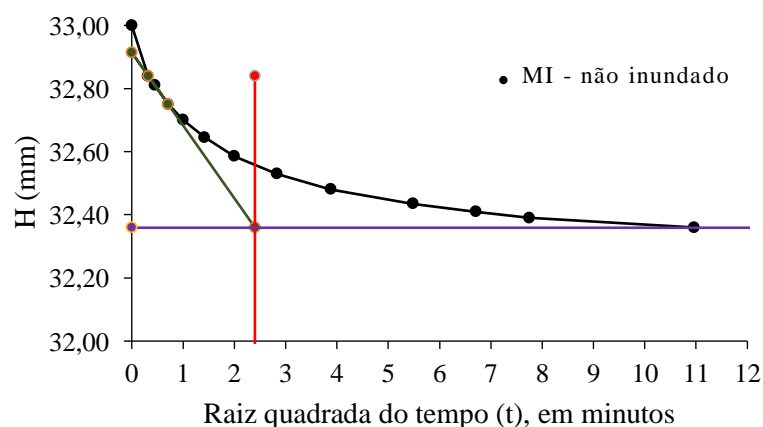
Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela D.9 – Dados da fase de adensamento da mistura entre solo e elevados teores de emulsão asfáltica do ensaio de cisalhamento direto com o uso da metodologia Marshall imediato sem inundação aplicação de carga de 50 kPa.

CARGA	50 kPa			SEM INUNDAÇÃO		
Tempo	Raiz (t)	Leitura	ΔH (mm)	H (mm)	Δe	e
0	0,00	2,700	0,000	33,000	0,000	0,1250
0,10	0,32	2,540	0,160	32,840	0,005	0,1195
0,20	0,45	2,510	0,030	32,810	0,001	0,1185
0,50	0,71	2,450	0,060	32,750	0,002	0,1165
1	1,00	2,400	0,050	32,700	0,002	0,1148
2	1,41	2,345	0,055	32,645	0,002	0,1129
4	2,00	2,285	0,060	32,585	0,002	0,1109
8	2,83	2,230	0,055	32,530	0,002	0,1090
15	3,87	2,181	0,049	32,481	0,002	0,1073
30	5,48	2,135	0,046	32,435	0,002	0,1057
45	6,71	2,110	0,025	32,410	0,001	0,1049
60	7,75	2,090	0,020	32,390	0,001	0,1042
120	10,95	2,060	0,030	32,360	0,001	0,1032
ΔH total (mm)			0,640			

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura D.9 – Curva da variação de altura (mm) em função da raiz quadrada do tempo em minutos da fase de adensamento da mistura entre solo e elevados teores de emulsão asfáltica do ensaio de cisalhamento direto com o uso da metodologia Marshall imediato sem inundação para carga de 50 kPa.



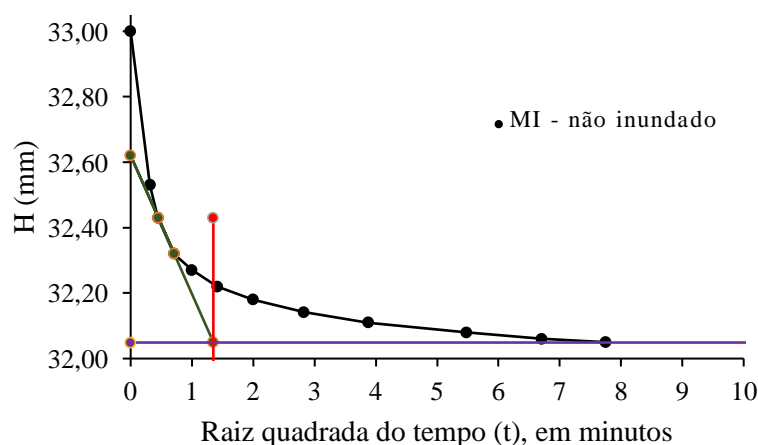
Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela D.10 – Dados da fase de adensamento da mistura entre solo e elevados teores de emulsão asfáltica do ensaio de cisalhamento direto com o uso da metodologia Marshall imediato sem inundação aplicação de carga de 100 kPa.

