

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

Leonardo Brizolla de Mello

**COMPORTAMENTO REOLÓGICO DE UM SOLO ARGILOSO
LATERÍTICO COMPACTADO**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Santa Maria, RS

2022

Leonardo Brizolla de Mello

**COMPORTAMENTO REOLÓGICO DE SOLO ARGILOSO LATERÍTICO
COMPACTADO**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, do Centro de Tecnologia da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito para a obtenção do título de **Mestre em Engenharia Civil**.

Orientador: Prof. Dr. Magnos Baroni

Santa Maria, RS

2022

Leonardo Brizolla de Mello

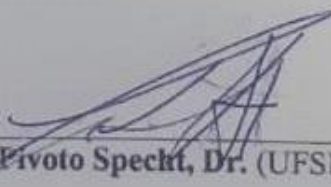
COMPORTAMENTO REOLÓGICO DE UM SOLO ARGILOSO LATERÍTICO COMPACTADO

Dissertação apresentado ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, do Centro de Tecnologia da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito para obtenção do título de **Mestre em Engenharia Civil**.

Aprovado em 20 de janeiro de 2022:



Magnos Baroni, Dr. (UFSM)
(Presidente/Orientador)



Luciano Pivoto Specht, Dr. (UFSM)



Lucas Feitosa de Albuquerque Lima Babadopulos, Dr. (UFC)

Santa Maria, RS
2022

Mello, Leonardo Brizolla de
COMPORTAMENTO REOLÓGICO DE SOLO ARGILOSO LATERÍTICO
COMPACTADO / Leonardo Brizolla de Mello.- 2022.
124 p.; 30 cm

Orientador: Magnos Baroni
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil, RS, 2022

1. Reologia 2. Solo Laterítico 3. Pavimentação 4.
Módulo de Resiliência 5. Relação I. Baroni, Magnos II.
Título.

Sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFSM. Dados fornecidos pelo autor(a). Sob supervisão da Direção da Divisão de Processos Técnicos da Biblioteca Central. Bibliotecária responsável Paula Schoenfeldt Patta CRB 10/1728.

Declaro, LEONARDO BRIZOLLA DE MELLO, para os devidos fins e sob as penas da lei, que a pesquisa constante neste trabalho de conclusão de curso (Dissertação) foi por mim elaborada e que as informações necessárias objeto de consulta em literatura e outras fontes estão devidamente referenciadas. Declaro, ainda, que este trabalho ou parte dele não foi apresentado anteriormente para obtenção de qualquer outro grau acadêmico, estando ciente de que a inveracidade da presente declaração poderá resultar na anulação da titulação pela Universidade, entre outras consequências legais.

DEDICATÓRIA

Aos meus pais e familiares, por fazerem o possível e impossível pela minha educação. À minha namorada, que arquitetou junto comigo cada passo deste ciclo. Aos meus amados amigos de Santa Maria e Camobi, que em momento algum pouparam esforços para me dar todo suporte necessário.

AGRADECIMENTOS

Nem nos meus melhores sonhos poderia imaginar que esse dia chegaria. Foi um processo longo e árduo, cheio de percalços e mudanças de rotas, mas nunca deixei de ter a certeza de que era justamente isso que eu queria para mim. Essa convicção só se constituiu por conta de tantas pessoas maravilhosas que de uma forma ou outra me apoiaram no decorrer desta jornada, as quais eu preciso dizer GRACIAS MIL.

Primeiramente, preciso externar a minha gratidão a Deus, Patrão dos Céus, que me deu o dom da vida e colocou pessoas incríveis na minha vida. Sem Ti, meu pai, de nada valeria cada segundo investido neste projeto. Agradeço-Te pela saúde e pelas inúmeras bênçãos que vivi enquanto estudante de pós-graduação.

Minha primeira gratidão é a ANP PETROBRAS por viabilizar a execução dos ensaios com equipamentos de primeira geração a todo GEPPASV. Minha gratidão é também a esse grupo incrível com o qual eu tive o privilégio de desenvolver diferentes habilidades e crescer pessoalmente e profissionalmente.

Agradeço aos meus pais e irmã por serem a minha base e o meu porto seguro, seguraram as pontas no período pré e pós-bolsa. Aguentaram “no osso do peito” a dor causada pela distância e souberam que o melhor caminho era especializar-me na área que eu mais amo. Aceitaram-me de volta em casa no momento que precisei priorizar o mestrado e novamente voltaram a ser meus locadores (risos).

Minha namorada, Bibiana Amaral, gratidão por todo carinho, amor e compreensão. Passamos por altos e baixos, mas estive sempre segurando a minha mão, acreditando na minha capacidade e potencial, e jamais permitiu que alguém desacreditasse deste sonho. Além de tudo, ganhou a oportunidade de ser a minha estagiária durante todos os finais de semana e feriados de janeiro a junho. Estivemos juntos até no laboratório, indo a altas horas da madrugada, quando o trabalho me impossibilitava de estar presente nos horários convencionais.

Muito obrigado, Magnos Baroni, por abraçar este jovem que aqui escreve e ter me incumbido este desafio de explorar o novo e o desconhecido. Grato pela compreensão e torcida para com minhas atividades extraclasse. Apoiou minhas decisões e fez o possível e o impossível para viabilizar todos os processos e ações para que esse momento chegasse.

Meus queridos amigos, Ma. Paula (@ptpascoal), eng. Lucas (vamo time), futura Ma. Gabriéli (filha do ChiChi – leia-se “quiqui”) e eng. Marcelo (@mabraida), irmãos do dia a dia, parceiros de boas prosas e para levantar o meu astral independente da hora e do dia. Vocês foram muito “mais que amigos, friends”.

Especialmente à minha amiga, @ptpascoal, preciso deixar o meu agradecimento por todos os desafios que topou vencer comigo. Além de uma mãezona desde os tempos da minha graduação, foi alguém com quem dividi sonhos, experiências e expectativas. Construímos juntos o Pavimentei e com ele pavimentamos, durante um ano, muito conhecimento e conteúdo legal para aqueles que nos acompanharam nas redes sociais. #VoltaPavimentei.

A minha gratidão também ao nosso futuro doutor, Schuster, vulgo pai Silvio. Abraçou-me logo depois da defesa da minha qualificação e possibilitou que qualquer FUNDAMENTAL detalhe relacionado à reologia acontecesse. Partiu com ideias e soluções para todo e qualquer problema, além de, que com ele, nunca houve tempo ruim, inclusive nos sábados, domingos e feriados, ou horários “pós-expediente” do laboratório.

Família Cantareli Arrivabene, meu muito obrigado. Acolheram-me no espaço de vocês e me possibilitaram experiências maravilhosas em Camobi. De uma carona para um show, até um abraço amigo para minimizar a saudade do meu pago. Tia Édila, tio Marcelo, Igã e Will, vocês podem contar sempre e em qualquer circunstância comigo. Aliás, o Will que é o cara diferenciado do Triopacito, foi até meu colega de apartamento, junto com o nosso futuro médico Emerson Júnior Anastácio, tão parte da família quanto qualquer outro supracitado.

Valmir Beltrame, o ser humano mais iluminado da história do Sul do Mundo. Apresentou-me às melhores pessoas, aconselhou-me quando a decisão era difícil e sempre nos dias que em Santa Maria havia sido tenebroso de quente, e só um climatizador podia salvar, deu-me poso, boia e caronas. Ainda em tantas outras possibilidades recebeu a mim e a minha família de braços abertos na sua casa, principalmente durante o primeiro semestre de 2021.

Minha tia e madrinha Dra. Margarete que me oportunizou grandes crescimentos dentro da área do marketing e exposição da minha marca pessoal. Conselheira em decisões envolvendo estudos, e motivadora para os novos e diferentes desafios. Meu tio e padrinho Dr. César Winter de Mello, pessoa que me motivou mesmo que de forma inconsciente a seguir seus passos e me ajuda a não ser tão medroso na tomada de decisões que envolvem qualquer área da engenharia.

Por fim, e não menos importante, muito obrigado à minha vovó Dulcina, que além de fazer toda a correção do Português desse documento (exceto dos agradecimentos, perceberam, né?), sempre me incentivou a amar a comunicação nas suas mais variadas formas. Se eu estou aqui e com as oportunidades que tenho hoje, sem dúvidas, tu tens pelo menos 50% da culpa (os 50 restantes coloca na conta da mãe). Aprendi contigo a amar a expressão através da escrita e hoje, muito da qualidade deste trabalho, passou por você.

RESUMO

COMPORTAMENTO REOLÓGICO DE UM SOLO ARGILOSO LATERÍTICO COMPACTADO

AUTOR: Leonardo Brizolla de Mello
ORIENTADOR: Prof. Dr. Magnos Baroni

Esta pesquisa objetiva avaliar possíveis relações entre os ensaios reológicos e módulo de resiliência, destinados à compreensão do comportamento de materiais terrosos compactados em pavimentos. Foi selecionado à coleta, amostras amolgadas de um solo argiloso laterítico, com prévia caracterização química, física e mecânica, da cidade de Cruz Alta (RS) e com ampla aplicação em estruturas de subleito rodoviário. O comportamento reológico foi ponderado em um total de noventa amostras divididas entre os ensaios de varredura de amplitude (AS) e ensaios de varredura de frequência (FS). Foram analisados os espécimes moldados nas três diferentes energias de compactação (normal, intermediária e modificada), atingidas a partir da massa específica aparente seca máxima, e cinco variações padrões de umidade em torno do teor ótimo de cada energia, caracterizados por $W_{ót}-4\%$, $W_{ót}-2\%$, $W_{ót}$, $W_{ót}+2\%$ e $W_{ót}+4\%$. A proposta de avaliação de materiais compactados pelos testes de varredura de amplitude, possibilitaram compreender que o ideal para solos compactados é a moldagem dos corpos de prova na geometria de torção de barras. Esse ensaio ainda permite inferir que os intervalos do limite viscoelástico linear (VEL) do solo CA podem atingir uma tensão cisalhante igual a 0,005%. O AS revelou que, para deformações cisalhantes muito baixas, há uma ineficiência de leitura por parte do reômetro. Em valores que excedem o VEL, os elementos apresentam queda de rigidez pelo aumento de deformações plásticas não recuperáveis, que passam a dominar seu comportamento e, posteriormente, levam-no à ruptura frágil a δ inferiores a sete graus. Os ensaios de FS trabalharam com as amostras no VEL. Esses revelaram que os solos são materiais viscoelásticos mesmo em frequências mais baixas. A partir desse, verifica-se o quão susceptíveis são as amostras à variação de frequência e umidade, os quais precisam ser ponderados em dimensionamentos de pavimentos. A partir desse ensaio, foram plotadas curvas mestras, denominadas isogrócopas, considerando a superposição parcial frequência – umidade, com $|G^*|$ em função da frequência transladada no eixo x dos gráficos por *shift factor*, que permitiram estimar o comportamento resiliente do material em uma frequência de 10Hz. Esse translado possibilitou, ainda, identificar que a susceptibilidade à variação da umidade é muito semelhante entre as diferentes energias de compactação. Com a conversão dos módulos resilientes em módulos cisalhantes, verifica-se que o modelo matemático de Svenson, por não considerar a ação de tensões confinantes se mostrou eficaz quando comparado ao Universal (modelo que melhor representou o comportamento resiliente do solo) para a energia intermediária e modificada. Finalmente, compreendeu-se que, apesar das limitações dadas pelas diferentes características dos ensaios de MR e FS, como as distintas formas de aplicação dos carregamentos e a existência de tensões confinantes nos ensaios reológicos, as relações se mostraram promissoras para a investigação expedita do comportamento quanto a rigidez de solos compactados destinados à pavimentação.

Palavras-chave: Reologia. Solo Laterítico. Pavimentação. Módulo de Resiliência. Relação.

ABSTRACT

RHEOLOGICAL BEHAVIOR OF COMPACTED LATERITIC CLAY SOIL

AUTHOR: Leonardo Brizolla de Mello

ADVISOR: Prof. Dr. Magnos Baroni

This research aims to evaluate possible relations between rheological tests and those carried out on resilient modulus tests, aimed at understanding the performance of compacted earth materials in pavements. Samples dented from a lateritic clayey soil were selected for the collection, with previous chemical, physical and mechanical characterization, from the city of Cruz Alta (RS) and with wide application in road subgrade structures. The rheological performance was weighted in a total of ninety samples divided between the amplitude sweep test (AS) and frequency sweep test (FS). Specimens molded in three different compaction energies (normal, intermediate, and modified), and five standard moisture variations around the optimum content of each energy, characterized by $W_{ót}-4\%$, $W_{ót}-2\%$, $W_{ót}$, $W_{ót}+2\%$, and $W_{ót}+4\%$ were analyzed. The proposal to evaluate compacted materials by amplitude sweep tests made it possible to understand that the ideal for compacted soils is the molding of specimens in the torsion geometry of bars. This test also allows us to infer that the intervals of the linear viscoelastic limit (VEL) of the CA soil can reach a shear strain common to all samples equal to 0.005%. The AS also revealed that for very low shear strain, there is an inefficiency of reading by the rheometer. At values that exceed the VEL, the elements show a drop in stiffness due to the increase in non-recoverable plastic deformations, which come to dominate their behavior and subsequently lead to brittle failure at δ below seven degrees. FS assays worked with samples at VEL. These revealed that soils are viscoelastic materials even at lower frequencies. From this, it is verified how susceptible the samples are to frequency and humidity variation, which need to be considered in pavement design. From this test, master curves, called isogróopes, were plotted, considering the partial overlapping frequency - humidity, with $|G^*|$ as a function of the frequency translated on the x-axis of the graphs by shift factor, which allowed estimating the resilient behavior of the material in a frequency of 10Hz. This translation also made it possible to identify that the susceptibility to moisture variation is very similar between the different compaction energies. With the conversion of the resilient modules into shear modules, it appears that the mathematical model of Svenson, for not considering the action of confining stresses, proved to be effective when compared to the Universal (model that best represented the resilient behavior of the soil) for the intermediate energy and modified. Finally, it was understood that, despite the limitations given by the different characteristics of the MR and FS tests, such as the different ways of applying the loads and the existence of confining stresses in the rheological tests, the relationships proved to be promising for the expeditious investigation of the behavior regarding the rigidity of compacted soils intended for paving.

Keywords: Rheology. Lateritic Soil. Pavement. Resilient Modulus. Relation

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Pavimento flexível sob atuação de roda.....	20
Figura 2 – Tipos mais comuns de ferramentas à avaliação reométrica.....	30
Figura 3 – Placas paralelas para ensaio de cisalhamento oscilatório	31
Figura 4 – Módulo G' e módulo G'' (a) e fator de perda (b).....	33
Figura 5 – Deformação em função do tempo com frequência constante	34
Figura 6 – Definição do VEL de uma amostra viscoelástica no estado sólido	35
Figura 7 – Géis de amido de milho com ruptura frágil (S1) e ruptura gradual (S2)	35
Figura 8 – Deformação em função do tempo com frequência constante	36
Figura 9 – Definição do VEL de uma amostra viscoelástica no estado sólido	37
Figura 10 – Equipamento triaxial de cargas repetidas.....	39
Figura 11 – Esquema da pesquisa.....	46
Figura 12 – Localização da jazida CA.....	47
Figura 13 – Jazida - detalhamento dos horizontes (a) e solo coletado de CA (b).....	48
Figura 14 – Curvas granulométricas com e sem defloculante do solo CA.....	49
Figura 15 – MEAS máx e Wót do solo de CA	51
Figura 16 – Reômetro modular compacto	52
Figura 17 – Dispositivo de ensaio de placas paralelas	53
Figura 18 – Dispositivo de ensaio de torção de barras	53
Figura 19 – Molde cilíndrico metálico para PP (a) e compactador PP (b).....	55
Figura 20 – Conjunto para PP (a) em processo de compactação (b).....	56
Figura 21 – CP sendo extraído após compactação, d=40mm e h=10 mm	57
Figura 22 – Base (a), laterais, espaçadores centrais (b) e cobertura metálica (c).....	58
Figura 23 – Corpo de prova sobre base rígida.....	59
Figura 24 – Equipamento triaxial de cargas repetidas.....	64
Figura 25 – Contato ineficiente da placa superior com o topo do corpo de prova.....	72
Figura 26 – Elevação da força normal para melhorar vínculo entre placa-amostra.....	73
Figura 27 – Experimentos com <i>gap</i> de 40 mm.....	74
Figura 28 – Destaque aos ganchos usados para torção de barras sólidas	74
Figura 29 – Amostra com fratura inicial (a), mediana (b) e completa (c).....	75
Figura 30 – Ensaio de varredura de amplitude a 4% abaixo do teor ótimo.....	76
Figura 31 – Ensaio de varredura de amplitude a 2% abaixo do teor ótimo.....	77
Figura 32 – Ensaio de varredura de amplitude no teor ótimo	78
Figura 33 – Ensaio de varredura de amplitude a 2% acima do teor ótimo.....	80
Figura 34 – Ensaio de varredura de amplitude a 4% acima do teor ótimo.....	81
Figura 35 – Ensaio de varredura de amplitude para CPs moldados na energia normal	82
Figura 36 – Efeito da não linearidade - EN	83
Figura 37 – VEL na EN (a) e <i>close</i> nas curvas NWót-2%, NWót e NWót+2% (b).....	84
Figura 38 – Ensaio de varredura de amplitude para CPs moldados na energia intermediária .	85
Figura 39 – Efeito da não linearidade - EI.....	86
Figura 40 – VEL na energia intermediária	86
Figura 41 – Ensaio de varredura de amplitude para CPs moldados na energia modificada....	87
Figura 42 – Efeito da não linearidade - EM	88
Figura 43 – VEL na energia modificada	89
Figura 44 – Teste de varredura de frequência energia normal	91

Figura 45– Ângulo de fase em função da frequência à energia normal.....	93
Figura 46 – <i>Teste de varredura de frequência</i> energia intermediária.....	93
Figura 47 – Ângulos de fase em função da frequência à energia intermediária	95
Figura 48 – Teste de varredura de frequência energia modificada	96
Figura 49 – Ângulo de fase em função da frequência à energia modificada	97
Figura 50 – Curva mestra energia normal.....	99
Figura 51 – <i>Shift factor</i> em função da variação de umidade EN	100
Figura 52 – Curva mestra energia intermediária.....	101
Figura 53 – <i>Shift factor</i> em função da variação de umidade EI.....	102
Figura 54 – Curva mestra energia modificada	103
Figura 55 – <i>Shift factor</i> em função da variação de umidade EM.....	104
Figura 56 – Curvas mestras nas diferentes energias de compactação.....	105
Figura 57 – <i>Shift factor</i> em função da variação de umidade.....	106

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Análise granulométrica média do solo CA.....	50
Tabela 2 – Condições equivalente dos ensaios.....	54
Tabela 3 – Massa de solo a ser compactado no dispositivo PP.....	56
Tabela 4 – Massa de solo a ser compactado para amostras em torção de barras	59
Tabela 5 – Nomenclatura e quantidade de amostras em placas paralelas ao AS	60
Tabela 6 – Nomenclatura e quantidade de amostras em torção de barras ao AS	61
Tabela 7 – Nomenclatura e quantidade de amostras em torção de barras ao FS.....	62
Tabela 8 – Frequências estipuladas para o AS	62
Tabela 9 – Denominações adotadas aos modelos propostos	65
Tabela 10 – Sequência de tensões no condicionamento e de pares para obtenção do MR	66
Tabela 11 – Resumo das características dos CP's moldados para o ensaio de MR	67
Tabela 12 – Coeficientes de regressão não linear dos ensaios de MR – EN.....	67
Tabela 13 – Coeficientes de regressão não linear dos ensaios de MR – EI	68
Tabela 14 – Coeficientes de regressão não linear dos ensaios de MR – EM	68
Tabela 15 – Valores notórios de $ G^* $ para AS, $W_{ót}$ -4%	76
Tabela 16 – Valores notórios de $ G^* $ para AS, $W_{ót}$ -2%	78
Tabela 17 – Valores notórios de $ G^* $ para AS, $W_{ót}$	79
Tabela 18 – Valores notórios de $ G^* $ para AS, $W_{ót}$ +2%	80
Tabela 19 – Valores notórios de $ G^* $ para AS, $W_{ót}$ +4%	81
Tabela 20 – Mediana, primeiro e terceiro quartil de módulo de armazenamento x deformação cisalhante - AS na energia normal	84
Tabela 21 – Mediana, primeiro e terceiro quartil de módulo de armazenamento x deformação cisalhante - AS na energia intermediária	85
Tabela 22 – Mediana, primeiro e terceiro quartil de módulo de armazenamento x deformação cisalhante - AS na energia modificada	88
Tabela 23 – Intervalos do limite viscoelástico linear das amostras.....	89
Tabela 23 – Intervalos do limite viscoelástico linear das amostras.....	90
Tabela 25 – Resumo dos valores de $ G^* $ para FS na energia normal.....	92
Tabela 26 – Mediana, primeiro e terceiro quartil de módulo de armazenamento x deformação cisalhante - FS na energia normal	92
Tabela 27 – Resumo dos valores de $ G^* $ para FS na energia intermediária.....	94
Tabela 28 – Mediana, primeiro e terceiro quartil de módulo de armazenamento x deformação cisalhante – FS na energia intermediária	94
Tabela 29 – Resumo dos valores de $ G^* $ para FS na energia modificada	96
Tabela 30 – Mediana, primeiro e terceiro quartil de módulo de armazenamento x deformação cisalhante - FS na energia modificada	97
Tabela 31 – Resumo dos valores de MR convertidos em módulo de cisalhamento	98
Tabela 32 – Valores de shift factor utilizados à energia normal	100
Tabela 33 – Valores de shift factor utilizados à energia intermediária	102
Tabela 34 – Valores de shift factor utilizados à energia modificada.....	103

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AASHTO	<i>American Association of Highway and Transportation Officials</i>
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AEMC	Análise elástica de múltiplas camadas
ANP	Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
AS	Ensaio de varredura de amplitude
ATR	Afundamento em trilha de Roda
CA	Cruz Alta
CD	Com uso de defloculante
cm	Centímetros
CP	Corpo de prova
CSD	<i>Controlled Shear Deformation</i>
CSS	<i>Controlled Tensão cisalhante</i>
DMA	<i>Dynamic-mechanic analysis</i>
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
DP	Deformação Permanente
E	Módulo de Young
EI	Energia intermediária
EM	Energia modificada
EN	Energia normal
ETCR	Ensaio triaxial de cargas repetidas
FS	Ensaio de varredura de frequência
G	Módulo de cisalhamento
G*	Módulo complexo
G*	Magnitude do módulo complexo
G'	Módulo de armazenamento
G''	Módulo de perda
GEPPASV	Grupo de Estudos em Pavimentação e Segurança Viária
h	<i>Gap</i>
Hz	Hertz
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IG	Índice de grupo
IPR	Instituto de Pesquisas Rodoviárias
ISC	Índice de suporte Califórnia
LG'	Solo Argiloso Laterítico
LL	Limite de liquidez
LMCC	Laboratório de Materiais de Construção Civil
LP	Limite de plasticidade

LVDT	<i>Linear Variable Differential Transformer</i>
VEL	Limite viscoelástico linear
MEAS	Massa específica aparente seca
MCT	Miniatura compactada tropical
ME	Método de Ensaio
MeDiNa	Método de Dimensionamento Nacional
MH	Silte com elevada plasticidade
mm	Milímetros
MPa	Mega Pascal
MR	Módulo de Resiliência
N	Newton
Pa	Pascal
pH	Potencial hidrogênico
PP	Dispositivo de placas paralelas
RDT	<i>Rectilinear Displacement Transduce</i>
SD	Sem uso de defloculante
SF	<i>Shift factor</i>
SUCS	Sistema unificado de classificação de solos
τ	Tensão cisalhante
τ_A	Amplitude de tensão cisalhante
τ_B	Ponto de escoamento de Bingham
τ_{VEL}	Tensão cisalhante no final do intervalo VEL
τ_y	Tensão de escoamento
tg δ	Fator de perda
TB	Dispositivo de torção de barras sólidas
TRB	<i>Transportation Research Board</i>
UFMS	Universidade Federal de Santa Maria
Wót	Umidade ótima
°C	Graus Celsius
σ_1	Tensão principal
σ_3	Tensão confinante
σ_d	Tensão desvio
ϵ_r	Deformação de natureza elástica
ϵ_p	Deformação de natureza plástica
δ	Ângulo de deslocamento fase
η_B	Coefficiente de fluxo de Bingham
γ	Deformação cisalhante
γ_B	Amplitude da deformação
γ_L	Limite de deformação
$\dot{\gamma}$	Taxa de deformação cisalhante

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	OBJETIVOS	17
1.2	ESTRUTURA DO TRABALHO	17
2	REVISÃO DE LITERATURA	19
2.1	MECÂNICA DOS PAVIMENTOS	19
2.2	MATERIAIS TERROSOS EMPREGADOS NA PAVIMENTAÇÃO	22
2.3	ANÁLISE MECÂNICA POR REOLOGIA	23
2.3.1	Interação interpartículas de solo	23
2.3.2	Aglomerção dos solos	24
2.3.3	Análise micromecânica	25
2.3.4	Reologia em solos	26
2.3.5	Princípios da reologia	28
2.3.6	Reometria	29
2.3.6.1	<i>Varredura de amplitude - amplitude sweep test</i>	34
2.3.6.2	<i>Varredura de frequência - frequency sweep test</i>	37
2.4	ANÁLISE MECÂNICA	37
2.4.1	Ensaio triaxiais de cargas repetidas	38
3	METODOLOGIA	45
3.1	PLANEJAMENTO DA PESQUISA	45
3.2	MATERIAIS UTILIZADOS	47
3.3	CARACTERIZAÇÕES DOS MATERIAIS TERROSOS	48
3.3.1	Caracterização física do solo	48
3.3.2	Classificação do solo	50
3.3.3	Compactação do solo	50
3.4	ESTUDO REOLÓGICO	52
3.4.1	Dispositivo de placas paralelas (PP)	54
3.4.2	Dispositivo torção de barras sólidas (TB)	57
3.4.3	Teste de Varredura de Amplitude	59
3.4.4	Teste de Varredura de Frequência	61
3.4.5	Análise estatística dos parâmetros reológicos	63
3.5	ENSAIOS TRIAXIAIS PARA OBTENÇÃO DE MÓDULO RESILIENTE	63
3.6	RELAÇÃO ENTRE MÓDULO DE RESILIÊNCIA E teste de varredura de frequência	69
4	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	71
4.1	ENSAIO DE ENSAIO DE VARREDURA DE AMPLITUDE	71
4.1.1	AS no dispositivo de placas paralelas (PP)	71
4.1.2	AS no dispositivo de torção de barras (TB)	74
4.2	ENSAIO DE VARREDURA DE FREQUÊNCIA - FS	90
4.2.1	FS no dispositivo de torção de barras (TB)	90
4.2.2	Curvas mestras	98
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	107
5.1	CONCLUSÕES	107
5.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	110
	REFERÊNCIAS	111
	APÊNDICE A – Análise estatística ensaio de varredura de amplitude	121
	APÊNDICE B – Análises estatísticas do ensaio de varredura de frequência	123

1 INTRODUÇÃO

A análise reológica de solo é um exemplo pertinente de ensaios que utilizam menores quantidades de material, sem demandar muito tempo de execução e permitem ampliar a compreensão dos fenômenos de deformação. Sabe-se que o comportamento em escalas meso e macro são influenciadas em grande parte pela organização microestrutural, assim, análises físicas como a reologia de solos podem ser uma excelente alternativa para se romper as barreiras da carência de análises fundamentadas em ensaios.

Segundo Khaydapova, Milanovski & Shein (2015), a reometria é uma técnica que é empregada a fim de compreender a reação interna do solo através das tensões aplicadas externamente, as quais derivam dos contatos intergranulares, de forma a quantificar a resistência estrutural do solo por meio de relações tensão-deformação. Desse modo, essa técnica permite relacionar a deformação do solo com a mineralogia e tamanho das partículas, concentração e tipo de íons, presença de matéria orgânica e teor de água no solo (MARKGRAF; HORN, 2009).

Nesse contexto, as aplicações de técnicas reológicas ainda são pouco difundidas no cenário nacional. Somado a isso, é observado uma ampla variedade textural e mineralógica dos solos, o que torna os comportamentos mecânicos dos materiais ainda mais diversos, com grande dependência de suas aplicações, resultando em uma elevada variedade de parâmetros a serem considerados.

Grande parcela dos estudos reológicos conhecidos em solos visa tratar de distribuições em uma faixa limitada de composição água e sólidos, a fim de atender à indústria e alguns ramos específicos de engenharia (FERRARIS, 1999; WRIGHT et al., 2001; SAMANIUK et al., 2012; SAMANIUK et al., 2014; VIPULANANDAN; MOHAMMED, 2014; HU; ROSTAMI, 2020). Recentemente com o surgimento desses mecanismos, em especial acerca do cisalhamento oscilatório, há a possibilidade de determinação de características reológicas de dispersões de solo com menor umidade, proporcionando a aproximação dos ensaios às reais condições de aplicação desses em obras geotécnicas. Tais propostas de análises podem guardar correlações com aquelas realizadas em mesoescala como verificou Pértille (2015) ao estudar solos para aplicação agrícola.

Em obras geotécnicas de pavimentação, as estruturas são convencionalmente dimensionadas para suportar o conjunto de carregamentos repetitivos oriundos dos eixos dos veículos. Os principais ensaios para avaliar rigidez e danificação de solos em pavimentos são executados através de testes com o uso do equipamento triaxial de cargas repetidas (ETCR),

que reproduz as condições de campo por meio da simulação da passagem de veículos (LIMA et al., 2018; FRANCO; MOTTA, 2018; LIMA et al., 2019).

A fim de evitar problemas relacionados a condições de contorno pela aplicação dos ensaios convencionais, é plausível obter antes propriedades fundamentais dos materiais para só então simular o comportamento desses em campo. Assim, a reometria pode ser considerada um instrumento de grande potencialidade para a compreensão dessas condições. Estas investigações são feitas através de ensaios reológicos utilizando reômetros, os quais proporcionam a execução de variados ensaios que podem compreender características de danificação e deformabilidade dos materiais.

Constata-se que os testes de varredura de frequência e módulo de resiliência possuem semelhanças por se tratarem de avaliações da rigidez dos materiais, isto é, não resultam em danos às amostras. As relações feitas a partir dos módulos cisalhantes encontrados nos ensaios de reologia podem guardar fortes correlações com o módulo axial encontrado pelo teste convencionalmente adotado para avaliação de camadas de pavimentos.

Em contrapartida, o ensaio reológico de solos mais difundido na literatura teste de varredura de amplitude (BAUMGARTEN; DÖRNER; HORN; 2013; PÉRTILE et al., 2016; HASS; HOLTHUSEN; HORN, 2018; HOLTHUSEN et al., 2018a; PÉRTILE et al., 2018), o qual age através de esforços que trabalham em intervalos de amplitude que vão além do limite viscoelástico linear. Trata-se de um estudo sobre diferentes níveis de amplitudes de deformação dos solos, essencial para a compreensão do caráter viscoelástico do material, incluindo possíveis não linearidades físicas. Ainda que não seja objetivo do presente trabalho, esse pode guardar correlações com ensaios de danos em mesoescala, como o ensaio de deformação permanente.

Ampliar a gama de materiais com parâmetros catalogados é um desafio para a engenharia rodoviária. Ainda não há estudos que proponham metodologias expeditas e simplificadas para que se tenha uma primeira impressão antes dos materiais serem ensaiados, e é desse problema que surge a proposta de compreender o comportamento mecânico dos solos com ensaios expeditos.

A concepção de um ensaio prévio para a obtenção de propriedades iniciais pode orientar e direcionar à escolha de jazidas de solos com bom potencial de aplicação em pavimentação. A partir da relação dos resultados de avaliações em ensaios triaxiais e reológicos, objetiva-se encontrar compatibilidades entre os efeitos do teste de varredura de frequência e módulo resiliente, de forma a somar experiência e conhecimento aos estudos do uso de materiais destinados à engenharia geotécnica e pavimentação.

1.1 OBJETIVOS

O presente trabalho tem como objetivo geral avaliar possíveis correlações entre os ensaios mecânicos de reometria e módulo de resiliência em solos compactados destinados à pavimentação.

Os objetivos específicos são:

- (i) Investigar as relações entre os comportamentos reométricos e mecânicos em um solo compactado em diferentes energias e umidades;
- (ii) Avaliar a não-linearidade de solos com ensaios reométricos
- (iii) Analisar o comportamento de deformabilidade através do ensaio de varredura de frequência;
- (iv) Compreender o grau de influência da variação de umidade no comportamento micromecânico das amostras;
- (v) Relacionar os parâmetros dos ensaios triaxiais de cargas repetidas (mesomecânicos) e reológicos (micromecânicos) em solos compactados;

1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

Esta dissertação estrutura-se em quatro capítulos fundamentais.

No primeiro capítulo, apresenta-se a introdução, relatando brevemente o contexto dos principais aspectos abordados no decorrer da pesquisa, de forma a compreender também o objetivo geral e os objetivos específicos, bem como à organização do trabalho.

O segundo capítulo apresenta a revisão de literatura, onde são abordados todos os temas correlatos ao estudo: mecânica dos pavimentos, materiais para compor pavimentos e seu comportamento mecânico frente as deformações elásticas e plásticas, modelos de determinação dos parâmetros mecânicos em mesoescala, análises mecânicas em microescala, reologia, reometria, tipos de ensaios reológicos mais adequados a solos, *amplitude sweep test* – teste de varredura de amplitude e ensaio de varredura de frequência - teste de varredura de frequência e os conceitos de curva mestra.

Na sequência, apresenta-se no terceiro capítulo os materiais e as metodologias aplicadas para o programa experimental da pesquisa. No princípio apresentam-se os aspectos inerentes à localização da jazida da qual foi retirado o material para estudo, os ensaios de caracterização física e química obtidos pelos trabalhos anteriores e o comportamento resiliente do solo em questão, o melhor modelo matemático para definir esse comportamento e os pares de tensão

que farão parte das análises de correlação. Em seguida aborda-se a definição das diferentes umidades para os ensaios de reologia, trazendo-se os dois processos utilizados na moldagem dos corpos de prova e os procedimentos executivos dos testes de varredura de amplitude e de frequência.

No quarto capítulo, discorre-se sobre a análise dos resultados, com base nos ensaios reológicos executados para as diferentes umidades propostas à moldagem dos corpos de prova e nas energias de compactação normal, intermediária e modificada. São discutidos nos ensaios de varredura de amplitude quais são os limites viscoelásticos lineares de cada amostra e, a partir dessa definição, os materiais são submetidos aos testes de varredura de frequência, aspecto que possibilita a concepção das curvas mestras em função da variação de umidade para cada energia de compactação e a análise da correlação dos ensaios reológicos com os ensaios de módulo resiliente.

O último capítulo é constituído pelas considerações finais, em que se apresentam as conclusões fundamentais a que se chegou através da pesquisa e se complementa com a sugestão de futuros trabalhos e pesquisas que possam contribuir com o desenvolvimento desta linha de estudos. Após as considerações, é apresentado o referencial utilizado à concepção da dissertação e dois apêndices que complementam os resultados apresentados no penúltimo capítulo.

2 REVISÃO DE LITERATURA

O primeiro passo para o início de um projeto de pavimentação, está em conhecer as características específicas de cada região onde se implantará a via, como clima, temperatura, volume de tráfego, disponibilidade de materiais e suas características mecânicas. Desta forma, é fundamental que sejam realizados estudos que possibilitem a compreensão destas diferentes condições e assegurem pavimentos que entreguem maior eficiência e durabilidade aos usuários.

Este capítulo pretende apresentar os conceitos fundamentais para a compreensão dos aspectos que envolvem a mecânica dos solos e de pavimentos. Serão tratados assuntos referentes aos tipos de materiais utilizados nas estruturas de um pavimento, com ênfase em solos e seus respectivos comportamentos micro e mesomecânicos e misturas de solo bem como diferentes tipos de agregados. Serão abordados temas correlatos às deformações elásticas, recuperáveis os quais levam em consideração o fenômeno de fadiga e de que maneira podemos avaliar o comportamento de materiais quanto a ele.

Diante da compreensão destes diversos aspectos, serão discutidas possíveis maneiras de correlacionar o comportamento reológico e mecânica dos solos e de que forma é possível aplicar a reometria para prever preliminarmente o comportamento desses materiais quando compactados.

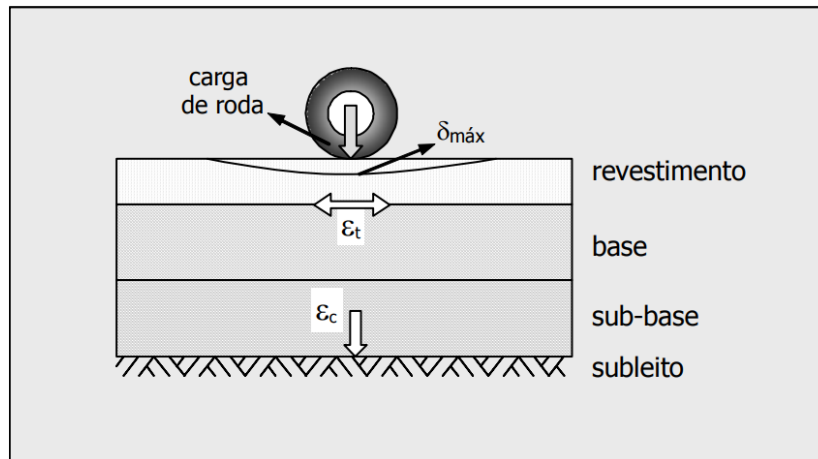
2.1 MECÂNICA DOS PAVIMENTOS

A mecânica dos pavimentos é uma área do saber que objetiva a compreensão do conjunto estrutural de camadas de suporte, carregadas e descarregadas repetidamente pela passagem de veículos. O principal intuito é compreender as propriedades dos materiais constituintes e estabelecer espessuras para as camadas. Finalmente, examina-se as condições de tensões atuantes e os consequentes deslocamentos e deformações no sistema, de forma a determinar o término da vida útil por meio do total de cargas aplicadas que culminam à ruptura do pavimento (MEDINA; MOTTA, 2015).

Segundo a mecânica dos pavimentos, o pavimento é visto como um sistema de camadas com espessuras finitas, concebidas por materiais distintos, que desempenham suas funções particulares no conjunto. O sistema responde mecanicamente às cargas repetidas de características cíclicas que atuam sobre o pavimento, as quais variam conforme a intensidade, frequência e magnitude em um dado espaço de tempo. É apresentado por Franco (2007) que as cargas são distribuídas por meio das camadas em formato circular e são modeladas atendendo

a Teoria da Elasticidade, conforme apresentado na Figura 1 para exemplificar de forma simplificada um pavimento e as cargas e deformações em seu interior.

