



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

**NATÁLIA JÉSSICA CANUTO OLIVEIRA BRITO**

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DO TEMPO DE CURA NO COMPORTAMENTO  
MECÂNICO DAS MISTURAS ENTRE SOLOS E ALTOS TEORES DE EMULSÃO  
ASFÁLTICA**

**FORTALEZA**

**2020**

**NATÁLIA JÉSSICA CANUTO OLIVEIRA BRITO**

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DO TEMPO DE CURA NO COMPORTAMENTO  
MECÂNICO DAS MISTURAS ENTRE SOLOS E ALTOS TEORES DE EMULSÃO  
ASFÁLTICA**

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**

**2020**

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)

---

B876e Brito, Natália Jéssica Canuto Oliveira.

Estudo da influência do tempo de cura no comportamento mecânico das misturas entre solos e altos teores de emulsão asfáltica / Natália Jéssica Canuto Oliveira Brito. – 2020.  
112 f. : il. color.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Geotecnia, Fortaleza, 2020.  
Orientação: Prof. Dr. Silvrano Adonias Dantas Neto.

1. Cura. 2. Solo-emulsão. 3. Resistência ao cisalhamento. 4. Resistência à compressão simples. I. Título.  
CDD 624.15

---

NATÁLIA JÉSSICA CANUTO OLIVEIRA BRITO

ESTUDO DA INFLUÊNCIA DO TEMPO DE CURA NO COMPORTAMENTO  
MECÂNICO DAS MISTURAS ENTRE SOLOS E ALTOS TEORES DE EMULSÃO  
ASFÁLTICA

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: 15/12/2020.

BANCA EXAMINADORA

---

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

---

Prof. Dr. Anderson Borghetti Soares (Examinador Interno)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

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

Aos meus pais,

Francisca Elizabete Canuto Oliveira Brito e  
Arimat ea Francisco de Brito, que nunca pouparam  
esforços para eu realizar meus sonhos.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por ter colocado as pessoas certas no meu caminho durante minha vida e por me dar forças para continuar.

À minha família, aos meus pais Elizabete e Arimatéa que nunca mediram esforços para que eu chegasse aonde eu cheguei e para que eu realizasse todos os meus sonhos. À minha irmã Letícia, que me ensina todos os dias a ser uma pessoa compromissada e que corre atrás dos seus objetivos. Neste período longe de casa eu entendi a importância e a falta que a família faz na nossa vida e o quanto eu os amo.

Ao meu Orientador, Professor Silvrano, por me orientar, ensinar e conduzir, e pela paciência e pela oportunidade de realizar este trabalho que me mostrou que nada na vida vem de forma fácil e que me fez amadurecer tanto pessoalmente como profissionalmente.

Aos professores participantes da banca examinadora Dra. Michéle Dal Toé Casagrande e Prof. Dr. Anderson Borghetti Soares pelas valiosas contribuições e sugestões para a pesquisa.

À minha tia Valnice, por ter sido uma segunda mãe e um porto seguro durante meu tempo em Fortaleza e aos meus outros familiares.

À minha querida amiga, Maryna, que sempre esteve do meu lado durante todo esse processo e que eu sempre serei grata por ser minha amiga/irmã. E a tia Inês, que é minha mãe postiça, e que foi muito importante durante todo meu crescimento.

À minha querida amiga, Renally, por ter sido um porto seguro durante a minha morada em Fortaleza e por ter me ensinado tanto.

À Yôkissya por colocar a minha cabeça no lugar quando tudo parecia estar um caos, por me fazer acreditar que quando a gente quer muito uma coisa o universo trabalha a nosso favor e por muito mais.

As minhas companheiras de apartamento Andrelane, Denise, Laysa, Ju e Cassinha, por terem sido minha família do coração durante meu período em Fortaleza.

Ao meu amigo Lucas, por ter sido meu marido fake e a pessoa em que eu descontava meu estresse.

Aos meus amigos de Roraima: Jéssica, Vitor, Rapha, Andréia, Nelinha, Luis Henrique, Uriel, Marcelo, por acreditarem no meu potencial mais do que eu mesma e pela amizade construída durante todos esses anos.

À professora Mariana, por ter causado o meu amor pela geotecnia e por ter me ajudado de diversas formas durante a minha vida acadêmica.

Aos meus colegas da turma do mestrado Cintia, Joyce e Marlon pelo companheirismo e amizade.

À empresa Asfalto Nordeste, pela doação da emulsão asfáltica utilizada na pesquisa e ao CNPq pela bolsa de estudos que possibilitou a minha total dedicação e desenvolvimento da pesquisa para que assim fosse possível alcançar os objetivos traçados.

Aos colegas do Laboratório de Mecânica dos Solos da UFC, Fabiola, Rosiel, Amanda, Anselmo, Francisco (Ciroca), seu Roberto, Dona Ana, pelo apoio, incentivo e disponibilização dos equipamentos laboratoriais para execução dos ensaios.

À minha bolsista e companheira de pesquisa, Jannyne, por toda paciência comido mesmo quando eu estava no meu ápice de estresse.

E finalmente, agradeço a quem direta, ou indiretamente contribuiu para eu caminhar da forma mais correta possível e conseqüentemente a conquistar meus sonhos.

.

“Quando você quer alguma coisa, todo o universo conspira para que você realize seu desejo. ”

Paulo Coelho

## RESUMO

O uso de misturas asfálticas como agente estabilizador de solos é uma alternativa que pode ser utilizada em inúmeras obras de geotecnia. O objetivo desta pesquisa foi estudar os efeitos da cura e tempo de aeração de misturas entre solo e elevados teores de emulsão asfáltica sobre o comportamento mecânico destas. A metodologia adotada consistiu na coleta e caracterização de solo arenoso e da emulsão asfáltica, mistura e compactação dos materiais com teores diferentes de emulsão, exposição dos corpos de prova ao ar livre (para que a cura ocorresse), realização de ensaios de compressão simples do solo compactado e das misturas solo-emulsão para diferentes tempos de cura, bem como de ensaio de compressão triaxial, para os teores ótimos de emulsão asfáltica. Este foi feito com e sem saturação dos corpos de prova, com e sem tempo de aeração, e para diferentes tempos de cura das misturas (1, 7 e 28 dias). Os resultados mostraram que, para as misturas solo-emulsão ensaiadas, o aumento do tempo de cura causou a diminuição gradual da massa específica aparente dos corpos de prova, em decorrência da diminuição do teor de umidade devido à ruptura da emulsão. Nos ensaios de compressão simples, notou-se que as misturas solo-emulsão apresentaram resistências bastante superiores às do solo compactado. Ademais, quanto maior o tempo de cura das misturas, maior a resistência à compressão. Para os ensaios de compressão triaxial, foi possível observar que a adição dos teores mais altos de emulsão asfáltica ao solo arenoso aumentou o valor do intercepto coesivo, ao mesmo tempo em que diminuiu consideravelmente seu ângulo de atrito. Em condições saturadas, o tempo de cura não interferiu significativamente na resistência ao cisalhamento e na rigidez das misturas. No entanto, nos ensaios triaxiais realizados em amostras em condições não saturadas, o tempo de cura influenciou consideravelmente estes parâmetros, sendo neste caso diretamente proporcional às rigidezes e ao valor do intercepto coesivo. Os resultados referentes às misturas compactadas após 24 horas do momento da mistura do solo com a emulsão (M24) e logo após a combinação destes materiais (MI) apontaram que a mistura MI apresentava maiores valores de resistência ao cisalhamento e de rigidez que M24. No entanto, ambas apresentaram intercepto coesivo semelhante, apesar de M24 ter apresentado ângulo de atrito inferior. De maneira geral, observou-se a estabilização do solo arenoso estudado, devido à mudança no comportamento cisalhante das misturas. Concluiu-se também que a cura e o tempo de aeração imprimiram mudanças nas propriedades de resistência ao cisalhamento em condições não saturadas, com o aumento do tempo de cura. Desta forma, tais misturas devem ser consideradas como alternativas viáveis em obras geotécnicas onde há

escassez de materiais, e principalmente, em obras que demandem materiais coesos e de baixa permeabilidade.

Palavras-chave: cura, solo-emulsão, resistência ao cisalhamento, resistência a compressão simples.

## ABSTRACT

The use of asphalt mixtures as a soil stabilizing agent is an alternative that can be used in numerous geotechnical works. The objective of this research was to study the effects of curing and aeration time of mixtures between soil and high levels of asphalt emulsion on their mechanical behavior. The methodology adopted consisted of collecting and characterizing sandy soil and asphalt emulsion, mixing and compacting materials with different levels of emulsion, exposing the test pieces to the open air (for curing to occur), performing simple compression tests of the compacted soil and soil-emulsion mixtures for different curing times, as well as a triaxial compression test, for optimum levels of asphalt emulsion. This was done with and without saturation of soil specimens, with and without aeration time, and for different curing times of mixtures (1, 7 and 28 days). The results showed that, for the tested soil-emulsion mixtures, the increase in the curing time caused a gradual decrease in the apparent specific gravity of the specimens, due to the decrease in the moisture content caused by emulsion failure. In the uniaxial compression tests, it was noted that the soil-emulsion mixtures presented much higher strengths than those of the compacted soil. Also, the longer the curing time of the mixtures, the higher the compression strength. For the triaxial compression tests, it was possible to observe that the addition of the highest levels of asphaltic emulsion to the sandy soil increased the value of the cohesion intercept, while considerably decreased its friction angle. Under saturated conditions, the curing time did not significantly affect the shear strength and stiffness of the mixtures. However, when the saturation process of soil-emulsion mixtures was not carried out, the curing time considerably influenced these parameters, being in this case directly proportional to the stiffness and cohesion intercept. The results referring to the compacted mixtures after 24 hours from the moment when soil and emulsion were mixed (M24) and shortly after the combination of these materials (MI) showed that MI had higher values of shear strength and stiffness than M24. However, both had a similar cohesion intercept, although M24 had a lower friction angle. In general, it was observed that the studied sandy soil was stabilized, due to the change in the shearing behavior of the mixtures. It was also concluded that curing and aeration time led to changes in the shear strength properties under unsaturated conditions, with an increase in curing time. Thus, such mixtures must be considered as viable alternatives in geotechnical works where there is a shortage of materials, and mainly, in works that demand cohesive and low permeability materials.

Key-words: curing, soil-emulsion, shearing strength, compressive strength

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Processo de produção da emulsão asfáltica. ....	27
Figura 2.2 - Composições granulométricas formadas a partir da estabilização mecânica. ....	33
Figura 2.3 – Etapas da fabricação das misturas solo-emulsão. ....	39
Figura 2.4 - Variação da resistência à compressão simples com o teor de emulsão asfáltica - Solo Peixe. ....	41
Figura 2.5 - Variação da resistência à compressão simples com o teor de emulsão asfáltica - Solo Corumbá. ....	42
Figura 2.6 -Variação da resistência à compressão simples com o teor de emulsão asfáltica - Solo Goiânia. ....	42
Figura 2.7- Compactação imediata e 24 horas após a mistura na energia Proctor Normal. ....	45
Figura 2.8 -Influência da energia de compactação nos valores da massa específica aparente das misturas entre o solo e elevados teores de emulsão. ....	46
Figura 2.9 –Compactação quente e 24 horas após a mistura na energia Marshall. ....	46
Figura 2.10 – Comparação entre o comportamento cisalhante das misturas solo-emulsão e do solo SM. ....	48
Figura 2.11 - Envoltórias das tensões cisalhantes na ruptura em função da tensão normal efetiva. ....	49
Figura 3.1 - Local de retirada da amostra de solo ....	53
Figura 3.2 - Coleta da amostra de solo ....	53
Figura 3.3 - Curvas granulométricas das três amostras de solo estudadas ....	54
Figura 3.4 - Curva de compactação do solo - Energia Proctor Normal. ....	55
Figura 3.5 – Procedimentos de mistura entre solo e emulsão asfáltica ....	58
Figura 3.6- Equipamento de compactação Marshall ....	60
Figura 3.7- Curvas de compactação das misturas solo e emulsão asfáltica. ....	61
Figura 3.8- Compactador MCT. ....	62
Figura 3.9 –Ranhura entre as camadas do corpo de prova. ....	62
Figura 3.10 – Corpos de prova após a compactação. ....	63
Figura 3.11- Posicionamento das pedras porosas e do corpo de prova. ....	65
Figura 3.12- Corpo de prova após envolto com a membrana de borracha ....	65
Figura 3.13 – Montagem final da célula na prensa do aparelho triaxial ....	67
Figura 3.14 – Equipamento triaxial. ....	69

Figura 4.1 - Resistência à compressão simples para os diferentes tempos de cura.....	72
Figura 4.2 - Variação do teor de umidade residual da mistura solo-emulsão em função do tempo de cura.....	73
Figura 4.3 - Variação da resistência à compressão simples de acordo com o tempo de cura ..	73
Figura 4.4 - Curvas de tensão-deformação das misturas solo-emulsão e do solo para as diferentes tensões confinantes, na condição saturada.....	75
Figura 4.5 - Envoltória de cisalhamento - Parâmetros efetivos - Misturas solo-emulsão e solo compactado na condição saturada .....	77
Figura 4.6 - Curvas tensão-deformação das misturas solo-emulsão para as diferentes tensões confinantes, na condição não saturada .....	79
Figura 4.7 - Envoltórias de cisalhamento - Parâmetros efetivos - Misturas solo-emulsão na condição não saturada.....	80
Figura 4.8 -Curvas tensão-deformação das misturas solo-emulsão saturada e não saturada com 7 dias de cura .....	82
Figura 4.9 - Curvas tensão-deformação das misturas solo-emulsão compactadas imediatamente e após 24 horas da mistura na condição não saturada. ....	84
Figura 4.10 - Envoltória de cisalhamento – Parâmetros efetivos – Misturas solo-emulsão compactadas imediatamente e após 24 horas das misturas, na condição não saturada.....	85

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1- Principais aplicações das emulsões asfálticas. ....	30
Tabela 2.2 – Características das emulsões para uso em pavimentação. ....	31
Tabela 2.3 - Coesão e ângulo de atrito - Solo Peixe.....	43
Tabela 2.4 - Coesão e ângulo de atrito - Solo Corumbá.....	43
Tabela 2.5 - Coesão e ângulo de atrito - Solo Goiânia.....	43
Tabela 2.6 – Resumo dos procedimentos adotados para a compactação das misturas solo-emulsão.....	44
Tabela 2.7 - Coesão e ângulo de atrito efetivos - baixos níveis de carregamento.....	50
Tabela 2.8 - Coesão e ângulo de atrito efetivos - altos níveis de carregamento.....	50
Tabela 3.1 Resumo dos parâmetros do solo em estudo.....	56
Tabela 3.2 - Especificações e parâmetros obtidos para a emulsão RL-1C utilizada.....	56
Tabela 3.3- Características das misturas entre solo e elevados teores de emulsão asfáltica ....	60
Tabela 4.1 – Índices físicos das misturas solo-emulsão .....	70
Tabela 4.2 Parâmetros de resistência ao cisalhamento do solo e das misturas solo-emulsão saturados .....	77
Tabela 4.3 - Parâmetros de resistência ao cisalhamento do solo e das misturas solo-emulsão não saturadas .....	80
Tabela 4.4 - Parâmetros de resistência ao cisalhamento do solo e das misturas solo-emulsão MI e M24. ....	85

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A-1-b	Areia média
A-2-4	Areia quartzosa
A-4	Silte
A-7-5	Solo argiloso
ABEDA	Associação Brasileira das Empresas Distribuidoras de Asfaltos
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CAP	Cimento asfáltico de petróleo
CC	Coefficiente de curvatura
CID	Consolidado isotropicamente drenado
CIU	Consolidado isotropicamente não drenado
CL	Argila de baixa plasticidade
CNPq	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
CNU	Coefficiente de não uniformidade
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
EM	Especificação de material
HRB	<i>Highway Research Board</i>
LA	Lama asfáltica
LARC	Lama asfáltica de ruptura controlada
LMSP	Laboratório de Mecânica dos Solos e Pavimentação
M24	Marshall compactado após 24 horas da mistura
MB	Normas relacionadas à método de ensaio da ABNT
MCT	Miniatura, Compactado, Tropical
ME	Método de ensaio
MI	Marshall compactado imediatamente
MQ	Marshall compactado à quente
NBR	Norma Brasileira Regulamentar
NL	Não líquido
NP	Não plástico
pH	Potencial hidrogeniônico
PM24	Proctor Modificado compactado após 24 horas da mistura

PMQ	Proctor Modificado compactado à quente
PN24	Proctor Normal compactado após 24 horas da mistura
PNI	Proctor Normal compactado imediatamente
PNQ	Proctor Normal compactado à quente
RCS	Resistência à compressão simples
RM	Emulsão asfáltica de ruptura média
RL	Emulsão asfáltica de ruptura lenta
RR	Emulsão asfáltica de ruptura rápida
S	<i>South</i>
SC	Areia argilosa
S-E	Solo-emulsão
SM	Areia siltosa
SUCS	Sistema Unificado de Classificação dos Solos
W	<i>West</i>
UFC	Universidade Federal do Ceará

## LISTA DE SÍMBOLOS

°	Graus
1C	Emulsão asfáltica de menor viscosidade
2C	Emulsão asfáltica de maior viscosidade
%	Porcentagem
°C	Graus Celsius
B	Parâmetro B de Skempton
$c'$	Coesão efetiva
$c$	Coesão total
cm	Centímetro
$\text{cm}^3$	Centímetro cúbico
$\phi'$	Ângulo de atrito interno efetivo
$\phi$	Ângulo de atrito interno total
$\Delta\sigma_c$	Acréscimo de tensão confinante aplicado
$\Delta u$	Acréscimo de poropressão gerado
$e_{\text{mist}}$	Índice de vazios da mistura
$e_{\text{er}}$	Deformação axial estimada na ruptura
g	Grama
$\text{g}/\text{cm}^3$	Grama/centímetro cúbico
h	Horas
kN	Quilo Newton
kPa	Quilo Pascal
L	Altura do corpo de prova
m	Metro
$\text{m}^3$	Metro cúbico
mm	Milímetro
$r$	Massa específica aparente da mistura
$r_{\text{inicial}}$	Massa específica aparente inicial da mistura
$r_{\text{final}}$	Massa específica aparente final da mistura
$r_{\text{s,mist}}$	Massa específica do sólido da mistura
$r_{\text{s,ap,mist}}$	Massa específica aparente do sólido da mistura
$r_{\text{s,ap,mist}}$	Marshall compactado imediatamente

## VGM

$V_{\text{máx}}$	Marshall compactado à quente
$W_{\text{inicial}}\%$	Umidade inicial da mistura
$W_{\text{final}}\%$	Umidade final da mistura
$W\%$	Teor de umidade

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>22</b>
<b>1.1 Motivação da pesquisa</b> .....	<b>22</b>
<b>1.2 Objetivos da pesquisa</b> .....	<b>24</b>
<i>1.2.1 Objetivo geral</i> .....	<i>24</i>
<i>1.2.2 Objetivos específicos</i> .....	<i>24</i>
<b>1.3 Metodologia</b> .....	<b>24</b>
<b>1.4 Estrutura do trabalho</b> .....	<b>25</b>
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>26</b>
<b>2.1 Introdução</b> .....	<b>26</b>
<b>2.2 Emulsão asfáltica</b> .....	<b>26</b>
<b>2.3 Estabilização de solos</b> .....	<b>32</b>
<i>2.3.1 Estabilização mecânica</i> .....	<i>32</i>
<i>2.3.2 Estabilização química</i> .....	<i>33</i>
<i>2.3.2.1 Solo estabilizado com cimento</i> .....	<i>33</i>
<i>2.3.2.2 Solo estabilizado com cal</i> .....	<i>34</i>
<i>2.3.2.3 Solo estabilizado com polímero</i> .....	<i>35</i>
<i>2.3.2.4 Solo estabilizado com emulsão asfáltica</i> .....	<i>36</i>
<b>2.4 Considerações parciais</b> .....	<b>50</b>
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>52</b>
<b>3.1 Introdução</b> .....	<b>52</b>
<b>3.2 Solo utilizado na confecção das misturas solo-emulsão</b> .....	<b>52</b>
<b>3.3 Classificação do solo</b> .....	<b>53</b>
<b>3.4 Emulsão asfáltica</b> .....	<b>56</b>
<b>3.5 Procedimentos de mistura entre o solo e a emulsão asfáltica</b> .....	<b>57</b>
<b>3.6 Compactação das misturas de solo com altos teores de emulsão asfáltica</b> .....	<b>59</b>
<b>3.7 Confecção dos corpos de prova e tempos de cura para os ensaios de resistência à compressão simples e resistência a compressão triaxial</b> .....	<b>61</b>
<b>3.8 Ensaios de resistência à compressão simples</b> .....	<b>64</b>
<b>3.9 Ensaios de compressão triaxial</b> .....	<b>64</b>
<i>3.9.1 Saturação das linhas do equipamento e montagem do ensaio</i> .....	<i>64</i>

3.9.2 <i>Saturação dos corpos de prova</i> .....	66
3.9.3 <i>Adensamento</i> .....	68
3.9.4 <i>Ruptura dos corpos de prova</i> .....	68
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	<b>70</b>
4.1 <b>Índices físicos das misturas de solo com altos teores de emulsão</b> .....	<b>70</b>
4.2 <b>Efeito da cura na resistência à compressão simples nas misturas de solo com altos teores de emulsão</b> .....	<b>71</b>
4.3 <b>Resultados dos ensaios de compressão triaxial realizados em corpos de prova saturados</b> .....	<b>74</b>
4.4 <b>Resultados dos ensaios de compressão triaxial realizados em amostras não saturadas</b> .....	<b>78</b>
4.5 <b>Influência do tempo de aeração no comportamento cisalhante das misturas</b> .....	<b>83</b>
<b>5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE PESQUISA</b> .....	<b>87</b>
5.1.1 <i>Objetivos específicos</i> .....	87
5.2 <b>Conclusões</b> .....	<b>87</b>
5.2.1 <i>Influência da adição de emulsão asfáltica ao solo e do tempo de cura na resistência à compressão simples nas misturas de solo com altos teores de emulsão</i> .....	87
5.2.2 <i>Influência da adição de altos teores de emulsão asfáltica ao solo arenoso nos parâmetros de resistência ao cisalhamento da mistura solo-emulsão</i> .....	88
5.2.3 <i>Influência dos tempos de cura nos parâmetros de resistência ao cisalhamento da mistura solo-emulsão</i> .....	88
5.2.4 <i>Influência do tempo de aeração no comportamento cisalhante das misturas</i> .....	89
5.2.5 <i>Conclusões gerais</i> .....	89
5.3 <b>Sugestões de pesquisas futuros</b> .....	<b>90</b>
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>91</b>
<b>APÊNDICE A - FIGURAS QUE REPRESENTAM AS ENVOLTÓRIAS DE RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO EFETIVAS, VARIAÇÃO DE POROPRESSÃO VERSUS DEFORMAÇÃO AXIAL E TRAJETÓRIAS DE TENSÕES EFETIVAS PARA O SOLO E CADA UMA DAS MISTURAS SOLO-EMULSÃO NA CONDIÇÃO SATURADA</b> .....	<b>100</b>
<b>APÊNDICE B - FIGURAS QUE REPRESENTAM AS ENVOLTÓRIAS DE RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO EFETIVAS E TRAJETÓRIAS DE TENSÕES</b>	

**EFETIVAS PARA O SOLO E CADA UMA DAS MISTURAS SOLO-EMULSÃO NA  
CONDIÇÃO NÃO SATURADA..... 107**

**APÊNDICE C - FIGURAS QUE REPRESENTAM AS ENVOLTÓRIAS DE  
RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO EFETIVAS E TRAJETÓRIAS DE TENSÕES  
EFETIVAS PARA O SOLO E CADA UMA DAS MISTURAS SOLO-EMULSÃO NA  
CONDIÇÃO NÃO SATURADA..... 111**

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Motivação da pesquisa

A estabilização de solos consiste em um termo geral para designar qualquer método físico, químico, biológico ou a combinação destes que altere as propriedades de um solo para que ele possa atender a algum objetivo de engenharia (Pannu, 2016). Tal alternativa pode ser capaz de reduzir os custos da obra em consonância com um bom comportamento mecânico ou hidráulico do solo, e também diminuir impactos ambientais devido a uma menor exploração das jazidas deste material.

Na estabilização química, há a adição de produtos químicos ao solo, como cimento Portland, cal, pozolanas e materiais betuminosos, que são utilizados com o intuito de melhorar uma ou mais de suas características, tanto quanto ao ganho de resistência, diminuição da permeabilidade, como também estabilidade à intempéries (Pereira, 2012; Gondim, 2008).

Os materiais betuminosos podem ser utilizados de formas distintas na estabilização de solos, podendo-se citar entre eles o cimento asfáltico de petróleo, o asfalto diluído e a emulsão asfáltica (Afrin, 2017). Destacando os asfaltos diluídos e as emulsões asfálticas, por não necessitarem de aquecimento para a sua fluidificação e por se encontrarem em estado líquido em temperatura ambiente (Castro, 2003). Tais materiais são geralmente empregados em bases e sub-base de pavimentos (Lima, 2016).

Na pavimentação, o uso da técnica de estabilização de solos com a adição da emulsão asfáltica visa a diminuição da permeabilidade do solo estabilizado, o aumento da durabilidade das camadas dos pavimentos, o aumento da resistência pela ação coesiva e também a maior capacidade de resistir à ação de intempéries. Dentre os trabalhos nesta área com o uso de emulsão asfáltica podemos citar Gondim (2008), Miceli Júnior (2006), Soliz (2007), Sant'Ana (2009) e Moreira (2010).

Em contrapartida, pesquisas com estabilização de solos utilizando emulsão asfáltica na área de geotecnia, em construções como barragens de terra, aterros em geral, e na impermeabilização de aterros sanitários, são escassas (Lima, 2016). Tornando necessário o desenvolvimento de novos estudos que permitam a definição das condições de utilização e dos benefícios da estabilização de solos com materiais betuminosos, em geotecnia.

Podemos encontrar nos trabalhos de Jacintho (2010), Lima et al. (2019), Pereira (2018) e Dantas Neto *et al.* (2020) estudos mais específicos tratando-se de estabilização de solos com emulsão asfáltica em geotecnia.

Na pesquisa de Jacintho (2010) foram avaliados o comportamento mecânico e hidráulico das misturas solo-emulsão. A autora avaliou a adição de emulsão asfáltica em uma areia siltosa (SM), areia argilosa (SC) e em um solo argiloso (CL). No entanto, a autora obteve resultados considerados inconclusos e inconsistentes, possivelmente, em razão dos baixos teores de emulsão asfáltica utilizados na sua pesquisa, que variavam 0% até 8%. Tais teores ocasionaram o aumento da macroporosidade nas misturas estudadas devido à formação de grumos entre as frações finas dos solos estudados e o ligante asfáltico residual.

Após os resultados inconclusos obtidos por Jacintho (2010), os autores Lima (2016), Pereira (2018) e Dantas *et al.* (2020) avaliaram as características geotécnicas da mistura solo-emulsão para os teores elevados de emulsão asfáltica. Os altos teores foram utilizados com o intuito de minimizar a heterogeneidade das misturas solo-emulsão quando nestas eram adicionados baixos teores de emulsão asfáltica. Os autores procuraram analisar os efeitos que um mais elevado teor deste material ocasionaria na compactação e no comportamento mecânico e hidráulico das misturas.

Lima (2016) avaliou o processo de dosagem dos altos teores de emulsão asfáltica, buscando uma maior homogeneidade da mistura, em razão da alta quantidade emulsão asfáltica adicionada ao solo, que variava entre 13% e 31%. Dantas Neto *et al.* (2020) avaliaram o comportamento das misturas solo-emulsão, com teores de emulsão asfáltica variando entre 13% e 28%, em massa, dando ênfase as propriedades de permeabilidade e resistência ao cisalhamento. Tais autores observaram um aumento da coesão da mistura além da diminuição da sua permeabilidade. Estes resultados foram coerentes diante do esperado para a estabilização de solos com materiais betuminosos.

Após a mistura da emulsão asfáltica com os grãos de solo, ocorre o processo de ruptura da emulsão, tal processo é um fator extremamente importante na utilização deste material como agente estabilizador de solos (Boucard *et al.*, 2017). A ruptura da emulsão asfáltica pode ser entendida como a união, coalescência, das gotículas de cimento asfáltico de petróleo (CAP) que estão dispersas na água, logo após o processo de compactação da mistura solo-emulsão (Sant'Ana, 2009).

Após a compactação da mistura entre solo e emulsão asfáltica, inicia-se o processo de cura, que só estará concluído quando a emulsão se encontrar completamente rompida (Soliz, 2007). Tal processo pode ser entendido como a continuação da perda de água, que ocorre simultaneamente com a estabilização do processo de ruptura da emulsão asfáltica (Sant'Ana, 2009).

Esta pesquisa se propôs a investigar o efeito que a cura da emulsão asfáltica é capaz de proporcionar na resistência à compressão simples e na resistência ao cisalhamento das misturas com altos teores de emulsão asfálticas. No estudo foram variadas as condições de saturação, o tempo de aeração, os tempos de cura, visando avaliar a aplicação das misturas em obras geotécnicas.

## **1.2 Objetivos da pesquisa**

### ***1.2.1 Objetivo geral***

Este trabalho tem por objetivo avaliar o efeito do tempo de cura e do tempo de aeração na resistência à compressão simples e na resistência ao cisalhamento em solos arenosos estabilizados com elevados teores de emulsão asfáltica.