CARGA	100 kPa			SEM INUNDAÇÃO		
	Tempo	Raiz (t)	Leitura	ΔH (mm)	H (mm)	Δe
0	0,00	7,570	0,000	33,000	0,000	0,1250
0,10	0,32	7,100	0,470	32,530	0,016	0,1090
0,20	0,45	7,000	0,100	32,430	0,003	0,1056
0,50	0,71	6,890	0,110	32,320	0,004	0,1018
1	1,00	6,840	0,050	32,270	0,002	0,1001
2	1,41	6,790	0,050	32,220	0,002	0,0984
4	2,00	6,750	0,040	32,180	0,001	0,0970
8	2,83	6,712	0,038	32,142	0,001	0,0958
15	3,87	6,680	0,032	32,110	0,001	0,0947
30	5,48	6,650	0,030	32,080	0,001	0,0936
45	6,71	6,630	0,020	32,060	0,001	0,0930
60	7,75	6,620	0,010	32,050	0,000	0,0926
ΔH total (mm)			0,950			

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura D.10 – Curva da variação de altura (mm) em função da raiz quadrada do tempo em minutos da fase de adensamento da mistura entre solo e elevados teores de emulsão asfáltica do ensaio de cisalhamento direto com o uso da metodologia Marshall imediato sem inundação para carga de 100 kPa.



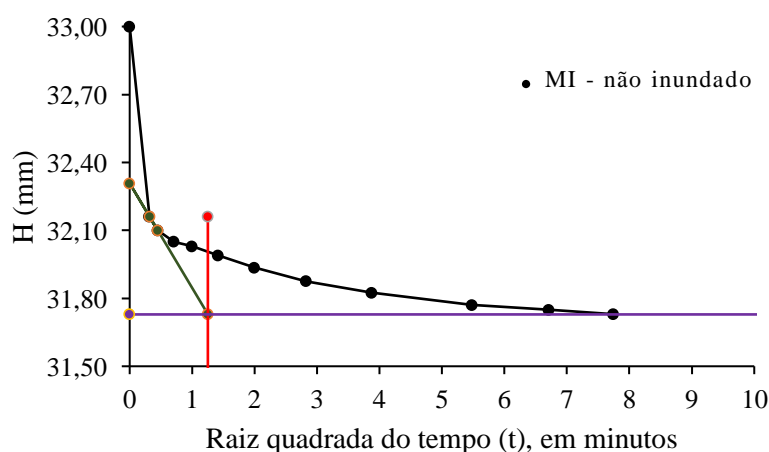
Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela D.11 – Dados da fase de adensamento da mistura entre solo e elevados teores de emulsão asfáltica do ensaio de cisalhamento direto com o uso da metodologia Marshall imediato sem inundação aplicação de carga de 200 kPa.

CARGA	200 kPa			SEM INUNDAÇÃO		
Tempo	Raiz (t)	Leitura	ΔH (mm)	H (mm)	Δe	e
0	0,00	10,200	0,000	33,000	0,000	0,1250
0,10	0,32	9,360	0,840	32,160	0,029	0,0964
0,20	0,45	9,300	0,060	32,100	0,002	0,0943
0,50	0,71	9,250	0,050	32,050	0,002	0,0926
1	1,00	9,230	0,020	32,030	0,001	0,0919
2	1,41	9,190	0,040	31,990	0,001	0,0906
4	2,00	9,135	0,055	31,935	0,002	0,0887
8	2,83	9,075	0,060	31,875	0,002	0,0866
15	3,87	9,025	0,050	31,825	0,002	0,0849
30	5,48	8,970	0,055	31,770	0,002	0,0831
45	6,71	8,949	0,021	31,749	0,001	0,0824
60	7,75	8,930	0,019	31,730	0,001	0,0817
ΔH total (mm)			1,270			

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura D.11 – Curva da variação de altura (mm) em função da raiz quadrada do tempo em minutos da fase de adensamento da mistura entre solo e elevados teores de emulsão asfáltica do ensaio de cisalhamento direto com o uso da metodologia Marshall imediato sem inundação para carga de 200 kPa.



