



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

PAULO MATEUS BARROS RODRIGUES

**ESTUDO DO EFEITO DA VARIAÇÃO NO TEOR DE EMULSÃO ASFÁLTICA NA
RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO E NO COMPORTAMENTO
VISCOELÁSTICO DE UM SOLO MISTURADO COM ELEVADOS TEORES DE
EMULSÃO**

FORTALEZA

2023

PAULO MATEUS BARROS RODRIGUES

ESTUDO DO EFEITO DA VARIAÇÃO NO TEOR DE EMULSÃO ASFÁLTICA NA
RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO E NO COMPORTAMENTO VISCOELÁSTICO DE
UM SOLO MISTURADO COM ELEVADOS TEORES DE EMULSÃO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil 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.

Coorientador: Prof. Dr. Lucas Feitosa Albuquerque Lima Babadopulos.

FORTALEZA

2023

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

R615e Rodrigues, Paulo Mateus Barros.

Estudo do efeito da variação no teor de emulsão asfáltica na resistência ao cisalhamento e no comportamento viscoelástico de um solo misturado com elevados teores de emulsão / Paulo Mateus Barros Rodrigues. – 2023.

130 f. : il. color.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo e Design, Fortaleza, 2023.

Orientação: Prof. Dr. Silvrano Adonias Dantas Neto.

Coorientação: Prof. Dr. Lucas Feitosa de Albuquerque Lima Babadopulos .

1. solo-emulsão. 2. reologia. 3. resistência ao cisalhamento. I. Título.

CDD 720

PAULO MATEUS BARROS RODRIGUES

ESTUDO DO EFEITO DA VARIAÇÃO NO TEOR DE EMULSÃO ASFÁLTICA NA
RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO E NO COMPORTAMENTO VISCOELÁSTICO DE
UM SOLO MISTURADO COM ELEVADOS TEORES DE EMULSÃO

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

Aprovada em: 12/07/2023.

BANCA EXAMINADORA

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

Prof. Dr. Lucas Feitosa de Albuquerque Lima Babadopulos (Coorientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Francisco Evangelista Junior
Universidade de Brasília (UNB)

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

Aos meus pais,

Paulo Abílio da Silveira Rodrigues e Rita de
Cássia Barros Rodrigues, que sempre
estiveram ao meu lado e dedicaram-se
incansavelmente para tornar meus sonhos
realidade.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Deus pela Sua presença constante em minha vida o que me fez, em muitos momentos, ter forças para continuar e superar todos os desafios. Agradeço também a Ele por todas as graças e por ter me concedido a mim muito além daquilo que mereço.

Aos meus pais, Paulo e Rita, que verdadeiramente dedicaram suas vidas em função da família, que nunca mediram esforços para proporcionar aquilo de há de melhor para os filhos e que sempre acreditaram em mim e apoiaram todas as minhas decisões. Vocês são minha verdadeira inspiração de vida.

Aos meus irmãos, Guga e Gabi, por estarem desde sempre presentes sendo fonte de apoio, amor e por me ensinarem, cada um a seu modo, uma forma diferente de enxergar a vida e encarar os problemas.

À Maria Edith, pessoa com quem escolhi dividir o resto de minha vida, por toda compreensão, incentivo e amor dedicados ao longo dessa jornada. Você esteve ao meu lado, encorajando-me, acreditando em mim e a sua dedicação e comprometimento foram inspiração para que eu pudesse chegar até aqui.

A todos os amigos e familiares que estiveram ao meu lado durante esta jornada acadêmica. Seu apoio constante, encorajamento e palavras de estímulo foram um verdadeiro presente em minha vida.

Ao meu orientador, Silvrano, e coorientador, Lucas, por tudo que me ensinaram, conselhos e contribuições durante esses anos de mestrado. Sou grato também por toda paciência e disponibilidade empregadas por eles para a conclusão deste trabalho e por todas as oportunidades que me deram, sempre acreditando em meu potencial.

Expresso também minha sincera gratidão ao professor Jorge Lucas pela sua contribuição fundamental na realização deste trabalho.

Aos professores Evangelista e Francisco Chagas pela disponibilidade em participar da banca.

À Universidade Federal do Ceará, ao Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental e a todos os professores e colaboradores que proporcionaram a realização dos meus estudos e a conclusão do mestrado em geotecnia.

“Nossa maior fraqueza é a desistência. O caminho mais certo para o sucesso é sempre tentar apenas uma vez mais.” (THOMAS EDISON).

RESUMO

A mistura de solos com emulsões asfálticas é uma técnica de estabilização com utilização bastante consolidada em obras de pavimentação. A adição de altas concentrações de emulsão asfáltica nessas misturas tem proporcionado modificações nas propriedades do solo, permitindo sua aplicação em diversos tipos de projetos de engenharia, além daqueles em que tradicionalmente eram empregadas. Esta pesquisa foi realizada a fim de avaliar o efeito do teor de emulsão asfáltica nas propriedades reológicas e de resistência ao cisalhamento de um solo arenoso misturado com emulsão asfáltica. A metodologia experimental empregada consistiu em: (i) coleta e caracterização do solo e escolha da emulsão asfáltica; (ii) mistura dos materiais adotando os teores de emulsão de 16%, 22% e 28% em massa; (iii) compactação dos materiais utilizando as metodologias MCT e Superpave; (iv) ensaio de compressão triaxial; e (v) ensaios de módulo complexo e de fluência. Os resultados dos ensaios de resistência mostraram que, à medida em que o teor de emulsão foi aumentado, menores foram os ângulos de atrito e, para as misturas com 16% e 22%, maiores foram os valores de coesão. Entretanto, na mistura com 28% de emulsão, houve uma redução em seu intercepto coesivo pelo afastamento dos grãos devido ao excesso de ligante. O modelo reológico adotado para caracterizar este material foi o 2S2P1D, com ajustes satisfatórios. Foi executada uma previsão do comportamento das misturas com 16% de emulsão, após sua caracterização por meio dos ensaios de módulo complexo com deformações máximas de 67,5 $\mu\text{m/m}$, e conseqüente comparação com os resultados obtidos diretamente pelo ensaio de fluência no material, realizado com deformações até 20 vezes maiores. Foram encontrados erros de previsão variando entre 44% e 61% de diferença, valores compatíveis com materiais granulares. Comprovada a validade do modelo, prosseguiu-se à caracterização das misturas nos demais teores de 22% e 28%. Os parâmetros do 2S2P1D que possuem dependência temporal (k , h , δ , τE e β) foram os mesmos para os três teores de mistura, indicando que estes estão associados ao tipo de ligante utilizado. Já para os valores de E_0 e E_{00} , observou-se uma clara correlação entre a quantidade de ligante nas misturas e os valores destes. Como uma primeira aproximação, estabeleceu-se uma relação linear entre estes valores. Com esse trabalho, é possível fazer uma determinação inicial de um coeficiente de caracterização do comportamento de misturas solo-emulsão sem a necessidade de maiores investigações experimentais, permitindo futuras avaliações quanto aos riscos estruturais devido à fluência. No futuro, estudos deverão se voltar para a avaliação da microestrutura dessas misturas e para o desenvolvimento de uma análise micromecânica que confirme os resultados encontrados.

Palavras-chave: solo-emulsão; reologia; resistência ao cisalhamento; viscoelasticidade.

ABSTRACT

The mixture of soils with asphalt emulsions is a well-established stabilization technique widely employed in pavement construction. The addition of high concentrations of asphalt emulsion in these mixtures has resulted in modifications of soil properties, enabling its application in various types of engineering projects, beyond those in which it was traditionally employed. This research was conducted to assess the effect of asphalt emulsion content on the rheological properties and shear strength of a sandy soil mixed with asphalt emulsion. The experimental methodology involved: (i) soil collection and characterization, and selection of the asphalt emulsion; (ii) mixing the materials at emulsion dosages of 16%, 22%, and 28% by mass; (iii) compacting the mixtures using MCT and Superpave methods; (iv) triaxial compression; and (v) complex modulus and creep tests. The results of the strength tests revealed that as the emulsion dosage increased, the friction angles decreased, while cohesion values were higher for mixtures with 16% and 22% dosages. However, in the mixture with 28% emulsion, there was a reduction in its cohesive intercept due to the separation of particles caused by an excess of binder. The rheological model adopted to characterize this material was the 2S2P1D, with satisfactory fitting. Behavior prediction was conducted for mixtures with 16% emulsion, after its linear viscoelastic characterization through complex modulus tests with maximum strains of 67.5 $\mu\text{m/m}$, as well as the corresponding comparison with the results obtained directly by the creep test, performed with deformations up to 20 times greater. Prediction errors were found ranging from 44% to 61% of difference, which are consistent with granular materials. Once the validity of the model was confirmed, the mixtures with 22% and 28% emulsion dosages were further characterized. It was observed that the temporal-dependent parameters (k , h , δ , τE and β) of the 2S2P1D model remained the same for all three mixture dosages, indicating their association with the type of binder used. Regarding the values of E_0 and E_{00} , a clear correlation was observed between the amount of binder in the mixtures and these values. As a first approximation, a linear relationship was established among these values. Through this study, it becomes feasible to perform an initial determination of a characterization coefficient for the behavior of soil-emulsion mixtures without the requirement for extensive experimental investigations, thereby enabling prospective assessments regarding structural risks attributable to creep. In the forthcoming research, emphasis should be placed on evaluating the microstructure of these mixtures and on the formulation of a micromechanical analysis that corroborates the findings obtained.

Keywords: soil-emulsion; rheology; shear strength; viscoelasticity.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1	– Fluxograma com estratégia experimental do trabalho.....	17
Figura 2.1	– Processo de fabricação de emulsão asfáltica	20
Figura 2.2	– Representação do filme asfáltico residual	25
Figura 2.3	– Variação da permeabilidade do solo Peixe com o teor de emulsão	28
Figura 2.4	– Variação da permeabilidade do solo Corumbá com o teor de emulsão	29
Figura 2.5	– Variação da permeabilidade do solo Corumbá com o teor de emulsão	29
Figura 2.6	– Curva de compactação das misturas solo – emulsão PNI e PN24 30	31
Figura 2.7	– Curva de compactação das misturas solo – emulsão M24, PM24 e PN24	31
Figura 2.8	– Curva de compactação das misturas solo – emulsão MQ e M24	32
Figura 2.9	– Variação do coeficiente de permeabilidade com o teor de emulsão	32
Figura 2.10	– Envoltórias de ruptura das misturas de solo – emulsão	33
Figura 2.11	– Envoltórias de ruptura das misturas de solo – emulsão não saturadas	35
Figura 2.12	– Envoltórias de ruptura das misturas de solo – emulsão saturadas	36
Figura 2.13	– Envoltórias de ruptura das misturas MI e M24 não saturadas	37
Figura 2.14	– Domínios típicos do comportamento observado na deformação de misturas betuminosas (ϵ) pelo número de ciclos (N)	39
Figura 2.15	– Função degrau unitária	41
Figura 2.16	– Respostas materiais viscoelásticos	42
Figura 2.17	– Carregamento harmônico	43
Figura 2.18	– Representação do módulo complexo	45
Figura 2.19	– Exemplo de translação horizontal para construção de curva mestra	47
Figura 2.20	– Resumo interconversão de propriedades	49
Figura 2.21	– Modelo de Maxwell generalizado	50
Figura 2.22	– Modelo de Kelvin – Voigt generalizado	51

Figura 2.23 – Modelo de Huet – Sayegh	53
Figura 2.24 – Modelo 2S2P1D	54
Figura 2.25 – Resumo interconversão de propriedades	55
Figura 2.26 – Comparação entre as previsões de modelos de espectro discreto e contínuo	56
Figura 3.1 – Curva de compactação do solo	59
Figura 3.2 – Curva de compactação da mistura solo e emulsão – M24	61
Figura 3.3 – Corpos de prova após compactação	63
Figura 3.4 – Adensamento e dissipação da poropressão	64
Figura 3.5 – Adensamento e dissipação da poropressão - solo com 28% de emulsão	66
Figura 3.6 – Mudança de geometria do corpo de prova após cessada variação volumétrica.	67
Figura 3.7 – Curva de ruptura mistura M24 e solo SM	68
Figura 3.8 – Diagrama $p'-q'$ e linha $k-f$ do solo SM 70	70
Figura 3.9 – Representação do filme asfáltico ao redor de um grão de solo	71
Figura 3.10 – Envoltórias de ruptura - Parâmetros efetivos	72
Figura 3.11 – Variação do V_v e RBV nos diferentes teores de emulsão da mistura	75
Figura 4.1 – (a) Compactador giratório Superpave utilizado para a compactação dos corpos de prova de solo-emulsão; (b) esquema do carregamento utilizado na compactação	80
Figura 4.2 – Curva de perda de massa dos 3 corpos de prova com 16% de emulsão investigados quanto ao comportamento viscoelasticidade linear	81
Figura 4.3 – Universal Testing Machine 25	82
Figura 4.4 – Carregamento harmônico de compressão e comportamento em deformação ...	83
Figura 4.5 – (a) LVDTs posicionados no corpo de prova para o ensaio de Módulo Complexo; (b) esquema de carregamento e de resposta mecânica no ensaio de Módulo Complexo	84
Figura 4.6 – LVDTs posicionados no corpo de prova para o ensaio de Fluência	86
Figura 4.7 – Isotermas do solo com 16% de emulsão asfáltica	87

Figura 4.8	– Curva mestra do solo-emulsão com teor de 16%	88
Figura 4.9	– Degradação do módulo areias e argilas em função de Z	89
Figura 4.10	– Comparação modelo 2S2P1D e modelo KVG	90
Figura 4.11	– Deformação prevista vs. Resultado ensaio de fluência	90
Figura 5.1	– Corpos de prova de solo – emulsão e suporte plástico	99
Figura 5.2	– Universal Testing Machine-25	100
Figura 5.3	– (a) LVDTs posicionado no corpo de prova; (b) Compór de prova na câmara de condicionamento de temperatura	101
Figura 5.4	– Carregamento de compressão harmônica e comportamento de deformação	103
Figura 5.5	– Isotermas de módulo dinâmico de pontos experimentais médios (°C)	105
Figura 5.6	– Curvas mestras experimentais e modelagem 2S2P1D para cada mistura solo-emulsão com valores assintóticos te óricos	107
Figura 5.7	– Comparação de resultados experimentais com modelos propostos em escala logarítmica	109
Figura 5.8	– Correlação entre o teor de emulsão e os valores de E_0 e E_{00}	110
Figura 5.9	– Correlação entre o teor de emulsão e os valores τE	111

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	– Variação parâmetros de resistência das misturas solo – emulsão	28
Tabela 2.2	– Resumo procedimentos de compactação solo – emulsão.....	30
Tabela 2.3	– Parâmetros de resistência solo – emulsão em baixos carregamentos	34
Tabela 2.4	– Parâmetros de resistência solo – emulsão em altos carregamentos	34
Tabela 2.5	– Parâmetros de resistência solo – emulsão não saturado	35
Tabela 2.6	– Parâmetros de resistência solo – emulsão saturado	36
Tabela 2.7	– Parâmetros de resistência solo – emulsão não saturado MI e M24	37
Tabela 3.1	– Resumo dos parâmetros geotécnicos do solo estudado	60
Tabela 3.2	– Propriedades da emulsão asfáltica RL-1C	60
Tabela 3.3	– Parâmetros de resistência	71
Tabela 4.1	– Resumo dos parâmetros geotécnicos do solo coletado	78
Tabela 4.2	– Resumo dos parâmetros da emulsão asfáltica RL-1C utilizada	78
Tabela 4.3	– Especificações do ensaio de módulo dinâmico quanto a: a) Frequência e número de ciclos; b) Temperatura e tempo de condicionamento	85
Tabela 4.4	– Níveis de tensão do ensaio de Módulo Complexo	85
Tabela 4.5	– Parâmetros do modelo 2S2P1D e da equação WLF	88
Tabela 5.1	– Parâmetros geotécnicos do solo	96
Tabela 5.2	– Parâmetros da emulsão RL-1C	97
Tabela 5.3	– Parâmetros do modelo 2S2P1D e da equação WLF	98
Tabela 5.4	– Níveis de tensões no ensaio de módulo complexo	101
Tabela 5.5	– Coeficientes do modelo 2S2P1D fatores de translação da lei WLF	108

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABEDA	Associação Brasileira das Empresas Distribuidoras de Asfaltos
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CAP	Cimento asfáltico de petróleo
CID	Consolidado isotropicamente drenado
CIU	Consolidado isotropicamente não drenado
CL	Argila de baixa plasticidade
CNPq	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
M24	Marshall compactado após 24 horas da mistura
MCT	Miniatura, Compactado, Tropical
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
SM	Areia siltosa
SUCS	Sistema Unificado de Classificação dos Solos
UFC	Universidade Federal do Ceará

LISTA DE SÍMBOLOS

$^{\circ}$	Graus
1C	Emulsão asfáltica de menor viscosidade
2C	Emulsão asfáltica de maior viscosidade
%	Porcentagem
$^{\circ}\text{C}$	Graus Celsius
B	Parâmetro B de Skempton
c'	Coesão efetiva
c	Coesão total
cm	Centímetro
cm^3	Centímetro cúbico
D	Diâmetro corpo de prova
$D(t)$	Função fluência
ε	Deformação final
$ E^* $	Módulo dinâmico
E^*	Módulo complexo
$E(t)$	Módulo de relaxação
ϕ'	Ângulo de atrito interno efetivo
ϕ	Ângulo de atrito interno total
φ	Ângulo de fase
$\Delta\sigma_c$	Acréscimo de tensão confinante aplicado
Δu	Acréscimo de poropressão gerado
g	Gramas
g/cm^3	Gramas/centímetro cúbico
h	Horas
kN	Quilo Newton
kPa	Quilo Pascal
H	Altura do corpo de prova
m	Metro
m^3	Metro cúbico
mm	Milímetro

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Motivação da pesquisa.....	14
1.2	Objetivos da pesquisa.....	16
1.2.1	<i>Objetivo geral</i>	16
1.2.2	<i>Objetivos específicos.....</i>	16
1.3	Metodologia geral empregada.....	16
1.4	Estrutura do trabalho.....	17
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.1	Introdução	19
2.2	Emulsão asfáltica.....	19
2.2.1	<i>Ruptura</i>	21
2.2.2	<i>Classificação das emulsões asfálticas.....</i>	21
2.3	Estabilização de solos.....	22
2.3.1	<i>Estabilização física.....</i>	23
2.3.2	<i>Estabilização química</i>	23
2.4	Viscoelasticidade	38
2.4.1	<i>Regime linear</i>	39
2.4.2	<i>Propriedades viscoelásticas lineares</i>	40
2.4.3	<i>Caracterização das propriedades a partir de resultados experimentais</i>	46
2.4.4	<i>Interconversão de propriedades</i>	48
2.4.5	<i>Modelos constitutivos viscoelástico lineares</i>	50
3	AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO CISALHANTE DE MISTURAS SOLO-EMULSÃO COM TEORES DE EMULSÃO VARIANDO DE 16% A 28% EM MASSA	57
3.1	Introdução	57
3.2	Materiais e métodos	59
3.2.1	<i>Solo empregado</i>	59
3.2.2	<i>Emulsão asfáltica.....</i>	60
3.2.3	<i>Determinação dos teores de emulsão asfáltica.....</i>	60
3.2.4	<i>Mistura entre o solo e a emulsão asfáltica.....</i>	61
3.2.5	<i>Confecção dos corpos de prova (CP).....</i>	62

3.2.6	<i>Ensaio de compressão triaxial</i>	63
3.3	Resultados e discussões	64
3.3.1	<i>Adensamento dos corpos de prova</i>	64
3.3.2	<i>Ruptura dos corpos de prova</i>	68
3.4	Conclusões	75
4	MODELAGEM VISCOELÁSTICA LINEAR A PARTIR DE ENSAIOS DE MÓDULO COMPLEXO E DE FLUÊNCIA EM UM SOLO-EMULSÃO	76
4.1	Introdução	76
4.2	Materiais e métodos	78
4.2.1	<i>Amostra de solo</i>	78
4.2.2	<i>Emulsão asfáltica</i>	78
4.2.3	<i>Determinação dos teores de emulsão asfáltica</i>	79
4.2.4	<i>Mistura entre o solo e a emulsão asfáltica</i>	79
4.2.5	<i>Confecção dos corpos de prova</i>	79
4.2.6	<i>Caracterização do módulo complexo</i>	81
4.2.7	<i>Ensaio de fluência</i>	86
4.3	Resultados e discussões	86
4.4	Conclusões	92
5	AVALIAÇÃO DO EFEITO DO TEOR DE LIGANTE ASFÁLTICO NO COMPORTAMENTO VISCOELÁSTICO DE MISTURAS SOLO-EMULSÃO	94
5.1	Introdução	94
5.2	Materiais e métodos	96
5.2.1	<i>Amostra de solo</i>	96
5.2.2	<i>Emulsão asfáltica</i>	97
5.2.3	<i>Determinação dos teores de emulsão asfáltica</i>	97
5.2.4	<i>Mistura do solo com a emulsão asfáltica</i>	97
5.2.5	<i>Preparação dos corpos de prova</i>	98
5.2.6	<i>Caracterização do modulo complexo</i>	99
5.3	Resultados e discussões	104
5.4	Conclusões	112

6	CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS	114
6.1	Resumo das conclusões	114
6.2	Sugestões para trabalhos futuros	116
	REFERÊNCIAS.....	117

1 INTRODUÇÃO

1.1 Motivação da pesquisa

A necessidade crescente por um maior controle de cheias e por mecanismos de armazenamento de água, juntamente com os avanços na área de mecânica dos solos, têm propiciado um aumento na quantidade e na magnitude das barragens de terra e, por consequência, despertando maior interesse no estudo de soluções alternativas para tais construções. Para Fontenelle et al. (2017) as barragens são a principal forma de combater as secas do semiárido brasileiro e segundo Massad (2010) as barragens de terra são as mais utilizadas no Brasil.

Embora as barragens de terra promovam melhorias à sociedade, muitas vezes, trazem consigo prejuízos ambientais em virtude da necessidade de extração de grandes volumes de solos de jazidas naturais (Cota, 2017). Além das questões ambientais e de sustentabilidade, a escolha de materiais para a execução de obras geotécnicas deve levar em consideração aspectos técnicos, uma vez que os solos possuem diversas aplicabilidades na engenharia e para cada uma dessas são requeridas características distintas. No caso das barragens de terra é necessário que o solo utilizado em sua construção tenha propriedades específicas de resistência, permeabilidade e deformabilidade.

A estabilização de solos consiste em uma alteração na composição ou na estrutura do material, a fim de modificar suas propriedades de modo a melhorar seu desempenho quando utilizados em obras de engenharia (VILLIBOR, 1982). Tais técnicas vão desde mudanças na composição granulométrica, aplicação de esforços mecânicos e até mesmo alterações em sua composição química (REBELO, 2009). Dentre os diversos produtos utilizados nas estabilizações químicas destacam-se os materiais asfálticos.

Falcão (2007) e Guimarães (2012) estudaram o comportamento mecânico e hidráulico de misturas asfálticas de concreto betuminoso usinado a quente (CBUQ) e, por mais que tenham dado maior ênfase para esse tipo de mistura convencional, evidenciaram o potencial na utilização de outros tipos de misturas asfálticas nas mais diversas obras de engenharia, como aterros, rodovias, núcleo de barragens, dentre outras.

Segundo Gondim (2008), o asfalto possui elevada viscosidade dificultando sua trabalhabilidade. Isso, por vezes, prejudica a completa interação com o solo e conseqüentemente dificulta a sua utilização como material estabilizante. Uma forma de

diminuir essa viscosidade sem a necessidade de uma fonte externa de calor seria: diluir o asfalto em solvente ou emulsificá-lo. Nesse contexto, a estabilização de solo com emulsão asfáltica, para fins de pavimentação, é uma solução difundida há bastante tempo e já foi objetivo de diversos estudos, dentre eles: Miceli Junior (2006), Soliz (2007), Gondim (2008), Sampaio (2008), Santos (2009) e Sant'Ana (2009).

Jacinto (2005, 2010) deu início ao estudo de misturas solo-emulsão asfáltica aplicadas como material impermeável em barragens de terra, tendo seus resultados considerados inconclusivos, provavelmente, em virtude dos baixos teores de emulsão asfáltica misturados no solo, inferiores a 10%. Os autores Lima & Dantas Neto (2019), Lima (2016), Dantas Neto *et al.* (2020) e Brito *et al.* (2022) avaliaram as alterações ocasionadas na forma de compactação e nas propriedades de permeabilidade e resistência ao cisalhamento de um solo tipicamente granular, quando misturado com altos teores de emulsão asfáltica, superiores a 10%. Os resultados obtidos foram bastante promissores.

Lima (2016) e Lima & Dantas Neto (2019) estudaram o processo de compactação em misturas com elevados teores de emulsão, variando entre 13% até 31%, com o intuito de se obter uma mistura mais homogênea e assim entender o processo de compactação deste material. Já Pereira (2018) e Dantas Neto *et al.* (2020) avaliaram o comportamento mecânico e hidráulico de misturas com teores variando de 13% até 28%.

Brito (2020) e Brito *et al.* (2022) estudaram os parâmetros de resistência ao cisalhamento das misturas de solo – emulsão com teores ótimos de emulsão de 16% e 19%, para corpos de prova compactados imediatamente após a mistura e com 24 horas de aeração. O objetivo principal do trabalho foi determinar o efeito do tempo de cura nestes parâmetros para diferentes tipos de misturas, sendo cada uma delas analisadas a partir dos teores ótimos de emulsão asfáltica obtidos das curvas de compactação.

Nenhum dos autores citados buscou caracterizar as propriedades de rigidez das misturas solo-emulsão, possibilitando compreender como se dá o comportamento de deformação destas quando submetidas a solicitações de tensão, ainda que esta informação seja de fundamental importância para viabilizar a aplicação desse material nas obras de engenharia.

Deve-se ressaltar que, ao estudar o comportamento de rigidez de misturas asfálticas, uma característica bastante pronunciada destas está associada a suas propriedades viscosas, que acabam lhes conferindo um comportamento de deformação dependente do tempo e da taxa de aplicação do carregamento (SILVA, 2009).

Diversos foram os estudos que se propuseram a desenvolver métodos mecânicos a fim de propor modelos constitutivos capazes de prever o comportamento viscoelástico dos

materiais asfálticos e suas misturas, dentre eles: Yusoff *et al.* (2011); Nur *et al.* (2013); Cheng *et al.* (2016). Até o apresentar momento, pouco se sabe sobre esse tipo de comportamento viscoso em mistura de solos e emulsões asfálticas e qual modelo mecânico mais adequado para caracterizá-lo.

1.2 Objetivos da pesquisa

1.2.1 Objetivo geral

Este trabalho tem por objetivo avaliar o efeito nas propriedades de resistência ao cisalhamento e de módulo dinâmico de um solo arenoso misturado com diferentes teores de dosagem emulsão asfáltica, acima e abaixo do teor ótimo, bem como verificar a tendência de variação das propriedades de rigidez viscoelásticas em função do teor de emulsão asfáltica da mistura.

1.2.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos deste trabalho são:

1. Investigar a tendência no comportamento cisalhante de misturas entre solo e emulsão asfáltica confeccionadas com teores de 16%, 22% e 28% em massa;
2. Ajustar um modelo constitutivo reológico adequado a misturas solo-emulsão, bem como determinar suas propriedades, para a descrição do comportamento de deformação desse material;
3. Validar o modelo constitutivo viscoelástico proposto comparando os valores previstos pelo modelo com resultados de ensaios experimentais;
4. Investigar a tendência na variação dos parâmetros do modelo viscoelástico entre o intervalo de 16% a 28% de teor de emulsão asfáltica na mistura.

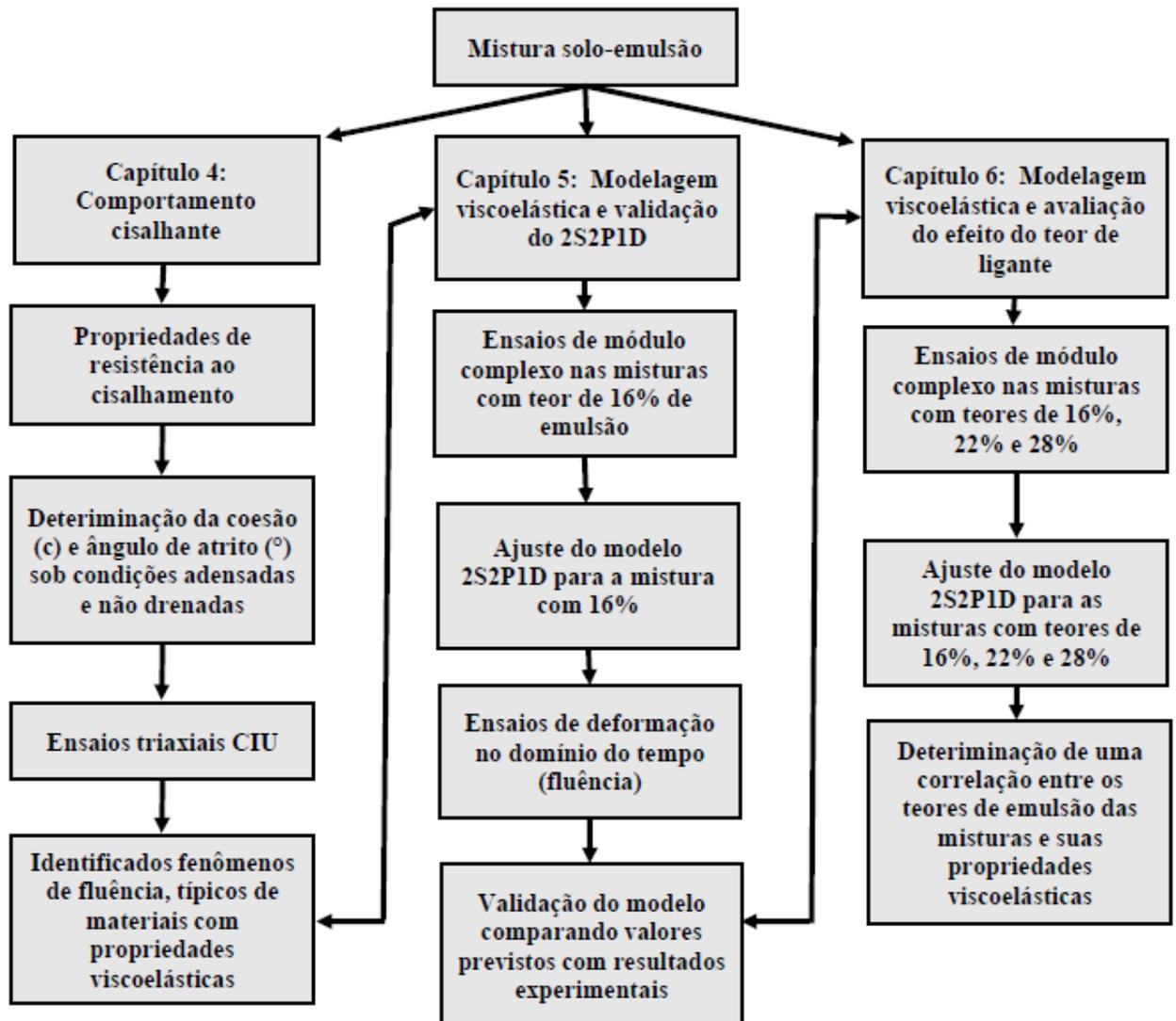
1.3 Estratégia metodológica geral empregada

Esta pesquisa desenvolveu-se, inicialmente, a partir de uma revisão bibliográfica em teses, artigos, livros, normas técnicas etc. Essa etapa foi fundamental para a correta compreensão dos assuntos abordados, garantindo o embasamento necessário para o desenvolvimento das etapas subsequentes.

Em seguida foram realizados trabalhos experimentais, por meio de ensaios laboratoriais, de caracterização dos materiais, dosagem com elevados teores de emulsão asfáltica, compactação das misturas, bem como ensaios de resistência e de deformação para a caracterização das propriedades reológicas.

A estratégia experimental adotada neste trabalho é apresentada de forma resumida na Figura 1.1, onde apresenta-se um fluxograma detalhando a concatenação das atividades e a divisão em duas investigações principais (uma de resistência ao cisalhamento e a outra de caracterização viscoelástica linear).

Figura 1.1 – Fluxograma com estratégia experimental do trabalho



Fonte: Elaborado pelo autor

Os detalhes experimentais são descritos nos três capítulos principais de resultados

e conclusões, em seções de “Materiais e Métodos” pertinentes especificamente àqueles capítulos.

1.4 Estrutura do trabalho

Esta dissertação foi dividida em 6 capítulos, com o assunto abordado em cada um deles descrito a seguir. No Capítulo 1 é feita uma introdução e contextualização do assunto, ressaltando a motivação da pesquisa, sua justificativa, objetivos gerais e específicos, metodologia e a forma de estruturação do trabalho.

O Capítulo 2 apresenta a Revisão Bibliográfica, conceituando os tipos de emulsões asfálticas, as técnicas de estabilização de solo, com foco em misturas de solo – emulsão, bem como apresenta os estudos desenvolvidos neste tema. São apresentados também os conceitos de viscoelasticidade linear e alguns de seus modelos reológicos.

Após essa seção inicial do trabalho, os capítulos 3, 4 e 5 são apresentados em formato de artigos científicos. Essa forma de organização permite que o leitor dê maior ênfase nos objetivos específicos abordados em cada um dos artigos.

O Capítulo 3, focado no objetivo específico 1, traz a avaliação do comportamento das propriedades de resistência ao cisalhamento de misturas solo – emulsão, com 24 horas de aeração, em três teores distintos: 16% (abaixo do teor ótimo); 22% (teor ótimo) e 28% (acima do teor ótimo).

O Capítulo 4, focado nos objetivos específicos 2 e 3, traz propõe um modelo viscoelástico linear 2S2P1D para a mistura solo-emulsão constituído de areia siltosa misturada com 16% de emulsão asfáltica, em massa a partir de ensaios experimentais de módulo complexo, bem como apresenta uma validação do modelo proposto a partir de resultados experimentais do ensaio de fluência.

O Capítulo 5, focado no objetivo específico 4, traz uma avaliação do comportamento das propriedades de modelos 2S2P1D de misturas solo – emulsão, com 24 horas de aeração, em três teores de emulsão em massa distintos: 16%, 22% e 28%.

No Capítulo 6 são apresentadas as considerações finais, bem como as principais contribuições, limitações, possíveis melhorias e sugestões para trabalhos futuros.

2 Revisão Bibliográfica

2.1 Introdução

Neste capítulo serão apresentadas as informações a respeito de emulsões asfálticas e estabilização de solos aplicados em obras de engenharia, com enfoque na utilização de misturas solo – emulsão como núcleo impermeável de barragens de terra. Será apresentada também a fundamentação teórica a respeito dos conceitos de viscoelasticidade e modelos constitutivos reológicos. Esta revisão bibliográfica expõe o conhecimento necessário para o desenvolvimento da pesquisa e auxilia na análise dos resultados obtidos.

2.2 Emulsão asfáltica

Os materiais asfálticos têm a sua utilização datada há milhares de anos pelo homem e são empregados nas mais diversas obras de engenharia em virtude das características de permeabilidade e coesão que estes proporcionam, quando misturados com agregados minerais. Ainda que o asfalto seja de fato um material com bastantes aplicabilidades, este tem como uma de suas principais características a elevada parcela viscosa em seu comportamento, o que requer verificações adicionais em suas utilizações.

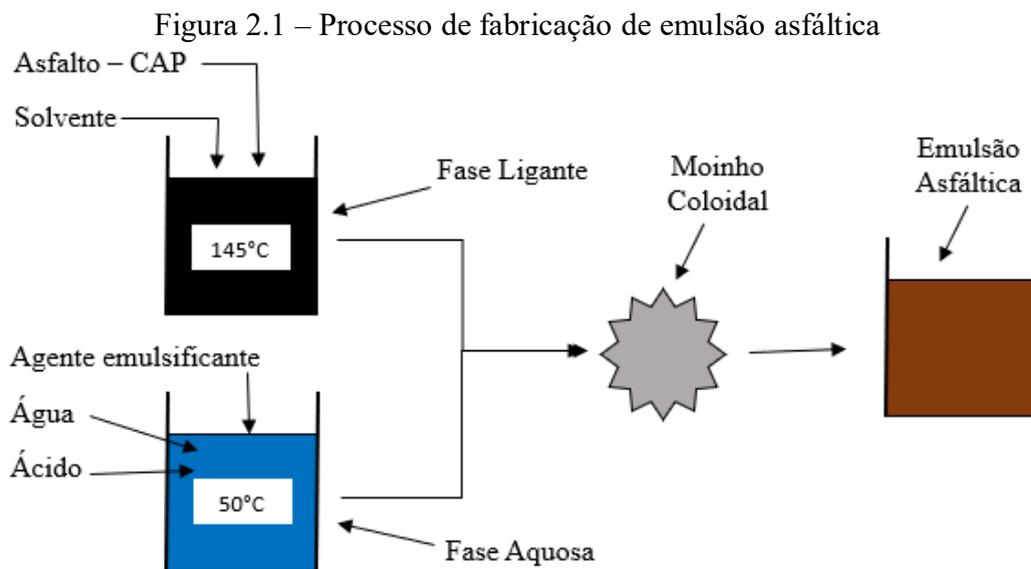
Para que haja uma mistura eficiente entre o asfalto e os agregados pétreos, faz-se necessário que esse apresente, no momento da mistura, uma viscosidade de aproximadamente 0,2 pascal segundo (Pa.s) (HUNTER, 2000). Uma das formas de garantir tal viscosidade ao asfalto seria aquecendo-o, entretanto este é um processo custoso e que demanda uma grande quantidade de energia. Assim, a fim de conseguir trabalhar com o asfalto em uma temperatura ambiente, sem a necessidade de aquecimento prévio, começou-se a diluí-lo em solventes químicos e posteriormente a emulsificá-lo (GONDIM, 2008).

Uma emulsão pode ser definida, de forma mais ampla, como a dispersão entre líquidos que, em condições naturais, não seriam miscíveis entre si, mas que formam uma mistura heterogênea e estável ao serem adicionadas substâncias químicas conhecidas como emulsificantes (ABEDA, 2010).

Dessa forma, as emulsões asfálticas são produzidas a partir da dispersão de partículas de asfalto na fase contínua da emulsão em um líquido imiscível, que é a água. Segundo Jacintho (2010) a essa mistura será adicionado um agente emulsificante a fim de reduzir a tensão interfacial entre as duas fases e estabilizar a mistura, impedindo o processo de

coalescência. O agente emulsificante é adicionado em uma proporção que varia entre 0,2% a 1% (JACINTHO, 2010; LIMA, 2016).

A fabricação das emulsões asfáltica se inicia com o aquecimento do cimento asfáltico de petróleo (CAP) até uma temperatura entre 140°C e 150°C, e a água é aquecida até a temperatura entre 50°C e 60°C. Depois de aquecidos, a água e o asfalto passam, sob pressão, em um moinho coloidal. Nesta etapa o asfalto será quebrado e suas partículas pequenas ficarão suspensas na água. A Figura 2.1 ilustra de forma resumida esse processo de fabricação.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A depender do tipo de agente emulsificante utilizado no processo de fabricação, diferentes cargas podem ser adicionadas nas partículas de asfalto. As moléculas dos emulsificantes consistem em cadeias hidrocarbonadas, em que a parte polar da cadeia é hidrofílica e fica aderida à água e a parte apolar é projetada nos glóbulos de asfalto. Uma vez carregadas eletricamente, as partículas de asfalto acabam por se repelirem entre si e é exatamente assim que a emulsão final é estabilizada, evitando o processo de coalescência.

Os emulsificantes aniônicos são constituídos pela saponificação de ácido graxo por uma base forte (ABEDA, 2010). Em função da sua carga elétrica as emulsões aniônicas possuem uma melhor adesividade com agregados de natureza calcária, que tem cargas positivas.

Já os emulsificantes catiônicos são formados pelo resultado da reação de uma base fraca com um ácido forte (ABEDA, 2010). A carga elétrica presente na superfície das partículas de asfalto em emulsões catiônicas faz com que estas tenham melhor adesividade com agregados de origem granítica.

Dentre algumas das principais vantagens em utilizar emulsões asfálticas de tipo catiônica, pode-se citar (ABEDA, 2010):

- a) Pode ser empregada sem necessidade de calor, resultando em maior eficiência energética;
- b) Dispensa a necessidade de aditivos melhoradores de adesividade, uma vez que tem boa interação com todos os tipos de agregados;
- c) Permite a mistura da emulsão com agregados úmidos;
- d) Tem uma maior facilidade em seu armazenamento, uma vez que pode ser deixada em temperatura ambiente;
- e) Pode ser produzida em maiores escalas em indústrias com equipamentos de baixo custo de aquisição e manutenção, o que propicia um menor custo de produção.

2.2.1 Ruptura

Após o contato entre a emulsão asfáltica e o agregado mineral, inicia-se o processo conhecido como ruptura da emulsão. Segundo Bernucci *et al.* (2010) o processo de ruptura consiste na anulação das cargas elétricas envolventes dos glóbulos de asfalto, em função da atração iônica entre estes e o agregado mineral e seu posterior contato. Esse processo promove a separação das fases constituintes da emulsão, favorecendo a evaporação da água.

A coalescência das partículas de asfalto favorece a formação do filme asfáltico ao redor dos grãos do agregado, desenvolvendo as propriedades ligantes da mistura. De acordo com Suarez (2008) o processo de ruptura é verificado visualmente pela mudança de coloração da mistura, que passa de uma cor marrom para uma cor preta.

A velocidade do processo de ruptura é uma das características utilizadas na classificação das emulsões asfálticas e pode variar de acordo com a temperatura dos materiais, o mecanismo de compactação adotado, a superfície específica dos agregados e o tipo de emulsão utilizada (ABEDA, 2010).

2.2.2 Classificação das emulsões asfálticas

A classificação das emulsões asfálticas é feita levando-se em consideração critérios de diferenciação entre as suas principais propriedades que, segundo ABEDA (2010), relacionam-se com o tempo necessário para que ocorra a separação do asfalto e da fase aquosa, com carga iônica do emulsificante e com o teor de asfalto contido nestas.