### ***1.2.2 Objetivos específicos***

Como objetivos específicos podem ser citados:

- a) Estudar a influência na resistência à compressão simples do solo arenoso devido a adição de altos teores de emulsão asfáltica;
- b) Estudar a influência na resistência ao cisalhamento do solo devido a adição de altos teores de emulsão asfáltica;
- c) Analisar a influência da cura nos parâmetros de resistência a compressão simples;
- d) Analisar a influência da cura nos parâmetros de resistência ao cisalhamento em condições saturadas e não saturadas;
- e) Verificar o efeito do tempo de aeração nos parâmetros de resistência ao cisalhamento do solo na condição não saturada.

## **1.3 Metodologia**

A pesquisa foi iniciada a partir da revisão bibliográfica, seguida pela parte experimental. Inicialmente, foram utilizados para a revisão tanto livros como teses, dissertações, artigos, normas técnicas, e etc. Tal atividade fora realizada com o intuito de ampliar o conhecimento e compreender melhor os assuntos referentes a pesquisa, de maneira a embasar os procedimentos laboratoriais realizados e assim possuir conhecimento para análise dos dados.

Para realização do processo experimental, foi escolhido um solo arenoso, que não apresentasse coesão e tivesse uma alta permeabilidade, com o objetivo de analisar como os parâmetros de resistência ao cisalhamento eram modificados com a adição dos altos teores de emulsão asfáltica, com os diferentes tempos de cura, havendo o tempo de aeração e em condições saturadas.

O processo experimental foi constituído através de ensaios de laboratório, tanto para caracterização do solo e caracterização da emulsão asfáltica. Com a mistura solo-emulsão, foram realizados os ensaios de compactação da mistura solo-emulsão, a confecção dos corpos de prova da mistura, ensaio de compressão simples e os ensaios de compressão triaxial.

#### ***1.4 Estrutura do trabalho***

Esta dissertação está dividida em cinco capítulos. Para uma melhor compreensão, os assuntos abordados em cada um destes são brevemente descritos a seguir.

No Capítulo 1 é realizada a introdução ao conteúdo da dissertação, com a motivação da pesquisa, objetivos, metodologia e a estrutura do trabalho.

No Capítulo 2 é apresentada a revisão bibliográfica, em que são conceituadas e classificadas as emulsões asfálticas, os diferentes tipos de estabilização de solos, com enfoque principal na estabilização com materiais betuminosos e emulsões asfálticas e os estudos realizados a respeito do tema.

O Capítulo 3 aborda a caracterização dos materiais utilizados, ou seja, o solo e a emulsão asfáltica, e também é descrita a metodologia empregada para os procedimentos de compactação, ensaio de compressão simples e ensaio de compressão triaxial.

No Capítulo 4 são apresentados e analisados os resultados obtidos com os ensaios de compressão simples e compressão triaxial, fornecendo os elementos essenciais para se obter as conclusões a respeito da pesquisa.

O Capítulo 5 consiste na apresentação das conclusões finais do trabalho e sugestões para pesquisas futuras.

## **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 Introdução**

Este capítulo tem como finalidade apresentar as informações básicas a respeito das emulsões asfálticas e estabilização dos solos empregadas em obras de engenharia. Tais conceitos são utilizados na elaboração da metodologia empregada, buscando sempre se abordar as particularidades de cada material e dos diferentes processos de estabilização dos solos, principalmente com o uso de emulsão asfáltica. Buscando assim, adquirir o conhecimento necessário para o desenvolvimento da pesquisa e no auxílio da análise dos resultados que foram obtidos, comparando-os com os resultados anteriores adquiridos por outros autores em experiências relativas a utilização desta técnica.

### **2.2 Emulsão asfáltica**

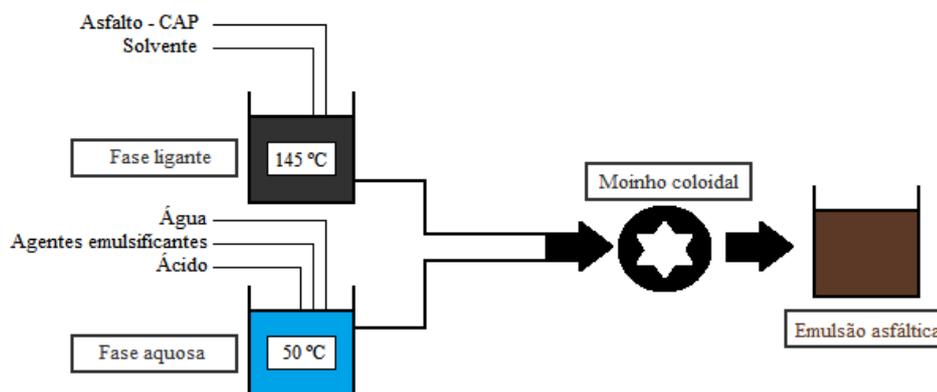
Emulsão é um sistema heterogêneo e pode ser entendida como uma dispersão de pequenas partículas de um líquido em outro líquido, sendo esses imiscíveis (Batra *et al.*, 2016 ABEDA, 2010). Para que haja a estabilidade do sistema formado, ou seja, para que ocorra o processo de emulsificação, é necessário que existam estes dois líquidos imiscíveis em contato e que estejam sob a incidência de uma forte agitação na presença de agentes emulsificantes (Brito, 2015).

As emulsões asfálticas podem ser definidas como a combinação de três componentes, que são o cimento asfáltico, água e o agente emulsificante (tenso-ativo), em que, no processo de emulsificação, estes são aquecidos e expostos a um mecanismo denominado moinho coloidal, que cisalha o asfalto em pequenos glóbulos, triturando-o e tornando-o suspenso em água. Para se obter uma emulsão asfáltica é necessário que se tenham uma energia de dispersão, que é representada pela ação que é imposta pelo moinho coloidal para que assim haja a quebra do cimento asfáltico, e o agente emulsificante, que possui a função de reduzir a tensão superficial, evitando assim que estes glóbulos se coalesçam (Gondim, 2008; Crispino e Brovelli, 2011).

As emulsões asfálticas são utilizadas de forma mais convencional na área da pavimentação em serviços como pintura de ligação, tratamentos superficiais, macadame betuminoso, fabricação de pré-misturados à frio, areia asfalto à frio, lama asfáltica, serviços de imprimação de base e em estabilização de solos (ABEDA, 2010).

A Figura 2.1 ilustra o processo de produção da emulsão asfáltica, no qual inicialmente aquece-se o cimento asfáltico a uma temperatura entre 140 a 145°C e a fase aquosa a uma temperatura entre 50 a 60°C (ABEDA, 2010). A quantidade de agente emulsificante vai de cerca de 0,2 a 1%, e a de asfalto varia entre 60 e 70% da emulsão em volume (Jacintho, 2010; Lima, 2016).

Figura 2.1 – Processo de produção da emulsão asfáltica.



Fonte: Adaptado de ABEDA (2001).

Quando há o contato entre a emulsão asfáltica e o agregado pétreo, se inicia o processo denominado ruptura da emulsão asfáltica, corresponde a separação entre as fases aquosa e asfáltica, fazendo com que seja possível haver o recobrimento do agregado por uma película de asfalto residual (Bernucci, *et al.* 2008). Após o processo de ruptura da emulsão asfáltica, que também é auxiliado pela água que está presente na composição da emulsão, a coloração que inicialmente tinha um tom marrom, se torna preta (Lima, 2016). O tempo de ocorrência desse processo confere às emulsões características para cada aplicabilidade, bem como serve de base para a sua classificação em função da velocidade de ruptura (ABEDA, 2010).

De acordo com a Norma DNIT-EM 165/2013, as emulsões asfálticas podem ser classificadas quanto a sua velocidade de ruptura como de ruptura rápida (RR), ruptura média (RM) e ruptura lenta (RL). Lima (2016) apresenta algumas particularidades desses três tipos de emulsão asfáltica:

- Ruptura rápida (RR), que possui uma quantidade relativamente baixa de agente emulsificante e devido a isso são menos estáveis. Neste tipo de emulsão asfáltica, a água se separa rapidamente do ligante, sendo, portanto, indicadas para as atividades de tratamento superficial, pinturas de ligação, imprimação e macadames betuminosos;

- Ruptura média (RM), no qual o tempo de exposição é maior que o tipo de emulsão asfáltica anterior, e são utilizadas principalmente para misturas com agregados limpos e sem pó, imprimação e macadames betuminosos;
- Ruptura Lenta (RL), que possui o maior tempo de exposição dentre as três, e que são empregadas em estabilizações de solos e no preparo de lamas asfálticas. As emulsões asfálticas de ruptura lenta são ideais para estabilização de solos por possuírem alta estabilidade quanto a ruptura e assim não apresentarem o risco de romper prematuramente (Cristelo, 2011; Gondim, 2008).

Além destes tipos de emulsão asfáltica de acordo com a Norma DNIT-EM 165/2013, há também as que apresentam ruptura controlada, como a lama de ruptura controlada (LARC), que são indicadas para serviços de lama asfáltica. As quais possuem uma reatividade intermediária, entre as emulsões de ruptura média e lenta (ABEDA, 2010).

As emulsões asfálticas também podem ser classificadas quanto ao tipo de carga das suas partículas. No qual, dependendo do tipo de emulsificante utilizado, podem apresentar tanto carga elétrica negativa, se tratando de uma emulsão asfáltica aniônica, como carga elétrica positiva, o que caracteriza uma emulsão asfáltica catiônica. Em algumas situações, as emulsões asfálticas podem não apresentar carga elétrica, quando são chamadas de emulsões asfálticas especiais, raramente utilizadas.

Nas emulsões aniônicas o processo de ruptura ocorre principalmente devido à evaporação de água (Brito, 2015; ABEDA, 2010). As emulsões asfálticas aniônicas possuem uma boa adesividade em relação aos agregados do tipo eletropositivo, ou seja, os que possuem natureza calcária, porém na presença de agregados do tipo eletronegativo, estas necessitam do emprego de melhoradores de adesividade (Torres, 2013).

Emulsões asfálticas catiônicas são obtidas através da dispersão do asfalto em água na presença de sais de amina, que oferecem cargas positivas aos glóbulos de betume (Torres, 2013). Neste tipo de emulsão o processo de ruptura ocorre principalmente reações químicas de atração eletrostática entre o agente emulsificante e o agregado pétreo. Apresentam também uma maior facilidade de aplicação, flexibilidade e resistência, além de possuir excelente adesividade para qualquer tipo de agregado, ou seja, tanto ácido como alcalino, positivo ou negativo, fazendo assim, com que haja uma boa aceitabilidade da sua utilização no Brasil (ABEDA, 2010; Lima, 2016).

ABEDA (2010) apresenta as principais vantagens das emulsões asfálticas catiônicas:

- a) Propiciam uma maior economia de energia, pois podem ser utilizadas praticamente sem a necessidade de aquecimento;
- b) Emulsões asfálticas catiônicas uma excelente afinidade com todos os tipos de agregados eliminando a utilização de aditivos;
- c) Propiciam a utilização de agregados úmidos evitando o uso de combustíveis para sua secagem;
- d) Torna possível a estocagem à temperatura ambiente em instalações simples que não necessitam de fonte de aquecimento, combustíveis derivados de petróleo e isolamento térmico;
- e) Eliminam os riscos de incêndios ou explosões, em razão de não haver o uso de solventes de petróleo em seu emprego, evitando assim também os riscos de acidentes por queimaduras;
- f) Não geram vapores tóxicos e poluentes;
- g) As instalações industriais possibilitam a produção de grandes volumes de misturas em equipamentos que são de baixo custo, tanto de manutenção como de aquisição, o que também são de fácil operação e distribuição, resultando em menores custos em relação às misturas que são produzidas à quente;
- h) A utilização de emulsões modificadas com polímeros tem ocasionado o uso de serviços asfálticos em vias de alto tráfego, o que traz uma melhoria nas condições de segurança e de desempenho desses pavimentos em relação às ações do tráfego e do clima.

As principais aplicações das emulsões asfálticas produzidas no Brasil são apresentadas na Tabela 2.1, seguida das especificações para as emulsões asfálticas para o uso em pavimentação apresentadas na Tabela 2.2.

A Tabela 2.1 mostra as principais aplicações das emulsões asfálticas que são produzidas no Brasil e a Tabela 2.2 apresenta as características das emulsões asfálticas para o uso em pavimentação, de acordo com a norma do DNIT-EM 165/2013.

Tabela 2.1- Principais aplicações das emulsões asfálticas.

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

Fonte: Adaptado de Lima (2016).

Tabela 2.2 – Características das emulsões para uso em pavimentação.

Características	Método 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
Ensaio sobre emulsão										
Viscosidade sobre Saybolt-Furol, S, a 25°C	NBR 14491:2007	90 máx.	-	-	-	90 máx.	90 máx.	90 máx.	90 máx.	90 máx.
Viscosidade sobre Saybolt-Furol, S, a 50°C	NBR 14491:2007	-	100-400	20-200	100-400	-	-	-	-	-
Sedimentação, % em massa, máx.	NBR 6570:2016	5	5	5	5	5	5	5	10	5
Peneiração, 0,84 mm, % massa, máx.	NBR 14393:2012	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 14249:2007	80	80	80	80	80	-	-	-	-
Adesividade em agregado miúdo, % mín.	NBR 14757:2017	-	-	-	-	-	75	-	-	75
Carga da partícula	NBR 6567:2015	Positiva	Positiva	Positiva	Positiva	Positiva	Positiva	Neutra	-	Positiva
pH, máx.	NBR 6299:2012	-	-	-	-	6,5	-	6,5	8	6,5
Destilação: Solvente destilado, % em vol.	NBR 6568:2005	-	-	0-12	0-12	-	-	-	0-15	-
Resíduo seco, % em massa, mín./h	NBR 14376:2019	62	67	62	65	60	60	60	45	60
Desemulsibilidade, % em massa	NBR 6569:2008	50 mín.	50 mín.	50 máx.	50 máx.	-	-	-	-	-
Mistura com filer silícico, %	NBR 6302:2008	-	-	-	-	2 máx.	1,2-2	-	-	2 mín.
Mistura com cimento, %	NBR 6297:2012	-	-	-	-	2 máx.	2 máx.	-	-	2 mín.
<b>Ensaio sobre o resíduo da emulsão obtido pela ABNT NBR 14896</b>										
Penetração a 25°C, 100g, 5s, 0,1 mm	NBR 6576:2007	40-150	40-150	40-150	40-150	40-150	40-150	40-150	40-250	40-150
Teor de betume, % mín.	NBR 14855:2015	97	97	97	97	97	97	97	97	97
Ductilidade a 25°C, cm, mín.	NBR 6293:2015	40	40	40	40	40	40	40	40	40
<b>Fonte: Adaptado de ABEDA, 2010.</b>										

## **2.3 Estabilização de solos**

A estabilização de solos é um termo geral usado para designar qualquer método físico, químico, biológico ou a combinação destes, que altere as propriedades de um solo para que este atenda a algum objetivo de engenharia (Pannu, 2016). Em um sentido mais amplo, a estabilização incorpora os vários métodos empregados aos solos para melhorar seu desempenho de engenharia. Este processo visa melhorar os parâmetros de resistência ao cisalhamento, reduzir a permeabilidade e compressibilidade do solo, aumentar a sua capacidade de suporte, reduzir a plasticidade, sendo necessário quando o solo disponível para certa aplicação não é apresenta as propriedades desejadas para tal (Afrin, 2017).

O conceito de estabilização de solos possui mais de 5000 anos, no qual, neste período, estradas de terra já eram estabilizadas no Antigo Egito e na Mesopotâmia, e também os gregos e romanos utilizavam-se de cal como agente estabilizante em seus solos (Firoozi *et al*, 2017; McDowell, 1959).

Ultimamente, esta técnica vem sendo utilizada para uma variedade de obras, sendo a sua aplicação mais comum na construção de pavimentos de estradas e de aeródromos, onde os principais objetivos são o aumento da resistência e estabilidade do solo e a redução de custos, fazendo com que este recurso seja utilizado da melhor forma possível (Pannu, 2016).

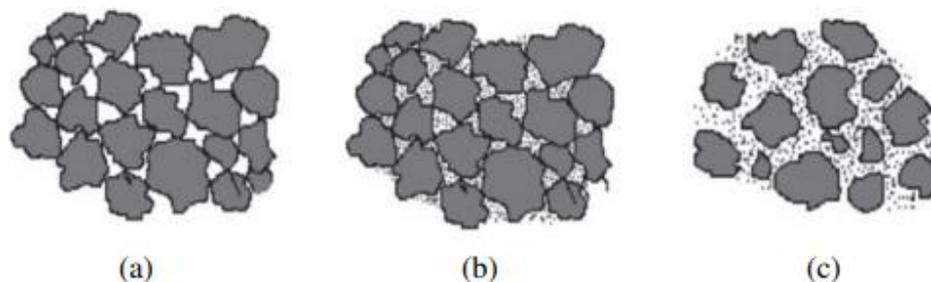
### **2.3.1 Estabilização mecânica**

A estabilização mecânica trata-se de um processo de mistura de dois ou mais solos com diferentes graduações com o objetivo de produzir um novo solo com as características necessárias e que depois é compactado para se alcançar a densidade requerida utilizando-se de metodologias convencionais de compactação. Os processos de mistura e compactação devem ser realizados de maneira adequada para que seja obtida uma estabilização mecânica bem-sucedida (Lim. *et al*, 2014).

Este tipo de estabilização se baseia na composição de solos, ou de solos e agregados, de maneira que resulte em uma mistura no qual esta resistência mecânica seja garantida pelo contato grão a grão entre as partículas maiores, ao mesmo tempo em que o material fino garante o preenchimento dos vazios deixados entre os grãos maiores, garantindo uma maior densidade e menor permeabilidade (Gondim, 2008).

Tal metodologia pode ser utilizada de forma individual ou em conjunto com outras técnicas de estabilização de solos, quando esta técnica não é suficiente para garantir as necessidades exigidas no projeto (Medina e Mota, 2005). A Figura 2.1 apresenta as diferentes composições granulométricas que podem ser formadas a partir deste tipo de estabilização, sendo a segunda a mais adequada por garantir o contato entre as partículas maiores e o preenchimento dos vazios deixados entre os grãos maiores pelas partículas finas.

Figura 2.2 - Composições granulométricas formadas a partir da estabilização mecânica.



Fonte: Yoder e Witczak, 1975.

### 2.3.2 Estabilização química

A estabilização química pode ser tratada como a adição de uma ou mais substâncias químicas ao solo, com o intuito de modificar o seu comportamento em relação ao ganho de resistência e estabilidade quanto às intempéries, onde essas mudanças também podem alterar sua permeabilidade e deformabilidade (Pereira, 2012; Jacintho, 2010). Neste processo, a estabilização do solo depende principalmente das reações químicas que ocorrem entre o agente estabilizador e os minerais do solo para que seja possível alcançar o efeito esperado (Makuza, 2013). Inúmeros podem ser os agentes estabilizadores, dentre eles podemos citar o cimento, cal, cinza volante e também os materiais betuminosos como apresentado nas pesquisas de Portelinha, 2018; Baghini, 2013; Ban, 2014; Amu *et al*, 2011; Emmert, 2010; Fujii, 2012; Arrivabeni, 2017; Soliz, 2009; Jacintho, 2012 e Dantas Neto *et al*, 2020.

#### 2.3.2.1 Solo estabilizado com cimento

A metodologia de estabilização com o uso de cimento consiste em misturar o solo com o cimento de modo a se obter um produto denominado solo-cimento. O produto

desta mistura apresenta um aumento significativo da resistência ao cisalhamento do solo, para assim atender a diversas aplicações (Fan *et al.*, 2018). Esta técnica tem sido praticada a cerca de 100 anos e atualmente é bastante utilizada como material de base de pavimentos, como proteção de taludes de barragens e aterros, estabilização de solo de fundação, etc (Firoozi *et al.*, 2017)

A estabilização de solos com cimento é causada pela reação de hidratação das partículas deste material que crescem em cristais que podem se ligar entre si, que ocasionam uma ligação entre as partículas de solo, o que gera uma alta resistência à compressão simples desse conjunto e também através das reações de hidrólise. Para que esta ligação ocorra de maneira satisfatória, as partículas de cimento devem revestir a maioria dos grãos de solo, proporcionando um bom contato entre ambos, e, assim, proporcionar uma eficiente estabilização (Afrin, 2016; Paiva, 2016).

Dentre todos os fatores construtivos que influenciam as propriedades físicas das misturas solo-cimento, podemos citar a temperatura ambiente, teor de cimento, umidade relativa do ar, tempo e técnica de cura e a duração entre a mistura e a compactação dos materiais (Guthrie *et al.*, 2009; Cancian *et al.*, 2015).

O efeito causado pela adição do cimento pode ser observado de duas maneiras distintas, uma para solos granulares e outra para solos coesivos. Em solos grossos, o cimento tem como função criar ligações nos contatos intergranulares, garantindo a resistência mecânica mais efetiva do material as solicitações externas, devido ao aumento da parcela resistente relativa à coesão, já para os solos finos, os grãos de solo comportam-se como núcleos, que aderem as pequenas partículas que os rodeiam formando regiões de materiais floculados que apresentam ligações oriundas dos fenômenos de cimentação, reduzindo a plasticidade e a expansão deste tipo de solo (Hicks, 2002; Portelinha, 2008).

#### 2.3.2.2 Solo estabilizado com cal

A cal trata-se de um dos materiais de construção mais antigos desenvolvidos pelo homem e tem sido usada a mais de 2000 anos, desde quando os romanos misturavam solo com cal para a construção de estradas (Dash e Hussain, 2012). Nos tempos atuais, sua utilização para a estabilização de solos teve início nos Estados Unidos na década de 1920 e, no Brasil, seus primeiros relatos datam dos anos 60 (Klinsky, 2012).

Seu uso é indicado para solos argilosos, ou muito siltosos, que apresentem tanto elevada plasticidade como alta expansão, bem como pouca capacidade de suporte.

(Santos, 2004). Sendo uma alternativa para estabilização de solos de custo relativamente baixo, comparando-a com as outras soluções tradicionais, tais como o uso do cimento Portland, cimento asfáltico ou o transporte de grandes volumes de materiais nobres (Klinsky, 2012).

A estabilização de solos finos com a cal é capaz de levar um aumento da sua resistência e rigidez em longo prazo e sua durabilidade e de reduzir sua densidade, plasticidade e expansão (Hicks, 2002; Firoozi *et al*, 2017).

Os fatores que influenciam no comportamento das misturas solo-cal são o teor de cal, o tipo de cal utilizada, o tipo de solo, o tempo de cura e a temperatura (Baldovino *et al.*, 2019; Gondim, 2008). Em que os efeitos da temperatura neste tipo de mistura são mais visíveis do que em solos estabilizados com cimento. Na mistura solo-cal quanto maior a temperatura do ambiente mais rápido se processa o ganho de resistência (Gondim, 2008).

#### 2.3.2.3 Solo estabilizado com polímero

Em geotecnia, a utilização de polímeros tem como principal objetivo a melhorias dos parâmetros de resistência de diversos tipos de solo e vem sendo cada vez mais utilizados em virtude da sua eficácia e por serem menos prejudiciais ao meio ambiente (Silva, 2020; Carneiro, 2020). Quando estes são aplicados de forma e dosagem adequadas, se tornam um ótimo agente estabilizante de solos, em obras como estradas não pavimentadas, proteção de taludes, selante no controle de poeira, para controle de erosão. Podendo também ser utilizado em aterros de solos moles (Carneiro, 2020).

No geral, os agentes estabilizantes de polímeros são acetatos de vinila ou copolímeros acrílicos suspensos em uma emulsão através de surfactantes. A estabilização de solos com polímeros é mais adequada para materiais granulares, devido ao fato de que em solos finos, a mistura dos materiais é dificultada em razão da área de superfície específica deste tipo de solo ser maior (Tingle *et al.*, 2007).

Tais materiais também são capazes de fornecer ao solo estabilizado uma excelente impermeabilização das superfícies revestidas, reduzindo também sua susceptibilidade à umidade (Tingle *et al.*, 2007). Além da atividade hidrófoba, os polímeros atuam gerando coesão ao solo por meio da polimerização (Soliz, 2007). Estes materiais também fornecem um efeito significativo tanto na trabalhabilidade como nas propriedades mecânicas das misturas solo-agregado-cimento (Baghini, 2016).

#### 2.3.2.4 Solo estabilizado com emulsão asfáltica

A metodologia de estabilização de solos com materiais betuminosos começou a ser empregada no início do século XX, quando engenheiros rodoviários, que trabalhavam nas proximidades de campos petrolíferos, notaram que o espalhamento de óleo cru sobre as estradas de terra era capaz de reduzir o pó existente, fazendo com fossem mais aptas a suportarem os esforços do tráfego e ao intemperismo (Gondim, 2008; Ferreira, 1980).

A estabilização betuminosa refere-se a um processo onde são adicionadas quantidades controladas de betume ao solo, no qual, estes materiais são completamente misturados de forma a se obter uma base estável. A adição de betume fornece ao solo um ganho de coesão, uma maior capacidade de carga e uma menor absorção de água (Afrin, 2017).

Neste tipo de estabilização há a incorporação e melhoria das características do solo através da coesão, atrito e permeabilidade, no qual o material asfáltico, ao ser incorporado ao solo, tem ação ligante ou impermeabilizante, ou ambas. (Moreira, 2011; Hicks, 2002). No entanto, a utilização de materiais betuminosos como agente estabilizante de solos não se encontra tão divulgada como o uso da cal e do cimento por se tratar de um material mais oneroso e mais exigente quanto à preparação da mistura (Cristelo, 2011).

Após a realização da estabilização betuminosa, algumas mudanças de propriedades são observadas no solo, que de acordo com Hamzah (1983) citado por Cristelo (2011) são:

- a) O aumento da resistência à compressão uniaxial até que se obtenha um valor ótimo do teor de betume utilizado, no qual a resistência à compressão pode ser maior em virtude do tempo de cura realizado;
- b) Acréscimo da resistência à compressão simples e do módulo de elasticidade até um valor máximo;
- c) Acréscimo da resistência ao cisalhamento da mistura dependendo tanto da temperatura como da velocidade de deformação;
- d) Diminuição da densidade máxima devido ao aumento do teor de betume da mistura;
- e) Diminuição da susceptibilidade da mistura à água devido à adição do teor de betume na mistura.

Existe uma vasta quantidade de materiais apropriados para a estabilização com betume, entretanto, por possuírem as características necessárias para este emprego, o cimento asfáltico de petróleo, o asfalto diluído e a emulsão asfáltica são os mais empregados na estabilização betuminosa (Pacheco, 2011).

Porém, por não necessitarem de aquecimento para a sua fluidificação, devido serem líquidos em temperatura ambiente, o asfalto diluído e a emulsão asfáltica são os materiais mais utilizados. Destes materiais, a emulsão possui um maior destaque, devido a inconvenientes técnico-econômicos e ambientais na aplicação à frio, bem como perigos na sua aplicação à quente dos asfaltos diluídos (Goudard *et al*, 2017; Castro, 2003).

A mistura solo-emulsão é o produto que é resultante da mistura de um determinado solo com emulsão asfáltica, que geralmente é do tipo catiônica, na presença ou não de fíler mineral ativo. Este conjunto solo-emulsão, é obtido com a utilização de equipamentos apropriados, onde a mistura é espalhada e compactada (ABEDA, 2011). A mistura solo-emulsão apresenta-se como uma ótima solução quando na região da construção há carência de materiais pétreos além de um elevado custo de transporte (Miceli Junior, 2009).

Com o passar dos anos, através da busca de formas mais simples de se fluidificar o asfalto, percebeu-se que a emulsão asfáltica é o principal agente da estabilização betuminosa. A principal função do material asfáltico na mistura solo-emulsão é conferir ao solo estabilizado um aumento na coesão, através da ação ligante do material asfáltico, e diminuir a permeabilidade do solo. O aumento da coesão é observado principalmente em solos arenosos, enquanto o efeito da diminuição da permeabilidade é maior em solos coesivos (Sant'Ana, 2009; Lima *et al*; 2019; Ingles e Metcalf, 1972).

Para que não ocorra a redução de atrito entre os grãos, a película de betume que recobre os grãos de solo deve ser fina. Quanto maior a quantidade de asfalto residual mais espessa será a película que envolve os grãos do solo, maior será a coesão entre os grãos e também menor será o atrito interno entre estes, em razão do efeito lubrificante gerado entre as partículas, que diminui o entrosamento entre estas, o que está intimamente ligado a perda de resistência cisalhante (Kézdi, 1979; Mattos, 1991; Gondim, 2008; Sant'Ana, 2009).

Vale salientar que a densidade máxima gerada na mistura solo-betume também é dependente da quantidade de emulsão asfáltica adicionada, porém, contudo, nem sempre o teor de emulsão que gera a máxima resistência é o mesmo responsável pela máxima densidade (Gondim, 2008). Sendo assim, o tipo de solo utilizado, a quantidade

de água presente nele e o tipo e teor de emulsão asfáltica estão intimamente ligados ao processo de dosagem da mistura solo-emulsão (Sant'Ana, 2009; Santos, 2009).