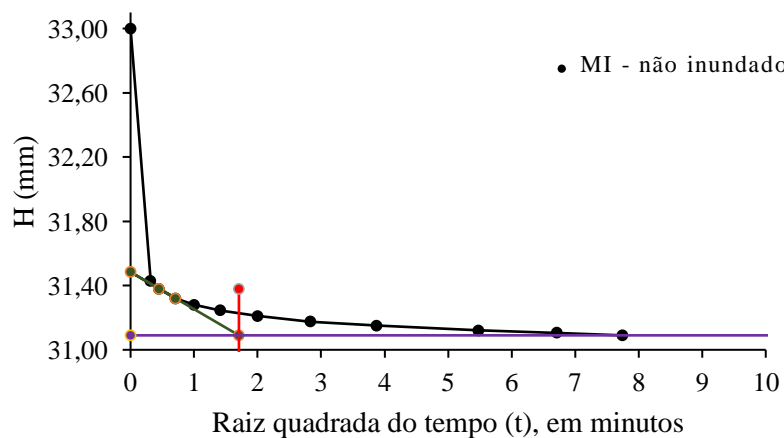
Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela D.12 – Dados da fase de adensamento da mistura entre solo e elevados teores de emulsão asfáltica do ensaio de cisalhamento direto com o uso da metodologia Marshall imediato sem inundação, com aplicação de carga de 400 kPa.

CARGA	400 kPa			SEM INUNDAÇÃO			
	Tempo	Raiz (t)	Leitura	ΔH (mm)	H (mm)	Δe	e
	0	0,00	10,670	0,000	33,000	0,000	0,1250
	0,10	0,32	9,100	1,570	31,430	0,054	0,0715
	0,20	0,45	9,050	0,050	31,380	0,002	0,0698
	0,50	0,71	8,990	0,060	31,320	0,002	0,0677
	1	1,00	8,950	0,040	31,280	0,001	0,0664
	2	1,41	8,915	0,035	31,245	0,001	0,0652
	4	2,00	8,880	0,035	31,210	0,001	0,0640
	8	2,83	8,845	0,035	31,175	0,001	0,0628
	15	3,87	8,820	0,025	31,150	0,001	0,0619
	30	5,48	8,790	0,030	31,120	0,001	0,0609
	45	6,71	8,775	0,015	31,105	0,001	0,0604
	60	7,75	8,760	0,015	31,090	0,001	0,0599
ΔH total (mm)				1,910			

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura D.12 – Curva da variação de altura (mm) em função da raiz quadrada do tempo em minutos da fase de adensamento da mistura entre solo e elevados teores de emulsão asfáltica do ensaio de cisalhamento direto com o uso da metodologia Marshall imediato sem inundação para carga de 400 kPa.



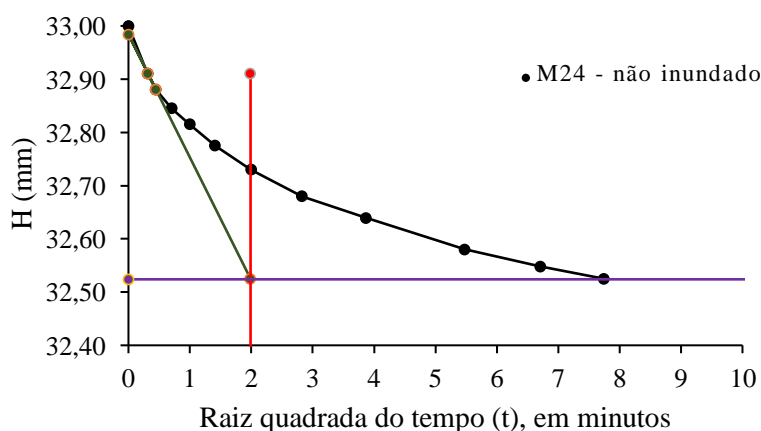
Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela D.13 – Dados da fase de adensamento da mistura entre solo e elevados teores de emulsão asfáltica do ensaio de cisalhamento direto com o uso da metodologia Marshall 24 horas sem inundação aplicação de carga de 50 kPa.

CARGA	50 kPa			SEM INUNDAÇÃO			
	Tempo	Raiz (t)	Leitura	ΔH (mm)	H (mm)	Δe	e
	0	0,00	9,780	0,000	33,000	0,000	0,1217
	0,10	0,32	9,690	0,090	32,910	0,003	0,1186
	0,20	0,45	9,660	0,030	32,880	0,001	0,1176
	0,50	0,71	9,625	0,035	32,845	0,001	0,1164
	1	1,00	9,595	0,030	32,815	0,001	0,1154
	2	1,41	9,555	0,040	32,775	0,001	0,1141
	4	2,00	9,510	0,045	32,730	0,002	0,1125
	8	2,83	9,460	0,050	32,680	0,002	0,1108
	15	3,87	9,419	0,041	32,639	0,001	0,1094
	30	5,48	9,360	0,059	32,580	0,002	0,1074
	45	6,71	9,328	0,032	32,548	0,001	0,1063
	60	7,75	9,305	0,023	32,525	0,001	0,1056
ΔH total (mm)				0,475			

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura D.13 – Curva da variação de altura (mm) em função da raiz quadrada do tempo em minutos da fase de adensamento da mistura entre solo e elevados teores de emulsão asfáltica do ensaio de cisalhamento direto com o uso da metodologia Marshall 24 horas sem inundação para carga de 50 kPa.