A Norma DNIT-EM 165 (2013) classifica as emulsões em três grupos a depender da sua velocidade de ruptura, sendo estes: ruptura rápida (RR) que tem o processo de ruptura iniciado imediatamente após o contato com o agregado, ruptura média (RM) que consegue ter um tempo de exposição maior que a RR depois de misturada com o agregado e ruptura lenta (RL) que tem o maior intervalo de tempo decorrido depois do contato com o agregado e o início do processo de ruptura.

As emulsões de ruptura lenta são bastante utilizadas em conjunto com agregados de elevadas áreas superficiais, uma vez que esse maior tempo até o início da ruptura permite que todos os grãos sejam corretamente recobertos pela película de asfalto formada.

Uma outra forma de classificar as emulsões se deve à concentração de asfalto nestas. Uma vez que a viscosidade deste material está diretamente relacionada com a quantidade de asfalto presente, a numeração presente em sua nomenclatura serve também para indicar, de forma indireta, o teor de asfalto da emulsão.

2.3 Estabilização de solos

Segundo Gondim (2008), os solos são os materiais de maior disponibilidade do mundo e bastantes utilizados na construção civil nos mais diversos fins. Cada solo apresenta um conjunto de características que definem o seu comportamento mecânico e cada obra de engenharia, que utilize solo, irá requerer um desempenho distinto para este material.

Assim, sabendo que nem sempre as características requeridas em uma obra são encontradas nos solos disponíveis nas jazidas próximas, as técnicas de estabilização surgem como mecanismos que visam melhorar determinadas propriedades destes. De acordo com Miceli Junior (2006), a estabilização de solo refere-se a um processo no qual há um melhoramento em suas propriedades de modo que este adquira as características de desempenho necessárias ao fim que se destina.

As técnicas de estabilização podem ser de natureza física ou química, e diversos são os materiais utilizados em ambas as técnicas, como geotêxteis, rejeitos industriais e até mesmo outros tipos de solo. Tendo em vista o escopo deste trabalho, será feita uma breve descrição dos processos de estabilização física e um maior aprofundamento nos diversos tipos de estabilização química, dentre eles as misturas de solo-emulsão.

2.3.1 Estabilização física

A estabilização física, também chamada de estabilização mecânica, trata-se de um processo onde há apenas uma mudança na organização nos grãos que compõe o solo. Neste tipo de técnica as soluções mais usuais são a compactação e a estabilização granulométrica (MICELI JUNIOR, 2006).

A compactação consiste na aplicação de uma energia mecânica ao solo, a fim de reorganizar sua estrutura diminuindo seus vazios pela expulsão de ar. Este procedimento promove melhorias, como aumento na resistência e capacidade de suporte do solo, diminuição da permeabilidade e da deformabilidade do material (PINTO, 2006; DAS, 2007).

Já a estabilização granulométrica consiste em misturar solos distintos ou mesmo o solo com outros agregados, a fim de promover uma melhora no contato entre os grãos e uma diminuição dos vazios pelo preenchimento destes por partículas menores. As melhorias promovidas por esta técnica irão depender da natureza do material utilizado. A metodologia de estabilização granulométrica pode ser utilizada de forma individual ou em conjunto com a compactação (MICELI JUNIOR, 2006).

2.3.2 Estabilização química

A estabilização química trata-se de um processo no qual há a adição de agentes estabilizadores que interagem quimicamente com os grãos do agregado mineral e, assim, alteram suas propriedades física com o intuito de se obter determinado desempenho no comportamento do solo (MICELI JUNIOR, 2006).

Os aditivos utilizados podem ser dos mais diversos tipos, e a mudança nas propriedades do solo estão diretamente associadas com o tipo de estabilizante escolhido. Os mais comumente adotados são a cal, o cimento Portland e os materiais de matriz betuminosa (GONDIM, 2008).

2.3.2.1 Estabilização de solo com cal

A cal consiste em um aglomerante obtido por meio da decomposição química do calcário. Sua produção inicia-se pelo carbonato de cálcio, que passa pelo processo conhecido

por calcinação. Este é um material com registros de utilização na construção civil a mais de dois mil anos (MICELI JUNIOR, 2006).

A adição de cal nos solos ocasiona reações que demoram certo tempo até serem completamente processadas e tendem a reduzir a densidade do solo, bem como aumentar sua capacidade de resistência. Essa técnica de estabilização propicia resultados mais eficientes quando aplicada em solos siltosos ou argilosos, que tem pouca capacidade de suporte e elevados índices de expansibilidade (SANTOS, 2004).

2.3.2.2 Estabilização de solo com cimento Portland

Esta técnica de estabilização consiste em adicionar e misturar cimento Portland ao solo e posteriormente acrescentar água para a compactação dos materiais. A reação de hidratação do cimento forma cristais no interior da mistura, que se unem e fortalecem as ligações entre as partículas do agregado mineral. Esse processo resulta em um material menos suscetível aos efeitos da água e com maior resistência (INGLES & METCALF, 1972).

Ingles e Metcalf (1972) ainda afirmam que a adição de uma quantidade excessiva do estabilizante pode acarretar o surgimento de trincas. Assim sendo, além do teor de cimento, outros fatores podem influenciar no desempenho da mistura, como o tipo de solo, forma de compactação e tempo de cura, sendo este último um dos principais fatores a serem considerados.

A depender do tipo de agregado mineral, os efeitos da estabilização podem ser diferentes. No caso de solos granulares, verifica-se uma melhor ligação entre as partículas, o que confere um aumento na parcela coesiva da resistência mecânica. Já no caso dos solos finos, estes se comportam como núcleos de aglomerados de partículas que aderem ao cimento, em seu entorno, formando flocos. Esse fenômeno diminui os índices de expansão da mistura bem como sua plasticidade (PORTELINHA, 2008).

2.3.2.3 Estabilização de solo com emulsão asfáltica

Os primeiros relatos de estabilização de solo com materiais de matriz betuminosa são de engenheiros rodoviários que, trabalhando próximo de campos petrolíferos, evidenciaram que ao despejar óleo cru sobre as estradas de terra, havia uma redução do pó existente e estas tornavam-se mais resistentes aos esforços do tráfego. Tal prática logo ganhou capilaridade e ao aprimorar esta técnica, começou-se a substituir o óleo cru por petróleo destilado (FERREIRA, 1980; ARAÚJO, 1983).

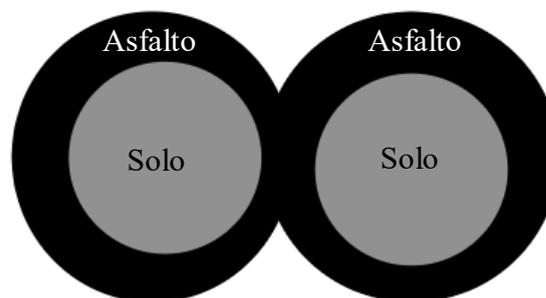
Buscando evitar a necessidade de aquecimento dos ligantes asfálticos, garantindo uma melhor trabalhabilidade deste, seguiu-se então para a diluição e emulsificação dos asfaltos de petróleo (CASTRO, 2003). As emulsões ganharam mais relevância, tendo em vista que os materiais utilizados na diluição de ligantes asfálticos além de possuírem aspectos técnicos e econômicos negativos, ainda são muito mais prejudiciais ao meio ambiente.

É a partir desse contexto que as técnicas de estabilização de solos com emulsão asfáltica ganham relevância e diversos estudos são desenvolvidos, a fim de conhecer os mecanismos de interação entre esses dois materiais, e como o desempenho da mistura é afetado. Dentre esses estudos podem ser citados: Ingles e Metcalf (1972), Ferreira (1980), Jacintho (2005, 2010), Miceli Jr. (2006), Lima (2016), Brito (2020), dentre outros.

Esse procedimento de estabilização consiste em adicionar emulsão asfáltica ao solo, o que ocasiona uma série de reações físico químicas. Após o contato entre estes materiais, o solo adsorve parte do soluto tensoativo da fase líquida da emulsão, ocasionando um desequilíbrio, em função da elevação da tensão superficial de sua fase líquida. Esse desequilíbrio interno dá início ao processo conhecido como ruptura da emulsão (MICELI JUNIOR, 2006).

É na etapa da ruptura que parte da água presente na emulsão é adsorvida pelo solo e parte é evaporada. Isso acarreta a coalescência das partículas de asfalto que estavam dispersas na emulsão e, assim, passam a recobrir os grãos de solo formando um filme asfáltico residual ao redor destes, conforme ilustrado na Figura 2.2.

Figura 2.2 – Representação do filme asfáltico residual



Fonte: Adaptado de Pereira (2018).

O filme asfáltico é responsável por incorporar algumas melhorias nas características do solo, como elevação da coesão, em virtude da ação ligante do material asfáltico, e uma redução da permeabilidade, ou ambos os efeitos (MICELI JUNIOR, 2006; SANT'ANA, 2009; SANTOS, 2009).

Segundo Sant'Ana (2009), o efeito impermeabilizante ocasionado nos solos pelo material asfáltico pode ser justificado pela vedação dos vazios formado entre os grãos, ou em função da proteção contra a água que o filme asfáltico residual promove. Ainda segundo o autor, é possível presumir que há na verdade uma ação conjunta desses dois mecanismos.

O efeito de aumento na coesão interna dos grãos é mais fortemente evidenciado em solos arenosos, já o efeito impermeabilizante é mais notabilizado em solos com maior percentual de finos (MOREIRA, 2010). A existência desse filme asfáltico, proporciona um acréscimo na coesão do material, entretanto produz também um efeito lubrificante entre as partículas de solo, uma vez que o contato grão a grão é prejudicado. Esse efeito lubrificante ocasionado pelo filme asfáltico tende a reduzir o ângulo de atrito interno do solo, diminuindo por consequência sua resistência ao cisalhamento (GONDIM, 2008; SANT'ANA, 2009).

Dito isso, o processo de dosagem para a escolha do teor de emulsão asfáltica utilizada na estabilização deve ser feito de forma a considerar todas essas condicionantes citadas. Segundo Moreira (2010), para uma dosagem eficaz e eficiente de misturas solo – emulsão, deve-se primeiro entender os mecanismos de atuação dessa estabilização. O autor afirma existir duas teorias que explicam esses mecanismos: teoria da mistura íntima e teoria da vedação modificada.

Segundo a teoria da mistura íntima, os grãos de solo são tratados como partículas individualizadas e que, ao se formar o filme de asfalto residual, este terá a função de envolver todos os grãos e mantê-los unidos, agindo como uma espécie de ligante. Em função desse mecanismo, observa-se um aumento na coesão do material estabilizado, quando comparado com o mesmo parâmetro do solo puro. Nesse caso, destaca-se que a dosagem da mistura deve considerar uma quantidade de emulsão suficiente para que o filme asfáltico recubra todos os grãos, atentando-se para não adicionar betume de forma demasiada e assim formar uma película muito espessa, prejudicando o atrito interno do solo (MOREIRA, 2010).

Já na teoria da vedação modificada, o sistema solo – betume é constituído por uma estrutura secundária oriunda do agrupamento de grãos de solo de diversos tamanhos, envoltos pelo material asfáltico. Nesse caso o betume tem por função proteger a coesão hidráulica existente, e mitigar a lubrificação entre as partículas, pois irá impedir que a água tenha acesso ao grupamento do solo pela vedação de seus poros. Esse mecanismo é aplicado em solos compostos por grãos muito finos, tendo em vista que a quantidade de asfalto necessária para garantir a mistura íntima seria muito elevada, tornando tal técnica de estabilização inviável (MOREIRA, 2010).

O objetivo de um método de dosagem é definir uma quantidade de emulsão, dita teor ótimo, que proporcionará o melhor desempenho à mistura sob algum critério de avaliação. Diversas foram as tentativas em definir-se um método de dosagem para estabilização de solos com emulsão asfáltica (KEZDI, 1979; ARAÚJO, 1983; GUARCONI *et al.*, 1988; MICELI JUNIOR, 2006). Entretanto cada um deles foi concebido em condições diferentes e não se chegou a um consenso quanto ao método ideal de dosagem, tendo em vista que, para cada propriedade em específico, existirá um teor que potencialize seu desempenho. Ingles e Metcalf (1972) afirmam, por exemplo, que a máxima impermeabilização é obtida com teores maiores que aqueles considerados ótimos sob a perspectiva de critérios de resistência.

Muitas são as variáveis que tem influência no comportamento das misturas, como tipo de solo, tempo de aeração, processo de cura, teor de dosagem, tipo de emulsão, dentre outros. Soma-se isso ao fato de serem requeridas propriedades mecânicas distintas dos solos em cada utilização específica nas obras de engenharia, é possível afirmar que, até o presente momento, a melhor opção é realizar uma investigação de ensaios físico químicos para cada situação particular em que for feita a estabilização de solo com emulsão asfáltica e, a partir disso, determinar o teor de ligante mais adequado para cada aplicação do material estabilizado.

Os autores Jacintho (2010), Lima (2016), Pereira (2018) e Brito (2020) buscaram estudar a aplicação de solos estabilizados com emulsões asfálticas como núcleo impermeável de barragens. Nestes trabalhos foram avaliados aspectos de resistência ao cisalhamento, condutividade hidráulica, dentre outras propriedades mecânicas.

Jacintho (2010) estudou três tipos de solos diferentes: solo peixe (areia siltosa), solo Corumbá (areia argilosa) e solo Goiânia (solo argiloso). Em suas misturas, nas quais utilizou emulsões asfálticas RL-1C, realizaram-se ensaios para caracterização e determinação das propriedades mecânicas. Os teores de emulsão adotados variaram de 0 a 8%.

A partir dos resultados dos ensaios de resistências a compressão simples, observou-se um aumento generalizado desses valores nas misturas não saturadas. Entretanto, nos ensaios feitos com corpos de prova submersos em água, os aumentos observados nesse parâmetro desapareceram. A autora justifica tal fato em função do ganho de resistência a compressão simples estar atrelado ao grau de saturação do corpo de prova, que é reduzido no processo de ruptura da emulsão. Portanto o principal agente responsável pela melhora da resistência foi a sucção matricial e não a película de asfalto residual formada. Jacintho (2010) ainda determinou os parâmetros de resistência das misturas estudadas (Tabela 2.1) a partir de ensaios triaxiais adensados isotropicamente e drenados.

Tabela 2.1 – Variação parâmetros de resistência das misturas solo – emulsão

Tipos de misturas	c (kPa)	ϕ (°)	c' (kPa)	ϕ' (°)
Solo Peixe - 0%	156	36,4	2	35,8
Solo Peixe - 8%	103	19,1	2	35,7
Solo Corumbá - 0%	70	16,8	10	35
Solo Corumbá - 8%	65	18,1	0	38,2
Solo Goiânia - 0%	39	24,4	31	33,9
Solo Goiânia - 8%	62	17,5	32	31,1

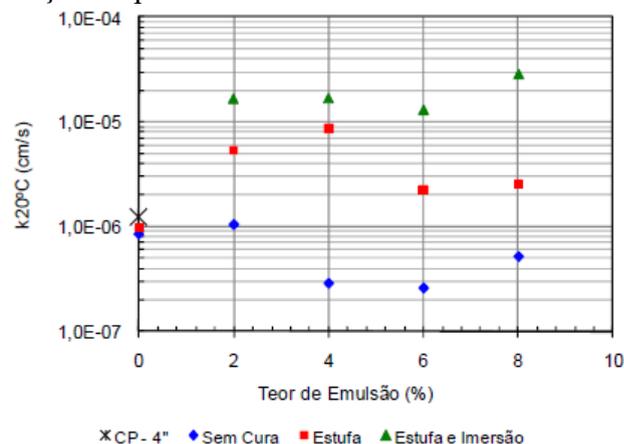
Fonte: Adaptado de Jacintho, 2010.

No solo peixe não foram observadas mudanças significativas dos parâmetros efetivos após a adição de emulsão asfáltica. Já para o solo Corumbá, foi observado uma redução na coesão e um incremento no ângulo de atrito efetivos. Estes resultados foram considerados inconsistentes com o esperado para tal tipo de mistura (JACINTHO, 2010).

No caso do solo Goiânia, houve uma leve redução no ângulo de atrito efetivo, justificada pela lubrificação do contato entre grãos, e praticamente nenhuma alteração no valor da coesão efetiva. Tal tendência de valores também foi de encontro com o comportamento típico esperado para a mistura. A autora atribui essa ausência de padrão nos resultados dos ensaios triaxiais em função dos baixos teores de emulsão asfáltica utilizados.

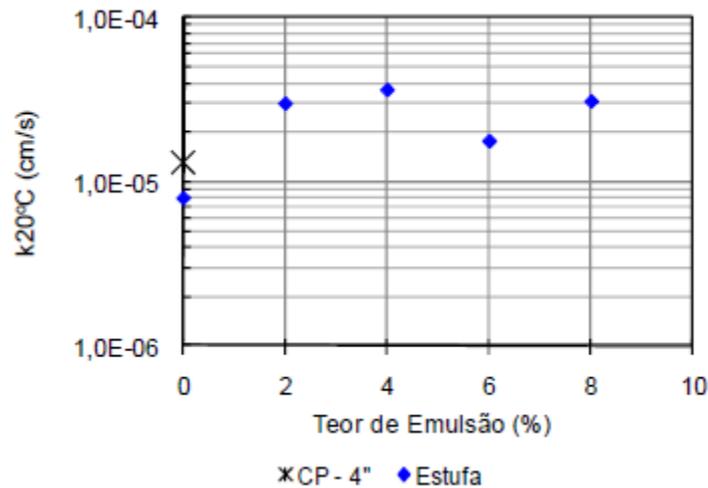
Em se tratando dos ensaios para avaliar as propriedades hidráulicas, Jacintho (2010) verificou que a adição de emulsão asfáltica não reduziu os valores de coeficiente de permeabilidade (Figuras 2.3 a 2.5) como era de se esperar. Ainda segundo a autora, acredita-se que, no caso em questão, não houve uma colmatção dos poros, mas apenas um envolvimento dos grãos pelo asfalto. A adição de emulsão, nos teores avaliados, promoveu a formação de macro poros, facilitando a fluxo de água.

Figura 2.3 – Variação da permeabilidade do solo Peixe com o teor de emulsão



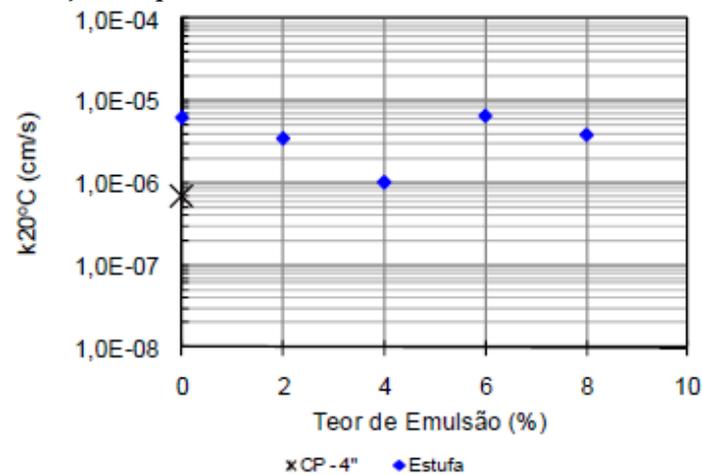
Fonte: Adaptado de Jacintho (2010).

Figura 2.4 – Variação da permeabilidade do solo Corumbá com o teor de emulsão



Fonte: Adaptado de Jacintho (2010).

Figura 2.5 – Variação da permeabilidade do solo Corumbá com o teor de emulsão



Fonte: Adaptado de Jacintho (2010).

Lima (2016) avaliou o comportamento de um solo SP – SM (areia siltosa mal graduada), em diversos tipos de misturas com uma emulsão do tipo RL – 1C. A fim de evitar a formação de macro poros, como observado em Jacintho (2010), a referida autora utilizou teores de emulsão mais elevados que variaram entre 13% e 31%.

Diversas foram as metodologias adotadas para as confecções das misturas de solo-emulsão. Tais procedimentos foram executados com e sem aquecimento prévio, e com compactação imediata ou após um período de 24 horas decorridas do contato entre os dois materiais. Esse período foi chamado tempo de aeração. A Tabela 2.2 apresenta um resumo dos procedimentos adotados por Lima (2016).

Tabela 2.2 – Resumo procedimentos de compactação solo – emulsão

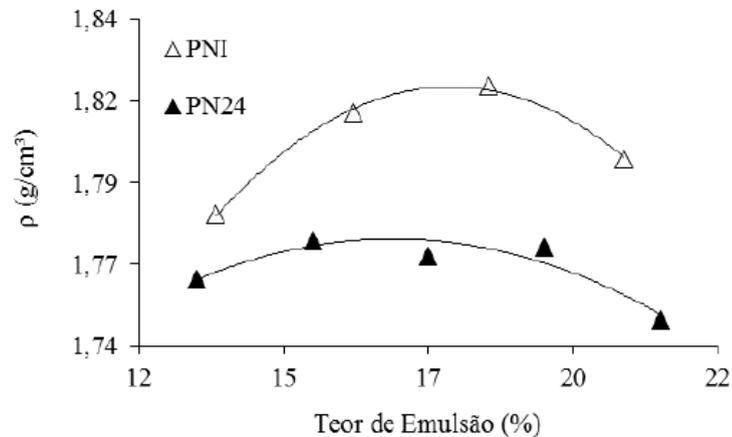
Metodologia de Compactação	Nomenclatura	Temperatura de Compactação	Tempo aeração
Proctor Normal	PNI	Temperatura ambiente (25°C)	Imediata
Proctor Normal	PN24	Temperatura ambiente (25°C)	24 horas após mistura
Proctor Modificado	PM24	Temperatura ambiente (25°C)	24 horas após mistura
Marshall	M24	Temperatura ambiente (25°C)	24 horas após mistura
Proctor Normal	PNQ	100 °C	24 horas após mistura
Proctor Modificado	PMQ	100°C	24 horas após mistura
Marshall	MQ	100°C	24 horas após mistura
Proctor Modificado	PMA	Temperatura ambiente (25°C)	24 horas após mistura

Fonte: Adaptado de Lima, 2016.

Lima (2016) buscou definir a metodologia ideal de compactação e dosagem e entender como os diferentes processos modificam as propriedades da mistura. A autora afirma que avaliar a compactação de misturas solo – emulsão, a partir da massa específica aparente seca e do teor de umidade, é algo ineficaz tanto pela dificuldade em determinar, de forma precisa, a quantidade de água presente nas misturas, como em função da dúvida sobre o estado físico do ligante asfáltico residual. Dito isto, todas as curvas de compactação apresentadas foram feitas a partir dos valores de massa específica aparente (ρ) e do teor de emulsão asfáltica em termos de porcentagem da massa total da mistura, por ser esta uma forma mais eficiente análise.

Inicialmente avaliou-se a influência do tempo de aeração na compactação da mistura. De acordo com os resultados apresentados na Figura 2.6, houve uma diminuição nos valores de massa específica aparente, quando a compactação foi feita 24 horas após o contato dos materiais. Isso pode ser justificado em função de uma maior dificuldade de aproximação dos grãos minerais, tendo em vista a maior rigidez do filme betuminoso após a ruptura da emulsão (LIMA, 2016).

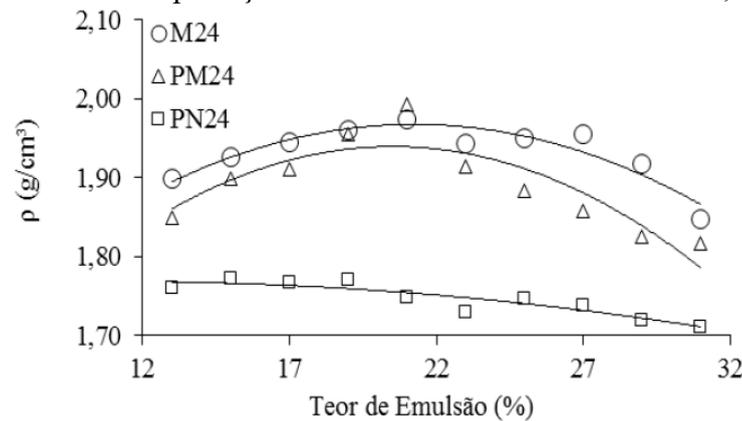
Figura 2.6 – Curva de compactação das misturas solo – emulsão PNI e PN24



Fonte: Adaptado de Lima (2016).

Ao comparar diferentes formas de compactação (Figura 2.7), foi possível constatar a influência da energia aplicada. Métodos com maiores energia levaram a uma definição mais objetiva das curvas de compactação. Os valores obtidos pelos métodos Marshall e Proctor Modificado foram consideravelmente maiores em comparação aos obtidos pelo método Proctor Normal. Essa constatação corrobora a hipótese de que maiores energias de compactação conseguem gerar maiores deformações do filme asfáltico residual, acarretando em um estado mais compacto das misturas (LIMA, 2016).

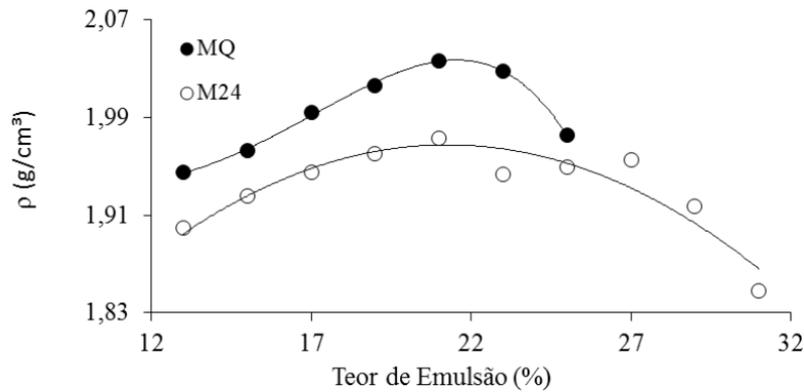
Figura 2.7 – Curva de compactação das misturas solo – emulsão M24, PM24 e PN24



Fonte: Adaptado de Lima (2016).

Outro aspecto estudado por Lima (2016), que reforçou a hipótese de correlação entre a rigidez do filme betuminoso e uma maior dificuldade de compactação, foi a influência da temperatura das misturas. A autora constatou que misturas aquecidas à 100°C possuíam massas específicas aparentes superiores daquelas compactadas em temperatura ambiente (Figura 2.8).

Figura 2.8 – Curva de compactação das misturas solo – emulsão MQ e M24

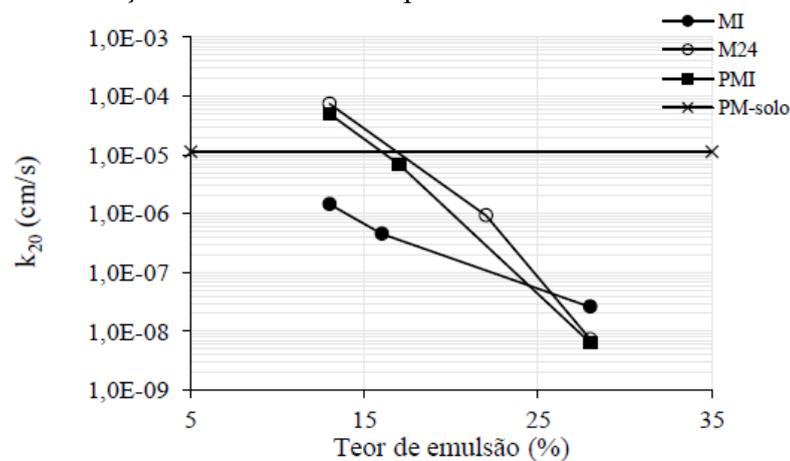


Fonte: Adaptado de Lima (2016).

Pereira (2018) estudou uma areia siltosa (SM) estabilizada com uma emulsão asfáltica do tipo RL-1C. Os teores de emulsão variaram de 13% até 28% e as amostras foram compactadas nas energias de compactação Marshall e Proctor Modificado, com e sem a aeração de 24 horas.

O autor constatou que, em todas as metodologias estudadas, no teor ótimo de compactação o coeficiente de permeabilidade (k_{20}) das misturas foi menor do que o do solo puro. Outra conclusão foi que à medida que se aumentavam os teores de emulsão asfáltica, havia uma redução da permeabilidade. A Figura 2.9 apresenta a forma como o k_{20} variou nas diferentes misturas. A linha de referência horizontal da figura representa o coeficiente de permeabilidade do solo puro, no valor de $1,12 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$ (PEREIRA, 2018).

Figura 2.9 – Variação do coeficiente de permeabilidade com o teor de emulsão



Fonte: Adaptado de Pereira (2018).

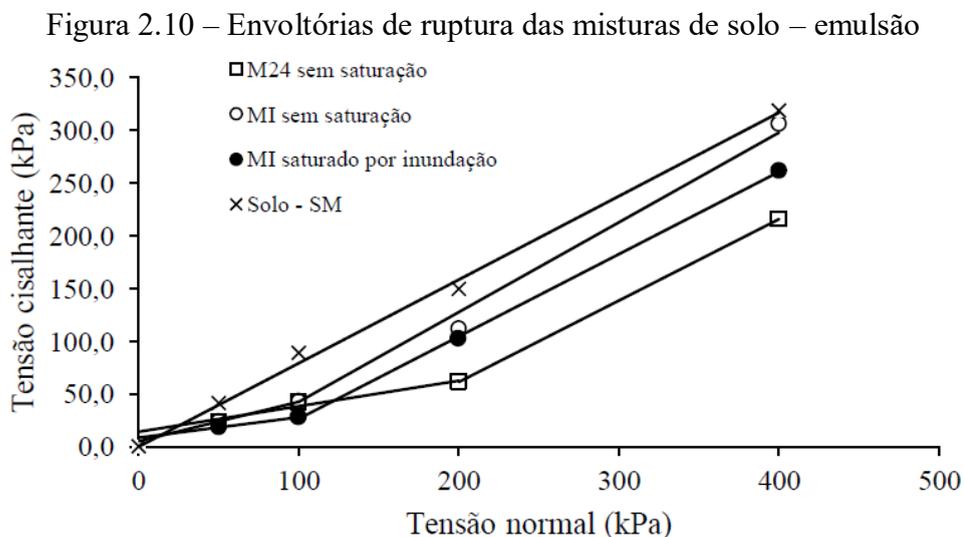
Deve-se notar que as misturas MI e M24 com 13% de emulsão obtiveram coeficientes de permeabilidade (k_{20}) maiores do que o do solo natural. Isso corrobora com a

hipótese levantada por Jacintho (2010) de que, a depender da quantidade de asfalto adicionada aos grãos minerais, pode haver a formação de macro poros a assim facilitar o fluxo de água pelo material.

Os valores de k_{20} das amostras compactadas utilizando o método MI foram, no geral, mais baixos que aqueles utilizando o M24. A justificativa para este fato é de que a energia de compactação aplicada não foi suficiente para vencer a rigidez do filme de asfalto que envolve os grãos após 24 horas da mistura (PEREIRA, 2018). Em teores bastante elevados, como os de 28%, os corpos de prova moldados em diferentes metodologias tendiam a um valor de coeficiente de permeabilidade com a mesma ordem de grandeza.

Os parâmetros de resistência das amostras das misturas de solo – emulsão, em seus respectivos teores ótimos de compactação, apresentados por Pereira (2018) foram obtidos por meio de ensaios de cisalhamento direto com e sem inundação. As tensões de confinamento adotadas para a construção das envoltórias de ruptura foram 50 kPa, 100 kPa, 200 kPa e 400 kPa.

De acordo com Pereira (2018), os corpos de prova de solo natural compactados apresentaram resistência de pico muito bem definida em todos os níveis de tensão normal, diferente das misturas solo – emulsão, que apresentaram resistências ao cisalhamento de pico e rigidezes menores relativamente à areia SM. O autor afirma que, exceto no caso da mistura M24 submetida à tensão normal de 400 kPa, não houve incremento relevante de tensões normais após a ruptura em nenhum dos corpos de prova das misturas. Este comportamento foi atribuído ao caráter viscoso do filme asfáltico residual. A partir das envoltórias de ruptura construídas (Figura 2.10), Pereira (2018) constatou uma bilinearidade no comportamento do material estudado, variando em função do nível de carregamento aplicado.



Fonte: Adaptado de Pereira (2018).

O autor afirma que em baixos níveis de carregamento a película de asfalto residual irá reger o mecanismo de resistência ao cisalhamento, promovendo à mistura uma parcela coesiva mais acentuada em função de sua ação ligante. Já no caso de elevados níveis de carregamento, o autor acredita haver uma remoção da película asfáltica ao redor dos grãos, ocasionada pela maior tensão confinante entre estes, fazendo com que a interação das partículas minerais seja favorecida. Dessa forma, para maiores níveis de carregamento, o mecanismo que comanda a parcela de resistência ao cisalhamento passa a ser o atrito grão a grão (PEREIRA, 2018).

As Tabelas 2.3 e 2.4 apresentam um resumo dos parâmetros de resistência obtidos, em níveis de carregamento baixos e elevados, nos ensaios de cisalhamento direto do trabalho de Pereira (2018).

Tabela 2.3 – Parâmetros de resistência solo – emulsão em baixos carregamentos

Procedimento	Teor de emulsão (%)	Parâmetros efetivos	
		c' (kPa)	ϕ' (°)
Solo - 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 2.4 – Parâmetros de resistência solo – emulsão em altos carregamentos

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

Fonte: Adaptado de Pereira, 2018.

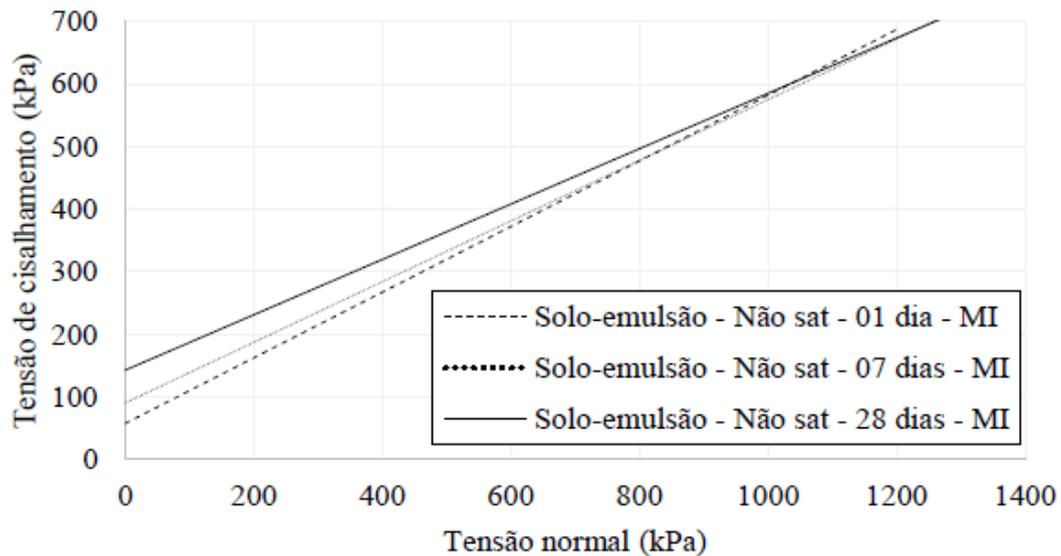
Pereira (2018) também constatou que os os corpos de prova ensaiados sem inundação apresentaram maior resistência ao cisalhamento e maior rigidez. Entretanto, esse melhor desempenho foi atribuído à sucção matricial e não ao efeito da emulsão asfáltica propriamente dita.

Brito (2020), dando continuidade na linha de pesquisa iniciada por Pereira (2018) estudou a mesma areia siltosa (SM) misturada com emulsão asfáltica do tipo RL-1C. A autora avaliou o comportamento de misturas MI e M24, somente, em seus respectivos teores ótimos

de compactação 16% e 19%. Nesse estudo foram determinadas os parâmetros de resistência a partir de ensaios triaxiais, sob condições saturadas e não saturadas.

A autora realizou ensaios em três tempos de cura diferentes: 01, 07 e 28 dias. A Figura 2.11 apresenta as envoltórias de ruptura das misturas MI não saturadas.

Figura 2.11 – Envoltórias de ruptura das misturas de solo – emulsão não saturadas



Fonte: Adaptado de Brito (2020).

É possível averiguar que, com o aumento do tempo de cura, os corpos de prova aumentaram os valores de interceptos coesivos e reduziram os ângulos de atrito nos ensaios não saturados. Esta variação dos parâmetros de resistência (Tabela 2.5) foi justificada pela diminuição de umidade residual dos corpos de prova no decorrer do tempo de cura (BRITO, 2020).

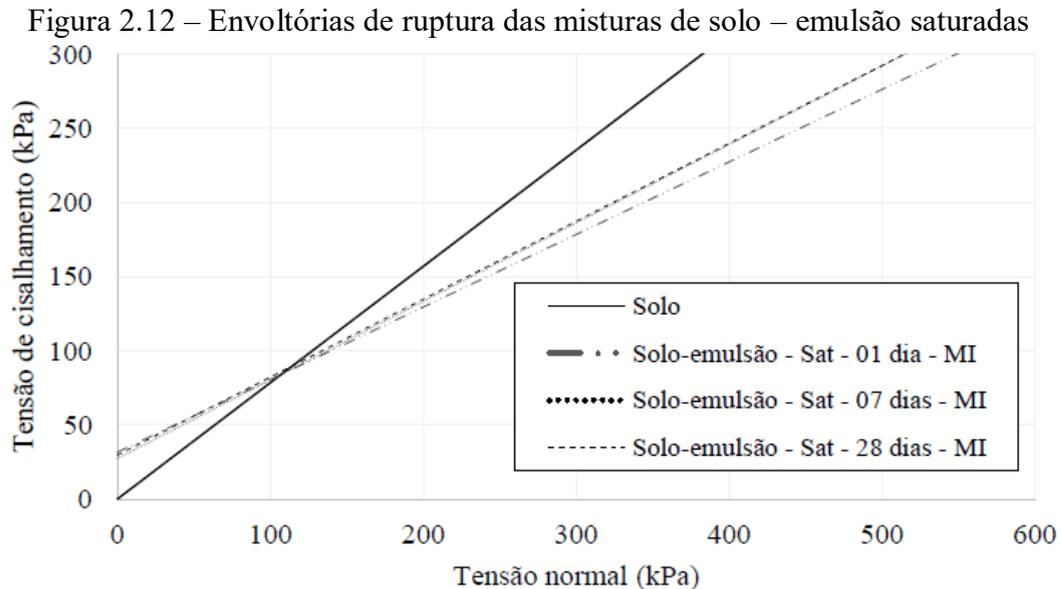
Tabela 2.5 – Parâmetros de resistência solo – emulsão não saturado

Parâmetros de resistência efetivos	Teor de emulsão (%)	c' (kPa)	ϕ' (°)
Solo-emulsão MI - 01 dia - não saturado	16%	57,20	27,70
Solo-emulsão MI - 07 dias - não saturado	16%	90,00	25,90
Solo-emulsão MI - 28 dias - não saturado	16%	142,50	23,90

Fonte: Adaptado de Brito, 2020.

Já a Figura 2.12 apresenta as envoltórias de ruptura das misturas MI sob condições saturadas. Observa-se que quando comparado com os mesmo parâmetros do solo puro, houve

uma elevação do intercepto coesivo e uma redução no ângulo de atrito, conforme era de se esperar para este tipo de material.



Entretanto não houve diferença nos parâmetros de resistência (Tabela 2.6) nos ensaios saturados em diferentes tempos de cura. Desta forma tem-se um indicativo de que o aumento de resistência, no caso dos ensaios não saturados, se deu em virtude do surgimento de forças de sucção matricial e não em função do asfalto residual que envolve os grãos de solo.

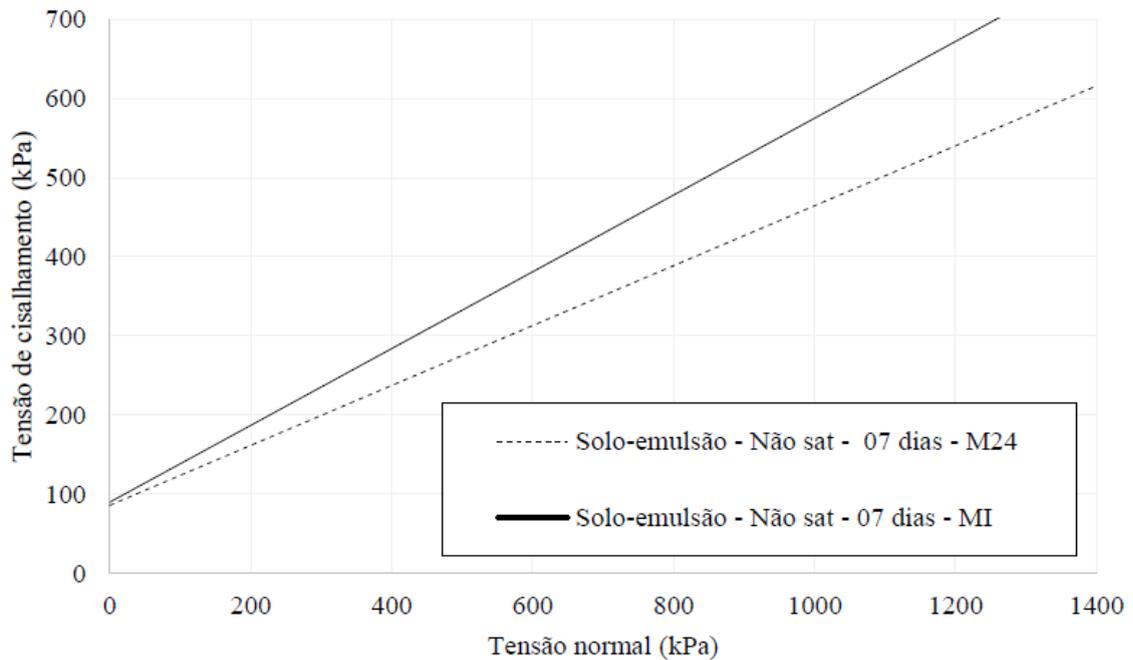
Tabela 2.6 – Parâmetros de resistência solo – emulsão saturado

Parâmetros de resistência efetivos	Teor de emulsão (%)	c' (kPa)	ϕ' (°)
Solo natural - Proctor normal	0%	0,00	38,10
Solo-emulsão MI - 01 dia - não saturado	16%	31,60	26,10
Solo-emulsão MI - 07 dias - não saturado	16%	27,40	27,90
Solo-emulsão MI - 28 dias - não saturado	16%	29,70	27,70

Fonte: Adaptado de Brito, 2020.