Figura 1 – Pavimento flexível sob atuação de roda



Fonte: Franco (2007)

Peraça (2007) afirma que ao se dimensionar um pavimento, deve ser prevista a atuação de todos os esforços que geram tensões na estrutura. Cada camada do pavimento possui uma capacidade de suporte que tem intensa relação com a sua resistência e leva em conta desde o tipo de material que faz parte do revestimento asfáltico até aquele que compõe o subleito, com o intuito de manter coesão entre os materiais mesmo com a ação do tráfego e com variação dos teores de umidade no decorrer do tempo. Balbo (2007) reforça a importância de se conhecer os parâmetros dos materiais que constituem a estrutura, sendo possível inferir as magnitudes das tensões resultantes do tráfego, divididas da seguinte forma:

- a) tensões verticais: também denominadas pressões, são os carregamentos oriundos de esforços de compressão vertical;
- b) confinamento horizontal: tem origem do contato das partículas lindeiras ao ponto em análise, as quais impossibilitam a movimentação e resultam no seu travamento;
- c) flexão: dada pela ação de carregamentos verticais e resultam em tensões de tração e/ou compressão nas extremidades entre agregados e ligantes, que resistem a deslocamentos laterais, provocando o fenômeno de fadiga e, em situações mais graves, a ruptura da camada;
- d) cisalhamento: ocorrem pela ação de carregamentos verticais que causam, quando em acúmulo, afundamentos em trilha de rodas (ATR) em pavimentos flexíveis, por

exemplo. Este fenômeno é a transferência das deformações a regiões lindeiras e é o principal fator a ser combatido nos métodos de dimensionamento empíricos.

No Brasil, comumente se aplica metodologia de características empíricas ou semi-empíricas de dimensionamento de pavimentos. Essa metodologia se baseia no que propôs o engenheiro Murillo Lopes de Souza, em meados da década de 1960, e foi atualizada pelo antigo DNER no início dos anos 1980. Esse método é adaptado do método criado pelo Corpo de Engenheiros Militares dos Estados Unidos da América (United States Army Corp of Engineers – USACE) e usa de fatores como o número de repetições do eixo padrão (N) e o índice de suporte Califórnia.

Carvalho (1997) reitera a importância de considerar variáveis como o tipo de material, espessuras e comportamento das camadas, cargas advindas do tráfego, velocidade de aplicação das tensões, atributos geométricos, clima, entre outros, para compreender perfeitamente o comportamento dos pavimentos. Dessa forma houve a concepção de um novo método de dimensionamento, a partir da cooperação do Instituto de Pesquisas Rodoviárias (IPR), da Agência Nacional do Petróleo (ANP/Petrobras), e de diversos centros de pesquisa e universidades brasileiras, para abranger tais características.

Na tese de Franco (2007) é apresentado o primeiro protótipo do atual framework de cálculo, cujo nome era SisPav. Com o passar do tempo, houve inúmeras reformulações para que se atingisse a atual versão do método empírico mecanicista, denominado Método de Dimensionamento Nacional (MeDiNa).

O referido método permite que o pavimento seja dimensionado ou avaliado, levando em consideração os esforços a que está sujeito, através da análise elástica de múltiplas camadas (AEMC), com base no coeficiente de Poisson e módulo resiliente (MR). Por meio destas características, é possível interpretar a rigidez das camadas, tal como submeter os coeficientes de dano à modelagem matemática. Para tanto, o MeDiNa é considerado uma metodologia empírico mecanicista, capaz de criar uma relação entre o comportamento mecânico dos materiais aplicados no pavimento e o tráfego atuante, e o desempenho que se observa em campo, denominados funções de transferência.

Esse método que já vigora no país, permite determinar, de acordo com Pascoal et al. (2020) os melhores materiais e as espessuras das camadas para que se calculem as tensões e as deformações, relacionando-as com os defeitos que efetivamente acometem os pavimentos. Franco (2018), mostra que a validação da avaliação estrutural dos pavimentos se dá através de um conjunto de ensaios de laboratório para caracterizar as amostras que compõem o pavimento, e posterior inserção dos dados necessários no método. No que diz respeito a materiais

destinados a subleito, reforço de subleito, sub-base e base, avalia-se os aspectos de rigidez, pelo ensaio de módulo de resiliência (DNIT 134/2018) e de deformabilidade pelas características de deformação permanente (DNIT 179/2018). Especificamente para solos ainda é necessário classificá-los de acordo com a metodologia miniatura compactada tropical - MCT (DNER CLA 259/96).

2.2 MATERIAIS TERROSOS EMPREGADOS NA PAVIMENTAÇÃO

Para a seleção e determinação das características dos elementos que irão constituir as camadas estruturais de um pavimento, segundo Bernucci et al. (2010), são adotados critérios específicos. Em um primeiro momento para escolher os materiais componentes das camadas de base, sub-base, subleito e reforço de subleito, são analisados os parâmetros correlatos à sua natureza, os quais afetam os atributos geotécnicos quando compactados.

Em suma, os materiais devem estar compactos de forma que ofereçam adequada resistência, baixa deformação e permeabilidade, cumprindo assim com suas atribuições na estrutura. Os componentes mais comuns dessas camadas são solos, agregados e, em algumas circunstâncias, aditivos como cal, emulsões asfálticas, cimento Portland e misturas de materiais (BERNUCCI et al., 2010), materiais segmentados pelo DNIT (2006) como materiais terrosos e pétreos.

Os materiais são analisados em um conjunto de aspectos como sua resistência, granulometria, durabilidade e formato dos grãos, fatores que propiciam à seleção e caracterização dos materiais aplicados nas estruturas de pavimentos. Além deste contexto, é evidenciado por Medina, Motta e Santos (2006), Soares et al. (2009), Bernucci et al. (2010) e Barros et al. (2019) a relevância para a performance de pavimentos flexíveis a fim de se compreender as deformações permanentes (DP) e os módulos resilientes dos materiais, compreendendo também a rigidez dos solos que se empregam na pavimentação

Os materiais terrosos, no âmbito da engenharia civil, são materiais capazes de oferecer suporte, tornando-o arrimado, perfurado, ou até mesmo escavado para aplicar em obras. Os solos possuem influência na condução de obras de acordo com suas propriedades e desempenhos em fundações, taludes e/ou aterros (VARGAS, 1997).

De acordo com o que dispõe o DNIT (2006), materiais terrosos, são basicamente os materiais conhecidos como solos. Esses materiais são conceituados amplamente como sendo materiais oriundos do intemperismo e deterioração da rocha mãe. Entretanto a engenharia rodoviária, considera como solo todos os elementos orgânicos ou não, instáveis ou

medianamente consistentes, presente sobre a face da terra sem que haja a necessidade de se fazer uso de explosivos.

Os solos são materiais comumente aplicados em subleitos rodoviários (RIBEIRO, 2013; ZAGO, 2016; KERN, 2017; DALLA ROZA, 2018; SANTOS et al., 2019; PASCOAL, 2020; SANTOS, 2020) e, por vezes, possuem parâmetros suficientemente aceitáveis para aplicação in natura em camadas de base e sub-base de pavimentos (ROLDÃO; FERREIRA, 2019). Dessa forma, de acordo com Pascoal (2020), é crucial realizar a caracterização física dos materiais terrosos e determinar seus comportamentos ao sofrerem deformações elásticas e plásticas, pois esses são critérios básicos para a realização do dimensionamento no MeDiNa.

2.3 ANÁLISE MECÂNICA POR REOLOGIA

De acordo com Markgraf e Horn (2009), avaliar o comportamento mecânico dos materiais, em escala microscópica, está diretamente ligado à análise dos parâmetros físico-químicos, da forma de contato, da disposição das partículas e de suas forças interparticulares. Estas propriedades, por sua vez, têm dependência do conteúdo e disposição das dimensões dos grãos, matéria orgânica, minerais argilosos, presença de água, concentração salina, potencial hidrogênico (pH) e capacidade de troca de cátions.

2.3.1 Interação interpartículas de solo

Ranalli (1995) apresenta a mecânica do contínuo e a microfísica como dois argumentos complementares aos estudos da reologia. Não há uma compreensão consumada acerca dos efeitos das propriedades individuais das partículas no que tange a seu comportamento de escoamento e tensão de conjunto (SHINOHARA; TUZUN, 2002). No campo da micromecânica, o comportamento dos materiais é estritamente descontínuo e heterogêneo. Portanto, no que diz respeito ao comportamento macroscópico dos materiais, percebe-se que as variáveis não estão restritas tão somente pela disposição espacial das partículas, mas também pelas diversas interações que ocorrem entre elas (SILVA; LUZ, 2004).

A resistência do solo está relacionada diretamente a fatores individuais como a forma, tamanho, mineralogia, modo de contato e forças das partículas, quantidade de poros e combinação interparticular (MARKGRAF; HORN; PETH, 2006; HOLTHUSEN; PETH; HORN, 2010). Dexter (1998) ainda complementa que a resistência do solo sofre influência de processos ocorridos além do contexto interparticular, no conjunto partícula e líquido também.

Ao considerar escalas menores, as argilas tendem a se unir em invólucros que formam flocos ou domínios e se mantêm unidas através de forças físico-químicas. As uniões ocorrem através de agentes ligantes por meio de agrupamentos de matéria orgânica do solo e cátions de metais, óxidos e aluminossilicatos desarranjados e, por fim, resultam em microagregados que se unem para formar macroagregados (OADES, 1984, 1993; BRONICK; LAL, 2005; DAYNES et al., 2013).

Ainda que as partículas tensionem a se aproximar por meio da atuação das forças eletrostáticas de cátions polivalentes, pontes de hidrogênio, tensões de capilaridade (BRONICK; LAL, 2005; MARKGRAF; HORN, 2009) e, como apontado por Dalal e Bridge (1996), por ciclos de umedecimento e secagem do solo. Para que haja uma estabilidade entre os agregados, Dexter (1988) mostra que é imprescindível a ocorrência do processo de consolidação de partículas com minerais argilosos, óxidos, composições orgânicas e inorgânicas que favorecem a cimentação.

2.3.2 Aglomeração dos solos

Uma das maneiras de diferenciar a aglomeração de solos é de acordo com a sua origem, classificando-os como fisiogênicos ou biogênico no que segue os padrões de morfologia (JOUQUET et al., 2009; LOSS et al., 2014; LOSS et al., 2017). A agregação fisiogênica faz referência à aglomeração de partículas unitárias de solo através de fenômenos de umedecimento e secagem e pelo processo de cimentação do solo através da ação de óxidos e hidróxidos ferrosos e de alumínio e/ou, de matéria orgânica, que resultam em materiais com formatos mais angulares ou prismáticos. Enquanto isso, de acordo com Loss et al. (2014), os aglomerados biogênicos têm origem de vias biológicas de formação, relacionadas a dejetos de animais da macrofauna do solo e da cimentação ocorrida a partir de exsudato de raízes, gerando agregados com formatos arredondados.

De acordo com Kemper e Rosenau (1986), a constituição de um aglomerado se dá em consequência das interações interpartículas causadas pela agregação entre as partículas primárias que em seu agrupamento possuem forças superiores às forças que as unem com as lindeiras. Para Hillel (1998), ainda que o processo de floculação seja primordial na aglomeração, é indispensável que haja a existência de estruturas cimentantes. Dessa forma, é consenso por diversos autores (HILLEL, 1998; BRONICK; LAL, 2005; PÉRTILE, 2015) que os aspectos supracitados atuem majoritariamente na agregação das partículas.

Hillel (1998) divide hierarquicamente a composição estrutural dos solos em microagregados (de diâmetros inferiores a 0,25 mm, formados pela união de pequenos flocos conglomerados ou invólucros de argila e matéria orgânica no solo) e macroagregados (de diâmetros superiores a 0,25 mm e são formados pela união de diversos microagregados). Em cada um desses conglomerados operam distintas fontes de aglomeração e é comprovado por Bronick e Lal (2005) que as tensões de aglomeração atuantes no interior de microagregados são superiores àquelas exercidas em macroagregados. Nesse contexto, os agregados de dimensões menores têm influência de aglomeração advindas de propriedades físico-químicas (floculação e expansão e contração das massas argilosas), enquanto nos agregados de dimensões superiores e solos arenosos associa-se a aglomeração à matéria orgânica produzida por microorganismos (BRADY; WEIL, 2008) e, ou, a ocorrência de raízes e hifas (SIX et al., 2004).

Os solos são composições intergranulares sensíveis, portanto, suas características hidráulicas e físico-químicas, a quantidade de água presente no meio e as propriedades individuais das partículas, são primordiais na compreensão das suas tensões de cisalhamento e deformações (MARKGRAF, HORN; PETH 2006). Desse modo, usam-se diferentes fundamentos físicos e químicos para compreender a resistência e possíveis finalidades do uso de solos.

2.3.3 Análise micromecânica

Para Ghezzehei e Or (2001), primordialmente o comportamento microestrutural dos materiais está conectado a quantidade de água presente na amostra, em vista de que a água em quantidades elevadas reduz a coesão interparticular tendo efeito lubrificante. Unido a isso, tem-se fragilidade na conexão molecular da água que propicia, com a aplicação de carregamentos, para o término das conexões diretas entre as partículas minerais.

Ao ocorrer modificações na microescala, seus efeitos podem ser irreversíveis quando se excede o limite de energia que é capaz de sustentar a organização inicial das partículas e na sua disposição para com as partículas lindeiras, ocorrendo um fluxo viscoso. Praticamente a totalidade das deformações e fluências ocorridas nos materiais, têm princípio nos contatos entre moléculas, ou seja, na microescala, o que leva à compreensão de que toda a mecânica que envolve às características em macroescala do solo estão relacionadas primordialmente aos rearranjos na escala molecular (GHEZZEHEI; OR, 2001).

Mitchell e Soga (2005) caracterizam os solos como materiais viscoelásticos, em vista de que parcela de suas deformações são viscosas, e outra parcela de origem elástica. Conforme

Markgraf e Horn (2009), ainda há estados transitórios dependentes de fatores como tensão, deformação, energia, frequência e tempo, os quais, de acordo com Markgraf, Horn e Peth (2006), são incapazes de serem explicados por meio de análises em mesoescala. Para tanto aplicam-se investigações dos solos em microescala, através de ensaios reológicos feitos em reômetros.

2.3.4 Reologia em solos

A reologia é uma ciência básica e usual no que está relacionado à mecânica dos fluidos. Trata das características de deformação e fluência dos materiais (majoritariamente líquidos), que correspondem a alterações no ambiente ao longo do tempo como perturbações externas e variações de temperatura (MESCHYAN, 1995; BARNES, 2000; MARKGRAF; HORN; PETH, 2006; SCHRAMM, 2006). Tem como principal objeto de estudo amostras que apresentem características de comportamento plástico, elástico, viscoso (fluência), que passem por relaxação de tensão e percam a resistência em longo prazo, ou seja, parâmetros presentes em todos os corpos reais, conhecidos como características reológicas (MESCHYAN, 1995). Ela se baseia, de acordo com Markgraf, Horn e Peth (2006), em princípios tais como a lei de Newton em fluidos ideais, a lei de Hooke ao se tratar de amostras elásticas perfeitas e, para amostras com comportamentos visco-plásticos, a lei de Bingham.

A compreensão do comportamento reológico em diversos campos industriais é indispensável, como o de alimentos, petróleo, transporte e bombeamento de minérios, concretos, trabalhabilidade de argamassas e produção pastas de argila para túneis (FERRARIS, 1999; WRIGHT et al., 2001; SAMANIUK et al., 2012; SAMANIUK et al., 2014; VIPULANANDAN; MOHAMMED, 2014; HU; ROSTAMI, 2020). De acordo com Meschyan (1995), os materiais apresentam suas características reológicas de maneiras distintas e têm dependência das propriedades das amostras, tempo, temperatura e do estado de esforços aplicados nela e sua respectiva deformação.

Materiais de grande aplicação em obras de infraestrutura como túneis, em geral possuem propriedades visco-plásticas, como é o caso de pastas argilosas, as quais são discretizadas através de uma tensão de escoamento (τ_y), característica de materiais não-newtonianos, em que abaixo desse limiar, o material deixa de fluir (PAPANASTASIOU, 1987; GHEZZEHEI; OR, 2001; SCHRAMM, 2006; MITSOULIS, 2007). Os solos, todavia, não possuem um comportamento que se enquadre como ideal, por exibirem características complexas (ZHU; ZHU; YU, 2017), simultaneamente como viscosidade, plasticidade e elasticidade. Para tanto,

assume-se para estudos que esses sejam insumos de comportamento visco-plástico, ao estarem sujeitos a tensões estáticas (GHEZZEHEI; OR, 2001), ou como insumos viscoelásticos, sob ações de tensões cíclicas (GHEZZEHEI; OR, 2001; MARKGRAF; HORN, 2006).

Oliveira et al. (2000) ressaltam que a distribuição granulométrica, densidade e forma dos grãos, concentração volumétrica de materiais sólidos, densidade do meio aquoso, temperatura e a forma de interação interparticular são propriedades que influenciam diretamente às características reológicas dos materiais. Ainda é discutido por Meschyan (1995) que em um sentido mais generalista, a reologia busca, além de entender a fluência de um líquido viscoso, contemplar todos os aspectos correlatos à mecânica de corpos rígidos que se deformam. Desta maneira, é substancial a categorização do entendimento de reologia e reologia experimental (reometria), a qual trata das leis que determinam os parâmetros reológicos de materiais diversos.

A reometria é uma técnica muito aplicada ao estudo de alimentos e polímeros (MARKGRAF, HORN; PETH, 2006), de grande aplicabilidade ao tratar dos aspectos físico-químicos de solos agrícolas (CZIBULYA et al., 2010; BAUMGARTEN; DÖRNER; HORN; 2013; PÉRTILE et al., 2016; HASS; HOLTHUSEN; HORN, 2018; HOLTHUSEN et al., 2018a; HOLTHUSEN et al., 2018b; PÉRTILE et al., 2018; HOLTHUSEN et al., 2019), estudo do comportamento de movimentos do tipo corrida de solo como um fluido (MACIAS et al., 1997; MELO et al., 2012; MELO, 2014). Por outro lado, estudos que envolvem a mecânica dos solos são ainda escassos, como os desenvolvidos por Markgraf, Horn e Peth (2006) para mecânica de solos agrícolas, utilizando procedimento reológico de varredura de amplitude sob cisalhamento oscilatório. Ainda que raros os estudos na engenharia geotécnica, alguns pesquisadores também já discutiram a aplicação do entendimento reológico para o condicionamento de solos para aplicação em túneis (HU; ROSTAMI, 2020) e para pesquisas que levam em conta a relação entre características mecânicas de micro e mesoescalas para solos brasileiros (PÉRTILE, 2015), mas ainda são mínimos os estudos reológicos voltados a solos compactados com foco nas engenharias geotécnica e de pavimentação, como o de Santos e Barroso (2020).

Conclui-se que os aspectos de resistência estrutural são de extrema complexidade e dependem de inúmeras variáveis interagindo entre si, que podem ser conhecidos através de estudos aprofundados de reologia, o que torna ainda mais pertinente à sua compreensão a partir de relações entre as deformações aplicadas e as correspondentes tensões obtidas como resposta.

2.3.5 Princípios da reologia

As tensões externas submetidas nos materiais resultam em conseqüentes deformações, cujos processos são comuns tanto à mecânica dos solos quanto à reologia (GHEZZEHEI; OR, 2001; MITCHELL; SOGA, 2005). Segundo Markgraf, Horn e Peth (2006), a deformação dos materiais e o comportamento de fluxo, possuem dependência do tempo de aplicação dos esforços, da saturação e das características dos materiais.

Tanto a mecânica dos solos clássica quanto a reologia baseiam-se em materiais ditos ideais ou perfeitos. Os fluidos ditos ideais, ao serem submetidos a uma tensão cisalhante têm um aumento da deformação de forma linear com o tempo, sua energia totalmente dissipada e, após cessar as tensões, suas deformações mantidas, baseadas na lei de Newton (GHEZZEHEI; OR, 2001; SCHRAMM, 2006). Já os sólidos perfeitos possuem um comportamento balizado pela lei da elasticidade (Lei de Hooke), totalmente oposta à primeira. Ao ser aplicada uma tensão, instantaneamente há uma deformação parametrizada à força aplicada e com o cessar, retorna para sua posição inicial, ou seja, há uma reversibilidade instantânea (HILLEL, 1998; MARKGRAF; HORN; PETH, 2006; SCHRAMM, 2006; HOLTHUSEN; PETH; HORN, 2010; REICHERT et al., 2010). Para o cisalhamento, a força é mediada pelo módulo de cisalhamento (G), que com o coeficiente de Poisson (μ) se obtém o módulo de Young (E), o qual indica a rigidez e quanto um sólido resiste à aplicação de uma deformação (SCHRAMM, 2006).

É possível perceber claramente as diferenças entre sólidos e líquidos pelas leis de Newton e Hooke e, nesse sentido pode-se representar no campo da reologia, analogias que representam cada um dos estados, sendo um amortecedor perfeito aos fluidos ideais, em que entende-se haver uma tensão em um pistão a uma taxa de deslocamento estabelecida pela viscosidade; e uma mola perfeita, que representa os sólidos ideais, em que a deformação e a tensão estão linearmente conectados (GHEZZEHEI; OR, 2001; MEZGER, 2006).

Tratando-se de solos, sabe-se que seu comportamento não é de um material ideal, é um comportamento intermediário aos aspectos de viscosidade, plasticidade e elasticidade. O modelo de Bingham, Equação 01, representa o solo, de características viscoplásticas. Isso se dá em função de o material somente fluir depois de exceder a tensão máxima para o ponto crítico, comportando-se como material viscoso (HILLEL, 1980); MARKGRAF, HORN; PETH, 2006).

$$\tau = \tau_B + \eta_B \cdot \dot{\gamma} \quad (01)$$

Onde:

τ : tensão de cisalhamento, em Pa;

τ_B : tensão de escoamento de Bingham, em Pa;

η_B : coeficiente de fluxo de Bingham, em Pa.s;

$\dot{\gamma}$: taxa de cisalhamento, em s⁻¹.

Ghezzehei e Or (2011) explicam que diferentemente do que acontece com a aplicação de uma tensão estática, quando o corpo passa por uma tensão oscilatória, essa tem aplicações de carga de curta duração. Neste processo uma parcela da energia cisalhante fica temporariamente armazenada de forma elástica, enquanto o restante induz ao fluxo. Nesta compreensão, Holthusen, Peth e Horn (2010), ressaltam que o solo é classificado como um material viscoelástico desde que a tensão de escoamento não seja atingida, apresentando comportamentos elásticos e viscosos ao mesmo tempo.

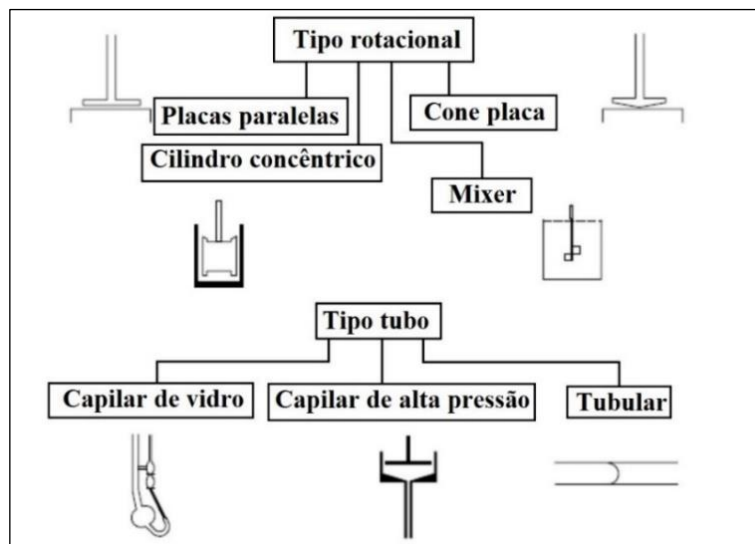
São propostos na literatura inúmeros modelos reológicos, com destaque a dois: o modelo de Maxwell e o modelo de Kelvin-Voigt (MARKGRAF; HORN; PETH, 2006). O primeiro representa fluidos viscoelásticos, com um modelo que simula o funcionamento de um sistema mola e amortecedor em série, ou seja, uma combinação de elasticidade e viscosidade (a tensão em cada elemento é a mesma tensão total e a deformação total é dada pela soma das deformações). Enquanto o segundo se aplica a sólidos viscoelásticos, e destaca a recuperação completa, com a tensão total dada pelo somatório das tensões nos elementos mola e amortecedor em paralelo. Salienta-se que esses modelos são ainda simplistas quando comparados ao comportamento de amostras viscoelásticas reais e maiores detalhes para a compreensão da reologia direcionada à mecânica dos solos são apresentados em Ghezzehei e Or (2006), Schramm (2006), Markgraf, Horn e Peth (2006), Markgraf e Horn (2009) e Holthusen et al. (2012c).

2.3.6 Reometria

De acordo com Melo (2014), a reometria é a parcela da reologia responsável por aplicar as técnicas experimentais para mensurar os parâmetros reológicos dos materiais, bem como definir e desenvolver os equipamentos e as geometrias que serão aplicadas aos ensaios. Um reômetro é um dispositivo para medir a reologia de um material não-newtoniano, possibilitando inúmeros tipos de testes, como rotacionais, de relaxação, transientes e de fluência, os quais, conforme Ghezzehei e Or (2006), Schramm (2006), Markgraf, Horn e Peth (2006), Holthusen,

Peth e Horn (2010), podem avaliar todos os tipos de materiais com características viscoelásticas, ao exemplo do solo. Na Figura 2, são apresentados por Steffe (1996), os modelos de instrumento reométricos mais comuns.

Figura 2 – Tipos mais comuns de ferramentas à avaliação reométrica

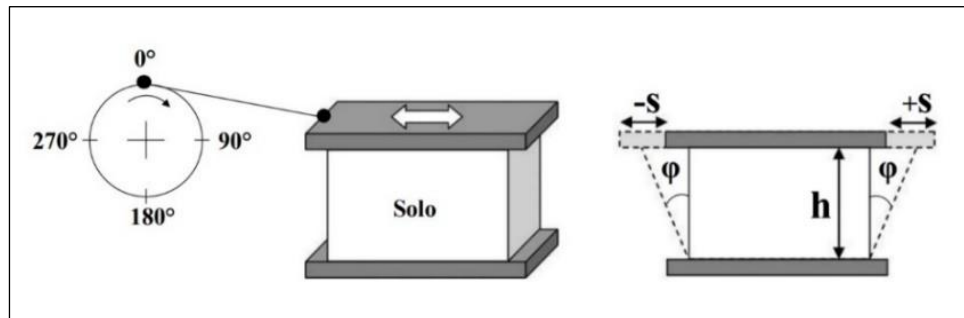


Fonte: Steffe (1996)

Betioli et al. (2009) apontam que a grande dificuldade para se parametrizar os materiais está relacionada a encontrar uma única técnica qualificada a mensurar todas as solicitações de forma simultânea. Melo (2014) afirma que a reometria não possui uma relação linear com os ensaios comumente aplicados na mecânica dos solos, como o ensaio de cisalhamento direto que utiliza uma única caixa cisalhante, em oposição ao reômetro que avalia o material aplicando variadas tensões.

O reômetro do tipo rotacional de placas paralelas - PP é largamente utilizado para investigação da reologia de solos (MEZGER, 2014) e consiste basicamente na aplicação de um torque causada por uma velocidade rotacional, que é medida a partir da resistência que o material a ser estudado oferece às tensões aplicadas (MELO, 2014). De acordo com Holthusen, Peth e Horn (2010), esse reômetro funciona com a alocação de uma amostra de material no meio de uma placa inferior fixa e outra placa superior oscilatória, que rotaciona para ambos os sentidos. A oscilação se dá de forma alternada para cada lado e segue uma função de tempo senoidal, com um reduzido ângulo de deflexão, como é apresentado na Figura 3.

Figura 3 – Placas paralelas para ensaio de cisalhamento oscilatório



Fonte: Pértile (2015)

Integrando os testes oscilatórios, o ensaio mais aplicado para solos é o de varredura de amplitude, o qual possui frequência constante e amplitude que varia. Nestes testes, a tensão cisalhante é resultado da taxa de cisalhamento, a qual, por sua vez, advém da razão entre a deflexão (s) e o gap entre as placas (h), sendo assim possível avaliar parâmetros correlatos à microestrutura dos solos (MARKGRAF; HORN; PETH, 2006).

Holthusen, Peth e Horn (2010) afirmam que alguns fatores precisam ser adequados para determinar as características reológicas das amostras viscoelásticas. Por exemplo, se na lei de Hooke o módulo cisalhante (G), quando submetido a tensões estáticas, é constante para materiais elásticos, nas tensões oscilatórias é adequado um módulo de cisalhamento complexo ($|G^*|$), apresentado pela Equação 02, decomposto em módulo de armazenamento (G'), na Equação 03, e módulo de perda (G''), traduzido pela Equação 04.

$$|G^*| = \frac{\tau_A}{\gamma_A} \quad (02)$$

$$G' = G \cdot \cos \delta = \frac{\tau}{\gamma} \cdot \cos \delta \quad (03)$$

$$G'' = G \cdot \sin \delta = \frac{\tau}{\gamma} \cdot \sin \delta \quad (04)$$

Onde:

G' : módulo de armazenamento, em Pa;

G'' : módulo de perda, em Pa;

$|G^*|$: módulo cisalhante complexo, em Pa;

τ : tensão cisalhante, em Pa;

τ_A : amplitude da tensão cisalhante, em Pa;

γ_B : amplitude da deformação, em % ou adimensional;

γ : deformação, em % ou adimensional;

δ : ângulo de deslocamento de fase, em $^\circ$.

O resultado dado pela razão de G'' e G' (Equação 05) é conhecido como fator de perda ($\text{tg } \delta$) e diz respeito à parcela de energia mecânica que se aplica no conjunto e se perde com a deformação (HORN; PETH, 2011). A partir deste fator, é possível classificar o comportamento dos solos, pois quando $\text{tg } \delta > 1$ (ângulos entre 45° e 90°), o traço viscoso prevalece e quando $\text{tg } \delta < 1$ (ângulos entre 0° e 45°), o material tem componentes elásticos mais notórios (MARKGRAF; HORN; PETH, 2006).

$$\text{tg } \delta = \frac{G''}{G'} \quad (05)$$

Onde:

G' : módulo de armazenamento, em Pa;

G'' : módulo de perda, em Pa;

$\text{tg } \delta$: fator de perda.

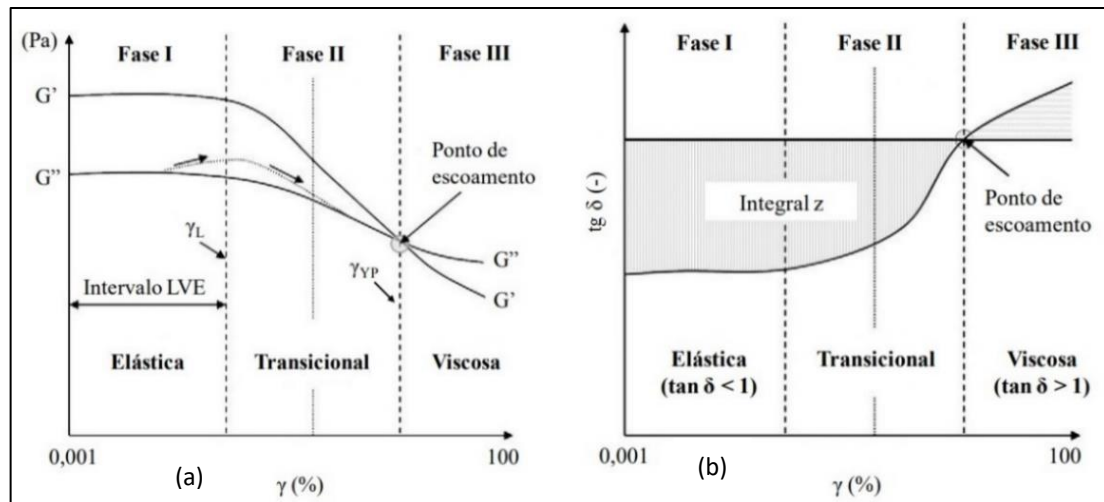
Holthusen, Peth e Horn (2006) apontam que nos gráficos com as curvas G' , G'' e $\text{tg } \delta$, em função da deformação de ensaios de varredura de amplitude é que se determinam os limites do intervalo viscoelástico linear (VEL) e a consequente deformação ao fim do intervalo (YL). O gráfico de G' e G'' é apresentado na Figura 4 (a) e o gráfico do $\text{tg } \delta$, Figura 4 (b), (ambos em função da deformação) e revelam que enquanto as deformações estão no domínio VEL, elas são totalmente reversíveis, entretanto se esse for ultrapassado além do limite de deformação, resultarão em alterações que se acumularão e serão permanentes.

Nas curvas apresentadas é possível observar o nível crítico da deformação, dado pelo yield point (ponto de escoamento), no momento em que G' é igual a G'' e, de acordo com Holthusen, Peth e Horn (2010), é o exato momento em que os parâmetros de elasticidade e plasticidade se igualam. Os autores resumem três etapas da perda de rigidez da estrutura com a atuação das tensões cisalhantes oscilatórias, divididas em:

- a) etapa 1: possui um pequeno estado de deformações atuantes e com propriedades elásticas ditas lineares (intervalo VEL);

- b) etapa 2: é um estado transitório com deformações elásticas e plásticas;
 c) etapa 3: perda da rigidez e deformação irreversível do solo.

Figura 4 – Módulo G' e módulo G'' (a) e fator de perda (b)



Fonte: Markgraf et al. (2011)

A característica que representa a rigidez do solo, segundo Markgraf et al. (2011), é a integral Z, dada pela soma da área balizadas pela tangente do ângulo de deslocamento de fase e a mínima deformação aplicada. Quanto maior for a rigidez do solo, maior há de ser a integral Z. Holthusen, Peth e Horn (2010) ainda relacionam o maior torque aplicado no decorrer do ensaio com a maior capacidade resistiva do solo às deformações, principal fator correlacionado a ensaios de mesoescala, como o de cisalhamento direto.

Os estudos que visam correlacionar as resistências microestruturais às macroestruturais, além de escassos, são direcionados à mecânica dos solos agrícolas e foram realizados por Baumgarten et al. (2012), Holthusen et al. (2012c), Pértile (2015). Esses propõem haver forte convergência entre as características reológicas com os ensaios de compressão de cargas repetidas, sendo a reometria um instrumento de grande potencialidade para a compreensão e possível conexão entre as diferentes escalas.

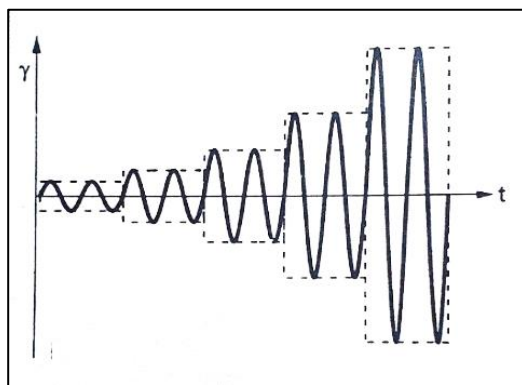
2.3.6.1 Varredura de amplitude – amplitude sweep test

Os ensaios de varredura de amplitude, ou *amplitude sweep test* – AS, em geral descrevem o desempenho quanto à deformabilidade dos exemplares possibilitando a definição dos limites máximos da faixa de deformação não destrutiva (MEZGER, 2018). O autor ainda afirma que

neste ensaio é analisado também o comportamento dos materiais ao se exceder os limites de deformação, definindo se há fluência das amostras ou se elas se comportam de maneira quebradiça.

Os testes realizados com varredura de amplitude levam os materiais a deformar progressivamente de um dado ponto até outro, enquanto a frequência dessas deflexões é mantida constante, como demonstra a Figura 5. Mezger (2018) indica que os ensaios podem ser executados de forma que se verifique os dados nas diferentes amplitudes de deformações, cuja deformação cisalhante é controlada, conhecido com *Controlled Shear Deformation – CSD*, ou através do controle da tensão de cisalhamento, ensaio designado como *Controlled Tensão cisalhante – CSS*, em que há análise dos dados nas diferentes tensões.

Figura 5 – Deformação em função do tempo com frequência constante



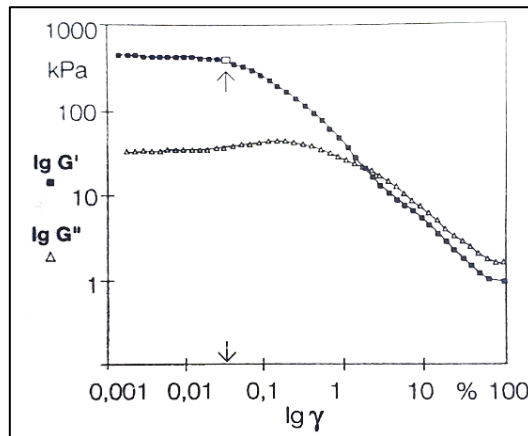
Fonte: Mezger (2018)

Segundo Mezger (2018), ao se avaliar os materiais, deve ser realizado primeiro o AS, para que se determine o limite viscoelástico linear, dado pelo nível de tensões ou deformações em que se trabalha sem que haja destruição do arranjo estrutural da amostra. Na Figura 6 é visível o trecho avaliado nas deformações mais baixas do ensaio, em que para as curvas de G' (a mais habitual entre os usuários) há a formação de um platô, ou seja, um trecho constante. O limite usualmente é definido pelo próprio usuário, através de tabelas de dados, *softwares*, ou até mesmo com o uso de régua, cuja tolerância é dada a partir do valor máximo de módulo de armazenamento.

Este é o ensaio que possui aplicação consolidada na literatura que trata sobre reologia de solos não compactados (HOULTHUSEN et al., 2017; PÉRTILE et al., 2017; PÉRTILE et al., 2018; BATISTÃO et al., 2020; HOULTHUSEN; BATISTÃO; REICHERT, 2020). As estruturas encontradas neste estudo são frequentemente associadas a materiais sólidos

viscoelásticos, ou seja, possuem $G' > G''$, no entanto, Mezger (2018) ressalta a existência de materiais com estruturas fluidas, cuja designação passa a ser líquidos viscoelásticos, isto é, $G'' > G'$.

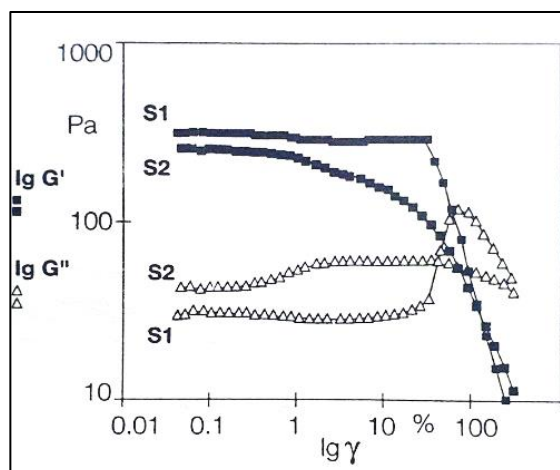
Figura 6 – Definição do VEL de uma amostra viscoelástica no estado sólido



Fonte: Mezger (2018)

Ainda o gráfico da Figura 6, mostra o ponto de encontro entre G' e G'' , diz que o material muda seu comportamento predominante, atingindo o ponto de escoamento. Se antes havia preponderância do comportamento de um sólido viscoelástico, a partir de então, prevalece um comportamento viscoso. No entanto, Mezger (2018) exemplifica na Figura 7, a possibilidade de haver comportamentos de ruptura frágil, utilizando dois géis de amido de milho, em que S1 é um gel contendo amido nativo e S2, amido modificado.