A escolha de um teor ótimo de ligante é de suma importância para estabilização de solos com emulsão e deve ser analisado com bastante cuidado. Para alcançar um teor ótimo de emulsão asfáltica, para qualquer parâmetro do solo a ser estudado, como resistência à compressão, resistência ao cisalhamento ou permeabilidade, é necessária a mistura do solo com diversos teores de emulsão, e a posterior realização de ensaios para analisar as variações quanto ao parâmetro no qual está sendo feita a dosagem (Miceli Junior, 2006).

Para que haja êxito na dosagem da mistura de solo e emulsão asfáltica, é necessário o entendimento do mecanismo da estabilização betuminosa, no qual existem duas teorias para explicação deste mecanismo, que são a chamada mistura íntima e a vedação modificada (Moreira, 2010).

Na teoria da mistura íntima considera-se que os grãos de solo são individualizados e estes são envoltos pela película betuminosa que mantém os grãos de solo unidos, agindo assim como um elemento ligante, dando coesão à mistura. Deve-se ter cuidado para que a quantidade de betume utilizada não seja exagerada, e que assim aja como um lubrificante, reduzindo a sua coesão. Essa teoria não é aplicada a solos coesivos, devido a este material possuir grande área superficial, no qual não é possível individualizar as partículas sem o uso de grandes quantidades de betume, o que tornaria a aplicação deste material onerosa (Moreira, 2010).

Na teoria da vedação modificada, o betume tem o objetivo de proteger a coesão hidráulica existente nos solos coesivos e evitar a lubrificação entre os grãos do solo. Desta maneira, o betume impede que a água tenha acesso aos grupamentos dos grãos do solo através da vedação dos seus poros, fornecendo ao conjunto estabilidade suficiente para o desenvolvimento da força coesiva. Neste caso, o betume age tanto como elemento impermeabilizante como cimentante (Moreira, 2010).

Não existe um consenso do teor ótimo de emulsão asfáltica para cada tipo de solo, para uso em pavimentação, no entanto, para materiais granulares, o intervalo de teor varia entre 2 e 4%, o que já seria suficiente para formação de um filme de betume na superfície dos grãos desse solo. E para solos plásticos, este teor ótimo de emulsão é maior, em torno de 8% (Miceli Júnior, 2006).

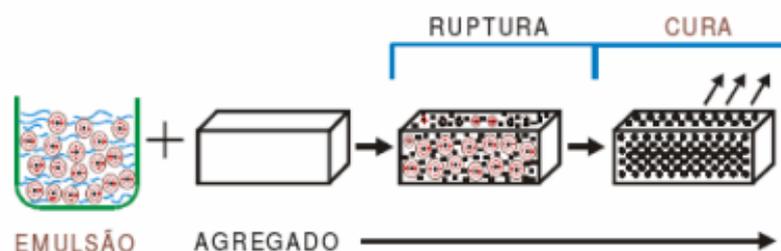
A cura das misturas solo-emulsão é de suma importância para que ocorram as reações entre estes dois materiais, no qual é durante este processo que ocorre a

evaporação da água presente na emulsão asfáltica, facilitando o surgimento do filme betuminoso sobre as partículas de solo (Gondim, 2008). Trata-se de uma etapa extremamente necessária, pois é nessa fase que a água presente na emulsão asfáltica evapora e assim é ocorre a cobertura da superfície dos agregados com o asfalto residual.

Quando a emulsão asfáltica entra em contato com a superfície de um agregado, parte da água que constitui a emulsão é adsorvida pelo grão de solo e a outra parte evapora devido a ação de intempéries ou reações químicas, rompendo a estabilidade que foi produzida no processo de emulsificação (Sant'Ana, 2009)

A ruptura da emulsão asfáltica também pode ser entendida como a união, coalescência, das gotículas de cimento asfáltico de petróleo (CAP) que estão dispersas na água, logo após o processo de compactação da mistura solo-emulsão. Já o processo de cura, pode ser definido como a continuação da perda de água, que ocorre simultaneamente com a estabilização do processo de ruptura da emulsão asfáltica, apresentadas na Figura 3.4 (Sant'Ana, 2009).

Figura 2.3 – Etapas da fabricação das misturas solo-emulsão.



Fonte: Costa, 2004.

O aumento da resistência à compressão de solos estabilizados com betume ocorre até um determinado valor ótimo do teor de betume, no entanto, este mesmo valor ótimo de betume e a resistência à compressão da mistura solo-emulsão aumentam de acordo com que o tempo de cura aumenta (Cristelo, 2011).

Miceli Júnior (2006) estudou o comportamento mecânico de solos do Rio de Janeiro estabilizados com emulsão asfáltica. O autor avaliou três solos com características diferentes, todos classificados pelo SUCS como areias siltosas, onde as variáveis investigadas eram o tipo de emulsão asfáltica empregada (RL-1C e RM-1C), o teor de emulsão (4% e 8% do peso do solo seco) e o tempo de cura (7 e 28 dias ao ar livre). O autor constatou que a adição de diferentes teores de emulsão asfáltica e os tempos de cura distintos interferem na resistência à compressão simples destes. Observando que esta resistência tende a aumentar também com o acréscimo do tempo de cura. Entretanto, para

solos finos não se deve atribuir este ganho de resistência em sua maior parte à adição de emulsão, pois mesmo sem o acréscimo deste material, foram obtidas maiores resistências devido a secagem ao ar livre.

Soliz (2007) estudou o comportamento mecânico de três solos com diferentes texturas, do estado do Rio de Janeiro, com distintos teores de emulsão asfáltica, através do ponto de vista da mecânica dos pavimentos. Os solos 1, 2 e 3 foram classificados através do sistema de classificação HRB em A-1-b, A-7-5 e A-2-4, respectivamente, e foram realizados ensaios que avaliassem a resistência à compressão simples destes solos. Para apenas um destes solos, o solo 1, que consistia em um material arenoso, foram realizados ensaios de resistência à compressão simples para os teores de 1, 2 e 3% de emulsão asfáltica do tipo RM-1C, para os tempos de cura de 7 e 28 dias. Constatou-se, que para todos os teores de emulsão asfáltica houve a tendência de crescimento da resistência à compressão simples de acordo com o aumento do tempo de cura e também em relação ao solo.

Gondim (2008) avaliou a estabilização betuminosa de três solos distintos, do estado do Ceará. Os solos A, B e C foram classificados pelo sistema de classificação HRB como A-2-4, A-4 e A-4, respectivamente. No qual, foi avaliado o emprego destes em camadas de bases de rodovias, através da adição de emulsão asfáltica do tipo RL-1C. A autora avaliou a resistência mecânica da mistura, onde as variáveis investigadas foram o teor de emulsão aplicado (2%, 5% e 8%), o tempo de cura seca ao ar livre (sem cura, 7 dias e 28 dias) e também a forma de distribuição da emulsão (distribuição uniforme ou em gradiente decrescente com a profundidade). Quanto aos resultados de resistência à compressão simples, verificou-se que os corpos de prova da mistura solo-emulsão ensaiados logo após a moldagem não obtiveram aumento da resistência, quando comparados com os corpos de prova contendo apenas solo. Demonstrando assim, que a adição de emulsão asfáltica não acarreta em ganhos de resistência à compressão simples de forma imediata. Em contrapartida, após o período de cura ao ar livre da mistura solo-emulsão, a adição do agente estabilizador é capaz de fornecer melhorias consideráveis quanto ao ganho de resistência à compressão simples.

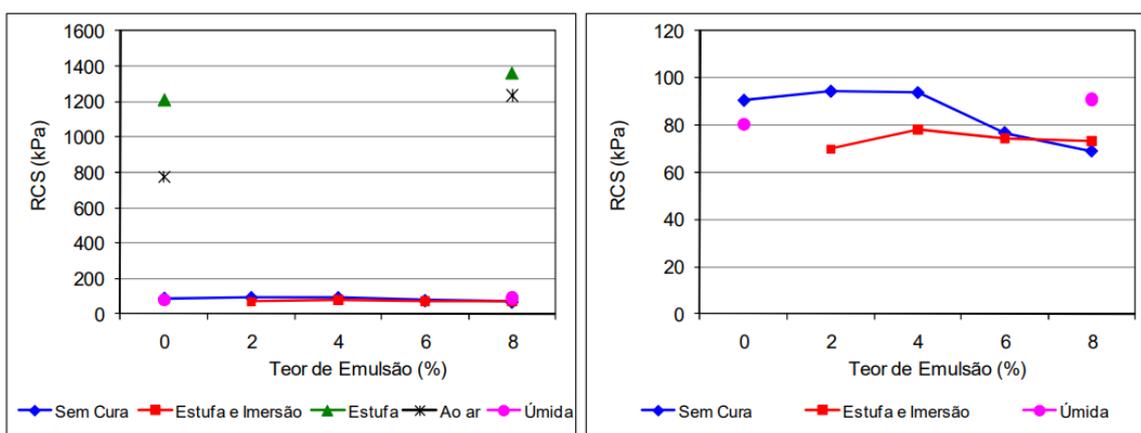
Tais resultados apresentaram comportamento distinto em relação ao tempo de cura para os solos granulares e coesivos, onde para o solo granular, a resistência à compressão simples possui a tendência de ser crescente de acordo com o tempo de cura. Já para as amostras de solo coesivo observou-se o aumento da resistência à compressão simples (RCS) para o tempo de cura de 7 dias, enquanto esta resistência sofreu uma queda

para o tempo de cura de 28 dias. Tais resultados podem ser explicados devido a resistência à compressão simples em solos granulares tender a crescer exponencialmente com a redução da umidade residual que ocorre com o passar do tempo de cura. No entanto, para solos coesivos, a resistência à compressão simples demonstra se relacionar com a umidade residual seguindo uma tendência parabólica, fazendo com que haja uma umidade residual ótima que conduz a uma máxima resistência à compressão (Gondim, 2008).

Jacintho (2010) estudou a técnica de solo-emulsão em barragens de terra. Para tal, a autora estudou três solos provenientes de diferentes localidades: solo Peixe (areia siltosa), solo Corumbá (areia argilosa) e solo Goiânia (solo argiloso), utilizando a emulsão asfáltica do tipo RL-1C. Foram realizados ensaios de caracterização, compactação, dosagem e determinação das propriedades hidráulicas e mecânicas.

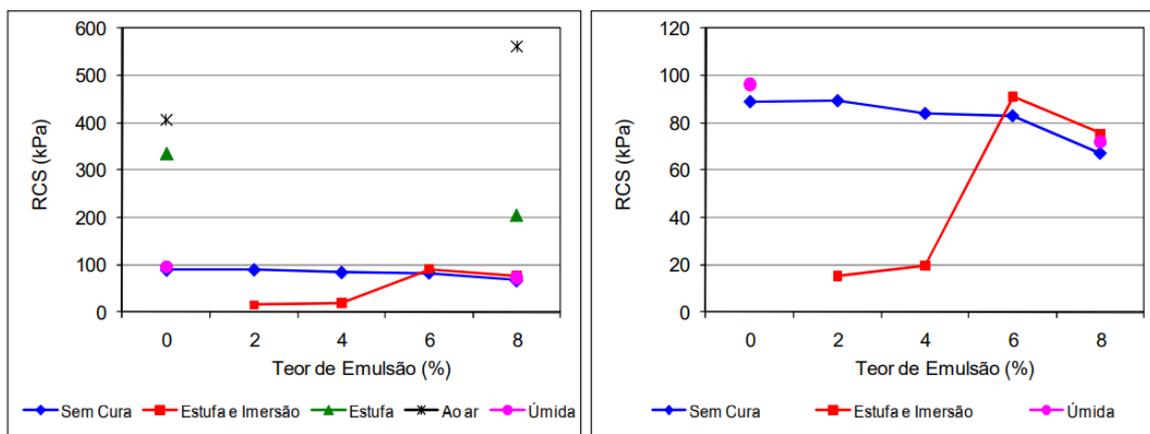
A partir dos ensaios de compressão simples e microscópio eletrônico de varredura, foi avaliado o processo de cura das misturas. Os ensaios foram realizados com teores de emulsão que variam de 0 a 8% (Figuras 4, 5 e 6). Foi observado que nos ensaios de resistência à compressão simples, em que houve a imersão em água logo após a secagem, este parâmetro diminuiu, ocasionada pela passagem do efeito de coesão aparente gerado pelo fenômeno da sucção. Para os três solos, foi verificado que resistência à compressão simples gerada está intimamente ligada ao grau de saturação do corpo de prova, que diminui com a ruptura da emulsão asfáltica, ou seja, que em sua maioria a responsável pelo ganho de resistência é a sucção e não a adição do material asfáltico, mesmo que esse possa gerar uma pequena parcela desta resistência (Jacintho, 2010).

Figura 2.4 - Variação da resistência à compressão simples com o teor de emulsão asfáltica - Solo Peixe.



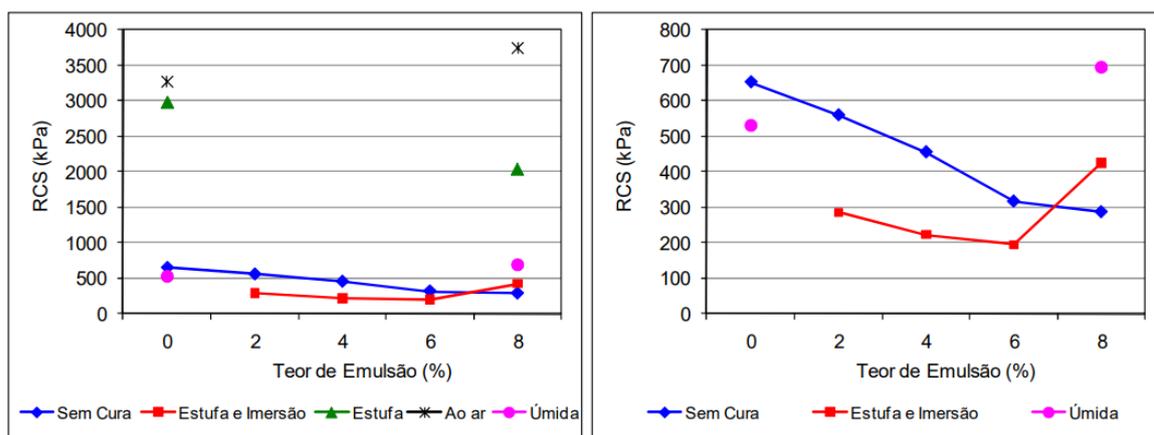
Fonte: Adaptado de Jacintho (2010).

Figura 2.5 - Variação da resistência à compressão simples com o teor de emulsão asfáltica - Solo Corumbá.



Fonte: Adaptado de Jacintho (2010).

Figura 2.6 - Variação da resistência à compressão simples com o teor de emulsão asfáltica - Solo Goiânia.



Fonte: Adaptado de Jacintho (2010).

Se tratando da resistência ao cisalhamento das misturas solo-emulsão, Jacintho (2010) obteve os valores de coesão e ângulo de atrito para os três solos estudados (Tabelas 3, 4 e 5), através do ensaio triaxial do tipo adensado isotropicamente e drenados (CID). Para a areia siltosa, a adição de da emulsão asfáltica não promoveu mudanças dos valores de coesão e ângulo de atrito, em termo de parâmetros efetivos. Para o segundo solo, a areia argilosa, a adição da emulsão asfáltica alterou os parâmetros de resistência ao cisalhamento, aumentando o seu ângulo de atrito (de 35° para 38,2) e diminuindo sua coesão (de 10 para 0 kPa), um resultado inconsistente diante do esperado devido a adição de um material betuminoso a um solo arenoso.

Tabela 2.3 - Coesão e ângulo de atrito - Solo Peixe.

Solo / Teor de emulsão	Parâmetros totais		Parâmetros efetivos	
	c (kPa)	$\phi$ (°)	c' (kPa)	$\phi'$ (°)
Solo Peixe – 0 %	156	36,4	2	35,8
Solo Peixe – 8 %	103	19,1	2	35,7

Fonte: Adaptado de Jacintho (2010).

Tabela 2.4 - Coesão e ângulo de atrito - Solo Corumbá.

Solo / Teor de emulsão	Parâmetros totais		Parâmetros efetivos	
	c (kPa)	$\phi$ (°)	c' (kPa)	$\phi'$ (°)
Solo Corumbá – 0 %	70	16,8	10	35
Solo Corumbá – 8 %	5	18,1	0	38,2

Fonte: Adaptado de Jacintho (2010).

Tabela 2.5 - Coesão e ângulo de atrito - Solo Goiânia.

Solo / Teor de emulsão	Parâmetros totais		Parâmetros efetivos	
	c (kPa)	$\phi$ (°)	c' (kPa)	$\phi'$ (°)
Solo Goiânia – 0 %	39	24,4	31	33,9
Solo Goiânia – 8 %	62	17,5	32	31,1

Fonte: Adaptado de Jacintho (2010).

E para o último, o solo argiloso, a autora observou que não houveram alterações significativas quanto a coesão, no entanto, o ângulo de atrito decresceu (de 33,9° para 31,1°), possivelmente em razão da lubrificação antes os grãos do solo devido a adição do material asfáltico. Em todos os casos, não houve um padrão nas mudanças em virtude da adição de emulsão asfáltica e nem alterações significativas da resistência ao cisalhamento, o que pode ter ocorrido devido aos baixos teores de emulsão asfáltica adicionados e também pelo ensaio triaxial ter sido executado em condições saturadas o que anulou o efeito da sucção.

Diferentemente dos autores citados acima, Lima (2016) e Pereira (2018) estudaram as misturas solo-emulsão com a adição de altos teores de emulsão asfáltica, da ordem de 13% a 31% de emulsão asfáltica com solos arenosos, em massa.

Lima (2016) realizou inúmeras combinações de procedimentos de compactação e dosagem, como a mistura da emulsão asfáltica do tipo RL-1C com o solo

arenoso do tipo SP-SM (areia siltosa mal graduada) sob metodologias de compactação diferentes (Proctor normal, Proctor modificado e Marshall), sem e com aquecimento da mistura (100°C), com a compactação imediata ou após 24 horas da mistura dos dois materiais e também com e sem a adição de água ao conjunto (Tabela 2.6).

Tabela 2.6 – Resumo dos procedimentos adotados para a compactação das misturas solo-emulsão.

<b>Metodologia de compactação</b>	<b>Código</b>	<b>Temperatura de compactação</b>	<b>Condições de compactação</b>
<i>Proctor Normal</i>	PN1	Temperatura ambiente (aprox. 25°C)	Imediata
<i>Proctor Normal</i>	PN24	Temperatura ambiente (aprox. 25°C)	Após 24 horas da preparação da mistura
<i>Proctor Modificado</i>	PM24	Temperatura ambiente (aprox. 25°C)	Após 24 horas da preparação da mistura
<i>Marshall</i>	M24	Temperatura ambiente (aprox. 25°C)	Após 24 horas da preparação da mistura
<i>Proctor Normal</i>	PNQ	100°C	Após 24 horas da preparação da mistura
<i>Proctor Modificado</i>	PMQ	100°C	Após 24 horas da preparação da mistura
<i>Marshall</i>	MQ	100°C	Após 24 horas da preparação da mistura
<i>Proctor Modificado</i>	PMA	Temperatura ambiente (aprox. 25°C)	Após 24 horas da preparação da mistura, com acréscimo de água

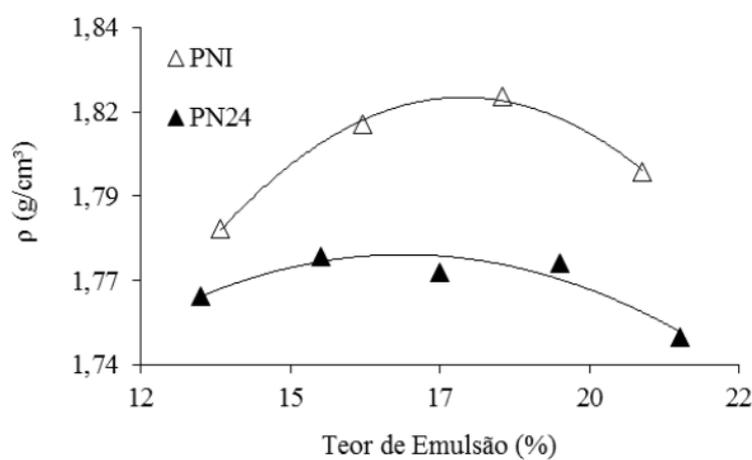
Fonte: Adaptado de Lima (2016).

A autora estudou todas estas condições com o intuito de se obter qual metodologia de compactação e dosagem ofereciam maiores massas específicas aparentes para a mistura e o quanto cada um destes diferentes procedimentos interferiam nas características da mistura solo emulsão.

Primeiramente, Lima (2016) avaliou se a compactação da mistura dos altos teores de emulsão asfáltica com a areia imediatamente após a junção dos dois materiais ou 24 horas após a mistura de ambos interferia nas curvas de compactação dos mesmos.

Os resultados indicaram que nas misturas em que a compactação foi realizada 24 horas após a mistura, houve uma diminuição dos valores da massa específica aparente (Figura 2.7). Tais resultados podem ser atribuídos à dificuldade de aproximação dos grãos minerais do solo, devido ao aumento da rigidez do filme betuminoso após a ruptura da emulsão asfáltica, quando esta é comparada à compactação realizada imediatamente após a mistura entre o solo e o material betuminoso.

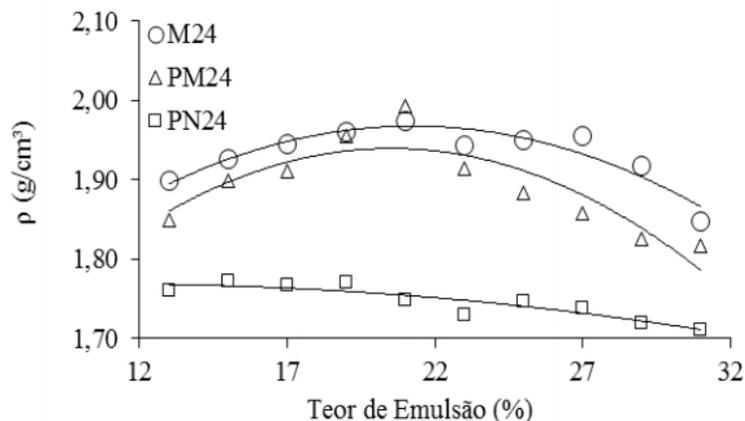
Figura 2.7- Compactação imediata e 24 horas após a mistura na energia Proctor Normal.



Fonte: Adaptado de Lima (2016).

Lima (2016) constatou que o aumento da energia de compactação proporcionou uma definição mais clara das curvas de compactação das misturas solo-emulsão. Em que, para maiores energias, Marshall e Proctor Modificado, todos os valores da massa específica aparente são superiores aos das misturas que foram compactadas com uma energia inferior, Proctor Normal (Figura 2.8). Tais resultados foram explicados em função de uma maior energia ser capaz de fornecer uma maior deformação do filme betuminoso residual que envolve os grãos de solo presentes na mistura solo-emulsão, o que acarreta a um estado mais compacto das misturas.

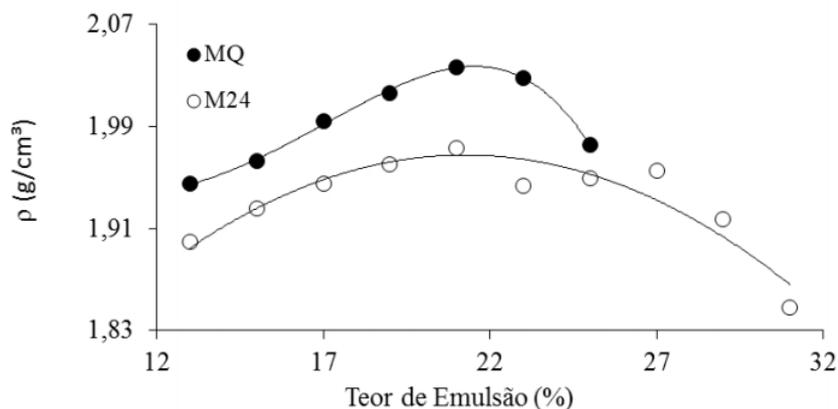
Figura 2.8 -Influência da energia de compactação nos valores da massa específica aparente das misturas entre o solo e elevados teores de emulsão.



Fonte: Adaptado de Lima (2016).

O aquecimento das misturas entre solo e altos teores de emulsão asfáltica também foi outra condição que foi estudada por Lima (2016). Em que, a autora constatou que as misturas que eram aquecidas à 100°C possuíam massas específicas aparentes superiores as que eram compactadas à temperatura ambiente. Tais resultados são explicados em função do aumento de temperatura diminuir a rigidez do filme betuminoso que surgiu após a mistura dos dois materiais.

Figura 2.9 –Compactação quente e 24 horas após a mistura na energia Marshall.



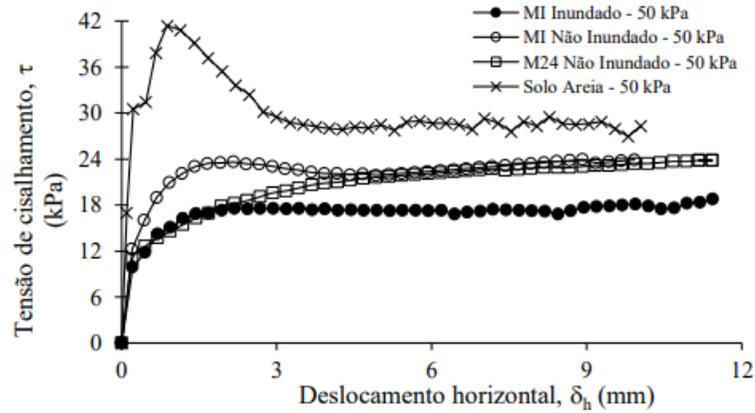
Fonte: Adaptado de Lima (2016).

Pereira (2018) estudou a resistência ao cisalhamento das misturas entre o solo, uma areia siltosa (SM), e altos teores de emulsão asfáltica. Foram estudadas as amostras compactadas sobre a energia Marshall, que foram compactadas imediatamente e também

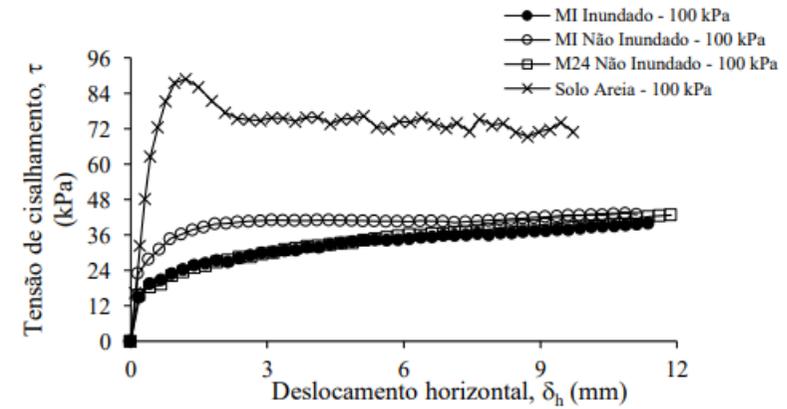
24 horas após a mistura da emulsão asfáltica com o solo, para que assim fossem analisados os parâmetros de resistência ao cisalhamento, coesão e ângulo de atrito, em misturas compactadas com diferentes rigidezes para o ligante asfáltico.

Os parâmetros de resistência foram obtidos através do ensaio de cisalhamento direto com e sem inundação por água, em que os corpos de prova eram confeccionados com as massas específicas aparentes máximas com seus respectivos teores ótimos de emulsão. Foram obtidos os resultados para os ensaios de cisalhamento direto da 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, para as tensões normais de 50 kPa, 100 kPa, 200 kPa e 400 kPa. As deformações específicas para cada uma das tensões de cisalhamento são apresentadas na Figura 2.10.

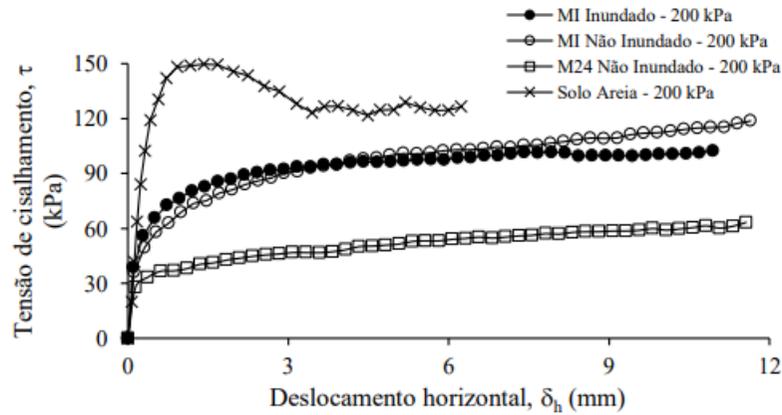
Figura 2.10 – Comparação entre o comportamento cisalhante das misturas solo-emulsão e do solo SM.



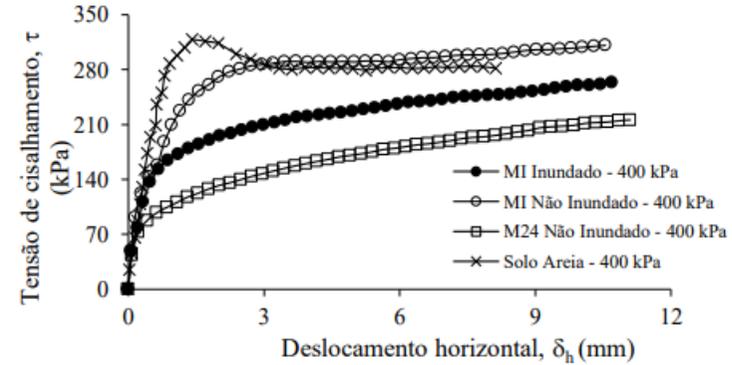
(a) Tensão normal de 50 kPa.