A autora ainda buscou avaliar a influência do tempo de aeração nos parâmetros de resistência não saturados das misturas. A Figura 2.13 apresenta as envoltórias de ruptura de corpos de prova moldados pelas metodologias MI e M24, ambas em seus respectivos teores ótimos de compactação e sob condições não saturadas.

Figura 2.13 – Envoltórias de ruptura das misturas MI e M24 não saturadas



Fonte: Adaptado de Brito (2020).

A Tabela 2.7 apresenta a comparação dos parâmetros de resistência dos corpos de prova moldados sob as metodologias MI e M24.

Tabela 2.7 – Parâmetros de resistência solo – emulsão não saturado MI e M24

Parâmetros de resistência efetivos	Teor de emulsão (%)	c' (kPa)	ϕ' (°)
Solo-emulsão MI - 07 dias - não saturado	16%	90,00	25,90
Solo-emulsão M24 - 07 dias - não saturado	19%	86,00	20,70

Fonte: Adaptado de Brito, 2020.

Constatou-se que ambas as misturas possuem valores de intercepto coesivo praticamente iguais e que a mistura M24 possui um ângulo de atrito ligeiramente menor, o que pode ser justificado pela maior quantidade de emulsão asfáltica utilizada na moldagem em seu teor ótimo (BRITO, 2020).

Dessa forma afirmou-se que o comportamento das misturas de solo e emulsão asfáltica não possui grande dependência do tempo de cura, e que o tempo de aeração não influenciou de forma significativa os parâmetros de resistência coesão e ângulo de atrito das misturas moldadas em seus teores ótimos (BRITO, 2020).

2.4 Viscoelasticidade

Os sólidos regidos pela teoria clássica da elasticidade podem ter seu estado de tensões determinados a partir do estado de deformações nele aplicado, sem considerar a taxa ou histórico de deformação (MEZGER, 2014). No caso de pequenas deformações, é válida a Lei de Hooke ao afirmar que tensões e deformações se relacionam por meio de um coeficiente de proporcionalidade, conhecido como Módulo de Young (E) (FERRY, 1980; VALLIAPPAN, 1981). Dessa forma, sempre que houver um descarregamento de forças, o sólido elástico retorna a sua geometria original que possuía antes de ter sido solicitado, seguindo a mesma trajetória de quando fora carregado, e de maneira que seu comportamento é reversível instantaneamente. Assim, nos ciclos de carga e descarga de um material elástico não há dissipação de energia. Um análogo mecânico que bem representa esta situação é uma mola.

Já os fluidos viscosos, regidos pela teoria hidrodinâmica clássica dos fluidos Newtonianos, tem seu estado de tensão relacionado com a taxa de deformação por meio de um coeficiente de proporcionalidade conhecido como coeficiente de viscosidade (η), sendo este independente do valor da deformação propriamente dita (FERRY, 1980). Assim, no caso de um descarregamento em um fluido viscoso, não há recuperação das deformações impostas, uma vez que toda a energia mecânica fornecida ao sistema é dissipada. Um análogo mecânico que bem representa um fluido viscoso em um amortecedor.

Entretanto, existem materiais que não armazenam e nem dissipam completamente a energia mecânica neles imposta, tendo características hora mais próximas de um sólido elástico, hora mais próximas de um fluido viscoso. Estes materiais são ditos viscoelásticos (FERRY, 1980; BRINSON & BRINSON, 2008). Como exemplo desse tipo de situação, podem-se citar diversos materiais, incluindo as misturas asfálticas e diversos outros contendo ligantes classificados tipicamente como poliméricos. Uma forma de representar o comportamento de materiais viscoelásticos, por meio de um análogo mecânico, seria em sistemas de associação de molas e amortecedores.

Caso um material viscoelástico fosse submetido a um estado de tensão constante ao longo do tempo, seria observada uma deformação crescente de forma contínua, sendo este fenômeno conhecido como fluência. Já no caso deste material ser submetido a um estado de deformação permanente no tempo, seria observado uma diminuição no seu estado de tensão, fenômeno denominado de relaxação. As relações de tensão e deformação de um material e sua dependência com o tempo são conhecidas como equações constitutivas e os parâmetros destas

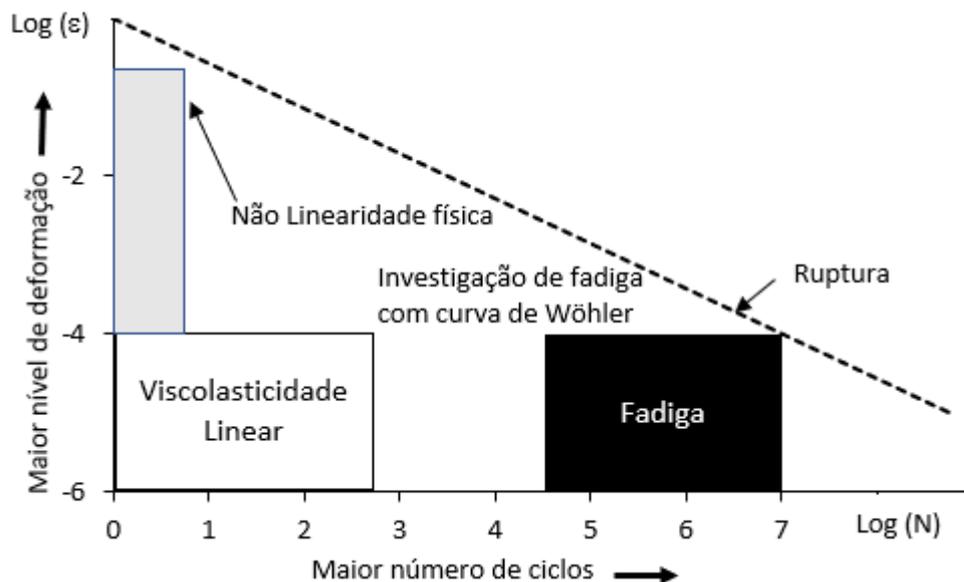
equações são considerados propriedades do material. Nas seguintes seções deste capítulo serão apresentados os principais modelos constitutivos de viscoelasticidade.

2.4.1 Regime linear

Os materiais viscoelásticos que têm a resposta de uma determinada solitação dependente apenas do histórico de aplicação desta, seja ela em termos de tensão ou deformação, e independente da sua magnitude estão no regime viscoelástico linear. No caso de a solitação aplicada ter magnitude muito elevada, o material pode passar a ter seu comportamento regido em um domínio não linear. Zhang *et al.* (2012) afirmam que, para o caso de misturas asfálticas, é esperado um comportamento viscoelástico linear, desde que não seja ultrapassado o valor de $150 \mu\epsilon$ de deformação.

Uma forma de verificação do domínio linear é por meio da obediência ao princípio da homogeneidade e da superposição de Boltzmann (BOLTZMANN, 1874). Tal verificação é uma hipótese fundamental para a definição das propriedades constitutivas e para o desenvolvimento das integrais de convolução, conceitos estes que serão apresentados nas seções seguintes desse trabalho. Di Benedetto *et al.* (2001) afirma que o número de ciclos de aplicação de solitação também pode levar o material a ter uma resposta viscoelástica não linear, conforme mostrado na Figura 2.14.

Figura 2.14 – Domínios típicos do comportamento observado na deformação de misturas betuminosas (ϵ) pelo número de ciclos (N).



Fonte: Adaptado de Di Benedetto *et al.* (2001).

Para além da não-linearidade física propriamente dita, onde os níveis de tensão e deformação afetam o comportamento do material, existem diversos outros fenômenos que também desempenham um papel significativo na resposta do material às solicitações. Esses fenômenos, em certas ocasiões, podem ser erroneamente interpretados como efeitos de não-linearidade. Alguns exemplos disso são: a tixotropia; os efeitos de segunda ordem, como as pequenas variações de temperatura resultantes da dissipação de energia e também fenômenos dissipativos, como a formação de microfissuras. É importante ressaltar que, embora esses fenômenos impactem o desempenho dos materiais viscoelásticos, eles não serão o foco central desta pesquisa.

Neste trabalho, que é fundamental ao abrir uma ação de caracterização de rigidez considerando aspectos de viscoelasticidade para misturas solo – emulsão, será abordada apenas a caracterização viscoelástica linear. Isso se deve ao fato de ela ser essencial para cálculos de tensão e deformação necessários a uma investigação fora do domínio linear. Ademais, para pequenas deformações, as quais devem ser garantidas na aplicação pretendida, a estrutura deve ser dimensionada para que o comportamento possa se aproximar da linearidade.

2.4.2 Propriedades viscoelásticas lineares

2.4.2.1 Propriedades no domínio do tempo

Os fenômenos da fluência e relaxação de um material viscoelástico linear podem ser avaliados a partir de experimentos laboratoriais no domínio do tempo, onde são obtidas as propriedades descritas nesta seção. Para a determinação do módulo relaxação, é imposta uma deformação ao material estudado, segundo a Equação 2.1.

$$\varepsilon = \varepsilon_0 U(t) \quad (2.1)$$

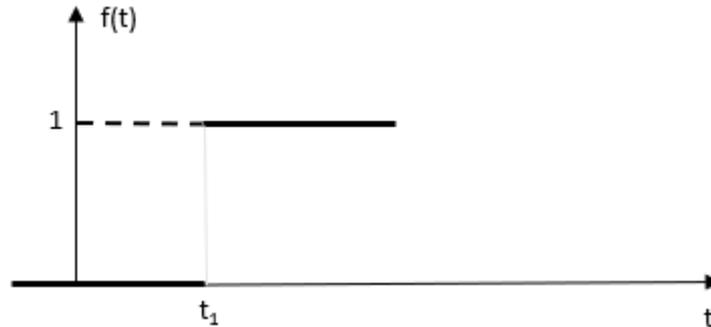
Onde:

- ε : deformação final;
- ε_0 : deformação inicial;
- $U(t)$: função degrau unitária.

Essa função degrau unitária, apresentada graficamente na Figura 2.15, pode ser expressa pela Equação 2.2, onde t_1 representa o momento inicial de aplicação de carregamento.

$$U(t - t_1) = \begin{cases} 0, & \text{se } t < t_1 \\ 1, & \text{se } t \geq t_1 \end{cases} \quad (2.2)$$

Figura 2.15 – Função degrau unitária



Fonte: Elaborado pelo autor.

Dessa forma o módulo de relaxação pode ser expresso, de forma genérica, no domínio do tempo a partir da Equação 2.3.

$$E(t) = \frac{\sigma(t)}{\varepsilon_0} \quad (2.3)$$

Onde:

- $E(t)$: módulo de relaxação;
- $\sigma(t)$: tensão no tempo t ;
- ε_0 : deformação aplicada;

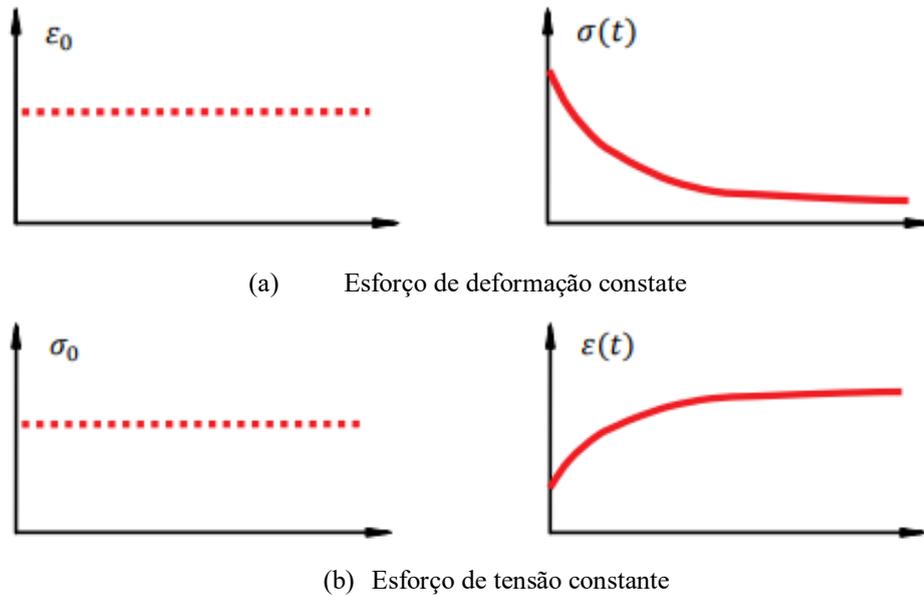
Já para a determinação de função fluência, o material é submetido a uma tensão conforme expresso na Equação 2.4 e terá sua deformação variando ao longo do tempo. A função fluência é então expressa, de forma genérica, pela Equação 2.5.

$$\sigma = \sigma_0 U(t) \quad (2.4)$$

$$D(t) = \frac{\varepsilon(t)}{\sigma_0} \quad (2.5)$$

As expressões do módulo de relaxação $E(t)$ e da função fluência $D(t)$ estão diretamente associadas com o modelo constitutivo utilizado para representar o comportamento viscoelástico dos materiais. A Figura 2.16 mostra a resposta em termos de tensão-deformação ao longo do tempo, quando são aplicadas solicitações constantes, ou de deformação (Figura 2.16a) ou de tensão (Figura 2.16b) em tais materiais, com $t_1 = 0$.

Figura 2.16 – Respostas materiais viscoelásticos



Fonte: Adaptado de Silva (2009).

Ferry (1980) ressalta que $E(t)$ e $D(t)$ na realidade mensuram um mesmo comportamento intrínseco e que por isso não são grandezas independentes entre si. Entretanto, diferente de como ocorre em materiais elásticos, essas grandezas não são recíprocas. A interconversão entre estas propriedades é feita por meio de procedimentos específicos (PARK; SCHAPERLY, 1999; SCHAPERLY; PARK, 1999; TIOUAJNI *et al.*, 2011).

Conforme já exposto, sabe-se que a resposta de um material viscoelástico linear depende também do seu histórico de solicitações. Considerando a aplicação de um histórico de tensões arbitrário aproximado por funções degraus (Figura 2.15) de magnitude $\Delta\sigma$, em virtude do princípio de superposição de Boltzmann (BOLTZMANN, 1874), tem-se o resultado de deformação expresso pela Equação 2.6, considerando duas aplicações de tensão constante diferentes, sendo σ_0 aplicada em $t = 0$ e um acréscimo de tensão no valor de σ_1 aplicado a partir de $t = \tau_1$. Tal procedimento é conhecido como superposição e é válido dadas condições de linearidade.

$$\varepsilon(t) = \sigma_0 D(t) + \sigma_1 D(t - \tau_1) \quad (2.6)$$

Dividindo a função degrau em infinitas partes, obtém-se a integral de convolução, também conhecida como integral hereditária, em termos de tensão (Equação 2.7). De forma análoga, é possível obter a integral de convolução em termos de deformação (Equação 2.8). As equações 2.7 e 2.8 representam modelos constitutivos viscoelástico lineares genéricos, e são

base para procedimentos de interconversão de propriedades obtidas por diferentes ensaios.

$$\varepsilon(t) = \lim_{d\tau \rightarrow 0} \sum_{i=1}^{N \rightarrow \infty} D(t - \tau_i) \frac{d\sigma}{d\tau} \quad (2.7.a)$$

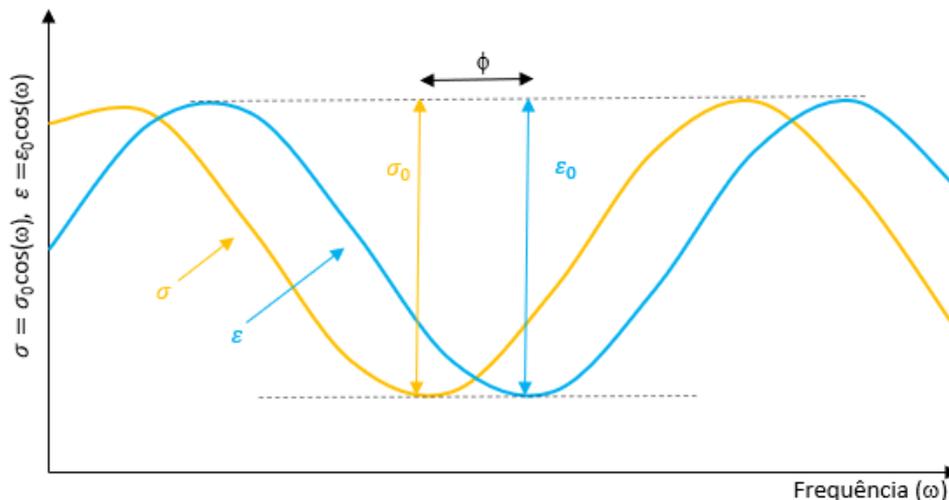
$$\varepsilon(t) = \int_{-\infty}^t D(t - \tau) \frac{\partial \sigma}{\partial \tau} d\tau \quad (2.7.b)$$

$$\sigma(t) = \int_{-\infty}^t E(t - \tau) \frac{\partial \varepsilon}{\partial \tau} d\tau \quad (2.8)$$

2.4.2.2 Propriedades no domínio da frequência

De forma análoga com que as propriedades viscoelástica lineares são descritas no domínio do tempo, também podem ser descritas no domínio da frequência, representadas por números complexos. Ao se aplicar um carregamento oscilatório harmônico, seja de tensão ou deformação, em um material viscoelástico, a resposta também será de natureza harmônica, porém defasada no tempo, conforme ilustra a Figura 2.17.

Figura 2.17 – Carregamento harmônico



Fonte: Elaborado pelo autor.

Aplicando uma solicitação harmônica de deformação, como a expresso na Equação 2.9, a resposta em termos de tensão em regime permanente, após alguns ciclos iniciais, será

regida conforme a Equação 2.10. Em misturas asfálticas, tipicamente são necessários cerca de 3-5 ciclos (GAYTE *et al.*, 2016). Nesse caso, o módulo complexo será dado pela relação da tensão com a deformação, em qualquer uma das diferentes frequências possíveis. A Equação 2.11 mostra o módulo complexo, utilizando a Fórmula de Euler para escrever as expressões em termos de expoentes complexos.

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 \cos(\omega t) \therefore \varepsilon(t) = \varepsilon_0 e^{i\omega t} \quad (2.9)$$

Onde:

- ω : Frequência angular.

$$\sigma(t) = \sigma_0 \cos(\omega t + \varphi) \therefore \sigma(t) = \sigma_0 e^{i(\omega t + \varphi)} \quad (2.10)$$

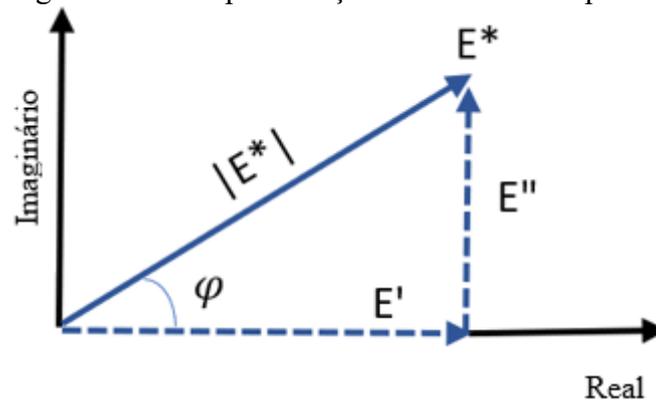
$$E^* = \frac{\sigma(t)}{\varepsilon(t)} = \frac{\sigma_0 \cos(\omega t + \varphi)}{\varepsilon_0 \cos(\omega t)} = \frac{\sigma_0 e^{i(\omega t + \varphi)}}{\varepsilon_0 e^{i\omega t}} = |E^*| e^{i\varphi} = |E^*| (\cos\varphi + i \sin\varphi) \quad (2.11)$$

A defasagem na resposta da solicitação é representada pelo ângulo de fase (φ). Os materiais perfeitamente elásticos lineares possuem ângulo de fase igual a 0° , já os materiais perfeitamente viscosos lineares possuem ângulo de fase igual a 90° . Dessa forma, o ângulo de fase de um material viscoelástico irá variar entre 0° e 90° , dependendo da pulsação ω aplicada, e quanto mais próximo esse valor for de 90° maior será a defasagem da resposta e mais pronunciada será sua parcela viscosa (MEZGER, 2014).

Papazian (1962) define a relação dos valores absolutos das amplitudes de tensão e de deformação, expresso por $|E^*|$, como módulo dinâmico. Trata-se do termo mais comumente utilizado na literatura norte-americana (*dynamic modulus*) para designar o valor absoluto do módulo complexo. Também é um termo adotado frequentemente no Brasil. Observa-se, porém que não há qualquer efeito inercial significativo nos ensaios realizados e que o termo módulo dinâmico é mais adequadamente utilizado para o resultado de ensaios com propagações de ondas a uma dada frequência, como com ultrassom, algo comum na geotecnia, e que ele não corresponde ao valor absoluto do módulo complexo, que é uma função da frequência de carregamento (GUIRELI NETTO *et al.*, 2020; BEZERRA *et al.*, 2022).

Uma vez conhecendo o módulo dinâmico e sabendo que o módulo complexo é um número imaginário, é possível separá-lo em duas partes (Figura 2.18).

Figura 2.18 – Representação do módulo complexo



Fonte: Elaborado pelo autor.

A parte real de $E^*(\omega)$, conhecida como Módulo de Estocagem $E'(\omega)$, está relacionada com a componente do comportamento do material capaz de armazenar e devolver energia, ou seja, elástica, onde não há perda da energia mecânica aplicada. Já a parte imaginária de $E^*(\omega)$, conhecida como Módulo de Perda $E''(\omega)$, está relacionada com a dissipação de energia aplicada, ou seja, uma componente viscosa.

O módulo dinâmico e o ângulo de fase descrevem o comportamento viscoelástico de um material. Nas seguintes seções deste trabalho serão apresentados modelos constitutivos utilizados para representar tanto o módulo complexo, como o módulo de estocagem e de perda, apresentados até então de forma genérica.

De forma análoga como foi apresentada a definição de módulo complexo (E^*), também poderia ser feito em relação à complacência complexa (D^*), assim como ocorre nas propriedades no domínio do tempo. Entretanto, não há necessidade de extensa descrição da definição de complacência complexa, uma vez que as propriedades viscoelásticas no domínio da frequência são recíprocas ($E^* \times D^* = 1$) (BRINSON; BRINSON, 2008).

Silva (2009) apresenta uma série de vantagens em caracterizar os materiais viscoelásticos no domínio da frequência, dentre elas: menos tempo demandado para a realização de ensaios; respostas no regime viscoelástico linear são mais facilmente garantidas, uma vez que as solicitações de natureza oscilatória resultam tensões e deformações suficientemente pequenas; melhor controle da região transiente do início do ensaio até a aplicação das solicitações desejadas.

2.4.3 Caracterização das propriedades a partir de resultados experimentais

Uma vez que o comportamento viscoelástico linear varia em relação ao tempo de carregamento e em relação à temperatura, a forma ideal de caracterizar suas propriedades seria através de curvas que mostrassem como estas comportam-se em diferentes tempos ou frequências de solicitação para uma dada temperatura. Essas são denominadas curvas mestras.

As curvas mestras devem ser capazes de representar uma escala de tempo e frequência amplas o suficiente a fim de refletir a mudança nas propriedades do material. Segundo Ferry (1980), essa variação de tempo ou frequência deve ser registrada em uma amplitude em torno de 10 a 15 décadas logarítmicas. Do ponto de vista experimental, seria inviável a realização de ensaios de caracterização com amplitude de varredura de tempo e frequência tão grande e para contornar este problema, na construção das curvas mestras, utiliza-se o princípio de superposição tempo – temperatura (PSTT).

Este princípio estabelece que as curvas de resultados experimentais obtidas em diferentes temperaturas e em uma dada faixa de tempo ou frequência, conhecidas como isócronas, podem ser transladadas horizontalmente em um eixo no espaço logarítmico, a fim de formar uma única curva isoterma, que apresentaria as propriedades analisada em tempos distintos daqueles ensaiados. Assim, o material pode apresentar valores idênticos de uma determinada propriedade, como por exemplo o módulo complexo, para diferentes pares de temperatura e frequência, conforme estabelece a Equação 2.12 (BABADOPULOS, 2013).

$$E^*(T_i, \omega_i) = E^*(T_0, \alpha(T_i, \omega_i)) \quad (2.12.a)$$

$$\alpha(T_i, \omega_i) = \alpha(T_i)\omega_i \quad (2.12.b)$$

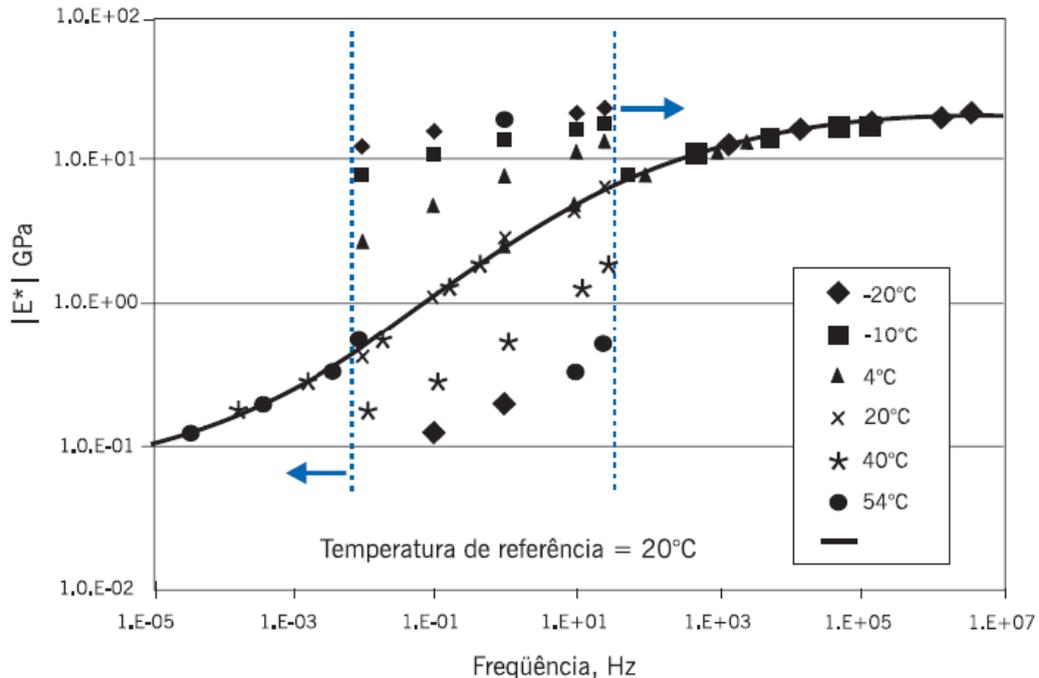
A translação horizontal no espaço logarítmico é representada pela expressão $\alpha(T_i, \omega_i) = \alpha(T_i)\omega_i$ conhecida como função de translação. Duas das leis mais utilizadas, na caracterização de misturas asfálticas, para descrever as funções de translação são: Lei de Arrhenius (Equação 2.13), e pela Lei WLF (William-Landel-Ferry) (Equação 2.14). (WILLIAMS; LANDEL; FERRY, 1955).

$$\log \alpha_T = 434,22 \frac{\Delta H}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \quad (2.13)$$

$$\log \alpha_T = \frac{-C_1(T - T_0)}{C_2 + T - T_0} \quad (2.14)$$

As constantes de cada uma dessas duas leis devem ser determinadas de modo que a curva construída a partir dos resultados experimentais tenha o formato mais suave possível. Os materiais que respeitam o princípio de superposição tempo – temperatura, e possibilitam a construção de uma curva mestra suave, são denominados termorreologicamente simples. A Figura 2.19 apresente um exemplo de translação horizontal de isócronas e construção de uma isoterma.

Figura 2.19 – Exemplo de translação horizontal para construção de curva mestra



Fonte: Adaptado de Bernucci *et al.* (2010).

Outra forma de expressar os resultados experimentais de materiais viscoelásticos é pela representação das propriedades no plano Cole – Cole, e no espaço de Black. A vantagem dessas formas de apresentação das propriedades, frente à curva mestra, se dá pela eliminação da temperatura e da frequência na representação.

O plano Cole – Cole é uma forma de representação dos infinitos pares de valores de módulo de estocagem (E') e módulo de perda (E'') que um material pode apresentar em diferentes temperaturas e frequências. Já o espaço de Black associa os pares de valores de módulo dinâmico, em escala logarítmica, e ângulo de fase em diferentes temperaturas e frequências.

Materiais termorreologicamente simples possuem uma curva única e de formato suave no espaço de Black e no plano Cole – Cole, e tal verificação é uma de suas grandes utilidades, pois permite a aplicação do PSTT. Entretanto, é válido ressaltar que Olard e Di Benedetto (2003) introduziram o conceito de princípio de superposição tempo – temperatura parcial para materiais que não formem uma curva única do espaço de Black, mas que possibilitem a modelagem de uma curva mestra de módulo, onde os ângulos de fase acabam preteridos e terão uma curva que não será suave.

2.4.4 Interconversão de propriedades

Uma vez que as propriedades: módulo de relaxação $E(t)$, função fluência $D(t)$, módulo complexo $E^*(\omega)$ e complacência complexa $D^*(\omega)$ têm a finalidade de representar o mesmo comportamento viscoelástico de um dado material, elas podem ser interconvertidas entre si. No caso das propriedades no domínio do tempo, a interconversão entre $E(t)$ e $D(t)$ pode ser obtida por meio das integrais de convolução conforme mostram as Equações 2.15a e 2.15b.

$$\int_0^t E(t-u)D(u)du = t; \quad t > 0 \quad (2.15.a)$$

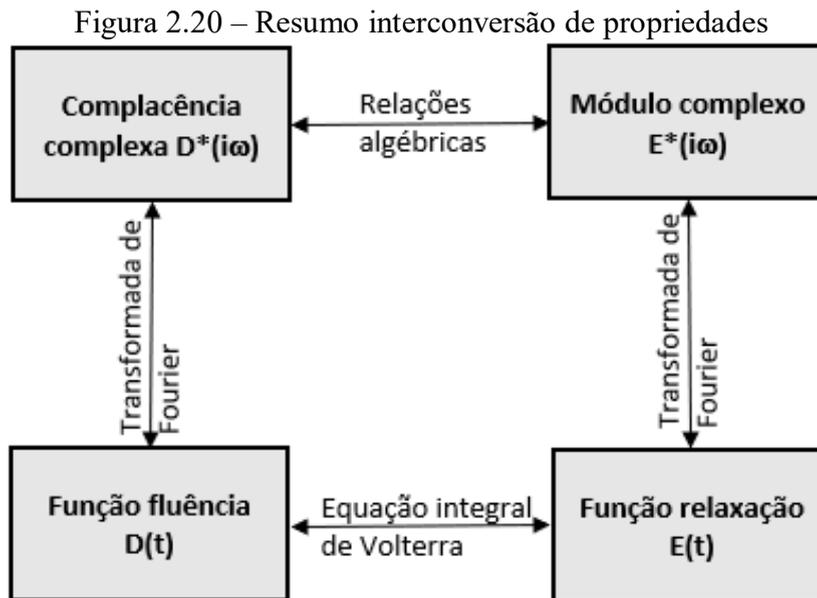
$$\int_0^t E(t)D(t-u)du = t; \quad t > 0 \quad (2.15.b)$$

Já a interconversão entre propriedades no domínio da frequência é muito mais simples, em razão da reciprocidade entre o módulo complexo e a complacência complexa ($E^* \times D^* = 1$). Uma das formas de interconversão de propriedades no domínio do tempo para o domínio da frequência se dá por métodos teóricos como os apresentados por Lakes (1998), Ninomiya & Ferry (1959) e Park & Schapery (1999a; 1999b),.

Uma outra forma de interconversão analítica das propriedades no domínio do tempo para o domínio da frequência é apresentada por Brinson & Brinson (2008), ao demonstrar que uma vez conhecidas as propriedades de módulo de relaxação e de função fluência de um material, o módulo complexo e complacência complexa podem ser facilmente calculados por meio de Transformadas de Fourier (Equações 2.16.a e 2.16.b). A Figura 2.20 mostra as diversas formas de interconversão entre as propriedades viscoelásticas lineares.

$$E^*(i\omega) = i\omega \int_0^{\infty} E(t)e^{-i\omega t} dt \quad (2.16.a)$$

$$D^*(i\omega) = i\omega \int_0^{\infty} D(t)e^{-i\omega t} dt \quad (2.16.b)$$



Fonte: Elaborado pelo autor.

A grande vantagem introduzida pelas técnicas de interconversão se deve ao fato de que a caracterização no domínio da frequência é muito mais simples e, aplicando estes métodos, é possível, a partir de resultados no domínio da frequência, obter qualquer propriedade viscoelástica no domínio do tempo.

O Princípio da correspondência elástico – viscoelástico (PCEV) afirma que o módulo elástico pode ser substituído pela sua contra parte viscoelástica no domínio transformado de Fourier. Assim, a equação diferencial utilizada para relacionar as tensões e as deformações de um material viscoelástico ao longo do tempo é convertida para uma equação algébrica simples. Esta conversão só é possível, pois as equações de equilíbrio, compatibilidade e as condições de contorno não se alteram nas soluções de um problema elástico e viscoelástico (THEISEN, 2006). A aplicação do PCEV reduz significativamente o esforço computacional necessário para a modelagem do comportamento de um material de natureza viscoelástica.

2.4.5 Modelos constitutivos viscoelástico lineares

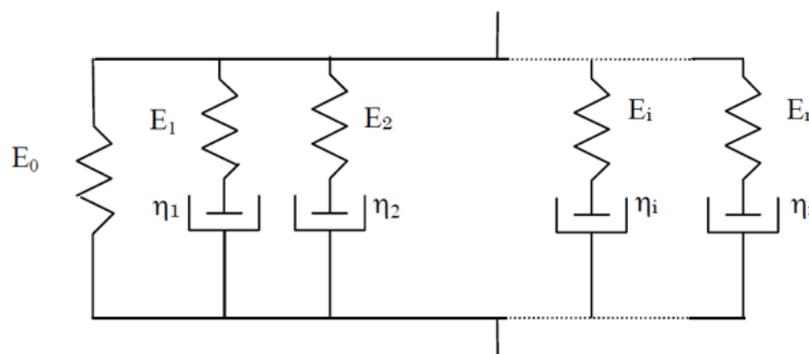
A definição das propriedades viscoelásticas se dá por expressões de modelos constitutivos com coeficientes a determinar, obtidos pelo processo de ajuste das respectivas expressões com resultados experimentais. Uma das maneiras de representar os modelos constitutivos é por meio de funções genéricas, como a sigmoideal do modelo de Witczak (BARI; WITCZAK, 2006), e pelas leis de potência, como as apresentadas por Williams (1964) e de Park *et al.* (1996). Outra forma de representar os modelos constitutivos se dá pelas expressões de análogos mecânicos, que são sistemas analógicos de associações de molas e amortecedores.

Ainda que os modelos constitutivos expressos por funções genéricas apresentem boa aderência a curvas de resultados experimentais, os modelos baseados em análogos mecânicos têm uma melhor interpretação física dos parâmetros de ajuste (OLARD; DI BENEDETTO, 2003). Por essa razão este trabalho priorizou essa última forma de ajuste. Ainda que não seja objetivo principal da pesquisa fazer uma extensa explicação do desenvolvimento dos diversos modelos, será apresentado uma breve descrição de cada um dos mais importantes e usuais.

2.4.5.1 Modelo de Maxwell – Wiechert

Também conhecido como modelo de Maxwell generalizado (Figura 2.21), consiste em uma mola posta em paralelo com um conjunto de n elementos paralelos, sendo esses compostos por uma mola e um amortecedor em série.

Figura 2.21 – Modelo de Maxwell generalizado



Fonte: Adaptado de Di Benedetto (2003).

As funções analíticas mais utilizadas para representar o módulo de relaxação deste modelo são as Séries de Prony ou Séries de Dirichlet (SOARES; SOUZA, 2003). A Equação

2.17 mostra uma Série de Prony genérica que representa o módulo de relaxação em um modelo de Maxwell generalizado. Os parâmetros E_{∞} , E_i e ρ_i caracterizam esta série de n elementos.

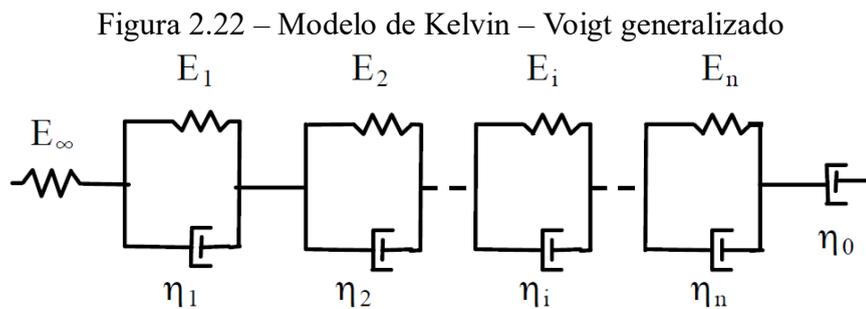
$$E(t) = E_{\infty} + \sum_{i=1}^{\eta} E_i e^{-t/\tau_i} \quad (2.17.a)$$

$$E^*(i\omega) = E_{\infty} + \sum_{i=1}^{\eta} E_i \frac{i\omega\tau_i}{1 + i\omega\tau_i} \quad (2.17.b)$$

Para cada um desses n elementos são definidas as variáveis $\rho = \frac{\eta}{E}$, conhecidas como tempo de relaxação. O conjunto de pares de valores de ρ e E_i é denominado espectro discreto de relaxação.

2.4.5.2 Modelo de Kelvin – Voigt generalizado

Consiste em uma mola posta em série com um conjunto de n elementos, sendo esses compostos por uma mola e um amortecedor em paralelo. A Figura 2.22 mostra o modelo de Kelvin – Voigt generalizado.



Fonte: Adaptado de Di Benedetto (2003).

As funções analíticas do modelo Kelvin – Voigt generalizado também costumam ser representadas por Séries de Prony (Equação 2.18). Os parâmetros D_g , D_j e τ_j caracterizam esta série de n elementos.

$$J(t) = \sum_{j=1}^{\eta} \frac{1}{E_j} \left(1 - e^{-t/\tau_j}\right) + \frac{1}{E_{\infty}} + \frac{1}{\eta_{\infty}} \quad (2.18.a)$$

$$E^*(i\omega) = \left(\sum_{j=1}^{\eta} \frac{1}{E_j + i\eta_j\omega} + \frac{1}{E_\infty} + \frac{1}{i\eta_0\omega} \right)^{-1} \quad (2.18.b)$$

Para cada um dos n elementos são definidas as variáveis $\tau = \frac{\eta}{E}$, conhecidas como tempo de retardação. O conjunto de pares de valores de τ e D_i é denominado espectro discreto de retardação.

De acordo com Olard e Di Benedetto (2003), qualquer que seja a combinação de molas e amortecedores lineares, como é o caso do modelo de Maxwell – Wiechert e o modelo de Kelvin – Voigt generalizado, será constituído um sistema de espectro discreto e por mais que estes sejam mais simples de se trabalhar, nem sempre são os mais apropriados para a descrição de comportamento viscoelástico. Quanto maior o número n de elementos, melhor será o ajusta da curva com os resultados experimentais.

2.4.5.2 Modelo de Huet

Este modelo analógico é constituído por uma associação em série de uma mola e dois amortecedores parabólicos (HUET, 1963). Um amortecedor parabólico é um elemento que apresenta uma função fluência parabólica em relação ao tempo, conforme mostra a Equação 2.19, onde Γ representa a função gama.

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma_0}{\eta * \tau^{m-1}} * \frac{1}{\Gamma(m+1)} t^m \quad (2.19)$$

A depender do valor adotado para a constante m , o elemento parabólico pode se comportar como uma mola ($m = 0$) ou como um amortecedor linear ($m = 1$), de modo que seu ângulo de fase dependa apenas deste valor m . Isso evidencia a grande versatilidade deste elemento (BABADOPULOS, 2013).

As Equações 2.20.a e 2.20.b representam a função fluência e o módulo complexo pelo modelo de Huet.

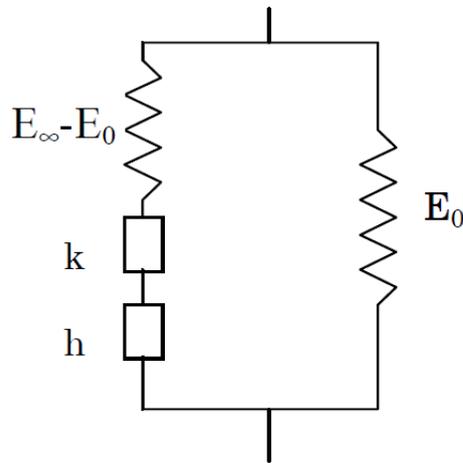
$$J(t) = \frac{1}{E_\infty} \left(1 + \alpha \frac{(t/\tau)^k}{\Gamma(k+1)} + \alpha \frac{(t/\tau)^h}{\Gamma(h+1)} \right) \quad (2.20.a)$$

$$E^*(i\omega) = \frac{E_\infty}{1 + \alpha(i\omega\tau)^{-k} + (i\omega\tau)^{-h}} \quad (2.20.b)$$

2.4.5.2 Modelo de Huet – Sayegh

Foi desenvolvido a partir do modelo de Huet, uma vez que este não apresentava um ajuste satisfatório para misturas asfálticas em frequências muito baixas e/ou temperaturas muito altas. O modelo de Huet – Sayegh (Figura 2.23) é composto por uma mola colocada em paralelo com o modelo de Huet (SAYEGH, 1965).

Figura 2.23 – Modelo de Huet – Sayegh



Fonte: Adaptado de Di Benedetto (2003).