Figura 7 – Géis de amido de milho com ruptura frágil (S1) e ruptura gradual (S2)



Fonte: Mezger (2018)

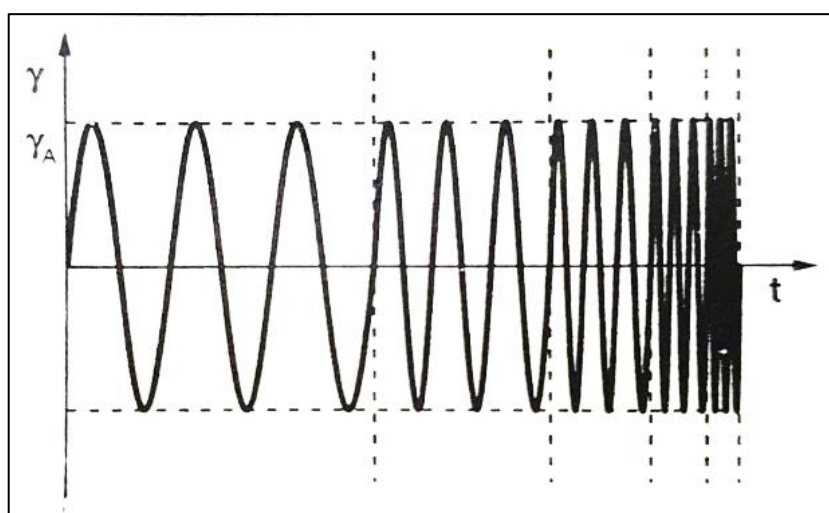
A curva S1 mostra que, sob a ação do cisalhamento, a amostra apresenta uma ruptura heterogênea, conhecida como fratura frágil, rompendo-se em pedaços grandes. Já em se tratando da amostra S2, percebe-se uma ruptura gradual e homogênea, resultado de um desgaste progressivo da superestrutura depois de passar pela região VEL.

2.3.6.2 Varredura de frequência – *frequency sweep test*

O ensaio de varredura de frequência, ou – FS não é um ensaio usual para avaliar o comportamento reológico de solos, em vista de que, segundo Markgraff (2006), esses são em geral aplicados para avaliar materiais com predominância viscosa em um domínio de tensões muito baixo, em que as diferenças são mais aparentes. Entretanto, Mezger (2018) destaca que esse ensaio trabalha no intervalo de deformações não destrutivas, isto é, um ensaio que avalia a rigidez dos materiais, possuindo ampla aplicação em polímeros e resinas com comportamento semelhantes a sólidos elásticos.

Nos ensaios de FS, a frequência decresce ou se eleva paulatinamente a cada ponto de medição, ao passo que a amplitude se mantém constante, como é evidenciado na Figura 8. Mezger (2018) complementa que é comum a apresentação dos dados deste ensaio em um gráfico com módulo de armazenamento e módulo de perda no eixo das ordenadas e frequência no eixo das abcissas, com ambos os eixos em escala logarítmica.

Figura 8 – Deformação em função do tempo com frequência constante

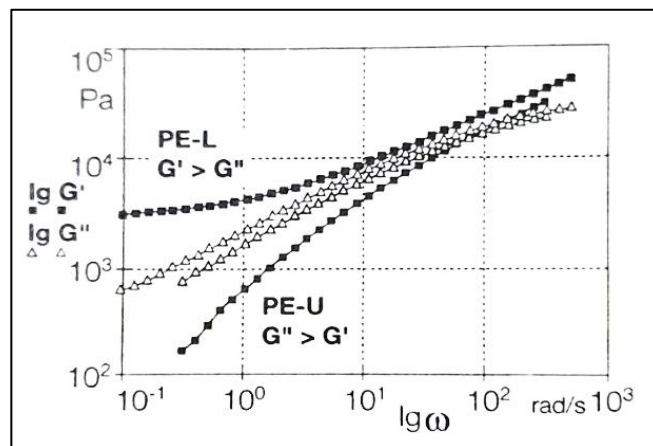


Fonte: Mezger (2018)

Mezger (2018) compara o comportamento de duas amostras de polímeros, um é polietileno reticulado (PE-L) e outro não (PE-U) quando submetidos à varredura de frequência. A Figura 9 mostra o comportamento desses materiais por G' e G'' em função da frequência a uma deformação cisalhante constante de 1%.

A amostra PE-U, em frequências menores, apresenta um predomínio de G'' sobre G' , o que traduz o desempenho viscoso, e com a elevação da frequência, G' passa G'' . Em oposição, a amostra PE-L é reticulada, percebendo-se constância de $G' > G''$ no decorrer de todo o intervalo de análise, em que não há um ponto de cruzamento das curvas. O grau de reticulação nesse caso é tão maior quanto mais elevado for módulo de armazenamento, o que significa também que maior é sua rigidez (MEZGER, 2018).

Figura 9 – Definição do VEL de uma amostra viscoelástica no estado sólido



Fonte: Mezger (2018)

2.4 ANÁLISE MECÂNICA

A compreensão do comportamento do solo, por conta das ações externas ocasionadas pelo tráfego de veículos ou apoio de materiais ou edificações sobre o terreno, está estritamente ligada às suas características mecânicas. De acordo com Reichert et al. (2010), determina-se as propriedades mecânicas através das alterações volumétricas e de resistência ao cisalhamento, descritos pela poropressão (tensões de pressão exercidas pela água no interior dos solos), que, por sua vez, é dependente das conexões interparticulares, distribuição porosa e suas características hidráulicas.

Hillel (1998) mostra que tensão nada mais é do que a aplicação de uma força sobre uma área, quando essa força é aplicada perpendicularmente a área, tem-se uma tensão normal e, ao ser aplicada paralelamente à área, resulta em uma tensão cisalhante. Os esforços, por sua vez,

são transmitidos através dos pontos em que há uma conexão das partículas, resultando em tensões e deformações que ocorridas através do tempo. Reichert et al. (2010) complementa ainda que para cada tensão aplicada há a sua equivalente deformação, contanto que a tensão aplicada externamente seja superior à resistência interna do solo (HORN, 2003), oportunizando a concepção de relações tensão-deformação dos materiais, as quais estabelecem seu comportamento mecânico tanto em relação à normal quanto à cisalhante.

Estruturas de pavimentos são solicitadas pela passagem de rodas dos veículos e, conseqüentemente, passam por uma deformação conhecida como específica total. Essa deformação se caracteriza pelas parcelas viscoelástica característica, elástica característica (resiliente) e plástica característica (permanente). As deformações ditas elásticas correspondem às parcelas recuperáveis da estrutura, enquanto as parcelas plásticas são aquelas ditas irreversíveis (BERNUCCI et al., 2010). As deformações viscoelásticas de um pavimento até então são compreensíveis apenas nas misturas asfálticas não serão abordadas nos itens que seguem.

2.4.1 Ensaios triaxiais de cargas repetidas

Os ensaios triaxiais de cargas repetidas são realizados através do equipamento triaxial de cargas repetidas (Figura 10 – Equipamento triaxial de cargas repetidas) a fim de reproduzir laboratorialmente o carregamento advindo do tráfego na estrutura e, conseqüentemente, determinar o comportamento de solos frente às deformações elásticas e plásticas.

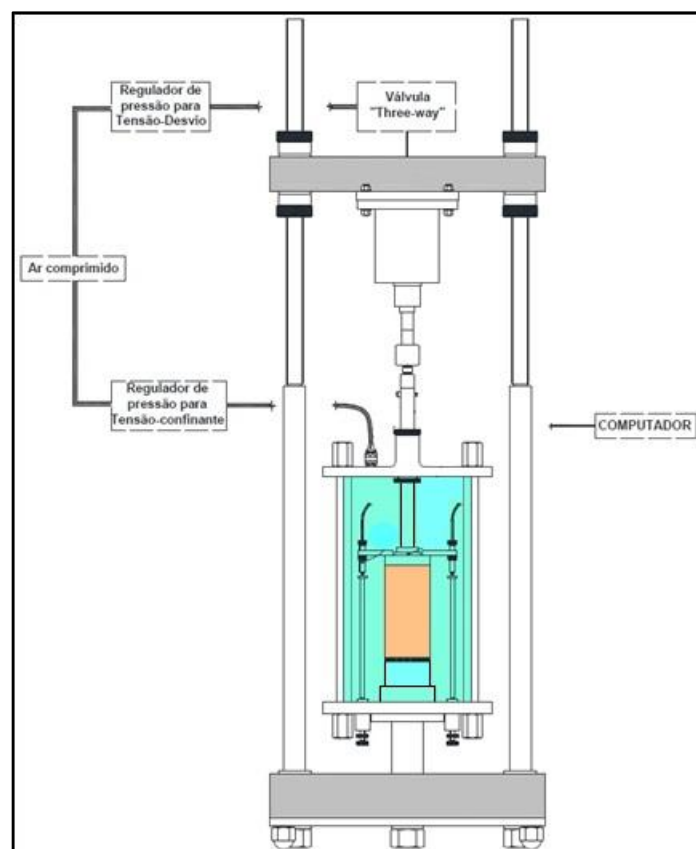
No que tange às deformações elásticas, realiza-se o ensaio de módulo de resiliência (MR) que tem por objetivo avaliar o desempenho quanto ao comportamento resiliente do material que, em função dos variados estados de tensões aplicados, em geral, não apresentam um comportamento linear (UZAN, 1985). Em se tratando do desempenho plástico, executa-se o ensaio de deformação permanente (DP), o qual se baseia na aplicação, em um corpo de prova, de elevados ciclos de uma carga repetitiva a um determinado estado de tensão, monitorando suas respectivas deformações no decorrer das aplicações (DNIT, 2018a).

São aplicados pelo equipamento, carregamentos de compressão, conhecido como tensão principal (σ_1), no topo do corpo de prova sempre em um mesmo sentido, até que se atinja uma carga estipulada como máxima e depois é reduzida a zero ou uma tensão menor para que fique em repouso e o processo se repete em uma quantidade pré-estabelecida. Além dessa tensão,

insere-se na câmara uma tensão conhecida como confinante (σ_3), a qual advém do sistema de ar comprimido.

A submissão dos corpos de prova aos esforços gera consequentes deformações axiais que podem ser de característica elástica (ϵ_r), ou plástica (ϵ_p), medidas recebidas por um *software* em potenciais elétricos captados através de transdutores eletromagnético-mecanizados, denominados *Linear Variable Differential transformer* (LVDT) e *Rectilinear Displacement Transduce* (RDT).

Figura 10 – Equipamento triaxial de cargas repetidas



Fonte: DNIT (2018a)

2.4.1.1 Módulo de Resiliência

O módulo de resiliência é um parâmetro que possui sua principal aplicabilidade na mecânica dos pavimentos, sendo a relação entre um carregamento que se aplica repetidamente em forma de ciclos com a parcela retornável da deflexão dos materiais. Este índice caracteriza o desempenho elástico de materiais como solo ao serem submetidos laboratorialmente a

carregamentos repetidos que representam a passagem de veículos sobre uma estrutura de pavimento (MEDINA; MOTTA, 2015).

É reforçado por Santos (2016), que o módulo resiliente é de extrema relevância para determinar as respostas mecânicas dos solos ao serem aplicados em camadas estruturais de pavimentação. Através do MR é possível qualificar os materiais aplicados nas camadas de revestimento, base, sub-base e subleito de pavimentos, através da avaliação de diversas situações e condições de tráfego (tensões atuantes), umidade e massa específica. A consecução dos resultados se dá a partir de ensaios realizados no ETCR, tal como expressa a Equação 06 através da correlação da tensão desvio e sua deformação retornável ou resiliente (BALBO, 2007).

$$MR = \frac{\sigma_d}{\epsilon_r} \quad (06)$$

Onde:

σ_d : tensão desvio ($\sigma_1 - \sigma_3$), em MPa;

σ_1 : tensão principal maior, em MPa;

σ_3 : tensão de confinamento (tensão principal menor), em MPa;

ϵ_r : $\frac{\Delta h}{h_0}$, deformação específica axial resiliente (vertical), em mm/mm;

Δh : deslocamento vertical máximo, em mm;

h_0 : altura de referência do corpo de prova, em mm;

MR : módulo de resiliente, em MPa.

O módulo resiliente é dependente da gênese e granulometria dos solos, das tensões aplicadas e das condições de disposição física. Aquilo que diz respeito à gênese é relacionado à plasticidade, à natureza mineralógica, relações cimentantes, disposição estrutural e textura dos grãos; no que tange às tensões concerne às ações dinâmicas dos eixos dos veículos em um pavimento; e, finalmente às condições da disposição física remete à umidade e à massa específica aparente seca (BAYOMY; AL-SANAD, 2013; MEDINA; MOTTA, 2015; RAZOUKI; IBRAHIM, 2017; LIMA et al., 2018; SANTOS et al., 2019; PASCOAL, 2020).

Os primeiros estudos direcionados ao entendimento à deformação resiliente de solos, segundo Medina e Motta (2015), foram conduzidos por Francis Hveem, em meados da década de 1950. Os experimentos precursores voltados à pavimentação no Brasil foram realizados ao fim da década de 1970, através de uma coalizão IPR/COPPE, em amostras de solo compactadas em dimensões de 5 e 10 cm de diâmetro e altura, respectivamente.

Medina e Preussler (1980) mostram que em solos coesivos, o teor de umidade e a massa específica são fundamentais no seu desempenho resiliente. Análises feitas por Mello et al. (2021) comprovam que, a partir de uma porcentagem limite de umidade, conhecida como umidade ótima, é reduzida a massa específica das amostras, o que resulta em uma redução do módulo resiliente em umidades acima da umidade ótima, por isso é sugerido que as moldagens dos corpos de prova sejam realizadas na umidade ótima (e conseqüente massa específica aparente máxima), no intuito de reduzir a influência da metodologia a ser aplicada.

Estudos realizados desde a década de 1980, mostram que solos que possuem laterização tendem a apresentar comportamentos resilientes elevados (MEDINA; MOTTA, 2015). Takeda (2006) comprova que solos lateríticos possuem um melhor desempenho resiliente em relação aos solos de comportamento não laterítico

Através do ensaio triaxial de cargas repetidas é possível avaliar os aspectos de deformação resiliente (elástica) não só de solos, mas também de britas graduadas, solos e materiais enriquecidos com aditivos químicos ou fibrosos, materiais otimizados granulometricamente e demais insumos alternativos ao emprego em camadas de pavimentos (DNIT, 2018a). De acordo com Pinto (2006), o processo de compactação é elementar para a determinação da relação entre MR e tensão desvio, pois gera conformação das partículas de solos, o que amplia a área de contato e minimiza o índice de vazios com conseqüente aumento da impermeabilidade, resistência e rigidez dos corpos de prova.

Inúmeros modelos matemáticos foram concebidos com o intuito de demonstrar a performance dos materiais perante as aplicações de tensões de forma experimental para se adquirir o MR dos materiais. Um modelo extremamente utilizado é o de Biarez (1962), o qual visa analisar o MR de materiais granulares. O autor apresenta a Equação 07 que considera significativamente a influência da tensão confinante (PREUSSLER, 1978).

$$MR = k_1 \cdot \sigma_3^{k_2} \quad (07)$$

Onde:

MR: módulo de resiliência, em MPa;

k_1 e k_2 : parâmetros de resiliência

σ_3 : tensão confinante (tensão principal menor), em MPa.

Enquanto a Equação 08, apresentada por Medina e Motta (2015), mostra a interferência da soma dada pelas tensões principais no MR, ou seja, $\theta = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$. Em caso de compressão triaxial, verifica-se o $\theta = \sigma_1 + 2 \cdot \sigma_3$, considerando que $\sigma_2 = \sigma_3$ e $\sigma_d = \sigma_1 - \sigma_3$, assim $\theta = \sigma_d + 3\sigma_3$.

$$MR = k_1 \cdot \theta^{k_2} \quad (08)$$

Onde:

MR: módulo de resiliência, em MPa;

θ : soma das tensões principais, em MPa;

k_1 e k_2 : parâmetros de resiliência.

Svenson (1980) baseou-se em Hicks (1970), para propor um modelo em que a tensão desvio tem maior influência que a tensão confinante, cujo modelo é recomendado para solos coesivos e são apresentados na Equação 09.

$$MR = k_1 \cdot \sigma_d^{k_2} \quad (09)$$

Onde:

MR: módulo de resiliência, em MPa;

σ_d : tensão desvio (tensão principal menor), em MPa;

k_1 e k_2 : parâmetros de resiliência.

Balbo (2007) mostra que ainda que a granulometria de solos laterítico sejam semelhantes aos de solos arenosos, o seu comportamento é tipicamente semelhante ao de materiais finos com coesão. Macêdo (1996), ao analisar um trecho rodoviário paulista, mostra que o modelo proposto por Pezo et al. (1992) diz respeito a uma teoria por regressão linear que leva em conta tanto as tensões desvio quanto as tensões confinantes, batizado de Modelo Composto, Equação 10.

$$MR = k_1 \cdot \sigma_3^{k_2} \cdot \sigma_d^{k_3} \quad (10)$$

Onde:

MR: módulo de resiliência, em MPa;

σ_d : tensão desvio (tensão principal menor), em MPa;

k_1 , k_2 e k_3 : parâmetros de resiliência.

Finalmente há o modelo conhecido como Universal, incluído na *National Cooperative Highway Research Program Project* (NCHRP, 2004). O modelo apresentado na Equação 11 possui um k_1 proporcional ao coeficiente elástico, sempre sendo positivo e toda vez em que houver aumento da tensão principal, haverá também uma crescente de rigidez e conseqüentemente no módulo de rigidez (k_2 será positivo). O acréscimo da tensão confinante gera um k_3 negativo e um módulo resiliente menor

$$M_R = k_1 \cdot \rho_a \left(\frac{\theta}{\rho_a} \right)^{k_2} \cdot \left(\frac{\tau_{oct}}{\rho_a} + 1 \right)^{k_3} \quad (11)$$

Onde:

M_R : módulo de resiliência;

θ : $\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$: tensões principais;

τ_{oct} : $\frac{1}{3} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2}$: tensão octaédrica;

ρ_a : pressão atmosférica;

k_1 , k_2 e k_3 : parâmetros de resiliência determinados experimentalmente.

O uso de carregamentos repetidos nos materiais mostra que o MR tem dependência de sua origem, granulometria, condições de carregamento, do histórico de tensões, porcentagem de umidade, tensões atuantes, massa específica aparente seca (MEAS), da quantidade de vezes que a tensão desvio se repete, da metodologia de compactação, tipo de agregado, entre outros (MEDINA; PREUSSLER, 1980; SVENSON, 1980; PREUSSLER, 1983; GUIMARÃES; MOTTA; MEDINA, 2001; LIMA et al., 2018; SANTOS et al., 2019; ZUCCHI et al., 2019; PASCOAL, 2020).

Em conformidade com o que foi discutido neste capítulo, a mecânica dos pavimentos possui ensaios em mesoescala, já consolidados, para a avaliação das propriedades de camadas granulares, como é o caso do ensaio de MR e de DP. Este primeiro ensaio é executado a fim de obter as propriedades resilientes do material através de carregamentos triaxiais, que, por sua vez, resultam em módulos axiais, sem que haja danificação das amostras em análise. Neste sentido, é possível prever uma análise semelhante quando avaliado o comportamento micromecânico do solo, dentro do VEL dos ensaios reológicos, onde as deformações são também recuperáveis. Em se tratando do ensaio de danificação em mesoescala (ensaio de deformação permanente), são estudadas as deformações não recuperáveis do material, o que

diz respeito, na reologia, aos trechos posteriores ao limite viscoelástico linear, os quais incluem também o ponto de *crossover*, trecho de encontro das curvas G' e G'' .

Analisando a literatura, os ensaios com maior potencial de obtenção de dados, para a linha de aplicação almejada, são os ensaios de varredura de amplitude e varredura de frequência. Ao considerar somente os parâmetros de rigidez, tais testes permitem avaliar prováveis relações entre o comportamento mecânico e reológico, através de seus resultados, respectivos, de módulos axiais e módulos de cisalhamento em cada uma das condições propostas.

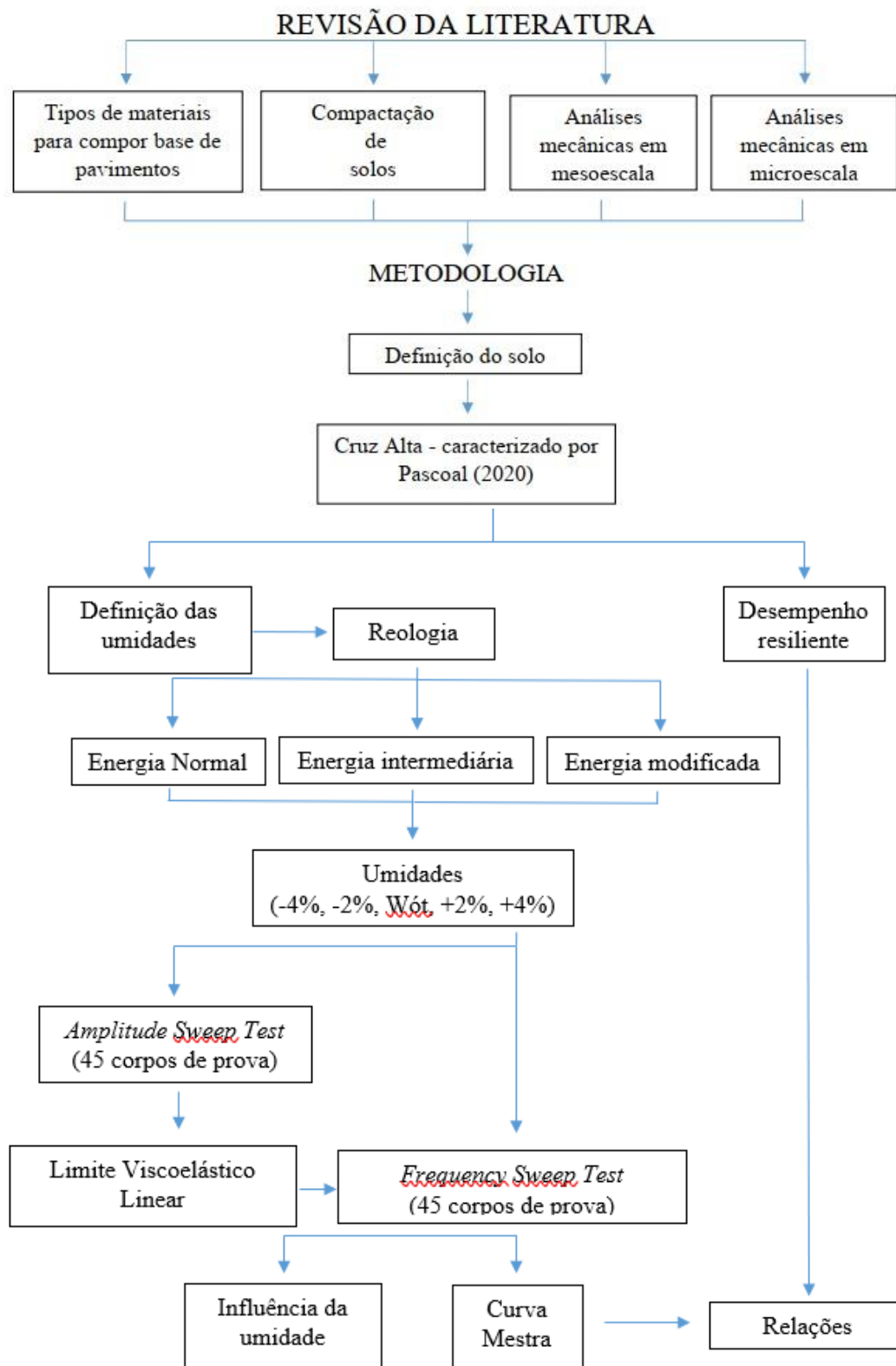
3 METODOLOGIA

Este capítulo apresenta o material a ser aplicado na pesquisa, os métodos de caracterização física, classificações e determinação do comportamento mecânico. O foco está essencialmente no desempenho resiliente desse solo e, finalmente, a moldagem e operação do equipamento que permite a avaliação do comportamento reológico. A abordagem deste último item, dar-se-á em termos do comportamento reológico em dois diferentes ensaios, o teste de varredura de amplitude e o de varredura de frequência, os quais permitirão avaliar possíveis correlações entre as duas escalas de avaliação mecânica.

3.1 PLANEJAMENTO DA PESQUISA

A Figura 11 apresenta as etapas principais para o desenvolvimento sequencial planejado neste trabalho. Com a definição e apresentação das premissas fundamentais do solo em estudo e seu comportamento mecânico em mesoescala, definiu-se diferentes umidades para que, nas dependências do Grupo de Estudos e Pesquisas em Pavimentação e Segurança Viária (GEPPASV/UFSM), fossem realizados ensaios de reometria. Os ensaios reométricos têm a finalidade de compreender o comportamento mecânico dos solos em função da reologia e, por conseguinte, buscar relações com o seu comportamento mecânico, essencialmente ao que tange o seu desempenho resiliente.

Figura 11 – Esquema da pesquisa



Fonte: Autor

3.2 MATERIAIS UTILIZADOS

O solo adotado para este estudo, trata-se de um material argiloso extraído de uma jazida junto à rodovia José Di Pietro, na ERS 342, conforme a Figura 12, com coordenadas 28°37'39.20" sul e 53°37'31.50" oeste, do município de Cruz Alta, localizado na região noroeste do Rio Grande do Sul, a uma altitude de 452 metros segundo IBGE (2018). Este mesmo material foi utilizado na construção do aterro rodoviário e subleito das obras referentes à interseção de acesso norte a Cruz Alta na mesma rodovia já mencionada. Esse material foi estudado por Pascoal (2020), que analisou suas características físicas, químicas e mecânicas (comportamento resiliente deste material).

O solo de Cruz Alta, denominado CA, Figura 13a, é originário do arenito Botucatu ou da sua mistura com basalto. Lemos (1973) discorre que o material predominante dessa região é o solo laterítico vermelho-escuro, originado do intemperismo de derrames basálticos de relevos planos e suavemente ondulados da Bacia do Paraná com textura média e profundos. Foi realizada, no mês de julho/2020, a coleta do material do horizonte pedogenético B do talude apresentado na Figura 13b.

Figura 12 – Localização da jazida CA



Fonte: adaptado do Google Maps (2020)

Figura 13 – Jazida - detalhamento dos horizontes (a) e solo coletado de CA (b)



Fonte: Autor

Propõe-se neste estudo moldar corpos de prova em teores de umidade que variam em 2 e 4 % abaixo e acima da umidade ótima para as energias de compactação normal, intermediária e modificada, estudadas por Pascoal (2019).

3.3 CARACTERIZAÇÕES DOS MATERIAIS TERROSOS

Neste item, serão primeiramente apresentados os resultados obtidos através das caracterizações em mesoescala realizados por Pascoal (2020). Os parâmetros de caracterização foram compilados, sendo apresentados a avaliação granulométrica por peneiramento e sedimentação, os limites de consistência, massa específica real e análise química, assim como os ensaios de compactação. Além disso, apresenta-se classificação de acordo com o Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS) e a *Transportation Research Board* (TRB/AASHTO), metodologias tradicionais, e através da metodologia MCT. Na sequência é descrito o ensaio adotado para a caracterização em microescala, através das análises reológicas em um reômetro modular compacto.

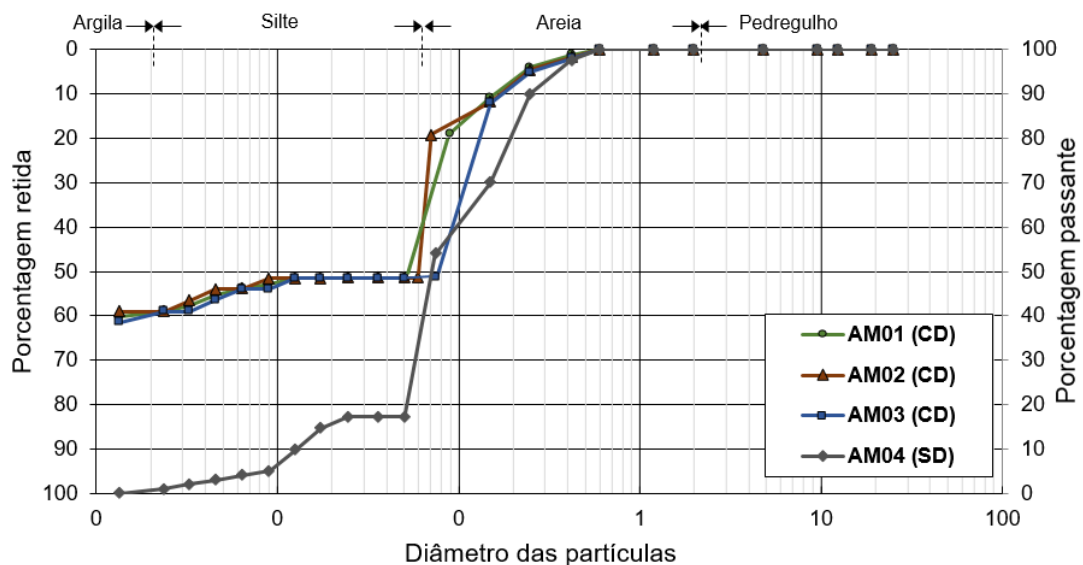
3.3.1 Caracterização física do solo

As caracterizações físicas realizadas por Pascoal (2020) para o solo CA, foram preparadas seguindo os preceitos da NBR 6457 (ABNT, 2016a), a qual expõe a forma de preparo aos ensaios de caracterização. O solo foi analisado granulometricamente através da

NBR 7181 (ABNT, 2016e) a qual recomenda a aplicação de ensaios por peneiramento da parcela de maiores dimensões, acompanhado do ensaio granulométrico por sedimentação com a utilização de defloculante (hexametáfosfato de sódio) e sem o uso desse. A união dos respectivos resultados de cada granulometria irá compor a curva granulométrica do solo. A Figura 14 exhibe as granulometrias do horizonte B, do solo CA, fazendo o uso de defloculando (CD) e sem o uso desse (SD).

Os limites de consistência, ou limites de Atterberg foram obtidos com base no que apresenta a NBR 6459 (ABNT, 2016b) para o limite de liquidez dos solos e na NBR 7180 (ABNT, 2016d), a qual propõe o ensaio do limite de plasticidade. A norma que regulamenta o processo para se determinar a massa específica real dos grãos é NBR 6508 (ABNT, 2016c), que recomenda que esse seja realizado com o uso de um picnômetro para solos que passam na peneira de número 4. A síntese dos resultados é apresentada na Tabela 1.

Figura 14 – Curvas granulométricas com e sem defloculante do solo CA



Fonte: Pascoal (2020)

Em uma perspectiva mais geral, evidencia-se a constância nos valores obtidos para cada amostra analisada do solo CA, fator que corrobora a correta realização do ensaio de granulometria. Ambas as análises salientam à quantidade significativa de finos, com teores que se aproximam de 26% de silte e 41% de argila. Na análise granulométrica por peneiramento percebe-se que cerca de 81% das partículas do solo CA são passantes na peneira de nº 200 (0,075 mm). O elevado valor do peso específico diz respeito ao alto teor de ferro do solo, evidenciando seu comportamento laterítico.

Tabela 1 - Análise granulométrica média do solo CA

Parâmetros	Solo CA
Peso específico (γ) kN/m ³	27,80
% pedregulho (>2,0mm)	0
% areia grossa (0,6 – 2,0mm)	0
% areia média (0,2 – 0,6mm)	8
% areia fina (0,06 – 0,2mm)	25
% silte (2 μ m – 0,06mm)	26
% argila (%< 2 μ m)	41
% passante n° 200	81
Limite de Plasticidade (LP) %	44
Limite de Liquidez (LL) %	55
Índice de Plasticidade (IP) %	11

Fonte: Pascoal (2020)

3.3.2 Classificação do solo

O solo foi classificado através das metodologias tradicionais (SUCS e TRB/AASHTO) nas quais se fez necessário obter as características de granulometria, plasticidade e liquidez dos materiais. A classificação MCT, foi realizada baseada nas características avaliadas a partir de corpos de prova cilíndricos, compactados em conformidade à DNER-CLA 259/96, a qual classifica solos tropicais com finalidades rodoviárias.

O solo CA foi classificado na classificação unificada, SUCS, como um silte de elevada plasticidade (MH), por conta de o LL ser maior que 50. Para a TRB/AASHTO, o solo CA apresentam um comportamento apontado como de sofrível a mau para aplicação em subleitos de pavimentos, sendo categorizados como um solo A-7-6 com um IG de 11 (material com alta variação volumétrica). A classificação MCT revela o solo sedimentar de Cruz Alta, originado da formação Botucatu, sendo um típico latossolo argiloso (LG') recomendado para aplicação deste material em pavimentação.

3.3.3 Compactação do solo

Os ensaios de compactação foram realizados por Pascoal (2020) de acordo com as diretrizes da normativa DNIT-ME 134/2018 – Pavimentação – Solos – Determinação do módulo de resiliência – Método de ensaio (DNIT, 2018a), junto ao procedimento REDE 04

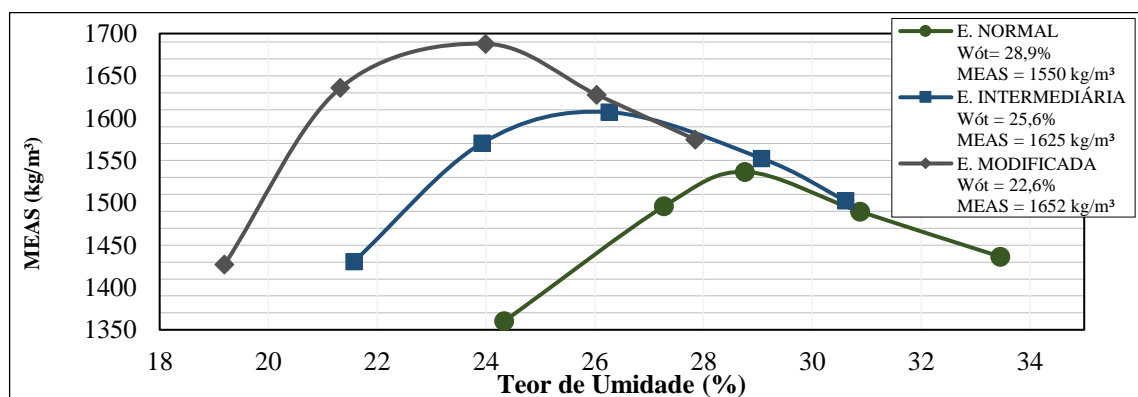
(PETROBRAS, 2010) em que, através de um esforço mecânico, intenciona-se minimizar o percentual de vazios da amostra e desta maneira potencializar seus atributos mecânicos. Zucchi et al. (2019) demonstram ser essencial realizar a compactação utilizando a mesma metodologia prevista para a moldagem dos corpos de prova (CP) aos ensaios triaxiais, pois há uma diferença significativa nos parâmetros de MEAS e umidade ótima (Wót).

Existem três possibilidades de realizar os ensaios, os quais se diferem pela quantidade de golpes dados na amostra e a altura de queda do soquete compactador, discriminados entre energia normal, intermediária e modificada. A partir dessas energias, é possível concatenar o máximo peso específico aparente e Wót do material submetido à compactação.

A norma DNIT-ME 134/2018 (DNIT, 2018a) preconiza que a execução dos ensaios com amostras deformadas, precisam ser realizados após a secagem do solo ao ar ou em estufa com até 60° C, com material passante na peneira de malha igual a 4,8 mm. Em seguida o solo deve ser destorroado e finalmente quarteado para ser ensaiado. Nesta regulamentação, indica-se a execução dos ensaios em moldes tripartidos, com dimensões de 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura, os mesmos moldes a serem utilizados nos ensaios de módulo resiliente e deformação permanente, de forma a facilitar a desmoldagem da amostra e evitar qualquer diferença de resultados de MEAS e Wót.

Pascoal (2020) executou os ensaios de compactação por impacto com um compactador de 2,50 kgf seguindo altura de queda de 30,5 cm, variando o número de repetições do impacto em cada uma das 10 camadas de material entre 55, 27 e 12 às energias modificada, intermediária e normal, na devida ordem. A Figura 15 expõe as curvas de compactação, obtidas pela autora, permitindo inferir massa específica aparente seca máxima e umidade ótima para os solos compactados nas referidas energias.

Figura 15 – MEAS máx e Wót do solo de CA



Fonte: Adaptado de Pascoal (2020)

3.4 ESTUDO REOLÓGICO

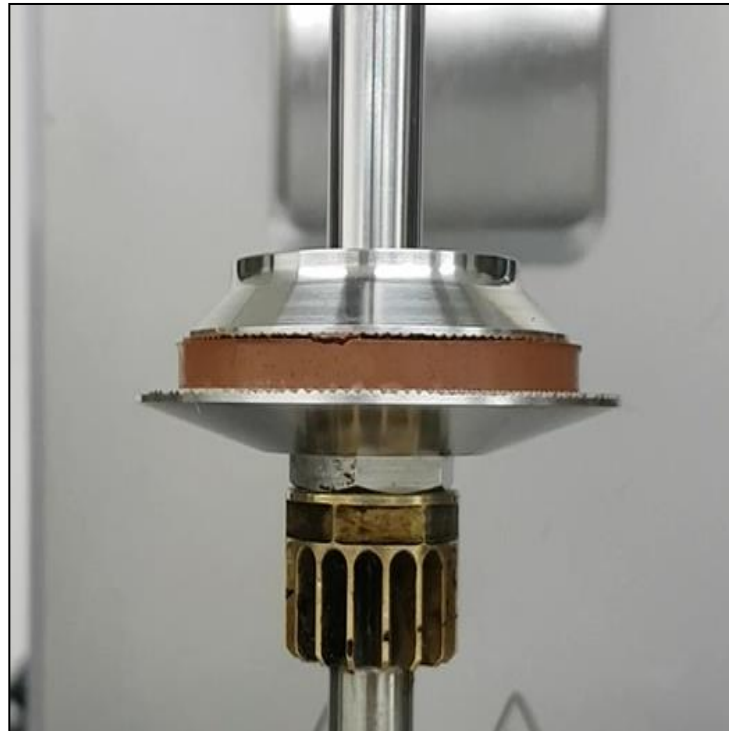
Foram realizadas em amostras de solo, análises reológicas com testes de varredura de amplitude da deformação com frequência constante (MARKGRAF; HORN; PETH, 2006; PÉRTILE, 2015) e testes de varredura de frequência, com amplitude constante, utilizando o reômetro Anton Paar EC Twist 502. A Figura 16, mostra o equipamento localizado junto ao GEPPASV, na Universidade Federal de Santa Maria. O equipamento tem a capacidade de ensaiar materiais em diversas geometrias, e, especificamente, nesta pesquisa são propostas as medições em placas paralelas, consolidadas na literatura, e nos dispositivos de torção de barras sólidas - TB.