(b) Tensão normal de 100 kPa.



(c) Tensão normal de 200 kPa.



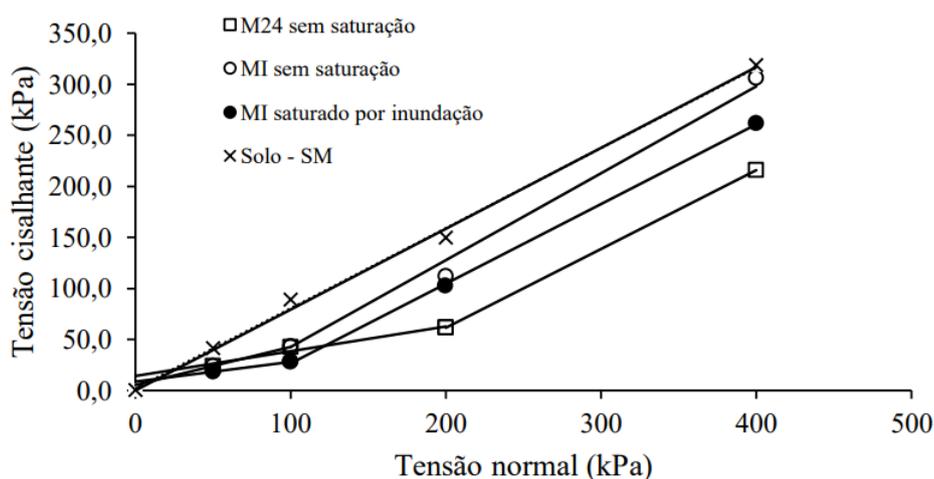
(d) Tensão normal de 400 kPa.

Fonte: Adaptado de Pereira (2018)

Pereira (2018) observou que a areia compactada (SM) apresenta uma resistência de pico bem definida para todos os níveis de tensões normais, diferentemente do que acontece com as misturas solo-emulsão, testadas com e sem saturação. O autor também observa que para as misturas solo-emulsão, exceto a compactada com a energia Marshall após 24 horas da mistura e submetida à tensão normal de 400 kPa, em todos os corpos de prova não há um aumento significativo da resistência após a ruptura. As misturas solo-emulsão apresentam em geral resistência ao cisalhamento de pico e rigidezes cisalhantes inferiores as que são obtidas para o solo SM compactado, tal comportamento pode ser atribuído ao caráter viscoso do filme do asfalto residual que envolve os grãos de solo.

A partir das envoltórias de ruptura das misturas solo-emulsão obtidas através dos valores máximos obtidos para as tensões cisalhantes e para as tensões normais aplicadas, Pereira (2018) observou uma bilinearidade das envoltórias de resistência das misturas solo-emulsão, o que faz com que o comportamento destas misturas possa ser definido a partir de dois níveis de carregamento. Para os baixos níveis de carregamento nas misturas entre solo e elevados teores de emulsão asfáltica, o filme de asfalto residual comanda o mecanismo de cisalhamento, que confere ao material um intercepto coesivo pela ação ligante da emulsão e atrito pelo intertravamento dos grãos envolvidos pelo filme de asfalto residual.

Figura 2.11 - Envoltórias das tensões cisalhantes na ruptura em função da tensão normal efetiva.



Fonte: Adaptado de Pereira (2018).

Tabela 2.7 - Coesão e ângulo de atrito efetivos - baixos níveis de carregamento.

Procedimento utilizado	Teor de emulsão (%)	Parâmetros efetivos	
		c' (kPa)	$\phi'$ (°)
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: Adaptado de Pereira (2018).

Tabela 2.8 - Coesão e ângulo de atrito efetivos - altos níveis de carregamento.

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

Fonte: Adaptado de Pereira (2018).

Pereira (2018) explica o comportamento cisalhante da mistura para os altos níveis de carregamento apenas pelo atrito entre os grãos dos minerais, pois acredita que nesse intervalo de tensões, há uma completa remoção do filme plástico nos contatos, fazendo com que o atrito grão a grão se sobressaia diante da ação ligante que é conferida pelo asfalto residual.

O autor também observa que a inundação dos corpos de prova também exerce influência na resistência ao cisalhamento das misturas estudadas. No qual, os corpos de prova que foram ensaiados sem inundação apresentem maior rigidez cisalhante e maior resistência ao cisalhamento do que os que foram ensaiados após a inundação dos corpos de prova. O aumento tanto da rigidez como da resistência ao cisalhamento pode ser atribuído por haver a presença da sucção mátrica nos corpos de prova ensaiados sem a inundação.

## 2.4 Considerações parciais

A revisão bibliográfica apresentada auxiliou para que fossem adquiridos os conhecimentos necessários dos conceitos básicos relacionados a emulsão asfáltica e estabilização de solo, tendo um enfoque maior na estabilização betuminosa com o uso de

emulsão asfáltica. Percebe-se que essa técnica vem sendo utilizada há alguns anos por pesquisadores, mas geralmente, estas pesquisas são relacionadas a área de pavimentação, por a mistura solo-emulsão ser bastante utilizada em bases e sub-bases de pavimentos.

Atualmente, algumas pesquisas, apesar de escassas, utilizam-se da emulsão asfáltica para estabilização de solos, mas com enfoque maior na área da geotecnia, principalmente para núcleos de barragens de terra.

Tendo em vista, estas duas áreas, pavimentação e geotecnia, também foram expostos os resultados, análises e conclusões de algumas pesquisas relacionadas a ambos os ramos de pesquisa. Em que, era dada ênfase aos resultados relacionados as características mecânicas das misturas solo-emulsão, através de ensaios de resistência à compressão simples, ensaio de cisalhamento direto e ensaios de compressão triaxial. Focando-se também em resultados relacionados a influência do tempo de cura das misturas e ao tempo de aeração, e o que estes períodos ocasionavam no comportamento mecânico destas.

## **3 MATERIAIS E MÉTODOS**

### **3.1 Introdução**

Neste capítulo são apresentadas as informações mais relevantes quanto aos materiais utilizados e os procedimentos realizados para o desenvolvimento da pesquisa sobre o efeito da cura na resistência ao cisalhamento nas misturas de solo com altos teores de emulsão asfáltica.

Inicialmente, serão descritas as características do solo utilizado na pesquisa, descrevendo os ensaios realizados com o mesmo. Posteriormente, serão apresentadas as características da emulsão asfáltica utilizada, seguidos dos procedimentos para dosagem e preparação dos corpos de prova de solo-emulsão e as metodologias de ensaios laboratoriais que foram realizados a fim de permitir o estudo da influência do tempo de cura nas propriedades de resistência ao cisalhamento da mistura, tanto para as amostras saturadas como não saturadas.

### **3.2 Solo utilizado na confecção das misturas solo-emulsão**

A pesquisa realizada é continuidade dos estudos feitos inicialmente por Lima (2016) e posteriormente por Pereira (2018). Sendo assim, foi utilizado um material com características semelhantes aos utilizados pelos autores citados, ou seja, um solo arenoso que não apresentasse coesão e possuísse uma alta permeabilidade.

O material foi coletado dentro dos limites do *Campus* do Pici da Universidade Federal do Ceará (UFC), no sítio de coordenadas UTM 3°45'10,080''S e 38°34'22,800''W, no município de Fortaleza, estado do Ceará. Foram realizadas duas coletas de material em períodos distintos, em razão da quantidade de ensaios realizados, no qual foi retirada a camada superficial de solo, contendo matéria orgânica, e assim foram coletadas as amostras a uma profundidade de 0,20 metros. As Figuras 3.1 e 3.2, a seguir, mostram o local onde a amostra foi retirada e a coleta do solo utilizado na pesquisa, respectivamente.

Figura 3.1 - Local de retirada da amostra de solo



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 3.2 - Coleta da amostra de solo



Fonte: Elaborado pela autora.

### 3.3 Classificação do solo

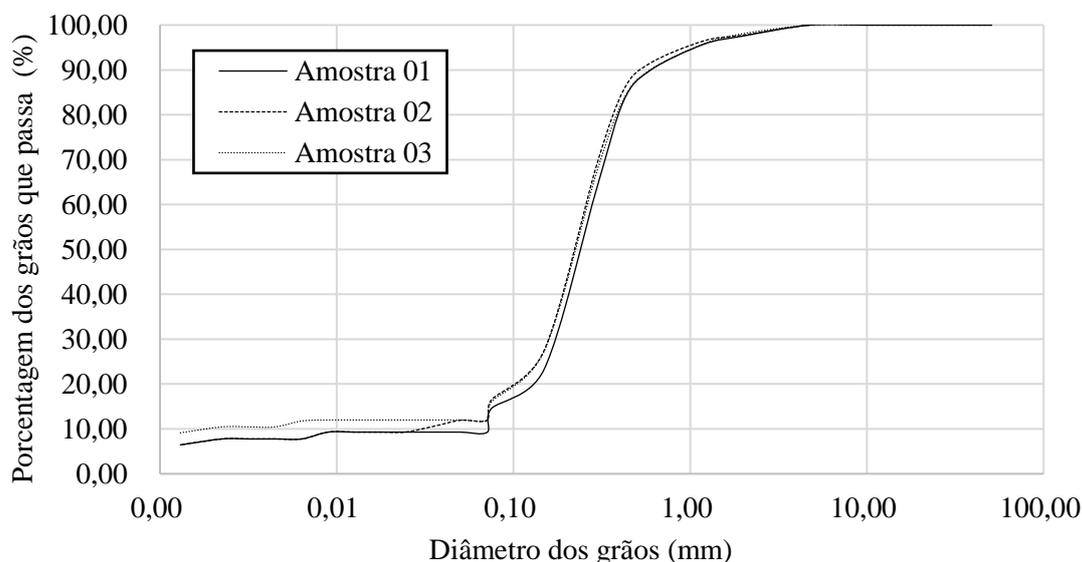
Os ensaios executados para caracterização do solo utilizado no desenvolvimento da pesquisa foram realizados no Laboratório de Mecânica dos Solos e Pavimentação (LMSP) da Universidade Federal do Ceará (UFC), onde foram empregados os seguintes métodos de ensaio:

- NBR 6457:2016 – Amostras de Solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização - Método de ensaio;
- NBR 6459:2016 – Solo – Determinação do limite de liquidez - Método de Ensaio;

- NBR 7180:2016 – Solo – Determinação do limite de plasticidade - Método de Ensaio;
- NBR 7181:2016 – Solo – Análise granulométrica - Método de ensaio;
- NBR 7182:2016 – Solo – Ensaio de compactação - Método de Ensaio;
- NBR 12770:1992 – Solo coesivo – Determinação da resistência a compressão não confinada – Método de ensaio;
- DNER – ME 093:1994 – Solos – Determinação da densidade real - Método de ensaio.

A densidade relativa das partículas constituintes do solo é de 2,65, o que corresponde um valor de peso específico dos grãos desse material de 25,99 kN/m<sup>3</sup>. Por meio do ensaio de granulometria do solo, onde foram realizados tanto peneiramento como a sedimentação com adição de defloculante (solução de hexametáfosfato de sódio), foram obtidas as seguintes proporções médias de materiais: 2,19% de areia grossa, 13,78% de areia média, 72,96% de areia fina, 2,41% de silte e 8,66% da fração argila, de acordo com a classificação da ABNT (Pinto, 2006). A Figura 3.3 apresenta o resultado das curvas granulométricas obtidas para as três amostras do solo ensaiadas.

Figura 3.3 - Curvas granulométricas das três amostras de solo estudadas



Fonte: Elaborado pela autora.

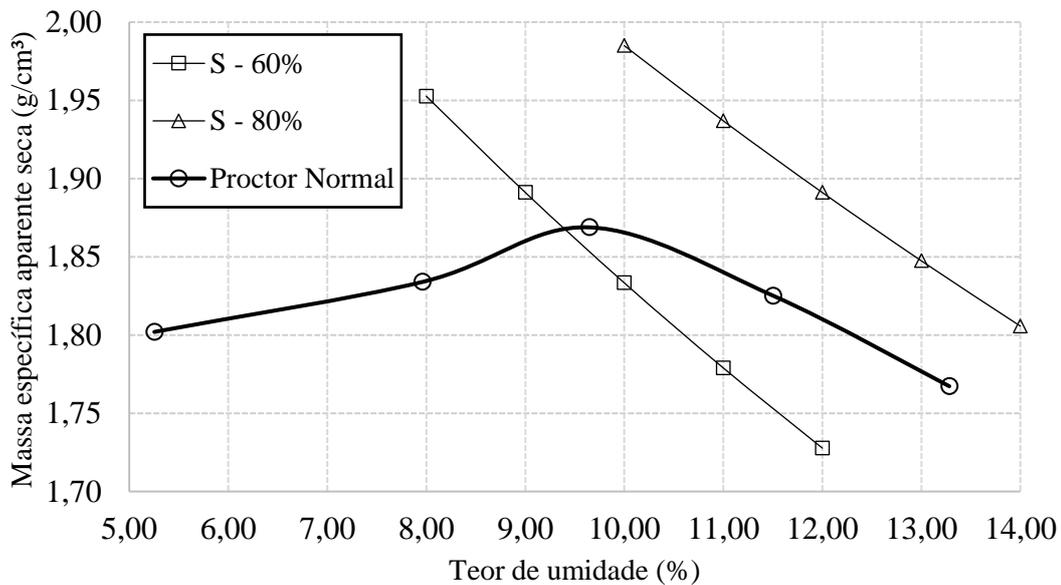
Tendo como base os resultados do ensaio de granulometria para determinação do Coeficiente de Não Uniformidade (CNU) e do Coeficiente de Curvatura do Solo (CC), foram obtidos os resultados de 30 e 13,3, respectivamente, o que define o solo como não uniforme e

mal graduado. Quanto aos índices de consistência, o solo ensaiado foi classificado como não líquido (NL) e não plástico (NP), que por sua vez, são características oriundas de solos arenosos.

O solo utilizado para a realização da pesquisa, na confecção das amostras dos corpos de prova das misturas de solo-emulsão, trata-se de uma areia-siltosa (SM), de acordo com o Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS). Por ser um material de caráter granular, não coesivo, com baixa compressibilidade, ângulo de atrito interno elevado e alta permeabilidade, a utilização da emulsão asfáltica como agente estabilizante tende a melhorar suas características diminuindo a permeabilidade e aumentando a coesão (Lima, 2016; Pereira, 2018).

Nos resultados do ensaio de compactação, realizado com a energia de Proctor Normal, fora obtida uma massa específica aparente seca máxima de  $1,85 \text{ g/cm}^3$ , com teor ótimo de umidade de 9,65%, compreendida entre o intervalo de grau de saturação de 60 e 80%, conforme mostrado na Figura 3.4.

Figura 3.4 - Curva de compactação do solo - Energia Proctor Normal



Fonte: Elaborado pela autora.

A Tabela 3.1 apresenta um resumo dos resultados que foram obtidos por meio dos ensaios realizados com as amostras de solo coletadas.

Tabela 3.1 Resumo dos parâmetros do solo em estudo

<b>Parâmetros</b>	<b>Resultados</b>
Massa específica aparente seca máxima (g/cm <sup>3</sup> )	1,85 g/cm <sup>3</sup>
Umidade ótima (%)	9,65%
Limite de liquidez (%)	NL
Limite de plasticidade (%)	NP
Densidade real do solo	2,64
Classificação SUCS	SM

Fonte: Elaborado pela autora.

### 3.4 Emulsão asfáltica

A emulsão asfáltica utilizada neste estudo foi a mesma utilizada por Lima (2016) e por Pereira (2018), e trata de uma emulsão do tipo catiônica de ruptura lenta (RL-1C), fornecida pela empresa Asfalto Nordeste. Os ensaios para caracterização desta emulsão asfáltica foram realizados no próprio laboratório da empresa, onde foram seguidos 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.

A Tabela 3.2 apresenta as especificações ditadas pela resolução ANP N° 32, de 14 de outubro de 2009, bem como os respectivos resultados obtidos para a emulsão asfáltica utilizada.

Tabela 3.2 - Especificações e parâmetros obtidos para a emulsão RL-1C utilizada

<b>Ensaio realizado</b>	<b>Especificações - IBP/ABNT</b>	<b>Resultados</b>
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: Elaborado pela autora.

### 3.5 Procedimentos de mistura entre o solo e a emulsão asfáltica

Os procedimentos realizados para a mistura entre o solo e a emulsão asfáltica são descritos a seguir, sendo ilustrados pela Figura 3.5:

- i. Destorroamento do solo com auxílio da mão de gral e do almofariz (Figura 3.5-a);
- ii. Homogeneização da amostra de solo;
- iii. Utilização do repartidor de amostras até se obter uma redução do material de maneira representativa (Figura 3.5-b);
- iv. Secagem em estufa à 100°C, por 24 horas, no mínimo (Figura 3.5-c);
- v. Resfriamento do solo à temperatura ambiente (Figura 3.5-d);
- vi. Pesagem do solo e da emulsão asfáltica a ser utilizada na mistura na porcentagem desejada (Figura 3.5-e);
- vii. Colocação, aos poucos, da emulsão asfáltica no solo (Figura 3.5-f);
- viii. Mistura do solo com a emulsão asfáltica por aproximadamente 5 minutos, manualmente (Figura 3.5-g);
- ix. Quando visivelmente homogênea, a mistura solo-emulsão foi submetida aos procedimentos de compactação (Figura 3.5).

Figura 3.5 – Procedimentos de mistura entre solo e emulsão asfáltica



(a) Destorroamento do solo.



(b) Uso do repartidor de amostras



(c) Secagem na estufa.



(d) Resfriamento do solo.



(e) Pesagem dos materiais.



(f) Colocação da emulsão no solo.



(g) Mistura dos materiais manualmente.



(h) Materiais homogeneizados.

Fonte: Elaborado pela autora.

### **3.6 Compactação das misturas de solo com altos teores de emulsão asfáltica**

Para as misturas de solo com altos teores de emulsão asfáltica, foi utilizada a metodologia Marshall, de acordo com as recomendações da norma DNER – ME 107/94 – Mistura betuminosa à frio, com emulsão asfáltica – ensaio Marshall, o equipamento utilizado para a realização dos ensaios de compactação sob estas condições está apresentado na Figura 3.6.

Tal metodologia de compactação foi adotada em razão de que nas pesquisas de Lima (2016) e Pereira (2018), o ensaio Marshall fornecia as maiores densidades em comparação as outras metodologias adotadas nestas pesquisas. Os teores iniciais de emulsão asfáltica e alguns dos procedimentos utilizados para realização das compactações foram baseados nas pesquisas de Pereira (2018).

Foram realizadas duas formas distintas de compactação das misturas solo-emulsão asfáltica. O primeiro tipo de compactação das misturas consistiu em após a homogeneização das amostras de solo-emulsão, conforme apresentado no item 3.5, estas era imediatamente compactada sob a energia Marshall, e este tipo de compactação foi denominado Marshall imediato (MI).

Já a segunda forma de compactação das misturas foi realizada homogeneizando as amostras de solo-emulsão e posteriormente deixando-as em repouso e ao livre pelo período de 24 horas, para que houvesse um tempo de aeração da mistura, e após o passar deste período as misturas eram compactadas, também sob energia Marshall, de modo a se analisar o comportamento da mistura em função da rigidez do ligante asfáltico. Este tipo de compactação foi denominado Marshall 24 horas (M24).

Figura 3.6- Equipamento de compactação Marshall



Fonte: Elaborado pela autora.

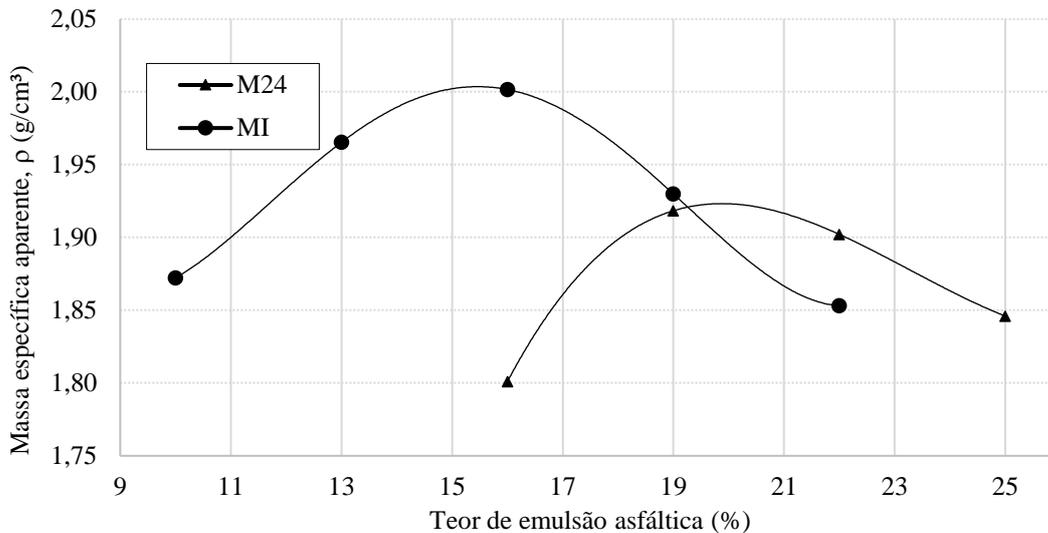
A Tabela 3.3 mostra as características das misturas entre solo e elevados teores de emulsões ensaiadas, quais sejam: as misturas compactadas na energia Marshall imediatamente após a o procedimento de mistura entre solo e emulsão asfáltica (MI); e as misturas compactadas na energia Marshall 24 horas após o procedimento de mistura entre os materiais constituintes (M24). Na Figura 3.7 são apresentadas as curvas de compactação obtidas para as misturas MI e M24, a partir das quais observa-se que as massas específicas aparentes máximas foram de 2,0 g/cm<sup>3</sup> e 1,93 g/cm<sup>3</sup>, para teores de emulsão de 16% e 19%, respectivamente.

Tabela 3.3- Características das misturas entre solo e elevados teores de emulsão asfáltica

<b>Procedimento</b>	<b>Metodologia de compactação</b>	<b>Código</b>	<b>Condições de compactação</b>
1	Marshall	MI	Imediata
2	Marshall	M24	Após 24 horas de preparação da mistura

Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 3.7- Curvas de compactação das misturas solo e emulsão asfáltica.



Fonte: Elaborado pela autora.

Os índices físicos utilizados nos estudos da compactação, da resistência à compressão simples e resistência ao cisalhamento das misturas de solo e altos teores de emulsão asfáltica, que também foram utilizados por Pereira (2018) em sua pesquisa, são: massa específica aparente, massa específica asfáltica, massa de solo seco, massa específica do sólido da mistura, massa específica aparente do sólido da mistura, índice de vazios da amostra solo-emulsão, grau de saturação da mistura solo-emulsão, porcentagem de vazios na mistura, porcentagem de volume de betume e porcentagem de vazios em relação aos grãos minerais na mistura.

### 3.7 Confeção dos corpos de prova e tempos de cura para os ensaios de resistência à compressão simples e resistência a compressão triaxial

Os corpos de prova da mistura solo e emulsão asfáltica foram provenientes do processo de compactação, com o teor de emulsão ótimo e massa específica aparente máxima obtidos no ensaio de compactação, descrito no item 3.6. Ou seja, para estes ensaios mecânicos, foram utilizados, unicamente, os teores ótimos de emulsão asfáltica obtidos nos ensaios de compactação das misturas solo-emulsão, que foram de 16% para a mistura MI, e 19% para a mistura M24. Tais teores foram utilizados por fornecerem as maiores densidades das misturas.

As compactações dos corpos de prova eram realizadas dinamicamente no compactador MCT (Miniatura, Compactado, Tropical) (Figura 3.9), cujo martelo do equipamento possui o peso de 2270g e uma altura de queda de 305 mm. A amostra de solo e

emulsão era colocada em um molde metálico devidamente lubrificado e eram aplicados golpes a este material.

Figura 3.8- Compactador MCT.



Fonte: Elaborado pela autora

No total, foram realizadas 4 camadas com 25 mm de espessura, aproximadamente, no qual eram aplicados 50 golpes em cada uma destas camadas, totalizando 200 golpes ao corpo de prova, conforme ilustrado na Figura 3.9. Tal quantidade de golpes, foi adotada devido ser a que proporcionasse a massa específica aparente máxima obtida nos ensaios de compactação. Para garantir uma ligação eficiente entre as camadas do corpo de prova, fornecendo ao material uma condição de maior homogeneidade, eram realizadas ranhuras no término de cada uma das camadas (Figura 3.10).

Figura 3.9 –Ranhura entre as camadas do corpo de prova.



Fonte: Elaborado pela autora.

Para os corpos de prova compostos apenas de solo, a compactação era realizada de forma semelhante ao descrito anteriormente, mas com o objetivo de alcançar o teor ótimo de água e a massa específica aparente seca máxima, que foram obtidos no ensaio de compactação do solo. Entretanto, a quantidade de golpes e de camadas eram inferiores ao da mistura solo - emulsão asfáltica, sendo realizadas apenas duas camadas de 50 golpes, totalizando 100 golpes ao corpo de prova.

Por fim, os corpos de prova (Figura 3.10) eram pesados e medidos, devendo possuir uma altura média aproximada de 100 mm e um diâmetro médio aproximado de 50 mm. Com estes resultados eram verificadas as suas massas específicas aparentes, com o intuito de averiguar se os graus de compactação dos corpos de prova estavam de acordo com o previsto.

Figura 3.10 – Corpos de prova após a compactação.



Fonte: Elaborado pela autora.

Nos casos em que se aplica, após compactados os corpos de prova contendo solo e emulsão asfáltica estes eram expostos ao ar livre, para que ocorresse o processo de cura do conjunto e ruptura da emulsão asfáltica, para que, desta forma, fosse possível a evaporação da água presente na emulsão asfáltica e assim surgisse o filme betuminoso sobre as partículas de solo.

As misturas solo e emulsão asfáltica foram curadas por três tempos distintos, sendo estes 1 (um), 7 (sete) e 28 (vinte e oito) dias, com o objetivo de analisar até qual período os processos de ruptura e cura, em que conseqüentemente há a redução do teor de umidade dos corpos de prova de solo e emulsão asfáltica, interferem na resistência à compressão simples e na resistência à compressão triaxial do material.

### **3.8 Ensaio de resistência à compressão simples**

Os ensaios de resistência à compressão simples, tanto das amostras compostas apenas por solo como também das misturas solo-emulsão, foram realizados de acordo com os procedimentos ditados pela NBR 12770/1992 - Solo coesivo – determinação da resistência à compressão não confinada.

Os corpos de prova foram provenientes da compactação do solo com a emulsão asfáltica, com o teor de emulsão ótimo e massa específica aparente máxima obtidos no ensaio de compactação da mistura, e também da compactação dos corpos de prova de areia, com o teor de umidade ótimo e massa específica aparente máxima obtidos no ensaio de compactação do solo, conforme descrito no item 3.7. Os corpos de prova foram moldados em triplicata para cada tempo de cura da mistura solo-emulsão, 1 (um), 7 (sete) e 28 (vinte e oito) dias, e para as amostras de solo compactado.

O carregamento no corpo de prova foi aplicado de modo que a taxa de deformação axial específica fosse constante, a uma velocidade de 1,2192 mm/min, e o carregamento só era prosseguido até que os valores da carga aplicada diminuíssem com a evolução dos deslocamentos.

### **3.9 Ensaio de compressão triaxial**

Os ensaios foram realizados tanto para amostras saturadas como para amostras não saturadas. Os procedimentos adotados para realização do ensaio de compressão triaxial CIU, em condições saturadas, seguiram as recomendações dadas por Head (1986).

A escolha do tipo do ensaio triaxial do tipo consolidado isotropicamente não drenado (CIU), utilizado na condição saturada, ocorreu devido à dificuldade da dissipação das pressões neutras na ruptura do corpo de prova, em razão da adição de emulsão asfáltica ao solo que o tornou menos permeável, se comportando de maneira semelhante a uma argila, o que deixaria o procedimento bastante demorado.

#### ***3.9.1 Saturação das linhas do equipamento e montagem do ensaio***

Antes da montagem do ensaio de compressão triaxial, na condição saturada, todas as linhas da base da célula de carga eram testadas, bem como a linha do “top cap” em relação a entupimentos, e em seguida saturadas para que houvesse a eliminação de bolhas dentro do

sistema. Tal processo era realizado através da percolação de água pela tubulação do equipamento.

Previamente, eram separados todos os itens necessários para a montagem do ensaio e as membranas eram testadas. O primeiro passo para a montagem consistia em posicionar a primeira pedra porosa e um papel filtro, ambos com o mesmo diâmetro do corpo de prova e saturados sobre o pedestal (Figura 3.12).

Figura 3.11- Posicionamento das pedras porosas e do corpo de prova.



Fonte: Elaborado pela autora.

Posteriormente, o corpo de prova era colocado sobre o papel filtro, e este era envolto por papel saturado, de modo a facilitar a sua saturação. Novamente, eram acrescentados o conjunto de papel filtro e pedra porosa saturados sobre o corpo de prova. O restante da montagem seguiu a rotina convencional ditada por Head (1986). A Figura 3.13 apresenta a montagem do corpo de prova na célula triaxial, logo após colocação da membrana de borracha.