A Equação 2.21 mostra a representação do módulo complexo para este modelo. O parâmetro τ é função apenas de τ_0 e da temperatura, podendo ter sua relação descrita por uma Lei WLF, conforme mostrado na Equação 2.22.

$$E^*(i\omega) = E_0 + \frac{E_\infty - E_0}{1 + \alpha(i\omega\tau)^{-k} + (i\omega\tau)^{-h}} \quad (2.21)$$

$$\tau(T) = \alpha_T(T) * \tau_0 \quad (2.22)$$

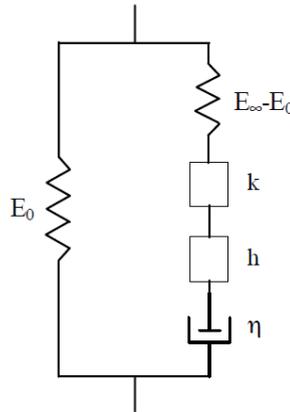
2.4.5.2 Modelo 2S2PID

O modelo 2S2PID (*two springs, two parabolic dashpots, one dashpot*) (Figura 2.24) foi desenvolvido por Olard e Di Benedetto (2003), a partir de um aprimoramento do modelo de Huet – Sayegh, com o diferencial de conseguir representar de forma satisfatória o

comportamento reológico tanto de ligante como de misturas asfálticas, em quaisquer faixas de frequência e temperatura (OLARD; DI BENEDETTO, 2003; DI BENEDETTO *et al.*, 2004b; NUR *et al.*, 2013b). A Equação 2.23 mostra como o módulo complexo é expresso.

$$E^*(i\omega) = E_0 + \frac{E_\infty - E_0}{1 + \alpha(i\omega\tau)^{-k} + (i\omega\tau)^{-h} + (i\omega\beta\tau)^{-1}} \quad (2.23)$$

Figura 2.24 – Modelo 2S2P1D



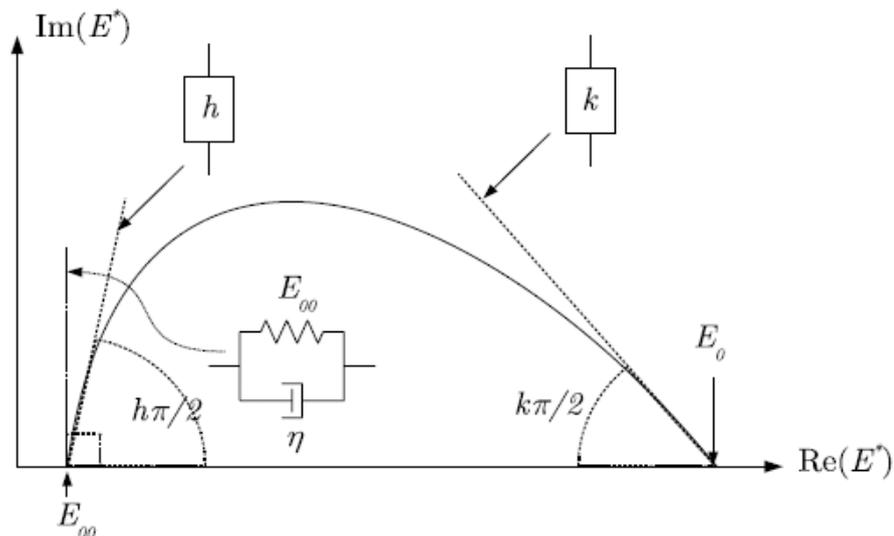
Fonte: Adaptado de Di Benedetto (2003).

Sendo o 2S2P1D utilizado na caracterização de materiais termorreologicamente simples, apenas o parâmetro τ é dependente da temperatura e esse pode ser definido, por exemplo, pelas constantes da Lei WLF. Assim o modelo é completamente, em modelos bidimensionais, representado pelos 7 parâmetros apresentados na Equação 2.23 mais 2 parâmetros da WLF.

De acordo com Di Benedetto *et al.* (2007), o 2S2P1D pode ainda ser utilizado na modelagem do comportamento tridimensional de misturas asfálticas, visto que o coeficiente de Poisson dessas misturas não é constante em diferentes temperaturas e frequências, sendo um número complexo a forma mais correta de representa-lo. Com pequenos ajustes, o 2S2P1D é capaz representar um modelo viscoelástico tridimensional. A Figura 2.25 apresenta o efeito que cada um dos parâmetros do modelo 2S2P1D tem no plano Cole – Cole.

Segundo Babadopulos (2013) ainda que os ângulos de início e fim do plano Cole – Cole estejam associados com os coeficientes de potência dos amortecedores parabólicos e os módulos relacionem-se com a posição do plano no eixo x, existe um efeito independente de cada constante do modelo na curva. Em virtude disso, a determinação destas constantes por métodos computacionais automatizados é tarefa bastante difícil e por vezes pode não apresentar o melhor ajuste possível.

Figura 2.25 – Resumo interconversão de propriedades



Fonte: Adaptado de Di Benedetto (2003).

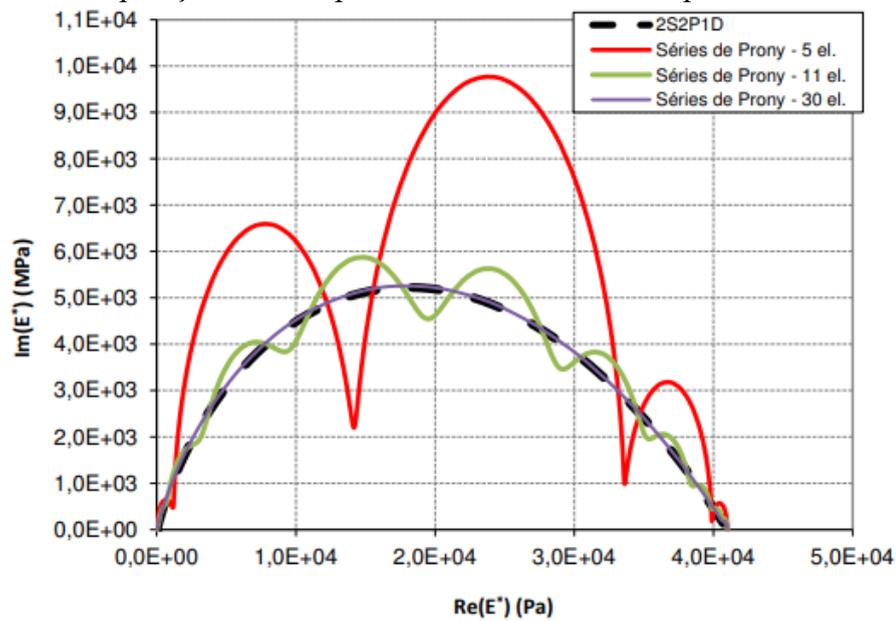
O ajuste dos dados experimentais a partir da determinação dos parâmetros do modelo também pode ser feita de forma manual, a partir da interpretação dada para o efeito de cada um destes na curva (OLARD; DI BENEDETTO, 2003; DI BENEDETTO *et al.*, 2004b).

Modelos como os de Huet, Huet – Sayegh e 2S2P1D, que utilizam amortecedores parabólicos, são considerados de espectro contínuo. Olard e Di Benedetto (2003) afirma que um modelo de espectro contínuo se assemelha a um de espectro discreto com infinitos elementos e por isso conseguem representar de forma muito mais precisa o comportamento de um material viscoelástico.

Babadopulos (2013) mostrou que a curva Cole – Cole de um material viscoelástico caracterizado pelo 2S2P1D apresenta resultados com muito menos ruídos, quando comparado com a caracterização por séries de Prony. A Figura 2.26 apresenta a comparação de resultados, para um mesmo material, entre previsões de modelos discretos e contínuos. Para que os resultados de ambos não apresentem consideráveis divergências, precisa-se de um número elevado de elementos nas séries de Prony.

Outra grande vantagem em utilizar o 2S2P1D para caracterizar misturas asfálticas se deve ao fato de que os parâmetros k , h e η estarem relacionados ao ligante, de modo que apenas os parâmetros α , E_0 e E_{∞} precisem ser determinados (NUR *et al.*, 2013a). É possível inclusive uma análise em diferentes escalas (ligante asfáltico, argamassa asfáltica e concreto asfáltico) com correspondência adequada (DI BENEDETTO ET AL., 2004; BABADOPULOS *et al.*, 2019; OLIVEIRA *et al.*, 2023).

Figura 2.26 – Comparação entre as previsões de modelos de espectro discreto e contínuo.



Fonte: Adaptado Babadopulos (2013).

Uma das desvantagens na utilização do 2S2P1D está relacionada a um elevado esforço computacional, no caso de uso de programas de elementos finitos, para a modelagem do comportamento tensão-deformação de materiais assim caracterizados. Para contornar esse problema, após a determinação dos parâmetros 2S2P1D, são feitas discretizações em séries de Prony, visto que essas têm uma eficiência computacional muito maior. Tiouajini *et al.* (2011) apresenta uma rotina de procedimentos para realizar esta discretização.

3 AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO CISALHANTE DE MISTURAS SOLO-EMULSÃO COM TEORES DE EMULSÃO VARIANDO DE 16% A 28% EM MASSA

3.1 Introdução

A utilização de misturas solo-emulsão asfáltica para a construção de pavimentos já foi objeto de estudo de diversas pesquisas, onde os teores de emulsão asfáltica estudados não costumam passar de 10% em massa (B. D. OLUYEMI-AYIBIOWU, 2019; S.ANDAVAN; B. MANEESHKUMAR, 2020; BUALUANG; JITSANGIAM; TANCHAISAWAT, 2021; FERNANDES *et al.*, 2022). Nesses estudos, as principais melhorias proporcionadas ao comportamento mecânico dos solos são a diminuição da permeabilidade, aumento da resistência mecânica, maior flexibilidade, formação de um filme betuminoso em torno dos grãos de solo para melhoria da parcela coesiva da resistência ao cisalhamento, maior resistência contra ação de ácidos, álcalis e sais, dentre outras.

Os estudos de misturas solo-emulsão em outras áreas da Geotecnia ainda são muito incipientes, destacando-se algumas aplicações para uso na construção de barragens de terra como os trabalhos Jacintho (2010), Lima (2016), Pereira (2018), Lima e Dantas Neto (2019), Brito (2020), Dantas Neto; Pereira e Abreu (2020) e Brito *et al.* (2022).

Jacintho (2010) misturou três tipos de solo, sendo eles uma areia siltosa (SM), uma areia argilosa (SC) e uma argila (CL), com teores de emulsão variando entre 0% até 8% em massa. Os resultados obtidos por esses autores foram ainda inconsistentes uma vez que indicaram um aumento nos coeficientes de permeabilidade e não houve aumento de coesão das misturas de solo – emulsão estudadas, indo de encontro ao comportamento esperado quando da adição de um ligante asfáltico aos solos. Uma possível explicação desses resultados se deu pelos teores de emulsão utilizados serem considerados muito baixos para tal fim, ocasionando o surgimento de macro poros no material.

Tendo em vista a macroporosidade observada nos estudos de Jacintho com teores de emulsão de até 8% em massa, Lima (2016) e Lima e Dantas Neto 2019) avaliaram o processo de compactação em misturas de uma areia siltosa (SM) com teores mais elevados de emulsão, variando entre 13% até 31% em massa, nas energias Proctor Normal, Proctor Modificado e Marshall. O aumento dos teores de emulsão asfáltica nas misturas estudadas por Lima (2016) e Lima e Dantas Neto (2019) teve por objetivo a obtenção de uma mistura mais homogênea que não apresentasse a elevada macroporosidade obtidas nas misturas estudadas por Jacintho (2010).

Pereira (2018) e Dantas Neto, Pereira e Abreu (2020) analisaram o comportamento

hidráulico de misturas de uma areia siltosa (SM) com teores de emulsão variando de 13% até 28% em massa, compactadas nas energias Proctor Modificado e Marshall, bem como o comportamento dessas misturas em seus respectivos teores ótimos de compactação. Nestes estudos foi observado que a adição da emulsão asfáltica levou a um aumento no intercepto coesivo do solo, que inicialmente apresentou um valor de 3,2 kPa e chegou a 14,2 kPa para misturas com o teor ótimo de 22% de emulsão, e uma diminuição no ângulo de atrito deste, que inicialmente possuía valor de 38°, enquanto nas misturas chegaram a valores de 10,9° para baixos níveis de tensão confinante. Além disso, observou-se uma diminuição do coeficiente de permeabilidade (k_{20}) das misturas à medida que se aumentou os teores de emulsão asfáltica chegando a valores da ordem de 10^{-8} cm/s nas misturas com 28% de teor de emulsão asfáltica em massa.

Brito (2020) e Brito *et al.* (2022) estudaram a influência do tempo de cura nos parâmetros de resistência ao cisalhamento das misturas de uma areia siltosa (SM) com teores emulsão asfáltica variando entre 10% e 25% em massa, compactadas na energia Marshall. De forma semelhante ao obtido nos estudos de Pereira (2018) e Dantas Neto, Pereira e Abreu (2020), esses autores obtiveram que o aumento do teor de emulsão levou a um aumento do intercepto coesivo e a uma diminuição do ângulo de atrito. Avaliou-se a influência do tempo no processo de cura induzido aos corpos-de-prova confeccionados, deixando-os expostos ao ar livre por 1, 7 e 28 dias antes de proceder ao ensaio triaxial e, em todos os casos estudados, não houve influência desse tempo de cura nos valores obtidos dos parâmetros de resistência ao cisalhamento.

Diante o exposto, observa-se que a maior parte dos estudos existentes foram desenvolvidos considerando-se misturas entre solo e emulsão asfáltica confeccionadas somente nas condições ótimas de compactação, que geralmente correspondem aos teores de emulsão que levam à maior massa específica aparente e menor volume de vazios. Em função da pequena quantidade de estudos desse tipo de mistura com elevados teores, torna-se necessário um maior entendimento sobre a influência do teor de emulsão, e consequentemente do volume de vazios, no comportamento cisalhante das misturas. Até o presente momento não há estudos que definam o ganho, ou perda, nos valores dos parâmetros de resistência para misturas com elevados teores de emulsão asfáltica e em condições distintas do teor ótimo de compactação.

Assim sendo e levando-se em consideração a metodologia de compactação definida por Pereira (2018) e Dantas Neto, Pereira e Abreu (2020), este trabalho tem por objetivo o estudo do comportamento cisalhante de misturas entre solo e emulsão asfáltica confeccionadas com teores de emulsão de 16%, 22% e 28%, em massa. A adoção destas quantidades de emulsão

se deu pelo fato de representarem não somente a condição ótima de compactação (teor de 22%), já estudada por outros autores, mas também as condições, ainda pouco avaliadas, com menores e maiores teores em relação ao teor ótimo, que levam as misturas a condições de compactação mais desfavoráveis, e conseqüentemente, a maiores volumes de vazios.

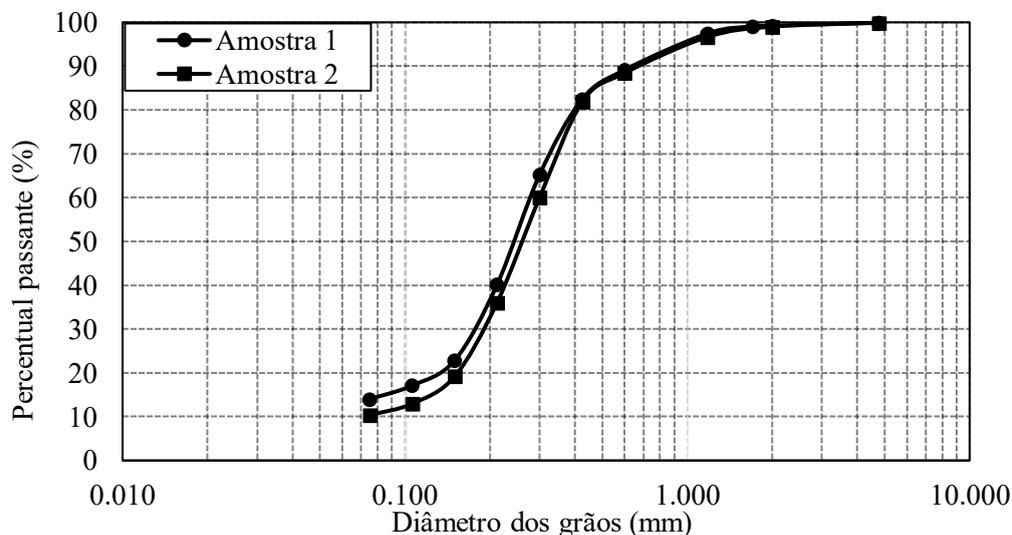
3.2 Materiais e métodos

3.2.1 Solo empregado

Para a realização deste trabalho, foi feita a coleta de duas amostras de solo dentro dos limites do Campus da Universidade Federal do Ceará – UFC, na cidade de Fortaleza, no sítio de coordenadas UTM 3°45'7,5"S e 38°34'21,9"W. Foram empregadas as seguintes normas técnicas para a caracterização do material: NBR 6457 (2016), NBR 6459 (2016), NBR 7180 (2016), NBR 7181 (2016), NBR 7182 (2016), DNER – ME 093 (1994).

O solo em questão foi identificado como uma areia siltosa (SM), segundo os critérios do Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS). A Figura 3.1 apresenta a curva granulométrica das duas amostras coletadas. Escolheu-se esse tipo de solo pelo fato de apresentar propriedades e características similares ao de solos aluvionares, os quais costumam ser encontrados em abundância próximos às localidades de obras de barragens de terra. A Tabela 3.1 apresenta um resumo dos valores médios dos parâmetros geotécnicos calculados para as duas amostras.

Figura 3.1 – Curva de compactação do solo



Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 3.1 – Resumo dos parâmetros geotécnicos do solo estudado

Parâmetros geotécnicos do solo	Valor	Unidade
Massa específica aparente seca máxima – Proctor Normal	1,87	g/cm ³
Umidade ótima	9,74	%
Limite de liquidez	NL	%
Limite de plasticidade	NP	%
Densidade relativa dos grãos	2,64	Adimensional

Fonte: elaborada pelo autor.

3.2.2 Emulsão asfáltica

A emulsão asfáltica escolhida nesta pesquisa foi uma emulsão de ruptura lenta do tipo catiônica (RL-1C). Foi utilizada uma emulsão de ruptura lenta, que leva até 4 horas para completar o processo de ruptura, a fim de que houvesse tempo hábil para a completa realização da sua mistura com o solo. A Tabela 3.2 apresenta um resumo das características da emulsão asfáltica RL – 1C utilizada, foram empregadas as seguintes normas técnicas para a caracterização da emulsão: NBR14950 (2003), NBR 14393 (2012), NBR 14376 (2019).

Tabela 3.2 – Propriedades da emulsão asfáltica RL-1C

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

Fonte: elaborada pelo autor.

3.2.3 Determinação dos teores de emulsão asfáltica

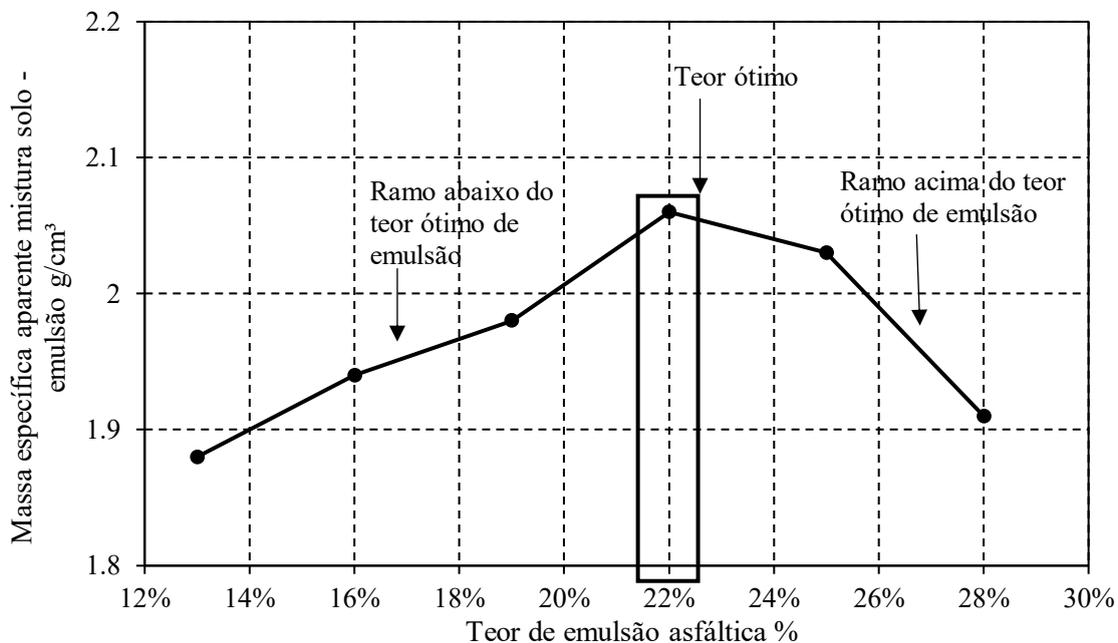
A determinação dos teores de emulsão foi feita de modo a confeccionar um corpo de prova no teor ótimo da curva de compactação do material e mais um teor acima e abaixo deste ponto, obtidos nos ensaios de compactação das misturas solo-emulsão com 24 horas de aeração e aplicando-se a energia de compactação Marshall (M24) conforme o procedimento apresentado em Pereira (2018). A energia Marshall foi escolhida como objetivo de estudo pelo fato de proporcionar misturas mais homogêneas entre o solo e a emulsão asfáltica e uma menor quantidade de macroporosidade (LIMA, 2016; LIMA; DANTAS NETO, 2019).

Assim, adotou-se os teores de emulsão asfáltica de 16%, 22% e 28%, em massa total da mistura antes do processo de perda de água da emulsão. Tais teores foram escolhidos, a fim de se entender o comportamento cisalhante das misturas entre solo e diferentes teores de

emulsão asfáltica definidos de modo a se ter corpos-prova em diferentes condições de volume de vazios ao longo da curva de compactação obtida (Figura 3.2).

O tempo de 24 horas de aeração foi adotado a fim de favorecer a ruptura da emulsão e a formação do filme asfáltico ao redor das partículas de solo antes da compactação dos corpos-de-prova. Vale salientar que uma das vantagens em se trabalhar com misturas confeccionadas segundo este procedimento (M24) se dá pela possibilidade armazenagem do material, antes de sua utilização facilitando assim o processo de execução e aumentando a produtividade do processo de aplicação da mistura (LIMA, 2016).

Figura 3.2 – Curva de compactação da mistura solo e emulsão – M24



Fonte: Adaptado de Pereira (2018)

3.2.4 Mistura entre o solo e a emulsão asfáltica

O procedimento para a mistura dos materiais foi o mesmo utilizado nos estudos de Lima (2016), Pereira (2018) e Brito (2020) e obedeceu às seguintes etapas:

- (i) Destorroamento do solo - procedeu-se com uso de almofariz e mão de gral, até que não tivessem mais torrões de solo;
- (ii) Utilização de um repartidor de amostras até que o material fosse reduzido de forma representativa;

- (iii) Secagem em estufa à 100°C por 24 horas - utilizou-se estufa não-aerada e sem ventilação;
- (iv) Resfriamento do solo à temperatura ambiente de cerca de 25°C - executado em laboratório em local com umidade aproximada de 70% (média da cidade de Fortaleza, Brasil);
- (v) Pesagem e mistura do solo com a emulsão asfáltica por aproximadamente 5 minutos, de forma manual, utilizando-se de espátula e recipiente metálico, com mistura contínua;
- (vi) Exposição do material misturado ao ar livre por 24 horas (aeração) em camada de cerca de 10 cm de espessura e sem compactação;
- (vii) Compactação compactador MCT.

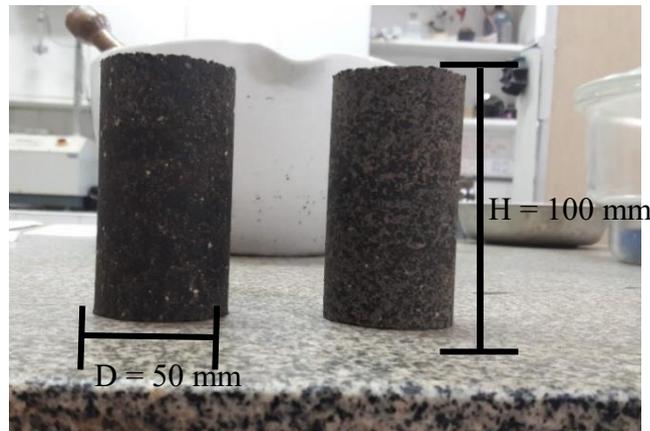
3.2.5 Confeção dos corpos de prova (CP)

As condições de compactação foram determinadas a partir dos resultados apresentados na Figura 4.2, sendo o controle dos corpos de prova (CP) feito a partir da sua massa específica aparente máxima. A compactação se deu com o auxílio do compactador MCT (Miniatura, Compactado, Tropical), o qual, segundo a DNER-ME 258 (1994), utiliza um martelo cilíndrico com peso de 2270 g e uma altura de queda de 305 mm, e 50 mm de diâmetro. Os corpos de prova possuíam massa de 375,02 g e grau de compactação de 98,4% para a amostra com teor de emulsão asfáltica de 16%, 392,69 g e grau de compactação de 97,1% para a amostra com teor de 22% e 371,10 g e grau de compactação de 98,9% para o teor de 28%, correspondentes as respectivas massas específicas encontradas na construção da curva de compactação (Figura 3.2).

De modo a compatibilizar a energia empregada no estudo de dosagem (Ensaio Marshall) com aquela utilizada na confecção dos corpos de prova, a compactação foi feita em 2 camadas com 50 mm de espessura, aplicando-se 75 golpes em cada uma.

Para a moldagem dos corpos de prova somente de solo, utilizou-se o mesmo equipamento adotando duas camadas de compactação com 50 golpes em cada uma delas. Essa diferença de energia aplicada entre o solo SM e as misturas com emulsão foi escolhida de maneira a reproduzir corpos de prova de emulsão asfáltica com energia de compactação semelhante à Marshall e corpos de prova de solo com energia semelhante à Proctor Normal. A Figura 3.3 apresenta corpos de prova da mistura solo-emulsão após a compactação.

Figura 3.3 – Corpos de prova após compactação



Fonte: elaborada pelo autor.

3.2.6 Ensaio de compressão triaxial

Os ensaios de compressão triaxial realizados foram do tipo consolidado hidrostáticamente e não drenado (CHU). Esse tipo de análise foi priorizado por permitir determinar os parâmetros de resistência totais e efetivos do material e em função dos valores muito baixos de permeabilidade dessas misturas (da ordem de 10^{-8} cm/s) conforme determinado por Pereira (2018).

O ensaio foi conduzido em deformações controladas a uma velocidade de 0,0813 mm/minuto. Esta velocidade foi adotada, segundo procedimento descrito por Head (1986), a fim de que fosse possível a equalização de poropressões geradas internamente no CP, durante a ruptura.

O controle da etapa de adensamento das misturas com 16% e 22% de teor de emulsão foi feita a partir da quantidade de volume de água que saía do corpo de prova, valores estes auferidos com o auxílio de uma bureta graduada. Já o controle do adensamento da mistura com 28% de emulsão foi feito a partir da equalização das poropressões, tendo em vista que para este teor houve um descompasso entre o tempo de dissipação da poropressão e de expulsão de água do interior dos corpos de prova. O controle da dissipação do excesso de poropressão interna foi feito com o auxílio de um transdutor eletrônico para medição de poropressões, conectado pela célula de carga.

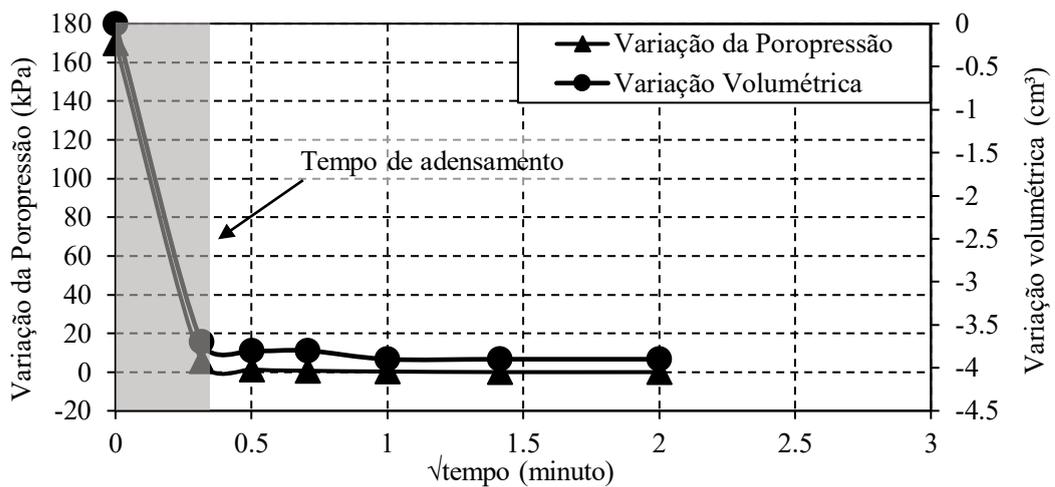
As pressões de confinamento adotadas para a construção das envoltórias de ruptura foram de 50 kPa, 100 kPa e 200 kPa, tanto para os corpos de prova de solo, quanto para os de solo-emulsão. Os procedimentos de montagem das células de carga e realização do ensaio seguiram as recomendações dadas por Head (1986).

3.3 Resultados e discussões

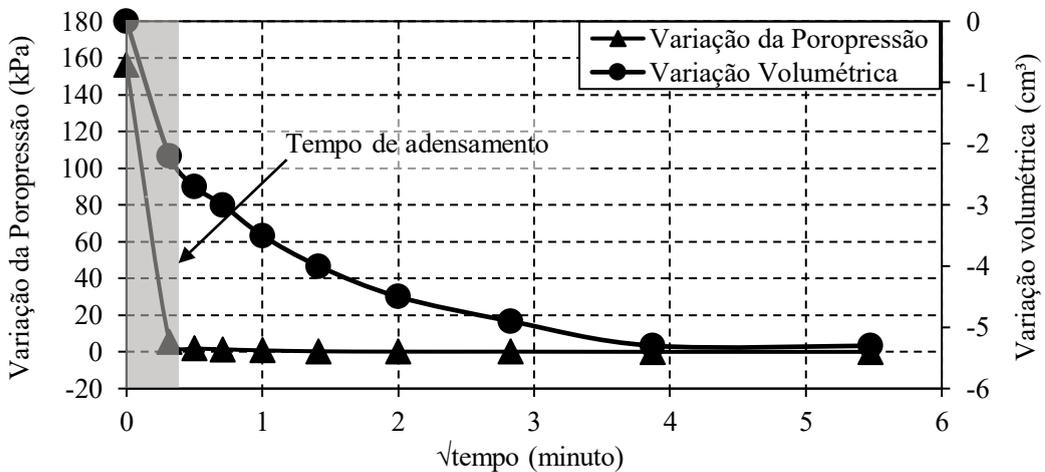
3.3.1 Adensamento dos corpos de prova

Ao analisar os resultados dos ensaios triaxiais, o adensamento do solo e das misturas somente foram considerados concluídos, e o corpo de prova considerado estabilizado, após o fim da expulsão de água deste. A Figura 3.4 apresenta as curvas de adensamento, com o eixo x na escala de raiz quadrada do tempo, do solo SM e das misturas com 16% e 22% de teor de emulsão asfáltica em massa na pressão confinante de 200 kPa, considerada a com condições mais desfavoráveis para estabilização do corpo de prova.

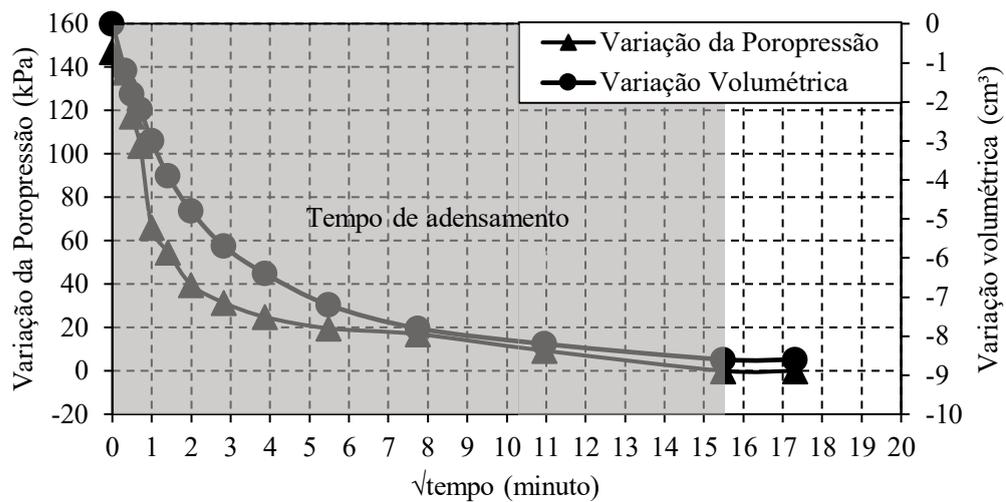
Figura 3.4 – Adensamento e dissipação da poropressão



a) Solo SM



b) Solo com 16% de emulsão asfáltica



c) Solo com 22% de emulsão asfáltica

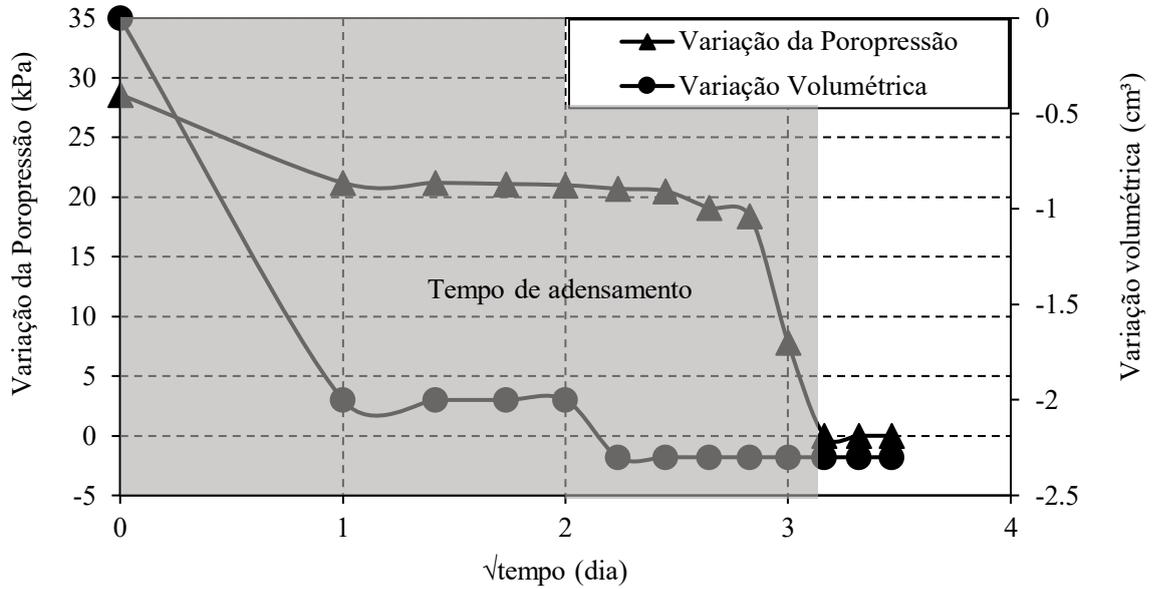
Fonte: Elaborado pelo autor

Analisando os resultados da Figura 3.4, observa-se uma consonância entre os tempos de adensamento e da completa dissipação do excesso de poropressão. Constatou-se uma semelhança nas curvas do solo SM e da mistura com 16%, mesmo quando os corpos de prova eram submetidos a elevadas tensões confinantes. Para ambos os casos, o adensamento ocorreu no primeiro minuto de ensaio. Tal comportamento já era esperado, uma vez que tanto para este teor de emulsão, como para o solo SM, o coeficiente de permeabilidade é da ordem de 10^{-5} cm/s (PEREIRA, 2018), valor este que propicia uma maior facilidade em permitir a saída d'água do interior dos corpos de prova.

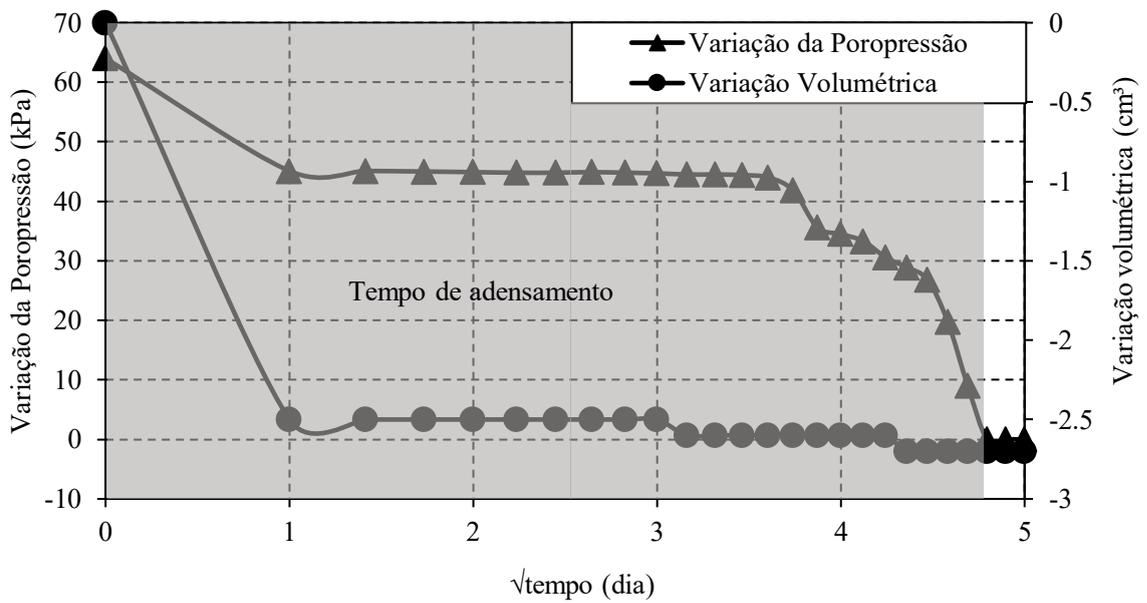
Já para os corpos de prova com 22% de emulsão foram necessários 240 minutos para cessarem as variações volumétricas e de poropressão, na confinante de 200 kPa. Este tempo, superior aos obtidos com o solo SM ou com o solo misturado com 16% de emulsão, pode ser justificado em função da reduzida permeabilidade para o teor de 22% de emulsão na mistura, da ordem de 10^{-6} cm/s (PEREIRA, 2018), o que torna mais difícil a saída de água do corpo de prova.

A Figura 3.5 apresenta os resultados de adensamento dos corpos de prova com teor de 28% de emulsão asfáltica em massa. Observou-se que mesmo com uma constância de variação volumétrica ainda havia mudança significativa das poropressões. Nesses casos, em virtude de haver um descompasso entre o tempo de dissipação do excesso de poropressão e de expulsão de água do interior do corpo de prova, definiu-se que a ruptura do material ocorreria após a equalização das poropressões, diferentemente do critério utilizado nos demais corpos de prova.

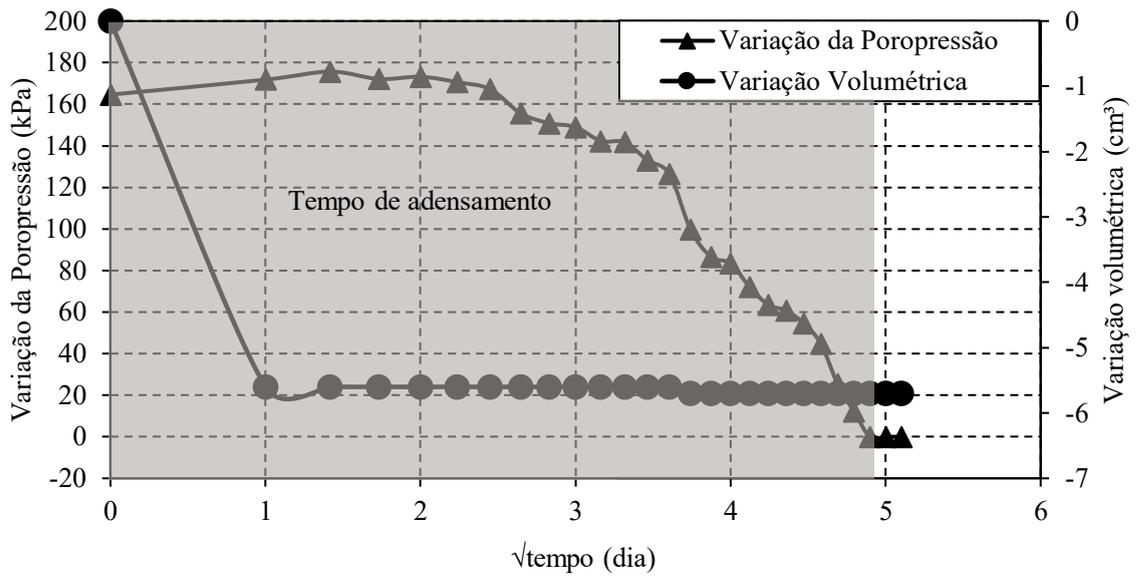
Figura 3.5 – Adensamento e dissipação da poropressão - solo com 28% de emulsão



a) Ensaio com pressão confinante $\sigma_3 = 50 \text{ kPa}$



b) Ensaio com pressão confinante $\sigma_3 = 100 \text{ kPa}$



c) Ensaio com pressão confinante $\sigma_3 = 200 \text{ kPa}$

Fonte: Elaborado pelo autor.

Outra constatação durante a análise do adensamento dos corpos de prova com 28% de emulsão asfáltica foi que, após cessada a variação de volume, restou ainda uma clara mudança em sua geometria enquanto eram dissipadas as poropressões. Essa alteração de geometria, apresentada na Figura 3.6, pode ser justificada pela elevada espessura do filme asfáltico formada ao redor dos grãos, que quando submetido a elevadas tensões confinantes iniciou um processo de fluxo viscoso, ocasionando modificações na sua estrutura do material.