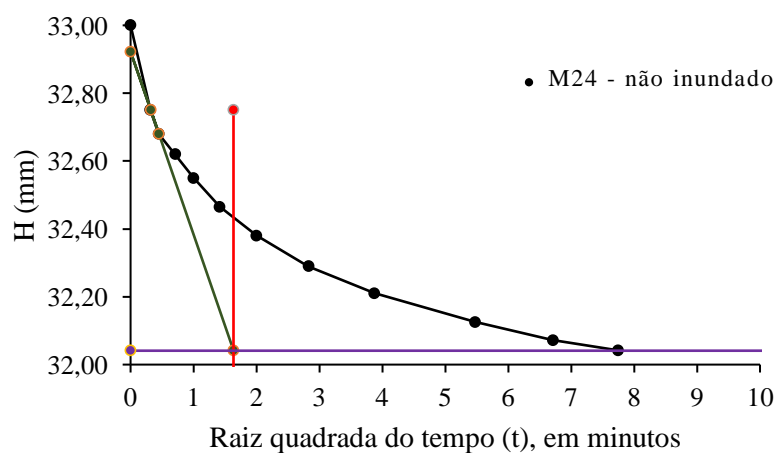
Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela D.14 – Curva da variação de altura (mm) em função da raiz quadrada do tempo em minutos da fase de adensamento da mistura entre solo e elevados teores de emulsão asfáltica do ensaio de cisalhamento direto com o uso da metodologia Marshall 24 horas sem inundação aplicação de carga de 100 kPa.

CARGA	100 kPa			SEM INUNDAÇÃO		
Tempo	Raiz (t)	Leitura	ΔH (mm)	H (mm)	Δe	e
0	0,00	9,500	0,000	33,000	0,000	0,1217
0,10	0,32	9,250	0,250	32,750	0,008	0,1132
0,20	0,45	9,180	0,070	32,680	0,002	0,1108
0,50	0,71	9,120	0,060	32,620	0,002	0,1088
1	1,00	9,050	0,070	32,550	0,002	0,1064
2	1,41	8,965	0,085	32,465	0,003	0,1035
4	2,00	8,880	0,085	32,380	0,003	0,1006
8	2,83	8,790	0,090	32,290	0,003	0,0976
15	3,87	8,710	0,080	32,210	0,003	0,0948
30	5,48	8,625	0,085	32,125	0,003	0,0920
45	6,71	8,572	0,053	32,072	0,002	0,0901
60	7,75	8,542	0,030	32,042	0,001	0,0891
ΔH total (mm)			0,958			

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura D.14 – Curva da variação de altura (mm) em função da raiz quadrada do tempo em minutos da fase de adensamento da mistura entre solo e elevados teores de emulsão asfáltica do ensaio de cisalhamento direto com o uso da metodologia Marshall 24 horas sem inundação para carga de 100 kPa.



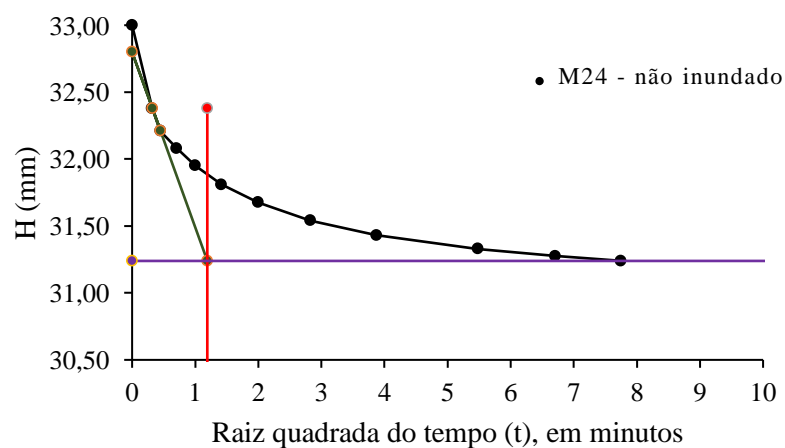
Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela D.15 – Dados da fase de adensamento da mistura entre solo e elevados teores de emulsão asfáltica do ensaio de cisalhamento direto com o uso da metodologia Marshall 24 horas sem inundação aplicação de carga de 200 kPa.