Figura 3.12- Corpo de prova após envolto com a membrana de borracha



Fonte: Elaborado pela autora.

Na condição não saturada, os corpos de prova eram montados na célula de carga de maneira semelhante à condição saturada, porém, neste caso, não havia saturação prévia das linhas de drenagem e de aplicação de contrapressão. Também não eram saturadas as pedras porosas, o papel filtro e o corpo de prova, não havendo, assim, nem a fase de saturação do corpo de prova e nem a fase de adensamento. E a umidade referente a cada corpo de prova era a que ocorria em razão da água que ainda constituía a mistura, mesmo após a ruptura da emulsão asfáltica.

### ***3.9.2 Saturação dos corpos de prova***

A saturação dos corpos de prova foi realizada através de duas técnicas: percolação e contrapressão, respectivamente. Inicialmente, era aplicada uma tensão efetiva de confinamento de 10 kPa. A técnica de saturação por percolação foi a primeira a ser realizada, e tinha duração mínima de 4 horas. O sentido do fluxo de água através do corpo de prova era de baixo para cima, e o gradiente hidráulico gerado no conjunto era insuficiente para causar a desestruturação do corpo de prova. Tal técnica só pode ser desenvolvida devido a rigidez da mistura solo-emulsão.

Logo após a saturação por percolação, era realizada a técnica de saturação por contrapressão, tal metodologia consiste no aumento da contrapressão a um nível de pressão alta o suficiente para que a água seja capaz de dissolver o ar que é encontrado nos vazios do corpo de prova. Eram aplicados no corpo de prova estágios de carga simultâneos de 50 kPa, tanto na tensão efetiva de confinamento como na contrapressão, mantendo sempre a tensão efetiva de confinamento de 10 kPa, onde a contrapressão era aplicada no topo do corpo de prova e medida na sua base. A Figura 3.14 apresenta o corpo de prova dentro da célula na prensa do triaxial.

Figura 3.13 – Montagem final da célula na prensa do aparelho triaxial



Fonte: Elaborado pela autora.

A fim de se verificar se o grau de saturação do corpo de prova era considerado satisfatório, era calculado o parâmetro B de Skempton, que é expresso pela Equação 3.1:

$$B = \frac{\Delta u}{\Delta \sigma_c} \quad (3.1)$$

Onde:

- $\Delta u$ : excesso de poropressão gerado;
- $\sigma_c$ : acréscimo de tensão confinante aplicado.

Foram considerados admissíveis valores do parâmetro de Skempton B maiores ou iguais a 0,95 e eram alcançadas as saturações do corpo de prova para tensões confinantes superiores a 200 kPa.

Para que fossem conseguidas as condições de saturação por contrapressão as tensões confinantes totais deveriam ser extremamente elevadas, devido ao caráter impermeável dos corpos de prova de solo com emulsão asfáltica. Na fase de adensamento, um valor adicional de tensão confinante deve ser acrescido ao sistema, para que seja fornecido ao ensaio o valor referente a sua tensão confinante efetiva.

Entretanto, o equipamento utilizado não permite que sejam alcançados esses altos valores de tensões confinantes totais, por haver um limite de pressão que o equipamento é capaz de suportar, não podendo exceder tal valor de pressão por haver riscos ao equipamento e ao operador, não sendo possível utilizar a tensão confinante efetiva de 400 kPa, se limitando apenas as tensões confinantes de 50 kPa, 100 kPa e 200 kPa.

### 3.9.3 Adensamento

Nessa fase, tanto a tensão confinante como a poropressão eram ajustadas de modo que fornecesse ao corpo de prova a tensão confinante efetiva de ensaio. Os adensamentos realizados nos corpos de prova eram isotrópicos. Eram adquiridos os dados de variação de volume e das poropressões, através de um transdutor, e estes eram medidos até que cessasse a variação de volume e que houve a equalização das poropressões na base do corpo de prova.

### 3.9.4 Ruptura dos corpos de prova

Para a fase de cisalhamento a velocidade de ruptura do corpo de prova foi calculada conforme a equação empírica proposta por Head (1986):

$$V_{m\acute{a}x} = \frac{\varepsilon_{er} \cdot L}{100 \cdot t_r} \quad (3.2)$$

Onde:

- $V_{m\acute{a}x}$ : velocidade máxima de cisalhamento;
- $L$ : altura do corpo de prova;
- $\varepsilon_{er}$ : deformação axial estimada na ruptura, em %;
- $t_r$ : tempo mínimo de ruptura, em minutos.

Tem-se que o valores de  $t_r$  são dependentes do tipo de ensaio triaxial realizado, se este é CIU ou CID. O tipo de ensaio realizado na pesquisa, é o consolidado e não drenado, CIU, e para tal o valor de  $t_r$  para corpos de prova sem drenagem radial é 0,51 vezes o valor de  $t_{100}$ . Para tal valor de  $t_r$ , Head (1986) recomenda-se que o seu valor mínimo seja de 120 minutos, de modo que a compressão axial que esteja ocorrendo seja suficientemente lenta de forma a permitir a equalização dos excessos de poropressão que são gerados ao longo do corpo de prova.

De acordo com os cálculos realizados através dos dados obtidos na etapa de adensamento, todos os valores de  $t_r$  foram inferiores a 120 minutos, e desta forma, segundo a recomendação, esse foi o tempo de ruptura adotado. A velocidade de ruptura na prensa utilizada é obtida através da combinação de duas engrenagens, e a velocidade de cisalhamento adotada

foi de 0,0813mm/min. Foi realizada uma deformação axial de 10% da altura do corpo de prova. A Figura 3.15 apresenta o conjunto prensa mais a célula com o corpo de prova para ser cisalhado.

Na condição não saturada, eram aplicadas apenas a tensões efetivas de confinamento, e ao ensaiar os corpos de prova nestas condições não haviam problemas quanto a equalização dos excessos de poropressões gerados, e assim, a velocidade de ruptura adotada foi de apenas 0,3048 mm/min, o que resultou em um tempo de ruptura de aproximadamente 30 minutos.

Figura 3.14 – Equipamento triaxial.



Fonte: Elaborado pela autora

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Serão apresentados neste capítulo os resultados dos ensaios de compressão simples e ensaios de compressão triaxial em corpos de prova para os tempos de cura de um, sete e vinte e oito (01, 07 e 28) dias.

### 4.1 Índices físicos das misturas de solo com altos teores de emulsão

A seguir, na Tabela 4.1, serão mostrados os índices físicos para todas as misturas de solo com altos teores de emulsão asfáltica compactadas imediatamente, para os tempos de cura de um, sete e vinte e oito dias e também para a mistura em que foi estudado o tempo de aeração de 24 horas. Tais índices físicos são referentes tanto para os ensaios de compressão simples como também para os ensaios de compressão triaxial.

Tabela 4.1 – Índices físicos das misturas solo-emulsão

	W <sub>inicial</sub> (%)	W <sub>final</sub> (%)	$\rho_{inicial}$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\rho_{final}$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\rho_{s,mist}$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\rho_{s,ap,mist}$ (g/cm <sup>2</sup> )	$\epsilon_{mist}$	VGM (%)
Solo-emulsão - 01 dia - MI	6,90	2,28	2,00	1,91	2,21	1,88	0,18	35,17
Solo-emulsão - 07 dias - MI	6,65	0,79	2,00	1,89	2,21	1,88	0,18	35,13
Solo-emulsão - 28 dias - MI	6,71	0,36	2,00	1,88	2,21	1,88	0,18	35,15
Solo-emulsão - 07 dia - M24	5,07	0,82	1,91	1,84	2,15	1,78	0,21	40,19

Fonte: Elaborado pela autora.

Observa-se para as misturas ensaiadas que com o aumento do tempo de cura houve uma diminuição gradual da massa específica aparente final ( $\rho_{final}$ ) em razão da diminuição do teor de umidade. A redução do teor de umidade variou de 4,62% para o menor tempo de cura (1 dia) até 6,35%, para o maior período de cura (28 dias), e se deu pela ruptura da emulsão em seguida ao contato com os grãos minerais constituintes do solo com a subsequente evaporação da água constituinte da emulsão asfáltica

A partir da Tabela 4.1 é notável também um índice de vazios superior da mistura compactada após 24 horas da junção entre o solo arenoso e a emulsão asfáltica (M24), em relação aos índices de vazios referentes as misturas compactadas imediatamente (MI). Tais distinções acontecem em razão do maior teor de emulsão

asfáltica e também da menor massa específica aparente inicial ( $\rho_{\text{inicial}}$ ) da mistura (M24).

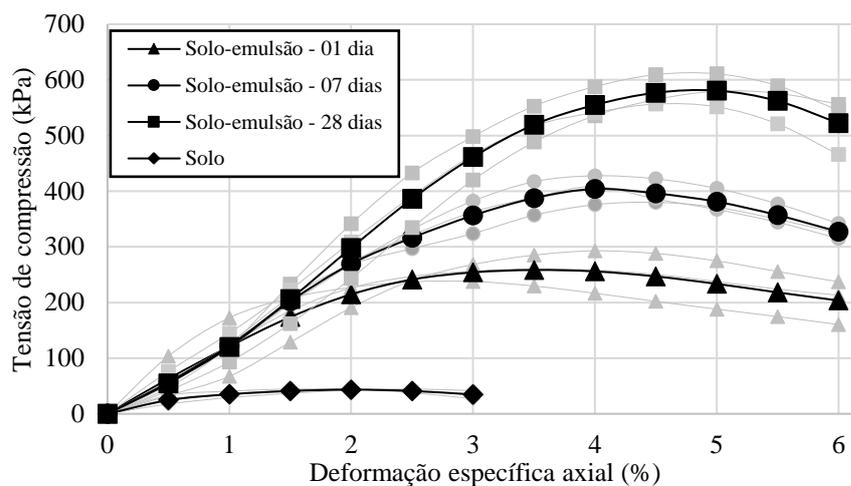
#### **4.2 Efeito da cura na resistência à compressão simples nas misturas de solo com altos teores de emulsão**

Os resultados obtidos nos ensaios de compressão simples, realizados de acordo com a metodologia indicada no Tópico 3.9, serão apresentados a seguir. Os materiais submetidos aos ensaios e suas respectivas condições de compactação foram:

- Amostras de solo compactadas na energia Proctor Normal;
- Solo-emulsão compactado na metodologia Marshall logo após a mistura do solo com o ligante asfáltico e curado por um dia ao ar livre;
- Solo-emulsão compactado na metodologia Marshall logo após a mistura do solo com o ligante asfáltico e curado por sete dias ao ar livre; e
- Solo-emulsão compactado na metodologia Marshall logo após a mistura do solo com o ligante asfáltico e curado por vinte e oito dias ao ar livre.

A Figura 4.1 apresenta os resultados obtidos nos ensaios de compressão simples realizados nos materiais descritos anteriormente. Com base nos resultados, observa-se que as resistências à compressão simples obtidas para essas misturas solo-emulsão foram bastante superiores à do solo compactado. Nota-se também que as misturas ensaiadas com tempos de cura diferentes, apresentam resistências distintas, no qual, observa-se que quanto maior o tempo de cura, maior foi a resistência à compressão simples obtida.

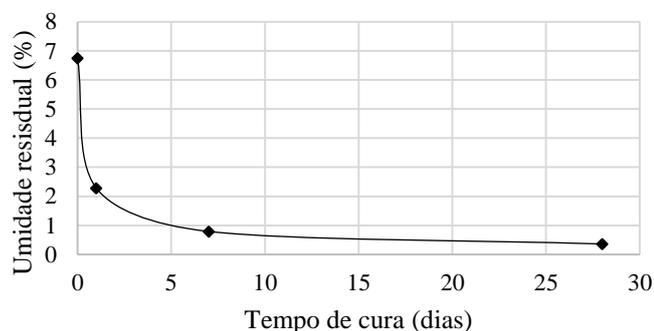
Figura 4.1 - Resistência à compressão simples para os diferentes tempos de cura



Fonte: Elaborado pela autora.

Sabe-se que nas misturas solo-emulsão a ruptura da emulsão asfáltica ocorre logo após o contato do ligante asfáltico com o agregado (Sant'Ana, 2009). Com o passar do tempo de cura ao ar livre, observa-se a evaporação da água constituinte da emulsão asfáltica conforme pode ser comprovado nos resultados apresentados na Figura 4.2, que mostram a variação do teor de umidade residual médio para os corpos de prova ensaiados. De acordo com estes resultados, observa-se que esse decréscimo de umidade residual ocorre de maneira mais acentuada, principalmente nos primeiros dias sete (07) de cura do conjunto solo-emulsão e posteriormente esse parâmetro diminui de forma mais atenuada.

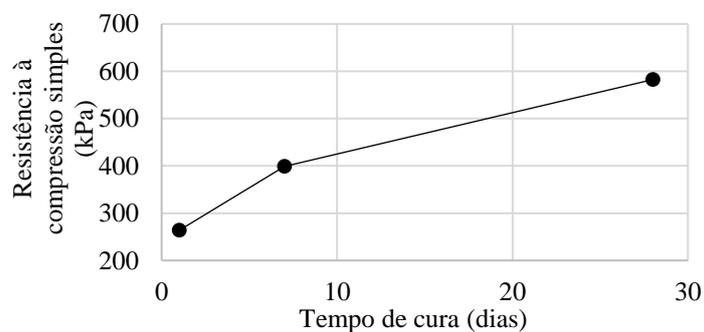
Figura 4.2 - Variação do teor de umidade residual da mistura solo-emulsão em função do tempo de cura



Fonte: Elaborado pela autora.

De acordo com os resultados obtidos observa-se que o ganho de resistência nos corpos de prova com adição de emulsão asfáltica em função do tempo de cura foi bastante elevada (Figura 4.3). No entanto, tais resultados podem não ser atribuídos apenas à adição da emulsão asfáltica em razão de que tal aumento de resistência, em função do tempo, e provavelmente podem ter ocorrido devido ao aumento da sucção matricial atuante nos materiais ensaiados, uma vez que fora observado uma diminuição considerável do teor de umidade dos corpos de prova, conforme também observados por Miceli Júnior (2006), Soliz (2007), Gondim (2008) e Jacintho (2010).

Figura 4.3 - Variação da resistência à compressão simples de acordo com o tempo de cura



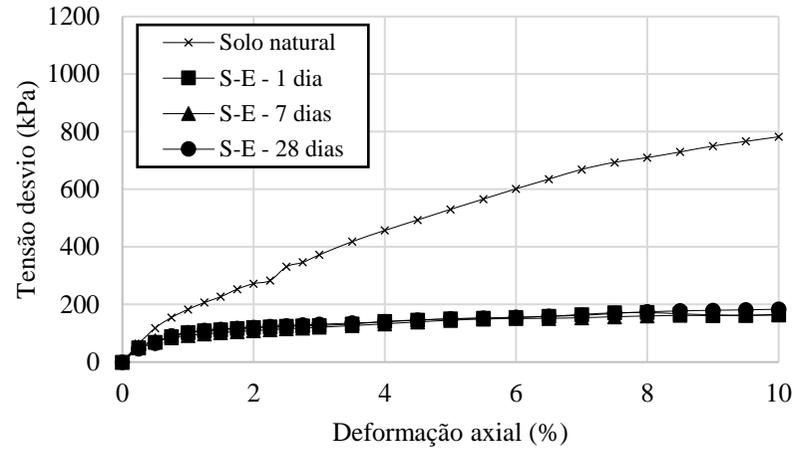
Fonte: Elaborado pela autora.

### **4.3 Resultados dos ensaios de compressão triaxial realizados em corpos de prova saturados**

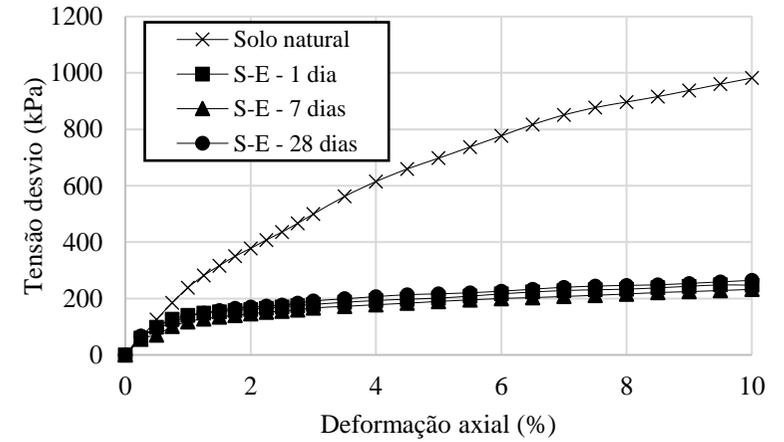
Com o intuito de analisar o efeito da adição de altos teores de emulsão asfáltica no solo e do tempo de cura, de um, sete e vinte e oito (01, 07 e 28) dias, nas misturas solo-emulsão, em condições saturadas, foram realizados ensaios de compressão triaxial do tipo CIU (consolidado isotropicamente e não drenado) em corpos de prova de solo e das misturas solo-emulsão compactados

A Figura 4.4 apresenta as curvas de tensão desvio *versus* deformação axial nos ensaios realizados nas tensões confinantes de 50 kPa, 100 kPa e 200 kPa. De acordo com os resultados obtidos nessa figura, observa-se que para todos os níveis de tensão de confinamento utilizados, o solo compactado apresentou maiores resistências ao cisalhamento do que as misturas de solo-emulsão. Verifica-se ainda, que há uma mudança no comportamento cisalhante devido a adição de emulsão asfáltica, no qual há um indicativo que o solo compactado se comporta como um material elastoplástico com endurecimento ao passo que as misturas solo-emulsão se comportaram, aparentemente, como um material elástico perfeitamente plástico.

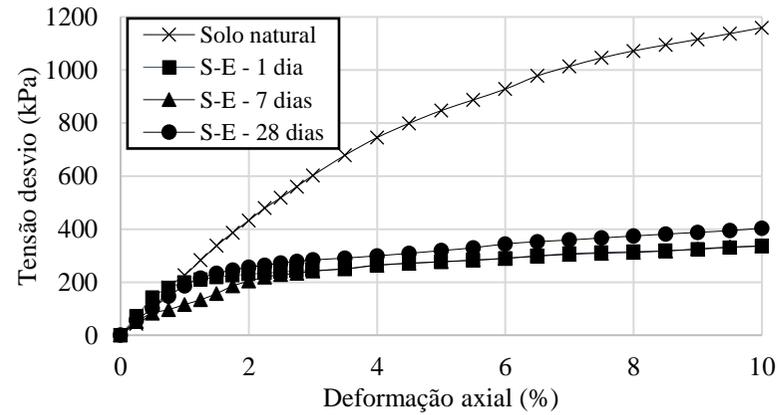
Figura 4.4 - Curvas de tensão-deformação das misturas solo-emulsão e do solo para as diferentes tensões confinantes, na condição saturada



(a) Solo-emulsão - 50 kPa - Saturado



(b) Solo-emulsão - 100 kPa - Saturado



(c) Solo-emulsão - 200 kPa - Saturado

Fonte: Elaborado pela autora.

Além disto, é perceptível através da Figura 4.4 uma diminuição de rigidez das misturas solo-emulsão em relação ao solo compactado, que possivelmente se dá em razão da natureza viscosa do filme do asfalto residual que envolve os grãos minerais constituintes das misturas solo-emulsão, de forma semelhante ao que foi relatado por Dantas Neto et al., 2020, quando da análise de resultados de ensaios de cisalhamento direto realizados neste tipo de material.

Por meio das curvas tensão desvio *versus* deformação axial também é possível observar que nas condições saturadas não há uma influência do tempo de cura no comportamento cisalhante e nas rigidezes das misturas, já que foi observado que os resultados obtidos nos ensaios foram bastantes semelhantes para todos os níveis de deformação axial induzidos nos corpos de prova.

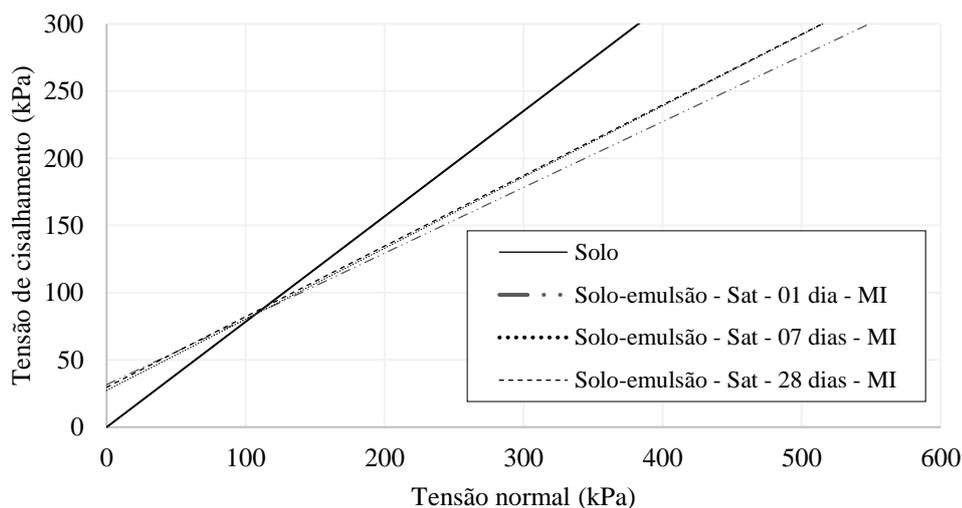
Provavelmente, esta pouca influência do tempo de cura nas misturas solo-emulsão, tanto no comportamento cisalhante como nas rigidezes, se dá pelo fato de que o ensaio triaxial CIU não ocorre drenagem dos corpos de prova durante o processo de ruptura favorecendo a geração de poropressões, prejudicando a interação entre os grãos de solo envolvidos pelo material asfáltico, devido ao betume ser um material hidrófobo (Lima, 2016)

A Figura 4.5 apresenta as envoltórias de resistência ao cisalhamento obtidas a partir das tensões máximas de cisalhamento para cada tensão de confinamento imposta. A Tabela 4.2 apresenta os parâmetros de resistência ao cisalhamento efetivos (coesão e ângulo de atrito) obtidos para as envoltórias apresentadas na Figura 4.5.

Por meio dos resultados apresentados na Figura 4.5 e na Tabela 4.2, observa-se que o tempo de cura não realizou influência significativa nos parâmetros de resistência das misturas de solo com altos teores de emulsão asfáltica na condição saturada, já que estes parâmetros são muito próximos entre si. No entanto, a partir das envoltórias de ruptura apresentadas na Figura 4.5, confirma-se a adição do ligante betuminoso confere ao solo um aumento significativo do seu intercepto coesivo, cerca de 30 kPa, mostrando o efeito da ação ligante do filme de asfalto residual. Ao mesmo tempo, esta adição, também ocasiona uma diminuição do ângulo de atrito, em relação ao do solo, diminuindo de 38° para valores em torno de 27°, o que ocorre devido ao agente betuminoso funcionar como um lubrificante e conseqüentemente diminuir o entrosamento entre os seus grãos minerais, o que está intimamente ligado a perda da parcela de atrito na resistência ao cisalhamento.

As envoltórias de resistência ao cisalhamento efetivas para cada uma das misturas solo-emulsão e do solo compactado com seus respectivos círculos de Mohr, além dos gráficos de variação de poropressão *versus* deformação axial e das trajetórias de tensões efetivas, na condição saturada, são apresentados no Apêndice A.

Figura 4.5 - Envoltória de cisalhamento - Parâmetros efetivos - Misturas solo-emulsão e solo compactado na condição saturada



Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 4.2 Parâmetros de resistência ao cisalhamento do solo e das misturas solo-emulsão saturados

<b>Parâmetros de resistência ao cisalhamento</b>	<b>c' (kPa)</b>	<b><math>\phi'</math> (°)</b>
Solo natural - Proctor - Saturado	0,00	38,10
Solo-emulsão - MI - 01 - Saturado	31,60	26,10
Solo-emulsão - MI - 07 - Saturado	27,40	27,90
Solo-emulsão - MI - 28 - Saturado	29,70	27,70

Fonte: Elaborado pela autora.

Como nos corpos de prova realizados sobre condições saturadas não houve diferença entre os resultados obtidos a partir dos ensaios de compressão triaxial, provavelmente, os aumentos de resistência à compressão simples observados das misturas solo-emulsão realmente se deram em razão do aumento de sucção com a evaporação da água. Desta maneira, tem-se um maior indicativo que o aumento da compressão simples

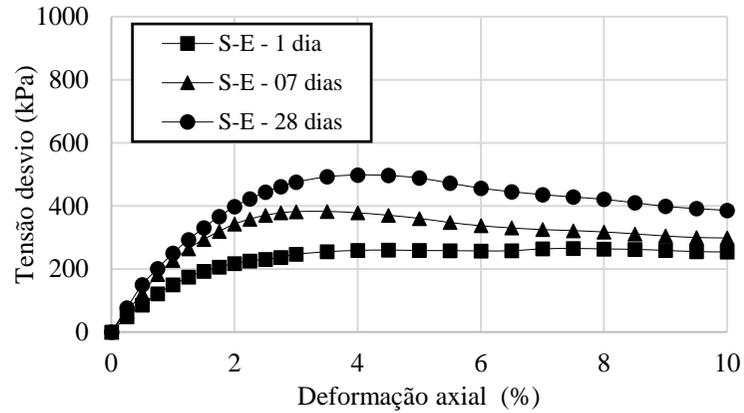
das misturas solo-emulsão ocorre em função da diminuição da umidade residual dos corpos de prova após o período de cura do material.

#### **4.4 Resultados dos ensaios de compressão triaxial realizados em amostras não saturadas**

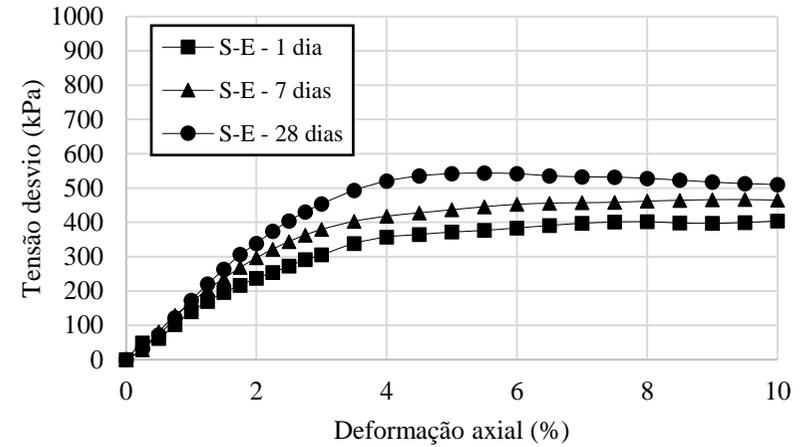
Com a finalidade de avaliar o efeito do tempo de cura, de um, sete e vinte e oito (01, 07 e 28) dias, nas misturas solo-emulsão, em condições não saturadas, foram realizados ensaios de compressão triaxial, sem que fossem realizadas as etapas de adensamento e saturação dos corpos de prova.

A Figura 4.6 apresenta as curvas de tensão desvio *versus* deformação axial nos ensaios realizados nas tensões confinantes de 50 kPa, 100 kPa, 200 e 400 kPa.

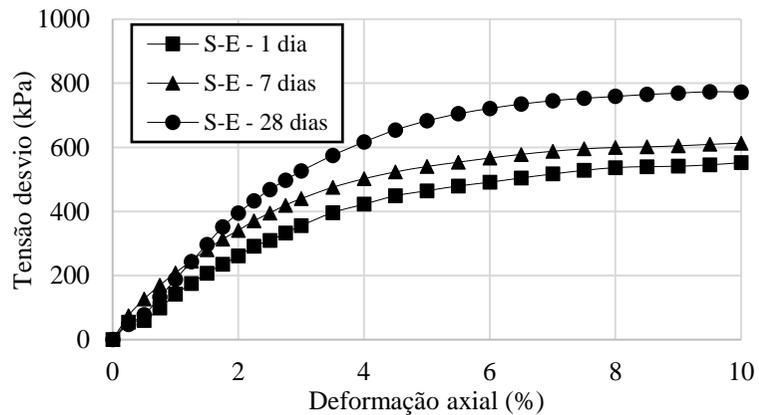
Figura 4.6 - Curvas tensão-deformação das misturas solo-emulsão para as diferentes tensões confinantes, na condição não saturada



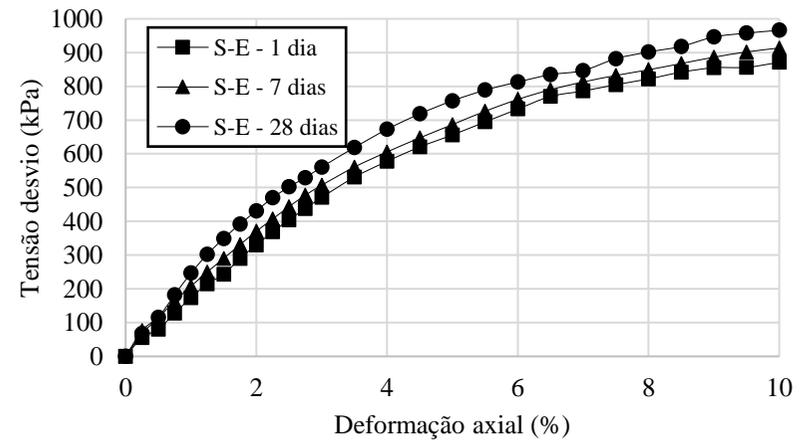
(a) Comparativo - Solo-emulsão - 50 kPa – Não saturado



(b) Comparativo - Solo-emulsão - 100 kPa – Não saturado



(c) Comparativo - Solo-emulsão - 200 kPa – Não saturado  
Fonte: Elaborado pela autora.