Figura 3.6 – Mudança de geometria do corpo de prova após cessada variação volumétrica

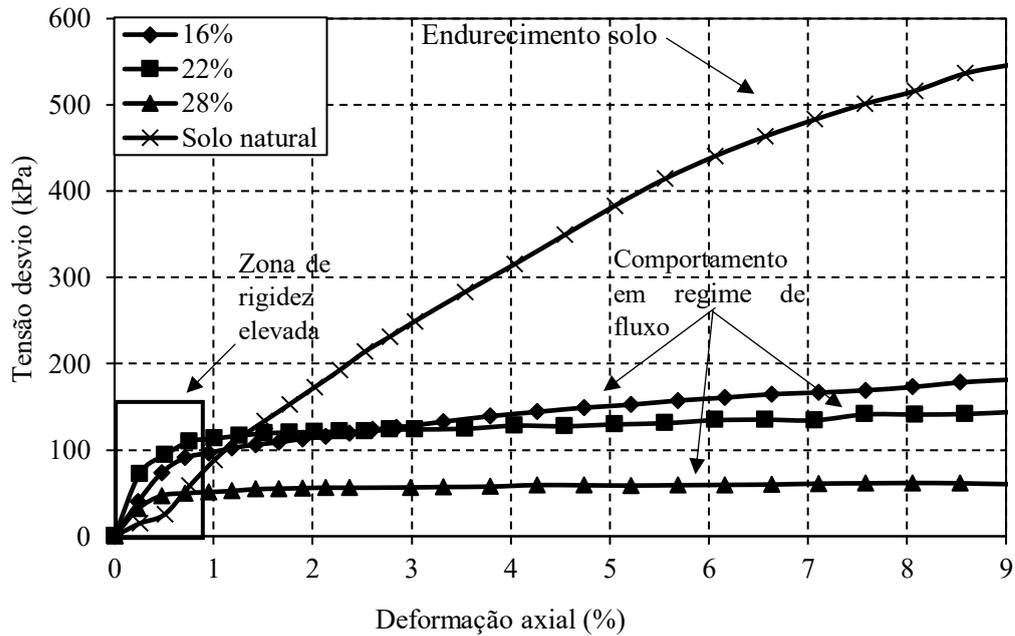


Fonte: Elaborado pelo autor.

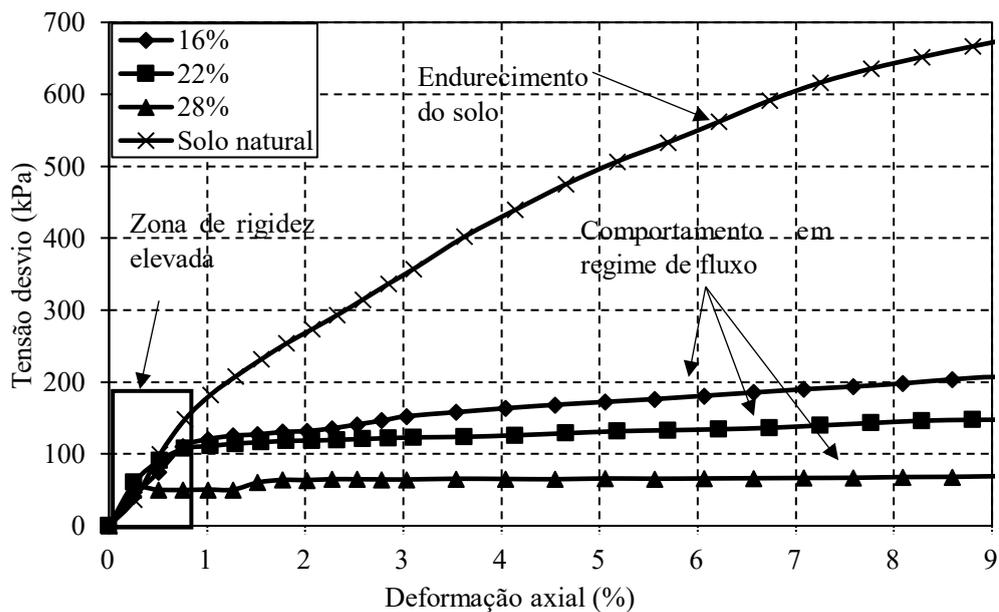
3.3.2 Ruptura dos corpos de prova

A Figura 3.7 apresenta as curvas de variação da tensão desviadora com a deformação axial obtidas, para as pressões confinantes de 50 kPa, 100 kPa e 200 kPa, com o solo compactado e com as misturas de solo-emulsão nos teores de 16%, 22% e 28% ensaiados sempre em condições saturadas.

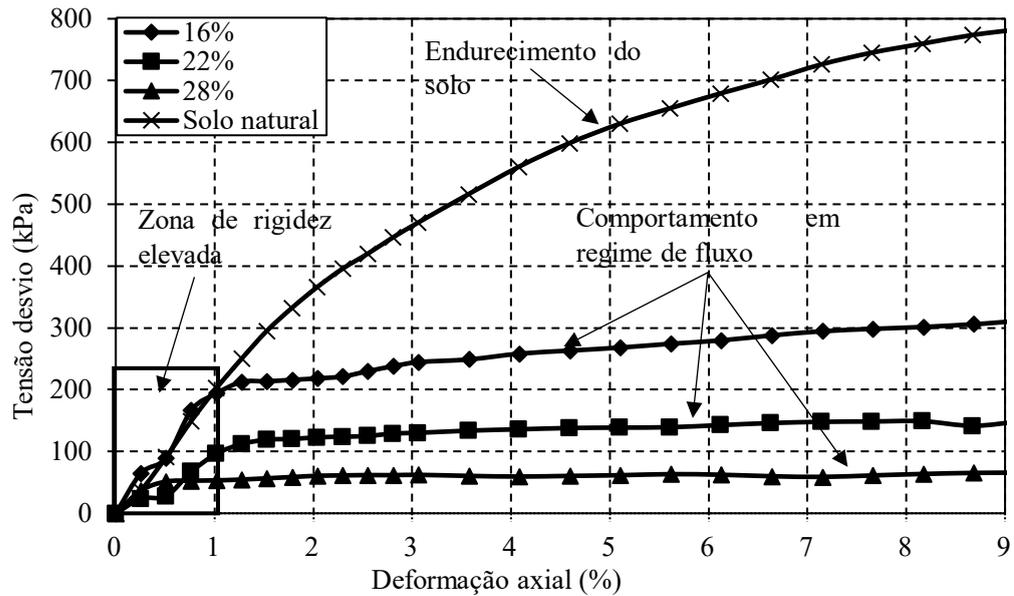
Figura 3.7 – Curva de ruptura mistura M24 e solo SM



a) Ensaio com pressão confinante $\sigma_3 = 50$ kPa



b) Ensaio com pressão confinante $\sigma_3 = 100$ kPa



c) Ensaio com pressão confinante $\sigma_3 = 200$ kPa

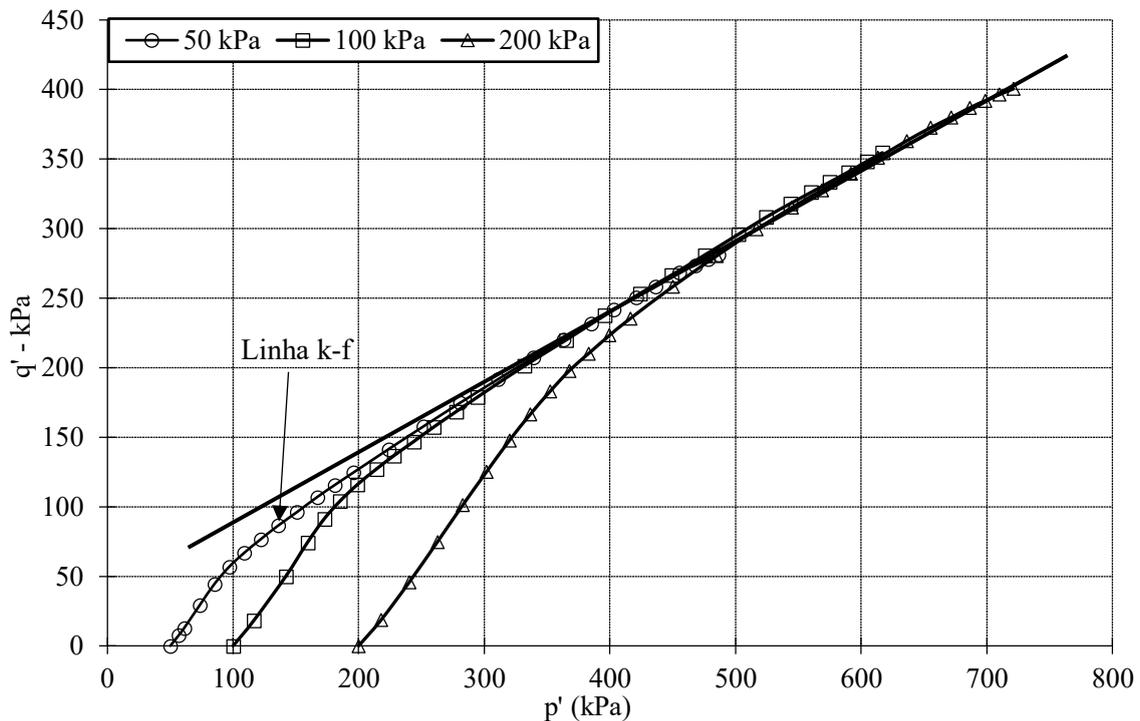
Fonte: Elaborado pelo autor.

De acordo com os resultados da Figura 3.7, observa-se que para o solo SM não há uma definição clara de uma tensão de pico, para os níveis de tensão investigados, indicando que o material apresenta um comportamento semelhante ao de um material elasto-plástico com endurecimento (KIMOTO *et al.*, 2015).

Esta semelhança com um material elasto-plástico com endurecimento pode ser justificada pela composição granulométrica do solo em questão, uma vez que este possui um grande percentual de areia fina e silte. Outro aspecto que influencia nesse endurecimento do solo é a energia de compactação Proctor Normal, que reflete em uma maior quantidade de vazios no corpo de prova quando comparado com outras energias de compactação.

Fica evidente, também, que os níveis de pressão aplicados nos ensaios com solo compactado foram muito maiores quando comparados com os das mistura solo-emulsão. Segundo Pereira (2018), isso pode ser atribuído à natureza viscosa do filme asfáltico residual formado ao redor das partículas de solo nos corpos de prova de mistura solo-emulsão que, quando submetido a elevadas tensões, entram em regime de fluxo.

A ruptura dos corpos de prova de solo SM foi considerada sempre que as curvas p' - q' , obtidas pelos resultados dos ensaios triaxiais, tocavam na linha k - f conforme apresentado na Figura 3.8.

Figura 3.8 – Diagrama p' - q' e linha k-f do solo SM

De forma diferente ao que ocorreu com o solo compactado, em todas as trajetórias observadas nos diagramas tensão-deformação das misturas observou-se um enrijecimento inicial e em seguida um regime de fluxo com a ocorrência de um patamar de tensão, fazendo com que esses materiais tivessem um comportamento tensão-deformação muito mais próximo ao de um material elástico perfeitamente plástico (BRINSON; BRINSON, 2008). O critério de ruptura foi considerado imediatamente após a observação dessa mudança na trajetória de tensões.

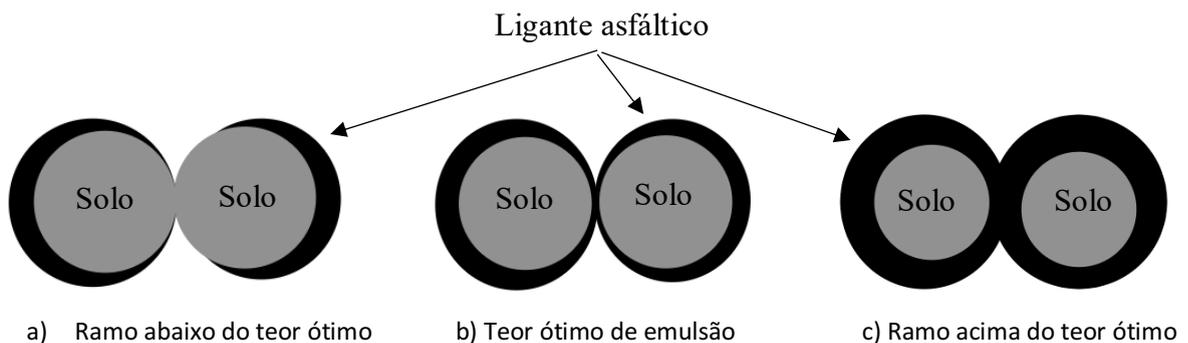
A tendência em deformar-se continuamente sem praticamente nenhum incremento de tensão pode ser atribuído à menor interação entre os grãos do solo devido à maior camada de asfalto residual formada. Dessa forma, após alcançado o patamar de plastificação, a mistura não consegue mais aumentar o valor do carregamento a ela imposta, conforme também observado por Brito (2020) e Brito *et al.* (2022).

Esse comportamento elástico perfeitamente plástico observado é mais expressivo nas misturas com maior teor de emulsão tendo em vista que, para os teores de 16% e 22%, observou-se uma pequena inclinação na trajetória após alcançado este patamar de tensão. Já nas misturas com 28% de teor de emulsão esse patamar de tensão permaneceu praticamente inalterado até o final do ensaio. Constata-se ainda que nas misturas com 16% e 22% de emulsão,

até 2% a 3% de deformação axial, o mecanismo de resistência é dado pelo intertravamento dos grãos envolvidos com asfalto residual, promovendo inclusive uma deformação deste filme betuminoso.

Aparentemente em elevados níveis de deformações há um deslocamento do filme em relação as partículas de solo, favorecendo algum contato grão – grão, que promove um leve acréscimo nas tensões confinantes. Esse comportamento é mais expressivo nas misturas com teores de 16% de emulsão, pois o filme asfáltico residual tem uma menor espessura conforme representado esquematicamente pela Figura 3.9. Comportamento semelhante a este é encontrado por Pereira (2018) e Dantas Neto, Pereira e Abreu (2020) que realizaram ensaios de cisalhamento direto em misturas solo – emulsão asfáltico nos seus teores ótimos de compactação e em tensões confinantes de 50 kPa até 400 kPa.

Figura 3.9 – Representação do filme asfáltico ao redor de um grão de solo



Fonte: Elaborado pelo autor.

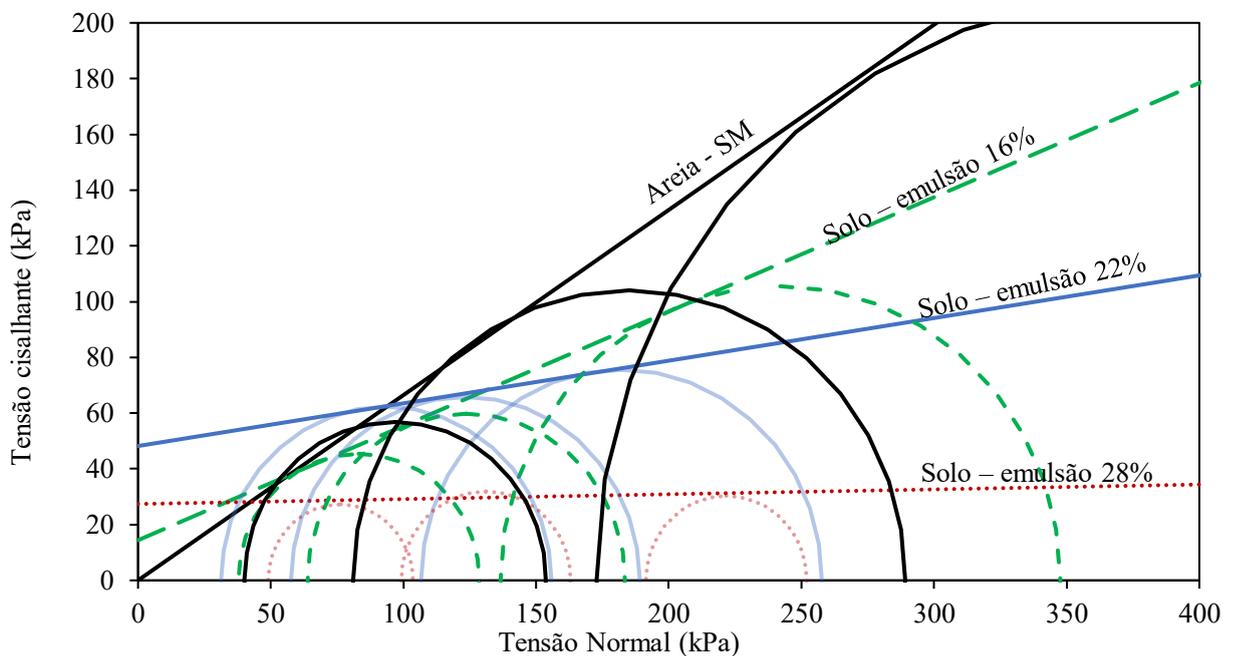
A Figura 3.10 apresenta os resultados das envoltórias de tensão calculadas para o solo compactado e para as misturas com os 3 teores de emulsão estudados. A Tabela 3.3 apresenta os parâmetros de resistência, ângulo de atrito e intercepto coesivo, para cada uma das amostras analisadas. O modelo constitutivo escolhido para representar a resistência ao cisalhamento da mistura foi o de Mohr-Coulomb, em função de sua já bastante conhecida aplicação para os solos de uma maneira geral. Entretanto, é importante ressaltar a possibilidade deste não ser o modelo mais adequado para o material estudado, uma vez que este possui características viscosas e assim aspectos como velocidade de ensaio e tempo de carregamento podem influenciar de forma significativa nos parâmetros de resistência analisados. Martins (1992) observou essa influência da velocidade de ensaio nos parâmetros de resistência ao estudar o cisalhamento de argilas saturadas.

Tabela 3.3 – Parâmetros de resistência

Misturas solo-emulsão	Parâmetros efetivos		Parâmetros totais	
	Coesão' (kPa)	Ang. atrito' (°)	Coesão (kPa)	Ang. atrito (°)
Solo - SM	0,00	33,60	0,00	30,90
Solo-emulsão M24 16%	14,40	22,30	16,60	16,90
Solo-emulsão M24 22%	48,20	8,70	52,80	4,70
Solo-emulsão M24 28%	27,40	1,00	27,50	0,90

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 3.10 – Envoltórias de ruptura - Parâmetros efetivos



Fonte: Elaborado pelo autor.

O solo SM tem sua parcela de resistência conferida só pelo ângulo de atrito e por isso à medida que se aumentam os valores de tensões confinante, maiores são as tensões necessárias para ruptura. Esse ganho de resistência pode ser explicado pelo favorecimento do contato entre os grãos com o aumento da tensão confinante.

Enquanto isso, ao analisar as envoltórias de ruptura, sob condições saturadas, das misturas de 16% e 22%, observou-se uma consonância com os resultados já obtidos por outros autores em pesquisas semelhantes (BRITO *et al.*, 2022; DANTAS NETO; PEREIRA; ABREU, 2020; MAHTO *et al.*, 2019; S.ANDAVAN; B. MANEESHKUMAR, 2020) pois, à medida que se aumentou a quantidade de asfalto na mistura, houve um ganho expressivo no valor do intercepto coesivo e uma redução no ângulo de atrito interno em relação ao solo compactado. Essa variação nos parâmetros de resistência é atribuída à formação do filme de asfalto residual a ao conseqüente preenchimento dos espaços vazios, entre os grãos de solo, pelo ligante

betuminoso. Essa película asfáltica funciona como uma superfície de colagem entre os grãos do solo, promovendo o aumento do seu intercepto coesivo justificado pelo efeito de confinamento. O filme asfáltico fez com que o contato entre grãos fosse diminuído, mesmo em maiores níveis de tensões confinantes, prejudicando o intertravamento destes, justificando a redução do ângulo de atrito interno.

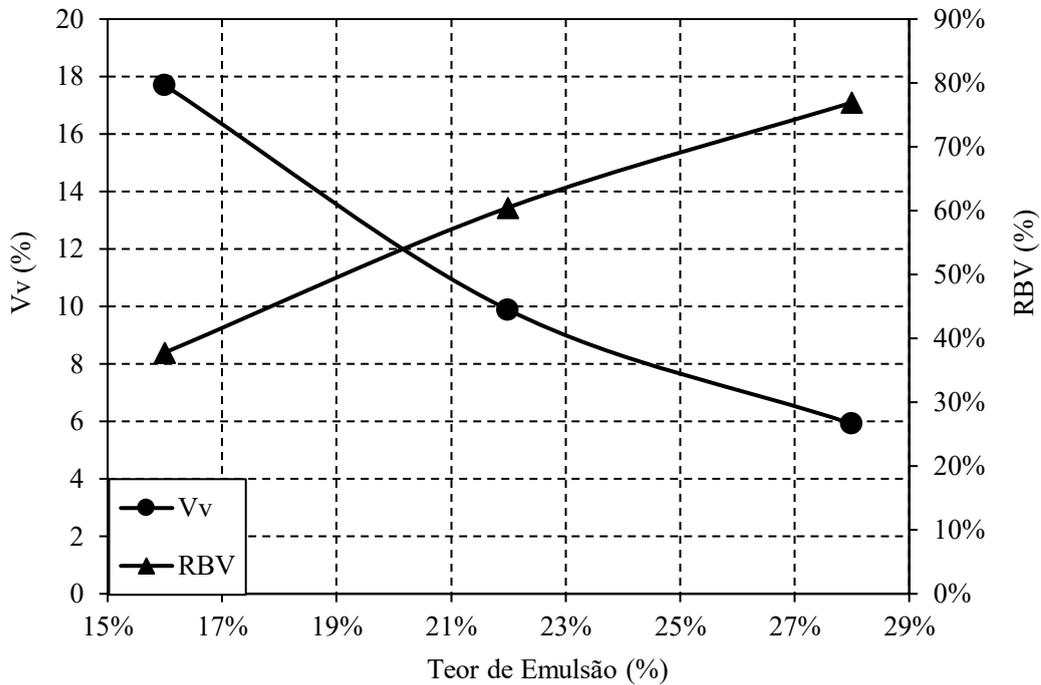
De acordo com os resultados das trajetórias de tensão e envoltória de ruptura das misturas com 28% de emulsão asfáltica, constatou-se uma redução no ângulo de atrito para um valor próximo de zero, em linha com o que foi observado nos teores de 16% e 22%. Entretanto, ao avaliar o intercepto coesivo, identificou-se uma diminuição em seu valor, quando comparado com o valor da mistura com 22% de emulsão asfáltica.

Uma das justificativas para essa redução da coesão se deve ao fato de que, conforme expresso na curva de compactação dessas misturas, a adição de ligante após o teor de 22% de emulsão não está mais preenchendo um espaço entre um grão de solo e outro, desse teor em diante está sendo criado um volume de emulsão em excesso, prejudicando essa superfície de colagem. À medida que se aumenta a espessura do filme asfáltico residual, o efeito de confinamento anteriormente citado vai diminuindo e a película começa a se deformar de maneira semelhante a um fluido. Assim, para o teor de 28%, a ruptura não mais ocorre entre o contato grão – grão ou grão-asfalto e passa a ocorrer dentro do próprio volume de asfalto residual.

Esse afastamento das partículas de solo pelo excesso de ligante asfáltico faz com que não haja mais uma estrutura sólida dos agregados minerais bem definida, de modo que as leis de mecânica dos solos passam a não ter mais validade para as misturas com 28% de emulsão. Isso também justifica o comportamento anômalo do material identificado durante seu adensamento. A Figura 3.11 mostra como o volume de vazios da mistura (V_v) e a relação de betume vazios (RBV) variam para os diferentes teores de emulsão.

Observa-se que nas misturas com teor de 28% o volume de vazios reduz drasticamente quando comparado com as de 16% de teor de emulsão. Além disso, mais de 70% dos vazios do agregado mineral estão sendo preenchidos por betume. Isso reforça a hipótese de que neste teor de 28% o excesso do volume de emulsão acaba por afastar as partículas de agregado mineral, tornando o seu contato menos eficiente.

Figura 3.11 – Variação do Vv e RBV nos diferentes teores de emulsão da mistura



Fonte: elaborada pelo autor.

Além da possibilidade de afastamento dos grãos pelo excesso de ligante, outra justificativa para a diminuição da coesão das misturas com teor de 28% pode ser dada em função da perda da estrutura interna do corpo de prova, antes do início do procedimento de ruptura, tendo em vista que estes chegaram a precisar de 24 dias para garantir a completa dissipação do excesso de poropressão, conforme apresentado na Figura 3.5. Esse tempo excessivo para a equalização das poropressões, onde o corpo de prova fica submetido a elevadas tensões confinantes efetivas, pode ter produzido deformações plásticas ou viscosas, caracterizando o fenômeno de fluência. Quando o material asfáltico é submetido a níveis de tensão por um longo prazo, este pode se deformar continuamente e resultar em falhas estruturais internas ao material o que é conhecido como ruptura por fluência (DAI *et al.*, 2021).

A ruptura por fluência ocorre em virtude da interação de diversos eventos, como a ruptura de ligações internas do material, deformações de natureza viscoelásticas e o escoamento por cisalhamento (FARINA, 2009). Isso acaba por acarretar, no material, o crescimento de trincas e posteriormente sua ruptura final, o que justificaria a perda de coesão nas misturas com teor de 28% de emulsão asfáltica em massa.

3.4 Conclusões

A partir da análise dos resultados apresentados neste trabalho, é possível chegar às seguintes conclusões:

- Durante o adensamento, as misturas com 16% e 22% apresentaram um comportamento semelhante ao do solo, de modo que o tempo de dissipação do excesso de poropressão coincidiu com a variação volumétrica do corpo de prova. Nas misturas com 28% tal semelhança não foi observada, em virtude da perda de estrutura interna e pela possível ruptura por fluência do corpo de prova quando submetido aos esforços das tensões confinantes;
- O solo SM compactado com energia Proctor Normal apresentou comportamento típico de um material elastoplástico com endurecimento. Em todas as misturas solo – emulsão observou-se um comportamento semelhante ao de um material elástico perfeitamente plástico, caracterizando um regime de fluxo;
- Após um determinado nível de deformação axial as misturas com 16% e 22% tenderam a ter um leve ganho de resistência, justificado pelo provável deslocamento da película de asfalto e consequente maior contato entre os grãos minerais. Nas misturas com 28% esse fenômeno não foi observado pela maior espessura do filme asfáltico;
- Enquanto adiciona-se emulsão no ramo abaixo do teor ótimo de compactação das misturas, consegue-se um efeito de colagem entre grãos, favorecendo a adesividade entre eles. Teores acima do ótimo tendem a reduzir o valor de coesão dos corpos de prova, em função do excesso de ligante na mistura, afastando os grãos uns dos outros;
- À medida em que o teor de emulsão foi aumentado, menores foram os ângulos de atrito, e, para as misturas com 16% e 22%, maiores foram os valores de coesão. Com 28% de emulsão, a mistura teve uma redução em seu intercepto coesivo, devido ao excesso de ligante;
- Os melhores resultados, quanto à resistência mecânica ao cisalhamento, de solos estabilizados pela adição de emulsão asfáltica são obtidos para misturas no ramo abaixo do teor ótimo da curva de compactação.

Os resultados obtidos nesse estudo reforçam a técnica de estabilização de solos com emulsão asfáltica como uma alternativa viável para obras de geotecnia que demandem materiais com uma boa coesão e baixos coeficientes de permeabilidade.

4 MODELAGEM VISCOELÁSTICA LINEAR A PARTIR DE ENSAIOS DE MÓDULO COMPLEXO E DE FLUÊNCIA EM UM SOLO-EMULSÃO

4.1 Introdução

A estabilização de solos com emulsão asfáltica é um tema já conhecido e estudado há bastante tempo (NASSAR *et al.*, 2016; S.ANDAVAN; B. MANEESHKUMAR, 2020). Entretanto, nos últimos anos, sua aplicação como núcleo de barragens de terra tem sido estudada devido às suas propriedades coesivas e impermeabilizantes que advém do ligante asfáltico (DANTAS NETO *et al.*, 2020; BRITO *et al.*, 2022). Tais estudos evidenciam que, diferentemente da estabilização de solos para pavimentação (B. D. OLUYEMI-AYIBIOWU, 2019; FERNANDES *et al.*, 2022), os resultados da utilização de solo-emulsão em núcleos impermeáveis se mostraram mais promissores com teores de emulsão acima de 16% em massa (PEREIRA, 2018; DANTAS NETO *et al.*, 2020). Uma possível preocupação na utilização deste material é o fato de que ele pode acumular deformações ao longo do tempo sob carregamento contínuo, fenômeno conhecido como fluência (WASFI AL-MISTAREHI; KHADAYWI; KHALED HUSSEIN, 2021).

Para as misturas asfálticas convencionais (constituídas frequentemente de agregados minerais britados de diversos tamanhos e de ligante asfáltico em teor aproximado de 5% em massa), sabe-se que seu comportamento mecânico depende de fatores como propriedades do ligante, taxa e intensidade de aplicação das solicitações mecânicas, temperatura, tempo e histórico de carregamento (OLARD & DI BENEDETTO, 2003; NUR *et al.*, 2013A; NGUYEN *et al.*, 2015). Apesar da ausência de agregados graúdos, o comportamento de um solo-emulsão tende a herdar, assim como as misturas asfálticas, as propriedades viscoelásticas do ligante asfáltico (DI BENEDETTO *et al.*, 2004a; LI *et al.*, 2018; POUGET *et al.*, 2012), uma vez que tal fenômeno também é observado em mástiques e argamassas asfálticas (DI BENEDETTO, SAUZÉAT, *et al.*, 2004; BABADOPULOS *et al.*, 2019). Estudos de caracterização e modelagem viscoelástica de misturas solo-emulsão ainda são escassos, e é importante entender seu comportamento em diferentes intervalos de tempo para aplicações como em barragens, que são projetadas para longos períodos de carregamento contínuo.

O comportamento mecânico de materiais viscoelásticos lineares pode ser investigado com ensaios de duas diferentes naturezas: (i) ensaios no domínio do tempo e (ii) ensaios no domínio da frequência (FERRY, 1980). No (i) domínio do tempo, a aplicação de carga é constante e a avaliação da deformação crescente leva à determinação da função fluência.

Por outro lado, a aplicação de deformação constante e a avaliação da tensão decrescente leva à determinação do módulo de relaxação. No (ii) domínio da frequência, o módulo complexo (constituído de uma magnitude e de um ângulo de fase) é a propriedade mais investigada. A magnitude do módulo complexo muitas vezes é conhecida como “módulo dinâmico”, apesar de não haver qualquer efeito inercial nessa propriedade, e que não deve ser confundida com o módulo de rigidez obtido em ensaios de propagação de ondas (HUANG; DI BENEDETTO, 2015). Há métodos de interconversão entre essas propriedades viscoelásticas lineares para um dado material (PARK; SCHAPERLY, 1999; SCHAPERLY; PARK, 1999; TIOUJANI *et al.*, 2011).

O modelo mecânico 2S2P1D (*two springs, two parabolic dashpots, one dashpot*) (OLARD; DI BENEDETTO, 2003), desenvolvido a partir de um aprimoramento do modelo de Huet-Sayegh (SAYEGH, 1965), possui o diferencial de representar de forma satisfatória o comportamento reológico tanto de ligantes como de misturas asfálticas, em quaisquer faixas de frequência e temperatura (DI BENEDETTO *et al.*, 2004b; MOUNIER; DI BENEDETTO; SAUZÉAT, 2012; NUR *et al.*, 2013a; OLARD; DI BENEDETTO, 2003). Esse modelo já teve sua aplicabilidade testada para diversos tipos de ligantes, mástiques, argamassas e misturas asfálticas convencionais (OLARD & DI BENEDETTO, 2003; NUR *et al.*, 2013A; BABADOPULOS *et al.*, 2019;). Entretanto, até o presente momento, não se encontra na literatura a caracterização viscoelástica de misturas solo-emulsão. Tampouco se sabe se há uma efetiva capacidade de representar o comportamento desse material com modelos viscoelásticos lineares. Não há ainda esse tipo de estudo, nem a validação para solos-emulsão. Além disso, a validação desse tipo de modelo pode ser um desafio, especialmente considerando que em ensaios no domínio da fluência há dificuldade em se garantir condições de linearidade. Ademais, materiais granulares apresentam comportamentos não lineares que precisarão ser considerados (GOMES CORREIA *et al.*, 2001; RUIZ *et al.*, 2022; SANTOS, 1999).

Assim, este trabalho tem o objetivo de propor um modelo viscoelástico linear para um solo-emulsão constituído de areia siltosa misturada com 16% de emulsão asfáltica, em massa, investigando resultados experimentais nos domínios do tempo e da frequência. A resposta a solicitações de uma mistura de uma areia siltosa com 16% de emulsão asfáltica em emulsão é examinada em uma vasta amplitude de temperaturas (-10,0 a 54,4°C) e frequências (0,1 a 25Hz), a fim de caracterizar o material analisado no domínio linear, restrito a pequenas tensões e deformações, adotando-se o critério de limitar as deformações senoidais a uma amplitude pico-a-pico de 68µm/m (CARPENTER *et al.*, 2003). A modelagem é feita a partir do modelo 2S2P1D, bem como uma validação é buscada com a predição de comportamento de deformações para um ensaio de fluência não utilizado no ajuste do modelo original.

4.2 Materiais e métodos

4.2.1 Amostra de solo

Para este trabalho, foram coletas duas amostras de solo no sítio de coordenadas UTM 3°45'7,5"S e 38°34'21,9W.. O solo em questão foi identificado como uma areia siltosa (SM), segundo os critérios do Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS). A Tabela 4.1 apresenta um resumo dos valores médios dos parâmetros geotécnicos obtidos para as duas amostras, assim como as normas usadas na caracterização.

Tabela 4.1 – Resumo dos parâmetros geotécnicos do solo coletado

Parâmetros geotécnicos do solo		
NBR 7182/2016	Massa específica aparente seca máxima (g/cm ³) - PN	1,87
NBR 7182/2016	Umidade ótima (%)	9,74
NBR 6459/2016	Limite de liquidez (%)	NL*
NBR 7180/2016	Limite de plasticidade (%)	NP*
DNER – ME 093/94	Densidade real do solo	2,64
NBR 7181/2016	Análise granulométrica	-

*O solo não apresentou liquidez nem plasticidade (não líquido, NL, não plástico, NP)

Fonte: elaborada pelo autor.

4.2.2 Emulsão asfáltica

A emulsão asfáltica escolhida nesta pesquisa foi uma emulsão de ruptura lenta do tipo catiônica (RL-1C). Foi utilizada uma emulsão de ruptura lenta, que, nominalmente, leva até 4 horas para completar o processo de ruptura, a fim de que houvesse tempo hábil para a completa realização da mistura com o solo.

Os ensaios para a caracterização da emulsão asfáltica foram realizados pelo fabricante, tendo seguido os procedimentos previstos nas normas: NBR14950 (2003), NBR 14393 (2012), NBR 14376 (2019). A Tabela 4.2 apresenta um resumo dos resultados obtidos em cada um dos referidos ensaios.

Tabela 4.2 – Resumo dos parâmetros da emulsão asfáltica RL-1C utilizada

Ensaio realizado	Especificações - IBP/ABNT	Resultados
Viscosidade “Saybolt-FuroI”, sSF, a 50°C	Máx. 70	44
Peneiramento, 0,84 mm, % em massa	Máx. 0,10	0,01
Resíduo, % em massa	Mín. 60	63,2

Fonte: elaborada pelo autor.

4.2.3 Determinação dos teores de emulsão asfáltica

O teor de 16% de emulsão asfáltica em massa foi escolhido a fim de que se obtivessem corpos de prova (CPs) de solo-emulsão com ganhos expressivos de coesão e impermeabilidade (PEREIRA, 2018; BRITO, 2020; BRITO *et al.*, 2022). Ao mesmo tempo, buscou-se um teor de emulsão que possibilitasse a moldagem CPs com rigidez suficiente para permitir a aplicação de níveis de carregamento respeitando os limites da resolução da prensa hidráulica utilizada, UTM-25 (*Universal Testing Machine*), na caracterização do material.

4.2.4 Mistura entre o solo e a emulsão asfáltica

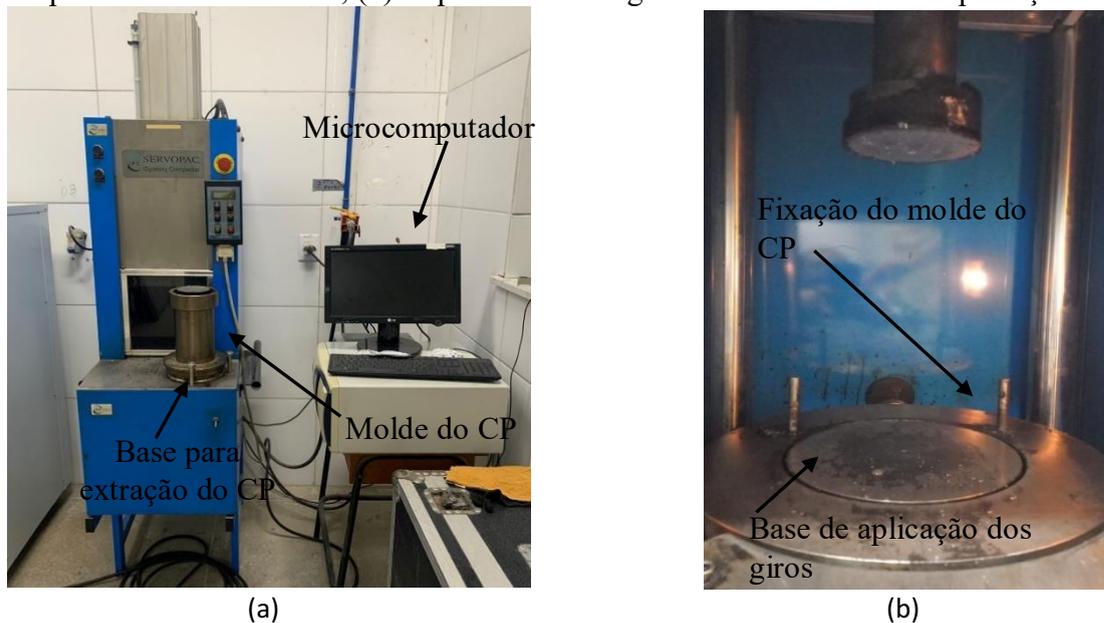
O procedimento para a mistura dos materiais foi o mesmo utilizado nos estudos de Pereira (2018) e Brito (2020) e obedeceu às seguintes etapas:

- (i) Destorroamento do solo - procedeu-se com uso de almofariz e mão de gral, até que não tivessem mais torrões de solo;
- (ii) Utilização de um repartidor de amostras até que o material fosse reduzido de forma representativa;
- (iii) Secagem em estufa à 100° C por 24 horas - utilizou-se estufa não-aerada e sem ventilação;
- (iv) Resfriamento do solo à temperatura ambiente de cerca de 25° C - executado em laboratório em local com umidade aproximada de 70% (média da cidade de Fortaleza, Brasil);
- (v) Pesagem e mistura do solo com a emulsão asfáltica -por aproximadamente 5 minutos, de forma manual, utilizando-se de espátula e recipiente metálico, com mistura contínua;
- (vi) Exposição do material misturado ao ar livre por 24 horas (aeração) em camada de cerca de 10 cm de espessura e sem compactação;
- (vii) Compactação: utilizando compactador giratório com ângulo de rotação de 1,16° velocidade de giro constante de 30 rotações por minuto e pressão de compactação de 600 kPa.

4.2.5 Confeção dos corpos de prova

A moldagem dos CPs foi realizada em compactador giratório Superpave, Figura 4.1, produzindo corpos de prova com 100 mm de diâmetro e 150 mm de altura. O procedimento de compactação seguiu a norma norte americana AASHTO T 312-15 (2019), adotada para diversos tipos de misturas asfálticas.

Figura 4.1 – (a) Compactador giratório Superpave utilizado para a compactação dos corpos de prova de solo-emulsão; (b) esquema do carregamento utilizado na compactação



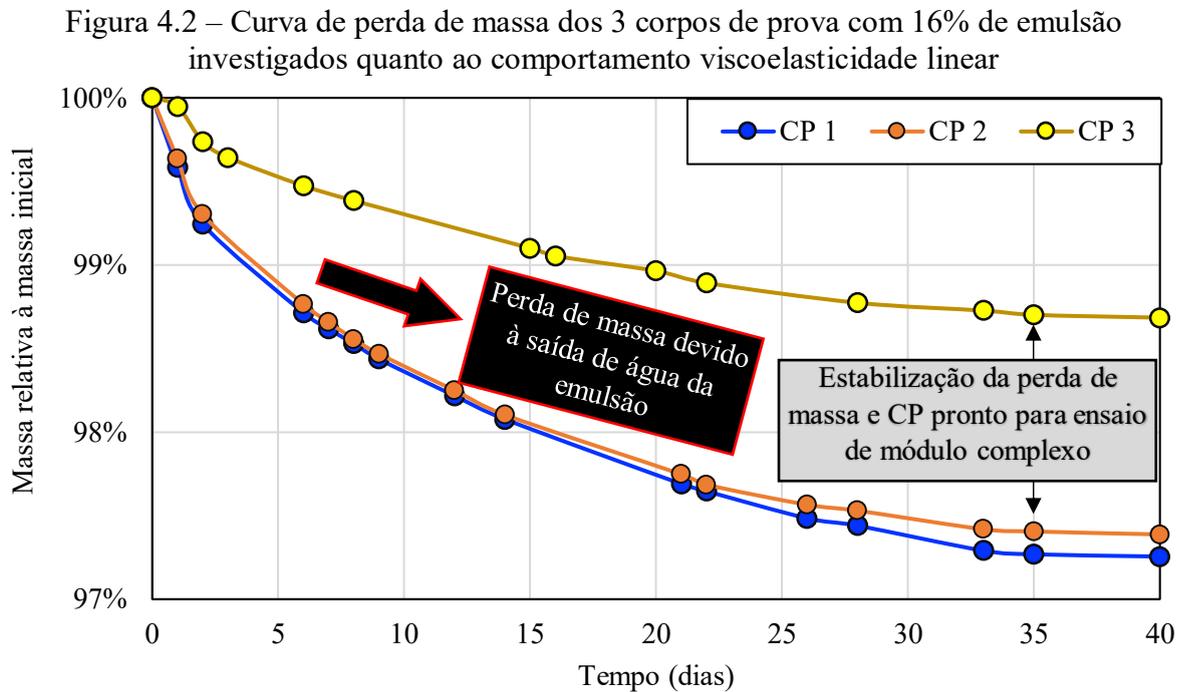
Fonte: elaborada pelo autor.