O dispositivo de medição de placas paralelas é caracterizado por uma placa rugosa fixa, na parte inferior do equipamento, com diâmetro de 50 mm e uma placa rotativa, rugosa na parte superior, com diâmetro de 40 mm, conforme demonstra a Figura 17. Já o conjunto para a geometria de torção de barras é formado por um grampo inferior estacionário e um grampo superior com capacidade rotativa conectado ao eixo acionador do reômetro, como apresentado na Figura 18, os quais possibilitam executar testes de torção em barras sólidas, usualmente em um comprimento livre de 40 mm, e com 10 mm e 5 mm de espessura e comprimento, respectivamente.

Figura 16 – Reômetro modular compacto

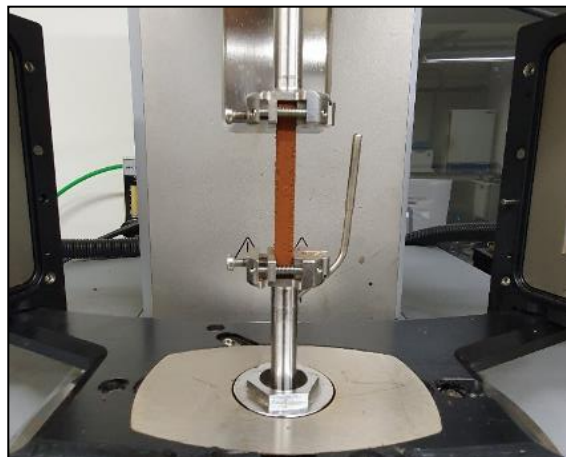


Figura 17 – Dispositivo de ensaio de placas paralelas



Fonte: Autor

Figura 18 – Dispositivo de ensaio de torção de barras



Fonte: Autor

O solo advindo da jazida de Cruz Alta, foi separado e passado pelo processo de secagem ao ar. O material então foi destorroado e passado na peneira de malha número 10 (abertura de 2 mm), separando-se assim amostras constituídas de solo fino seco ao ar (SFSA). O diâmetro máximo foi definido em um quinto da menor dimensão dos corpos de prova a serem moldados. Foi proposto inicialmente o preparo de três amostras de SFSA para cada uma das umidades,

compactando-as de forma a torná-las equivalentes às três energias de compactação para cada geometria, de acordo com a NBR 6457 (ABNT, 2016a) e são descritas na Tabela 2.

Tabela 2 – Condições equivalente dos ensaios

Energia	Varição de umidade	W (%)	MEAS (kN/m ³)	Nomenclatura
Normal	-4%	24,90	1550	EN-4
	-2%	26,90		EN-2
	Ótima	28,90		ENót
	+2%	30,90		EN+2
	+4%	32,90		EN+4
Intermediária	-4%	21,60	1625	EI-4
	-2%	23,60		EI-2
	Ótima	25,60		EIót
	+2%	27,60		EI+2
	+4%	29,60		EI+4
Modificada	-4%	18,60	1652	EM-4
	-2%	20,60		EM-2
	Ótima	22,60		EMót
	+2%	24,60		EM+2
	+4%	26,60		EM+4

Fonte: Autor

Tendo conhecimento dos valores de umidade ótima e massa específica máxima, o material foi separado para realização dos ensaios nas duas geometrias referidas anteriormente, o dispositivo de placas paralelas, e em torção de barras. A MEAS é mantida constante para todas as amostras de cada energia equivalente, pois busca-se avaliar o comportamento reológico dos materiais, apenas a se considerar da variação de umidade. Os processos de moldagem, descritos a seguir, seguem um método rigoroso de preparo e moldagem para evitar erros de medições e, apesar de serem distintos, ambos seguem o mesmo princípio: atingir a densidade requerida em determinada energia equivalente de compactação e no volume que a geometria permite.

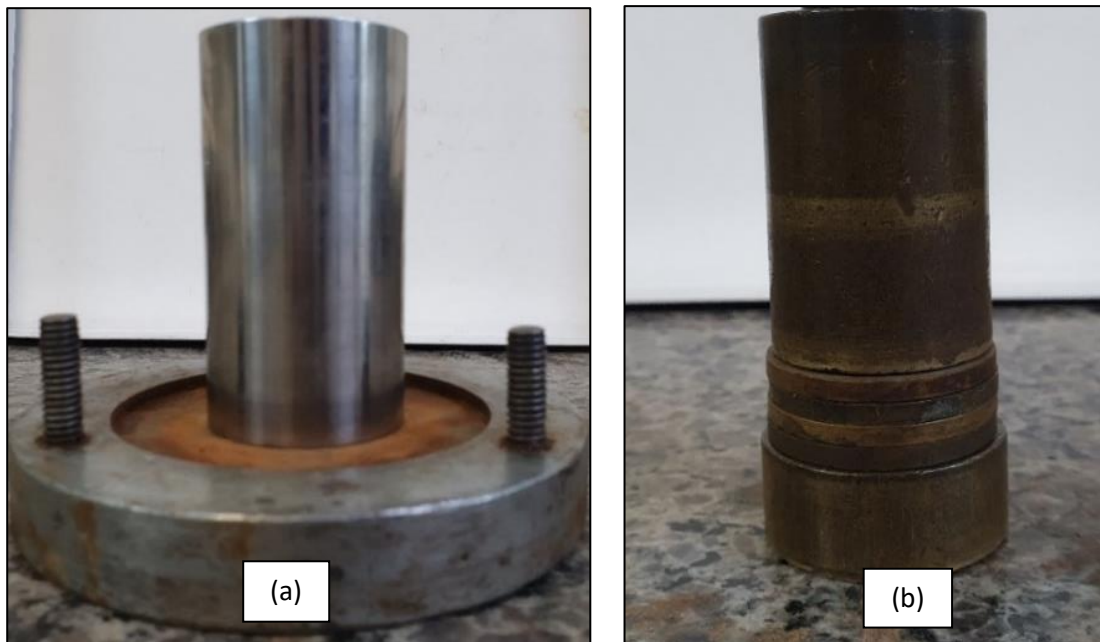
3.4.1 Dispositivo de placas paralelas (PP)

Os testes no dispositivo de placas paralelas são propícios para ensaiar géis, pastas, sólidos macios e polímeros fundidos de alta viscosidade (MEZGER, 2018). Uma das vantagens do uso dispositivo PP, é a possibilidade de definir diferentes condições de medição, podendo assim serem ensaiadas amostras de solos compactadas. Para os ensaios realizados com esta geometria, o diâmetro proposto foi acordado através do diâmetro das placas disponíveis para os ensaios, enquanto a altura do disco (*gap*) possuía maleabilidade. Logo os discos foram

moldados com 40 mm de diâmetro e 10 mm de altura, observando um *gap* pelo menos cinco vezes maior que o diâmetro máximo do material (2 mm).

Após o processo de acréscimo de umidade e armazenamento do material, iniciou-se o processo de compactação da amostra. Para a execução deste tipo de moldagem, foi produzido um molde metálico vazado em formato cilíndrico, com altura igual a 150 mm e diâmetro interno de 40 mm (Figura 19a) e um compactador cilíndrico maciço com diâmetro ligeiramente inferior ao do molde (38 mm), altura de 160 mm e marcações para determinar a altura certa do corpo de prova de solo (Figura 19b).

Figura 19 – Molde cilíndrico metálico para PP (a) e compactador PP (b)

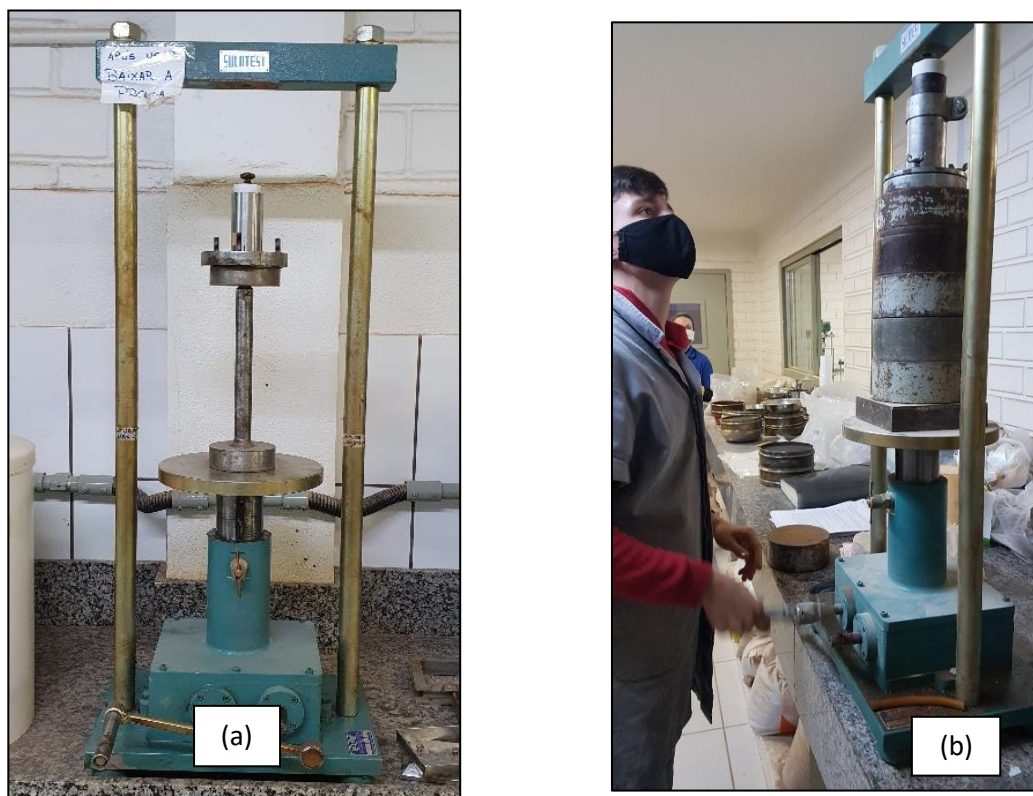


Fonte: Autor

O procedimento de compactação consiste em, inicialmente, passar desmoldante no cilindro metálico, após foi inserido um filtro de polietileno no interior do molde e, com o uso de um funil, foi acrescentado a massa de solo necessária (descrita na

Tabela 3) para que atinja a MEAS, para os corpos de prova com volume de 12,57 cm³. Em seguida, homogeneizou-se com o auxílio de uma espátula o material do interior com leves movimentos que auxiliem na ocupação completa do cilindro, sobre esse material, foi colocado o segundo filtro de polietileno e, finalmente, foi posicionado o cilindro compactador. O conjunto é levado para uma prensa hidráulica, Figura 20a onde será elevado constantemente até que o corpo de prova atinja a altura estipulada, tal qual demonstrado na Figura 20b.

Figura 20 – Conjunto para PP (a) em processo de compactação (b)



Fonte: Autor

Tabela 3 – Massa de solo a ser compactado no dispositivo PP

Nomenclatura	W (%)	MEAS (kN/m ³)	Massa de solo (g)
PPN-4	24,90		23,54
PPN-2	26,90		23,92
PPNót	28,90	1550	24,30
PPN+2	30,90		24,67
PPN+4	32,90		25,05
PPI-4	21,60		24,83
PPI-2	23,60		25,24
PPIót	25,60	1625	25,65
PPI+2	27,60		26,06
PPI+4	29,60		26,46
PPM-4	18,60		24,62
PPM-2	20,60		25,04
PPMót	22,60	1652	25,45
PPM+2	24,60		25,87
PPM+4	26,60		26,28

Fonte: Autor

Retira-se da prensa e, com o auxílio do próprio compactador, a amostra é extraída (Figura 21) e posta sobre uma base rígida, para evitar qualquer possível dano. São averiguadas suas dimensões e massa (se a diferença da massa específica aparente for superior a 0,5%, o CP deve

ser descartado) e, em seguida, o corpo de prova deve ser envolto com plástico filme até que seja ensaiado, a fim de impedir a perda de umidade para o ambiente. As amostras foram testadas imediatamente após o processo de moldagem, visando manter a umidade de compactação.

Figura 21 – CP sendo extraído após compactação, $d=40\text{mm}$ e $h=10\text{ mm}$



Fonte: Autor

Após o processo descrito o disco de solo é retirado de seu envelope e é posto sobre a placa inferior do reômetro. Conforme sugerido por Holthusen, Peth e Horn (2010), o diâmetro do corpo de prova precisa estar em acordo com o diâmetro da placa superior para evitar possíveis efeitos da parcela de solo que circundaria a área sem o contato dessa. As avaliações reológicas foram definidas e executadas nas seguintes condições laboratoriais: em testes oscilatórios, temperatura estável na placa rugosa inferior de 20°C ; espaço entre placas (*gap*) de 1 cm; tempo de repouso antes do teste de 30 s; força normal máxima aplicada de 40 N.

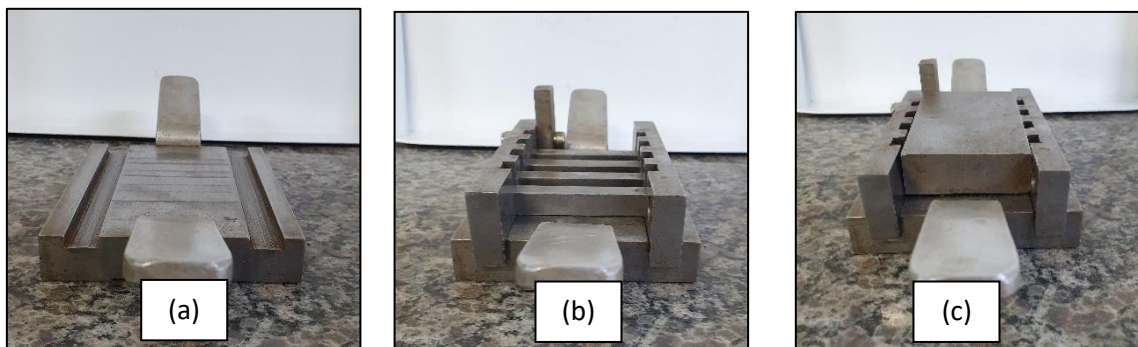
3.4.2 Dispositivo torção de barras sólidas (TB)

Para a execução dos testes no dispositivo torção de barras sólidas, como o próprio nome já denota, é necessário a moldagem de barras de solo com pequenas dimensões que são propícios para os ensaios de torção em materiais no estado sólido a temperatura ambiente. No caso desta pesquisa foram executados os testes em temperatura constante, também referidos como testes de análise dinâmico-mecânica, ou *dynamic-mechanic analysis* – DMA (MEZGER, 2018), com excitação senoidal.

Para a execução da compactação do material com esta geometria, utilizou-se o mesmo molde desmontável de Zat, et al. (2021). É um molde metálico, composto por uma base (Figura 22a), duas paredes laterais dotadas de frisos para o encaixe de quatro espaçadores em formato

de vigotas (Figura 22b) e uma cobertura metálica (Figura 22c) que recebe os esforços da prensa hidráulica a fim de compactar as amostras.

Figura 22 – Base (a), laterais, espaçadores centrais (b) e cobertura metálica (c)



Fonte: Autor

O conjunto possibilita que sejam moldadas três barras de solo por vez com dimensões aproximadas de 54 mm de comprimento, 10 mm de altura e 5 mm de espessura. Nestes casos, o *gap* em torno de 40 mm está associado ao comprimento livre da amostra, a qual dispõe de um excedente de aproximadamente 14 mm para a fixação da barra nos ganchos. Em cada processo de compactação, definiu-se utilizar sempre as três áreas destinadas às amostras, com material para finalidades e condições iguais, isto é, nas mesmas umidades e com energias de compactação denominadas equivalentes, a fim de minimizar possíveis erros.

Para o processo executivo, foram preparados aproximadamente 300g de solo, acrescentadas as umidades e, 24 horas depois do solo úmido homogeneizado, para iniciar a compactação. O molde é montado, aplicado desmoldante nas regiões que estarão em contato com o material, acrescentado a massa de solo necessária para cada amostragem, as quais estão dispostas na Tabela 4, e o conjunto é levado à, já mencionada, prensa hidráulica para que as amostras sejam compactadas.

Por se tratar de espécimes delicadas, qualquer diferença em seu processo constitutivo pode gerar resultados anômalos, portanto há necessidade da padronização rigorosa do processo. Todas as barras, após compactação, foram transferidas para uma base rígida, como na Figura 23, são medidas suas três dimensões e se averigua suas massas para certificação da MEAS e, tal qual ocorre ao dispositivo de placas paralelas, aquelas com desvio superior a 0,5% são descartadas.

Figura 23 – Corpo de prova sobre base rígida



Fonte: Autor

Cada exemplar foi envolto por plástico filme e acondicionado em uma caixa de isopor até o momento do ensaio. Cabe salientar que estes ensaios também foram realizados no dia da moldagem. O ensaio de reometria ocorre observando as condições constantes de temperatura no gancho inferior, igual a 20° C; *gap* total de 40 cm; repouso anterior ao teste de 30 s; e aplicação de uma tensão Normal máxima de 1 N.

Tabela 4 – Massa de solo a ser compactado para amostras em torção de barras

Nomenclatura	W (%)	MEAS (kN/m ³)	Massa de solo (g)
BTN-4	24,90		5,23
BTN-2	26,90		5,31
BTNót	28,90	1550	5,39
BTN+2	30,90		5,48
BTN+4	32,90		5,56
BTI-4	21,60		5,34
BTI-2	23,60		5,42
BTIót	25,60	1625	5,51
BTI+2	27,60		5,60
BTI+4	29,60		5,69
BTM-4	18,60		5,29
BTM-2	20,60		5,38
BTMót	22,60	1652	5,47
BTM+2	24,60		5,56
BTM+4	26,60		5,65

Fonte: Autor

3.4.3 Teste de Varredura de Amplitude

O teste de varredura de amplitude, tem a finalidade de definir o limite viscoelástico linear de cada espécime a ser avaliada. Para o ensaio de variação da amplitude da deformação de

0,0001 a 100%, a frequência é constante, igual a 0,5 Hz; série de cem pontos de medição com duração de 13 minutos. Avalia-se o material em triplicata para cada condição de ensaio (umidade e energia de compactação), totalizando em quarenta e cinco amostras para cada geometria, como demonstrado nas Tabela 5 e Tabela 6 e em seguida são analisadas as suas médias. Foram verificadas as umidades das amostras de solo antes e depois do ensaio, das quais se eliminaram aquelas com perda de umidade superior a 1%.

O programa utilizado para o controle e execução automática do Teste de Varredura de Amplitude e de Frequência, das medições e cálculos dos parâmetros reológicos foi o *software* RheoCompass 1.21.652. Durante a execução dos testes, Pértile (2015), Pértile *et al.* (2018) e Zat *et al.* (2021) que trabalham com o ensaio de AS, utilizam amostras em dispositivo de placas paralelas e explicam que são calculados os *storage modulus* - módulos de armazenamento (G') e *loss modulus* - módulos de perda (G''), a partir da *shear strain* – deformação cisalhante (γ) que é dada pela deflexão no bordo extremo da placa de cima e do *shear stress* – tensão cisalhante (τ). O reômetro possibilita obter a resposta de *complex modulus* – módulo complexo (G^*) e ângulo de fase, com esses valores é possível separar as parcelas elásticas G' e viscosas G'' do material e, a partir de G' versus γ , é deduzido o VEL. Em se tratando do sistema de torção de barras, o princípio é absolutamente o mesmo, exceto pela geometria da amostra.

Tabela 5 – Nomenclatura e quantidade de amostras em placas paralelas ao AS

Nomenclatura	W (%)	MEAS (kN/m ³)	Quantidade de amostras
PASN-4	24,90		3
PASN-2	26,90		3
PASNót	28,90	1550	3
PASN+2	30,90		3
PASN+4	32,90		3
PASI-4	21,60		3
PASI-2	23,60		3
PASIót	25,60	1625	3
PASI+2	27,60		3
PASI+4	29,60		3
PASM-4	18,60		3
PASM-2	20,60		3
PASMót	22,60	1652	3
PASM+2	24,60		3
PASM+4	26,60		3

Fonte: Autor

Neste ensaio a amplitude de deformação é crescente, enquanto a tensão de cisalhamento é variável ao longo do teste e a frequência é constante. Determina-se com ele as curvas em

função da deformação, encontrando o intervalo em que o material se comporta de forma linear, ou seja, o seu limite VLE, bem como inferir em qual momento do ensaio há a ruptura dos corpos de prova e como esse comportamento se difere do proposto na Figura 4 no capítulo da revisão da literatura.

Tabela 6 – Nomenclatura e quantidade de amostras em torção de barras ao AS

Nomenclatura	W (%)	MEAS (kN/m³)	Quantidade de amostras
BASN-4	24,90		3
BASN-2	26,90		3
BASNót	28,90	1550	3
BASN+2	30,90		3
BASN+4	32,90		3
BASI-4	21,60		3
BASI-2	23,60		3
BASIót	25,60	1625	3
BASI+2	27,60		3
BASI+4	29,60		3
BASM-4	18,60		3
BASM-2	20,60		3
BASMót	22,60	1652	3
BASM+2	24,60		3
BASM+4	26,60		3

Fonte: Autor

3.4.4 Teste de Varredura de Frequência

Estipulada a amplitude de deformação máxima à qual o material se encontra dentro do intervalo VEL, é possível determinar até qual nível de deformação não há dano nas amostras, sendo o ponto de deformação imediatamente inferior a esse limite escolhido para a aplicação do teste de varredura de frequência, ou *frequency sweep test* - FS. Deformações de pequenas grandezas também não são propícias para uma leitura acurada dos resultados de módulo, de maneira que o intervalo VEL foi definido nos testes de AS como o espaço de deformações que compreende reduções de no máximo 1% a partir do maior valor de módulo medido.

No teste de varredura de frequência, como o nome já sugere, há variação na frequência que vai de 0,1 a 30 Hz, distribuída em vinte e cinco pontos, com uma amplitude definida constante a partir dos resultados do ensaio de varredura de amplitude - AS. Tal qual para o AS, esse ensaio avalia os exemplares em triplicata, totalizando quarenta e cinco corpos de prova para a geometria de TB, conforme apresentado na Tabela 7.

Tabela 7 – Nomenclatura e quantidade de amostras em torção de barras ao FS

Nomenclatura	W (%)	MEAS (kN/m ³)	Massa de solo (g)
BASN-4	24,90		3
BASN-2	26,90		3
BASNót	28,90	1550	3
BASN+2	30,90		3
BASN+4	32,90		3
BASI-4	21,60		3
BASI-2	23,60		3
BASIót	25,60	1625	3
BASI+2	27,60		3
BASI+4	29,60		3
BASM-4	18,60		3
BASM-2	20,60		3
BASMót	22,60	1652	3
BASM+2	24,60		3
BASM+4	26,60		3

Fonte: Autor

O Teste de Varredura de Frequência, o qual permite avaliar as propriedades viscoelásticas do material em função do tempo, com temperatura e amplitude de deformação constante enquanto a frequência utilizada durante o ensaio é variada. Com o uso do *software RheoCompass*, são inseridos os dados variáveis a serem avaliados, apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 – Frequências estipuladas para o AS

Ponto	Frequência (Hz)
01	0,100
02	0,127
03	0,161
04	0,204
05	0,259
06	0,328
07	0,416
08	0,528
09	0,669
10	0,849
11	1,080
12	1,370
13	1,730
14	2,200
15	2,790
16	3,530
17	4,480
18	5,680
19	7,210
20	9,140
21	11,600
22	14,700
23	18,700
24	23,700
25	30,000

Fonte: Autor

Os experimentos de varredura frequência permitem observar valores de módulo de armazenamento, módulo de perda e, conseqüentemente, o módulo complexo (G^*), e ângulo de fase (δ). Em posse dos resultados da magnitude de módulo complexo para cada frequência por amostra é possível plotar gráficos $|G^*|$ por frequência e a partir da inserção de *shift factors* (SF), formular curvas mestras para cada uma das energias de compactação em relação à susceptibilidade das curvas à variação de umidade.

3.4.5 Análise estatística dos parâmetros reológicos

Os dados advindos do ensaio de reometria serão considerados como oriundos de uma experiência casual, em que as energias de compactação equivalentes (normal, intermediária e modificada) são fatores quantitativos, resultando em doze ensaios em que o teor de umidade, com base no teor ótimo variam em -4%, -2%, umidade ótima, +2% e +4% totalizam quinze diferentes condições ao se considerar as diferentes energias de compactação a cada ensaio. Quando houve diferença significativa entre todos os dados, esses foram classificados em cinco grupos denominados A, B, C, D e E. Para os casos em que os dados sejam estatisticamente iguais uns aos outros, esses se agrupam com seus semelhantes, sendo denominados pelas mesmas letras, e a consequência do agrupamento foi a supressão daquelas sem dados que as representem.

Os termos foram analisados quanto à normalidade dos erros através do método Shapiro-Wilk ($p < 0,05$) para avaliar os pressupostos de normalidade e então realizar a avaliação de homogeneidade de variâncias (ANOVA) pelo teste Tuckey, caso fossem normais (ROYSTON, 1982). Em se tratando de dados não paramétricos, realizar-se-á o Teste de Kruskal Wallis (HOLLANDER; WOLFE, 1973) para comparar os diferentes níveis de umidade, e na existência de diferença significativa, em que p-valor seja maior que 0,05, será aplicado o teste de Dunn (DUNN, 1964). Todos os doze ensaios foram analisados meio do *software RStudio 1.3.1073*, o que permitiu avaliar a existência ou não de diferença estatística entre os dados obtidos pelos ensaios de reologia.

3.5 ENSAIOS TRIAXIAIS PARA OBTENÇÃO DE MÓDULO RESILIENTE

A compreensão dos comportamentos dos materiais foi realizada através da execução dos ensaios triaxiais de cargas repetidas a partir da determinação dos módulos resilientes do horizonte B do solo de Cruz Alta para cada uma das energias de compactação por Pascoal

(2020). A normativa que orienta os ensaios mencionados são a DNIT 134/2018 – Pavimentação – Solos – Determinação do módulo de resiliência – Método de ensaio.

Através do equipamento (Figura 24) que se localiza junto ao laboratório do GEPPASV na UFSM, são reproduzidos os efeitos de campo, de forma a simular a passagem dos veículos em uma zona na superfície do pavimento, nas camadas estruturais. O princípio de trabalho do equipamento ocorre através da aplicação de um esforço de compressão no topo do corpo de prova, a qual gera uma tensão conhecida como principal (σ_d) variante de zero até uma grandeza pré-estabelecida e retorna a zero, acompanhada de um período de repouso e este mesmo processo se reinicia o número de vezes que for definido pelo operador do equipamento. O dispositivo também permite a inserção de uma tensão que atua em todos os pontos do corpo de prova, a qual simula o confinamento de uma partícula do material por conta das partículas lindeiras, conhecida como tensão confinante (σ_3).

Figura 24 – Equipamento triaxial de cargas repetidas



Fonte: Autor

Com a aplicação dos esforços, há a ocorrência de duas espécies de deformações, as resilientes (de natureza elástica - ϵ_r) e as permanentes (de natureza plástica ϵ_p). As primeiras

deformações mencionadas são partes componentes deste estudo e são mensuradas através de dois transdutores mecânico-eletromagnéticos, denominados LVDT, posicionados em pontos diametralmente opostos na cápsula triaxial, os quais possibilitam registrar, no *software* SEEPAV 14200, as deformações elásticas em potencial elétrico, com sensibilidade de interpretação de até 5 mm. Na Tabela 9, são apresentados os modelos e as denominações adotados em coerência aos estudos de Pascoal (2020) e serão utilizadas no decorrer este trabalho.

Tabela 9 – Denominações adotadas aos modelos propostos

Modelo	Denominação adotada
Equação 06 - Biarez	$k-\sigma_3$
Equação 07 – Invariante de tensões	$k-\theta$
Equação 08 – Svenson	$k-\sigma_d$
Equação 09 – Pezo et al.	Composto
Equação 10 – AASHTO.	Universal

Fonte: Pascoal (2020)

Todas as amostras utilizadas neste estudo foram moldadas por Pascoal (2020) em laboratório, com porcentagens de umidade que variou para cada energia de compactação a que foi submetida, um total de 5 kg de material foram preparados, reservados em sacos hermeticamente fechados e guardados em câmara úmida. Primeiramente obteve-se a umidade higroscópica da mistura, retirando duas cápsulas de material do saco, as quais foram levadas à estufa por 24 horas, sob uma temperatura de $\pm 105^\circ \text{C}$.

Após 12 horas da amostra na câmara úmida e consciente dos teores de umidade ótima e massa específica aparente seca, inferidos por meio da curva de compactação, Pascoal (2020) calculou a quantidade de água a ser acrescentada para se atingir a umidade ótima. Acrescentou-se água a cada amostra até atingir a umidade ótima logo antes, e levou-se o material novamente à câmara úmida em sacos hermeticamente vedados por mais 24 horas. Em seguida moldou-se o CP em um cilindro tripartido, o qual foi direcionado para a câmara triaxial, a fim de realizar os ensaios de módulo de resiliência.

DNIT (2018a) admite uma variação máxima de até 0,5% para mais ou para menos em relação à umidade ótima para materiais finos, conforme considerado por Pascoal (2020). Assim buscou-se a homogeneidade entre as amostras ensaiadas, adotando a tolerância de $\pm 0,5\%$ no que diz respeito à variação da umidade ótima. Enquanto no que se refere a variação da massa específica aparente seca, Pascoal (2020) adotou a variação de $\pm 1,0\%$.

A etapa inicial de aplicação de carregamentos busca minimizar o efeito de possíveis deformações não recuperáveis com a aplicação de três pares de tensões a uma frequência de 1 Hz (0,1 s de aplicação de carregamento e 0,9 s de repouso), com quinhentas repetições. O segundo estágio é iniciado imediatamente com aplicações de 100 ciclos de carregamentos em 12 pares distintos de tensões, como demonstra Tabela 10. Os valores de MR obtidos serão tratados estatisticamente através do enquadramento em modelos matemáticos apresentados na revisão da literatura. Evidencia-se que este protocolo é aplicado para solos destinados a compor o subleito de pavimentos.

Os ensaios de módulo de resiliência do horizonte B do solo de Cruz Alta foram realizados por Pascoal (2020), cujas características são discriminadas na

Tabela 11. A partir de análises de regressão múltipla não linear dos corpos de prova de forma individual, e em grupo, apresentam-se os coeficientes para cada um dos cinco modelos matemáticos à energia normal, na Tabela 12. Tais dados são expressos através de modelos matemáticos de comportamento elástico não linear considerando a relação entre o módulo de resiliência e as tensões impostas, obtidas por meio de regressão não linear no *software* Statistica.

Pascoal (2020) observa que quando analisadas individualmente, as amostras apresentam um coeficiente de correlação mais elevado do que as análises conjuntas, fato ocorrido devido ao número elevado de dados que compõem a investigação. Os modelos matemáticos que melhor representaram as amostras de solo, moldadas na energia normal, foram aqueles que consideraram a atuação conjunta da tensão desvio e tensão confinante, ou seja, o modelo Universal e o modelo Composto.

Tabela 10 – Sequência de tensões no condicionamento e de pares para obtenção do MR

Nº de ciclos	Tensão confinante (MPa)	Tensão desvio (MPa)	σ_1/σ_3
500*	0,070	0,070	-
		0,020	2
100	0,020	0,040	3
		0,060	4
		0,035	2
100	0,035	0,070	3
		0,105	4
		0,050	2
100	0,050	0,100	3
		0,150	4
		0,070	2
100	0,070	0,140	3
		0,210	4

*Ciclos de condicionamento

Fonte: Adaptado de DNIT (2018a)

Tabela 11 – Resumo das características dos CP's moldados para o ensaio de MR

Amostra	Diâmetro médio (cm)	Altura média (cm)	Densidade máxima (kg/m ³)	GC (%)	W antes ETCR (%)	W após ETCR (%)
B EN1	9,97	20,03	1545,80	99,73	29,25	28,82
B EN2	10,01	20,04	1556,60	100,42	28,42	28,35
B EN3	9,99	20,04	1555,50	100,35	28,58	28,47
B EI1	9,99	20,08	1626,90	100,12	25,70	25,57
B EI2	10,00	20,06	1631,50	100,40	25,10	24,91
B EI3	10,00	20,07	1628,90	100,28	25,31	24,59
B EM1	10,02	20,07	1655,30	100,20	22,33	22,25
B EM2	10,02	20,11	1646,60	99,67	23,01	22,55
B EM3	10,01	20,10	1654,00	100,12	22,48	22,26

Fonte: Pascoal (2020)

Ao submeter os corpos de prova moldados na energia intermediária ao ensaio de MR, Pascoal (2020) observa que o comportamento do material, com exceção do modelo Universal, difere-se do observado na energia normal em todos os modelos matemáticos. A Tabela 13 apresenta os valores de cada parâmetro dos CPs ensaiados na energia intermediária, dos quais é perceptível que, em termos de coeficiente de correlação, o modelo Universal é o que possui maior convergência ao desempenho resiliente das amostras.

Tabela 12 – Coeficientes de regressão não linear dos ensaios de MR – EN

Modelo	Amostra	k1	k2	k3	R ²	MR médio (MPa)
Svenson (σ_d)	B EN1	109,145	-0,143	-	0,452	159,73
	B EN2	115,453	-0,130	-	0,519	163,15
	B EN3	84,805	-0,180	-	0,652	137,15
	B EN1+2+3	102,983	-0,149	-	0,412	153,17
Biarez (σ_3)	B EN1	131,188	-0,060	-	0,038	159,30
	B EN2	132,804	-0,064	-	0,060	163,37
	B EN3	96,049	-0,109	-	0,115	136,76
	B EN1+2+3	109,759	-0,076	-	0,051	140,38
Invariante de tensões (θ)	B EN1	129,769	-0,125	-	0,196	159,48
	B EN2	134,192	-0,119	-	0,246	163,28
	B EN3	102,367	-0,177	-	0,352	137,22
	B EN 1+2+3	122,031	-0,138	-	0,199	153,25
Composto	B EN1	160,097	0,204	-0,247	0,655	159,76
	B EN2	155,644	0,159	-0,212	0,695	163,55
	B EN3	117,980	0,176	-0,269	0,791	136,82
	B EN1+2+3	144,296	0,180	-0,241	0,546	153,14
Universal	B EN1	456,450	0,333	-1,566	0,953	250,92
	B EN2	380,954	0,260	-1,298	0,968	237,97
	B EN3	341,875	0,259	-1,517	0,978	211,68
	B EN1+2+3	391,497	0,285	-1,455	0,740	233,22

Fonte: Pascoal (2020)

Tabela 13 – Coeficientes de regressão não linear dos ensaios de MR – EI

Modelo	Amostra	k1	k2	k3	R ²	MR médio (MPa)
Svenson (σ_d)	B EI1	411,804	0,198	-	0,567	246,52
	B EI2	379,945	0,164	-	0,415	248,12
	B EI3	373,398	0,161	-	0,460	245,72
	B EI1+2+3	387,895	0,174	-	0,478	246,90
Biarez (σ_3)	B EI1	792,520	0,366	-	0,938	246,46
	B EI2	755,509	0,348	-	0,895	248,69
	B EI3	680,323	0,318	-	0,862	248,89
	B EI1+2+3	751,378	0,344	-	0,897	250,47
Invariante de tensões (θ)	B EI1	415,602	0,327	-	0,877	246,70
	B EI2	396,803	0,293	-	0,750	248,38
	B EI3	382,363	0,276	-	0,763	245,80
	B EI 1+2+3	397,976	0,299	-	0,795	246,78
Composto	B EI1	776,648	0,335	0,030	0,945	246,69
	B EI2	766,608	0,370	0,021	0,899	223,14
	B EI3	578,504	0,315	0,004	0,862	209,20
	B EI1+2+3	739,201	0,340	0,004	0,897	247,00
Universal	B EI1	677,929	0,516	-0,558	0,958	293,56
	B EI2	822,709	0,573	-0,838	0,943	322,67
	B EI3	687,882	0,501	-0,674	0,904	322,74
	B EI1+2+3	727,293	0,530	-0,691	0,928	306,47

Fonte: Pascoal (2020)

Para os ensaios executados na energia intermediária, verifica-se que o menor coeficiente de correlação é dado para o k- σ_d . Em contrapartida, de acordo com Pascoal (2020), os modelos de tensões invariantes e Svenson possuem uma dispersão de dados (apresentadas no Anexo 2) aceitáveis para serem aplicados em um futuro dimensionamento, contudo é dado a preferência para o modelo Composto. Esse considera ambas as tensões como atuantes no corpo de prova, sobre as quais a autora constata que, à medida que a tensão desvio aumenta, eleva-se também o módulo de resiliência.

Tal qual ocorreu à energia intermediária, os exemplares moldados na energia modificada, também apresentaram altos valores de R², conforme exposto pela Tabela 14. É enfatizado que o pior desempenho foi para o modelo de Biarez, com fator de correlação na ordem de 60%.

Tabela 14 – Coeficientes de regressão não linear dos ensaios de MR – EM
(continua)

Modelo	Amostra	k1	k2	k3	R ²	MR médio (MPa)
Svenson (σ_d)	B EI1	736,972	0,302	-	0,605	339,13
	B EI2	706,543	0,295	-	0,718	365,90
	B EI3	720,817	0,263	-	0,616	330,89
	B EI1+2+3	729,834	0,286	-	0,619	349,62

Fonte: Pascoal (2020)

Tabela 14 – Coeficientes de regressão não linear dos ensaios de MR – EM (conclusão)

Modelo	Amostra	k1	k2	k3	R ²	MR médio (MPa)
Biarez (σ_3)	B EI1	2017,248	0,551	-	0,943	351,24
	B EI2	1517,637	0,479	-	0,919	330,90
	B EI3	1668,232	0,477	-	0,967	366,02
	B EI1+2+3	1724,197	0,503	-	0,910	348,75
Invariante de tensões (θ)	B EI1	736,290	0,492	-	0,899	339,11
	B EI2	678,664	0,455	-	0,959	330,69
	B EI3	722,279	0,429	-	0,922	366,23
	B EI1+2+3	721,031	0,459	-	0,892	349,20
Composto	B EI1	1931,350	0,487	0,062	0,956	348,06
	B EI2	1414,030	0,360	0,114	0,976	335,69
	B EI3	1610,660	0,423	0,053	0,980	336,01
	B EI1+2+3	1640,160	0,426	0,076	0,932	348,45
Universal	B EI1	1502,940	0,760	-0,750	0,971	447,97
	B EI2	877,026	0,555	-0,286	0,972	442,42
	B EI3	1243,200	0,641	-0,610	0,984	444,88
	B EI1+2+3	1185,260	0,653	-0,554	0,936	417,71

Fonte: Pascoal (2020)

3.6 RELAÇÃO ENTRE MÓDULO DE RESILIÊNCIA E TESTE DE VARREDURA DE FREQUÊNCIA

Ao constatar que o ensaio de módulo de resiliência e o teste de varredura de frequência são similares, por avaliarem a rigidez dos materiais, sem que haja danos às amostras, serão estes os ensaios a serem comparados por este trabalho. O ensaio de MR proporciona a avaliação do desempenho resiliente dos materiais mediante a aplicação de diferentes pares de tensões confinantes e desvio para que se obtenha seus chamados módulos axiais.