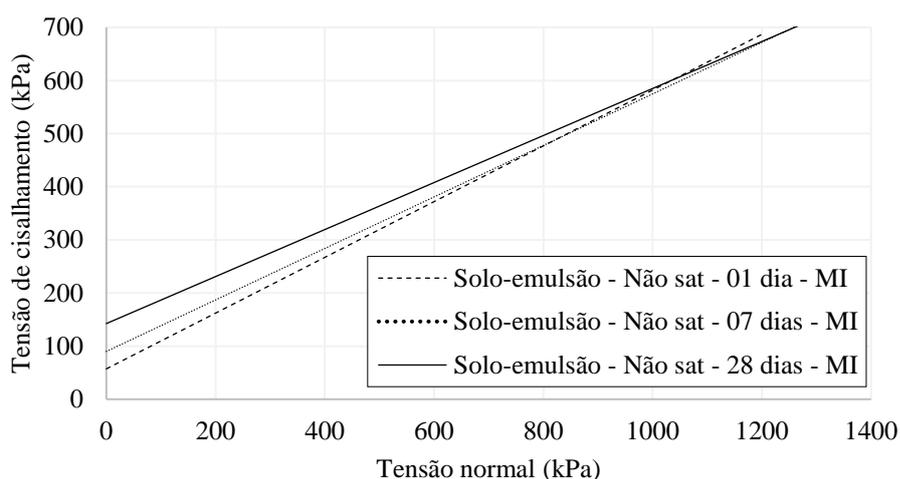


(d) Comparativo - Solo-emulsão - 400 kPa – Não saturado

De acordo com os resultados obtidos nessa figura, observa-se que há um aumento tanto da rigidez, como da resistência ao cisalhamento das misturas solo-emulsão ensaiadas em condições não saturadas com o tempo de cura.

A Figura 4.7 apresenta as envoltórias de resistência ao cisalhamento obtidas a partir dos resultados do ensaio triaxial realizados nos corpos de prova formados pelas misturas solo-emulsão, na condição não saturada. Em seguida, a Tabela 4.3 apresenta os parâmetros de resistência ao cisalhamento efetivos (coesão e ângulo de atrito) obtidos para as envoltórias apresentadas na Figura 4.7. As envoltórias de resistência ao cisalhamento efetivas para cada uma das misturas solo-emulsão com seus respectivos círculos de Mohr, além das trajetórias de tensões efetivas, na condição não saturada, estão presentes no Apêndice B.

Figura 4.7 - Envoltórias de cisalhamento - Parâmetros efetivos - Misturas solo-emulsão na condição não saturada



Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 4.3 - Parâmetros de resistência ao cisalhamento do solo e das misturas solo-emulsão não saturadas

<b>Parâmetros de resistência ao cisalhamento</b>	<b>c'(kPa)</b>	<b><math>\phi'</math>(°)</b>
Solo-emulsão - MI - 01 - Não saturado	57,20	27,70
Solo-emulsão - MI - 07 dias - Não saturado	90,00	25,90
Solo-emulsão - MI - 28 dias - Não saturado	142,50	23,90

Fonte: Elaborado pela autora.

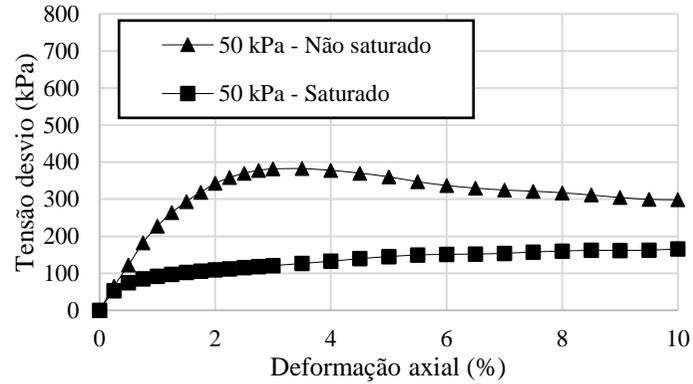
Por meio dos resultados apresentados na Tabela 4.3, é perceptível que quando os corpos de prova ensaiados não passam pelo processo saturação, o tempo de cura gera uma influência significativa nos parâmetros de resistência ao cisalhamento das misturas solo-emulsão. Tais resultados, provavelmente são explicados devido à diminuição da umidade residual dos corpos de prova com o passar do tempo de cura conforme já apresentado previamente, em que, quanto maior o período de cura, maior é o aumento do intercepto coesivo.

Pereira (2018) também observou que em misturas entre solo e elevados teores de emulsão asfálticas confeccionadas em condições muito semelhantes àquelas dos corpos-de-prova cujos resultados são apresentados na Figura 4.7 e submetidas a ensaios de cisalhamento direto sob condições não saturadas também apresentaram um aumento do intercepto coesivo em comparação à misturas ensaiadas em condições saturadas. O autor atribuiu este aumento do intercepto coesivo à sucção mátrica existente nos corpos de prova ensaiados de forma não saturados. Desta forma, o aumento do intercepto coesivo das misturas para a condição não saturada pode ser conferido ao efeito combinado da presença do ligante betuminoso residual com a ação da sucção matricial nas misturas ensaiadas de forma não saturada.

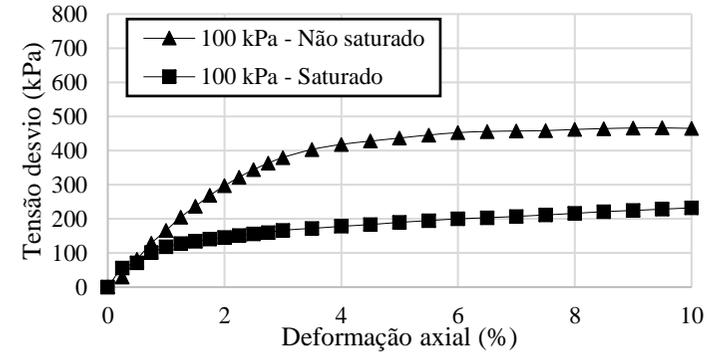
A Figura 4.8 apresenta a comparação entre as curvas de tensão desvio *versus* deformação específica axial dos corpos de prova da mistura solo-emulsão saturados e não saturados, para o tempo de cura de sete dias, que neste estudo, foi considerado o tempo de cura padrão, para as diferentes tensões confinantes de 50 kPa, 100 kPa e 200 kPa.

A partir das curvas tensão desvio *versus* deformação axial, percebe-se que nos corpos de prova não saturados há um aumento da resistência ao cisalhamento, em comparação dos corpos de prova saturados. Tais resultados comprovam mais uma vez que nos corpos de prova não saturados há um aumento da resistência ao cisalhamento e da rigidez quando comparado aos corpos de prova ensaiados sob saturação.

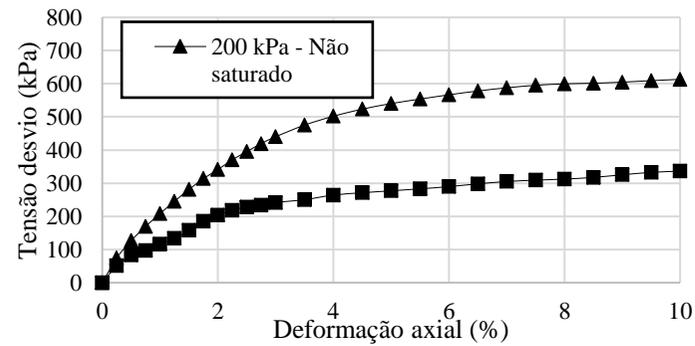
Figura 4.8 -Curvas tensão-deformação das misturas solo-emulsão saturada e não saturada com 7 dias de cura



(a) Comparativo – Saturado e não saturado – 50 kPa



(b) Comparativo – Saturado e não saturado – 100 kPa



Comparativo – Saturado e não saturado – 200 kPa

Fonte: Elaborado pela autora.

Os resultados apresentados na Figura 4.8 comprovam mais uma vez que o aumento da resistência ao cisalhamento das misturas ensaiadas com o tempo de cura se dá pela redução da umidade residual nos corpos de prova que ocasiona o aumento da sucção matricial, em que, nos corpos de prova saturados há a anulação dessa diferença de pressão. Resultados semelhantes também foram observados nas pesquisas realizadas a respeito da estabilização de solos com o uso de emulsão asfáltica de Miceli Junior (2006), Soliz (2007), Gondim (2008) e Jacintho (2010).

O comportamento das misturas, de uma maneira geral, tanto em condições saturadas como não saturadas, pode ser atribuído ao filme de asfalto residual. Ele também proporciona ao solo arenoso um intercepto coesivo devido à ação ligante da emulsão asfáltica e também à diminuição do intertravamento entre os grãos do solo, conforme apresentado por Dantas *et al.*(2020), para os baixos de carregamento das misturas de solo com altos teores de emulsão asfáltica.

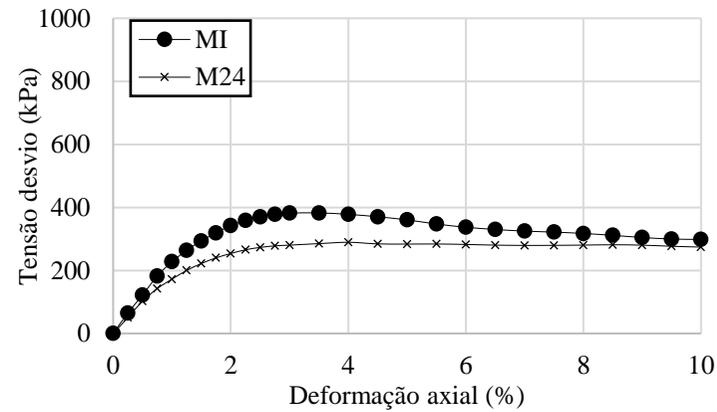
#### **4.5 Influência do tempo de aeração no comportamento cisalhante das misturas**

Com o intuito de analisar o efeito do tempo de aeração nas misturas de solo com a adição de altos teores de emulsão asfáltica, foram realizados ensaios de compressão triaxial, sem que fossem realizadas as etapas de adensamento e saturação dos corpos de prova, para o tempo de cura de sete dias. Neste caso, duas condições foram avaliadas, na primeira o material era compactado imediatamente após a mistura do solo com a emulsão (MI), e na segunda os corpos de prova só eram compactados após 24 horas da mistura de ambos os materiais (M24), sendo este período o tempo de aeração.

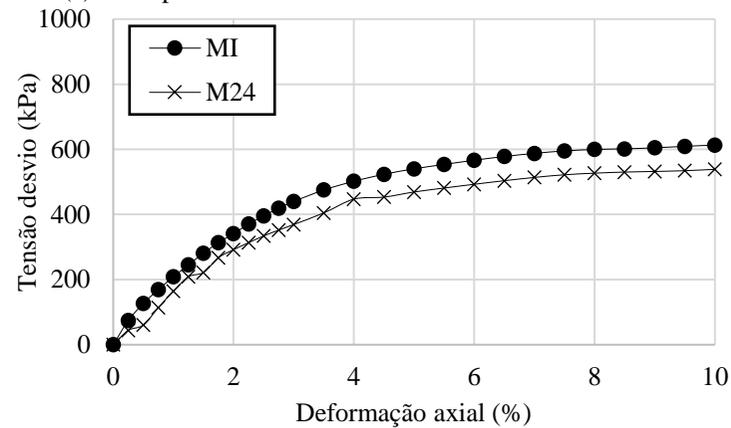
A Figura 4.9 apresenta as curvas de tensão desvio *versus* deformação axial nos ensaios realizados nas tensões confinantes de 50 kPa, 100 kPa, 200 e 400 kPa, para as misturas MI e M24. Em que para a confecção destes corpos de prova foram utilizados os teores ótimos de emulsão que conduziam às máximas massas específicas aparentes das duas condições, que correspondiam a 16% e 19%, para as misturas MI e M24, respectivamente. Em que ambas as misturas passavam pelo tempo de cura de sete dias, após a sua compactação.

Com base nos resultados mostrados na Figura 4.9 observa-se que a mistura compactada imediatamente após a combinação dos materiais (MI), possui maiores valores de resistência ao cisalhamento e de rigidezes do que a mistura compactada após 24 horas da mistura (M24).

Figura 4.9 - Curvas tensão-deformação das misturas solo-emulsão compactadas imediatamente e após 24 horas da mistura na condição não saturada.

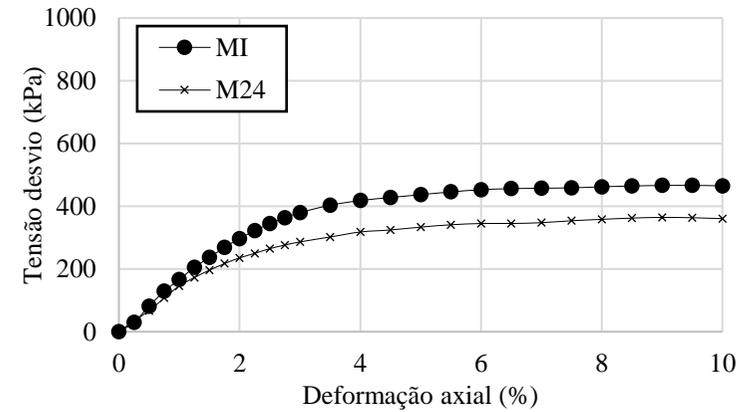


(a) Comparativo - Solo-emulsão - MI e M24 - 50 kPa

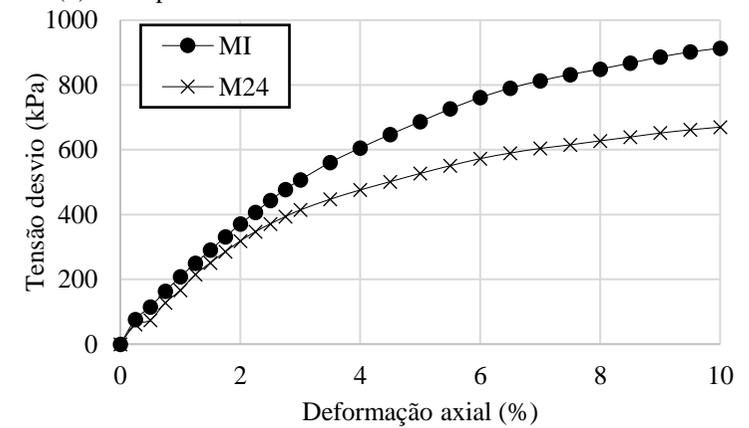


(c) Comparativo - Solo-emulsão - MI e M24 - 200 kPa

Fonte: Elaborado pela autora.



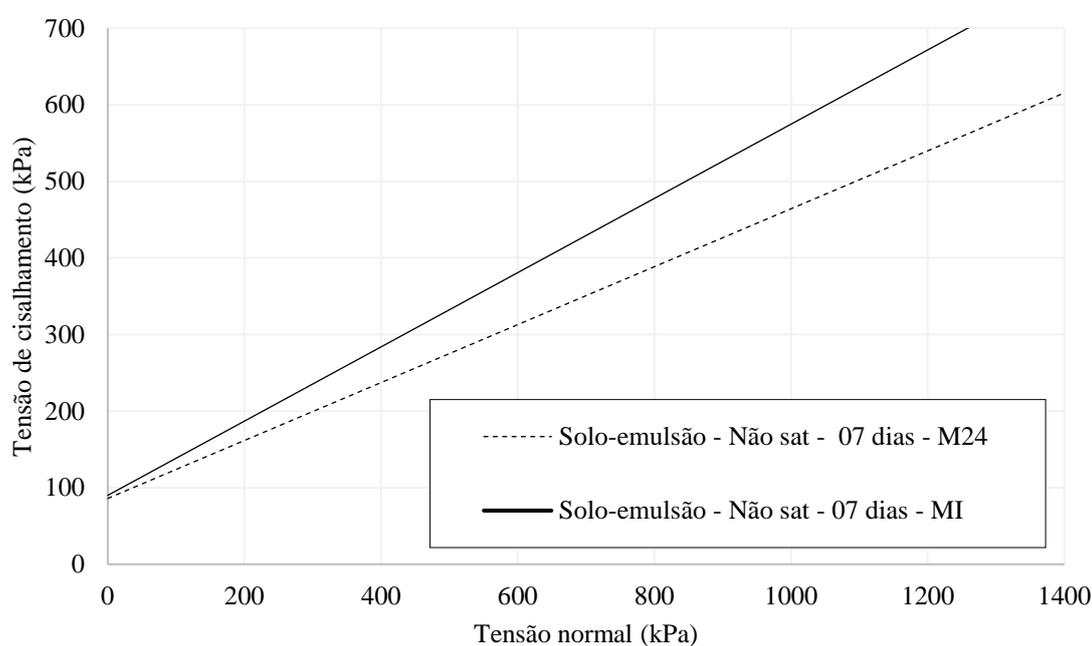
(b) Comparativo - Solo-emulsão - MI e M24 - 100 kPa



(d) Comparativo - Solo-emulsão - MI e M24 - 400 kPa

De posse das tensões máximas de cisalhamento para cada tensão de confinamento imposta é possível que sejam elaboradas as envoltórias de Mohr-Coulomb para as misturas solo-emulsão ensaiadas com e sem tempo de aeração, M24 e MI, que são apresentadas na Figura 4.10. Em seguida, a Tabela 4.4 apresenta os parâmetros de resistência ao cisalhamento efetivos (coesão e ângulo de atrito) obtidos para as envoltórias apresentadas na Figura 4.10. As envoltórias efetivas para a mistura M24 com seus respectivos círculos de Mohr, além das trajetórias de tensões efetivas estão presentes no Apêndice C.

Figura 4.10 - Envoltória de cisalhamento – Parâmetros efetivos – Misturas solo-emulsão compactadas imediatamente e após 24 horas das misturas, na condição não saturada



Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 4.4 - Parâmetros de resistência ao cisalhamento do solo e das misturas solo-emulsão MI e M24.

<b>Parâmetros de resistência ao cisalhamento</b>	<b>c' (kPa)</b>	<b><math>\phi'</math> (°)</b>
Solo-emulsão - MI - 07 dias - Não saturado	90,00	25,90
Solo-emulsão - M24 - 07 dias - Não saturado	86,00	20,70

Fonte: Elaborado pela autora.

Por meio da Tabela 4.4, observa-se que ambas as misturas, independentemente de o teor de emulsão asfáltica ser superior na mistura M24, possuem valores de intercepto coesivo praticamente semelhantes. No entanto, a mistura que foi exposta ao tempo de aeração (M24) possui um ângulo de atrito inferior ao da condição que foi compactada de imediato (MI).

A partir da Tabela 4.1, apresentada no início do capítulo, observa-se que os valores de massa específica aparente ( $\rho$ ) para a mistura M24 são inferiores aos da mistura MI, tanto após a compactação dos materiais como também após o período de cura. Além destes resultados, notam-se valores de índice de vazios ( $e_{mist}$ ) e porcentagem de vazios em relação aos grãos minerais (VGM) são superiores para a mistura compactada após as 24 horas da junção dos materiais (M24).

Nestes casos, a mistura MI também é compactada com a emulsão asfáltica ainda fluida, contribuindo para que esta atinja uma maior massa específica aparente em razão do esforço de compactação aliado à baixa viscosidade do ligante que envolve os grãos permitir um maior intertravamento dos grãos do corpo de prova, aumentando seu ângulo de atrito. Diferentemente do que ocorre nas misturas M24, em que a massa específica aparente da mistura é menor, em razão da dificuldade de aproximação dos grãos após a ruptura da emulsão asfáltica, pelo aumento da rigidez do filme betuminoso, como observado por Lima (2016).

Simultaneamente, o teor ótimo de emulsão asfáltica para a mistura M24 é maior que o da MI, e esta quantidade superior de asfalto residual ocasiona uma menor massa específica aparente da mistura e um maior volume de vazios após o tempo de aeração e de cura, como mostrados na Tabela 4.1, o que diminui o embricamento entre os grãos de areia, e que conseqüentemente gera menores valores de ângulo de atrito, e o que possivelmente ocasionará maiores valores de coeficiente de permeabilidade.

Independentemente do tempo de aeração, ambas as misturas se comportam de forma semelhante as misturas apresentadas por Dantas *et al.* (2020) para baixos níveis de carregamento. Em que a adição de altos teores de emulsão asfáltica proporciona ao solo arenoso um intercepto coesivo, inexistente anteriormente, e a diminuição do intertravamento entre os grãos, em razão da ação ligante do asfalto residual contido na emulsão asfáltica. No entanto, esta diminuição de ângulo de atrito se mostra mais acentuada no caso das misturas M24, em razão da maior quantidade de asfalto residual recobrindo os grãos do solo, diminuindo ainda mais o embricamento entre os grãos.

## 5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE PESQUISA

Neste capítulo, são apresentadas as principais conclusões a respeito da pesquisa realizada e sugestões de trabalhos futuros a respeito do tema abordado.

Este trabalho tem por objetivo avaliar o efeito do tempo de cura e do tempo de aeração na resistência à compressão simples e na resistência ao cisalhamento em solos arenosos estabilizados com elevados teores de emulsão asfáltica.

### 5.1.1 *Objetivos específicos*

Como objetivos específicos podem ser citados:

- f) Estudar a influência na resistência à compressão simples do solo arenoso devido a adição de altos teores de emulsão asfáltica;
- g) Estudar a influência na resistência ao cisalhamento do solo devido a adição de altos teores de emulsão asfáltica;
- h) Analisar a influência da cura nos parâmetros de resistência a compressão simples;
- i) Analisar a influência da cura nos parâmetros de resistência ao cisalhamento em condições saturadas e não saturadas;
- j) Verificar o efeito do tempo de aeração nos parâmetros de resistência ao cisalhamento do solo na condição não saturada.

## 5.2 Conclusões

### 5.2.1 *Influência da adição de emulsão asfáltica ao solo e do tempo de cura na resistência à compressão simples nas misturas de solo com altos teores de emulsão*

Com o passar do tempo de cura das misturas entre solo e altos teores de emulsão asfáltica, houve a diminuição do teor de umidade residual de acordo com este período das misturas ao ar livre. Essa diminuição da umidade residual, aconteceu de forma mais acentuada nos primeiros sete dias de cura, e após esse tempo, a diminuição da umidade ocorreu de modo mais atenuado, tendendo a constância.

Para todos os tempos de cura estudados, a resistência à compressão simples das misturas solo-emulsão foi superior ao do solo compactado. No entanto, quanto maior o tempo de cura ao ar livre, maior foi a resistência ao cisalhamento das misturas solo-emulsão.

Os ganhos de resistência à compressão simples nos corpos de prova com a adição dos altos teores de emulsão asfáltica não puderam ser atribuídos somente ao efeito aglutinante da emulsão asfáltica. O tempo de cura é crucial neste ganho de resistência, por estar intimamente ligado a diminuição da umidade e conseqüentemente ao ganho da sucção mátrica.

### ***5.2.2 Influência da adição de altos teores de emulsão asfáltica ao solo arenoso nos parâmetros de resistência ao cisalhamento da mistura solo-emulsão***

Em condições saturadas, houve uma maior resistência ao cisalhamento e maiores rigidezes do solo compactado em relação as misturas solo-emulsão, independentemente do tempo de cura. O solo, sem a adição de emulsão asfáltica comportou-se como um material elastoplástico com endurecimento e com a adição passou a se comportar como um material elástico perfeitamente plástico.

Verificou-se também que há uma mudança no comportamento cisalhante devido a adição de emulsão asfáltica, no qual o solo compactado se comporta como um material elastoplástico com endurecimento e as misturas solo-emulsão se comportaram, aparentemente, como um material elástico perfeitamente plástico.

### ***5.2.3 Influência dos tempos de cura nos parâmetros de resistência ao cisalhamento da mistura solo-emulsão***

O tempo de cura das misturas solo-emulsão, nos corpos de prova que passaram pelo processo de saturação, não gerou diferenças significativas quanto ao comportamento cisalhante, as rigidezes e nem aos parâmetros efetivos de resistência ao cisalhamento destas. Em relação aos parâmetros efetivos de resistência ao cisalhamento, a adição de emulsão conferiu ao solo, um aumento de intercepto coesivo, e ao mesmo tempo, reduziu o ângulo de atrito deste, tais efeitos ocorreram em razão da emulsão asfáltica adicionada ter agido como lubrificante e diminui o entrosamento entre os grãos minerais do solo.

Sem que houvesse o processo de saturação, ocorreu o aumento da resistência ao cisalhamento dos corpos de prova e das rigidezes iniciais em virtude do tempo de cura destes, e conseqüente diminuição da umidade quanto maior o tempo de cura.

Em vista do exposto, sem o processo de saturação, o tempo de cura das misturas influência de forma significativa nos parâmetros de resistência ao cisalhamento destas, principalmente quanto ao aumento do intercepto coesivo.

O aumento do intercepto coesivo das misturas para a condição não saturada foi ocasionado a partir da junção do efeito ligante do betume contido na emulsão com a ação da sucção matricial que ocorreu nos vazios entre as partículas de solo e emulsão asfáltica.

Os resultados obtidos através dos ensaios de compressão triaxial, sem saturação e adensamento, para os corpos de prova das misturas solo-emulsão mostraram que houve o aumento da resistência ao cisalhamento dos corpos de prova em razão do maior tempo de cura ao ar livre da mistura solo-emulsão.

Comparando também as misturas solo-emulsão nas condições saturadas e não saturadas se notou que nos corpos de prova não saturados houve um aumento da resistência ao cisalhamento, em comparação dos corpos de prova saturados. Constatou-se, mais uma vez, que este aumento de resistência é causado pela redução da umidade residual nos corpos de prova que ocasiona o aumento da sucção matricial.

#### ***5.2.4 Influência do tempo de aeração no comportamento cisalhante das misturas***

A compactação imediata (MI) das misturas solo-emulsão gerou maiores valores de resistência ao cisalhamento, em relação as misturas que passaram pelo tempo de aeração de 24 horas (M24). Ambas as misturas obtiveram interceptos coesivos praticamente semelhantes, independente do teor de emulsão asfáltica ser superior na mistura M24, no entanto, a mistura que passou pelo tempo de aeração obteve ângulo de atrito inferior ao da mistura MI.

A quantidade superior de asfalto residual na mistura MI gerou uma menor massa específica aparente da mistura M24 e um maior volume de vazios após o tempo de aeração o que diminuiu o embricamento entre os grãos de areia e ocasionou menores valores de ângulo de atrito.

#### ***5.2.5 Conclusões gerais***

Verificou-se que todas as misturas estudadas de solo com altos teores de emulsão asfáltica, independentemente de serem saturadas ou não, ou de serem compactadas imediatamente ou após a espera o tempo de aeração não apresentaram bilinearidade nas envoltórias de ruptura.

A adição de altos teores de emulsão asfáltica trata-se de uma alternativa viável em obras geotécnicas em regiões com ausência de materiais adequados para determinadas construções, como em núcleos impermeáveis de barragens de terra, taludes, fundações de aterros sanitários e aterros, havendo uma maior necessidade de investigação sobre esta mistura em ambas as condições. Em obras geotécnicas, em que não há a saturação do solo, a mistura solo-emulsão se mostra mais eficiente com o passar do período de cura, em relação aos parâmetros efetivos de cisalhamento.

### **5.3 Sugestões de pesquisas futuros**

As sugestões de pesquisas futuras que possam ampliar os conhecimentos e estudos a respeito da adição de altos teores de emulsão aos solos são apresentadas a seguir.

- Estudar a resistência não saturada das misturas com altos teores de emulsão através de ensaios com sucção controlada;
- Estudar mais profundamente o efeito da sucção mátrica nas misturas entre solo e altos teores de emulsão;
- Estudar a estabilização de outros tipos de solo com altos teores de emulsão asfáltica;
- Estudar o efeito de tempos diferentes de aeração na resistência ao cisalhamento entre solo e altos teores de emulsão;
- Avaliar a susceptibilidade ao lixiviamento do asfalto residual das misturas solo-emulsão, classificando a periculosidade;
- Estudar as características mecânicas e hidráulicas das misturas entre altos teores de emulsão e solo, associando-as com outros aditivos como cal, cinzas volantes e cimento.

## REFERÊNCIAS

ABEDA - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS EMPRESAS DISTRIBUIDORAS DE ASFALTOS. Manual Básico de Emulsões Asfálticas. 2 ed. Rio de Janeiro: ABEDA, 2010.

AFRIN, H. A review on different types soil stabilization techniques. **International Journal of Transportation Engineering and Technology**, v. 3, n. 2, p. 19-24, 2017.

AMU, O. O.; OGUNNIYI, S. A.; OLADEJI, O. O. Geotechnical properties of lateritic soil stabilized with sugarcane straw ash. **American journal of Scientific and industrial Research**, v. 2, n. 2, p. 323-331, 2011.

ARRIVABENI, Breno Santos. **Alternativas para estabilização granulométrica e química de solo de estradas florestais**. 2017. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **MB 581/1971: Emulsão Asfáltica – Viscosidade “Saybolt-furol” de Emulsões Asfálticas**. Rio de Janeiro, 1971.