O método de compactação Superpave foi escolhida em detrimento das metodologias Marshall e Proctor, uma vez que o ensaio de obtenção do módulo dinâmico (AASHTO 342, 2019), requer uma relação de altura/diâmetro (H/D) do corpo de prova de 1,5, a fim de minimizar o efeito de borda, e nas metodologias Proctor e Marshall essa relação não seria atendida. Além disso, investigações em misturas com ligantes betuminosos demonstraram que esse tipo de compactação por amassamento produz materiais mais semelhantes aos obtidos com compactação em campo (CHEN *et al.*, 2012).

A norma AASHTO T 342 (2019) prevê que os corpos de prova sejam moldados no compactador giratório com 100 mm de diâmetro e 170mm de altura e que sejam serrados posteriormente. Entretanto, em virtude da dificuldade de manuseio da serra para realizar esses cortes, em corpos de prova de solo-emulsão, que apresentam uma menor rigidez inicial em temperatura ambiente, quando comparado a um corpo de prova de concreto asfáltico, este procedimento não foi realizado. Além disso, o procedimento é feito de forma a regularizar as superfícies de contato do material, que já são bastante regulares nos corpos de prova de solo-emulsão devido ao pequeno tamanho dos grãos.

Após a moldagem, os corpos de prova foram expostos ao ar livre, para que a água de diluição da emulsão fosse evaporada. Para garantir a completude do processo de ruptura, os corpos de prova expostos ao ar livre foram pesados diariamente e assim permaneceram até que fosse verificada uma variação máxima de 0,3g nos valores de suas massas por pelo menos dois

dias consecutivos. A Figura 4.2 apresenta uma curva de perda de massa média, ao longo do tempo, para os CPs utilizados na investigação de viscoelasticidade linear.

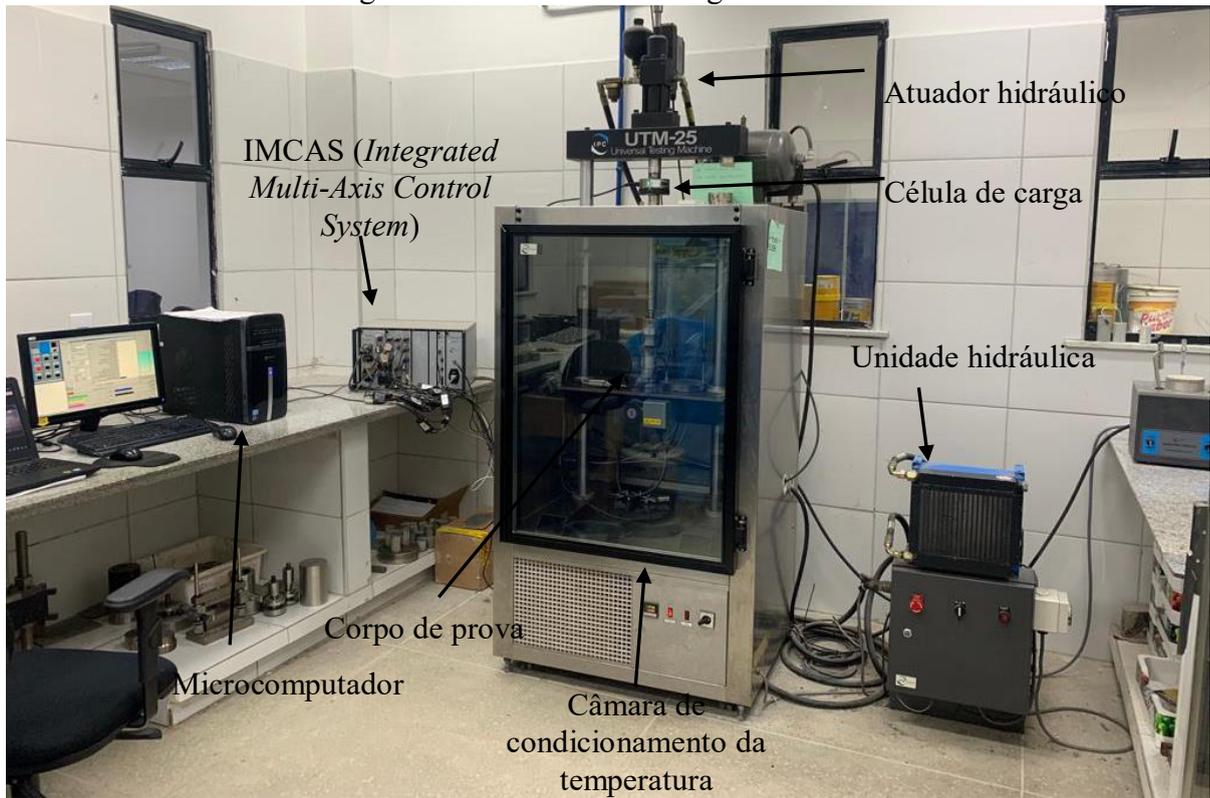


Fonte: elaborada pelo autor.

4.2.6 Caracterização do módulo complexo

O ensaio de módulo dinâmico foi realizado segundo a norma AASHTO T 342 (2019). Foram ensaiados três CPs, em diferentes frequências e temperaturas, tomando-se o valor do módulo dinâmico do material como a média dos 5 ciclos finais. Em seguida, para cada condição de ensaio, o módulo dinâmico do material foi determinado pela média desses três valores. O equipamento utilizado para este ensaio foi a prensa UTM-25 (Figura 4.3), programada para executar carregamentos senoidais nas temperaturas e frequências pré-determinadas, conforme AASHTO T 342 (2019). Trata-se de uma prensa hidráulica servo-controlada dotada de uma câmara térmica com controle da temperatura e tem seus resultados registrados por meio de um sistema de aquisição de dados e de um computador. Em seguida os dados podem ser processados para obtenção dos valores do módulo complexo e do ângulo de fase. Tal processamento é melhor detalhado a seguir.

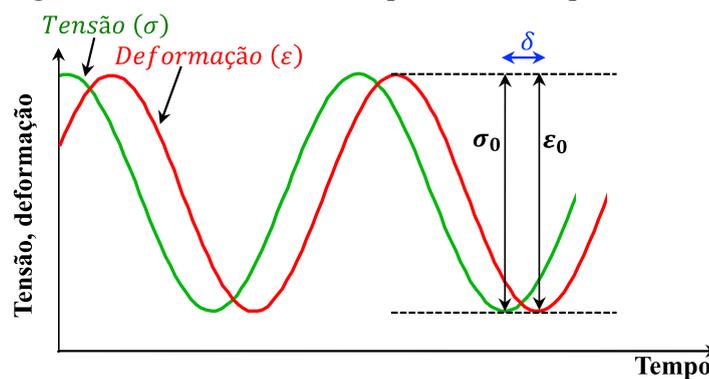
Figura 4.3 – Universal Testing Machine 25



Fonte: elaborada pelo autor.

Durante o ensaio de módulo complexo é aplicado sobre o corpo de prova um carregamento uniaxial de compressão senoidal harmônico, sendo registrado o resultado de deformação, que também possui um formato senoidal em regime permanente, conforme apresentado na Figura 4.4. Diferentemente de materiais elásticos, para materiais viscoelásticos, os picos de tensão e deformação não coincidem no mesmo instante de tempo e essa defasagem é associada ao ângulo de fase (δ), conforme ocorre para misturas asfálticas (PAPAZIAN, 1962; HUET, 1963).

Figura 4.4 – Carregamento harmônico de compressão e comportamento em deformação



Fonte: elaborada pelo autor.

Esse processo de aplicação de carga senoidal é repetido e registrado para as diferentes temperaturas e frequências em que se busca a caracterização experimental. A relação entre tensão em notação complexa (σ^*) e deformação em notação complexa (ε^*) de um material sob um carregamento harmônico é definido como módulo complexo E^* (Equação 4.1). Tal propriedade contém tanto a informação de relação entre as amplitudes de tensão e deformação, que define o valor absoluto deste parâmetro, que é a propriedade comumente referida como “módulo dinâmico” $|E^*|$ (Equação 5.2) (PAPAZIAN, 1962), apesar da inexistência de efeitos inerciais.

$$E^* = \frac{\sigma^*}{\varepsilon^*} = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \cos \delta + i \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \sin \delta \quad (\text{Eq. 4.1})$$

$$|E^*| = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \quad (\text{Eq. 4.2})$$

Onde: σ_0 é a amplitude da tensão de carregamento;
 ε_0 é a amplitude da resposta de deformação;
 δ é o ângulo de fase.

Para uma diversidade de materiais viscoelásticos, nota-se, em representações contendo tanto a informação de módulo quanto de fase (como curvas em Espaço de Black – módulo dinâmico em escala logarítmica vs. ângulo de fase – ou de Cole-Cole – parte imaginária do módulo complexo vs. parte real do módulo complexo), uma superposição de pontos experimentais obtidos em diferentes pares frequência-temperatura. Isso significa que há uma equivalência entre efeitos de variação de frequência (ou do tempo de aplicação do carregamento) e efeitos de variação de temperatura (neste caso, os materiais com essa característica são chamados de termorreologicamente simples). Sendo assim, após a obtenção dos módulos dinâmicos para diferentes temperaturas e frequências, em respeito ao princípio da superposição tempo-temperatura, estes poderão ser convertidos em uma única curva plotada em função de uma frequência equivalente, também conhecida como frequência reduzida (f_T), que é obtida por meio da Equação 4.3. A curva resultante é conhecida como curva mestra. Cada ponto experimental possuirá um fator de translação horizontal (α_T), que é função da temperatura, e quando a frequência de ensaio é dividida por este fator passa a ser chamada frequência reduzida (Equação 4.3).

$$f_r = f * \alpha_T \quad (\text{Eq. 4.3})$$

Onde: α_T é o fator de translação;
 f é a frequência de obtenção dos dados;
 f_r é a frequência reduzida.

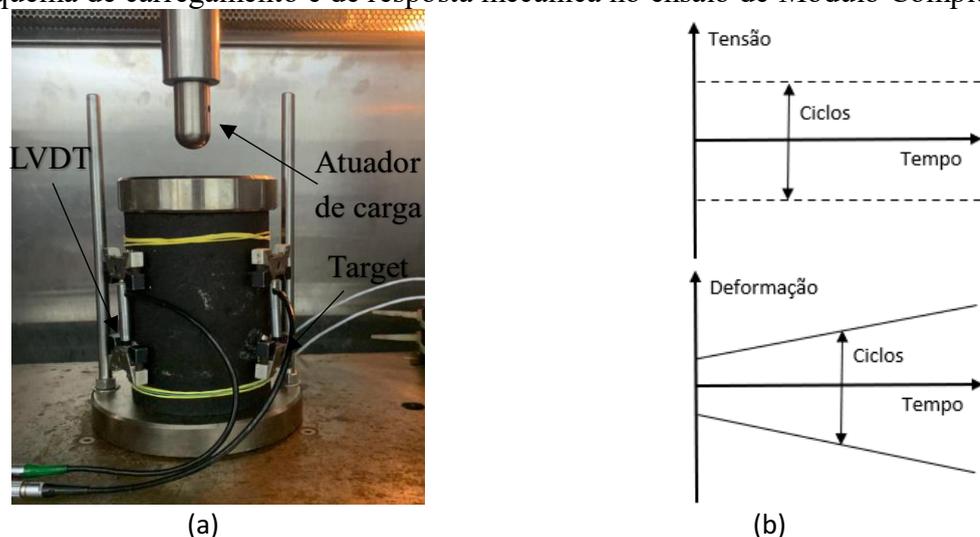
A determinação dos fatores de translação foi feita a partir da equação de Williams-Landel-Ferry (WLF) (WILLIAMS; LANDEL; FERRY, 1955) cf. Equação 4.4. Os coeficientes C_1 e C_2 são otimizados de modo que os pontos experimentais e os pontos modelados possuam o menor erro possível.

$$\log(\alpha_T) = \frac{-C_1(T - T_r)}{C_2 + T - T_r} \quad (\text{Eq. 4.4})$$

Onde: α_T é o fator de translação (também conhecido como *shift factor*);
 C_1 e C_2 são os coeficientes da Lei WLF;
 T é a temperatura de obtenção dos dados;
 T_r é a temperatura de referência para a construção da curva mestra.

As deformações dos corpos de prova cilíndricos são determinadas a partir da média dos valores captados por 3 dispositivos do tipo *Linear Variable Differential Transformers* – LVDT (Figura 4.5), posicionados de forma equidistante a cada 120° nos corpos de prova. O posicionamento é feito com targets (pequenos elementos hexagonais metálicos colados ao CP com adesivo epóxi), acoplados em seguida aos dispositivos em que se encaixam os LVDTs. A distância entre os pontos de colagem, utilizada para calcular as deformações, é de 75mm.

Figura 4.5 – (a) LVDTs posicionados no corpo de prova para o ensaio de Módulo Complexo;
 (b) esquema de carregamento e de resposta mecânica no ensaio de Módulo Complexo



Fonte: elaborada pelo autor.

As frequências, temperaturas e tempos mínimos de condicionamento dos corpos de prova, expostos na Tabela 4.3, foram os recomendados pela AASHTO T 342 (2019). Os níveis de tensões adotados no ensaio foram escolhidos de modo que os corpos de prova não tivessem deformações excessivas e saíssem do domínio linear da viscoelasticidade considerado tipicamente para materiais asfálticos (MANGIAFICO *et al.*, 2018). Assim, para garantir essa condição, buscou-se não aplicar amplitudes de deformações maiores que $67,5\mu\text{m/m}$ nos corpos de prova. Como o controle do ensaio é feito em carga, os limites escolhidos devem ser em tensão, e determinados por tentativa-e-erro com poucos ciclos de carregamento, em um procedimento comumente denominado de *fingerprint* (AASHTO T342, 2019). A Tabela 4.4 apresenta os níveis de tensão máximos aplicados nos ensaios para todos os 3 corpos de prova. Sublinha-se que uma tensão de contato equivalente a 5% da tensão máxima foi aplicada como tensão mínima durante o carregamento.

Tabela 4.3 – Especificações do ensaio de módulo dinâmico quanto a: a) Frequência e número de ciclos; b) Temperatura e tempo de condicionamento

Frequência (Hz)	Número de Ciclos	Temperatura (°C)	Tempo de condicionamento a partir da temperatura ambiente (25° C)
25	200	-10	Durante a noite
10	200	4,4	Durante a noite
5	100	21,1	1 hora
1	20	37,8	2 horas
0,5	15	54	3 horas
0,1	15		

(a)

(b)

Fonte: elaborada pelo autor.

Tabela 4.4 – Níveis de tensão do ensaio de Módulo Complexo

Níveis máximos de tensão aplicados no ensaio de Módulo Complexo							
Frequência (Hz)	25	25	10	5	1	0.5	0.1
Número de ciclos	200	200	200	100	20	15	15
Tensão máxima, T=-10°C (kPa)	620	620	540	510	450	420	380
Tensão máxima, T=4,4°C (kPa)	480	480	320	240	140	120	100
Tensão máxima, T=21,1°C (kPa)	210	210	145	105	58	49	28
Tensão máxima, T=37,8°C (kPa)	90	90	60	45	20	16	10
Tensão máxima, T=54,4°C (kPa)	50	50	40	30	10	8	8

Fonte: elaborada pelo autor.

4.2.7 Ensaio de fluência

O equipamento usado no ensaio de fluência foi o mesmo utilizado no ensaio de módulo dinâmico, a UTM-25 (Figura 4.3). As deformações deste ensaio foram medidas a partir de dois LVDTs fixados na extremidade superior do CP, conforme apresentado na Figura 4.6. Esse procedimento de medida de deslocamentos necessita ser diferente devido ao fato de que ao longo do tempo as deformações acumulam continuamente, de maneira que o uso dos LVDTs encaixados entre os targets não é possível.

Figura 4.6 – LVDTs posicionados no corpo de prova para o ensaio de Fluência



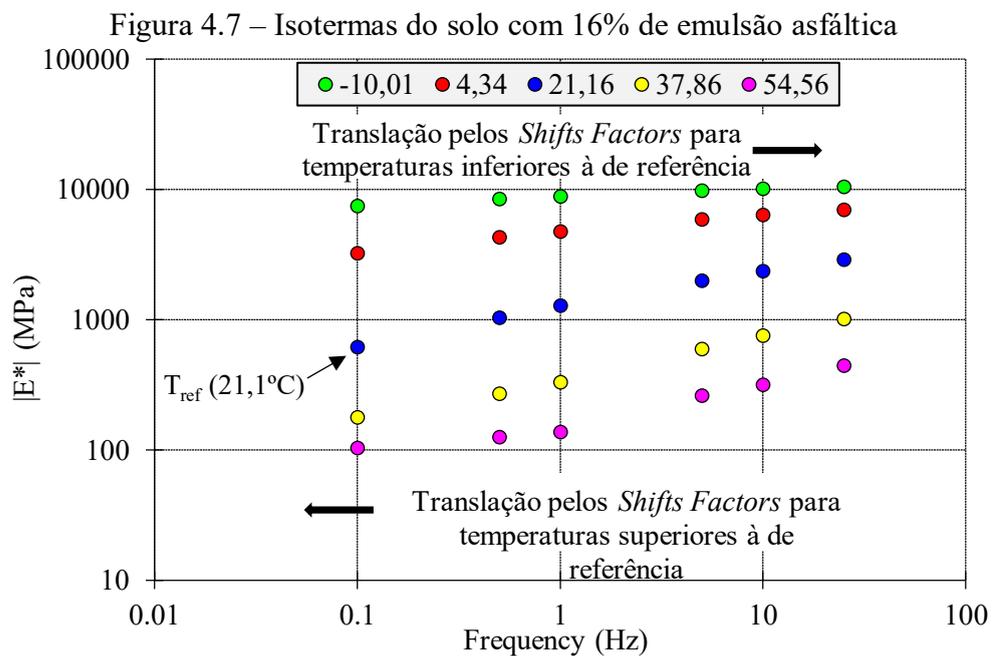
Fonte: elaborada pelo autor.

A temperatura de ensaio foi de 0°C , a fim de permitir a aplicação de níveis de força acima da faixa de resolução mínima do equipamento, que é de 0,35 kN, sem causar deformações excessivas no CP já no início do ensaio. Assim, o ensaio de fluência foi executado com dois níveis de tensão, para verificar se o modelo proposto é válido em diferentes carregamentos. No CP1 foi aplicado uma tensão da ordem de 343 kPa e nos CP2 e CP3 uma tensão da ordem de 150kPa. Os ensaios de fluência foram utilizados como meio de validação para o modelo viscoelástico linear proposto.

O tempo máximo de ensaio foi determinado em 7200 segundos, a fim de testar o nível de confiabilidade do modelo proposto no domínio linear, tendo em vista que este foi modelado no domínio da linearidade, e em tempos muitos elevados de ensaio este deixa de ser respeitado e a comparação entre os valores previstos no 2S2P1D idealizados tendem a ser cada vez menos representativos com a evolução das deformações. É esperado no ensaio de fluência que, após suficiente acúmulo de deformações, o comportamento desvie do linear.

4.3 Resultados e discussões

Os resultados experimentais de módulo dinâmico da mistura de solo com 16% de emulsão asfáltica estão expressos na Figura 4.7 pelas isotermas. Observa-se a dependência do módulo dinâmico com a temperatura, uma vez que o valor deste diminui drasticamente à medida que a temperatura se elevou, bem como a dependência que esta propriedade do material tem com a frequência de ensaio. O material investigado pode tanto apresentar rigidez em torno de 104MPa (-10°C e 0,1Hz), valor compatível com algumas argilas (SULTANOV *et al.*, 2019), quanto em torno de 7,49GPa (54,5°C e 25Hz), compatível com argamassas de cimento Portland (NUNES; BORGES; ZANOTTI, 2019). Essa observação ocorre de maneira similar para as demais frequências e temperaturas analisadas; e essa constatação reforça a necessidade de se investigar o comportamento viscoelástico linear mesmo em temperaturas não esperadas em campo, pois constituem uma parte do espectro de comportamento do material e, como será visto, interferem no modelo reológico a ser adotado.

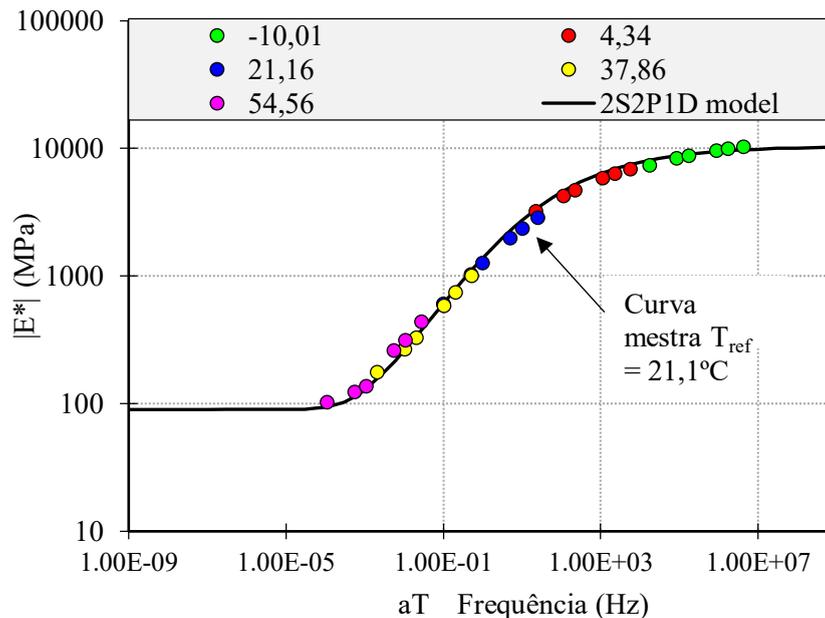


A Figura 4.8 apresenta a curva mestra do material construída a partir dos resultados experimentais e compara com uma curva obtida a partir do modelo proposto. O modelo viscoelástico escolhido para representar o comportamento deste material foi o 2S2P1D, pois além das vantagens em se utilizar um modelo de espectro contínuo apresentadas no capítulo de revisão bibliográfica, este modelo tem como vantagem a possibilidade de correlacionar os seus

parâmetros com propriedades físicas das misturas, além de permitir o ajuste do comportamento de diferentes escalas de misturas asfálticas (DI BENEDETTO *et al.* 2004).

A Tabela 4.5 apresenta os coeficientes do modelo 2S2P1D, obtidos a partir de um ajuste manual dos parâmetros, e os coeficientes de translação de acordo com a lei WLF (WILLIAMS; LANDEL; FERRY, 1955).

Figura 4.8 – Curva mestra do solo-emulsão com teor de 16%



Fonte: elaborada pelo autor.

Tabela 4.5 – Parâmetros do modelo 2S2P1D e da equação WLF

Parâmetros do modelo 2S2P1D								
E_{00} (Mpa)	E_0 (Mpa)	k	h	δ	τ_E (T_{ref})	β	C_1	C_2
90	10400	0,25	0,5	1,6	0,01	250	12,11	103,16

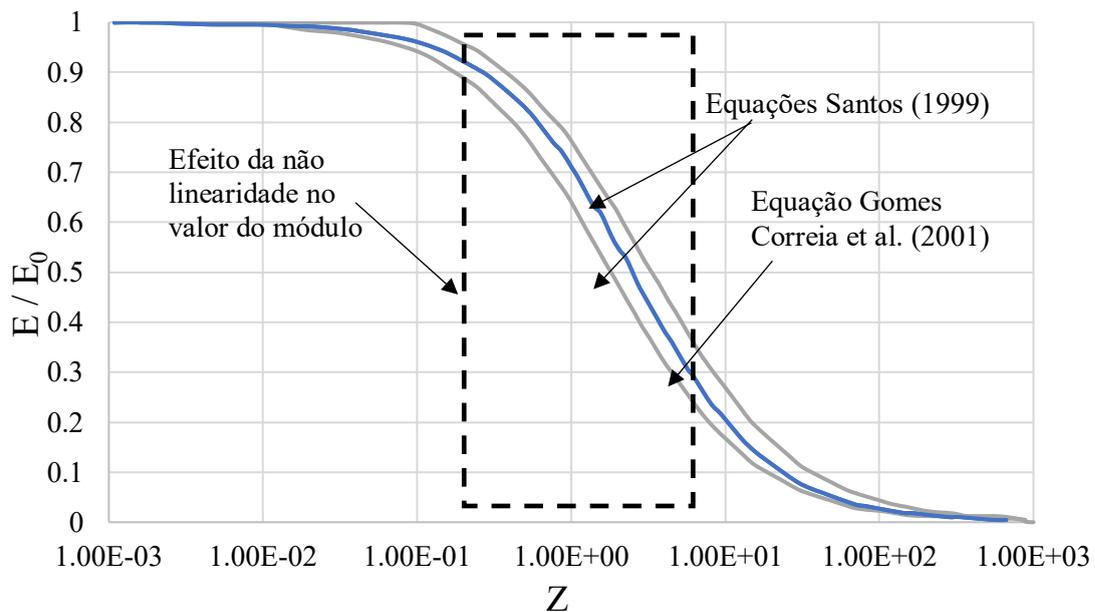
Fonte: elaborada pelo autor.

A boa aderência dos resultados experimentais com o modelo 2S2P1D quanto ao valor de $|E^*|$ indicam que tal modelo é capaz de representar de forma satisfatória o comportamento do solo-emulsão no domínio linear. Fora da região linear, à medida que as deformações evoluem, o módulo do material tende a passar por mudanças significativas em seu valor (SANTOS, 1999; GOMES CORREIA *et al.*, 2001). Em virtude dessa mudança de módulo dos solos fora do regime linear, Santos (1999) e Gomes Correia *et al.* (2001) determinaram equações para prever essa variação nas propriedades de deformabilidade a partir de resultados experimentais de uma grande variedade de solos incluindo argilas, areais, solos residuais, solos lateríticos e solos saprolíticos. Estas equações são definidas em função de um parâmetro chave

($\gamma_{0,7}$), definido como a deformação cisalhante para um fator de degradação da rigidez $G/G_0 = 0,7$, onde G_0 é o módulo cisalhante inicial para deformações muito pequenas ($\gamma \approx 10^{-6}$).

A partir dos resultados desses trabalhos, e considerando os solos como sendo materiais isotrópicos e com coeficiente de Poisson constante, elaborou-se a Figura 4.9 que apresenta intervalos de variação do módulo de elasticidade de solos à medida que os valores de deformação normalizada evoluem ($Z = \varepsilon/\varepsilon_{0,7}$).

Figura 4.9 – Degradação do módulo areias e argilas em função de Z



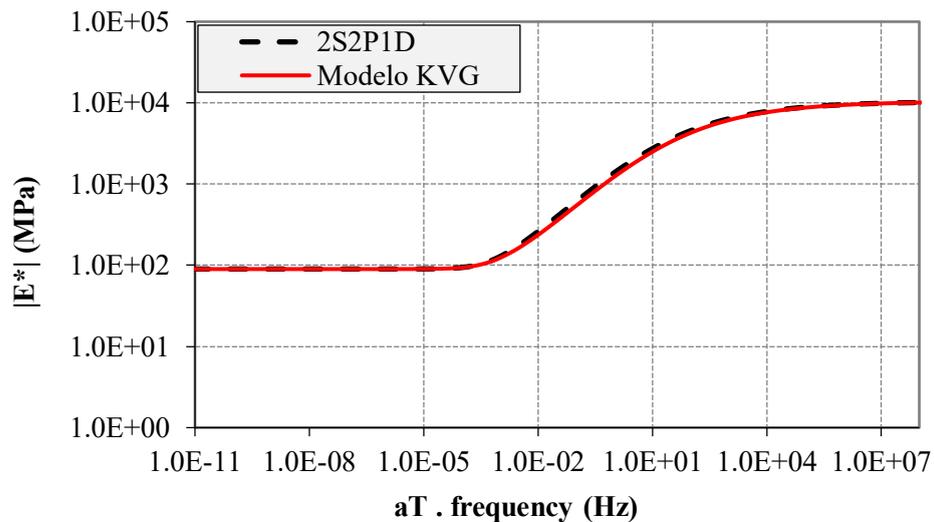
Fonte: elaborada pelo autor.

Sabendo que o módulo de deformabilidade dos solos é reduzido com a evolução das deformações, elaborou-se mais modelagens com diferentes parâmetros do modelo 2S2P1D que tiveram seus valores de E_0 e E_{00} reduzidos em 50%, 65% e 80%, uma vez que o ensaio de fluência foi conduzido para deformações até 20 vezes maiores do que as observadas no ensaio de módulo de dinâmico. Tais variações do modelo foram produzidas a fim de aproximar seus resultados com o comportamento no regime não linear da mistura e solo-emulsão.

O modelo 2S2P1D inicial, bem como suas variações, foram discretizados para o modelo de Kelvin-Voigt generalizado (KVG) que é constituído de associação em série de suficiente número de elementos viscoelásticos, cada um representado por uma mola em paralelo a um amortecedor linear. Neste trabalho, 40 elementos viscoelásticos lineares e uma mola livre foram usados. Tais discretizações, obtidas de acordo com os procedimentos propostos por (DI BENEDETTO *et al.*, 2007), foram feitas em função do elevado esforço computacional em se calcular as deformações a partir de modelos de espectro contínuo, como o 2S2P1D (TIOUAJNI

et al., 2011). Além disso, o modelo KVG fornece explicitamente a curva de fluência do material, possibilitando uma interconversão direta entre o módulo complexo e a função fluência, enquanto que o modelo 2S2P1D não tem forma explícita para a fluência. A Figura 4.10 apresenta uma comparação entre o modelo 2S2P1D e o modelo KVG discretizado com 40 elementos viscoelásticos e uma mola, evidenciando a proximidade nos resultados de ambos.

Figura 4.10 – Comparação modelo 2S2P1D e modelo KVG



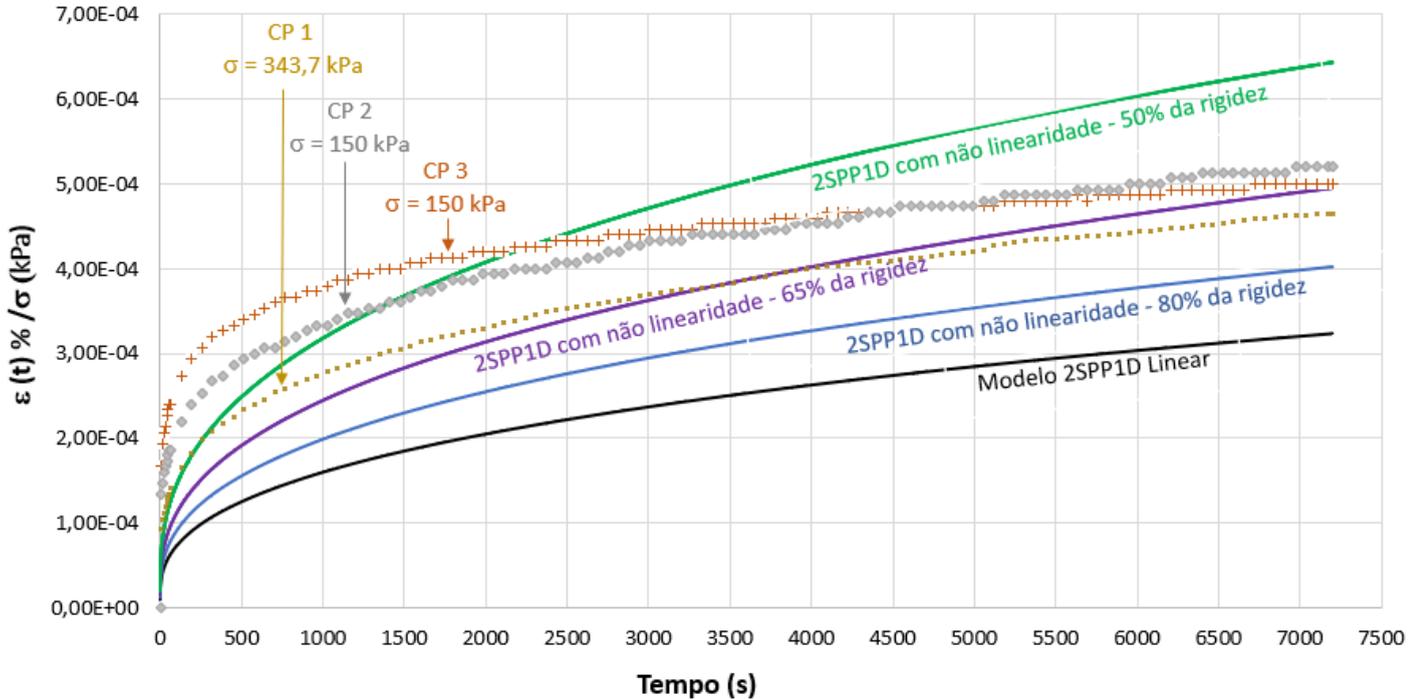
Fonte: elaborada pelo autor.

De posse dos parâmetros dos modelos KVG, calculou-se qual seria o comportamento estimado da mistura de solo-emulsão em um ensaio de fluência. Em seguida, comparou-se esse comportamento com os resultados obtidos experimentalmente para o ensaio de fluência executado experimentalmente, conforme resultados apresentados na Figura 4.11.

Inicialmente, observa-se que as funções fluência ($D(t)$) medidas nos CPs, mesmo submetidos a diferentes níveis de tensão normal, tiveram resultados em termos de $D(t)$ muito parecidos. As diferenças observadas (da ordem de 30%) são compatíveis com a variabilidade nas propriedades de CPs de solo (WANG; CAO; LI, 2016), e não são suficientes para evidenciar não linearidade no comportamento durante os ensaios de fluência, que atingiram deformações de até $780\mu\text{m/m}$, para os CPs ensaiados (CP2 e CP3) com menor tensão, e $1600\mu\text{m/m}$, para o CP com maior tensão de ensaio (CP1). Entretanto, o Modelo 2S2P1D linear por si só não foi suficientemente representativo do comportamento da mistura solo-emulsão asfáltico em termos absolutos, visto que previu apenas cerca de metade da deformabilidade de fato observada nos ensaios. Porém, deve-se observar que nos ensaios de ajuste de módulo dinâmico as deformações máximas foram de $67,5\mu\text{m/m}$, enquanto que durante o ensaio de fluências, após 7200 segundos,

observou-se uma deformação da ordem de grandeza de $780\mu\text{m}/\text{m}$, para os CPs ensaiados com menor tensão, e $1600\mu\text{m}/\text{m}$, para o corpo de prova com maior tensão de ensaio.

Figura 4.11 – Deformação prevista vs. Resultado ensaio de fluência



Fonte: elaborada pelo autor.

O erro, ao final do ensaio, na predição da deformação variou entre 44% e 61%, usando um modelo calibrado para determinar o comportamento em níveis de deformação até 20 vezes menor que o de fato ocorrido. Essas diferenças em função das amplitudes de carregamento estão compatíveis com não linearidades típicas de solos (SANTOS, 1999; GOMES CORREIA *et al.*, 2001), conforme apresentado na Figura 4.9.

Sendo assim, foram feitos ajustes no modelo 2S2P1D linear, a fim de possibilitar uma melhor representação do comportamento do material em elevados níveis de deformação, fora dos limites do regime linear. Determinou-se o comportamento de mais 3 novas modelagens do 2S2P1D (variando apenas os módulos assintóticos) levando em conta diferentes níveis de diminuição do módulo com a evolução do nível de deformação. Os novos modelos foram feitos considerando variações de 50%, 65% e 80% do valor determinado da rigidez. Os resultados de deformação desses novos modelos também foram expostos na Figura 4.11.

Constata-se que, com no modelo considerando 65% da rigidez, os resultados foram muito mais próximos dos observados experimentalmente, uma vez que os erros encontrados nas deformações caíram para valores da ordem de 6% de diferença, ao final do ensaio. Além

disso, para os elevados níveis de deformação obtidos a partir de dois mil segundos de ensaio, todos os resultados analisados experimentalmente ficaram compreendidos entre os modelos com 80% e 50% do valor determinado da rigidez.

Dessa forma, sugere-se que o Modelo 2S2P1D linear idealizado é capaz de ser utilizado de forma razoável na previsão de comportamento do solo-emulsão, até mesmo em deformações elevadas, onde começam a existir influências da não linearidade, desde que se tenha informação sobre os níveis de deformação. Além disso, é um meio viável para previsão de deformações lentas com carregamento contínuo, podendo ser utilizado para futura previsão de comportamento de barragens com núcleo em solo-emulsão. A inserção de um coeficiente de diminuição do módulo dinâmico, para o material estudado, foi suficiente para prever o comportamento do material com deformações mais elevadas que no ensaio de módulo complexo.

Há a necessidade, em estudos posteriores, da realização de mais ensaios neste tipo de material, para que, com dados experimentais suficientes, seja possível definir uma regra para a aplicação do coeficiente de diminuição de módulo, ou de um fator de segurança adequado para este tipo de estimativa, compatível com obras geotécnicas. Pelos resultados obtidos até aqui, seria necessário a utilização de coeficientes de segurança ordem de 1,53, o que equivaleria a este coeficiente de diminuição de módulo de 65%. Tal ordem de grandeza de fator de segurança de fato já é utilizada em muitas obras geotécnicas para avaliar propriedades de materiais, o que evidencia mais uma vez a boa aproximação obtida a partir do modelo proposto.

4.4 Conclusões

Este trabalho investigou o comportamento mecânico de solo-emulsão quanto à deformabilidade em ensaios no domínio do tempo (função fluência) e no domínio da frequência (módulo complexo). Enquanto o ensaio de módulo foi usado para o ajuste dos modelos viscoelásticos lineares (2S2P1D e KVG), o ensaio de fluência foi usado como meio de validação dos modelos propostos. O modelo 2S2P1D foi considerado satisfatório, uma vez que se fez um ensaio de determinação de módulo dinâmico em pequenas deformações (abaixo de $100\mu\text{m/m}$) e ao prever o comportamento de fluência em deformações até 20 vezes maiores, foram encontrados erros de previsão variando entre 44% e 61% de diferença, corrigíveis em se considerando coeficientes de não linearidade compatíveis com materiais granulares. Com os resultados obtidos, foi possível concluir que:

- A mistura solo-emulsão estudada é um material termorreologicamente simples e assim sendo foi possível determinar parâmetro de um modelo constitutivo 2S2P1D linear;
- Para pequenas deformações, o modelo 2S2P1D linear idealizado consegue representar de forma satisfatória o comportamento da mistura solo-emulsão estudada;
- O modelo 2S2P1D apresentou bons ajustes com os resultados experimentais para os ensaios de fluência, mesmo em diferentes níveis de tensão, desde que se considere a esperada não linearidade nos ensaios de fluência;
- Mesmo em elevados níveis de deformação, no domínio da não linearidade, as diferenças entre o comportamento previsto e o experimental foram consideradas dentro de um limite aceitável para aplicações em geotecnia;
- A inserção de um coeficiente de diminuição de módulo da ordem de 65% foi suficiente, neste caso estudado, para simular o efeito da não linearidade em elevados níveis de deformação do material.

5 AVALIAÇÃO DO EFEITO DO TEOR DE LIGANTE ASFÁLTICO NO COMPORTAMENTO VISCOELÁSTICO DE MISTURAS SOLO-EMULSÃO

5.1 Introdução

As misturas asfálticas a frio têm grande relevância e aceitação em aplicações geotécnicas devido a uma série de benefícios econômicos, ambientais e construtivos derivados de sua metodologia de uso (BAGHINI; ISMAIL; BIN KARIM, 2015; DULAIMI; SHANBARA; AL-RIFAIE, 2020; KUNA; GOTTUMUKKALA, 2019; PÉREZ *et al.*, 2020). Um dos tipos mais conhecidos e amplamente utilizados de misturas a frio em sistemas de pavimentação, com baixos volumes de tráfego, são aquelas compostas por solos estabilizados com emulsão asfáltica (S.ANDAVAN; B. MANEESHKUMAR, 2020). Nos últimos anos, tem sido estudada a possibilidade de aplicar misturas solo-emulsão como núcleos impermeáveis em barragens, uma vez que as misturas a frio têm se mostrado uma alternativa competitiva em outras aplicações de engenharia (BRITO *et al.*, 2022; DANTAS NETO; PEREIRA; ABREU, 2020).

Pereira (2018) e Dantas Neto *et al.* (2018) mostraram que os resultados mais promissores em termos de resistência ao cisalhamento e coeficiente de permeabilidade, do ponto de vista da aplicação como núcleo de barragem, para a mistura investigada de areia siltosa com emulsão, ocorreram em misturas com teor de emulsão acima de 16% em massa. Brito *et al.* (2022) avaliaram a influência do teor de emulsão nos parâmetros de resistência da mesma mistura solo-emulsão e constataram que, em níveis muito altos de teor, da ordem de 28% em massa, a estrutura interna das partículas do agregado sofre uma mudança significativa devido à alta quantidade de ligante presente. Isso reduziu o contato grão a grão do solo e resultou em uma diminuição da fricção interna e das forças coesivas, afetando, em última instância, as propriedades de resistência da mistura.

Devido à natureza viscoelástica dos ligantes asfálticos, o comportamento mecânico das misturas asfálticas convencionais depende da temperatura, história de carregamento e taxa de aplicação de solicitações mecânicas (NGUYEN; DI BENEDETTO; SAUZÉAT, 2015; NUR *et al.*, 2013b; OLARD; DI BENEDETTO, 2003). As misturas solo-emulsão tendem a herdar as propriedades viscoelásticas do ligante, assim como ocorre com masticues e argamassas asfálticas (DI BENEDETTO *et al.*, 2004b; POUGET *et al.*, 2012). No entanto, ainda há uma lacuna na literatura quando se trata de análises viscoelásticas de misturas solo-emulsão para aplicações geotécnicas, como barragens (DANTAS NETO; PEREIRA; ABREU, 2020;

JACINTHO, 2010). Além disso, a aplicação de cargas estáticas permanentes pode favorecer altas deformações de fluência (WANG *et al.*, 2021), tornando a análise viscoelástica importante para essas estruturas quando materiais propensos à fluência são utilizados.