Esses módulos guardam uma relação próxima a do módulo de cisalhamento, a Equação 12 demonstra como converter o módulo axial em cisalhante. Para este estudo, foram selecionados dois valores de MR médio por energia de compactação definidos pelo modelo matemático que melhor se adequou às amostras (modelo Universal) e o modelo que desconsidera a ação da tensão confinante (Modelo $k-\sigma_d$), dos quais encontrou-se seu valor equivalente em módulo de cisalhamento. Em posse dos valores de módulo resiliente e do coeficiente de Poisson, e utilizando a Equação 13, objetiva-se prever o desempenho do módulo cisalhante.

$$E = 2 \cdot (1 + \mu) \cdot G \quad (12)$$

$$G = \frac{E}{2 \cdot (1 + \mu)} \quad (13)$$

Onde:

E : módulo de axial (em Pa);

μ : coeficiente de Poisson;

G : . Módulo cisalhante (em Pa).

4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

No presente capítulo serão apresentados os dados resultantes dos ensaios reométricos de varredura de frequência e de amplitude, tal qual as formas como as amostras se comportam em relação a aplicação de carregamentos repetitivos. Será discutido, ainda, o porquê de a geometria de placas paralelas não se aplicar para o estudo de caso proposto e como é possível correlacionar o comportamento reológico com o desempenho resiliente do horizonte B do solo em estudo.

Em respeito a cada um dos ensaios, são apresentadas análises para as cinco diferentes umidades propostas a uma compactação dita equivalente ao grau de compactação. A partir das umidades ótimas definidas, em estudos anteriores, nas EN, EI e EM propõe-se variações no teor de umidade de dois e quatro por cento abaixo e, de dois e quatro por cento, acima dessa.

Os resultados dos ensaios de varredura de frequência permitem compreender o comportamento do material quanto ao seu módulo de armazenamento, módulo de perda e a magnitude do módulo complexo e assim inferir o intervalo do limite viscoelástico linear do material, que permitirá a compreensão de qual é a amplitude máxima de deformação sem que haja danificação nos exemplares. A partir de então, são avaliados os comportamentos no ensaio de varredura de frequência, para avaliar dados reológicos que permitirão entender a possível relação com o desempenho resiliente dos materiais moldados e avaliados por ensaios convencionais.

4.1 ENSAIO DE ENSAIO DE VARREDURA DE AMPLITUDE

O subcapítulo, que se inicia, pretende apresentar as constatações quanto ao uso das diferentes geometrias propostas para os ensaios, e os resultados obtidos com a avaliação micromecânica através de um dos testes do programa experimental determinado. Com os dados reológicos, compreende-se os comportamentos da amostra quanto à deformabilidade em microescala e o intervalo de deformação viscoelástica, ou seja, o VEL. Desta maneira é possível entender qual é o limite de deformação (γ_L) e a tensão cisalhante no final do intervalo VEL (τ_{VEL}) para avançar nas avaliações.

4.1.1 AS no dispositivo de placas paralelas (PP)

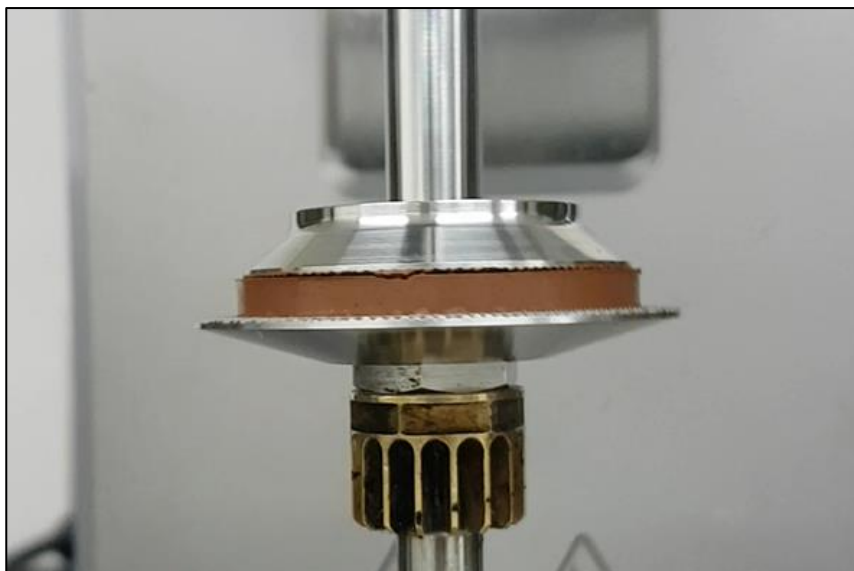
A execução de ensaios reométricos no dispositivo placas paralelas é a mais difundida no campo das pesquisas que envolvem reologia de solos. Nesse sentido, a asserção inicial foi de

executar os experimentos de ensaios de varredura de amplitude e frequência a partir da geometria PP, entretanto o desempenho do ensaio para solos no estado compactado e com umidades comparativamente mais baixas do que aquelas até então estudadas pela literatura, não é adequado pelos aspectos que serão apresentados neste capítulo.

O solo em estudo, compactado nas energias normal, intermediária e modificada, destinados a camadas de pavimentos rodoviários, é distinto dos solos estudados com níveis de compactação ditos naturais. Ao executar ensaios nestas geometrias e com solos compactados, é inevitável não se deparar com problemas dados pela falta de torque do equipamento. Os testes não têm capacidade de fornecer respostas com confiança, pois as amostras estão muito próximas do estado sólido, e o formato de execução e a falta de torque impossibilita que os espécimes fluam a partir de determinadas amplitudes.

Em se tratando do AS, percebe-se que com o aumento da amplitude a placa superior perde contato com os espécimes, isso porque a tensão Normal proposta de 1 N é muito baixa para manter essa ligação. Assim, o contato passa a ser somente pelo atrito superficial dado entre a placa e o corpo de prova, como mostra a Figura 25, e, neste sentido, o equipamento não apresenta mais capacidade de proporcionar e ler o fenômeno de cisalhamento na amostra.

Figura 25 – Contato ineficiente da placa superior com o topo do corpo de prova



Fonte: Autor

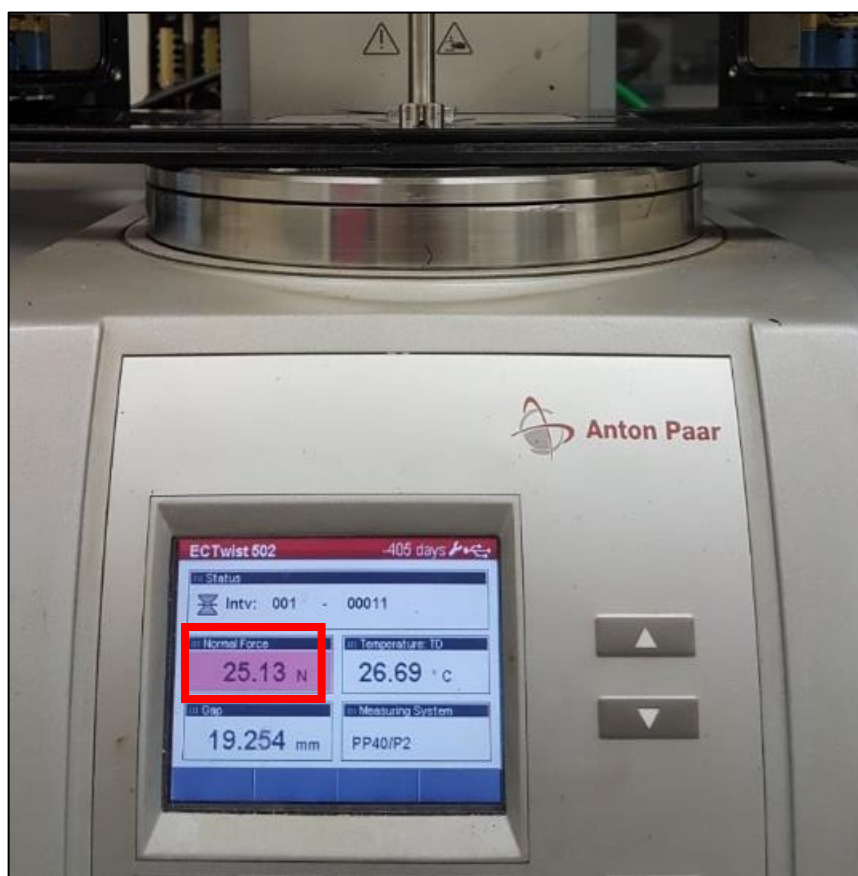
Deste modo, adotou-se paralelamente duas alternativas para solucionar o impasse:

a) elevar a tensão Normal à ordem de 30 N (tensões ainda mais altas resultam em erros na leitura do ensaio), como ilustra a Figura 26;

b) ou o aumentar a dimensão do *gap* das amostras (Figura 27).

Entretanto, nenhuma das opções se mostrou suficiente para solucionar o problema em grandes amplitudes de deformação. Assim, o equipamento é capaz de compreender o comportamento sob a ação cisalhante inicial do corpo de prova, contudo, ao se deparar com deformações de cisalhamento maiores, a inconsistência nos resultados comprova a ineficácia da aplicação deste método para solos compactados e umidades relativamente baixas como é o caso dos exemplares em estudo.

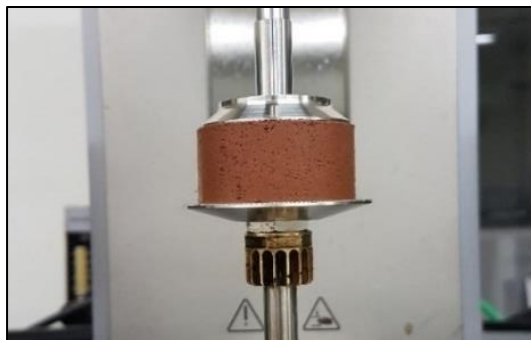
Figura 26 – Elevação da força normal para melhorar vínculo entre placa-amostra



Fonte: Autor

Finalmente, entendeu-se que para as três energias de compactação equivalentes e cada uma das cinco umidades propostas para o ensaio, nenhuma foi aplicável para este método. Os resultados inconsistentes e inconclusivos, garantiram a exclusão dos dados obtidos para esta geometria e garantiu que a melhor representatividade seria dada através dos ensaios com torção de barras.

Figura 27 – Experimentos com *gap* de 40 mm



Fonte: Autor

4.1.2 AS no dispositivo de torção de barras (TB)

Os ensaios de varredura de amplitude foram realizados na geometria de torção de barras, na qual as extremidades superior e inferior do corpo de prova, em formato de barra, são presas por grampos, que garantem total fixação no decorrer do ensaio (

Figura 28). Neste capítulo, serão apresentados os resultados deste ensaio com análise do valor absoluto de módulo complexo em função do número de ciclos, bem como o do módulo de armazenamento, em função de deformação cisalhante para cada teor de umidade estabelecido a este estudo.

Figura 28 – Destaque aos ganchos usados para torção de barras sólidas

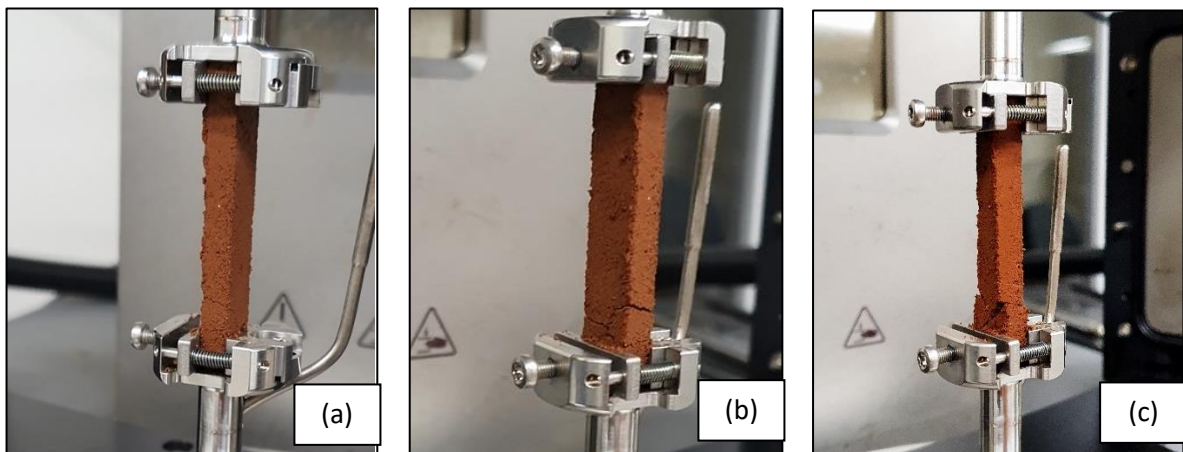


Fonte: Autor

Durante os ensaios de varredura de frequência, observa-se um comportamento padrão das curvas que compõem os gráficos, entretanto distinto do que apresenta a Figura 4, na revisão da literatura. Nos casos em estudo o ponto de cruzamento de G' e G'' não representa o momento em que o comportamento plástico se sobrepõe sobre o elástico, conforme é proposto por estudos de solos agrícolas, o que levaria ao denominado como ruptura plástica. Foi observada nas análises a ocorrência de uma ruptura frágil, com o aparecimento de trincas visíveis, muito antes de haver o cruzamento do módulo de armazenamento e módulo de perda.

Em se tratando de solos compactados, no início dos ciclos de aplicação dos esforços cisalhantes, há certa ineficácia no processo de leitura dos módulos, devido as deformações muito baixas, até que se atinja um por cento abaixo do ponto de rigidez máxima. Em seguida, é observado uma redução leve, mantendo um patamar próximo de linear até o momento em que há a ruptura visual pela formação de trincas da amostra, como caracterizado pelo CP da Figura 29a. Após esse fenômeno, observa-se um comportamento descendente da curva e, em seguida, uma inconstância dos resultados dado pelo contato eventual entre as duas partes do corpo de prova (Figura 29b), que se quebra devido à sua fragilidade e, com o passar dos ciclos, perdem toda a conexão entre suas partes superior e inferior, como demonstra a Figura 29c, não havendo representação gráfica e qualquer correspondência com o comportamento característico do material.

Figura 29 – Amostra com fratura inicial (a), mediana (b) e completa (c)



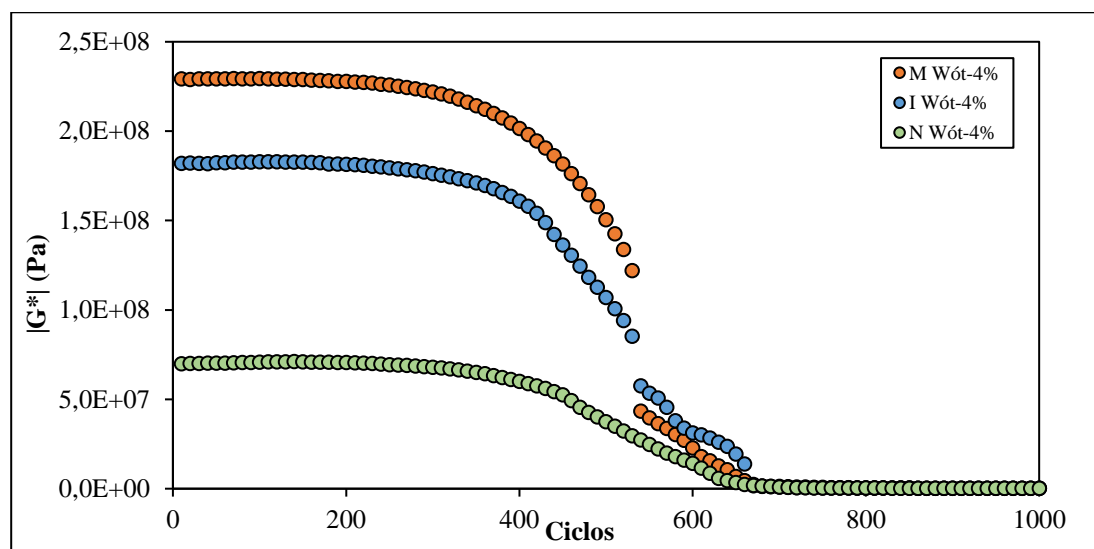
Fonte: Autor

Finalmente, nos últimos ciclos, as deformações são mais elevadas, enquanto a frequência de carregamentos é mantida sempre constante. Assim, no momento em que a fratura gera a perda de contato entre as parcelas que compõem o corpo de prova, as curvas se igualam nos

valores em que o a magnitude de módulo complexo é zero. Salienta-se que, por se tratar de um material com comportamento não linear, todos os valores de tensão e deformação que se averiguam fora do intervalo da linearidade deixam de fazer sentido, a partir de onde passa-se analisar a rigidez de estrutura muito além do módulo do material.

A Figura 30 mostra a média do comportamento dos corpos de prova, moldados em cada uma das energias de compactação em sua condição mais seca dentre as umidades propostas, isto é, a 4% abaixo da umidade de referência e a Tabela 15 – mostra os valores notórios de $|G^*|$ inicial e máximo de cada nível de compactação e a amplitude de deformação em cada um deles.

Figura 30 – Ensaio de varredura de amplitude a 4% abaixo do teor ótimo



Fonte: Autor

Tabela 15 – Valores notórios de $|G^*|$ para AS, Wót-4%

Condição de ensaio	Situação	Ciclos	Amplitude de deformação (%)	$ G^* $ (Pa)
Normal – Wót-4%	Inicial	1	0,0010	69.770.625,5
	Rigidez máxima	140	0,0038	71.031.265,5
	Mediana	-	-	36.208.577,0
Intermediária – Wót-4%	Inicial	1	0,0010	181.952.959,00
	Rigidez máxima	110	0,0028	182.851.981,0
	Mediana	-	-	103.790.129,5
Modificada – Wót-4%	Inicial	1	0,0010	229.285.207,0
	Rigidez máxima	100	0,0025	229.353.815,0
	Mediana	-	-	146.568.421,5

Fonte: Autor

A Figura 30 mostra que quanto maior a energia de compactação à qual o exemplar está submetido, maior é também a sua rigidez, que, por sua vez, é traduzida pelo aumento de seu $|G^*|$. Os valores partem de 69,77 MPa para a energia normal; 181,95 MPa para a intermediária; e, na modificada, 229,29 MPa; atingindo valores máximos não maiores que 1,50 MPa do ponto de leitura inicial.

Por volta do trecentésimo ciclo, a uma amplitude de deformação de 0,0194%, os exemplares passam a perder integridade de maneira acelerada e iniciam o primeiro estágio de degradação, momento em que há a ruptura no ponto mais crítico do exemplar, para ângulos de fase de 5°, 3° e 4°, para EN, EI e EM, respectivamente. A fase de degradação mediana ocorre entre o quatrocentésimo e septingentésimo ciclo, em deformações respectivas de 0,0539% e 1,159%, em que o comportamento do gráfico é traduzido pelo atrito entre as parcelas já rompidas do CP, enquanto o período final é resultado da ruptura total desse sem que haja contato entre a sua parte superior e inferior.

A Figura 31 corresponde às curvas de $|G^*| \times$ Ciclos, para a média das amostras com umidade igual a 2% abaixo da ótima ($W_{ót-2\%}$) nas diferentes energias de compactação, com valores resumidos na Tabela 16. Por se tratar de amostras com teores de umidade mais elevados do que a anterior, apresentam uma rigidez inferior para todos os graus de compactação. Observa-se, a este teor de umidade, que a ruptura vem a ocorrer nas amostras moldadas na energia equivalente à normal em um ângulo de fase igual a 5°, tal qual ocorreu para o menor teor de umidade, e nas amostras de compactação equivalente a EI e EM, δ os mesmos 5°.

Figura 31 – Ensaio de varredura de amplitude a 2% abaixo do teor ótimo

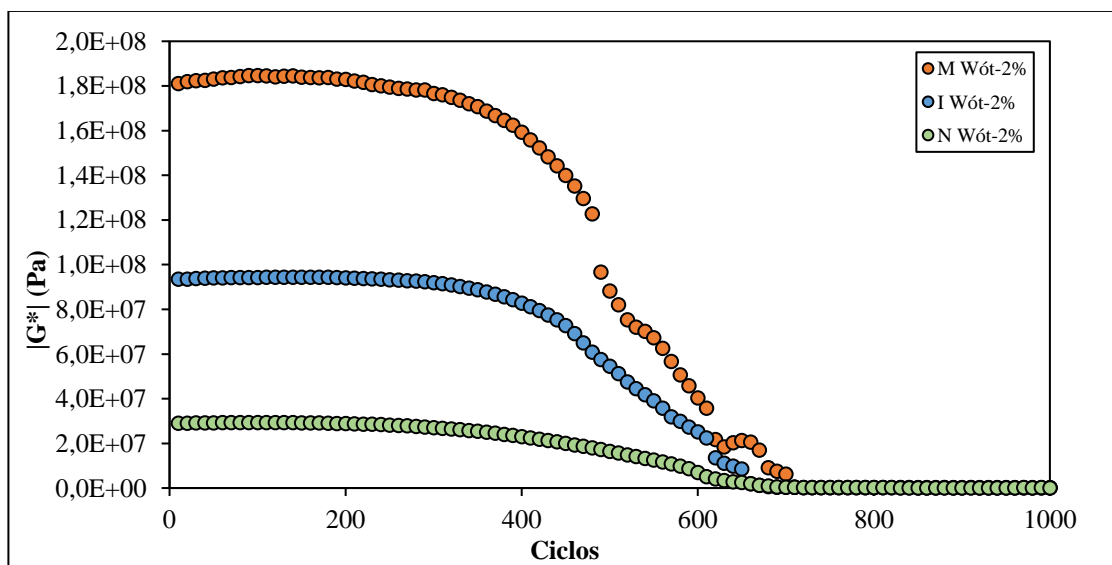


Tabela 16 – Valores notórios de $|G^*|$ para AS, Wót-2%

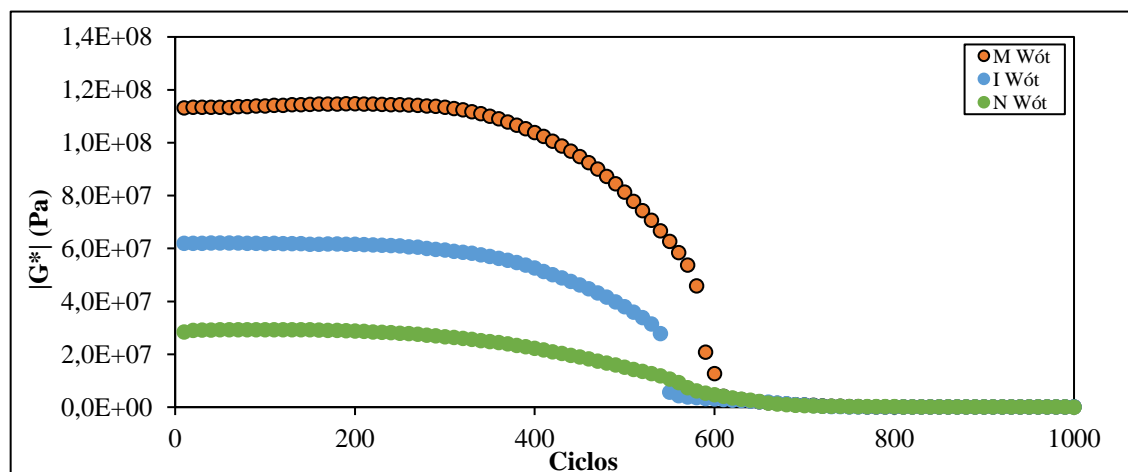
Condição de ensaio	Situação	Ciclos	Amplitude de deformação (%)	$ G^* $ (Pa)
Normal – Wót-2%	Inicial	1	0,0010	29.006.956,0
	Rigidez máxima	110	0,0028	29.314.783,0
	Mediana	-	-	15.990.912,5
Intermediária – Wót-2%	Inicial	1	0,0010	93.419.982,5
	Rigidez máxima	150	0,0042	94.392.490,5
	Mediana	-	-	52.861.469,5
Modificada – Wót-2%	Inicial	1	0,0010	181.056.154,0
	Rigidez máxima	100	0,0025	184.604.065,0
	Mediana	-	-	85.048.404,5

Fonte: Autor

As médias dos valores partem, nos ciclos iniciais, de 29,01 MPa, 93,42 MPa e 181,06MPa para as energias normal, intermediária e modificada, respectivamente, o que significa reduções respectivas de 58,43%, 48,67% e 21,03% em relação às amostras mais secas, apresentadas anteriormente. Os exemplares em análise possuem valores máximos que se elevam em até 3,55 MPa à energia mais severa, enquanto cresce apenas em 0,30 MPa na energia mais amena de compactação.

Ainda é perceptível a existência de um afastamento da curva da energia intermediária em relação à curva da energia modificada, quando comparado ao comportamento do material ensaiado na condição Wó-4%. A Figura 32, que apresenta o comportamento dos materiais na umidade ótima, evidencia a mesma tendência, onde se percebe que a curva da energia intermediária tende a se aproximar ainda mais da curva da energia normal. Aliado a isso, são apresentados os valores característicos de alguns pontos estratégicos de análise na Tabela 17.

Figura 32 – Ensaio de varredura de amplitude no teor ótimo



Fonte: Autor

Tabela 17 – Valores notórios de $|G^*|$ para AS, Wót

Condição de ensaio	Situação	Ciclos	Amplitude de deformação (%)	$ G^* $ (Pa)
Normal – Wót	Inicial	1	0,0010	28.429.931,0
	Rigidez máxima	90	0,0023	29.340.277,5
	Mediana	-	-	14.732.360,3
Intermediária – Wót	Inicial	1	0,0010	61.944.724,0
	Rigidez máxima	60	0,0017	62.146.040,0
	Mediana	-	-	36.995.075,0
Modificada – Wót	Inicial	1	0,0010	113.235.426,00
	Rigidez máxima	150	0,0042	114.754.852,50
	Mediana	-	-	79.625.479,00

Fonte: Autor

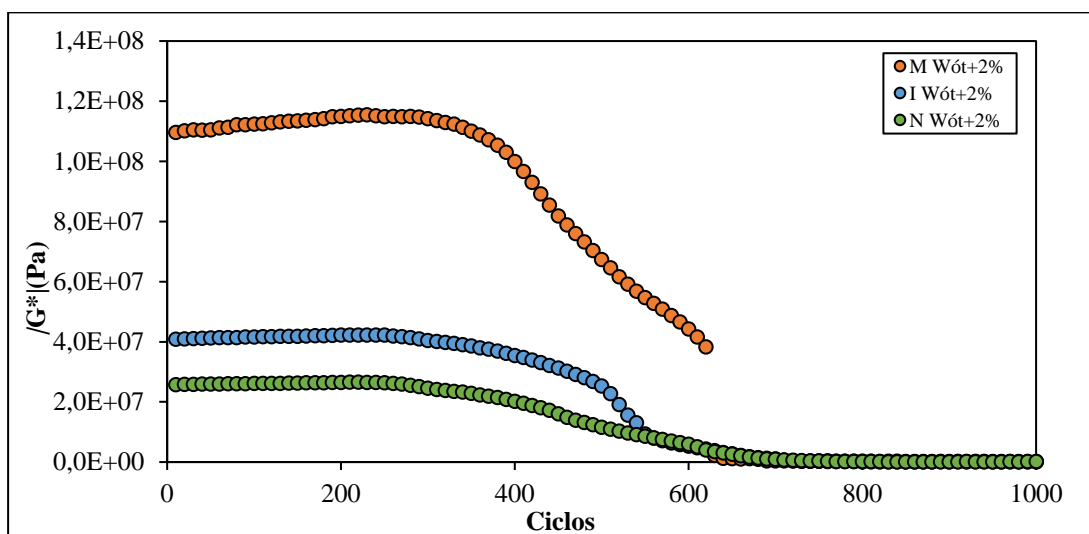
Os valores médios iniciais de rigidez crescem conforme o aumento da energia de compactação, partindo de 28,43 MPa para a normal e atingindo 113,24 MPa na modificada. A rigidez da amostra para os ciclos iniciais na energia intermediária, reduziu para 61,94 MPa, isto é, uma diminuição de 33,69% de $|G^*|$ em relação à amostra compactada na mesma energia e para Wót-2%. Redução semelhante foi para a modificada, com 37,49%, enquanto para a energia normal, foi de apenas 2,07%. Logo, para essa condição de testes, os elementos com maior grau de compactação se mostraram mais sensíveis, diferente do que se observou para o primeiro grupo de análise.

Para as análises de ruptura na umidade ótima, nota-se o aparecimento de trincas a partir do trigésimo sétimo ciclo, para EN, sob δ igual a 7°. Para as energias de compactação subsequentes, observa-se a ruptura no vigésimo nono e quadragésimo ciclo, para na EI e EM, respectivamente e δ de 5° em ambos.

Ao se comparar a umidade ótima com o teor de 2% acima dessa, Figura 33 e Tabela 18, é observado que as amostras que possuem maior alteração no $|G^*|$, são aquelas ensaiadas na energia intermediária, com decréscimo de 34,08% de sua rigidez, enquanto para a energia normal e modificada, a atenuação é de 9,51% e 3,18%, na devida ordem.

O comportamento quanto a $|G^*|$ da energia intermediária se assemelha ao da energia normal. A compactação mais severa, diferente das demais, apresenta um crescimento acentuado de rigidez já no início dos ciclos, em que principia de um $|G^*|$ igual a 109,61 MPa até atingir o seu pico, em 115,44 MPa, ou seja, um crescimento de aproximadamente 6,00 MPa enquanto as demais curvas apresentam elevação até sua maior rigidez máxima de apenas 1,43 MPa na energia intermediária, e 0,85 MPa para a energia normal. O *gap* de leituras que se forma para as amostras na energia modificada até os valores que próximos a 0 MPa, ocorre devido à quebra dos CPs, momento em que não há mais contato entre as partes.

Figura 33 – Ensaio de varredura de amplitude a 2% acima do teor ótimo



Fonte: Autor

Observou-se que, quanto ao momento do aparecimento de suas trincas, os corpos de prova seguiram apresentando comportamentos extremamente próximos dos demais. Enquanto para EM, o surgimento se deu no trigésimo oitavo ciclo, em um ângulo de fase igual a 5°, bem como 5° para δ para EM, que apresentou ruptura por volta do trigésimo ciclo, e enquanto EI passou a apresentar trincas com δ igual a 6°, no trigésimo sexto ciclo.

Tabela 18 – Valores notórios de $|G^*|$ para AS, Wót+2%

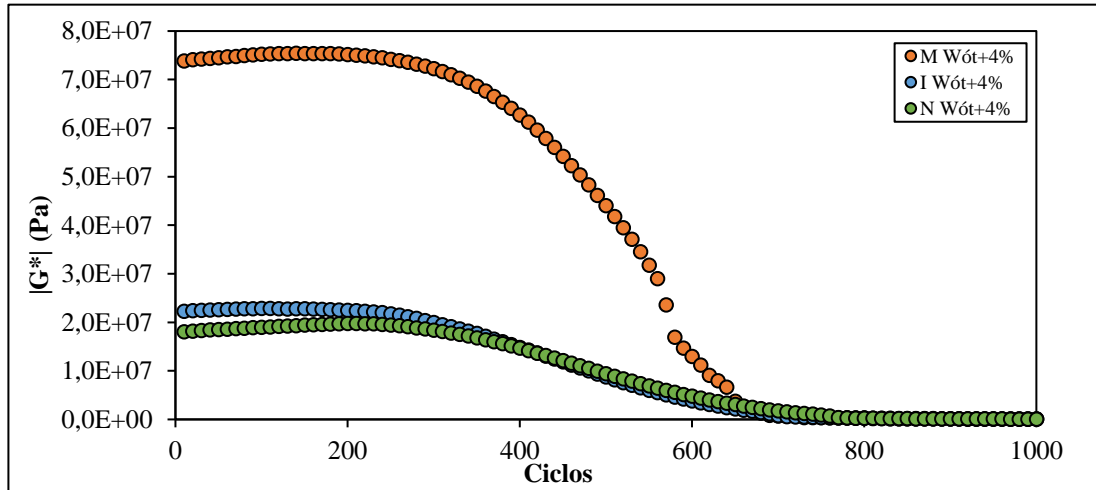
Condição de ensaio	Situação	Ciclos	Amplitude de deformação (%)	$ G^* $ (Pa)
Normal – Wót+2%	Inicial	1	0,0010	25.694.264,0
	Rigidez máxima	220	0,0086	26.543.656,0
	Mediana	-	-	11.236.940,0
Intermediária – Wót+2%	Inicial	1	0,0010	40.811.158,00
	Rigidez máxima	60	0,0017	42.245.022,00
	Mediana	-	-	23.994.170,00
Modificada – Wót+2%	Inicial	1	0,0010	109.605.452,0
	Rigidez máxima	150	0,0042	115.440.105,0
	Mediana	-	-	65.923.831,0

Fonte: Autor

Finalmente, a Figura 34, mostra as curvas nas três energias de compactação para o mais elevado teor de umidade (4% acima da umidade ótima), o qual confere aos espécimes a menor rigidez entre todas as análises. Há uma evidente aproximação dos valores de rigidez às energias normal e intermediária, fator que comprova a semelhança de comportamento entre essas amostras quando sujeitas a um alto teor de umidade.

Os CPs, na EN e EI romperam por volta do trigésimo ciclo, e EM apresentou suas primeiras fissuras por volta do quadragésimo ciclo. Os ângulos de fase foram os mesmos dos materiais moldados com mais dois por cento de umidade acima da ótima, 5°, 6° e 5°, na devida ordem.

Figura 34 – Ensaio de varredura de amplitude a 4% acima do teor ótimo



Fonte: Autor

Observa-se, na Tabela 19, que as amostras menos compactas apresentaram $|G^*|$ nos primeiros ciclos de 18,05 MPa, atingindo rigidez máxima de 19,76 MPa no ciclo de número 210, enquanto a energia intermediária arranca de 22,29 MPa, com máxima de 22,87 MPa, e para a máxima compactação, parte-se de 73,89 MPa para os ciclos iniciais, até atingir 75,41 MPa no centésimo septuagésimo ciclo para que então, a partir do trecentésimo, passe a decrescer constantemente.

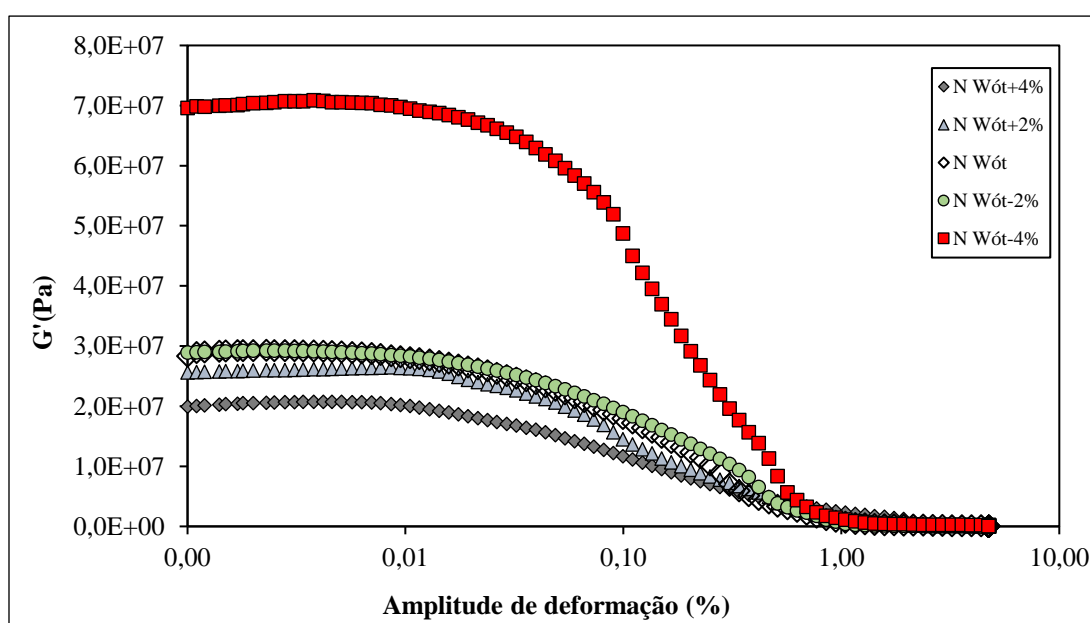
Tabela 19 – Valores notórios de $|G^*|$ para AS, Wót+4%

Condição de ensaio	Situação	Ciclos	Amplitude de deformação (%)	$ G^* $ (Pa)
Normal – Wót+4%	Inicial	0	0,0010	18.047.056,0
	Rigidez máxima	210	0,0077	19.755.289,00
	Mediana	-	-	9.168.803,50
Intermediária – Wót+4%	Inicial	0	0,0010	22.291.882,0
	Rigidez máxima	100	0,0038	22.865.651,0
	Mediana	-	-	8.453.588,0
Modificada – Wót+4%	Inicial	0	0,0010	73.886.752,0
	Rigidez máxima	140	0,0042	75.408.000,0
	Mediana	-	-	42.927.164,80

Fonte: Autor

Os gráficos apresentados anteriormente (Figuras 30, 31, 32, 33 e 34) mostram um panorama geral em relação às diferentes energias de compactação, enquanto nas imagens retratadas a seguir, explana-se os gráficos de módulo de armazenamento em função de amplitude de deformação para cada variação de umidade, em uma determinada energia de compactação. Os ensaios realizados nas energias equivalentes a normal, intermediária e modificada são apresentados nos gráficos das Figura 35, Figura 38 e Figura 41, respectivamente, considerando cem pontos de deformação.

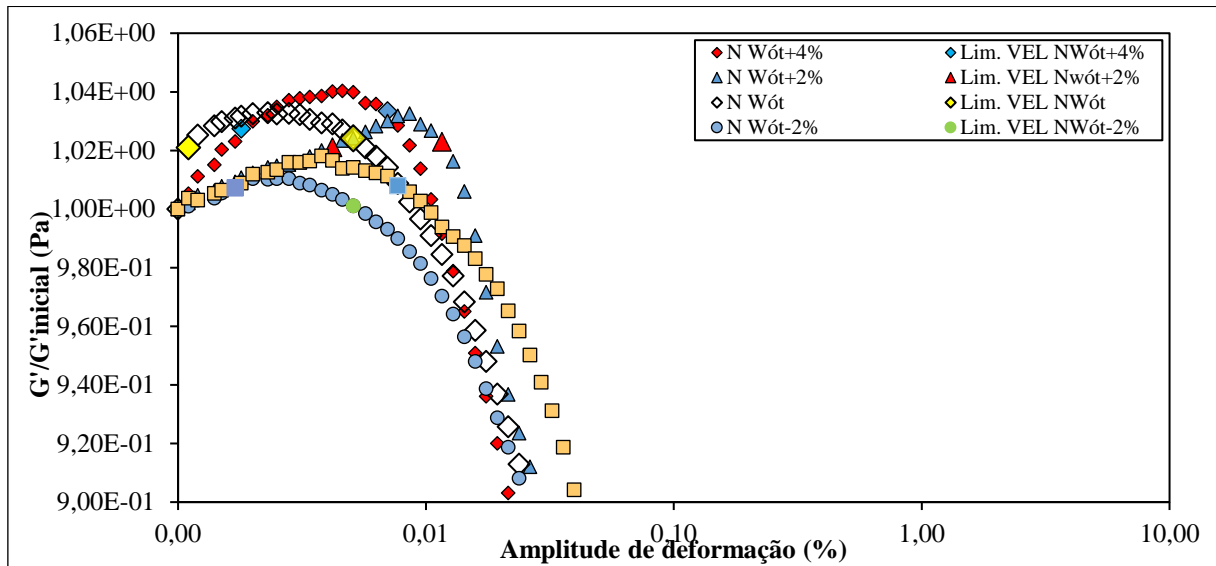
Figura 35 – Ensaio de varredura de amplitude para CPs moldados na energia normal



Fonte: Autor

Verifica-se que, para a energia de compactação equivalente à normal, as curvas dadas à umidade ótima e com um teor 2% abaixo dessa, estão extremamente próximas, partindo de valores de rigidez em torno de 29,0 MPa, enquanto as amostras contendo umidade 2% acima da umidade ótima, possui rigidez inicial de 25,6 MPa. Para as umidades extremas deste estudo, há uma variação não homogênea, cujos valores para o ramo mais seco chegam à ordem de 70,8 MPa e, para o ramo mais úmido, a rigidez do material inicia em 20,0 MPa para as deformações mais baixas. Para identificar o efeito da não linearidade de forma mais clara, é apresentado na Figura 36, as curvas normalizadas, considerando G'/G' inicial em função da amplitude de deformação. Desta maneira, compreende-se que a amostra que apresenta um crescimento inicial mais acentuado é a Wót, seguido da amostragem com maior teor de umidade, a NWót+4%.