\_\_\_\_\_. **MB 609/1971: Emulsão Asfáltica – Determinação da Peneiração de Emulsões Asfálticas**. Rio de Janeiro, 1971.

\_\_\_\_\_. **NBR 6293/2015: Ligantes asfálticos - Determinação da ductilidade**. Rio de Janeiro, 2015.

\_\_\_\_\_. **NBR 6297/2012: Emulsão asfáltica de ruptura lenta — Determinação da ruptura - Método da mistura com cimento**. Rio de Janeiro, 2012.

\_\_\_\_\_. **NBR 6299/2012: Emulsões asfálticas — Determinação do pH**. Rio de Janeiro, 2012.

\_\_\_\_\_. **NBR 6302/2008: Emulsões asfálticas - Determinação da ruptura - Método de mistura com fíler silícico**. Rio de Janeiro, 2008.

\_\_\_\_\_. **NBR 6457/2016: Amostras de Solo – Preparação Para Ensaios de Compactação e Ensaios de Caracterização**. Rio de Janeiro, 2016.

\_\_\_\_\_. **NBR 6459/2016: Solo – Determinação do Limite de Liquidez.** Rio de Janeiro, 2016.

\_\_\_\_\_. **NBR 6567/2015: Ligantes asfálticos - Emulsões asfálticas - Determinação da carga de partícula.** Rio de Janeiro, 2015.

\_\_\_\_\_. **NBR 6568/2005: Emulsões asfálticas - Determinação do resíduo de destilação.** Rio de Janeiro, 2005.

\_\_\_\_\_. **NBR 6569/2008: Emulsões asfálticas catiônicas - Determinação da Desemulsibilidade.** Rio de Janeiro, 2008.

\_\_\_\_\_. **NBR 6570/2016: Ligantes asfálticos - Determinação da sedimentação e estabilidade à estocagem de emulsões asfálticas.** Rio de Janeiro, 2016.

\_\_\_\_\_. **NBR 6576/2007: Materiais asfálticos - Determinação da penetração.** Rio de Janeiro, 2007.

\_\_\_\_\_. **NBR 7180/2016: Solo – Determinação do Limite de Plasticidade.** Rio de Janeiro, 2016.

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

\_\_\_\_\_. **NBR 7182/2016: Solo – Ensaio de Compactação.** Rio de Janeiro, 2016.

\_\_\_\_\_. **NBR ME 12770/1992. Solo coesivo - Determinação da resistência à compressão não confinada.** Rio de Janeiro, 1992.

\_\_\_\_\_. **NBR 14249/2007: Emulsão asfáltica catiônica - Determinação expedida da resistência à água (adesividade) sobre agregados graúdos.** Rio de Janeiro, 2007.

\_\_\_\_\_. **NBR 14376/2019: Ligantes asfálticos - Determinação do teor do resíduo seco de emulsões asfálticas convencionais ou modificadas - Métodos expeditos.** Rio de Janeiro, 2019.

\_\_\_\_\_. **NBR 14393/2012: Emulsões asfálticas — Determinação da peneiração.** Rio de Janeiro, 2012.

\_\_\_\_\_. **NBR 14491/2007: Emulsões asfálticas - Determinação da viscosidade Saybolt Furol.** Rio de Janeiro, 2007.

\_\_\_\_\_. **NBR 14757/2017: Microrrevestimentos e lamas asfálticas - Determinação da adesividade de misturas.** Rio de Janeiro, 2017.

\_\_\_\_\_. **NBR 14855/2015: Ligantes asfálticos - Determinação da solubilidade em tricloroetileno.** Rio de Janeiro, 2015.

BAGHINI, M. S. *et al.* The potentials of Portland cement and bitumen emulsion mixture on soil stabilization in road base construction. **Jurnal Teknologi**, v. 65, n. 2, 2013.

BAGHINI, M. S. *et al.* Performance evaluation of road base stabilized with styrene–butadiene copolymer latex and Portland cement. **International Journal of Pavement Research and Technology**, v. 9, n. 4, p. 321-336, 2016.

BAN, H.; PARK, S. Characteristics of modified soil-aggregate system and their application in pavements. **KSCE Journal of Civil Engineering**, v. 18, n. 6, p. 1672-1678, 2014.

BALDOVINO, J. J. A. *et al.* Optimizing the evolution of strength for lime-stabilized rammed soil. **Journal of rock mechanics and geotechnical engineering**, v. 11, n. 4, p. 882-891, 2019.

BATRA, S. S.; ARORA, J. S. Effect of cationic bitumen emulsion on shear strength parameters of soil. **International Journal of Research in Engineering and Technology (IJRET)**, v. 5, n. 09, 2016.

BERNUCCI, Liedi Bariani *et al.* **Pavimentação asfáltica.** 1 ed. Rio de Janeiro, 2008.

BEZERRA, Petrucia Karine Santos de Brito. **Obtenção de novas emulsões asfálticas utilizando óleo lubrificante usado ou contaminado (OLUC).** 2015. Dissertação ( Mestrado em Engenharia Química) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2015.

BOUCARD, L; *et al.* Bitumen emulsion destabilization kinetics: importance of the crystallized wax content”, **Langmuir**, v. 33, n.38, p. 9740-9749, 2017.

CANCIAN, V. A. *et al.* Influência do tempo de mistura de solo-cimento na resistência à compressão simples, XXIX congresso nacional de pesquisa em transporte da ANPET. Ouro Preto. **Anais de Congresso**. Solos, agregados e concreto. Minas Gerais. p. 184-195. 2015.

CARNEIRO, A. A. **Comportamento mecânico de um rejeito de minério de ferro estabilizado com polímero e do compósito rejeito-polímero reforçado com fibras de polipropileno**. 2020. Tese (Doutorado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2020.

CASTRO, C. A. **Estudo da técnica anti-pó com emulsão de xisto em pavimentos para baixo volume de tráfego**. 2003. Tese (Mestrado em Ciências) - COPPE/UFRJ, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2003.

CRISPINO, M; BROVELLI, C. **Bitumen emulsion and foam bitumen for cold recycled and bitumen stabilized materials: A comparison based on performances, costs and safety**. In: 8th International Conference on Managing Pavement Assets. 2011.

CRISTELO, N. M. C. **Estabilização de solos residuais graníticos através da adição de cal**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia civil) - Universidade de Minho, Braga - Portugal, 2011.

DANTAS NETO, S. A.; PEREIRA, C. G. F.; ABREU, A. A.. Stabilization of sandy soil with high content of asphalt emulsion. **REM-International Engineering Journal**, v. 73, n. 2, p. 163-169, 2020.

DASH, S. K.; HUSSAIN, M. Lime stabilization of soils: reappraisal. **Journal of materials in civil engineering**, v. 24, n. 6, p. 707-714, 2012.

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.

EMMERT, F. Avaliação do emprego da técnica de estabilização de solo na melhoria de estradas florestais da região de Niquelândia-GO. 2010. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade de Brasília, Brasília, 2010.

FAN, J; WANG, D; QIAN, D. Soil-cement mixture properties and design considerations for reinforced excavation. **Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering**, v. 10, n. 4, p. 791-797, 2018.

FERREIRA, A. M. **Estudo de três solos estabilizados com uma emulsão asfáltica catiônica**. 1980. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, 1980.

FIROOZI, Ali Akbar et al. Fundamentals of soil stabilization. **International Journal of Geo-Engineering**, v. 8, n. 1, p. 26, 2017.

FUJII, L. M. T. **Estudo de misturas de solo, RCD e cal virgem e hidratada para uso em obras rodoviárias**. 2012. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Universidade de Brasília, Brasília, 2012.

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

GUTHRIE, W. S.; BROWN, A. V.; EGGETT, D. L. Cement stabilization of aggregate base material blended with reclaimed asphalt pavement. **Transportation Research Record**, v. 2026, n. 1, p. 47-53, 2007

HAMZAH, M. **Conventional Methods for Highway Soil Stabilization**. 1983. Tese (Master of Science in Civil Engineering) - University of Strathclyde, Glasgow, 1983.

HEAD, K. H. **Manual of soil laboratory testing**, Vol 3, ELE. International limited, 1986.

HICKS, Russell G. **Alaska soil stabilization design guide**. 2002.

INGLES, O. G.; METCALF, J. B. **Soil stabilization: Principle and Practice**. Melbourne: Butterworths, 1972.

JACINTHO, E. C. **Estudo de propriedades e comportamentos de misturas solo emulsão aplicado a barragens**. 2010. Tese (Doutorado em Geotecnia) - Universidade de Brasília, Brasília, 2010.

JI-RU, Z; XING, C. Stabilization of expansive soil by lime and fly ash. **Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci.** Ed., v. 17, n. 4, p. 73-77, 2002.

KLINSKY, L. M. G; FABBRI, G. T. P.; FURLAN, A. P. Efeito da adição de areia de fundição e cal em algumas propriedades de solos argilosos. **TRANSPORTES**, v. 20, n. 1, p. 22-30, 2012.

KEZDI, A. **Stabilized Earth Roads – Developments in Geotechnical Engineering**. Elsevier Company, 1979.

LIM, S. M. et al. Critical review of innovative soil road stabilization techniques. **International Journal of Engineering and Advanced Technology**, Bhopal, v. 3, n. 5, p. 204-211, 2014.

LIMA, F. C. **Estudo dos processos de compactação e dosagem de misturas entre solo arenoso e emulsão asfáltica**. 2016. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2016.

LIMA, F. C.; DANTAS NETO, S. A. Study of the compaction mechanism in mixtures of sandy soil and high asphalt emulsion contents. **Geotecnia**, n. 145, p. 61-80, 2019. DOI: 10.24849/j.geot.2019.145.05

MAKUSA, G. P. **Soil stabilization methods and materials in engineering practice: State of the art review**. Luleå tekniska universitet, 2013.

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

MCDOWELL, Chester. Stabilization of soils with lime, lime-fly ash and other lime reactive materials. **Highway Research Board Bulletin**, v. 231, n. 1, p. 60-66, 1959.

MEDINA, J., MOTTA, L. M. G. **Mecânica dos Pavimentos**. Rio de Janeiro: Editora UFRJ, 2015.

MICELI JUNIOR, G. Comportamento de solos do estado do Rio de Janeiro estabilizados com emulsão asfáltica. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) - Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2006.

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

ONYELOWE, Kennedy. C.; OKAFOR, Fidelis. O. A comparative review of soil modification methods. **ARPN J. Earth Sci**, v. 1, n. 2, 2012.

PAIVA, S. C. **Estudo do comportamento geomecânico dos solos expansivos dos Municípios de Cabrobó, Paulista e Ipojuca-PE e de suas misturas com cal.** 2016. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2016.

PANNU, A. Effect of soil stabilization in construction of roads and strength improvement. **Int. J. All Res. Educ. Sci. Methods**, v. 4, n. 8, p. 99-103, 2016.

PEREIRA, C. G. F. **Avaliação do comportamento hidráulico e da resistência ao cisalhamento de misturas entre solo arenoso e elevados teores de emulsão asfáltica para aplicações em barragens.** 2018. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2018.

PEREIRA, K. L. A. **Estabilização de um solo com cimento e cinza de lodo para uso em pavimentos.** 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Rio Grande do Norte, Natal, 2012.

PEI, X. et al. Physicochemical and index properties of loess stabilized with lime and fly ash piles. **Applied Clay Science**, v. 114, p. 77-84, 2015.

PINTO, C. S. Curso básico de mecânica dos solos em 16 aulas. 3ª edição. São Paulo: Oficina de textos, 2006.

PORTELINHA, F.H.M. **Efeitos da cal e do cimento na modificação dos solos para fins rodoviários: mecanismos de reação, parâmetros de caracterização geotécnica e resistência**

**mecânica**. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civi) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2008.

SALDANHA, R. B. **Misturas cinza volante e cal de carbureto: comportamento da resistência à compressão simples para cura acelerada**. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

SANTOS, J. **Estabilização de uma Argila Laterítica do Distrito Federal para Uso em Rodovias de Baixo Volume de Tráfego**. 2004. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Universidade de Brasília, Brasília, 2004.

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

SANT'ANA, W. C. **Contribuição ao estudo de solo-emulsão em pavimentos de rodovias de baixo volume de tráfego para o estado do Maranhão**. 2009. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

SILVA, N.A.B.S. **Desempenho de um compósito solo-polímero para aplicabilidade em obras geotécnicas e de pavimentação**. 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) - Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2009.

SOLIZ, V. V. P. **Estudo de três solos estabilizados com emulsão asfáltica**. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2007.

TAKHELMAYUM, G; SAVITHA, A. L.; KRISHNA, G. Laboratory study on soil stabilization using fly ash mixtures. **International Journal of Engineering Science and Innovative Technology (IJESIT)**, v. 2, n. 1, p. 477-482, 2013.

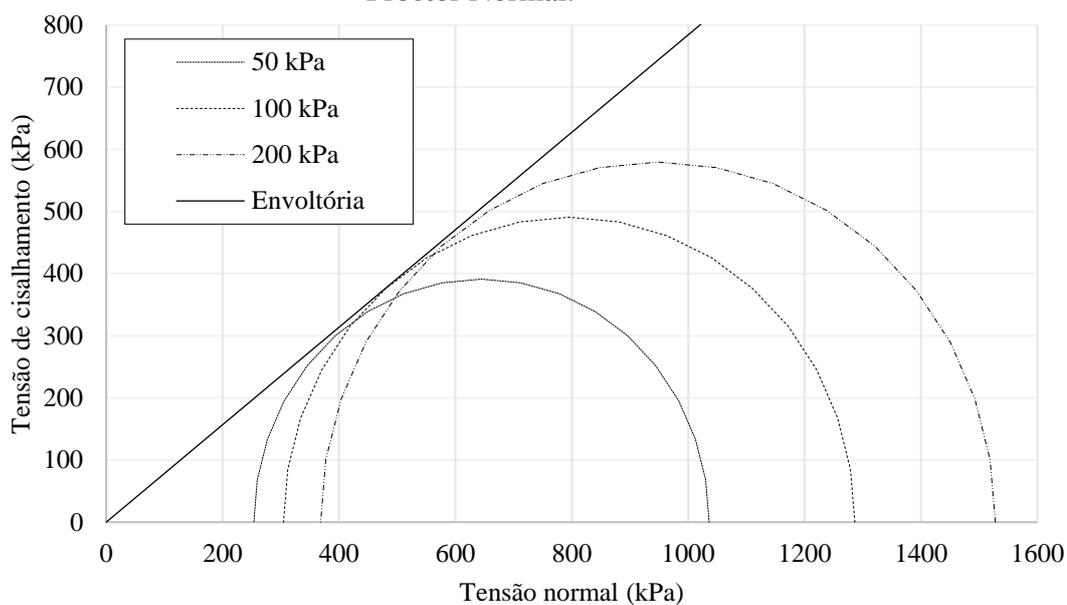
TINGLE, J. S. et al. Stabilization mechanisms of nontraditional additives. **Transportation research record**, v. 1989, n. 1, p. 59-67, 2007.

TORRES, J. C. L. **Obtenção de emulsões asfálticas convencionais e modificadas com argilas e nanoargilas**. 2013. Dissertação (Mestrado em Pesquisa e Desenvolvimento de Tecnologias Regionais) . Universidade Federal do Rio Grande do Norte , Natal, 2013.

YODER, E. J.; WITCZAK, M. W. **Principles of pavement design**. John Wiley & Sons, 1991.

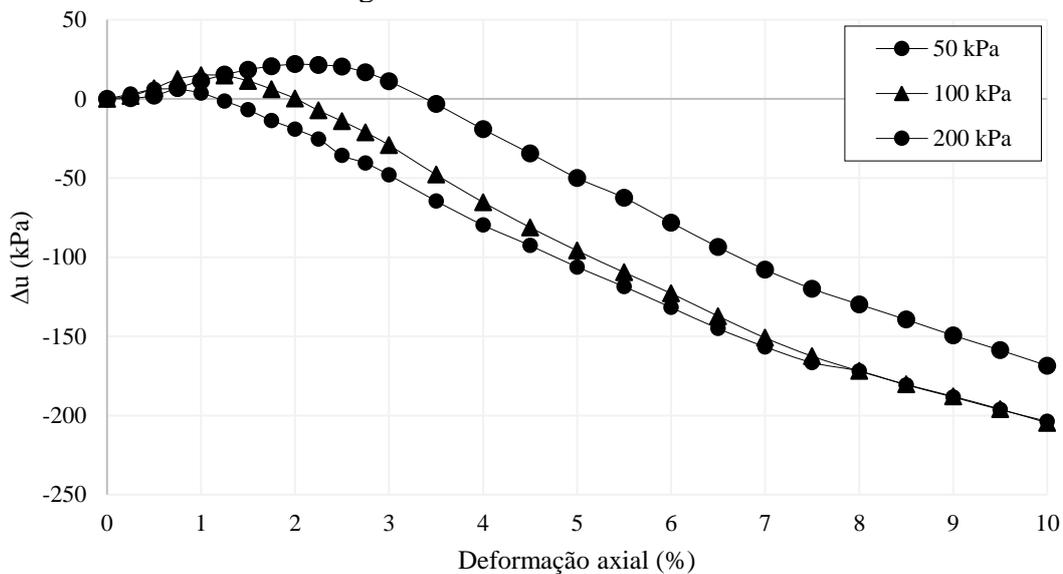
**APÊNDICE A - FIGURAS QUE REPRESENTAM AS ENVOLTÓRIAS DE RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO EFETIVAS, VARIAÇÃO DE POROPRESSÃO *VERSUS* DEFORMAÇÃO AXIAL E TRAJETÓRIAS DE TENSÕES EFETIVAS PARA O SOLO E CADA UMA DAS MISTURAS SOLO-EMULSÃO NA CONDIÇÃO SATURADA**

Figura A.1 – Envoltória de resistência ao cisalhamento – Solo compactado – Energia Proctor Normal.



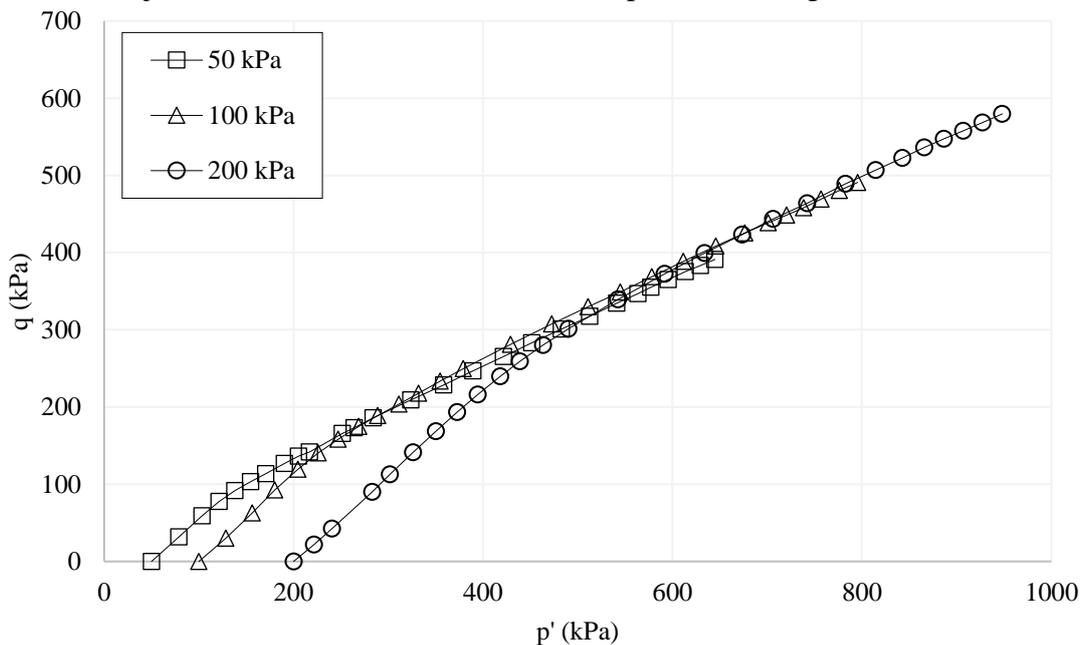
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura A.2 – Variação de poropressão *versus* deformação axial - Solo compactado- Energia Proctor Normal.



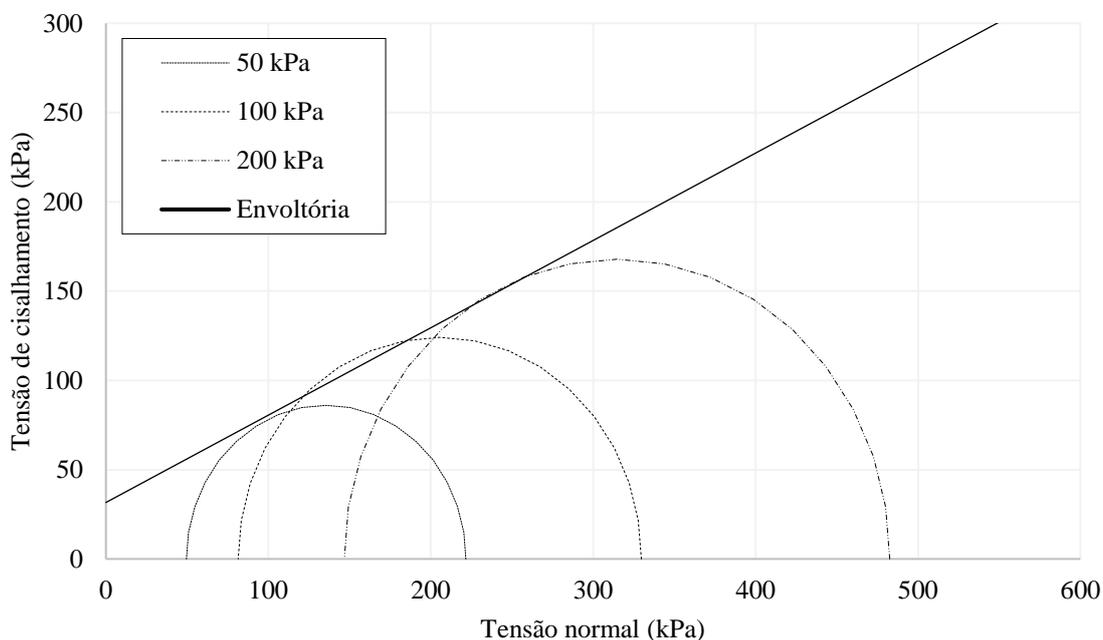
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura A.3. Trajetória de tensões efetivas - Solo compactado- Energia Proctor Normal.



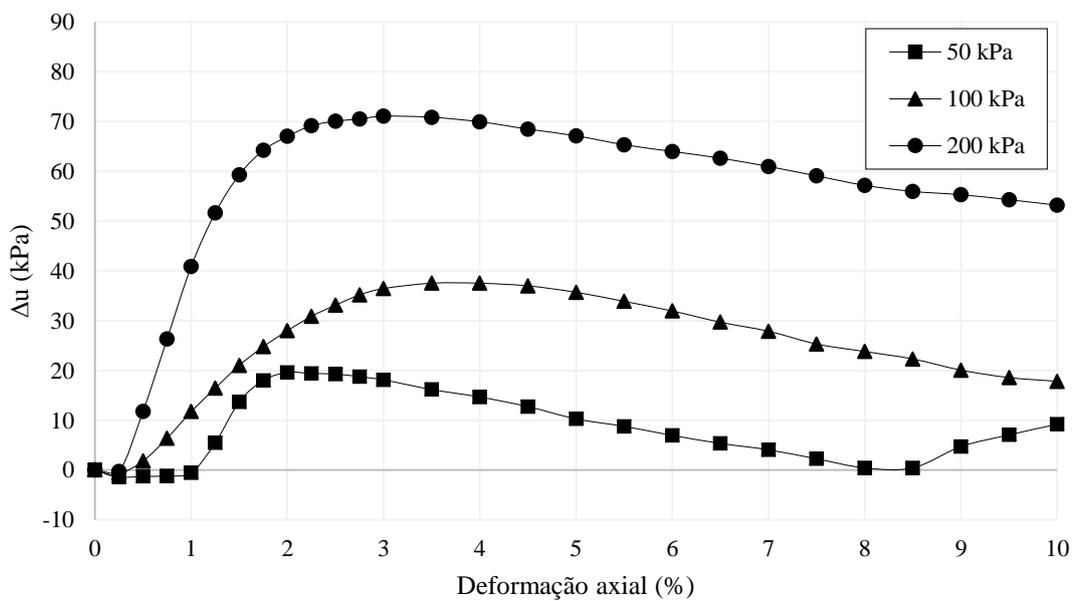
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura A.4 – Envoltória de resistência ao cisalhamento – Mistura solo-emulsão – Metodologia MI – 01 dia de cura – Saturada.



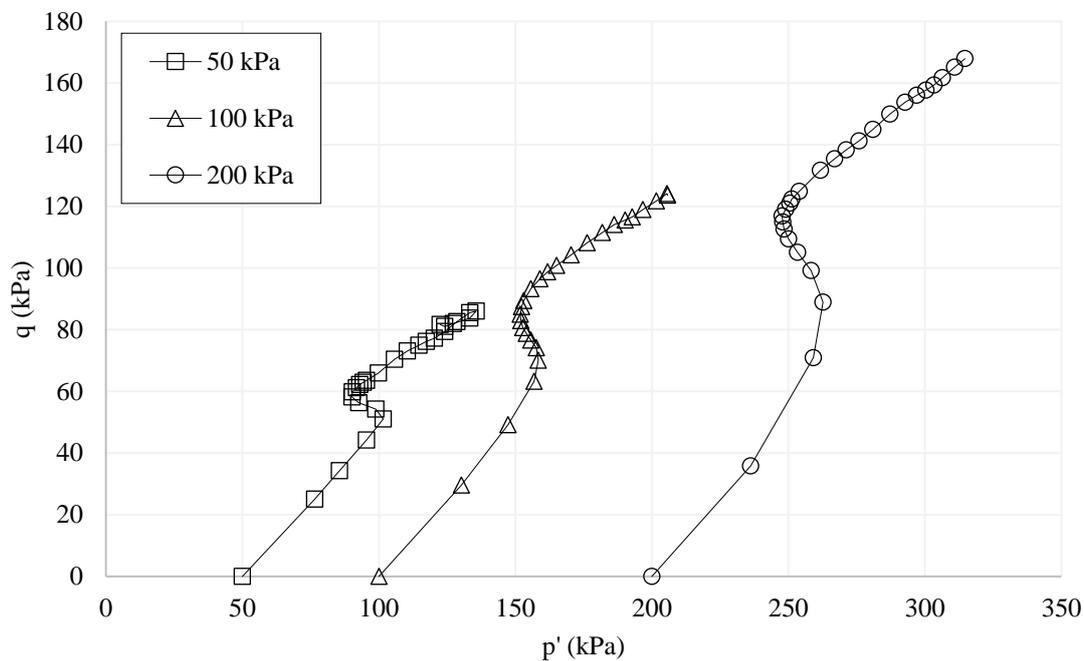
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura A.5 – Variação de poropressão *versus* deformação axial - Mistura solo-emulsão – Metodologia MI – 01 dia de cura – Saturada.



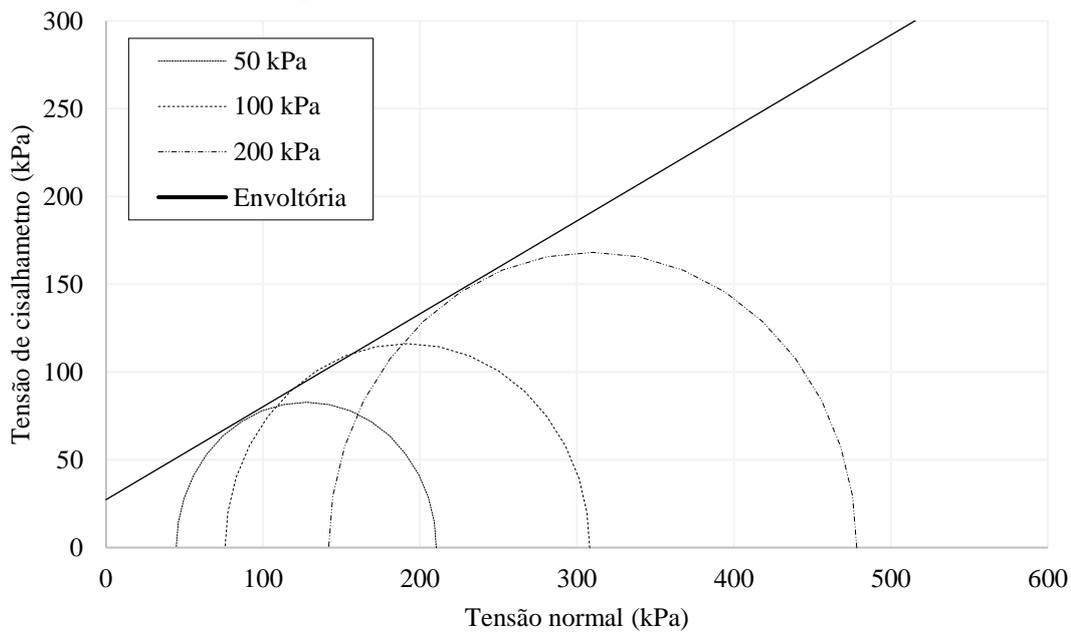
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura A.6 - Trajetória de tensões efetivas - Mistura solo-emulsão – Metodologia MI – 01 dia de cura – Saturada.