O fato de que estruturas de engenharia, como barragens de terra, estão sujeitas a diferentes tipos e intensidades de carregamentos ao longo de sua construção e uso, e especialmente a possibilidade de as misturas solo-emulsão se comportarem de forma dependente do tempo em termos de deformações sob carga estática permanente, torna essencial a realização de estudos de caracterização e modelagem viscoelástica desses materiais para garantir sua segurança. Até o momento, há poucos estudos investigando as características reológicas de misturas de solo com ligantes asfálticos (COLLOP; KHANZADA, 2001; KUVAT; SADOGLU, 2020; SARAJPOOR; GHALANDARZADEH; KAVAND, 2021). No entanto, nenhum deles se concentra especificamente em misturas com altos teores de ligante, especialmente para sua aplicação em núcleos impermeáveis, o que torna impossível simular o comportamento de deformação do corpo da barragem e avaliar o risco de fluxo do material. Para isso, modelos reológicos são necessários.

No Capítulo 4 deste trabalho, foi proposto o uso de um modelo viscoelástico linear para uma mistura solo-emulsão composta por areia siltosa misturada com 16% em massa de emulsão asfáltica. A metodologia escolhida consistiu em ajustar o modelo 2S2P1D (OLARD; DI BENEDETTO, 2003) aos resultados experimentais do módulo complexo. Os resultados mostraram uma aderência satisfatória do ajuste para o material estudado, e as previsões do comportamento de deformação do modelo foram validadas usando outros dados experimentais, provenientes de ensaios de fluência. No entanto, não se sabe se o modelo 2S2P1D pode fornecer bons ajustes para teores de emulsão superiores a 16% em massa, e não se investigou o efeito do teor de emulsão nas propriedades viscoelásticas.

Considerando os aspectos mencionados, é essencial realizar a caracterização reológica de misturas solo-emulsão com diferentes teores de emulsão para viabilizar sua aplicação como núcleos impermeáveis em barragens sem comprometer a segurança. Assim, o principal objetivo deste capítulo é verificar se o modelo 2S2P1D apresenta uma aderência satisfatória para misturas de solo com teores de emulsão entre 16% e 28%, bem como entender como as propriedades viscoelásticas da mistura tendem a se comportar em relação a essa variação.

Para alcançar o objetivo proposto, foi realizada a caracterização viscoelástica da mistura solo-emulsão com três diferentes teores de emulsão asfáltica: 16%, 22% e 28% em

massa. Uma vez determinadas as propriedades de um modelo viscoelástico linear 2S2P1D e compreendida a relação dessas propriedades com o teor de emulsão em cada mistura, será possível realizar simulações numéricas do comportamento de deformação em longos períodos em barragens com núcleo de solo-emulsão. Isso permitirá a idealização de melhores projetos de barragens com núcleos de solo-emulsão no futuro. Para esta pesquisa, o módulo complexo de três diferentes misturas foi determinado em cinco temperaturas (-10; 4,4; 21,1; 36,8 e 54°C) e seis frequências de carregamento (25; 10; 5; 1; 0,5 e 0,1 Hz), considerando o material como termorreologicamente simples, e uma caracterização viscoelástica linear baseada no modelo 2S2P1D foi realizada. Por fim, o efeito do teor de emulsão foi avaliado nos parâmetros do modelo, a fim de investigar como o modelo captura a mudança na composição.

5.2 Materiais e métodos

5.2.1 Amostra de solo

A amostra de solo estudada neste trabalho foi coletada nas coordenadas UTM 3°45'7.5"S e 38°34'21.9"W. O solo foi classificado como silte arenoso (SM) de acordo com o Sistema de Classificação Unificada de Solos (USCS). Um resumo dos parâmetros geotécnicos do solo em estudo, bem como as normas utilizadas para caracterização, está apresentado na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Parâmetros geotécnicos do solo

Geotechnical parameters – Sandy silty		
NBR 7182 (2016)	Massa específica aparente seca máxima (g/cm ³) - PN	1,87
NBR 7182 (2016)	Teor ótimo de compactação (%)	9,74
NBR 6459 (2016)	Limite de liquidez (%)	NL*
NBR 7180 (2016)	Limite de plasticidade (%)	NP*
DNER – ME 093 (1994)	Densidade relativa dos grãos	2,64

* Solo não apresentou liquidez nem plasticidade (não líquido, NL, não plástico, NP)

Fonte: elaborada pelo autor.

5.2.2 Emulsão asfáltica

A fim de ter tempo suficiente para o processo de mistura com o solo, foi adotada uma emulsão catiônica de cura lenta (RL-1C) (levando nominalmente até 4 horas para

completar o processo de ruptura). Um resumo dos resultados da caracterização, fornecidos pelo fabricante, da emulsão asfáltica está apresentado na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 – Parâmetros da emulsão RL-1C

Caracterização da emulsão asfáltica		
NBR 14950 (2003)	Saybolt-Furol viscosity, sSF, at 50°C	44
NBR 14393 (2012)	Peneiração, 0.84mm, % em peso	0,01
NBR 6568 (2005)	Resíduo, % em peso	63,2

Fonte: elaborada pelo autor.

5.2.3 Determinação dos teores de emulsão asfáltica

Os teores de emulsão asfáltica de 16, 22 e 28% em massa foram escolhidas para ter corpos de prova de teste em diferentes condições de vazios de ar e teores de ligante, e assim ser capaz de entender o comportamento viscoelástico da mistura de solo-emulsão. A variação nos parâmetros do material do modelo 2S2P1D será então investigada.

5.2.4 Mistura do solo com a emulsão asfáltica

Os procedimentos de mistura do solo com a emulsão asfáltica seguiram a mesma metodologia empregada por Pereira (2018) e Brito (2020), de acordo com as seguintes etapas:

- (i) Destorroamento do solo: Foi realizada o destorroamento do solo utilizando almo fariz e mão de grau, até que não houvesse mais aglomerados no solo;
- (ii) Utilização de um divisor de amostras para reduzir o material a uma forma representativa;
- (iii) Secagem do solo em uma estufa não ventilada a 100°C por 24 horas;
- (iv) Resfriamento do solo até a temperatura ambiente de aproximadamente 25°C - realizado no laboratório em um ambiente com umidade média de 70% (média para a cidade de Fortaleza, Brasil);
- (v) Pesagem e mistura do solo com a emulsão asfáltica por aproximadamente 5 minutos, manualmente, utilizando uma espátula e um recipiente metálico, com mistura contínua;
- (vi) Exposição do material misturado ao ar livre por 24 horas (aeração), em uma camada com espessura de cerca de 10 cm, sem compactação;
- (vii) Compactação utilizando um compactador giratório com um ângulo de rotação de 1,16°, velocidade de rotação constante de 30 rpm e pressão de compactação de 600 kPa;

(viii) Exposição ao ar livre das amostras em temperatura ambiente de aproximadamente 25°C, para facilitar a evaporação da água da emulsão.

5.2.5 Preparação dos corpos de prova

A moldagem dos corpos de prova (CP) (procedimento vii) foi realizada de acordo com os procedimentos contidos na norma AASHTO T 312-15 (2019), com o auxílio de um compactador giratório Superpave que produz corpos de prova com diâmetro de 100 mm e altura de 150 mm. A escolha do método Superpave em relação às metodologias Marshall e Proctor foi recomendada pela norma AASHTO T 342-11 (2022), que exige uma relação de 1,5 entre a altura e o diâmetro dos CP utilizados no teste de módulo complexo. Essa recomendação tem como objetivo reduzir o efeito de borda, e se as metodologias Proctor e Marshall fossem adotadas, essa relação não seria atendida. Outro aspecto que levou à adoção da metodologia Superpave foi o fato de que esse tipo de compactação produz materiais com características mais próximas às obtidas com a compactação em campo, como observado em diversos estudos de misturas asfálticas (KHAN U *et al.*, 1998; PETERSON *et al.*, 2003; CHEN *et al.*, 2012).

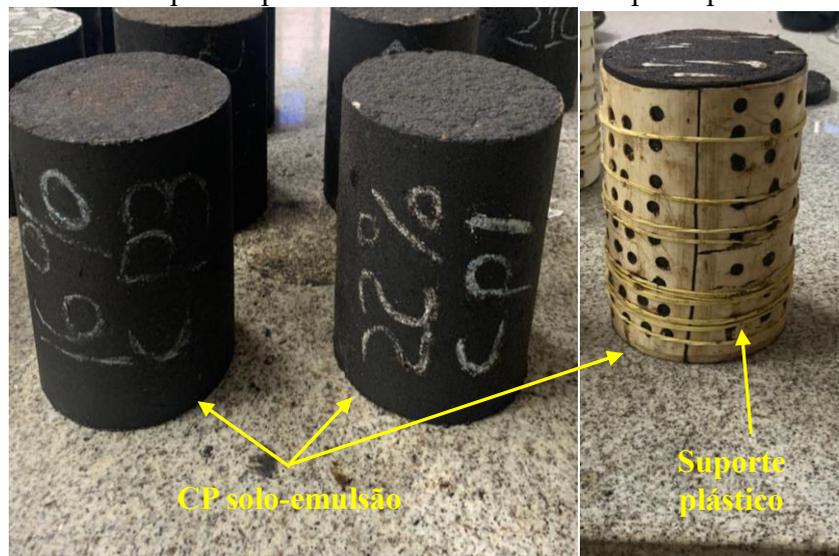
Uma adaptação dos procedimentos de preparação dos CP da norma AASHTO T 342-11 (2022) foi necessária, que requer um procedimento de perfuração/serragem para garantir superfícies externas bem regularizadas em materiais de vários tamanhos nominais máximos de agregado. No entanto, a perfuração/serragem não foi realizada nesta investigação devido a dois motivos principais. Primeiro, os corpos de prova de solo-emulsão, devido ao pequeno tamanho das partículas de solo, já possuem superfícies externas bem regularizadas, o que provavelmente torna esses procedimentos de corte desnecessários. Segundo os CPs de solo-emulsão apresentam uma rigidez inicial menor em temperatura ambiente, o que torna muito difícil a realização desses cortes.

Para garantir o processo de cura, os corpos de prova foram expostos ao ar livre (procedimento viii), pesados diariamente e mantidos assim até que uma variação máxima de 0,3 g em seus valores de massa fosse verificada por pelo menos dois dias consecutivos. A importância do processo de cura se deve à mudança nas propriedades viscoelásticas do ligante à medida que a água é liberada da emulsão durante o processo de coalescência das partículas de asfalto (MERCADO; FUENTES, 2017). As misturas com 16% e 22% de emulsão levaram cerca de quarenta dias para se estabilizarem no processo de cura e perderam aproximadamente 2% e 3% de sua massa inicial, respectivamente. As misturas com 28% de emulsão levaram

cerca de 60 dias para se estabilizarem no processo de cura e tiveram uma perda de aproximadamente 4% de sua massa inicial.

Para os corpos de prova com 28% de emulsão, um suporte plástico foi utilizado durante os primeiros três dias para ajudar a manter sua geometria (Figura 5.1), uma vez que, nesse teor de emulsão, os corpos de prova ainda apresentavam uma aparência muito fluida após a compactação, mesmo com a aeração de 24 horas realizada antes da compactação giratória dos corpos de prova.

Figura 5.1 – Corpos de prova de solo – emulsão e suporte plástico

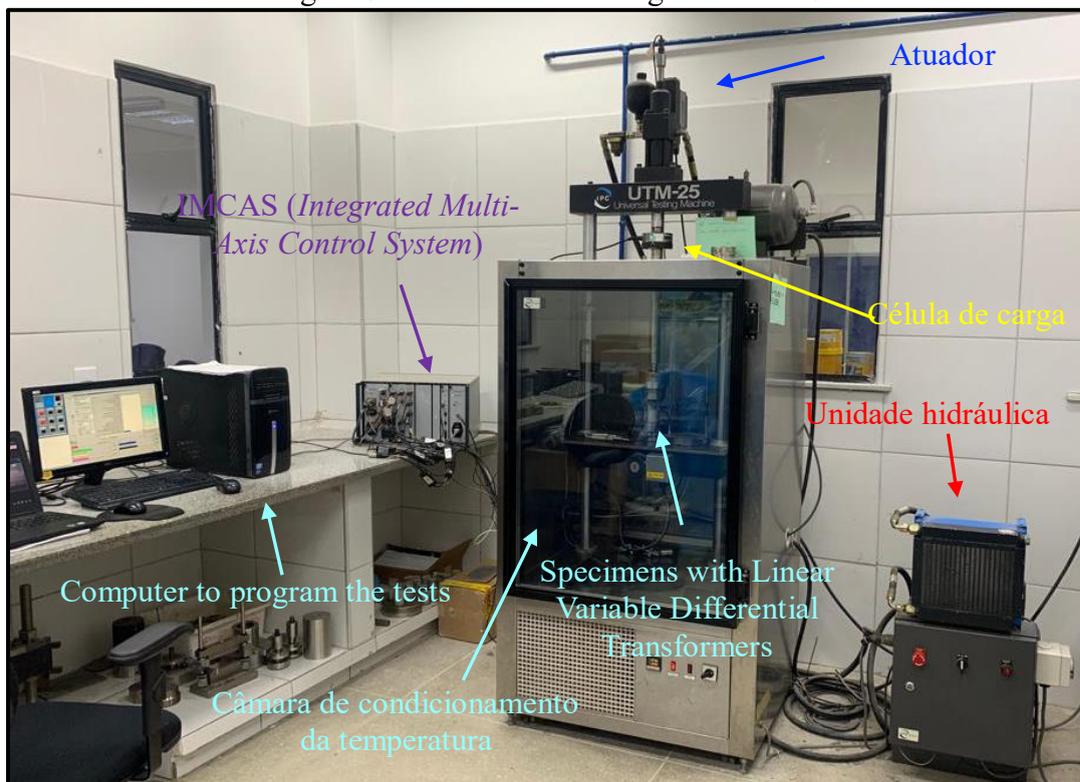


Fonte: elaborada pelo autor.

5.2.6 Caracterização do módulo complexo

O teste do módulo complexo foi realizado de acordo com o método AASHTO T 342-11 (2022). Para cada teor de emulsão estudado, foram testados três corpos de prova cilíndricos de solo-emulsão em diferentes frequências e temperaturas, com um determinado número de repetições de ciclos. Para cada corpo de prova, o valor do módulo complexo de cada par temperatura-frequência foi calculado como a média dos últimos 5 ciclos. O módulo complexo de cada mistura foi determinado calculando-se a média dos valores obtidos dos três corpos de prova testados. Para esse teste, foi utilizado o equipamento UTM-25 (Figura 5.2), que foi programado para aplicar cargas sinusoidais em temperaturas e frequências predefinidas, de acordo com o método AASHTO T 342-11 (2022).

Figura 5.2 – Universal Testing Machine-25

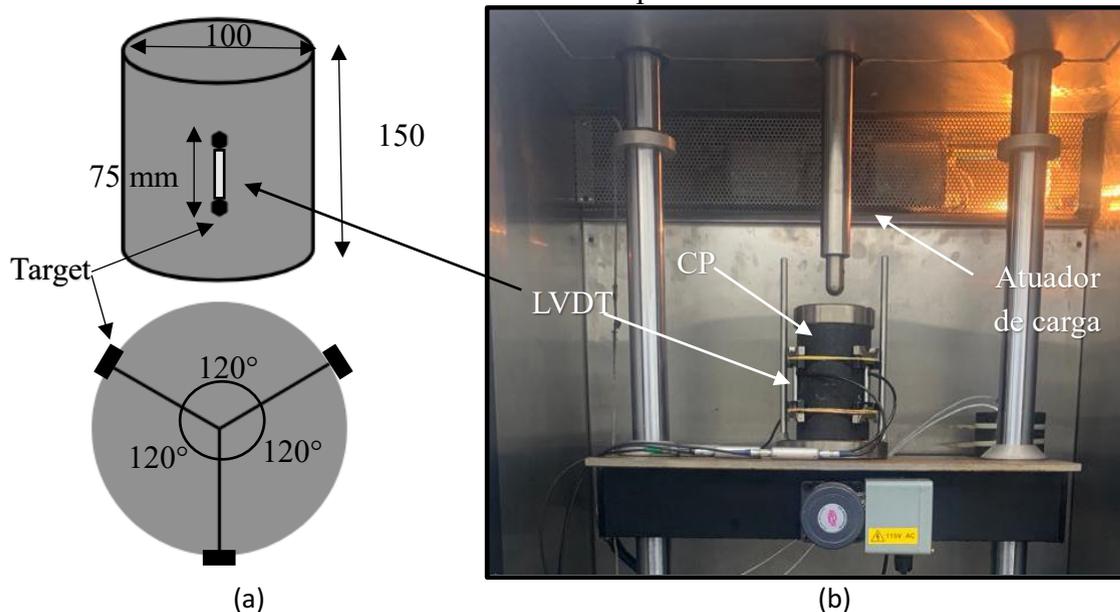


Fonte: elaborada pelo autor.

A UTM-25 (*Universal Testing Machine*) é composta por uma prensa hidráulica controlada por servo motor, equipada com uma câmara térmica com controle de temperatura, e seus resultados são registrados por meio de um sistema de aquisição de dados e um computador. Três transdutores diferenciais lineares variáveis (*linear variable differential transformer*) - LVDT (Figura 5.3) são fixados de forma equidistante a cada 120° nos corpos de prova, e são usados para calcular as deformações dos corpos de prova com base na média dos valores capturados por cada um dos dispositivos. O posicionamento desses LVDTs é realizado por meio de dispositivos que se encaixam em alvos metálicos (*targets*) (pequenos elementos hexagonais metálicos colados no espécime com adesivo epóxi). A distância entre os pontos de fixação, usada para calcular as amplitudes de deformação, é de 75 mm.

As frequências, temperaturas e tempos mínimos de condicionamento dos corpos de prova utilizados nos testes foram aqueles recomendados pela AASHTO T 342-11 (2022), que consistiram em seis frequências (25; 10; 5; 1; 0,5 e 0,1 Hz) e cinco diferentes temperaturas (-10; 4,4; 21,1; 37,8 e 54°C). Trinta diferentes valores de módulo complexo e ângulo de fase foram registrados para cada espécime. Considerando os três teores de emulsão investigados, este estudo obteve 252 pontos experimentais diferentes para módulo complexo e ângulo de fase.

Figura 5.3 – (a) LVDTs posicionado no corpo de prova; (b) Compor de prova na câmara de condicionamento de temperatura.



Fonte: elaborada pelo autor.

Para garantir que os pontos experimentais não estivessem fora do domínio linear de viscoelasticidade normalmente considerado para materiais asfálticos, foram escolhidos níveis de tensão de forma que resultassem em amplitudes de deformação próximas de $67,5 \mu\text{m}/\text{m}$ nos corpos de prova (MANGIAFICO *et al.*, 2018). A definição desses níveis de tensão de carregamento foi feita por tentativa e erro em um dos CPs, com poucos ciclos de carregamento (menos de 20 ciclos por frequência), em um procedimento comumente conhecido como "*fingerprinting*" (AASHTO 342-11, 2022).

A Tabela 6.4 fornece os níveis de tensão de pico aplicados nos testes para os três CPs. Uma tensão de contato equivalente a 5% da tensão máxima foi aplicada como tensão mínima durante o carregamento. Este trabalho não teve como objetivo determinar a resistência à compressão simples das misturas, entretanto é válido ressaltar que as tensões de ensaio foram determinadas como sendo os mínimos valores necessários para produzir deformações nos corpos de prova dentro do regime linear. Além disso, ao final dos ensaios não foram identificadas fissuras ou deformações excessivas nos CPs, indicando que as tensões aplicadas não foram superiores ao limite de resistência física do material.

Tabela 5.4 – Níveis de tensões no ensaio de módulo complexo

Níveis de tensão de pico aplicados no ensaio de modulo complexo – CP 16%							
Frequência (Hz)	25	25	10	5	1	0,5	0,1
Número de ciclos	200	200	200	100	20	15	15
Tensão de pico, T=-10°C (kPa)	620	620	540	510	450	420	380
Tensão de pico, T=4,4°C (kPa)	480	480	320	240	140	120	100
Tensão de pico, T=21,1°C (kPa)	210	210	145	105	58	49	28
Tensão de pico, T=37,8°C (kPa)	90	90	60	45	20	16	10
Tensão de pico, T=54,4°C (kPa)	50	50	40	30	10	8	8

(a)

Níveis de tensão de pico aplicados no ensaio de modulo complexo – CP 22%							
Frequência (Hz)	25	25	10	5	1	0,5	0,1
Número de ciclos	200	200	200	100	20	15	15
Tensão de pico, T=-10°C (kPa)	500	500	470	450	400	380	350
Tensão de pico, T=4,4°C (kPa)	260	260	210	180	130	115	80
Tensão de pico, T=21,1°C (kPa)	120	120	80	54	26	22	14
Tensão de pico, T=37,8°C (kPa)	60	60	40	26	10	7	5
Tensão de pico, T=54,4°C (kPa)	30	30	20	10	5	4	3

(b)

Níveis de tensão de pico aplicados no ensaio de modulo complexo – CP 28%							
Frequência (Hz)	25	25	10	5	1	0,5	0,1
Número de ciclos	200	200	200	100	20	15	15
Tensão de pico, T=-10°C (kPa)	440	440	396	352	308	264	220
Tensão de pico, T=4,4°C (kPa)	200	200	160	140	93	70	50
Tensão de pico, T=21,1°C (kPa)	78	78	45	40	14	11	7
Tensão de pico, T=37,8°C (kPa)	26	26	24	16	6	5	4

(c)

Fonte: elaborada pelo autor.

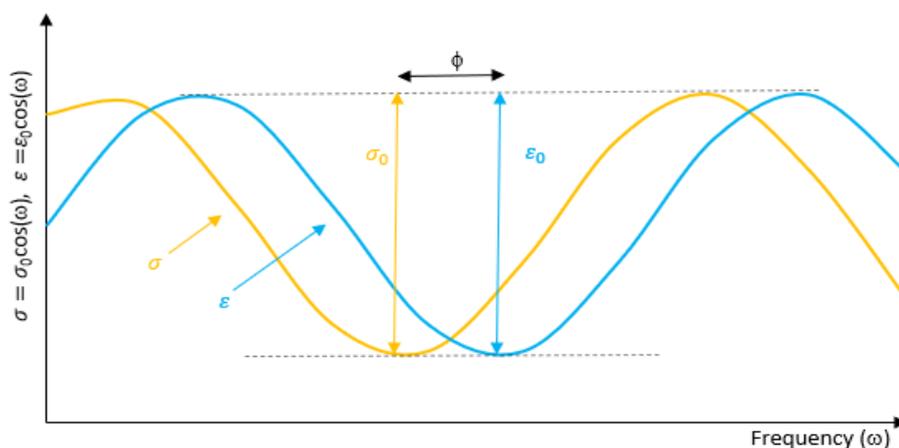
As misturas com 28% de emulsão asfáltica não foram testadas a 54,4°C, pois, nesse nível de temperatura, devido à grande quantidade de ligante, os corpos de prova ficaram muito deformáveis, tornando impossível a realização dos procedimentos necessários para o teste, como fixação dos *targets* e LVDTs ou aplicação de carga sem deformar muito o espécime (mais do que permitido pelos LVDTs). Portanto, a curva mestra para esse teor específico foi construída com pontos experimentais de apenas quatro temperaturas diferentes e seis frequências.

Após a realização do teste nas temperaturas e frequências programadas, os dados foram processados para obter os valores do ângulo de fase e módulo complexo. O processamento dos dados seguiu a caracterização viscoelástica linear clássica do módulo complexo, focando nos resultados das senoidais dos sinais de tensão e deformação. Como esse

é um conceito relativamente novo para o campo de aplicações de solo-emulsão, uma breve explicação é fornecida abaixo.

A Figura 5.4 mostra o esquema de aplicação de carga de tensão compressiva senoidal uniaxial em um material durante um teste de módulo complexo. Os resultados de deformação também são registrados e têm forma senoidal no estado estacionário que é alcançado para esses materiais betuminosos em poucos ciclos (GAYTE *et al.*, 2016). O deslocamento temporal entre os picos de tensão e deformação é medido como um ângulo de fase (δ) (HUET, 1963; PAPAZIAN, 1962).

Figura 5.4 – Carregamento de compressão harmônica e comportamento de deformação



Fonte: elaborada pelo autor.

Esse processo de aplicação de carga senoidal é repetido e registrado para diferentes temperaturas e frequências durante a caracterização experimental. A relação entre a tensão em notação complexa (σ^*) e a deformação em notação complexa (ϵ^*) de um material sob carga harmônica é definida como o módulo complexo E^* (Equação 6.1). O módulo complexo contém informações sobre a relação entre tensão e deformação, traduzida pelo seu ângulo de fase e pelo seu valor absoluto, comumente referido como "módulo dinâmico" $|E^*|$ (Equação 5.2) (PAPAZIAN, 1962), embora nenhum efeito inercial participe dessa propriedade e não deva ser confundido com isso.

$$E^* = \frac{\sigma^*}{\epsilon^*} = \frac{\sigma_0}{\epsilon_0} \cos \delta + i \frac{\sigma_0}{\epsilon_0} \sin \delta \quad (\text{Eq. 5.1})$$

$$|E^*| = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \quad (\text{Eq. 5.2})$$

Onde: σ_0 é a amplitude de carregamento de tensão;
 ε_0 é a amplitude da resoste de deformação;
 δ é o ângulo de fase.

Assumindo a validade do princípio de superposição tempo-temperatura (TTSP), que já foi validado para várias outras misturas de asfalto (APEAGYEI; DIEFENDERFER; DIEFENDERFER, 2012; KUNA; GOTTUMUKKALA, 2019), é possível converter os dados experimentais sobrepostos obtidos em diferentes pares de frequência-temperatura usando um fator de deslocamento horizontal α_T . Esse procedimento é realizado para plotar os valores em uma única curva em função de uma frequência equivalente, para qualquer temperatura de referência. Isso permite acessar informações do material em frequências que não podem ser avaliadas experimentalmente, seja porque são muito baixas (testes muito longos) ou muito altas (produzindo efeitos inerciais/dinâmicos indesejados). Quando o princípio de superposição tempo-temperatura (TTSP) é aplicável com os mesmos fatores de deslocamento para o ângulo de fase e o valor absoluto do módulo complexo, diz-se que o material é termorreologicamente simples, como discutido recentemente para a mistura solo-emulsão (APEAGYEI; DIEFENDERFER; DIEFENDERFER, 2012; KUNA; GOTTUMUKKALA, 2019) e validado para muitas misturas de asfalto na literatura (DI BENEDETTO *et al.*, 2001, 2004). A Equação 5.3 mostra como obter essa frequência equivalente, também conhecida como frequência reduzida f_r .

$$f_r = f * \alpha_T \quad (\text{Eq. 5.3})$$

Onde: α_T é o fator de translação;
 f é a frequência de aquisição de dado;
 f_r é a frequência reduzida.

A determinação dos fatores de deslocamento pode ser realizada usando a equação de Williams-Landel-Ferry (WLF) (WILLIAMS; LANDEL; FERRY, 1955), conforme apresentado na Equação 5.4. Os parâmetros do modelo WLF C_1 e C_2 são otimizados para que os pontos experimentais e os pontos modelados tenham o menor erro possível.

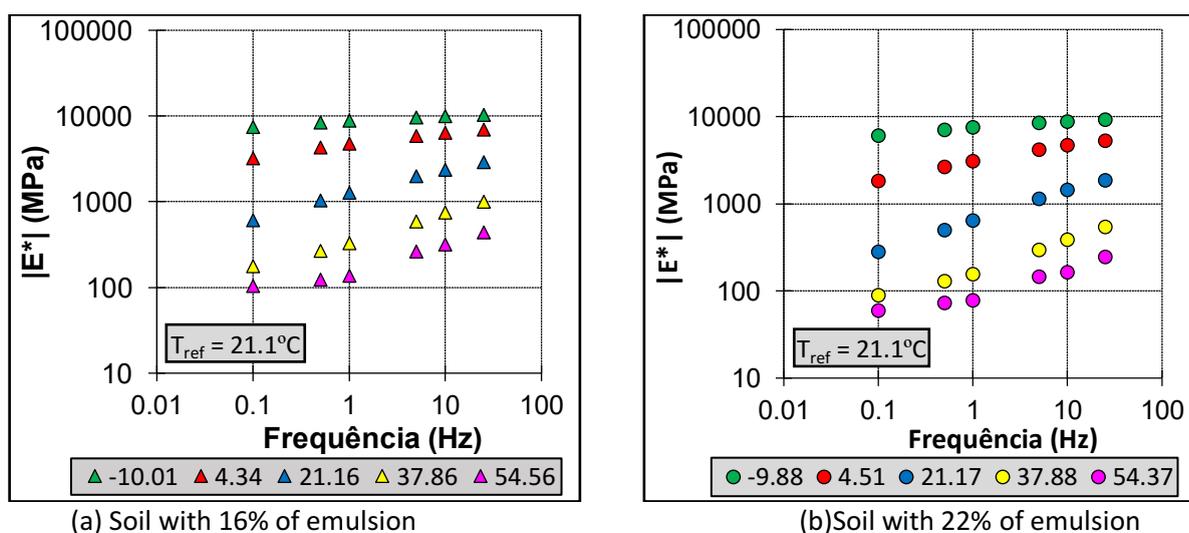
$$\log(\alpha_T) = \frac{-C_1(T - T_r)}{C_2 + T - T_r} \quad (\text{Eq. 5.4})$$

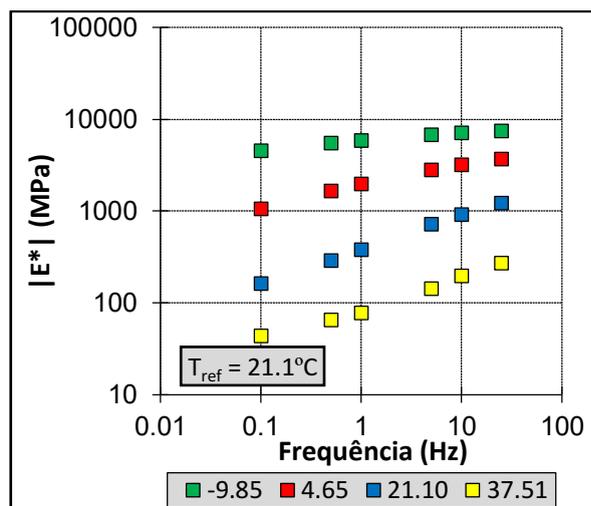
Onde: C_1 e C_2 são os coeficientes da lei WLF;
 T é a temperatura de aquisição de dado;
 T_r é a temperatura de referência para a construção da curva mestra.

5.3 Resultados e discussões

As isotermas do módulo dinâmico das misturas com 16, 22 e 28% de teor de emulsão asfáltica, obtidas pela média dos pontos de dados experimentais dos corpos de prova para cada respectivo teor, são apresentadas na Figura 5.5. Nas três misturas de solo-emulsão avaliadas, observou-se uma redução na rigidez do corpo de prova à medida que a frequência do teste diminuía e/ou a temperatura aumentava. Por outro lado, um aumento na frequência e/ou uma diminuição na temperatura resultaram em um aumento na rigidez. Essa mesma relação foi encontrada por outros pesquisadores que investigaram o comportamento viscoelástico de outros tipos de misturas asfálticas (BUCZYŃSKI; IWAŃSKI, 2018; GODENZONI; GRAZIANI; PERRATON, 2017). O maior valor experimental de módulo dinâmico foi encontrado em torno de 10,4 GPa (-10°C e 25Hz) na mistura com 16% de teor de emulsão, enquanto o menor valor foi em torno de 45 MPa (37,5°C e 0,1Hz) na mistura com 28% de emulsão. Conforme será discutido com base no procedimento de modelagem, os valores teóricos assintóticos podem chegar a 11,5 GPa para o primeiro caso e 30 MPa para o último caso.

Figura 5.5 – Isotermas de módulo dinâmico de pontos experimentais médios (°C)





(c) Soil with 28% of emulsion

Fonte: elaborada pelo autor.

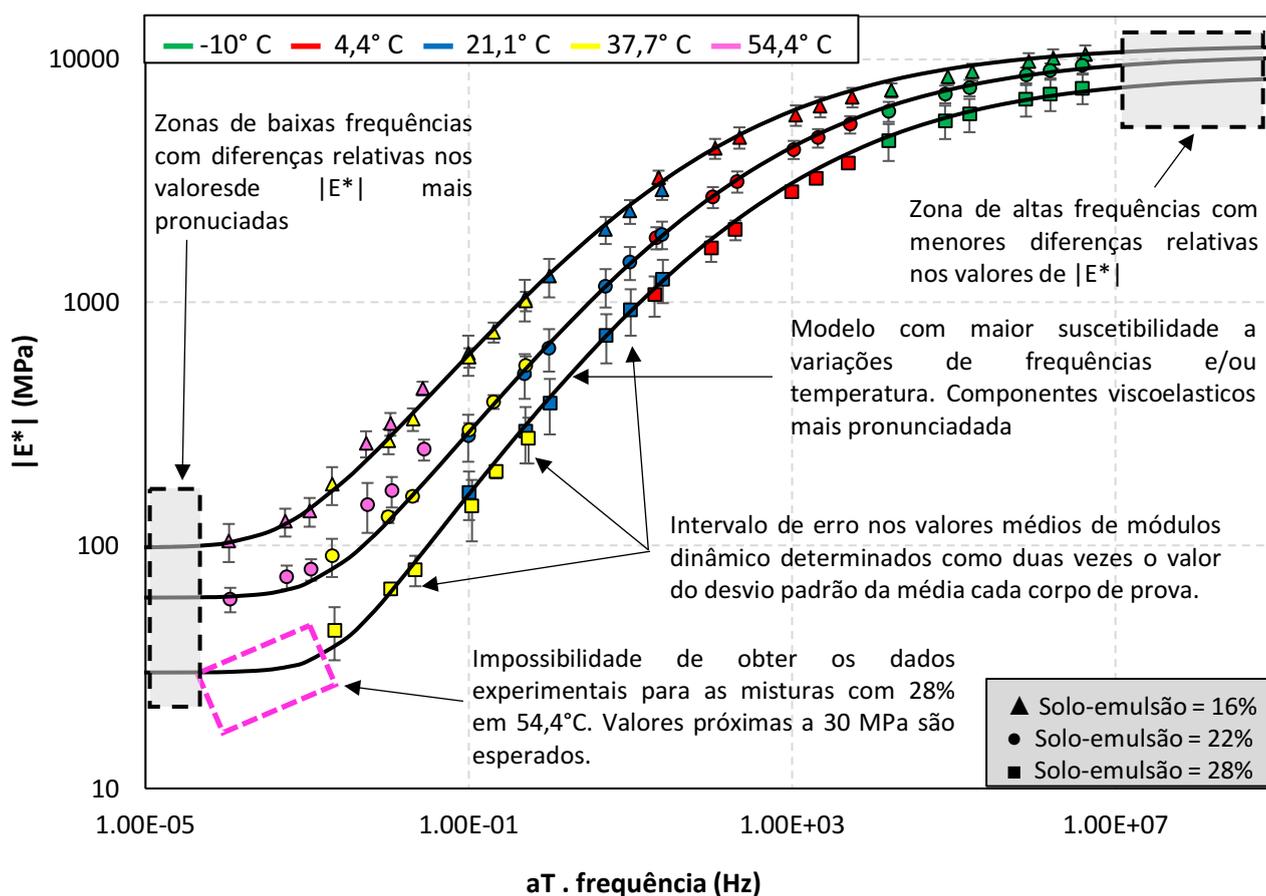
A curva mestra de módulo das três misturas de solo-emulsão estudadas foi construída utilizando os dados experimentais e os fatores de deslocamento (*shift factors*) (Figura 5.6). A suavidade e continuidade das curvas construídas reforçam a validade do princípio de superposição tempo-temperatura (TTSP) para o material estudado. Os fatores de deslocamento, obtidos de acordo com a equação de Williams-Landel-Ferry (WLF) (WILLIAMS; LANDEL; FERRY, 1955), foram os mesmos para as três misturas diferentes, confirmando que esses coeficientes estão relacionados à origem do ligante utilizado, e não à dosagem da mistura, como observado em outros estudos (PERRATON *et al.*, 2018).

Ao analisar a Figura 5.6, observa-se que quanto menor a frequência de teste, maiores são as diferenças relativas entre as curvas mestras das misturas de solo-emulsão. Em frequências muito altas, o valor de $|E^*|$ da mistura com 28% de emulsão foi aproximadamente 16% menor do que o da mistura com 16%, enquanto em frequências muito baixas, essa redução chegou a cerca de 70%. Verificou-se que quanto maior o teor de ligante, mais pronunciada é a diminuição do módulo dinâmico, uma vez que no intervalo de valores para a temperatura de referência (21,1°C), as misturas com 16, 22 e 28% de emulsão apresentaram as respectivas inclinações nas suas curvas mestras de 0,010; 0,015 e 0,023Hz/MPa.

Em frequências muito baixas, as curvas mestras mostraram uma inclinação mais íngreme e uma maior variação nos valores do módulo dinâmico. Esse comportamento pode sugerir uma menor resistência do material a deformações permanentes. A região de frequência muito baixa, que corresponde a carregamentos quase estáticos, é de particular importância para a análise do comportamento de fluência. Isso é especialmente relevante para aplicações em

barragens, onde pode auxiliar na previsão do comportamento em longo prazo da mistura de solo-emulsão que constitui o núcleo da barragem.

Figura 5.6 – Curvas mestras experimentais e modelagem 2S2P1D para cada mistura solo-emulsão com valores assintóticos teóricos



Fonte: elaborada pelo autor.

A diferença percentual nos valores assintóticos das curvas mestras e a evolução de suas inclinações indicam não apenas a suscetibilidade do comportamento reológico das misturas a teores mais altos de ligante e variações de temperatura e/ou frequência, mas também a relação direta entre a estrutura interna dos agregados formados pelo contato grão a grão com o componente de rigidez elástica no comportamento do material.

Ao analisar os resultados experimentais do módulo dinâmico para cada par de temperatura e frequência, observou-se que, ao comparar as misturas de asfalto com 16% e 22% de emulsão, a adição de 6% de ligante na mistura levou a uma redução média de 22,65% nos valores de módulo. Ao comparar as misturas com 16% e 28%, verificou-se que a adição de 12% de emulsão à mistura resultou em uma redução média de 43,15% nos valores de módulo. Isso

confirma a tendência de redução da rigidez geral do material à medida que mais ligante é adicionado à mistura.

A Tabela 5.5 mostra os coeficientes dos modelos 2S2P1D para cada mistura avaliada, ajustados a partir de suas respectivas curvas mestras.

Tabela 5.5 – Coeficientes do modelo 2S2P1D fatores de translação da lei WLF

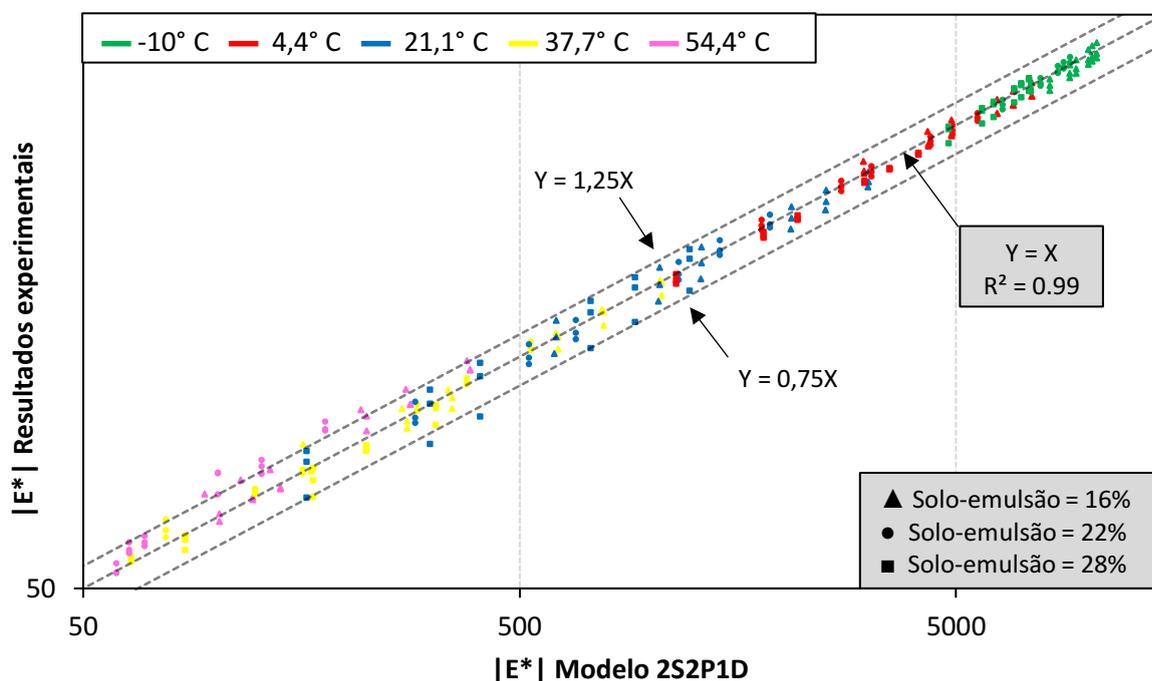
2S2P1D coefficients									
Emulsion content (%)	E_{00} (MPa)	E_0 (MPa)	k	h	δ	τ_E (T_{ref})	β	C_1	C_2
16	98	11500	0,25	0,5	2,3	0,01000	250	12,11	103,16
22	61	10500	0,25	0,5	2,3	0,00196	250	12,11	103,16
28	30	8700	0,25	0,5	2,3	0,00088	250	12,11	103,16

Fonte: elaborada pelo autor.