Figura 36 – Efeito da não linearidade - EN



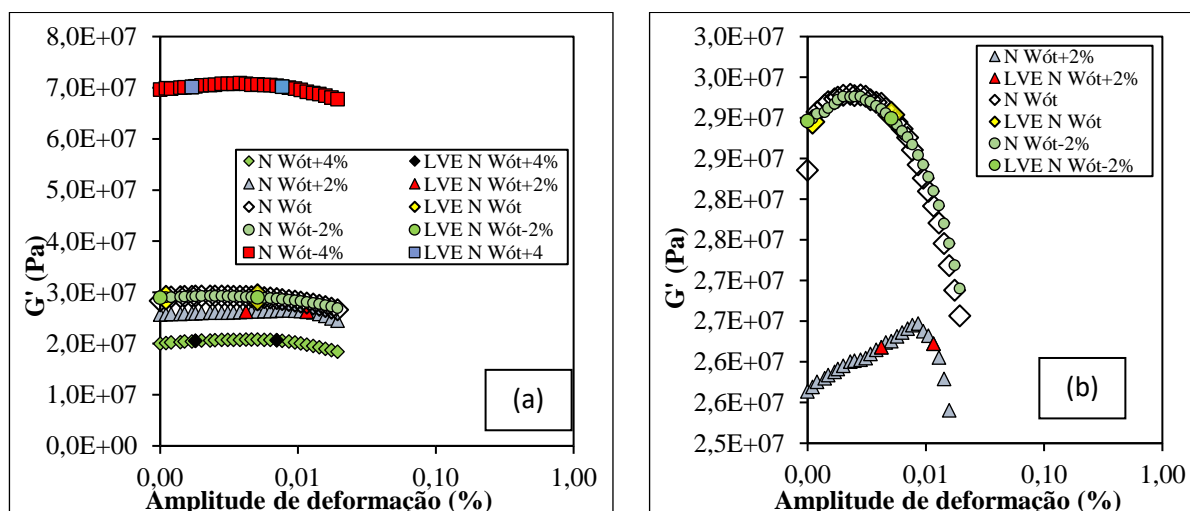
Fonte: Autor

Como se observa, a curva NWót+2 apresenta a maior amplitude de deformação limite para o trecho VEL, isto é, sua não linearidade é definida a partir de γ igual a 0,0116%. O crescimento inicial de rigidez das amostras moldadas nos ramos secos é proporcionalmente o menos elevado em comparação aos demais, notando-se também uma tendência de a ruptura frágil vir a ocorrer antes em comparação às amostras no ramo úmido.

As curvas apresentam inicialmente um leve aumento de rigidez, seguido de seu comportamento linear na aplicação de pequenas deformações e posteriormente se verifica uma perda acentuada de rigidez que corresponde ao momento em que há a fratura do corpo de prova, acabando com a sua estabilidade. Os trechos entre os pontos de colorações distintas das curvas, descrevem o limite viscoelástico linear, com seus valores estabelecidos na variação de 1% do módulo de armazenamento máximo tanto para os ciclos anteriores quanto para os posteriores a este ponto.

São apresentados também, em G' em função das deformações cisalhantes, a Figura 37(a), com destaque a proximidade das curvas NWót-2%, NWót e NWót+2% na Figura 37(b). Esses espaços não possuem uma tendência padrão de comportamento, mas é possível notar que quanto menor é a umidade dos CPs, maior tende a ser o intervalo VEL. A exceção do caso é a amostra mais úmida, a qual se apresenta invariável em relação a sua rigidez por um período maior do que as curvas com umidades intermediárias, e τ_{VEL} igual a 0,007%, ao passo que a menor deformação cisalhante correspondente ao fim de VEL é da amostra NWót e NWót+2%, que é igual a 0,0051%.

Figura 37 – VEL na EN (a) e *close* nas curvas NWót-2%, NWót e NWót+2% (b)



Fonte: Autor

A proximidade dos dados de NWót-2% e NWót, impossibilita diferenciar visualmente as duas curvas, mesmo em um quadro mais focado como o da Figura 36(b). Quando analisadas estatisticamente, conforme é apresentado na Tabela 20, para as curvas das diferentes umidades, na menor energia de compactação equivalente, nota-se que todas são agrupadas como um mesmo conjunto de dados, com exceção da NWót-4%. A Figura 1 do Apêndice A, mostra claramente como as medianas se sobrepõem nos diferentes quartis, o que significa afirmar que os dados podem ser considerados estatisticamente iguais e, portanto, pertencentes ao mesmo grupo.

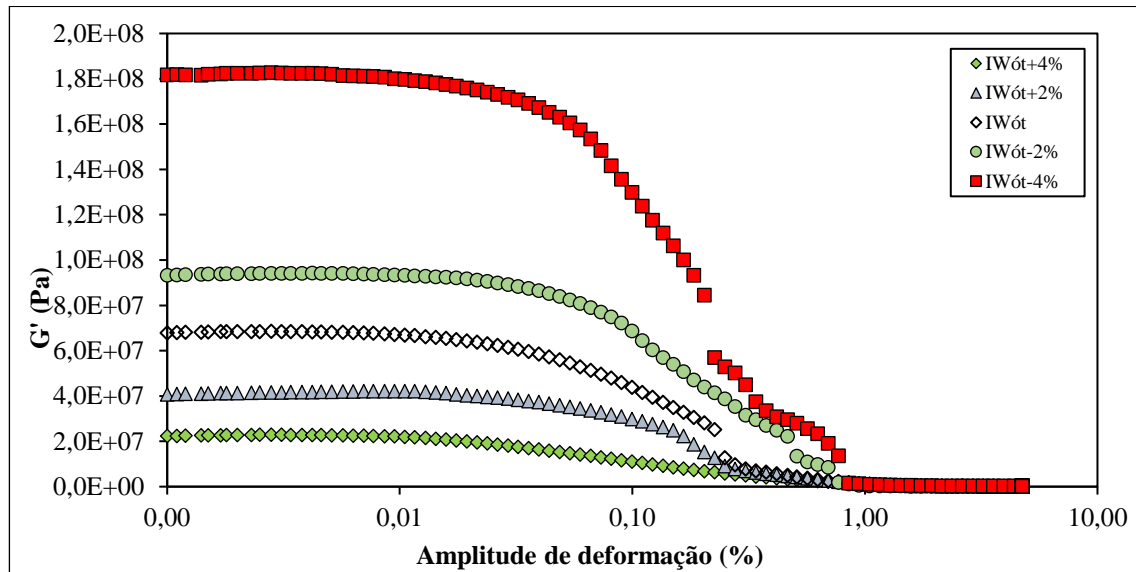
Tabela 20 – Mediana, primeiro e terceiro quartil de módulo de armazenamento x deformação cisalhante - AS na energia normal

	Wót -4%	Wót-2%	Wót	Wót+2%	Wót+4%	P-valor
Primeiro quartil (MPa)	0,31	0,13	0,21	0,29	1,17	3,425x10 ⁻¹³
Mediana (MPa)	35,32	15,45	14,31	10,99	9,28	
Terceiro quartil (MPa)	68,77	25,72	26,56	25,71	19,60	
Grupo	A	B	B	B	B	

Fonte: Autor

A Figura 38 traduz o comportamento do módulo de armazenamento em relação à deformação cisalhante em porcentagem das amostras de solo compactadas na energia intermediária. Apesar de a rigidez das amostras de maior teor de umidade partirem, assim como na energia normal, da casa dos 20 MPa, nota-se que nas demais umidades, há um crescimento substancial do módulo de armazenamento em relação à outra energia já citada.

Figura 38 – Ensaio de varredura de amplitude para CPs moldados na energia intermediária



Fonte: Autor

É notória a elevação de rigidez para a amostra mais seca, a qual se mantém em um primeiro grupo estatístico. As demais curvas começam a apresentar diferenças consideráveis entre si, ficando evidenciado o afastamento de aproximadamente 25 MPa entre a amostra NWót-2% e a NWót, o que, mesmo assim, não é suficiente para diferenciá-las estatisticamente, resultando em um segundo grupo, denominado B. Já a diferença da ordem de 30 MPa entre NWót e NWót+2%, revela a formação de um terceiro agrupamento estatístico, qualificando-o como C, conjunto esse, composto pelas duas amostras que sobrepõem seus quartis, como apresentado na Figura 2 do Apêndice A, nas condições mais úmidas, e revela seu panorama na Tabela 21.

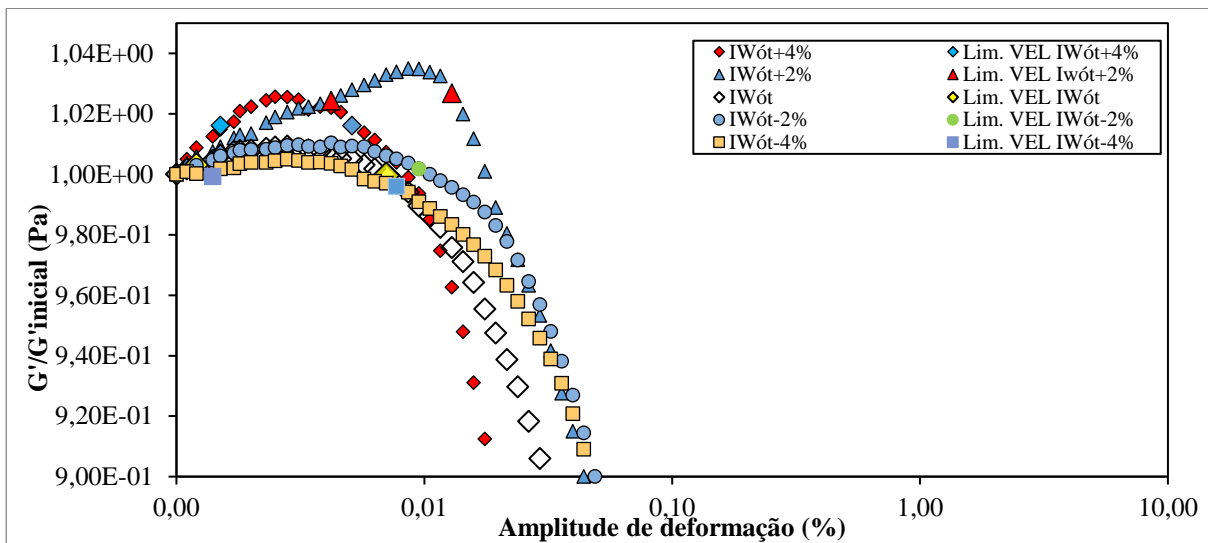
Tabela 21 – Mediana, primeiro e terceiro quartil de módulo de armazenamento x deformação cisalhante - AS na energia intermediária

	Wót -4%	Wót-2%	Wót	Wót+2%	Wót+4%	P-valor
Primeiro quartil (MPa)	0,32	0,15	0,37	0,21	0,33	
Mediana (MPa)	98,13	50,93	34,84	23,53	8,23	
Terceiro quartil (MPa)	178,68	92,60	178,61	40,95	21,52	$<2,2 \times 10^{-16}$
Grupo	A	B	B	C	C	

Fonte: Autor

As curvas são também plotadas considerando G'/G'' em função de γ_B (Figura 39), a fim de normalizá-las e se ter uma percepção da proporcionalidade do comportamento não linear dos diferentes espécimes compactados na energia equivalente à intermediária.

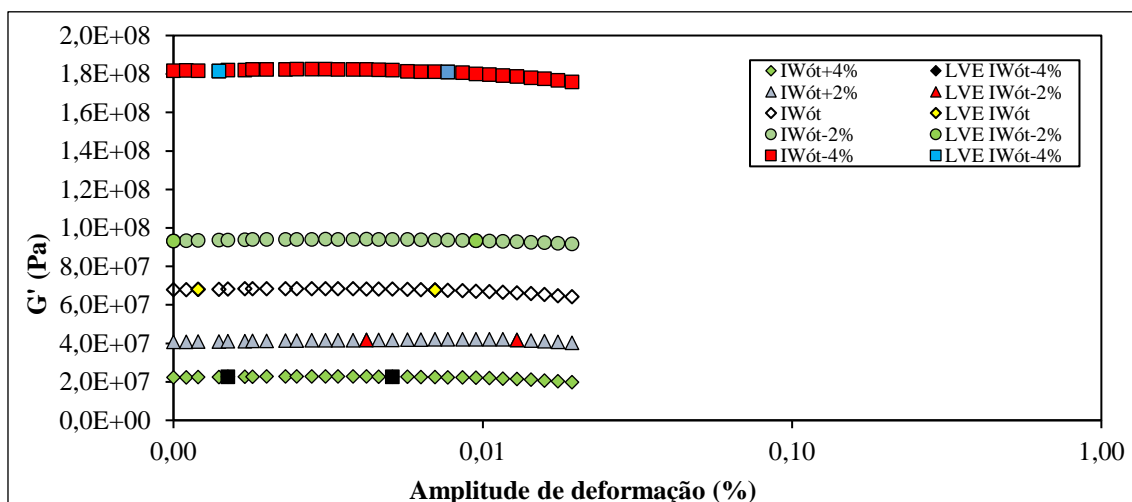
Figura 39 – Efeito da não linearidade - EI



Fonte: Autor

Com VEL definido como o trecho compreendido com valores de rigidez igual a 1% de máximo G' , é possível compreender com maior sensibilidade que as amostras no mais elevado teor de umidade passam ao intervalo não linear em amplitudes mais baixas do que as demais. Nota-se um crescimento no intervalo VEL para as amostras no ramo mais seco da curva em comparação às demais, o que é destacado na Figura 40, a qual mostra que estes intervalos seguem uma sequência heterogênea, sem uma tendência clara de comportamento. Tal qual ocorre na EN, a amostra mais úmida tende a destacar o seu pico de rigidez mais cedo do que as demais, e IWót+2% atinge o maior valor de γ_B no seu limite linear.

Figura 40 – VEL na energia intermediária

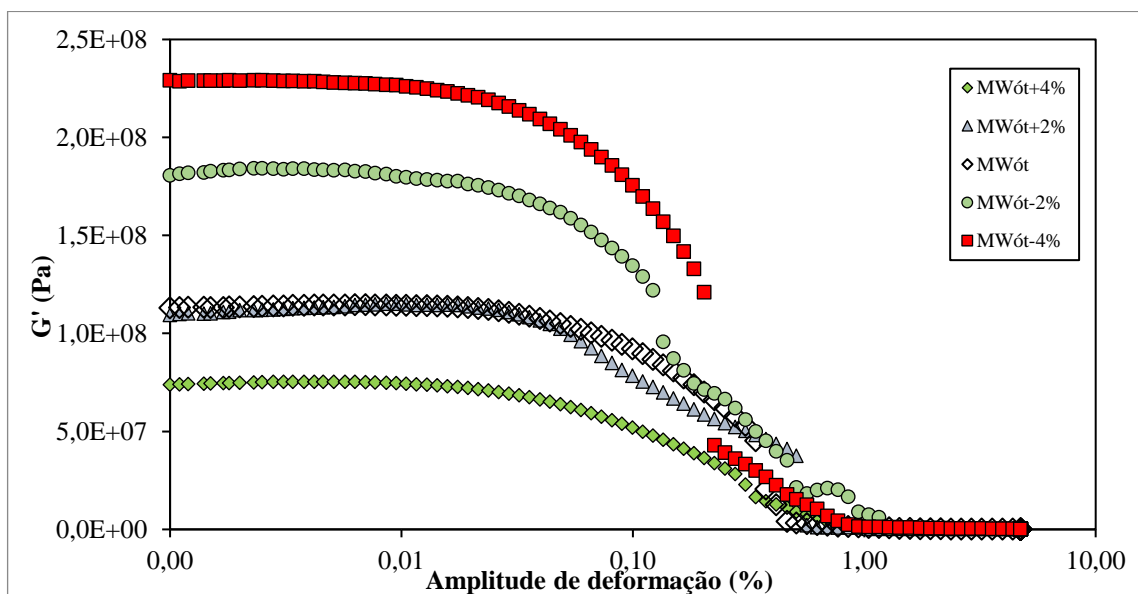


Fonte: Autor

A Figura 40 destaca melhor a existência do deslocamento do espaço viscoelástico linear para deformações mais altas para IWót+2% e mostra que suas intermitências são menores do que às demais. Enquanto para a amostra mais úmida, IWót+4%, tem τ_{VEL} reduzido para 0,0051%, a amostra mais seca, nesta energia de compactação, possui τ_{VEL} muito próximo de NWót+4%, igual a 0,0077%. As amostras intermediárias têm o término de seu VEL em deformações que vão de 0,0070% para a IWót, até 0,0129% para IWót+2%.

Ao tratarmos da energia de compactação equivalente à modificada, a Figura 41 ilustra o incremento na rigidez de todas as amostras propostas em relação às demais energias de compactação. É perceptível a aproximação da curva representativa da amostra MWót+2% do exemplar MWót, com valores iniciais de módulo de armazenamento de 10,9 e 11,3 MPa, respectivamente e rigidez máximas que se equiparam nas duas umidades, e, da mesma forma, há uma aproximação das duas curvas compactadas no ramo seco em relação às demais energias de compactação. Isso ocorre para as deformações mais altas, nas duas curvas de menor teor de umidade, a ruptura brusca dos corpos de prova, tal ruptura é traduzida pelo *gap* percebido em MWót-4% e MWót-2%.

Figura 41 – Ensaio de varredura de amplitude para CPs moldados na energia modificada



Fonte: Autor

Em termos estatísticos, o aumento de rigidez de MWót+2% resulta na justaposição das linhas de tendência com a amostra mais seca, o que revela um agrupamento único formado por essas duas amostras, denominado A. Enquanto a amostra mais úmida se diferencia de todas,

refletindo o grupo C, MWót+2% e MWót, compõem o grupo B, bem como apresentado na Tabela 22 e Figura 3 do Apêndice 1.

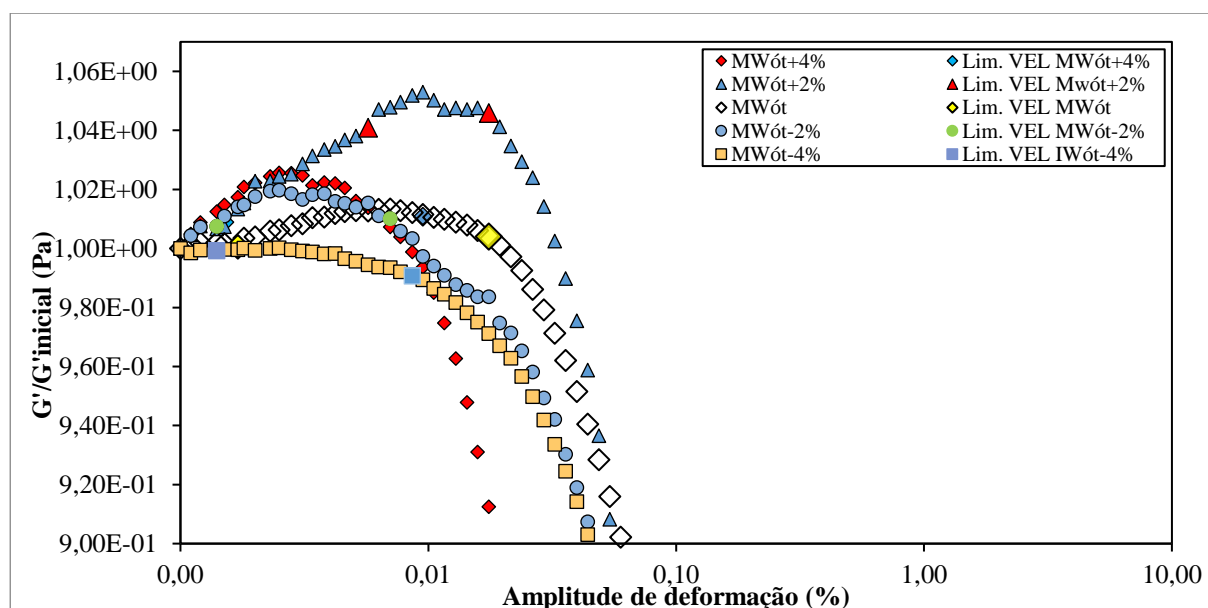
Tabela 22 – Mediana, primeiro e terceiro quartil de módulo de armazenamento x deformação cisalhante - AS na energia modificada

	Wót -4%	Wót-2%	Wót	Wót+2%	Wót+4%	P-valor
Primeiro quartil (MPa)	0,64	0,19	0,24	0,27	0,40	
Mediana (MPa)	145,71	84,17	78,54	65,46	42,26	9,627 x10 ⁻¹¹
Terceiro quartil (MPa)	225,01	178,61	107,23	111,86	72,85	
Grupo	A	A	B	B	C	

Fonte: Autor

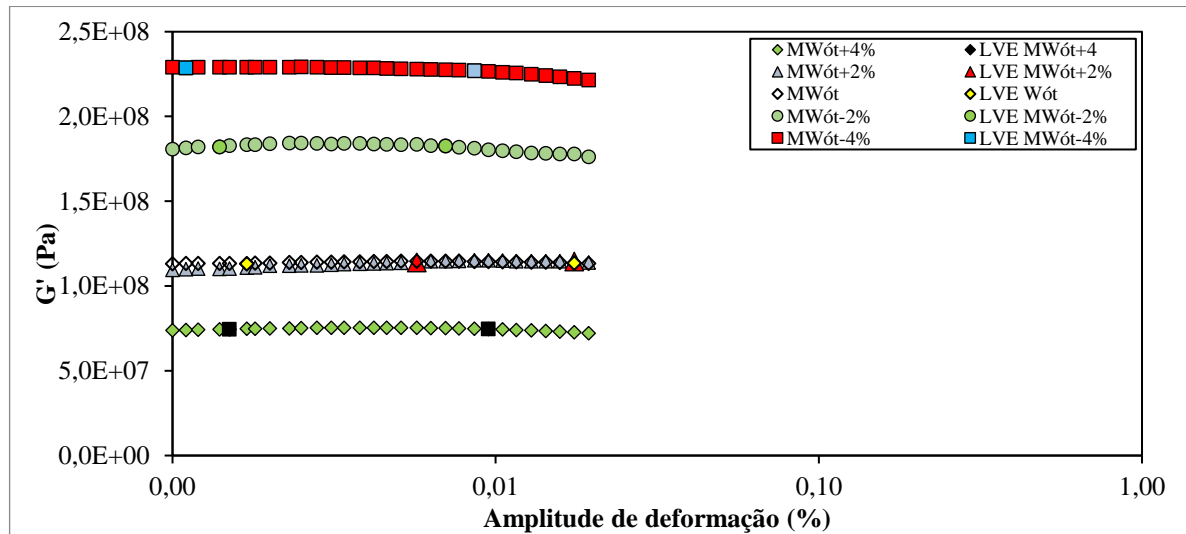
A partir dos dados apresentados na Figura 41, define-se o intervalo VEL da energia modificada, que são destacados de forma normalizada na Figura 45 e na sua íntegra na Figura 43. Os pontos de leitura inicial tendem a estar fora do intervalo de linearidade, porque o reômetro tem dificuldade de registrar os valores de módulo pelas deformações tão baixas, acarretando valores distantes mais que 1% do máximo G' . O período dado entre os pontos em destaque de cada parcela de curva, diz respeito à parcela de deformações que sucede os baixos níveis de deformação e precede o intervalo de não linearidade e danificação. Em suma, neste intervalo não há fratura nas amostras a ponto de que ela perca todas as suas propriedades elásticas.

Figura 42 – Efeito da não linearidade - EM



Fonte: Autor

Figura 43 – VEL na energia modificada



Fonte: Autor

Nota-se que o intervalo percorre as diferentes deformações para cada umidade de compactação. Quanto menor for o teor de umidade, as amostras tendem a perder propriedades viscoelásticas mais cedo do que as demais e, com o incremento de umidade, há o deslocamento desse intervalo para tensões de deformação mais altas, com exceção da amostra com o teor crítico de umidade. É percebido que a mais baixa tensão cisalhante limite é dada pela amostra MWót-2%, que tem τ_{VEL} igual a 0,0070% e a mais alta segue sendo da amostra com umidade igual a 2% acima da ótima.

Com base nos testes de varredura de amplitude, define-se os limites de deformação cisalhante que os materiais podem trabalhar apresentando um comportamento linear viscoelástico. A Tabela 23 apresenta os valores iniciais e finais do VEL de cada amplitude de deformação. Em vista de que o menor τ_{VEL} entre todas as amostras foi de 0,0051%, para NWót-2%. NWót e Iwót +4,% foi estabelecido como limite dos intervalos aceitos para a zona de serviço do VEL, deformação cisalhantes de 0,005%.

Tabela 23 – Intervalos do limite viscoelástico linear das amostras
(continua)

Energia de compactação	Condição	Módulo de armazenamento VEL inicial (Pa)	Deformação inicial (%)	Módulo de armazenamento VEL final (Pa)	Deformação final (%)
Normal	Wót-4%	70.120.195	0,0017	70.168.203	0,0077
	Wót-2%	28.961.625	0,0010	28.991.126	0,0051
	Wót	28.949.660	0,0011	29.037.144	0,0051
	Wót+2%	26.177.668	0,0042	26.223.311	0,0116
	Wót+4%	20.501.100	0,0018	20.621.972	0,0070

Fonte: Autor

Tabela 23 – Intervalos do limite viscoelástico linear das amostras (conclusão)

Energia de compactação	Condição	Módulo de armazenamento VEL inicial (Pa)	Deformação inicial (%)	Módulo de armazenamento VEL final (Pa)	Deformação final (%)
Intermediária	Wót-4%	181.561.457	0,0014	180.959.939	0,0077
	Wót-2%	93.193.172	0,0010	93.360.481	0,0095
	Wót	68.015.847	0,0012	67.776.304	0,0070
	Wót+2%	41.684.001	0,0042	41.785.933	0,0129
	Wót+4%	22.576.531	0,0015	22.603.933	0,0051
Modificada	Wót-4%	228.696.326	0,0011	226.904.888	0,0086
	Wót-2%	182.042.888	0,0014	182.515.864	0,0070
	Wót	113.102.612	0,0017	113.490.108	0,0175
	Wót+2%	113.831.685	0,0057	114.378.918	0,0175
	Wót+4%	74.418.285	0,0015	74.558.356	0,0095

Fonte: Autor

4.2 ENSAIO DE VARREDURA DE FREQUÊNCIA - FS

O ensaio de varredura de frequência é um ensaio que, em oposição ao AS, atua especificamente em amplitudes dentro do limite de linearidade das amostras. Ressalta-se que estes intervalos (Tabela 23) foram definidos através do ensaio de varredura de amplitude, que é caracteristicamente um experimento que trabalha nos diferentes intervalos de amplitude nos espécimes, com base no qual é possível dar sequência ao programa experimental deste documento.

Da varredura de frequência, infere-se, além de outros fatores como ângulo de fase (δ), módulo de armazenamento, módulo de perda e fator de perda ($\tan \delta$), o comportamento da magnitude do módulo complexo fundamentado em cada variação de frequência e, posteriormente, são compostas curvas mestras para cada energia de compactação equivalente, alicerçado em seu *shift factor*. Conforme exposto no capítulo 4.1.1 deste documento, não foi possível registrar os parâmetros reológicos dos ensaios em placas paralelas, devido à alta rigidez e baixas umidades das amostras, portanto os ensaios só tiveram sequência baseados nas geometrias para o dispositivo de TB.

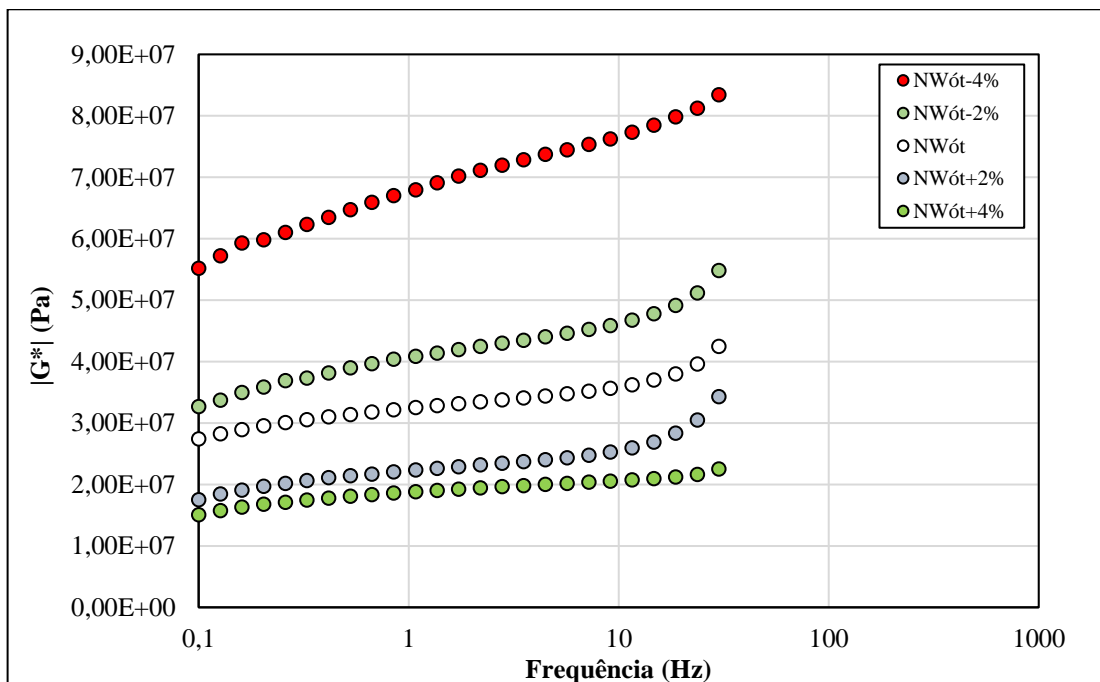
4.2.1 FS no dispositivo de torção de barras (TB)

Os ensaios de varredura de frequência foram organizados com a intenção de avaliar o incremento de rigidez em condição estabelecida para os experimentos. Estatisticamente, tal qual ocorreu para o primeiro ensaio, os dados não são paramétricos, portanto, foram submetidas ao teste de Kruskal Wallis, conforme exposto no item 3.4.5., nas três energias de compactação, e,

considerando o nível de significância igual a 5%, rejeita-se a hipótese nula, $p\text{-valor} < 0,05$, o que indica a existência de diferença entre os teores de umidade propostos.

A Figura 44 evidencia a média dos valores de $|G^*|$ em função da variação de frequência para os ensaios realizados na energia normal e com teores de umidade ótimo, 2% abaixo e acima e 4% abaixo e acima dessa. Desta maneira, a Tabela 24 apresenta o resumo dos parâmetros iniciais e finais de cada condição de ensaio na energia normal.

Figura 44 – Teste de varredura de frequência energia normal



Fonte: Autor

Quando as curvas são representadas por sua mediana, estatisticamente, elas possuem diferenças significativas entre si. Apesar de os dados na umidade acima da ótima estarem visivelmente próximos dos dados lindeiros, a Tabela 25 revela que todos são diferentes entre si, como apresentado pelo gráfico das medianas de cada condição e seus respectivos quartis, na Figura 2 do Apêndice B.

A curva representada pelo maior teor de umidade, é a única com característica diferente das demais, em que não se observa tal incremento no trecho final. Esta ocorrência se dá em conta de o ângulo de fase atingir um valor de aproximadamente 20° , resultado de amostras com comportamento viscoso maior que às demais curvas, pelos maiores teores de umidade e a mais baixa energia de compactação do experimento.

Tabela 24 – Resumo dos valores de $|G^*|$ para FS na energia normal

Condição de ensaio	Frequência (Hz)	Ângulo de fase (°)	$ G^* $ (Pa)
NWót-4%	0,1	10,85	55.202.164,0
	30,0	5,80	83.424.453,0
NWót-2%	0,1	10,69	32.721.949,5
	30,1	6,87	54.822.190,0
NWót	0,1	7,83	27.453.521,0
	30	6,28	42.490.480,5
NWót+2%	0,1	9,46	17.527.466,0
	30	6,54	34.343.694,0
NWót+4%	0,1	9,47	15.107.281,0
	30	19,52	22.551.845,0

Fonte: Autor

Tabela 25 – Mediana, primeiro e terceiro quartil de módulo de armazenamento x deformação cisalhante - FS na energia normal

	NWót -4%	NWót-2%	NWót	NWót+2%	NWót+4%	P-valor
Primeiro quartil (MPa)	63,48	38,09	30,58	21,07	17,26	$< 2,2 \times 10^{-16}$
Mediana (MPa)	70,21	41,72	32,86	22,92	18,83	
Terceiro quartil (MPa)	74,74	44,63	35,90	24,77	20,38	
Grupo	A	B	C	D	E	

Fonte: Autor

Fundamentado na Figura 44, entende-se que a rigidez dos corpos de prova se eleva à medida que os testes são realizados em maiores frequências, ou seja, é demonstrado de forma experimental que o solo possui caráter viscoelástico mesmo em baixas amplitudes de deformação. Há variações de módulo de até 40% conforme mudanças de frequência de carga na faixa de 0,1 a 30 Hz.

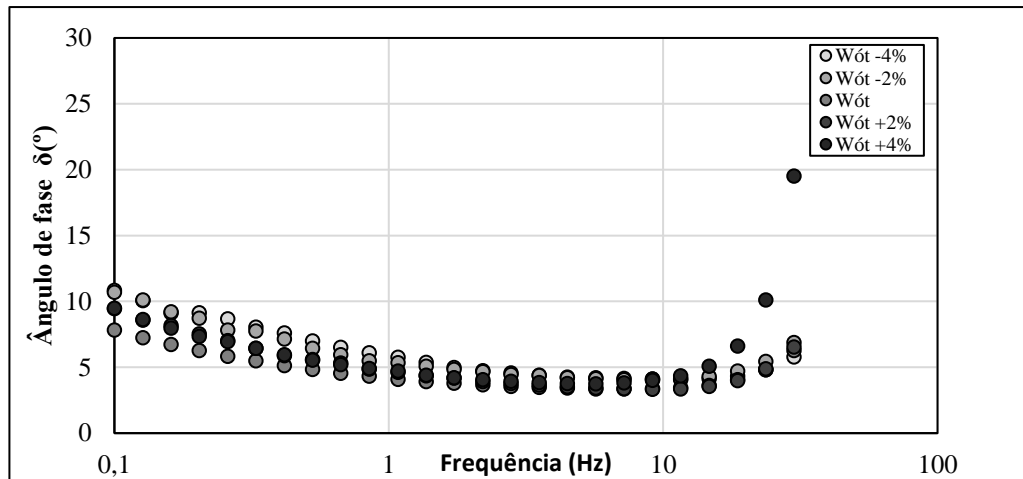
Destacam-se os crescimentos mais acentuados em dois trechos das curvas, o trecho inicial e o trecho final, onde se observa os maiores valores para o ângulo de fase, como mostrado no gráfico da Figura 45. A partir das frequências em torno de 0,328 Hz a inclinação da curva é amenizada, resultado de decréscimo constante do δ .

Quando são atingidas frequências maiores, da ordem de 10 Hz, constata-se que δ começa a crescer e, conseqüentemente, há um novo pico de intensificação do módulo dinâmico. Destaca-se a acentuada crescente de δ para NWót-4% no final do ensaio, sendo mais de 10° a mais para frequência de 30 Hz em relação à frequência de 0,1 Hz. Esse possivelmente é um dos fatores que traduz o comportamento anômalo de seu $|G^*|$.

A Figura 46 revela o gráfico que relaciona o comportamento do valor absoluto de módulo complexo em função da frequência, considerando cada um dos diferentes teores de umidade

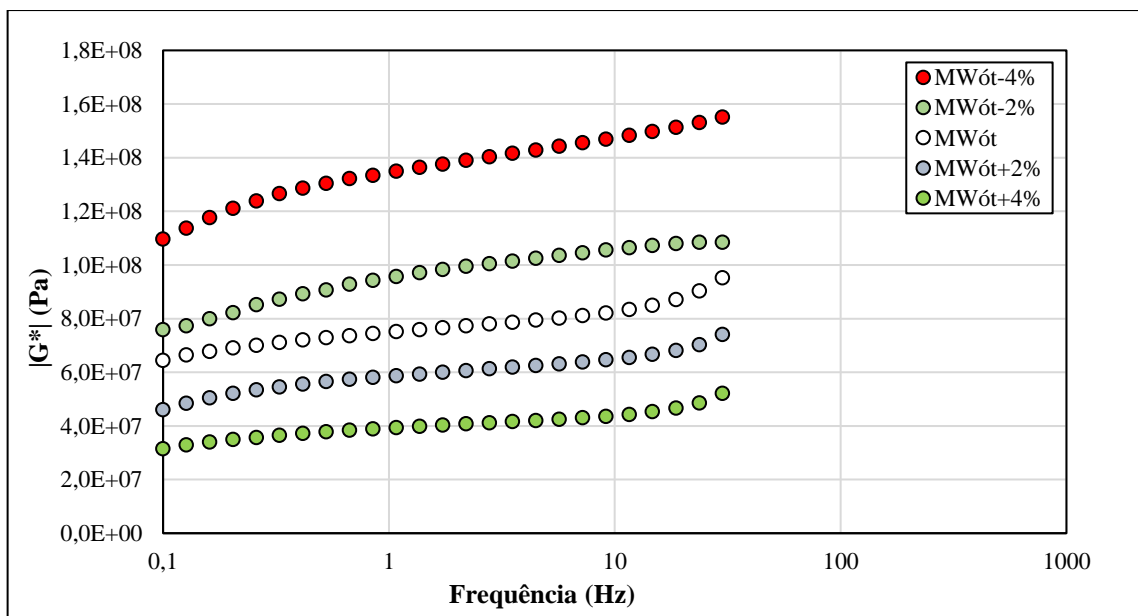
para a energia de compactação equivalente à intermediária de compactação. Os valores correspondentes às frequências iniciais e finais de ensaio para este nível de compactação são explicitados na Tabela 26.