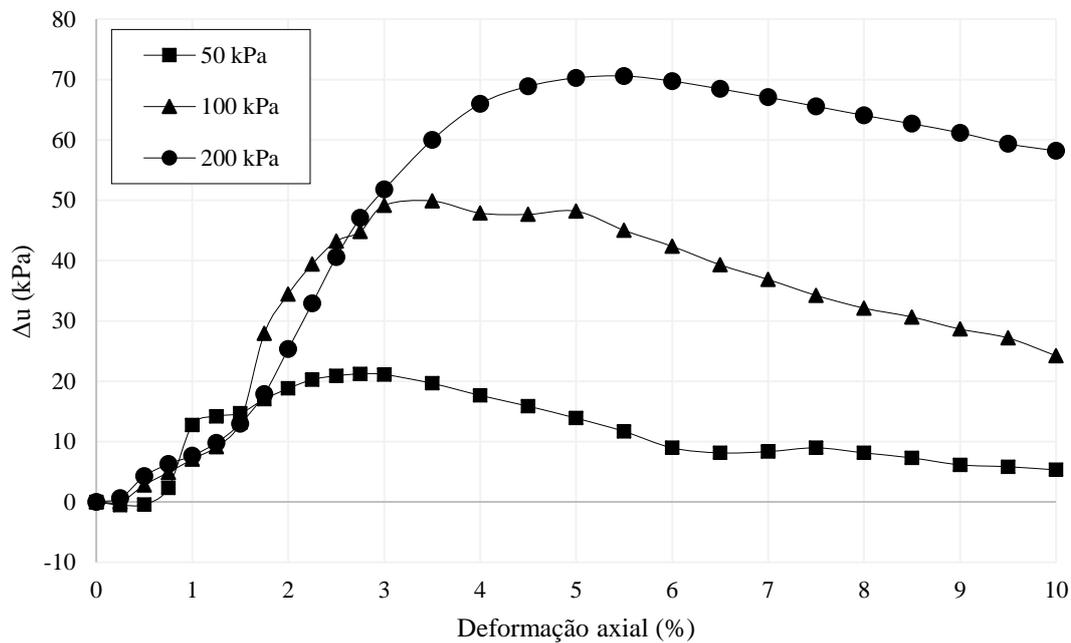
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura A.7 – Envoltória de resistência ao cisalhamento – Mistura solo-emulsão – Metodologia MI – 07 dias de cura – Saturada.



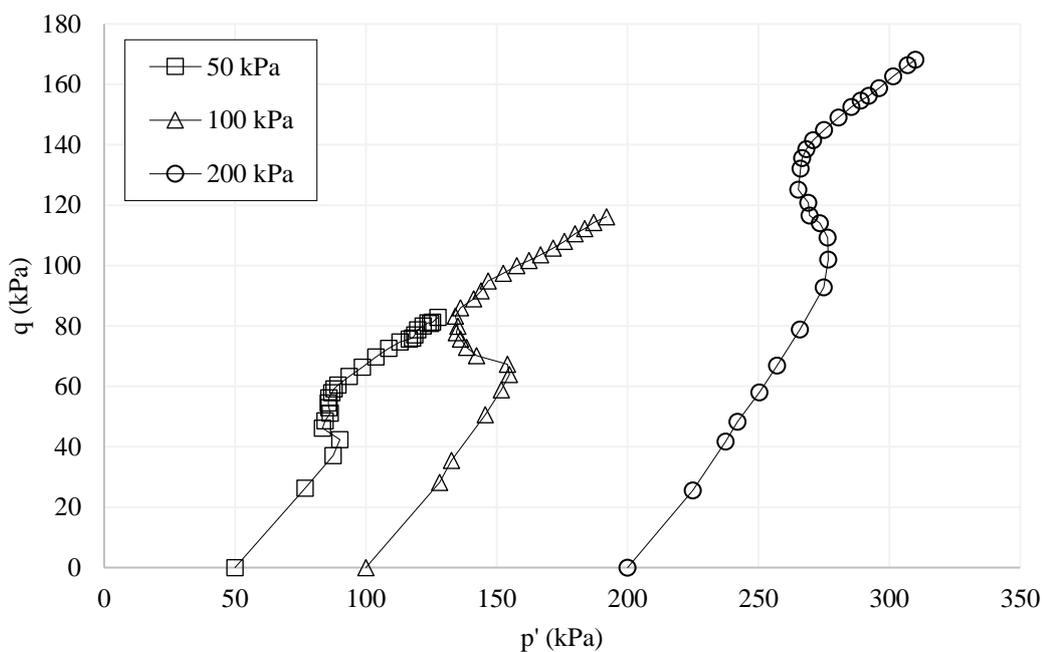
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura A.8 – Variação de poropressão *versus* deformação axial - Mistura solo-emulsão – Metodologia MI – 07 dias de cura – Saturada.



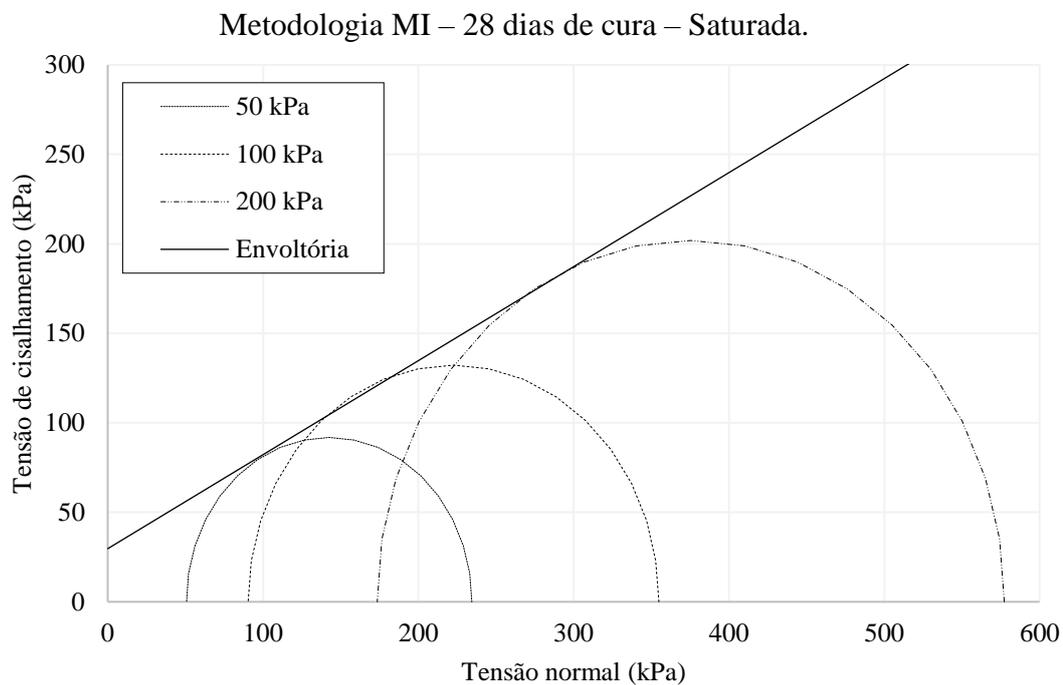
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura A.9 - Trajetória de tensões efetivas - Mistura solo-emulsão – Metodologia MI – 07 dias de cura – Saturada.



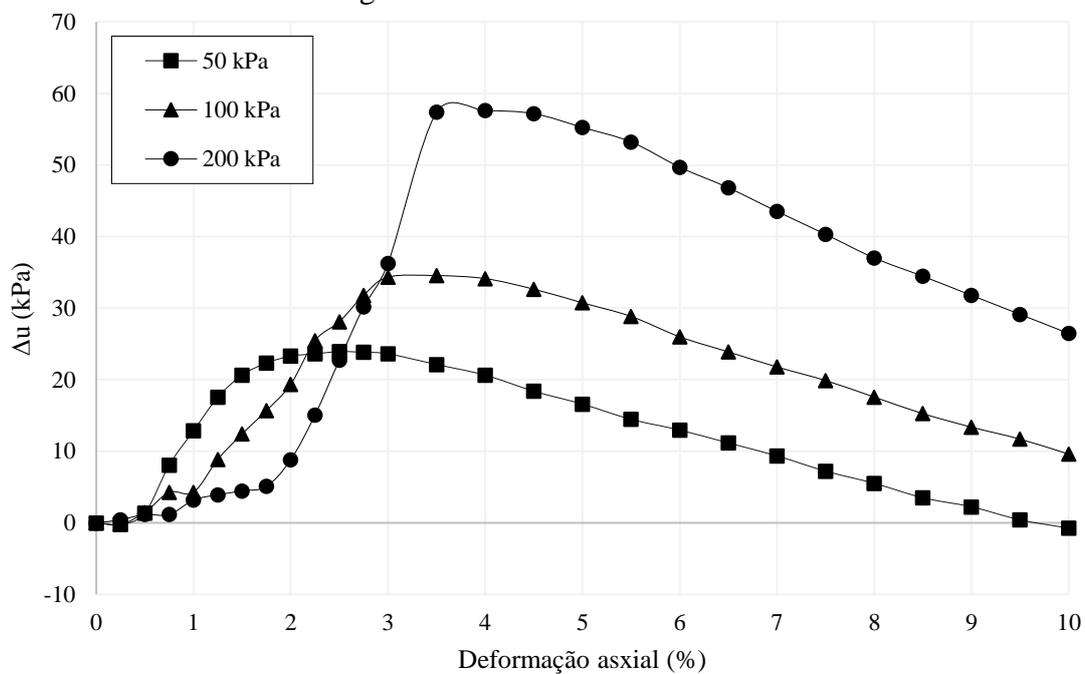
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura A.10 – Envoltória de resistência ao cisalhamento – Mistura solo-emulsão –



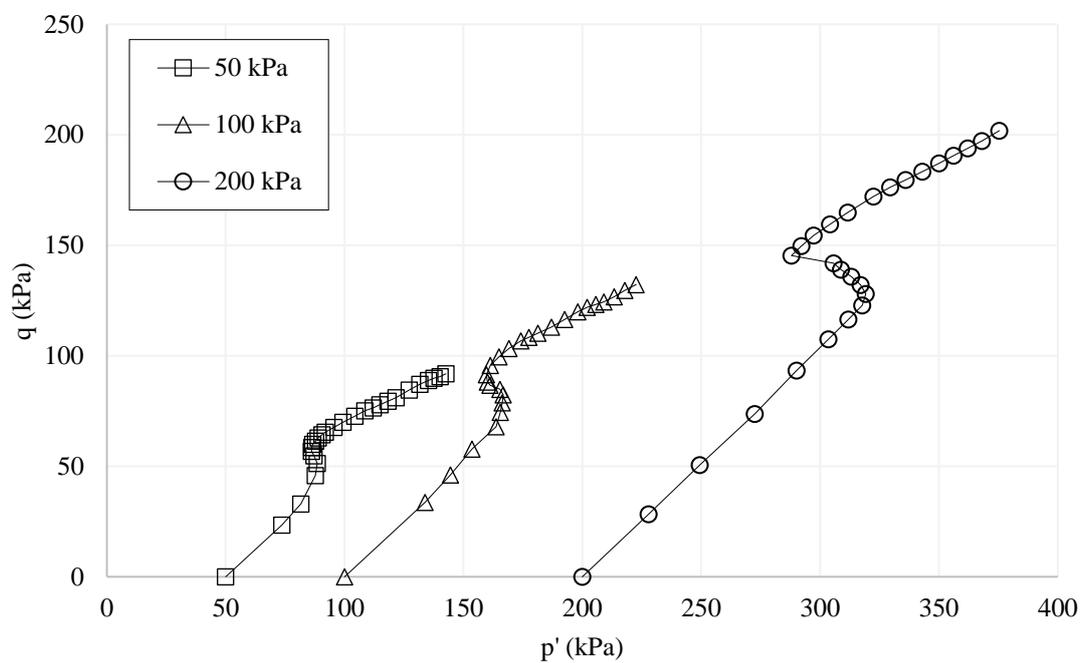
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura A.11 – Variação de poropressão *versus* deformação axial - Mistura solo-emulsão – Metodologia MI – 28 dias de cura – Saturada.



Fonte: Elaborado pela autora.

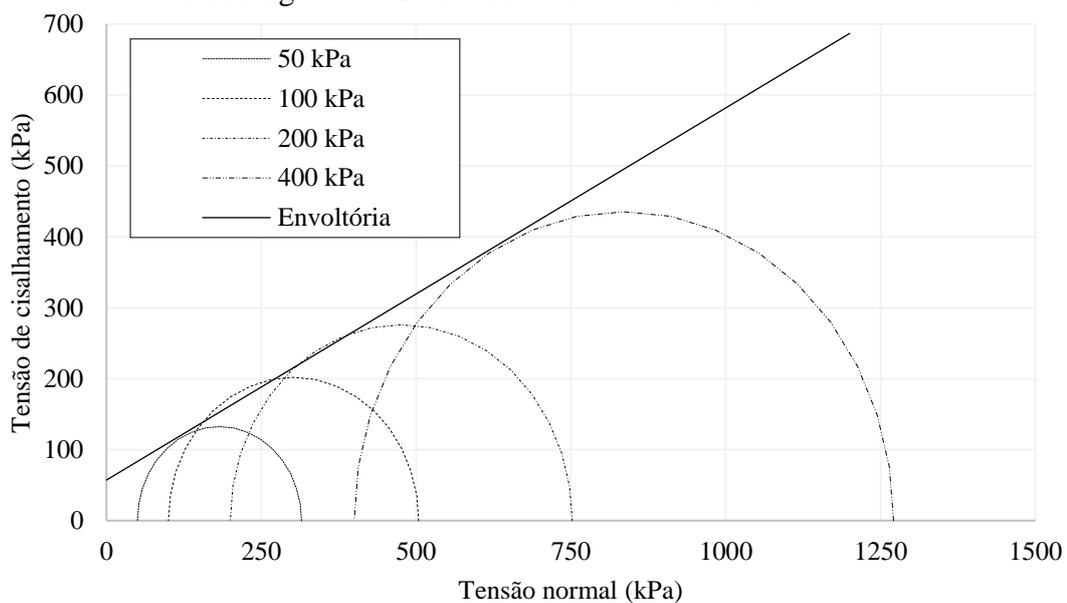
Figura A.12 -. Trajetória de tensões efetivas - Mistura solo-emulsão – Metodologia MI  
– 28 dias de cura – Saturada.



Fonte: Elaborado pela autora.

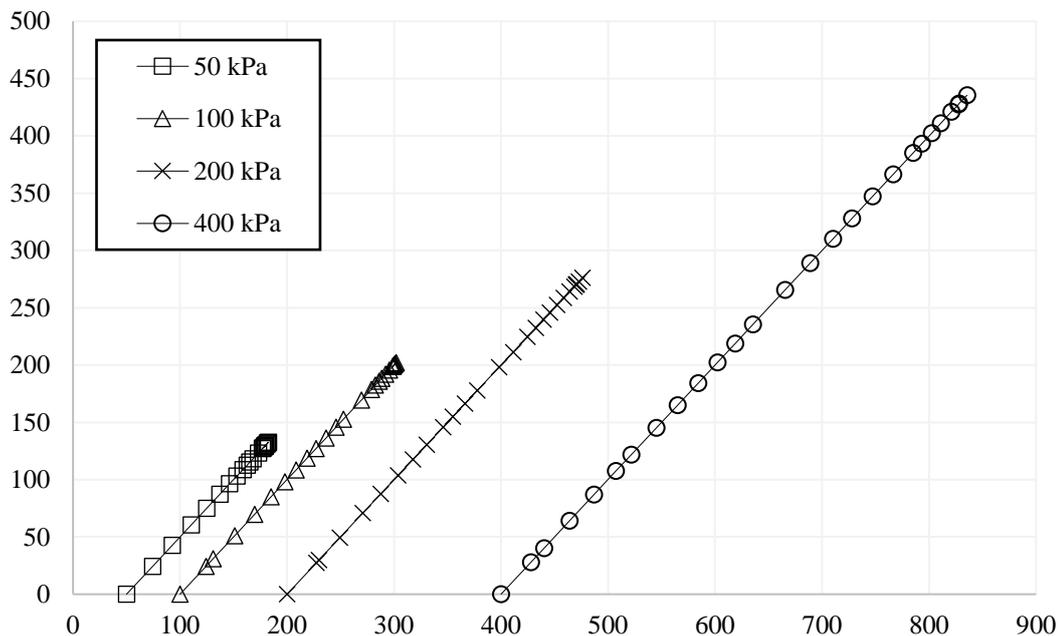
**APÊNDICE B - FIGURAS QUE REPRESENTAM AS ENVOLTÓRIAS DE RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO EFETIVAS E TRAJETÓRIAS DE TENSÕES EFETIVAS PARA O SOLO E CADA UMA DAS MISTURAS SOLO-EMULSÃO NA CONDIÇÃO NÃO SATURADA.**

Figura B.1 - Envoltória de resistência ao cisalhamento –Mistura solo-emulsão – Metodologia MI – 01 dia de cura – Não saturada.



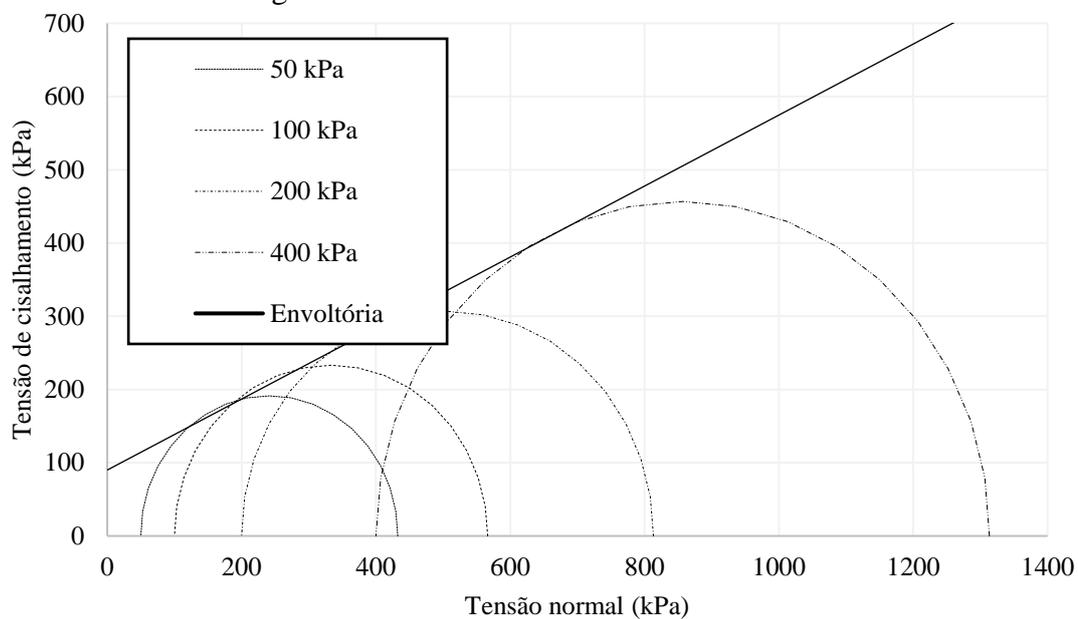
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura B.2 - . Trajetória de tensões efetivas - Mistura solo-emulsão – Metodologia MI – 01 dia de cura – Não saturada.



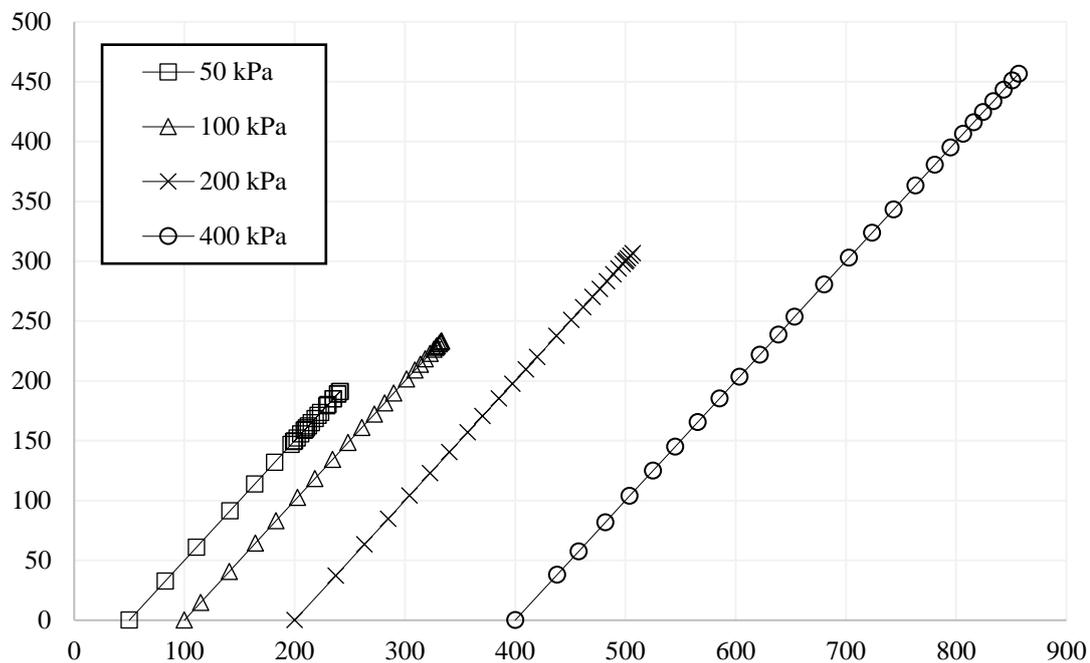
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura B.3 - Envoltória de resistência ao cisalhamento – Mistura solo-emulsão – Metodologia MI – 07 dias de cura – Não saturada.



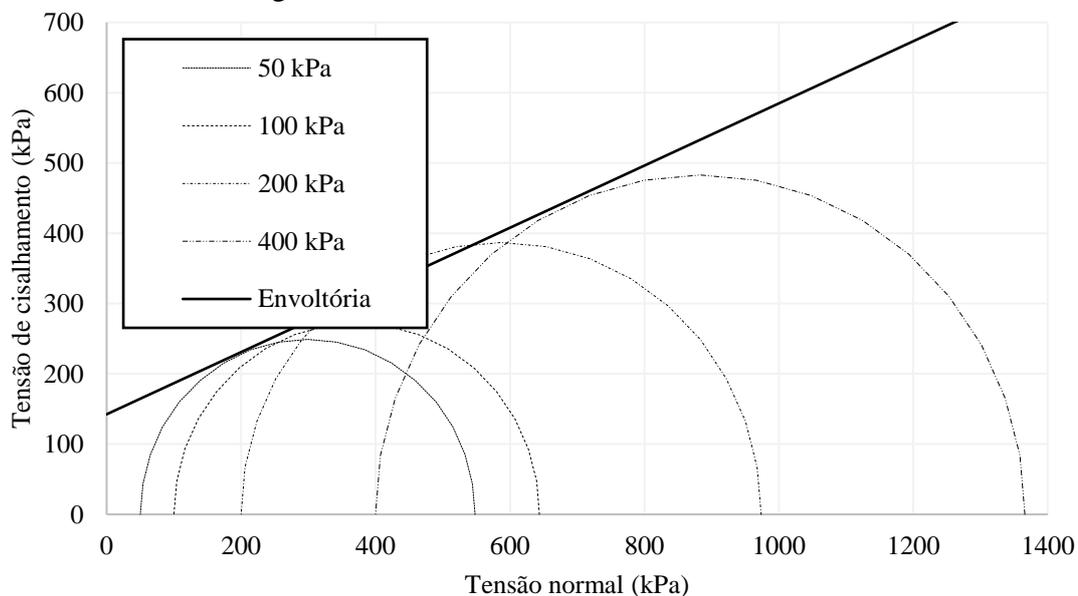
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura B.4 -. Trajetória de tensões efetivas - Mistura solo-emulsão – Metodologia MI – 07 dias de cura – Não saturada.



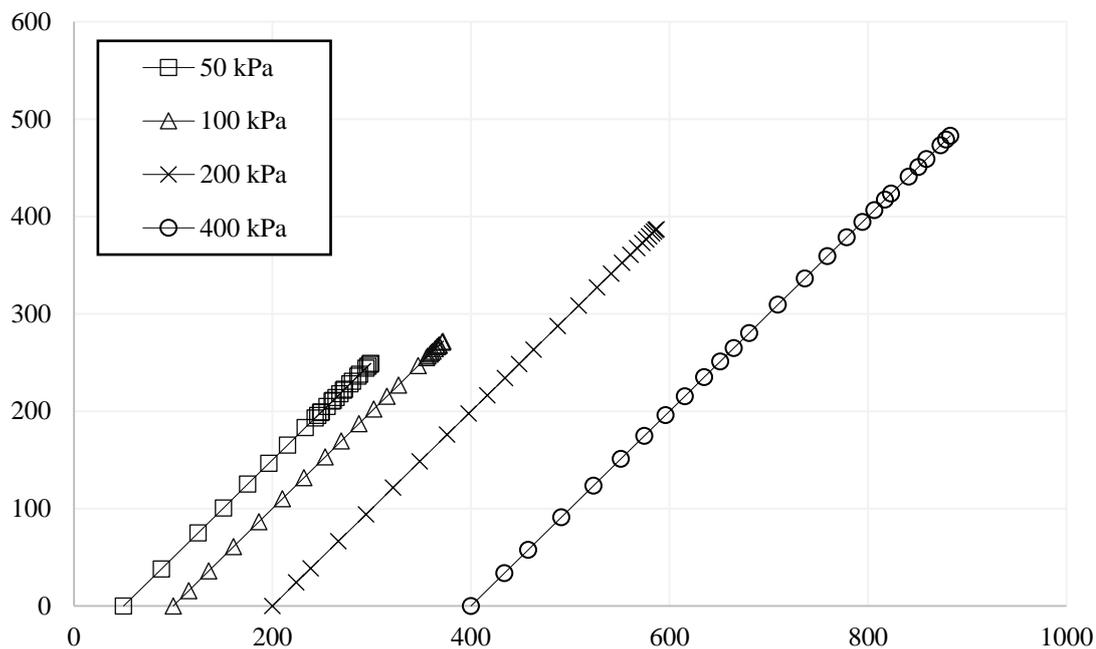
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura B.5 - Envoltória de resistência ao cisalhamento – Mistura solo-emulsão – Metodologia MI – 28 dias de cura – Não saturada.



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura B.6 -. Trajetória de tensões efetivas - Mistura solo-emulsão – Metodologia MI  
– 28 dias de cura – Não saturada.



Fonte: Elaborado pela autora.

**APÊNDICE C - FIGURAS QUE REPRESENTAM AS ENVOLTÓRIAS DE RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO EFETIVAS E TRAJETÓRIAS DE TENSÕES EFETIVAS PARA O SOLO E CADA UMA DAS MISTURAS SOLO-EMULSÃO NA CONDIÇÃO NÃO SATURADA.**

Figura C.1 - Envoltória de resistência ao cisalhamento –Mistura solo-emulsão –Metodologia M24 – 07 dias de cura – Não saturada.

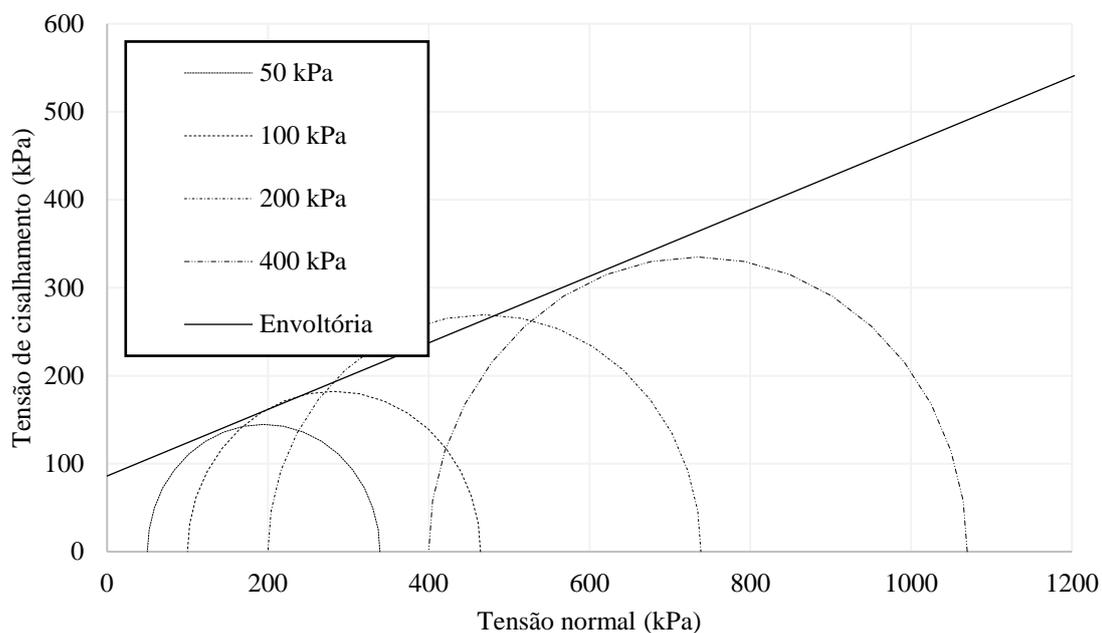


Figura C.2 - . Trajetória de tensões efetivas - Mistura solo-emulsão – Metodologia M24 – 07  
dias de cura – Não saturada