Durante o processo de ajuste, foi possível obter modelos com ajustes satisfatórios aos resultados experimentais, variando apenas os valores de E_0 e E_{00} , mantendo os coeficientes k, h, δ e β do modelo 2S2P1D iguais para as três misturas, indicando que tais parâmetros estão associados ao tipo de ligante utilizado, conforme já demonstrado em outros tipos de misturas asfálticas (DELAPORTE *et al.*, 2009; NUR *et al.*, 2013). Por outro lado, os valores de E_{00} e E_0 mostraram ser suscetíveis ao teor de ligante (e possivelmente ao teor de vazios também), indicando sua relação com a estrutura interna do corpo de prova, e não apenas com o tipo de ligante.

Embora a mistura com 28% de teor não tenha dados experimentais para uma temperatura de 54,4°C, o que pode ter comprometido a determinação do valor de E_{00} para esse teor, foi observado um bom ajuste dos resultados em outras temperaturas com o modelo proposto, uma vez que a definição dos demais coeficientes não foi afetada pela falta de tais dados experimentais. A Figura 5.7 mostra uma representação gráfica dos resultados de ajuste entre os duzentos e cinquenta e dois valores diferentes de módulo dinâmico, correspondentes aos pontos experimentais em cada par frequência-temperatura dos três corpos de prova nos três teores de emulsão asfáltica estudados, com os valores otimizados obtidos a partir dos respectivos modelos propostos.

Figura 5.7 – Comparação de resultados experimentais com modelos propostos em escala logarítmica



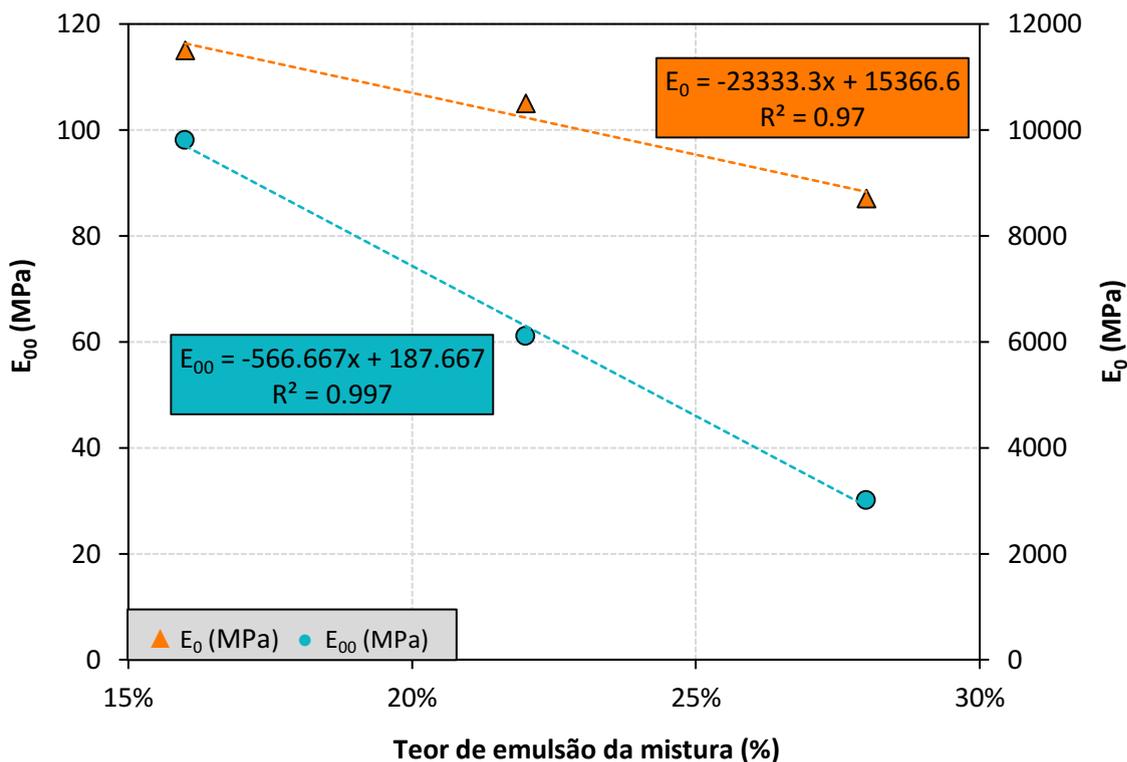
Fonte: elaborada pelo autor.

É válido ressaltar que os pontos experimentais apresentados na Figura 5.7 foram os mesmos utilizados para a definição dos parâmetros do 2S2P1D e por isso essa representação gráfica tem por finalidade avaliar o ajuste dos modelos propostos. Em geral, foi confirmado um bom ajuste entre os resultados experimentais dos três teores de solo-emulsão avaliados com seus respectivos modelos 2S2P1D, em relação ao valor $|E^*|$, indicando que o modelo é capaz de representar satisfatoriamente o comportamento das misturas de solo-emulsão no domínio linear. Conforme observado na Figura 5.7, o erro experimental máximo em relação ao modelo proposto é inferior a 25% para 93% dos pontos experimentais. Em particular, os valores experimentais em altas temperaturas apresentaram maior erro, uma vez que em altas temperaturas o material encontrava-se bastante fluido o que dificultava a fixação dos LVDT's nos corpos de prova. Além disso à medida que se aumentava a temperatura e reduzia-se a frequência de ensaio, menores tinham que ser as amplitudes de carga, o que pode ter prejudicado na medição da amplitude do sinal pela célula de carga do equipamento. Já para os valores em baixas temperaturas, o erro experimental é inferior a cerca de 15%. Por outro lado, para a tendência geral, o R^2 é de 0,99.

Uma vez que os coeficientes k , h , δ e β foram os mesmos para os três modelos analisados e que foi observada uma influência direta e proporcional entre a quantidade de

ligante em cada espécime e os valores de E_0 e E_{00} , foi feita uma tentativa de criar uma correlação que possa auxiliar na escolha desses parâmetros em futuras modelagens de misturas que compartilhem a metodologia utilizada neste estudo, com teores de ligante entre 16 e 28%, de acordo com a Figura 5.8.

Figura 5.8 – Correlação entre o teor de emulsão e os valores de E_0 e E_{00}



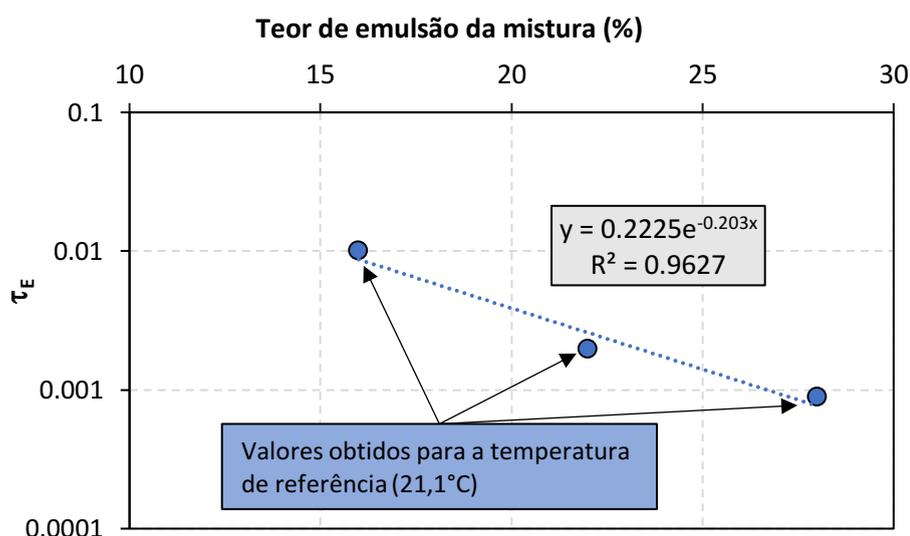
Fonte: elaborada pelo autor.

À medida que o teor de emulsão da mistura aumenta, observa-se uma diminuição significativa nos valores de E_0 e E_{00} , de modo que, para cada acréscimo de 1% no teor de emulsão, foi observada uma redução de aproximadamente 2,02% em E_0 e 5,78% em E_{00} . Pesquisas futuras focadas na microestrutura interna das misturas de solo-emulsão podem demonstrar que, em misturas com 28% de emulsão, há menos contato grão a grão entre as partículas do solo devido ao excesso de ligante, resultando em um comportamento viscoelástico mais pronunciado do asfalto na mistura.

O parâmetro τ_E está associado com o tempo característico de ensaio de modo que, diferentemente do que acontece com os demais parâmetros do modelo, o seu valor está diretamente relacionado com a temperatura de referência escolhida. Entretanto ao avaliar a variação deste parâmetro nas três diferentes misturas, na temperatura de referência (21,1°C), observou-se uma relação destes valores com a quantidade de ligante em cada mistura. Quanto

maiores foram os valores de teor de emulsão das misturas, menores foram os valores de τ_E . A Figura 5.9 apresenta uma correlação entre o teor de emulsão asfáltica e os valores de τ_E , em escala logarítmica, para as misturas estudadas.

Figura 5.9 – Correlação entre o teor de emulsão e os valores τ_E



Fonte: elaborada pelo autor.

Como primeira aproximação, foi possível determinar a relação entre os valores de τ_E e os valores de módulo E_0 e E_{00} com os teores de emulsão a partir de modelos lineares. Uma modelagem micromecânica mais aprofundada da mistura solo-emulsão permitirá, no futuro, uma melhor compreensão do comportamento desse material e, portanto, uma melhor previsão de comportamento para teores de emulsão mais variados do que os testados neste artigo. Uma vez que essa relação seja confirmada e conhecendo os coeficientes do modelo 2S2P1D herdados do ligante utilizado, será possível realizar uma série de simulações computacionais de misturas com diferentes teores de emulsão sem a necessidade de extensas investigações experimentais.

Em trabalhos futuros simulando o comportamento de barragens com núcleos de solo-emulsão impermeáveis, deve-se observar que, embora as misturas com 28% de emulsão tenham apresentado resultados mais promissores em termos de coeficiente de permeabilidade (PEREIRA, 2018), atenção especial deve ser dada à deformabilidade desse tipo de material, uma vez que apresentou valores mais baixos de módulo complexo e, se submetido a carregamentos por um longo período de tempo, pode resultar em menores resistências do sistema estrutural como um todo aos fenômenos de deformação e fluência (BUCZYŃSKI; IWANŃSKI, 2018).

5.4 Conclusões

Este trabalho avaliou o comportamento reológico de um solo silto-arenoso (SM) estabilizado com emulsão asfáltica em diferentes teores de mistura (16%, 22% e 28% em peso). Testes de módulo complexo foram realizados em uma ampla faixa de frequências (0,1; 0,5; 1; 5; 10 e 25Hz) e temperaturas (-10; 4,4; 21,1; 36,8 e 54°C). A mistura solo-emulsão foi submetida a condições de carregamento que permitiram níveis semelhantes de amplitudes de deformação (cerca de 67,5 μ m/m). O modelo 2S2P1D foi utilizado para ajustar os dados experimentais do valor absoluto do módulo complexo, com boa concordância (erros abaixo de 25% para 93% dos pontos experimentais e $R^2=0,99$ entre resultados modelados e experimentais), a fim de caracterizar as propriedades viscoelásticas dessas misturas. A partir dos resultados obtidos, foi possível concluir que:

- As misturas apresentaram os mesmos coeficientes WLF, permitindo a construção de curvas mestras suaves, o que indica que os efeitos de equivalência tempo-temperatura foram os mesmos, independentemente do teor de ligante. A dependência temporal nas misturas solo-emulsão, como mostrado na literatura para muitas misturas asfálticas, é herança do ligante asfáltico.
- O valor do módulo das três misturas solo-emulsão apresentou mudanças significativas ao variar as frequências de teste e as temperaturas, destacando a contribuição viscoelástica em seu comportamento, sendo essa influência muito mais pronunciada na mistura com 28% de emulsão asfáltica. Pesquisas futuras focadas na microestrutura interna dessa mistura solo-emulsão podem demonstrar que, devido ao excesso de ligante, acaba separando as partículas do solo e, portanto, apresenta um comportamento viscoelástico mais pronunciado do asfalto na mistura.
- Em baixas temperaturas e altas frequências, as diferenças relativas no módulo dinâmico entre as misturas foram menos pronunciadas (diferença assintótica máxima de 8,7 GPa para 11,5 GPa). À medida que a temperatura aumentava e/ou a frequência diminuía, essa diferença se tornava cada vez maior, precisamente devido à quantidade de ligante e à microestrutura interna de cada uma das misturas nos níveis de teor avaliados.
- Os coeficientes k , h , δ , τ_E e β dos modelos 2S2P1D propostos foram os mesmos nas três misturas, justamente porque possuíam o mesmo ligante.
- O modelo viscoelástico escolhido apresentou bons ajustes com os resultados experimentais para deformações dentro do regime linear. A maioria dos parâmetros do modelo 2S2P1D, especialmente relacionados à dependência temporal, como mostrado anteriormente para muitas misturas asfálticas, é herança do ligante asfáltico.

- Foi observada uma clara correlação entre a quantidade de ligante nas misturas e os valores de E_0 e E_{00} . À medida que o teor de emulsão aumentava, esses coeficientes se tornavam menores, devido à microestrutura interna das amostras. O modelo de relação linear entre os módulos e o teor de emulsão parece ser uma boa primeira aproximação, considerando a faixa de teores de emulsão entre 16% e 28%. Para a mistura solo-emulsão investigada, para cada aumento de 1% no teor de emulsão, há uma diminuição de cerca de 2,02% e 5,78% em E_0 e E_{00} , respectivamente.

6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

O objetivo principal deste trabalho foi avaliar o efeito dos diferentes teores de emulsão asfáltica nas propriedades de resistência ao cisalhamento e determinar as propriedades de um modelo reológico viscoelástico linear adequado para esse material. Para alcançar esse objetivo, foram realizados ensaios de resistência triaxial em teores acima e abaixo do teor ótimo de compactação (16%, 22% e 28% em massa), bem como ensaios de módulo complexo em diferentes condições de temperatura (-10,0 a 54,4°C) e frequência (0,1 a 25Hz), além de ensaios de fluência, que foram utilizados como meio para validação dos modelos ajustados.

Os procedimentos descritos permitiram ter uma melhor compreensão da tendência do comportamento dos parâmetros de resistência ao cisalhamento e das propriedades de deformação viscoelásticas de misturas de solo-emulsão, que possibilitarão no futuro a realização de simulações numéricas do comportamento de estruturas de engenharia que venham a utilizar este tipo de material. Além disso facilitou a caracterização da mistura, em diferentes teores dos estudados neste trabalho, a partir de uma aproximação inicial na tendência de variação dos parâmetros definidos em cada um dos modelos constitutivos em função do teor de emulsão asfáltica. Essa abordagem facilita o trabalho de futuras investigações sobre o comportamento das misturas solo-emulsão, especialmente no que tange à investigação de riscos estruturais devidos à fluência viscoelástica.

6.1 Resumo das conclusões

- Quanto ao Capítulo 3, que se concentrou em atingir o objetivo específico 1 deste trabalho:

Verificou-se a tendência no comportamento cisalhante de misturas entre solo e emulsão asfáltica confeccionadas com teores de 16%, 22% e 28% em massa. Durante o processo de adensamento, foi observado que as misturas com 16% e 22% de emulsão apresentaram um comportamento semelhante ao do solo, onde o tempo de dissipação do excesso de poropressão coincidiu com a variação volumétrica do corpo de prova. No entanto, nas misturas com 28% de emulsão, essa semelhança não foi observada devido à perda de estrutura interna e à possível ruptura por fluência quando submetidas a esforços de tensões confinantes. Ainda que as misturas tenham apresentado um comportamento semelhante ao de um material elástico perfeitamente plástico, caracterizando um regime de fluxo, observou-se que após atingir um determinado nível de deformação axial, as misturas com 16% e 22% de

emulsão apresentaram um leve ganho de resistência, provavelmente devido ao deslocamento da película de asfalto e ao maior contato entre os grãos minerais. No entanto, esse fenômeno não foi observado nas misturas com 28% de emulsão devido à maior espessura do filme asfáltico. Além disso, verificou-se que o aumento do teor de emulsão resultou em menores ângulos de atrito e maiores valores de coesão para as misturas com 16% e 22%. No entanto, para as misturas com 28% de emulsão, houve uma redução no intercepto coesivo devido ao excesso de ligante.

- Quanto ao Capítulo 4, que se concentrou em atingir os objetivos específicos 2 e 3:

Determinou-se um modelo constitutivo viscoelástico linear capaz de representar de forma satisfatória o comportamento das misturas, bem como se verificou a validade deste modelo com resultados de ensaios experimentais de fluência. O modelo 2S2P1D conseguiu representar de forma satisfatória o comportamento da mistura estudada, uma vez que, ao prever o comportamento de fluência em deformações até 20 vezes maiores daquela utilizadas no ensaio de determinação de módulo dinâmico, foram encontrados erros de previsão variando entre 44% e 61% de diferença, corrigíveis em se considerando coeficientes de não linearidade compatíveis com materiais granulares. Nesse sentido, a inserção de um coeficiente de diminuição de módulo na ordem de 65% foi suficiente para simular o efeito da não linearidade em elevados níveis de deformação do material.

- Quanto ao Capítulo 5 concentrou-se em atingir os objetivos específicos 2 e 4:

Investigaram-se os parâmetros do modelo 2S2P1D entre o intervalo de 16% a 28% de teor de emulsão asfáltica nas misturas. O modelo viscoelástico escolhido apresentou bons ajustes com os resultados experimentais dos três teores de mistura estudados dentro do regime linear. O valor do módulo das misturas variou significativamente com as frequências de teste e as temperaturas, evidenciando sua natureza viscoelástica. Os coeficientes k , h , δ , τ_E e β dos modelos 2S2P1D propostos, bem como os mesmos coeficientes WLF, foram os mesmos nas três misturas evidenciando que tais parâmetros estão associados ao tipo de ligante utilizado e não necessariamente à dosagem da mistura ou com a estrutura de ligações internas do material. Já os coeficientes E_0 e E_{00} sofreram influência pela variação do teor de ligante da mistura, uma vez que diferentes estruturas internas foram formadas. Observou-se uma relação linear entre os valores dos módulos e o teor de emulsão. À medida que o teor de emulsão aumentou, esses

coeficientes se tornaram menores, de modo que para cada aumento de 1% no teor de emulsão, houve uma diminuição de cerca de 2,02% e 5,78% nos valores de E_0 e E_{00} respectivamente.

6.2 Sugestões para trabalhos futuros

As sugestões de pesquisas futuras que decorrem deste trabalho e foram enxergados como capazes de ampliar os conhecimentos a respeito da adição de altos teores de emulsão aos solos e decorrentes impactos no comportamento desses materiais são apresentadas a seguir:

- Estudar o comportamento viscoelástico de solos de diferentes graduações, que não os arenosos, estabilizados com emulsão asfáltica;
- Estudar o efeito da temperatura e tempo de carregamento nas propriedades de resistência ao cisalhamento das misturas solo-emulsão;
- Estudar o efeito de diferentes velocidades de ruptura de ensaios triaxiais na resistência ao cisalhamento das misturas solo-emulsão;
- Caracterizar as propriedades viscoelásticas do material estudado a partir de um modelo constitutivo fora do regime linear;
- Desenvolver investigação focada na microestrutura interna das misturas a fim de avaliar o nível de contato grão a grão entre as partículas de solo e como essa microestrutura influencia no comportamento de resistência ao cisalhamento e viscoelástico do material;
- Desenvolver uma modelagem micromecânica aprofundada das misturas solo-emulsão e aprimorar a previsão de comportamento para os mais variados teores de emulsão de mistura;
- Realizar simulações computacionais de deformação em longos períodos de tempo em barragens que utilizem solo-emulsão como material em seu núcleo impermeável e avaliar risco de fluência da estrutura.

REFERÊNCIA

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

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **Preparing and Determining the Density of Asphalt Mixture Specimens by Means of the Superpave Gyrotory Compactor (AASHTO T 312)**. , 2019.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **Standard Method of Test for Determining Dynamic Modulus of Hot Mix Asphalt (HMA) (AASHTO T 342)**. , 2022.

APEAGYEI, A. K.; DIEFENDERFER, B. K.; DIEFENDERFER, S. D. Development of dynamic modulus master curves for hot-mix asphalt with abbreviated testing temperatures. **International Journal of Pavement Engineering**, v. 13, n. 2, p. 98–109, abr. 2012.

ARAUJO, R. N. A. **Estabilização de solos lateríticos da região Nordeste com emulsão asfáltica catiônica**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)—Campina Grande: Universidade Federal da Paraíba, 1983.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **Emulsões asfálticas - Determinação do resíduo de destilação. NBR 6568**. Rio de JaneiroABNT, , 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **Amostras de Solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. NBR 6457**. Rio de JaneiroABNT, , 2016a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **Solo – Determinação do limite de plasticidade. NBR 7180**. Rio de JaneiroABNT, , 2016b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **Solo – Análise Granulométrica. NBR 7181**. Rio de JaneiroABNT, , 2016c.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **Solo – Ensaio de compactação. NBR 7182**. Rio de JaneiroABNT, , 2016d.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **Solo – Determinação do limite de liquidez. NBR 6459**. Rio de JaneiroABNT, , 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **Materiais betuminosos - Determinação da viscosidade Saybolt Furol. NBR14950**. , 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **Emulsões asfálticas - Determinação de peneiração. NBR 14393**. , 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **Ligantes asfálticos - Determinação do teor do resíduo seco de emulsões asfálticas convencionais ou modificadas - Métodos expeditos. NBR14376**. , 2019.

B. D. OLUYEMI-AYIBIOWU. STABILIZATION OF LATERITIC SOILS WITH ASPHALT- EMULSION. **Nigerian Journal of Technology**, v. 38, n. 3, p. 603–608, jul. 2019.

BABADOPULOS, L. et al. Influence of loading amplitude on viscoelastic properties of bitumen, mastic and bituminous mixtures. **Road Materials and Pavement Design**, v. 20, n. sup2, p. S780–S796, 31 jul. 2019.

BABADOPULOS, L. F. L. **Avaliação do Modelo Viscoelástico Linear Aplicado a Misturas Asfálticas Utilizadas em Revestimentos de Pavimentos no Brasil**. Trabalho de conclusão de curso—Fortaleza: Universidade Federal do Ceará, 2013.

BAGHINI, M. S.; ISMAIL, A.; BIN KARIM, M. R. Evaluation of cement-treated mixtures with slow setting bitumen emulsion as base course material for road pavements. **Construction and Building Materials**, v. 94, p. 323–336, 18 jul. 2015.

BARI, J.; WITCZAK, M. W. Development of a new revised version of the Witczak E* Predictive Model for hot mix asphalt mixtures. **Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists**, v. 75, p. 381–424, 2006.

BERNUCCI, L. B. et al. **Pavimentação Asfáltica: Formação básica para engenheiros**. 4. ed. Rio de Janeiro: Associação Brasileira das Empresas Distribuidoras de Asfaltos, 2010.

BEZERRA, A. K. L. et al. Desenvolvimento de ensaio de ressonância por impacto para determinação de rigidez de diferentes materiais. **Transportes**, v. 30, n. 3, 2022.

BOLTZMANN, L. Zur theorie der elastischen nachwirkung. **Pogg. Ann. Physik**, v. 70, p. 275–306, 1874.

BRINSON, H. F.; BRINSON, L. C. **Polymer Engineering Science and Viscoelasticity An Introduction**. [s.l.] Springer, 2008.

BRITO, N. J. C. DE O. et al. Avaliação do tempo de cura na resistência ao cisalhamento de misturas solo-emulsão com teores de emulsão superiores a 10%. **Revista Matéria**, v. 27, n. 2, jun. 2022.

BRITO, N. J. C. O. **ESTUDO DA INFLUÊNCIA DO TEMPO DE CURA NO COMPORTAMENTO MECÂNICO DAS MISTURAS ENTRE SOLOS E ALTOS TEORES DE EMULSÃO ASFÁLTICA**. Dissertação de Mestrado—Fortaleza: Universidade Federal do Ceará, 2020.

BUALUANG, T.; JITSANGIAM, P.; TANCHAISAWAT, T. Sustainable flexible pavement base stabilization with pozzolanic materials incorporating sodium hydroxide and asphalt emulsion. **Transportation Engineering**, v. 6, p. 1–9, dez. 2021.

BUCZYŃSKI, P.; IWAŃSKI, M. **Complex modulus change within the linear viscoelastic region of the mineral-cement mixture with foamed bitumen**. **Construction and Building Materials** Elsevier Ltd, , 30 maio 2018.

CASTRO, C. A. **Estudo da técnica anti-pó com emulsão de xisto em pavimentos para baixo volume de tráfego**. Dissertação de Mestrado—Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2003.

CHEN, J. et al. Application of discrete element method to Superpave gyratory compaction. **Road Materials and Pavement Design**, v. 13, n. 3, p. 480–500, 2012.

CHENG, Y. et al. Influence of the properties of filler on high and medium temperature performances of asphalt mastic. **Construction and Building Materials**, v. 118, p. 268–275, 15 ago. 2016.

COLLOP, A. C.; KHANZADA, S. Permanent Deformation In Idealised “Sand Asphalt” Bituminous Mixtures. **Road Materials and Pavement Design**, v. 2, n. 1, p. 7–28, 2001.

COSTA DE LIMA, F.; ADONIAS DANTAS NETO, S. Estudo dos mecanismos de compactação em misturas entre solo arenoso e altos teores de emulsão asfáltica. **Geotecnia**, n. 145, p. 61–80, 15 out. 2019.

DAI, Z. et al. Experimental study of Compression-Tension asymmetry in asphalt matrix under Quasi-static and dynamic loads via an integrated DMA-based approach. **Construction and Building Materials**, v. 283, 10 maio 2021.

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.

DAS, B. M. **Fundamentos de Engenharia Geotécnica**. 6ª ed. [s.l.] Thomson, 2007.

DELAPORTE, B. et al. Linear viscoelastic properties of bituminous materials including new products made with ultrafine particles. **Road Materials and Pavement Design**, v. 10, n. 1, p. 7–38, 1 jan. 2009.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM (DNER). **Solos – Determinação da densidade real. ME 093**. Rio de Janeiro DNER, , 1994a.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM (DNER). **Solos compactados em equipamento miniatura - Mini-MCV. ME 258**. , 1994b.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Emulsões asfálticas para pavimentação – Especificação de material DNIT 165/2013**. , 2013.

DI BENEDETTO, H. et al. Stiffness testing for bituminous mixtures. **Materials and Structures/Mat&iaux et Constructions**, v. 34, p. 66–70, 2001.

DI BENEDETTO, H. et al. Fatigue of Bituminous Mixtures. **Materials and Structures**, v. 37, p. 202–216, 2004a.

DI BENEDETTO, H. et al. Linear viscoelastic behaviour of bituminous materials: From binders to mixes. **Road Materials and Pavement Design**, v. 5, p. 163–202, 1 jan. 2004b.

DI BENEDETTO, H. et al. Three-dimensional thermo-viscoplastic behaviour of bituminous materials: The DBN model. **Road Materials and Pavement Design**, v. 8, n. 2, p. 285–315, abr. 2007.

DULAIMI, A.; SHANBARA, H. K.; AL-RIFAIE, A. The mechanical evaluation of cold asphalt emulsion mixtures using a new cementitious material comprising ground-granulated blast-furnace slag and a calcium carbide residue. **Construction and Building Materials**, v. 250, 30 jul. 2020.

FALCÃO, P. R. F. **Estudo de propriedades mecânicas de hidráulicas de concretos asfálticos para aplicação em barragens**. Tese de Doutorado—[s.l.] Universidade de Brasília, 2007.

FARINA, L. C. **CARACTERIZAÇÃO VISCOELÁSTICA POR MEIO DE ENSAIOS DE FLUÊNCIA E RUPTURA POR FLUÊNCIA DE COMPÓSITOS POLIMÉRICOS DE MATRIZ DE RESINA EPOXÍDICA E FIBRA DE CARBONO**. Dissertação de Mestrado—São Paulo : Universidade de São Paulo, 2009.

FERNANDES, L. F. et al. Sandy soil stabilization with asphalt emulsion for paving purposes. **RESEARCH, SOCIETY AND DEVELOPMENT**, v. 11, n. 1, p. e0711124274, jun. 2022.

FERREIRA, A. M. **Estudo de Três Solos Estabilizados com Uma Emulsão Asfáltica Catiônica**. Dissertação de Mestrado—Campina Grande: Universidade Federal da Paraíba, 1980.

FERRY, J. D. **Viscoelastic Properties of Polymers**. 3. ed. New York: John Wiley & Sons, 1980.

GAYTE, P. et al. Influence of transient effects for analysis of complex modulus tests on bituminous mixtures. **Road Materials and Pavement Design**, v. 17, n. 2, p. 271–289, 2 abr. 2016.

GODENZONI, C.; GRAZIANI, A.; PERRATON, D. Complex modulus characterisation of cold-recycled mixtures with foamed bitumen and different contents of reclaimed asphalt. **Road Materials and Pavement Design**, v. 18, n. 1, p. 130–150, 2 jan. 2017.

GOMES CORREIA, A. et al. **An approach to predict shear modulus of soils in the range of 10⁻⁶ to 10⁻² strain levels**. Fourth International Conference on Recent Advances In Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics. **Anais...**San Diego: 2001.

GONDIM, L. M. **Estudo experimental de misturas solo - emulsão aplicados as rodovias do agropolo do baixo Jaguaribe/Estado do Ceará**. Dissertação de Mestrado—Fortaleza: Universidade Federal do Ceará, 2008.

GUARCONI, D. S.; MATTOS, A. B. G.; GONÇALVES, N. R. **Estabilização de Solos com Betume - Técnicas de Execução**. REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 23. **Anais...**1988.

GUIMARÃES, R. C. **Barragens com núcleo de concreto asfáltico - Análise do comportamento mecânico e hidráulico do núcleo** . Tese de Doutorado —[s.l.] Universidade de Brasília , 2012.

GUIRELI NETTO, L. et al. **Comparação de dados obtidos por métodos geofísicos e ensaios de laboratório para determinação de velocidades de propagação de ondas sísmicas em barragem de terra compactada**. XX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica. **Anais...**Campinas - SP: 2020.

HEAD, K. H. **Manual of soil laboratory testing**. [s.l.] ELE. International limited, 1986. v. 3

HUANG, S.-C.; DI BENEDETTO, H. **Advances in Asphalt Materials**. Cambridge : Elsevier , 2015.

HUET, C. **Etude par une méthode d'impédance du comportement viscoélastique des matériaux hydrocarbonés**. Tese de Doutorado—Paris: Faculté des Sciences de l'université de Paris, 1963.

HUNTER, R. N. **Asphalts in road construction**. [s.l.] Thomas Thelford Ed. London, 2000.

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

JACINTHO, E. C. **ESTUDO DO COMPORTAMENTO DE MISTURAS SOLO-EMULSÃO PARA USO EM BARRAGENS**. Dissertação de Mestrado—Brasília: Universidade de Brasília, 2005.

JACINTHO, E. C. **ESTUDO DE PROPRIEDADES E COMPORTAMENTOS DE MISTURAS SOLO-EMULSÃO APLICADOS A BARRAGENS**. Tese de Doutorado—Brasília: Universidade de Brasília, 2010.

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

KHAN U, Z. A. et al. **Comparative study of asphalt concrete laboratory compaction methods to simulate field compaction** *Construction and Building Materials*. [s.l.: s.n.].

KIMOTO, S. et al. Cyclic Elastoviscoplastic Constitutive Model for Clay Considering Nonlinear Kinematic Hardening Rules and Structural Degradation. **International Journal of Geomechanics**, v. 15, n. 5, out. 2015.

KUNA, K.; GOTTUMUKKALA, B. Viscoelastic characterization of cold recycled bituminous mixtures. **Construction and Building Materials**, v. 199, p. 298–306, 28 fev. 2019.

KUVAT, A.; SADOGLU, E. Dynamic properties of sand-bitumen mixtures as a geotechnical seismic isolation material. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, v. 132, 1 maio 2020.

LAKES, R. S. **Viscoelastic Solids**. [s.l.] Ed CRC Press LLC, EUA, 1998.

LI, P. et al. Analysis of viscoelastic response and creep deformation mechanism of asphalt mixture. **Construction and Building Materials**, v. 171, p. 22–32, 20 maio 2018.

LIMA, F. C. **ESTUDO DOS PROCESSOS DE COMPACTAÇÃO E DOSAGEM DE MISTURAS ENTRE SOLO ARENOSO E EMULSÃO ASFÁLTICA**. Dissertação de Mestrado—Fortaleza: Universidade Federal do Ceará, 2016.

MAHTO, A. K. et al. Increase the Shear Strength of Soil Using Bitumen Emulsion to Strengthening of Sub-structure. **International Journal of Architectural Heritage**, v. 2, n. 1, 2019.

MANGIAFICO, S. et al. Nonlinearity of bituminous mixtures. **Mechanics of Time-Dependent Materials**, v. 22, n. 1, p. 29–49, 1 fev. 2018.

MERCADO, R.; FUENTES, L. Measure of asphalt emulsions stability by oscillatory

rheology. **Construction and Building Materials**, v. 155, p. 838–845, 30 nov. 2017.

MEZGER, T. G. **The Rheology Handbook**. 4. ed. Hanover, Germany: Vincentz Network, 2014.

MICELI JUNIOR, G. **Comportamento de solos do Estado do Rio de Janeiro estabilizado com emulsão asfáltica**. Dissertação de Mestrado—Rio de Janeiro: Instituto Militar de Engenharia, 2006.

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

MOUNIER, D.; DI BENEDETTO, H.; SAUZÉAT, C. Determination of bituminous mixtures linear properties using ultrasonic wave propagation. **Construction and Building Materials**, v. 36, p. 638–647, nov. 2012.

NASSAR, A. I. et al. Mechanical, durability and microstructure properties of Cold Asphalt Emulsion Mixtures with different types of filler. **Construction and Building Materials**, v. 114, p. 352–363, 1 jul. 2016.

NGUYEN, Q. T.; DI BENEDETTO, H.; SAUZÉAT, C. Linear and nonlinear viscoelastic behaviour of bituminous mixtures. **Materials and Structures/Materiaux et Constructions**, v. 48, n. 7, p. 2339–2351, 18 jul. 2015.

NINOMIYA, K.; FERRY, J. D. Some approximate equations useful in the phenomenological treatment of linear viscoelastic data. **Journal of Colloid Science**, v. 14, n. 1, p. 36–48, 1959.

NUNES, V. A.; BORGES, P. H. R.; ZANOTTI, C. Mechanical compatibility and adhesion between alkali-activated repair mortars and Portland cement concrete substrate. **Construction and Building Materials**, v. 215, p. 569–581, 10 ago. 2019.

NUR, N. I. et al. Modelling the rheological properties of bituminous binders using the 2S2P1D Model. **Construction and Building Materials**, v. 38, p. 395–406, jan. 2013a.

NUR, N. I. et al. Modelling the rheological properties of bituminous binders using the 2S2P1D Model. **Construction and Building Materials**, v. 38, p. 395–406, jan. 2013b.

OLARD, F.; DI BENEDETTO, H. General “2S2P1D” Model and Relation Between the Linear Viscoelastic Behaviours of Bituminous Binders and Mixes. **Road Materials and Pavement Design**, v. 4, n. 2, p. 185–224, 1 jan. 2003.

OLIVEIRA, L. S. et al. Linear viscoelasticity and fatigue life: Relationships between properties of asphalt binders and corresponding mixtures. **Construction and Building Materials**, v. 372, p. 130685, 2023.

PAPAZIAN, H. S. **The response of linear viscoelastic materials in the frequency domain with emphasis on asphaltic concrete**. International conference on the structural design of asphalt pavements. **Anais...Michigan** : 1962.

PARK, S. W.; SCHAPERLY, R. A. Methods of interconversion between linear viscoelastic material functions. Part I a numerical method based on Prony series. **International Journal of Solids and Structures**, v. 36, p. 1653–1675, 1999.

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**. Dissertação de Mestrado—Fortaleza: Universidade Federal do Ceará, 2018.

PÉREZ, I. et al. Numerical simulation of bitumen emulsion-stabilised base course mixtures with C&D waste aggregates considering nonlinear elastic behaviour. **Construction and Building Materials**, v. 249, 20 jul. 2020.

PERRATON, D. et al. Three-Dimensional Linear Viscoelastic Properties of Two Bituminous Mixtures Made with the Same Binder. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 30, n. 11, nov. 2018.

PETERSON, R. L. et al. Superpave Laboratory Compaction Versus Field Compaction. **Transportation Research Record**, v. 1832, p. 201–208, 2003.

PINTO, C. S. **Curso Básico de Mecânica dos Solos**. 3ª ed. [s.l.] 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**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civi)—Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 2008.

POUEGET, S. et al. **Prediction of isotropic linear viscoelastic behavior for bituminous materials – forward and inverse problems**. EURASPHALT AND EUROBITUME CONGRESS, 5º, 2012, Istambul. Proceedings V EEC. **Anais...Istambul: EEC: 2012**.

REBELO, E. DE P. **Estudo de mistura solo-emulsão para a região de Urucu (Coari-AM)**. Dissertação de Mestrado—[s.l.] Universidade Federal do Amazonas, 2009.

RODRIGUES, P. M. B.; DANTAS NETO, S. A.; BABADOPULOS, L. F. DE A. L. Avaliação do comportamento cisalhante de misturas solo-emulsão com teores de emulsão variando de 16% a 28% em massa. **Revista Matéria**, v. 28, n. 2, 2023.

RUIZ, J. F. et al. Influence of non-linear soil properties on railway critical speed. **Construction and Building Materials**, v. 335, n. 13, p. 127485, jun. 2022.

SAMPAIO, M. G. **Comportamento mecânico e hídrico de solos estabilizados com emulsão asfáltica**. Dissertação de Mestrado—Campinas: Universidade Estadual de Campinas, 2008.

S.ANDAVAN; B. MANEESHKUMAR. Case study on soil stabilization by using bitumen emulsions – A review. **Materials Today: Proceedings**, v. 22, n. 3, p. 1200–1202, jan. 2020.

SANT'ANA, W. C. **Contribuição ao estudo de solo - emulsão em pavimentos de rodovias de baixo volume de tráfego para o Estado do Maranhão**. Tese de Doutorado—São Paulo: Universidade de São Paulo, 2009.

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

SANTOS, J. A. **Soil characterisation by dynamic and cyclic torsional shear tests. Application to the study of piles under lateral static and dynamic loadings.** Tese de Doutorado—Lisboa, Portugal: Technical University of Lisbon, 1999.

SANTOS, W. J. **Avaliação do uso de emulsão asfáltica na estabilização química de três solos de Sergipe.** Dissertação de Mestrado—Campina Grande: Universidade Federal de Campina Grande, 2009.

SARAJPOOR, S.; GHALANDARZADEH, A.; KAVAND, A. Dynamic behavior of sand-bitumen mixtures using large-size dynamic hollow cylinder tests. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, v. 147, 1 ago. 2021.

SAYEGH, G. **Variation des modules de quelques bitumes purs et bétons bitumineux.** Paris: Faculté des Sciences de l'université de Paris, 1965.

SCHAPERLY, R. A.; PARK, S. W. Methods of interconversion between linear viscoelastic material functions. Part II an approximate analytical method. **International Journal of Solids and Structures**, v. 36, p. 1677–1699, 1999.

SILVA, H. N. **Caracterização viscoelástica linear de misturas asfálticas: Operacionalização Computacional e Análise pelo Método dos Elementos Finitos.** Dissertação de Mestrado—Fortaleza: Universidade Federal do Ceará, 2009.

SOARES, J. B.; SOUZA, F. V. **Considerações sobre módulo resiliente e módulo dinâmico em misturas asfálticas com base na teoria da viscoelasticidade.** XII Congresso Ibero-Latinoamericano do Asfalto. **Anais...** Quito: 2003.

SOLIZ, V. V. P. **Estudo de três solos estabilizados com emulsão asfáltica.** Dissertação de Mestrado—Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2007.

SUAREZ, D. A. A. **Estudo do comportamento mecânico de dois solos lateríticos do Estado de São Paulo com adição de emulsão asfáltica.** Dissertação (Mestrado) —São Carlos: Universidade de São Paulo, 2008.

SULTANOV, K. et al. **Variable moduli of soil strain.** E3S Web of Conferences. **Anais...**EDP Sciences, 29 maio 2019.

TIOUAJNI, S. et al. Approximation of Linear Viscoelastic Model in the 3 Dimensional Case with Mechanical Analogues of Finite Size: Application to Bituminous Materials. **Road Materials and Pavement Design**, v. 12, n. 4, p. 897–930, 1 jan. 2011.

VALLIAPPAN, S. **Continuum Mechanics Fundamentals.** [s.l: s.n.].

WANG, H. et al. Investigation of asphalt mixture permanent deformation based on three-dimensional discrete element method. **Construction and Building Materials**, v. 272, 22 fev. 2021.

WANG, Y.; CAO, Z.; LI, D. Bayesian perspective on geotechnical variability and site characterization. **Engineering Geology**, v. 203, p. 117–125, 25 mar. 2016.

WASFI AL-MISTAREHI, B.; KHADAYWI, T. S.; KHALED HUSSEIN, A. **Investigating the effects on creep and fatigue behavior of asphalt mixtures with recycled materials as**

fillers. Journal of King Saud University - Engineering Sciences King Saud University, , 1 jul. 2021.

WILLIAMS, M. L. Structural analysis of viscoelastic materials. **American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA) Journal**, v. 2, n. 5, p. 785–808, 1964.

WILLIAMS, M. L.; LANDEL, R. F.; FERRY, J. D. The temperature dependence relaxation mechanism in amorphous polymers and other glass forming liquids. **Journal of ACS**, v. 77, p. 3701, 1955.

YUSOFF, N. I.; SHAW, M. T.; AIREY, G. D. Modelling the linear viscoelastic rheological properties of bituminous binders. **Construction and Building Materials**, v. 25, n. 5, p. 2171–2189, 2011.

ZHANG, Y.; LUO, R.; LYTTON, R. L. Characterizing permanent deformation and fracture of asphalt mixtures by using compressive dynamic modulus tests. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 24, n. 7, p. 898–906, 2012.