Figura 45– Ângulo de fase em função da frequência à energia normal



Fonte: Autor

Figura 46 – Teste de varredura de frequência energia intermediária



Fonte: Autor

É típico que as amostras submetidas a este ensaio apresentem comportamentos de suas curvas semelhantes para todas as energias de compactação. Inicialmente há uma elevação acentuada do $|G^*|$ até que atinja um platô que se aproxima de um comportamento linear.

Finalmente, há um trecho final em que o crescimento se torna intenso novamente até atingir a frequência máxima de 30 Hz, com exceção da curva IWót-2%.

Tabela 26 – Resumo dos valores de $|G^*|$ para FS na energia intermediária

Condição de ensaio	Frequência (Hz)	Ângulo de fase (°)	$ G^* $ (Pa)
IWót-4%	0,1	10,91	109.649.676,5
	30,0	4,31	155.100.130,5
IWót-2%	0,1	13,38	75.880.640,5
	30,0	5,21	108.517.752,5
IWót	0,1	7,73	64.392.260,5
	30,0	4,73	95.167.407,5
IWót+2%	0,1	10,71	46.009.044,0
	30,0	5,51	74.127.632,0
IWót+4%	0,1	8,85	31.528.821,0
	30	6,04	52.086.123,0

Fonte: Autor

Comparativamente à energia normal, é notória a aproximação dos dados das duas amostras com menor teor de umidade. Enquanto a rigidez inicial do exemplar no ramo mais seco praticamente dobra com o aumento da energia de compactação (de 55,2 MPa para 109,6 MPa), as amostras IWót-2% e IWót, possuem valores de $|G^*|$ que se elevam na ordem de 130% cada, e os dois espécimes no ramo mais úmido, elevam-se em 162% e 109%, respectivamente.

Para esse caso, quanto maior for o teor de umidade, menor é o ganho de rigidez da amostra. Em termos estatísticos, as informações plotadas no gráfico são dispostas não mais em cinco grupos, tal qual para a energia normal e como poderá ser observado à modificada. Para este caso, conforme apresenta a Tabela 27 e a Figura 3 do Apêndice B, os dados de Wót-2% e Wót são iguais, e os demais dados são distintos entre si.

Tabela 27 – Mediana, primeiro e terceiro quartil de módulo de armazenamento x deformação cisalhante – FS na energia intermediária

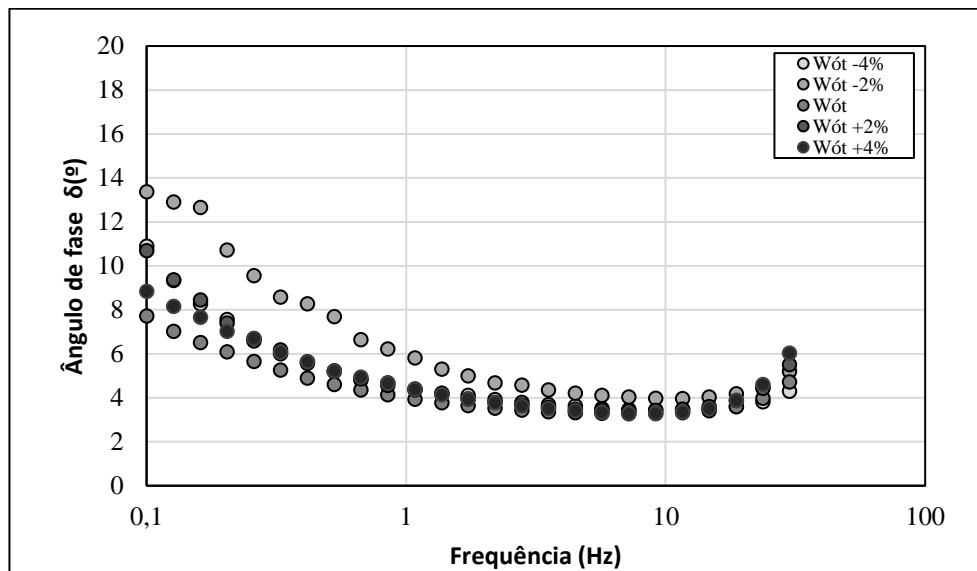
	IWót -4%	IWót-2%	IWót	IWót+2%	IWót+4%	P-valor
Primeiro quartil (MPa)	124,12	76,53	71,97	22,93	17,27	< 2,2 x10 ⁻¹⁶
Mediana (MPa)	135,33	95,67	76,59	21,07	18,83	
Terceiro quartil (MPa)	149,73	120,16	81,21	24,77	20,39	
Grupo	A	B	B	C	D	

Fonte: Autor

A Figura 47 retrata o comportamento de δ com a elevação da frequência, e possibilita associar como os valores de ângulo de fase diminuem à medida que há o incremento repentino

de rigidez. O mesmo ocorre para as amostras compactadas na energia normal, até frequências da ordem de 10 Hz, a partir da qual começa a elevar. Já as amostras moldadas a 2% abaixo da umidade ótima, possui um decréscimo constante do δ e, a partir de frequências em torno de 7 Hz, passa a crescer, o que resulta na característica observada no gráfico $|G^*|$ em função da frequência, na Figura 46.

Figura 47 – Ângulos de fase em função da frequência à energia intermediária



Fonte: Autor

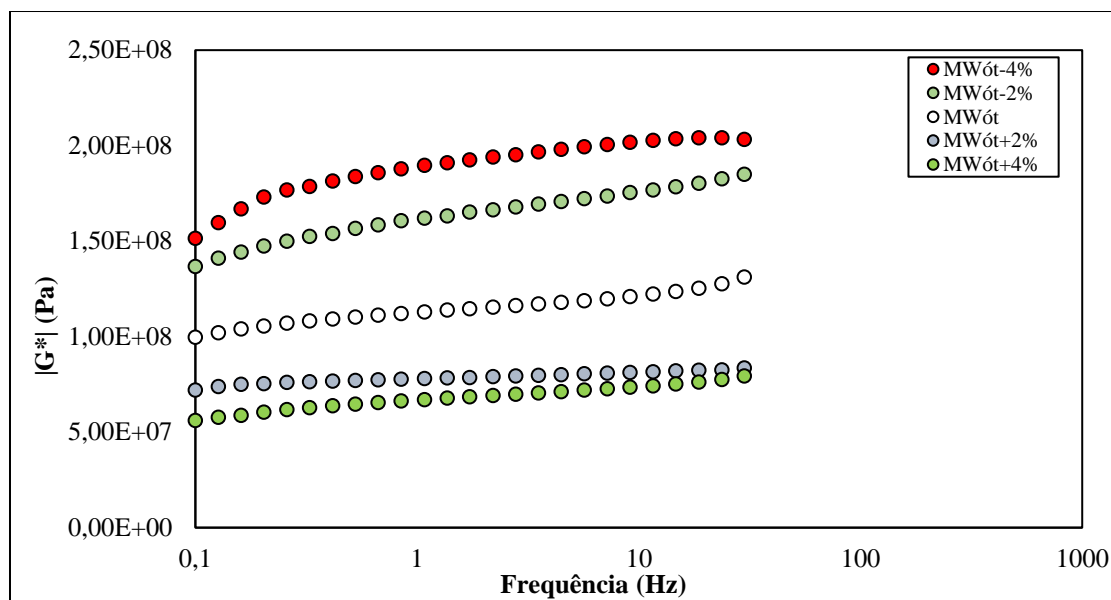
No decorrer da maioria das variações de frequência, os valores mais altos são da amostra IWót-2%, com exceção dos dois últimos pontos que não se elevam tal qual os demais e potencialmente resulta no comportamento anormal no final da curva IWót-4%. Os menores ângulos de fases são para a umidade ótima até a frequência de 23,7 Hz, o que não causa nenhuma alteração significativa na curva de $|G^*|$.

Na Figura 48 é apresentado o gráfico que contém as curvas de $|G^*|$ em função da frequência à compactação máxima das amostras e a Tabela 28 um resumo dos principais pontos de análise na EM. De um modo geral, com exceção de MWót+2, observa-se que quanto maior o teor de umidade, menor é o ganho de rigidez da amostra no decorrer do teste.

Ao variar a energia intermediária à modificada, nota-se um acréscimo moderado da variação de rigidez em comparação à variação da normal para a intermediária, o que resulta em uma maior inclinação das curvas. As amostras MWót-4% e MWót-2% possuem um incremento de 72% em seu $|G^*|$, ao passo que MWót e MWót+2%, tem um aumento de apenas 55% em

sua rigidez inicial, e MWót+4% sobem de 31,5 MPa, para 56,1 MPa, o que significa um acréscimo de rigidez de 78%.

Figura 48 – Teste de varredura de frequência energia modificada



Fonte: Autor

A análise estatística demonstra que no conjunto dos dados de $|G^*|$, há cinco diferentes grupos, cada um composto por uma curva diferente. Isso significa afirmar que há diferença entre as curvas submetidas a diferentes variações de umidade. A Tabela 29 e a Figura 5 do Apêndice B retratam esse comportamento.

Tabela 28 – Resumo dos valores de $|G^*|$ para FS na energia modificada

Condição de ensaio	Frequência (Hz)	Ângulo de fase (°)	$ G^* $ (Pa)
MWót-4%	0,1	10,75	151.525.517,0
	30,0	3,47	203.347.319,0
MWót-2%	0,1	11,57	136.745.585,5
	30,0	4,57	184.967.137,5
MWót	0,1	8,77	99.708.246,0
	30,0	5,42	131.171.973,5
MWót+2%	0,1	10,98	72.085.087,5
	30,0	7,84	83.543.590,5
MWót+4%	0,1	10,21	56.132.321,0
	30,0	5,33	79.471.886,5

Fonte: Autor

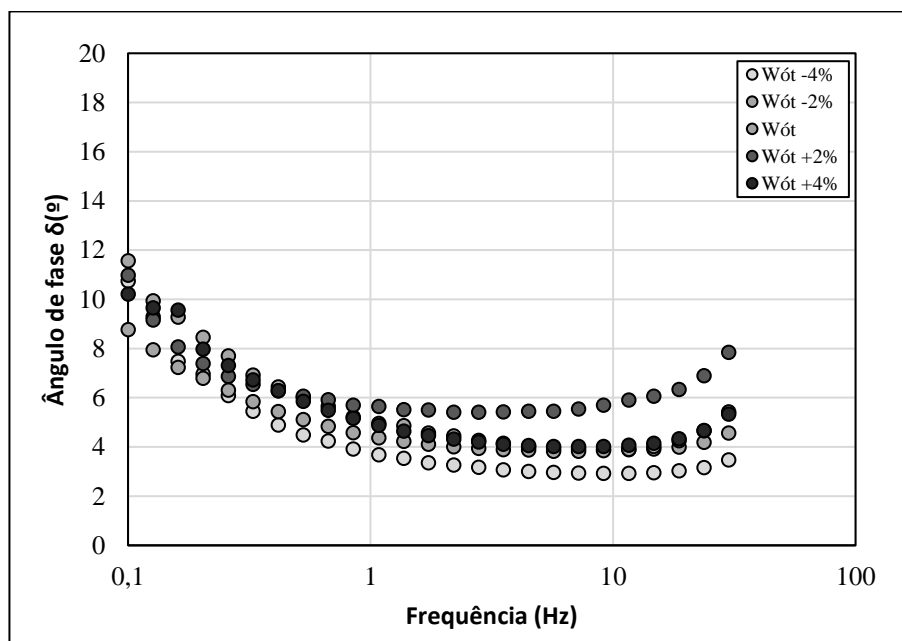
Tabela 29 – Mediana, primeiro e terceiro quartil de módulo de armazenamento x deformação cisalhante - FS na energia modificada

	Wót -4%	Wót-2%	Wót	Wót+2%	Wót+4%	P-valor
Primeiro quartil (MPa)	181,08	143,71	86,66	68,53	61,93	
Mediana (MPa)	191,85	154,66	106,66	74,81	67,27	< 2,2 x10 ⁻¹⁶
Terceiro quartil (MPa)	199,10	186,20	142,37	88,59	73,77	
Grupo	A	A	B	B	C	

Fonte: Autor

As curvas para esta condição de compactação, diferente das demais energias, não apresentam um comportamento tão evidente de possuir um incremento inicial de rigidez acentuado, explicado pelo decréscimo gradual do δ com a variação de frequência (Figura 49), havendo mudança de direção das curvas somente por volta da frequência de 11,6 Hz. Destaca-se à elevação extremamente sutil da amostra MWót-4%, que é traduzida em uma curva $|G^*|$ com final decrescente no gráfico apresentado na Figura 48.

Figura 49 – Ângulo de fase em função da frequência à energia modificada



Fonte: Autor

Com base no que foi anteriormente exposto, considera-se que, através dos testes de varredura de frequência, a rigidez do solo é inteiramente susceptível à frequência de carregamento aplicada, bem como pela umidade. Portanto, esses parâmetros podem ser tidos como fundamentais a serem considerados para o dimensionamento de estruturas de pavimentos.

4.2.2 Curvas mestras

Após análise do comportamento reológico através do *teste de varredura de frequência*, é proposto a montagem de curvas mestras, compostas pelas curvas de rigidez dos materiais em determinada energia de compactação equivalente, transladadas no gráfico. Esse procedimento possibilita, a partir de princípios de superposição frequência – umidade parcial, investigar a dependência do módulo em função desses dois aspectos, em um amplo espectro de variações. A proposta se limita aos valores de rigidez, porque a intenção do documento é compreender o comportamento do solo e possibilitar um dimensionamento expedito de pavimentos, não se aprofundando, neste momento, em mais aspectos correlatos às propriedades do material.

As frequências para cada condição de variação de umidade são multiplicadas por um valor denominado *shift factor* (SF), que representa o quão susceptíveis são as curvas a determinada variável. No caso em estudo optou-se por avaliar a variação de umidade, de forma que, com a composição da curva mestra, haja a possibilidade de criar uma previsão do comportamento dos materiais a qualquer frequência por meio de uma equação que corresponda ao comportamento do conjunto nestas condições específicas, com curvas que passam a ser denominadas de isogróscopas. Em cada gráfico, para a frequência de 10 Hz, adotado por se tratar da frequência de aplicação de carga no ensaio de MR (dada em 0,1 s), foi plotado um ponto correspondente ao MR médio do material, por meio do modelo Universal e Svenson (σ_d) na umidade ótima (conforme explicado no item 3.5). Os dados foram convertidos em módulos cisalhantes e têm valores apresentados na Tabela 30.

Tabela 30 – Resumo dos valores de MR convertidos em módulo de cisalhamento

Energia de compactação	Módulo de resiliência - Universal (MPa)	Módulo de cisalhamento - Universal (MPa)	Módulo de resiliência – Svenson (MPa)	Módulo de cisalhamento - Svenson (MPa)
Normal	233,22	80,42	153,17	52,81
Intermediária	306,47	105,68	246,52	85,01
Modificada	417,71	144,04	349,62	120,56

Fonte: Autor

A Figura 50 é composta pelas curvas nas cinco diferentes umidades determinadas para este documento, extrapoladas de acordo com os valores de *shift factor* e os valores de MR médio apresentados em módulo cisalhante. Junto à curva mestra, é mostrada a equação que a representa para a energia normal e seu respectivo R². A Tabela 31 especifica os SFs para cada uma das umidades.

Para as umidades mais baixas, são atribuídos *shift factors* mais elevados, porque possuem maiores valores de rigidez, assim quando multiplicado por frequência, serão transladados para o lado direito do gráfico. Em contrapartida, às curvas que representam amostras com maior teor de umidade precisam ser transladadas à esquerda do gráfico, resultando em *shift factors* mais próximos de zero. A curva na Wót permanece centralizada, considerando assim um SF igual a 1, tal qual ocorre para os pontos de MR médio, obtidos a uma frequência de 10 Hz e convertidos em módulo cisalhante através da equação 12, que também é apresentada junto à Figura 50.

Percebe-se que a equação matemática de potência modela satisfatoriamente a curva mestra da energia normal, com um elevado valor de R^2 . Neste caso, os *shift factors* (FS) para as umidades extremas são proporcionalmente equivalentes, ou seja, enquanto para as amostras mais rígidas, percebe-se dígitos da ordem de 10^4 , como bem mostra Figura 51, as amostras mais úmidas são da ordem de 10^{-4} . O mesmo não ocorre às amostras NWót-2% e NWót+%2, em que se constata, na primeira, um fator de translado moderado, igual a 25, ao passo que, para a segunda, o valor de frequência é multiplicado por 0,001. Quanto mais inclinada for a reta representada na Figura 51, menor é a susceptibilidade da amostra à mudança no teor de umidade.

Figura 50 – Curva mestra energia normal

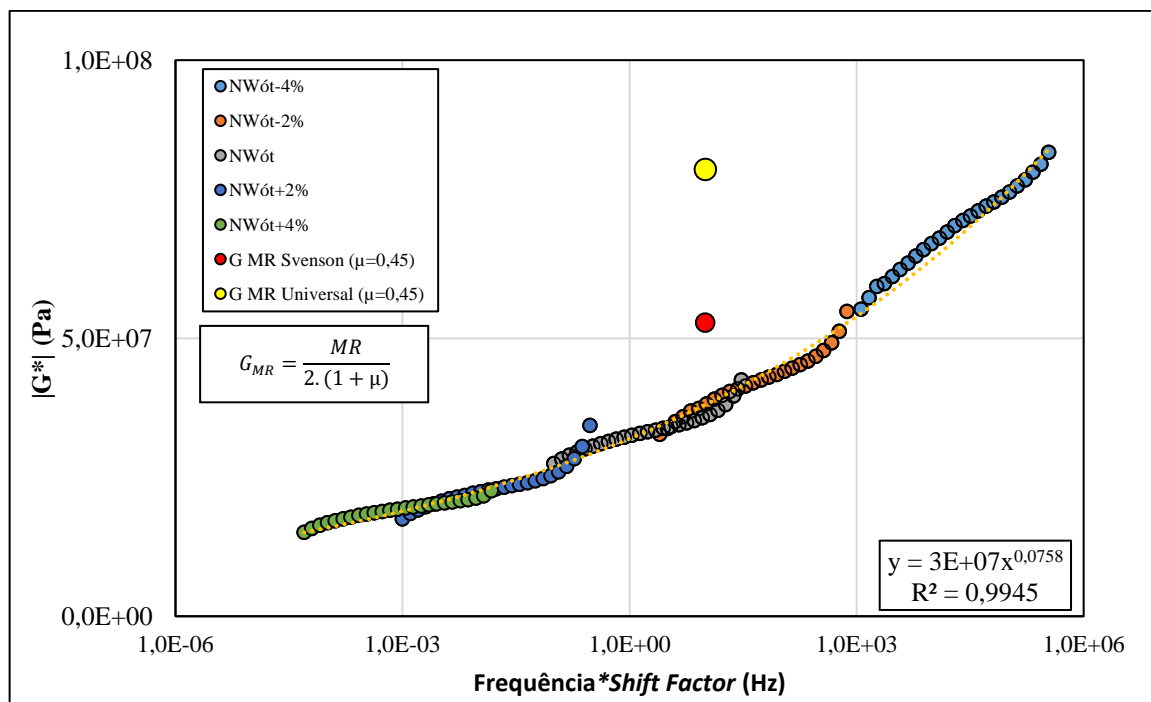
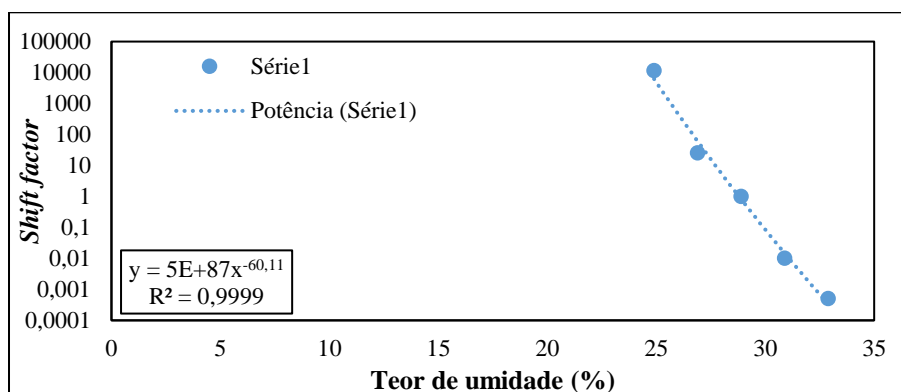


Tabela 31 – Valores de shift factor utilizados à energia normal

	Condição de ensaio	Umidade (%)	Shift factor
Energia normal	Wót-4%	24,9	11.500
	Wót-2%	26,9	25
	Wót	28,9	1
	Wót+2%	30,9	1×10^{-2}
	Wót+4%	32,9	5×10^{-4}

Fonte: Autor

Figura 51 – Shift factor em função da variação de umidade EN



Fonte: Autor

Para analisar o vínculo entre o ensaio de MR e FS, o primeiro modelo selecionado foi o Universal. Esse é o modelo que apresentou o maior R^2 durante as análises realizadas por Pascoal (2020), ou seja, é o que melhor representa o comportamento resiliente do material estudado. Nele o MR médio, na umidade ótima da EN, foi de 233,22 MPa. Ao ser plotado o ponto correspondente ao MR, convertido em módulo cisalhante, é notório a sua disparidade em relação à curva mestra, pois enquanto o ponto correspondente a $|G^*|$ da umidade ótima, na frequência de 10 Hz é igual a 35,88 MPa, o valor de módulo de cisalhamento é 124,1% superior.

O segundo modelo matemático proposto é o $k-\sigma_d$, o qual considera apenas a atuação da tensão desvio na modelagem do comportamento resiliente do material. Apesar de o valor de R^2 para o modelo ser de apenas 0,478, analisá-lo é pertinente, porque considera um sistema sem a atuação da tensão confinante, tal como ocorre para o teste de varredura frequência. Essa modelagem resulta em um MR médio convertido em G igual a 52,81 MPa, isto é, um valor 47,19% maior do que o analisado pela curva mestra na mesma frequência.

Essas diferenças são compreensíveis e aceitáveis, por estar sendo considerado um coeficiente de Poisson igual a 0,45 para todas as condições propostas para o material. No

entanto, cabe destacar que ele corresponde a um valor que possivelmente variaria para cada uma das condições impostas aos materiais.

A Figura 52 mostra a curva mestra formada a partir dos dados de $|G^*|$ das diferentes amostras, compactadas na energia intermediária, quando transladados em função de *shift factor*. Tal qual para a energia normal, o R^2 da equação de potência que representa a curva é alto, o que indica a sua excelente representatividade. Aparentemente nota-se uma possível tendência de que a rigidez dos materiais pare de crescer para umidades inferiores àquelas referentes a NWót-4%, em vista de que o final dessa curva possui um platô incipiente. A Tabela 32 expõe os valores de *shift factor* adotados para cada uma das condições.

Em relação aos *shift factors* propostos, há um crescimento moderado em seus valores, com exceção da amostragem mais úmida. Ainda é percebido que a ordem de grandeza destes dados se mantém inalterados quando comparados à menor energia de compactação equivalente, isto é, as amostras possuem susceptibilidades semelhantes à variação de umidade, como mostra a Figura 53.

Quando analisado o comportamento resiliente do material IWót, nota-se que seu MR médio no modelo Universal é de aproximadamente 306 MPa, o que resulta em um valor de módulo cisalhante, na frequência de 10 Hz, de aproximadamente 106 MPa. Em módulo de cisalhamento, esse dado corresponde a 28% mais do que o valor de $|G^*|$ na umidade ótima à frequência de ensaio, ou seja, assemelhando-se mais do que a mesma reprodução na energia normal.

Figura 52 – Curva mestra energia intermediária

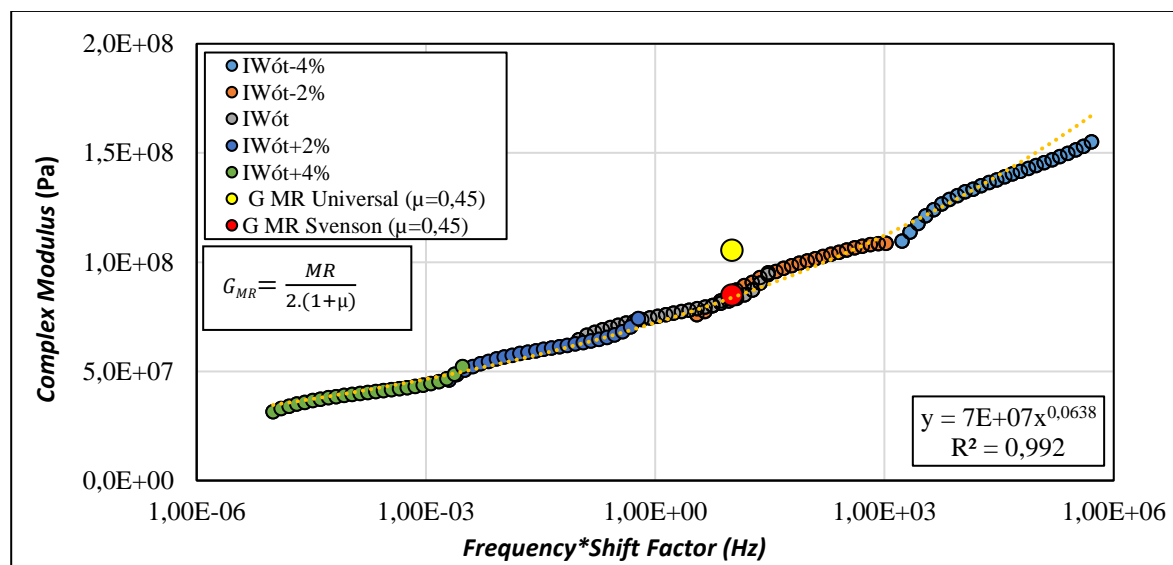


Tabela 32 – Valores de shift factor utilizados à energia intermediária

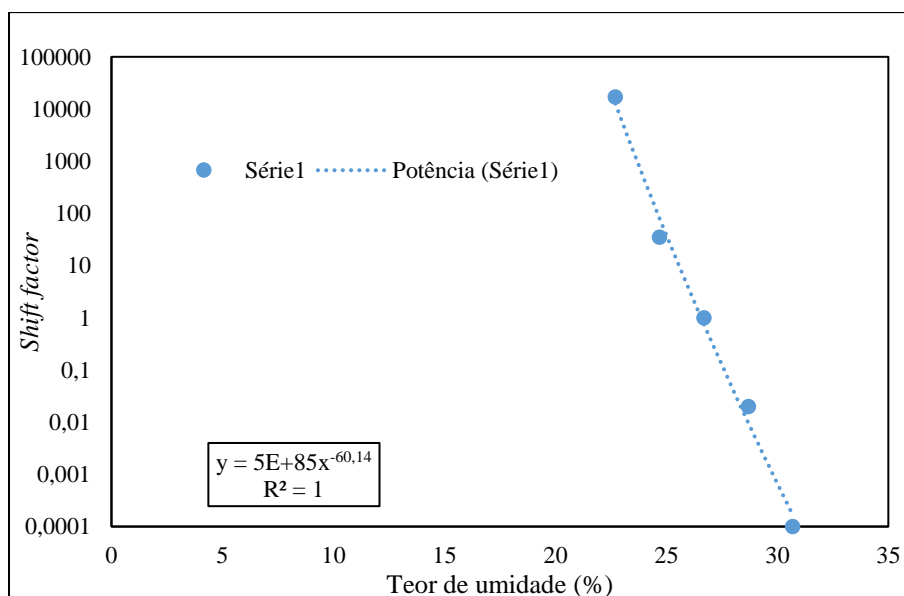
	Condição de ensaio	Umidade (%)	Shift factor
Energia intermediária	Wót-4%	22,7	17.000
	Wót-2%	24,7	35
	Wót	26,7	1
	Wót+2%	28,7	2×10^{-2}
	Wót+4%	30,7	1×10^{-4}

Fonte: Autor

O modelo $k-\sigma_d$ para EI, provê um valor de MR médio 20% menor do que para EN, o que resulta em um G apenas 2,9% maior do que o valor previsto pela curva mestra, no trecho de IWót e de 1,1% menor em relação a IWót-2% . Em outras palavras, o valor absoluto de módulo complexo, a 10 Hz, corresponde a um valor compreendido entre 82,61 a 85,93 MPa, para IWót e IWót-2%, respectivamente, enquanto o módulo de cisalhamento obtido pela transformação do MR médio é de 85,01 MPa, ou seja, um resultado compreendido no intervalo de previsão.

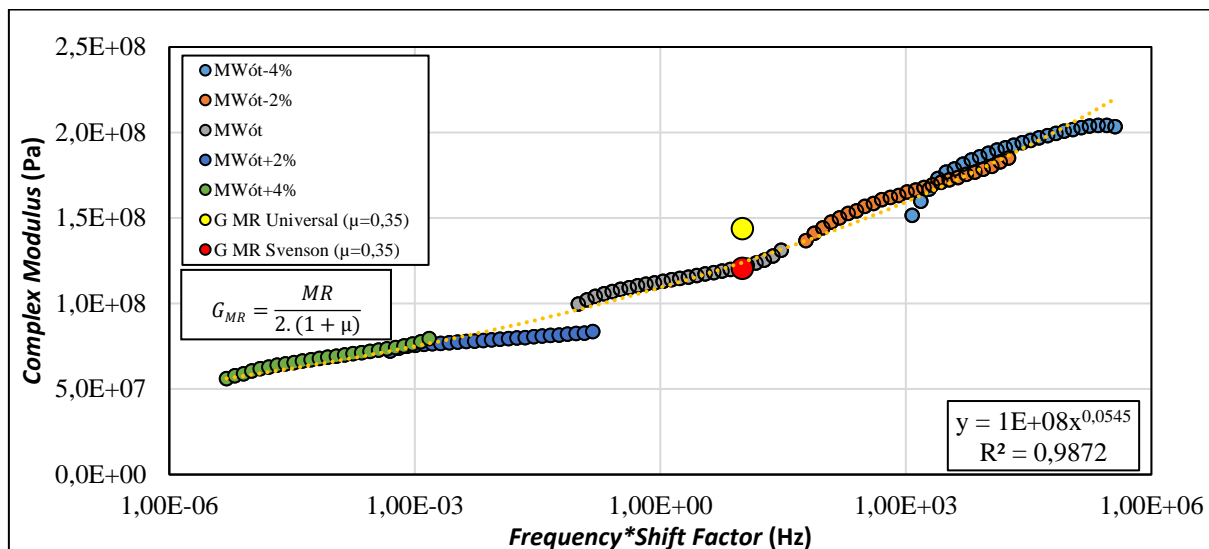
A Figura 54, revela a curva mestra composta pelos dados de $|G^*|$, transladados em função de *shift factors* (Tabela 33) de cada uma das condições de umidade na energia modificada. Além disso, apresenta-se os pontos de MR médio pelo modelo Universal e modelo $k-\sigma_d$, convertidos para módulo cisalhante através da equação informada, e o modelo matemático de potência que representa a curva mestra com o seu respectivo R^2

Figura 53 – Shift factor em função da variação de umidade EI



Fonte: Autor

Figura 54 – Curva mestra energia modificada



Fonte: Autor

Tabela 33 – Valores de shift factor utilizados à energia modificada

	Condição de ensaio	Umidade (%)	Shift factor
Energia modificada	Wót-4%	18,6	12.000
	Wót-2%	20,6	500
	Wót	22,6	1
	Wót+2%	24,6	5×10^{-3}
	Wót+4%	26,6	5×10^{-5}

Fonte: Autor

Os dados apresentados, denotam que o modelo matemático de potência mostra que existe uma continuidade nas curvas com um R^2 igual a 0,987. Ainda assim, nota-se que a inclinação da curva referente à amostra MWót+2% é menos acentuada do que as demais, resultando em um claro desencontro com a curva na MWót, o que desfavorece o estabelecimento de um R^2 tão alto quanto o das demais curvas mestras.

Destaca-se a tendência clara de formação de um platô a partir de MWót-4%, o que leva a crer que, em se tratando de umidades ainda mais baixas, possa não haver mais o crescimento da rigidez do material, mas sim uma estabilização, bem como uma possível queda de seus valores. Isso provavelmente ocorre devido à falta de coesão entre as partículas que compõem as amostras, isto é, o material vai perdendo seu caráter viscoelástico à medida que a água se torna mais escassa no sistema. A umidade ótima nesta energia é caracteristicamente mais baixa do que as demais, demonstrando que potencialmente esse comportamento possa vir a ocorrer, para teores ainda mais baixos.

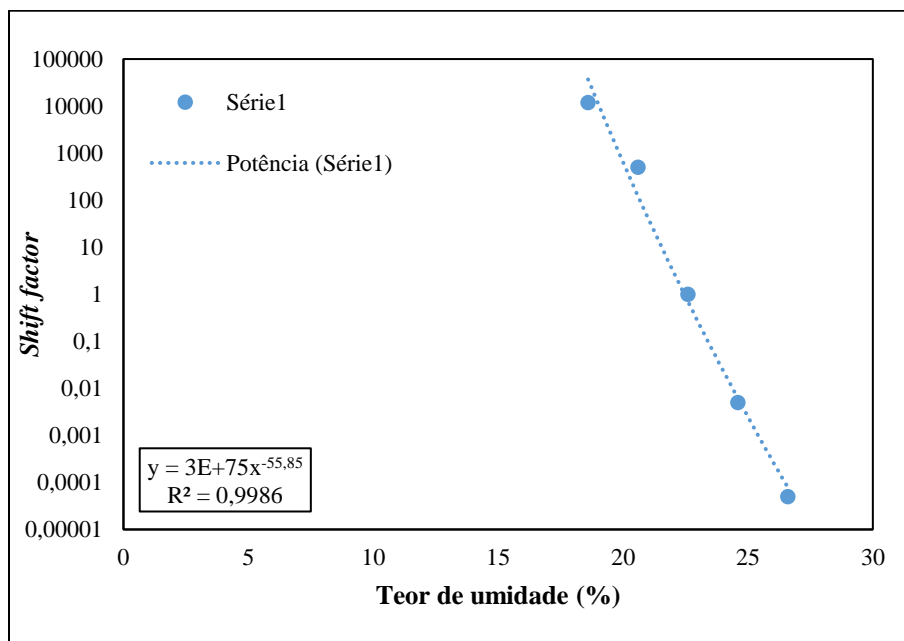
Tal qual ocorreu anteriormente, os dados na umidade ótima são mantidos centralizados, ou seja, possuem um *shift factor* igual a 1. As demais curvas têm sua frequência modificada em função de valores maiores que 1 para as umidades mais baixas, resultando em transações para o lado direito do gráfico, e menores do que 1, para as amostras moldadas no ramo úmido, caracterizando um translado à esquerda da figura.

Para a umidade ótima da energia modificada, observa-se um MR médio, através do modelo Universal, igual a 417 MPa, resultando em um G equivalente a 144 MPa. Esse valor corresponde a um módulo cisalhante apenas 20,8% maior do que o $|G^*|$ da MWót a 10 Hz de frequência, isto é, ainda mais próximo da curva mestra em comparação às demais energias de compactação.

Por $k-\sigma_d$, há uma aproximação ainda maior do valor de módulo cisalhante equivalente, em que seu valor igual a 120,55 MPa, é apenas 1,1% maior do que $|G^*|$ da curva mestra a 10 Hz. Neste sentido, é percebida tal qual para o modelo Universal, há uma tendência de que quanto mais intensa for a compactação, menor será a diferença entre os dados convertidos e os valores calculados pela curva mestra, para ambos os modelos matemáticos analisados.

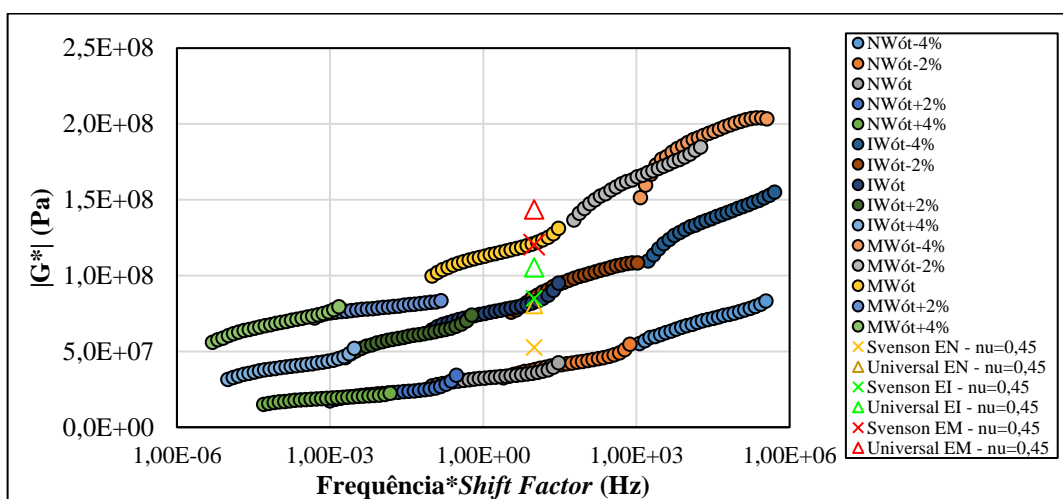
De acordo com a Figura 55, é perceptível a não existência de uma clara proporcionalidade no deslocamento das curvas. Enquanto o *shift factor* para MWót-4% fica estabelecido em $5,0 \times 10^{-3}$, para MWót-4%, o valor é de $1,2 \times 10^4$.

Figura 55 – *Shift factor* em função da variação de umidade EM



Finalmente, todos os arranjos de curvas mestras se mostraram pertinentes para avaliar o possível comportamento dos materiais perante a alteração do teor de umidade, com destaque às energias intermediária e modificada, com resultados de valores similares para o modelo de Svenson. Na Figura 56 são plotadas todas as curvas mestras em um mesmo gráfico, através das quais é possível observar o comportamento de rigidez dos materiais e quais seriam as tendências em cada uma das energias de compactação. Caso os espécimes sejam expostos a pontos mais extremos em relação à presença ou não de umidade, essas curvas também permitem prever o comportamento resiliente médio de um material em determinada frequência, e possivelmente em qualquer umidade.

Figura 56 – Curvas mestras nas diferentes energias de compactação



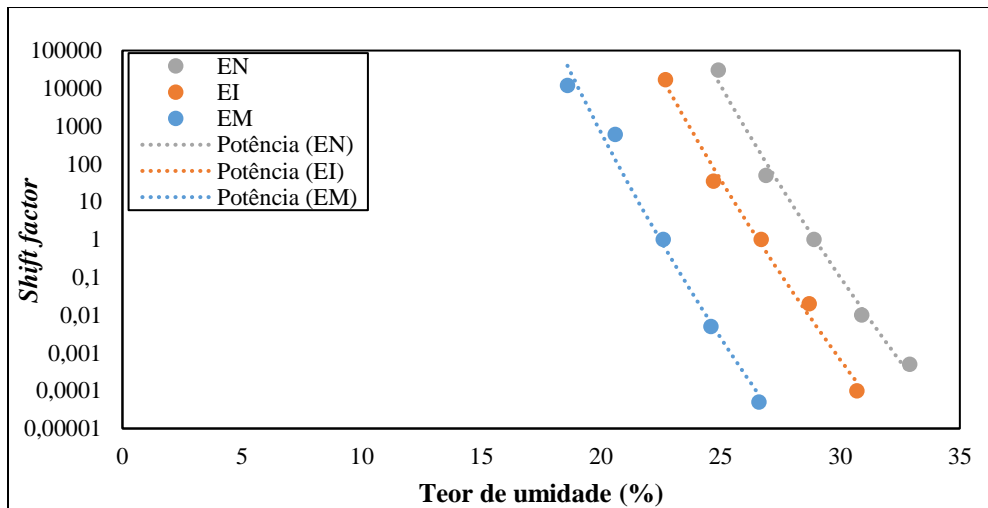
Fonte: Autor

Este gráfico permite analisar as curvas em uma mesma escala, tendo uma percepção geral das variações de comportamento nas diferentes energias de compactação. A partir dos valores de *shift factor* adotados para o translado de cada uma das curvas, em função da umidade, é composta a Figura 57. Através da inclinação das curvas de tendência é mostrado com clareza que as três curvas mestras propostas são igualmente susceptíveis em função da variação do teor de umidade.