CARGA	200 kPa			SEM INUNDAÇÃO			
	Tempo	Raiz (t)	Leitura	ΔH (mm)	H (mm)	Δe	e
	0	0,00	9,990	0,000	33,000	0,000	0,1217
	0,10	0,32	9,370	0,620	32,380	0,021	0,1006
	0,20	0,45	9,200	0,170	32,210	0,006	0,0948
	0,50	0,71	9,070	0,130	32,080	0,004	0,0904
	1	1,00	8,940	0,130	31,950	0,004	0,0860
	2	1,41	8,800	0,140	31,810	0,005	0,0812
	4	2,00	8,665	0,135	31,675	0,005	0,0767
	8	2,83	8,530	0,135	31,540	0,005	0,0721
	15	3,87	8,420	0,110	31,430	0,004	0,0683
	30	5,48	8,320	0,100	31,330	0,003	0,0649
	45	6,71	8,265	0,055	31,275	0,002	0,0631
	60	7,75	8,230	0,035	31,240	0,001	0,0619
ΔH total (mm)				1,725			

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura D.15 – Curva da variação de altura (mm) em função da raiz quadrada do tempo em minutos da fase de adensamento da mistura entre solo e elevados teores de emulsão asfáltica do ensaio de cisalhamento direto com o uso da metodologia Marshall 24 horas sem inundação para carga de 200 kPa.



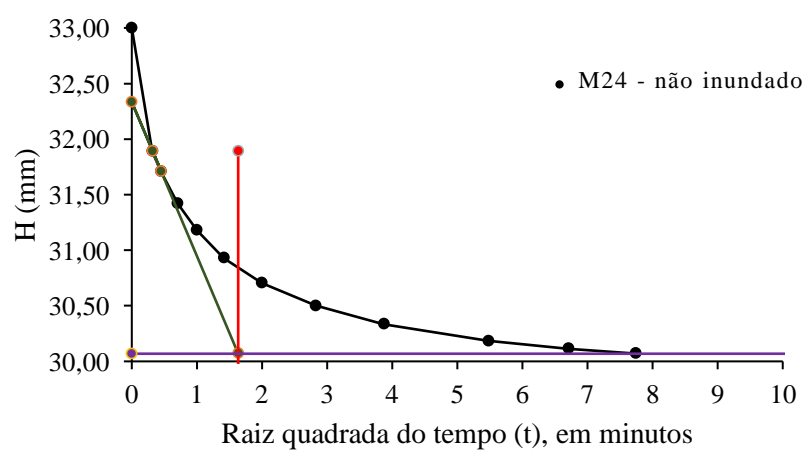
Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela D.16 – Dados da fase de adensamento da mistura entre solo e elevados teores de emulsão asfáltica do ensaio de cisalhamento direto com o uso da metodologia Marshall 24 horas sem inundação, com aplicação de carga de 400 kPa.

CARGA	400 kPa			SEM INUNDAÇÃO		
Tempo	Raiz (t)	Leitura	ΔH (mm)	H (mm)	Δe	e
0	0,00	10,730	0,000	33,000	0,000	0,1217
0,10	0,32	9,620	1,110	31,890	0,038	0,0840
0,20	0,45	9,440	0,180	31,710	0,006	0,0778
0,50	0,71	9,150	0,290	31,420	0,010	0,0680
1	1,00	8,910	0,240	31,180	0,008	0,0598
2	1,41	8,660	0,250	30,930	0,008	0,0513
4	2,00	8,435	0,225	30,705	0,008	0,0437
8	2,83	8,230	0,205	30,500	0,007	0,0367
15	3,87	8,065	0,165	30,335	0,006	0,0311
30	5,48	7,915	0,150	30,185	0,005	0,0260
45	6,71	7,845	0,070	30,115	0,002	0,0236
60	7,75	7,800	0,045	30,070	0,002	0,0221
ΔH total (mm)			2,930			

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura D.16 – Curva da variação de altura (mm) em função da raiz quadrada do tempo em minutos da fase de adensamento da mistura entre solo e elevados teores de emulsão asfáltica do ensaio de cisalhamento direto com o uso da metodologia Marshall 24 horas sem inundação para carga de 400 kPa.



Fonte: Elaborado pelo autor.