Como já mencionado, o ensaio de módulo resiliente e o teste de varredura de frequência são distintos em diversos aspectos. O primeiro se trata de um ensaio que aplica tensões axiais nas amostras, enquanto o segundo submete o corpo de prova a tensões cisalhantes e, outra significativa distinção é o fato de o reômetro não submeter o corpo de prova a tensões confinantes como o que é feito pelo equipamento triaxial de cargas repetidas. Essas são

condições de contorno importantes de serem consideradas ao propor uma relação perfeita entre os dois ensaios.

Figura 57 – *Shift factor* em função da variação de umidade



Fonte: Autor

Além disso, os valores do coeficiente de Poisson são complexos de serem obtidos, e, por conta disso, geralmente suas verdadeiras grandezas são desconhecidas. Para a transição do MR para módulo cisalhante, a equação mostra-se altamente dependente do valor do coeficiente de Poisson. Assim, a melhor alternativa seria compreender o μ do solo em cada uma das condições, ao invés de assumir um valor habitualmente utilizado para solos de maneira empírica.

Por fim, outra condição de contorno percebida, é o fato de que as umidades ótimas foram definidas a partir de curvas de compactação construídas com o uso de partículas de solos passantes na peneira de 4,75 mm. Para as avaliações reológicas foram utilizadas partículas passantes na peneira de 2,00 mm para que o material se adequasse às pequenas dimensões dos moldes propostos, o que pode resultar em $W_{ót}$ distintas daquelas propostas em estudo.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Dentro da Mecânica dos Pavimentos, conhecer e entender o comportamento dos materiais terrosos quanto a rigidez e danificação é algo substancial para o bom dimensionamento das estruturas. Em vista disso, quanto maior o volume de materiais terrosos com dados catalogados para aplicação em pavimentação, maiores são também as opções de jazidas passíveis de utilização em obras de infraestrutura de transporte.

Os ensaios de reologia possibilitam compreender os comportamentos fundamentais do solo. Através de avaliações reológicas, nota-se grande potencial de relação com os ensaios mecânicos, isto é, possuem boas condições para avaliar previamente o comportamento dos materiais terrosos de forma expedita.

Todo o contexto de execução de ensaio reológicos ocorreu sem experiência prévia de aplicação em solos compactados. Posto isso, foram realizados inúmeros testes iniciais para se estabelecer um modelo ideal de moldagem e preparo do solo para uma coerente avaliação reológica. Dessa maneira, foram estipulados inicialmente duas geometrias para cada um dos ensaios reológicos, o dispositivo de placas paralelas e o dispositivo de torção de barras.

Com base no apresentado, são discorridas as principais considerações acerca do trabalho executado para cada um dos ensaios propostos. Finalmente apresentam-se sugestões para trabalhos que possam ser desenvolvidos posteriormente.

5.1 CONCLUSÕES

Em função dos testes de varredura de amplitude é possível concluir que:

- Devido a incapacidade de o equipamento aplicar torque suficiente para deformações cisalhantes elevadas às amostras ensaiadas em PP. Os CPs apresentaram elevado grau de compactação e baixa umidade quando comparados a solos com fins agrícolas, impossibilitando a continuidade dos experimentos nesta geometria. Em contrapartida, a geometria de BT se adequou perfeitamente às avaliações reológicas.
- Avaliando o comportamento de $|G^*|$ em função de ciclos, para as três energias equivalentes de compactação, em cada uma das umidades propostas ($W_{ót}-4\%$, $W_{ót}-2\%$, $W_{ót}$, $W_{ót}+2\%$ e $W_{ót}+4\%$), fica evidente que inicialmente, com o passar dos ciclos, o corpo de prova eleva a sua rigidez até um ponto máximo e, com o seguimento do teste, há um decréscimo e com o aparecimento de fissuras que caracterizam a ruptura frágil dos elementos.

- Diferente do que o proposto à mecânica dos solos agrícolas, materiais compactados não passam pelo fenômeno de ruptura plástica (quando G' se iguala a G'' , δ igual a 45°). Neste estudo, observou-se a ocorrência de ruptura frágil nos corpos de prova em δ menores que 7° .
- A partir do comportamento de G' em função da amplitude de deformação foi determinado o VEL. As curvas a 2% acima da umidade ótima apresentaram os maiores valores de Y_L . O menor valor de deformação comum a todas os espécimes foi de 0,0051%, para tanto, foi estabelecido um limite máximo padrão de Y igual a 0,005% para utilizar no FS.

Relacionado ao ensaio de varredura de frequência conclui-se que:

- O teste de FS foi executado sobre o VEL das amostras, através da análise de $|G^*|$ e δ em função da frequência, dispostos em suas diferentes umidades para um mesmo grau de compactação. Inicialmente, para todas as curvas na EN e EI, à exceção de NWót+4%, há uma elevação acentuada de $|G^*|$ com o aumento da frequência, enquanto δ decresce. A partir do momento em que as curvas de δ passam a ser crescentes, há uma tendência de aumentar as suas inclinações, com exceção das representativas de IWót-2% e MWót-4%.
- Experimentalmente é comprovado que o solo apresenta caráter viscoelástico mesmo quando submetido a baixos valores de Y , com variações de módulo da ordem de 40%, em variações de frequência que vão de 0,1 a 30 Hz.
- Para todas as condições, excluído MWót+2%, quanto maior for o teor de umidade, menor tenderá a ser o seu ganho de rigidez no decorrer do ensaio. O comportamento no final do ensaio dos espécimes IWót-2% apresentou um comportamento inconclusivo em relação aos aspectos analisados neste trabalho.
- Os maiores incrementos de rigidez se deram às amostras compactadas na EM, seguidas por EI. A exceção a esse comportamento também foi MWót+2%, pelo seu particular comportamento de δ , em que a variação máxima é a menor entre todas as amostras na EM.
- Existe susceptibilidade das amostras em função das variações da frequência de carregamento, da energia de compactação equivalente e do teor de umidade. Portanto esses são fatores importantes a serem ponderados ao se dimensionar estruturas de pavimentos.

A obtenção das curvas mestras possibilita inferir que:

- São obtidas as curvas isogrócopas, através do princípio de superposição frequência – umidade parcial, para os valores de $|G^*|$ trasladados no gráfico pela inserção de um *shift factor* para cada uma das umidades. Com um modelo matemático de potência que permite

inferir a existência de continuidade, com valores de R^2 superiores a 0,95. Este princípio, por ser parcial, não se aplica da mesma forma às curvas de ângulo de fase.

- Para frequência de 10 Hz e um coeficiente de Poisson igual a 0,45, plota-se os módulos cisalhantes (G_{MR}) convertidos dos valores de MR médios do modelo Universal e modelo de $k-\sigma_d$. Para todas as energias de compactação, o modelo universal foi o que mais se distanciou das curvas mestras. Ainda que esse tenha sido o modelo mais representativo para os dados de MR, foi o modelo $k-\sigma_d$ que apresentou maior semelhança, por não considerar a ação da tensão confinante atuando sobre o CP, tal qual ocorre para os ensaios de reologia.
- G_{MR} obtido pelo modelo de Svenson, apresentou relação pura com os valores estimados de $|G^*|$ para a frequência de 10 Hz na EI e EM, enquanto para a EN, houve uma diferença não maior que 50%. Isso demonstra o potencial que as curvas mestras têm em estimar o comportamento resiliente de solos argilosos laterítico, principalmente para altos níveis de compactação.
- Os valores de *shift factor* para cada energia de compactação foram plotados em função da umidade, demonstrando o quão susceptíveis foram as amostras à sua variação. A seleção de SF apresentaram excelentes valores de R^2 , nesses casos, acima de 0,99, o que mostra uma aplicação factível dos valores às curvas. Além disso, foi observado que, independentemente do grau de compactação, as amostras se mostraram igualmente susceptíveis à variação de umidade quando trasladados pelo *shift factor*.

Por fim, é importante salientar que, ao se tratar da comparação direta das metodologias de ensaio, além do distinto formato de aplicação dos esforços (onde, em um, há teste com esforços cisalhantes, e, em outro, esforços axiais), há limitações dadas pelo modo de execução desses dois ensaios. O ensaio de MR concerne um teste com a aplicação de tensões desvio e confinantes. Tal confinamento não é reproduzido nos ensaios de FS, o que pode traduzir as diferenças significativas na transformação do módulo axial para módulo cisalhante.

Uma possível solução para esse impasse seria a adoção do valor de módulo resiliente para um par de tensão com a menor ação de confinamento possível dentro do modelo Universal. Outro recurso pode ser a investigação de solos de diversas naturezas, os quais possibilitaria a adoção de um fator de correlação que proporcionará a adequação da equação 12.

Durante o processo observou-se também a incompatibilidade com as dimensões máximas dos grãos para cada um dos ensaios. Enquanto os dados para MR, como massa específica aparente máxima e umidade ótima, foram obtidos de ensaios com materiais passantes na peneira 4 (abertura de 4,75 mm), para teste de varredura de frequência os ensaios foram

executados com materiais passantes na peneira de número 10 (abertura de 2,0 mm). Isso pode resultar em valores de $W_{ót}$ diferentes para cada uma das situações. Portanto, uma aproximação mais coerente dos dados pode ser realizada, inferindo MEAS e $W_{ót}$ do ensaio de mini-Proctor da metodologia MCT, que conta com materiais também passantes na malha 10.

Finalmente, salienta-se que em termos de propriedades fundamentais dos materiais, houve diferenças significativas para cada condição proposta de ensaio. Em função da umidade ser acrescentada ao material logo antes da compactação, ao invés de sua saturação ou secagem após compactação, o índice de vazios dos espécimes se altera em relação a $W_{ót}$.

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Desta maneira, são feitas as seguintes sugestões para trabalhos futuros:

- Avaliar o comportamento resiliente em corpos de prova moldados nas diferentes umidades estudadas por este trabalho para os ensaios reológicos.
- Analisar uma gama maior de umidades para verificar o que ocorre com a rigidez em microescala em teores extremos de umidade.
- Ampliar o banco de dados reológicos de materiais terrosos através desse protocolo, principalmente estudando solos que possam identicamente ser testados em ambos os ensaios, a fim de propor fatores e consolidar correlações para a conversão de módulos axiais e módulos cisalhantes.
- Realizar estudos comparativos entre os ensaios mecânicos de danificação (deformação permanente) e reológicos de danificação (teste de varredura de amplitude).

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6457**: Amostras de solo – preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 2016a. 8 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6459**: Solo – determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 2016b. 5 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6508**: Grãos de solo que passam na peneira de 4,8 mm – Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2016c. 8 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7180**: Solo – Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 2016d. 3 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181**: Solo – Análise granulométrica. Rio de Janeiro, 2016e. 13 p.

BALBO, J. T. **Pavimentação asfáltica**: materiais, projetos e restauração. 1 ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2007. 558 p.

BANDIEIRA, M.; ZAT, T.; SCHUSTER, S. L.; JUSTE, L. H.; WEIDE, H.; RODRÍGUEZ, E. D. Water treatment sludge in the production of red-ceramic bricks: effects on the physico-mechanical properties. **Materials and Structures**. v. 54, n. 168, p. 1-16, 2021.

BARNES, H. A. **A handbook of elementary rheology**. Aberystwyth: University of Wales, Institute of Non-Newtonian Fluid Mechanics. 2000. 200 p.

BARROS, L. M.; LIMA, C. D. A.; NASCIMENTO, L. A. H. do; MOTTA, L. M. G. & ARAGÃO, F. T. S. Aspectos dos ensaios de deformação permanente e a perspectiva brasileira para utilização no dimensionamento de pavimentos asfálticos. In: **33º ANPET - Congresso de pesquisa e ensino de Transportes**, Balneário Camboriú, SC. 2019.

BAUMGARTEN, W.; NEUGEBAUER, T.; FUCHS, E.; HORN, R. Structural stability of marshland soils of the riparian zone of the tidal Elbe River. **Soil and Tillage Research**. V. 125. p. 80-88. 2012.

BAUMGARTEN, W.; DÖRNER, J.; HORN, R. Microstructural development in volcanic ash soils from South Chile. **Soil and Tillage Research**. v. 129. p. 48-60. 2013.

BAYOMY, F. M.; AL-SANAD, H. A. Deformation characteristics of subgrade soils in Kuwait. **Transportation Research Record**. v. 1406. p. 77-87. 2013.

BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G. da; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. **Pavimentação asfáltica**: formação básica para engenheiros. Rio de Janeiro: PETROBRAS: ABEDA. 2010. 504 p.

BETIOLI, A. M.; JOHN, V. M.; GLEIZE, P. J. P.; PILEGGI, R. G. Caracterização reológica de pasta cimentícia: associação de técnicas complementares. **Revista ambiente construído**. Porto Alegre, RS. v. 9, nº4. p. 37-48. 2009.

BIAREZ, J. **Contribution à l'étude des propriétés mécaniques des sais et des matériaux pulvérulents**. Faculté des Sciences, l'Université de Grenoble, Thèse de Doctorat. 1962.

BRADY, N. C.; WEIL, R. R. **The nature and properties of soils**. 14th ed. New Jersey: Prentice Hall, 2008. 975 p.

BRONICK, C. J.; LAL, R. **Soil structure and management**: a review. *Geoderma*. v. 124. p. 3-22. 2005.

CARVALHO, J. B. Q. de. **Fundamentos da mecânica dos solos**. 1. ed. Campina Grande, PB: Ed. Marconi. 1997., 310 p.

CZIBULYA, Z.; TOMBÁ CZ, E.; SZEGI, T.; MICHÉLI, E. ZSOLNAY, Á.. Standard state of soil dispersions for rheological measurements. **Applied Clay Science**. v. 48, n. 4, p. 594-601, 2010.

DALAL, R. C.; BRIDGE, B. J. Aggregation and organic matter storage in sub-humid and semi-arid soils. In: CARTER, M. R.; STEWART, B. A. (Eds.). **Structure and organic matter storage in agricultural soils**. Florida: CRC Press. p. 263-307. 1996.

DALLA ROZA, A. E. **Contribuição para projeto mecanístico-empírico de pavimentos asfálticos na região norte do estado do Mato Grosso**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2018. 178 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **Norma DNER – CLA 259/96**: Classificação de solos tropicais para finalidades rodoviárias utilizando corpos-de-prova compactados em equipamento miniatura. Rio de Janeiro, 1996. 6 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Norma DNIT 134/2018**: Pavimentação – Solos - Determinação do módulo de resiliência - Método de Ensaio. Rio de Janeiro, 2018a. 18 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Norma DNIT 179/2018**: Pavimentação – Solos - Determinação da deformação permanente - Instrução de Ensaio. Rio de Janeiro, 2018b. 20 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Glossário de termos técnicos rodoviários**. Rio de Janeiro, 2017. 322 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Manual de pavimentação**. 3. ed. Rio de Janeiro, 2006. 274 p.

DEXTER, A. R. **Advances in characterization of soil structure**. *Soil and Tillage Research*, v. 11, n. 3, p. 199-238, 1988.

FERRARIS, C.F. Measurement of the rheological properties of high-performance concrete: State of the art report. **Journal of Research National Institute Standards Technology**. v. 104. n° 5. 1999 18 p.

FRANCO, F. A. C. P. **Método de dimensionamento mecânico – empírico de pavimentos asfálticos – SisPav**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2007. 294 p

FRANCO, F. A. C. P.; MOTTA, L. M. G. **MeDiNa – Método de Dimensionamento Nacional. Manual de Utilização**. Versão 1.0.0. Rio de Janeiro, 2019.

GHEZZEHEI, T. A.; OR, D. **Rheological Properties of Wet Soils and Clays under Steady and Oscillatory Stresses**. Soil Science Society of America Journal. v. 65, n° 3. p. 624-637. 2001.

GUIMARÃES, A. C. R; MOTTA, L. M. G. da; MEDINA, J. de. Estudo de deformação permanente em solo típico de subleito de rodovia brasileira. In: **Anais da 33ª RAPv - Reunião Anual e Pavimentação**. Florianópolis, p. 336-354, 2001.

HASS, C.; HOLTHUSEN, D.; HORN, R. Biological alteration of flow properties of soils samples from two bt horizons of a haplic luvisol determined with rheometry. **Frontiers Environmental Science**. n° 6. v. 110. 2018.

HICKS, R.G. **Factors Influencing the Resilient Properties of Granular Materials**. Tese (Pós-doutorado), Universidade da Califórnia, Berkeley, EUA, 1970.

HILLEL, D. **Environmental soil physics: Fundamentals, applications, and environmental considerations**. San Diego: Academic Press, 1998. 771 p.

HILLEL, D. **Fundamentals of soil physics**. San Diego: Academic Press, 1980. 413 p.

HOLTHUSEN, D; BRANDT, A. A.; REICHERT, J. M.; HORN R. Soil porosity, permeability and static and dynamic strength parameters under native forest/grassland compared to no-tillage cropping. **Soil & Tillage Research**. v. 177. p. 113 -124. 2018a.

HOLTHUSEN, D.; BRANDT, A. A.; REICHERT, J. M.; HORN R.; FLEIGE, H.; ZINK A. Soil functions and in situ stress distribution in subtropical soils as affected by land use, vehicle type, tire inflation pressure and plant residue removal. **Soil & Tillage Research**. p. 184. v. 78-92. 2018b.

HOLTHUSEN, D.; JÄNICKE, M.; PETH, S; RAINER, H. Physical properties of a Luvisol for different long-term fertilization treatments. II. Microscale behavior and its relation to the mesoscale. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**. v. 175, n. 1, p. 14–23, 2012c.

HOLTHUSEN, D.; PÉRTILE, P.; REICHERT, J. M.; HORN R. Viscoelasticity and shear resistance at the microscale of naturally structured and homogenized subtropical soils under undefined and defined normal stress conditions. **Soil & Tillage Research**. v. 191. p. 282-293. 2019.

HOLTHUSEN, D.; PETH, S.; HORN, R. Impact of potassium concentration and matric potential on soil stability derived from rheological parameters. **Soil and Tillage Research**. v. 111, n. 1, p. 75-85, 2010.

HOLTHUSEN, D.; REEB, D.; HORN, R. Influence of potassium fertilization, water and salt stress, and their interference on rheological soil parameters in planted containers. **Soil and Tillage Research**. v. 125, p. 72-79, 2012.

HORN, R.; PETH, S. Mechanics of unsaturated soils for agricultural applications. In: Huang, P. M.; LI, Y.; SUMNER, M. E., editors. **Handbook of soil sciences**. 2 ed. Boca Raton: CRC Press. p.3. 1-30 2011.

HORN, R. **Stress–strain effects in structured unsaturated soils on coupled mechanical and hydraulic processes**. Geoderma, v. 116, n. 1, p. 77-88, 2003.

HU, W.; ROSTAMI, J. A new method to quantify rheology of conditioned soil for application in EPB TBM tunneling. **Tunneling and Underground Space Technology**. v. 96. 2020. 14 p.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Estimativas populacionais para os municípios e para as Unidades da Federação brasileira**. 2018. Disponível em: <https://ww2.ibge.gov.br/home/estatistica/popilacao/estimativa2016/estimativa_dou.shtm>. Acesso em: 25 mai. 2019.

JOUQUET, P., ZANGERLE, A., RUMPEL, C; BRUNET, D., BOTTINELLI, N.; TRANDUC, T. Relevance and limitations of biogenic and physicogenic classification: a comparison of approaches for differentiating the origin of soil aggregates. **European Journal of Soil Science**. v. 60. P. 1117-1125. 2009.

KEMPER, W. D.; ROSENAU, R. C. Aggregate stability and size distribution. In: KLUTE, A. (Ed.). **Methods of soil analysis: Part 1 - Physical and mineralogical methods**. 2nd ed. Madison: American Society of Agronomy, 1986. p. 425-442.

KERN, C. **Análise de desempenho de pavimentos da rede temática de asfalto no Rio Grande do Sul – A avaliação de um pavimento submetido à oscilação do lençol freático**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017. 167 p.

LEMOS, R. C. **Levantamento de reconhecimento dos solos do Rio Grande do Sul**. Departamento Nacional de Pesquisa Agropecuária. Divisão de Pesquisa Pedológica, EMBRAPA, Boletim Técnico nº 30. Recife, PE. 1973.

LIMA, C. D. A.; MOTTA, L. M. G. da; GUIMARÃES, A. C. R.; ARAGÃO, F. T. S. Contribution to the study of brazilian tropical soils as pavement materials. In: **13º Conference on asphalt pavements – ISAP**. Fortaleza, Ceará, 2018.

LIMA, C. D. A. de.; MOTTA, L. M. G. da.; ARAGÃO, F. T. S. Effects of compaction moisture content on perma deformation of soils subjected to repeated triaxial load. In: **98º Annual Meeting of the Transportation Research Board (TRB)**. Washington, D.C, EUA, 2019.

LOSS, A.; PEREIRA, M.; COSTA, E.; BEUTLER, S. Soil fertility, physical and chemical organic matter fractions, natural ^{13}C and ^{15}N abundance in biogenic and physiocogenic aggregates in areas under different land-use systems. **Soil Research**. v.52. p. 685-697. 2014.

LOSS, A.; LOURENZI, C. R.; MERGEN JUNIOR, C. A., SANTOS JUNIOR, E.; BENEDET, L.; PEREIRA, M.; PICCOLO, M. C.; BRUNETTO, G.; LOVATO, P.; COMIN, J. Carbon, nitrogen and natural abundance of ^{13}C and ^{15}N in biogenic and physiocogenic aggregates in a soil with 10 years of pig manure application. **Soil & Tillage Research**. V.166. p. 52-58. 2017.

MACÊDO, J. A. G. **Interpretação de Ensaios Deflectométricos para Avaliação Estrutural de Pavimentos Flexíveis**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). COPPE/ UFRJ, Rio de Janeiro. 1996.

MACIAS, J.; AMARAL, C; VARGAS Jr., E. Retroanálise do comportamento mecânico das corridas de massa de 1996 no Rio de Janeiro: determinação da velocidade de deslocamento e da viscosidade dos materiais envolvidos. In: **2º Pan-American symposium on landslide / 2ª Conferência brasileira sobre estabilidade de taludes**. Rio de Janeiro, RJ. v. 1. p. 243-251. 1997.

MARKGRAF, W. WATTS, C. W.; WHALLEY, W. R.; HRKAC, T.; HORN, R. Influence of organic matter on rheological properties of soil. **Applied Clay Science**. v. 64, p. 25-33. 2011.

MARKGRAF, W.; HORN, R. Rheological investigations in soil micro mechanics: Measuring stiffness degradation and structural stability on a particle scale. In: GRAGG, L. P.; CASSELL, J. M. **Progress in management engineering**. New York: Nova Science Publishers. p. 237-279. 2009.

MARKGRAF, W.; HORN, R., PETH, S. An approach to rheometry in soil mechanics-structural changes in bentonite, clayey and silty soils. **Soil Till Research**. v. 91 p.1-14. 2006.

MEDINA, J. de; MOTTA, L. M. G. da. **Mecânica dos pavimentos**. Rio de Janeiro: UFRJ. Editora Interciência. 3ª ed. 2015. 638 p.

MEDINA, J.; MOTTA, L. M. G.; SANTOS, J. D. G. dos. Deformability characteristics of Brazilian laterites. **Geotechnical and Geological Engineering**. p. 949-971. 2006.

MEDINA, J.; PREUSSLER, E. S. **Características resilientes de solos em estudos de pavimentos**. Solos e Rochas. Rio de Janeiro. v. 3. n.1. p. 3-26. 1980.

MELLO, L. B. de; CHIARELLO, G. P.; PASCOAL, P. T.; BARONI, M.; SPECHT, L. P. Solo-brita em bases de pavimentos flexíveis: avaliação quanto à fadiga utilizando o MeDiNa. **Anuário do instituto de Geociência**. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ. 2021 17 p.

MELO, D. F. M. de. **Comportamento reológico de solos sujeitos a corridas de lama por liquefação estática**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP. 2014. 277 p.

MELO, D. F. M de; ROMANO, R. C. O.; PILEGGI, R. G.; JOHN, V. M.; FUTAI, M. M. Caracterização reológica de encosta em Vila Albertina- São Paulo. In: **Congresso brasileiro de mecânica dos solos**. Recife, PE. 2012.

MESCHYAN, S. R. **Experimental rheology of clayey soils**. 1 ed. CRC Press. Geotechnika 13. 1995. 460 p.

MEZGER, T. G. **The rheology handbook: for users of rotational and oscillatory rheometers**. 2nd ed. Hannover: Vincentz Network GmbH & Co KG, 2006. 303 p.

MEZGER, T.G. **The rheology handbook**. 4th ed. Hannover: Vincentz Network GmbH & Co KG, 2014. 432 p.

MEZGER, T. G. **Reologia aplicada**. 1st ed. Graz: Anton Paar GmbH, 2018. 196 p.

MITCHELL, J. K.; SOGA, K. **Fundamentals of soil behavior**. 3^a ed. New Jersey: John Willey & Sons. 2005. 560 p.

MITSOULIS, E. **Flows of viscoplastic materials: Models and computations**. Rheology Reviews. P.135–178. 2007.

OLIVEIRA, I. R.; STUDART, A. R.; PILEGGI, R. G.; PANDOLFELLI, V. C. **Dispersão e empacotamento de partículas – Princípios e aplicações em processamento cerâmico**. Fazendo arte editorial. São Paulo. 2000. 224p.

PAPANASTASIOU, T.C., 1987. Flows of Materials with Yield. **Journal of Rheology**. v. 31. P. 385–404. 1987.

PASCOAL, P. T. **Estudo da influência da compactação no comportamento resiliente e deformação permanente de solo laterítico do Rio Grande do Sul**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS. 2020. 184 p.

PERAÇA, V. **Qualificando solos para revestimentos primários de rodovias: uma abordagem baseada nas mecânicas dos solos e dos pavimentos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2007. 170 p.

PÉRTILE, P. **Propriedades mecânicas em micro e mesoescala de solos do Rio Grande do Sul**. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS. 2015. 166 p.

PÉRTILE, P.; HOLTHUSEN, D.; GUBIANI, P. I.; REICHERT, J. M. Microstructural strength of four subtropical soils evaluated by rheometry: properties, difficulties and opportunities. **Scientia Agricola**. v. 75. n. 2. p. 154-162. 2018.

PÉRTILE, P.; REICHERT, J. M.; GUBIANI, P. I.; HOLTHUSEN, D.; COSTA, A. da. Rheological parameters as affected by water tension in subtropical soils. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v. 40. p. 1-14. 2016.

PETROBRAS, et al. **Rede temática de asfalto**. Manual de execução de trechos monitorados. [S.l.]: 2010.

PEZO, R. F.; CLAROS, G.; HUDSON, W. R.; STOKOE II, K. H. Development of reliable resilient modulus test for subgrade and non-granular subbase materials for use in routine pavement design. **Research Report** 1177, 1992.

PINTO, Carlos de Sousa. **Curso Básico de Mecânica dos Solos em 16 Aulas**. 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2006. 367 p.

PREUSSLER, E. S. **Ensaio triaxiais dinâmicos de um solo arenoso**. 1978. 141 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 1978.

PREUSSLER, E. S.; PINTO, S. Proposição de método para projeto de reforço de pavimentos flexíveis, considerando a resiliência. In: **Anais da 17ª RAPv – Reunião Anual de Pavimentação**, Brasília, 1983.

RANALLI, G. **Rheology of the Earth**. Chapman & Hall. 2 ed. 1995. 436 p.

RAZOUKI, S. S.; IBRAHIM, A. N. Improving the resilient modulus of a gypsum sand roadbed soil by increased compactation. **International Journal of Pavement Engineering**, p. 432-438. 2017.

REICHERT, J. M.; REINERT, D. J.; SUZUKI, L. E. A. S.; HORN, R. Mecânica do solo. In: VAN LIER, Q. J. **Física do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. p. 30-102. 2010.

REICHERT, J. M., ALBUQUERQUE, J. A., SOLANO PERAZA, J. E., da COSTA, A. Estimating water retention and availability in cultivated soils of Southern Brazil. **Geoderva Regional**, V. 21, p. 1-12, 2020

RIBEIRO, Madalena Maria Pereira. **Contribuição ao estudo da deformação permanente dos solos de subleito**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 2013. 121 p.

ROLDÃO, L. N.; FERREIRA, R. T. L. Avaliação da capacidade de suporte de um solo da região do vale do Araguaia com adição de material fresado e cimento. In: **V Simpósio de prática de engenharia geotécnica na região Centro-Oeste – GEOCENTRO**. Brasília, DF. 2019. 8 p.

SAMANIUK, J.R.; SCOTT, C. T.; ROOT, T. W.; KLINGENBERG, D. J. Rheological modification of corn stover biomass at high solids concentrations. **Journal of Rheology**. V. 56, p. 1-17, 2012.

SAMANIUK, J. R.; SHAY, T. W.; ROOT, T. W.; KLINGENBERG, D. J.; SCOTT, C. T. A novel rheometer design for yield stress fluids. **American Institute of Chemical Engineers Journal**. p. 1523–1528. 2014.

SANTOS, T. A. dos. **Avaliação da resistência e da deformabilidade de quatro solos empregados em subleitos rodoviários no estado do Rio Grande do Sul.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS. 2016. 164 p.

SANTOS, T. A. dos. **A influência da sucção na deformabilidade de subleitos rodoviários: efeitos da variação de umidade, método de compactação e gênese dos solos.** Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS. 2020.

SANTOS, T. A. dos.; SPECHT, L. P.; PINHEIRO, R. J. B.; CERATTI, J. A. P.; BRITO, L. A. T. Avaliação da resistência e da deformação resiliente de quatro solos de subleitos rodoviários no estado do Rio Grande do Sul. **Revista Transportes.** p. 48-54, 2019.

SANTOS, T. C.; BARROSO, S. H. A. Uso de técnicas de reometria para avaliar a rigidez de solos finos estabilizados quimicamente na pavimentação. In: **Anais do 33º ANPET - Congresso de pesquisa e ensino de transportes.** Congresso digital. p. 1620-1623. 2020.

SCHRAMM, G. **Reologia e reometria: fundamentos teóricos e práticos.** Tradução e adaptação: Mothé, C. G. et al. São Paulo: Artliber Editora Ltda., 2006. 237 p.

SHINOHARA, K.; TUZUN, U. Solids flow mechanisms and their applications. **Chemical Engineering Science.** v. 57, 213-214. 2002.

SILVA, J. M.; LUZ, J. A. M. Aspectos reológicos do escoamento de sistemas granulares. In: **Encontro nacional de tratamento de minérios e metalurgia extrativa.** p. 243-250. 2004.

SIX, J.; BOSSUYT, H.; DEGRYZE S.; DENEFF, K. A history of research on the link between (micro)aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. **Soil and Tillage Research.** v. 79. n. 1. p. 7-31. 2004.

SOARES, J. B.; MORENO, A. M.; MOTTA, L. M. G. da. 2009. Aspectos gerais de métodos de dimensionamento de pavimentos asfálticos de vários países e a relação com um novo método brasileiro. **Revista Pavimentação.** ABPV, (4)1: 20-35.

STEFFE, J. F. Rheological methods in food process engineering. 2ª ed. **East lansing:** Freeman press. 1996. 418 p.

SVENSON, M. **Ensaio triaxiais dinâmicos de solos argilosos.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 1980.

TAKEDA, M. C. **A influência da variação da umidade pós-compactação no comportamento mecânico de solos de rodovias do interior paulista.** Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola de Engenharia de São Carlos, São Paulo, SP. 2006.

UZAN, J. Characterization of granular material. **Transportation Research Board,** p; 52-59, 1985.

VARGAS, M. **Introdução à mecânica dos solos**. São Paulo: Ed. da Universidade de São Paulo, 1977. 509 p.

VIPULANANDAN, C., MOHAMMED, A.S. Hyperbolic rheological model with tensão cisalhante limit for acrylamide polymer modified bentonite drilling muds. **Journal of Petroleum Science and Engineering**. V. 122, p. 38–47. 2014.

WRIGHT, A.J., SCANLON, M.G., HARTEL, R.W., MARANGONI, A.G. Rheological properties of milkfat and butter concise reviews in food science. **Journal of Food Science**. v. 66, p. 1056–1071. 2001.

ZAGO, J. P. **Estudo da deformação permanente de três solos típicos de subleito rodoviários de Santa Maria – RS**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2016. 225 p.

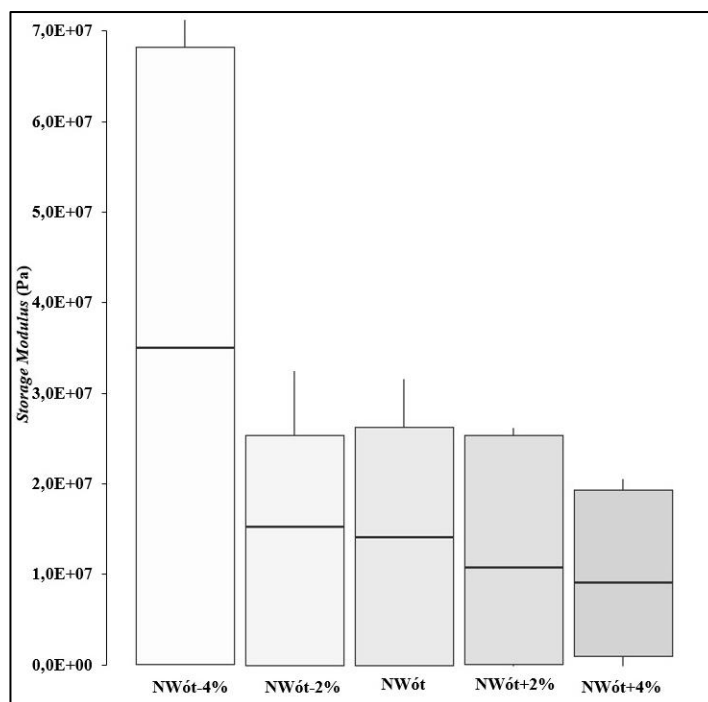
ZAT, T.; BANDIEIRA, M.; SATTLER, N.; SEGADÃES, A. M.; CRUZ, R. C. D.; MOHAMAD, G.; RODRÍGUEZ, E. D. Potential re-use of sewage sludge as a raw material in the production of eco-friendly bricks. **Journal of Environmental Management**. v. 297, n. 113238, p. 1-12, 2021.

ZHU, G.; ZHU, L.; YU, C. Rheological properties of soil: a review. In: **International Symposium on Resource Exploration and Environmental Science**. IOP conference series: Earth and environmental science. v. 64. 2017. 7 p.

ZUCCHI, F. L.; PASCOAL, P. T.; SANTOS, T. A; MENDES, T. C; BARONI, M.; PINHEIRO, R. J. B. Análise comparativa entre as metodologias de compactação da ABNT (2016) e REDE (2010) para solo argiloso e arenoso do estado do Rio Grande do Sul. In: **Anais do 33º ANPET - Congresso de pesquisa e ensino de transportes**. Balneário Camboriú, SC. p. 1970-1980. 2019.

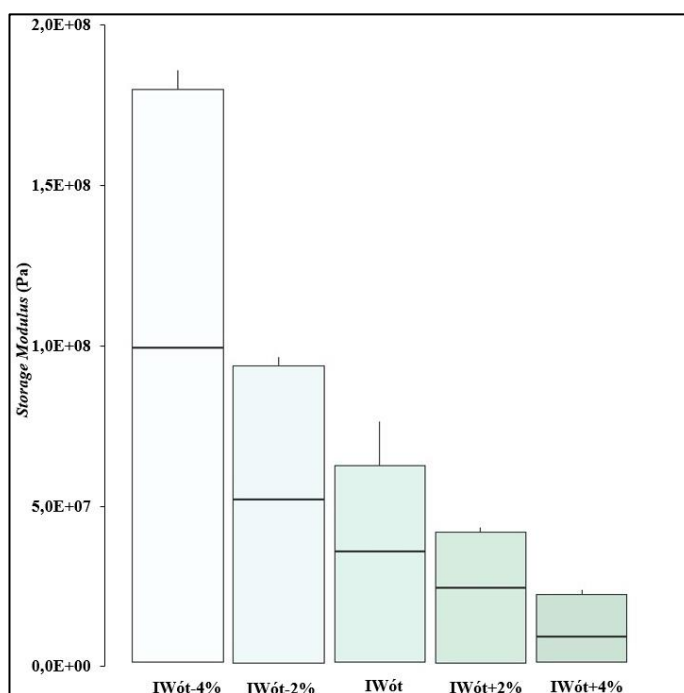
APÊNDICE A – ANÁLISE ESTATÍSTICA ENSAIO DE VARREDURA DE AMPLITUDE

Figura 1 – Medianas de G' à energia normal

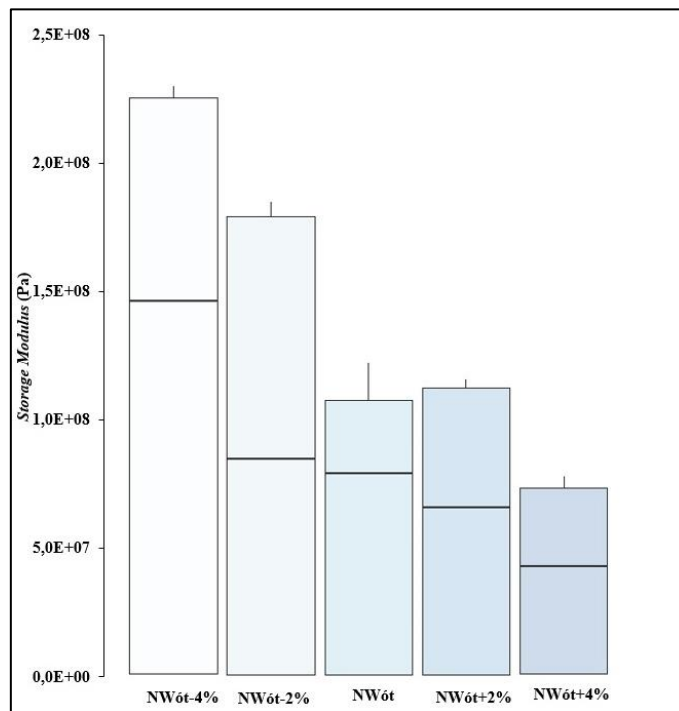


Fonte: Autor

Figura 2 – Medianas de G' à energia intermediária



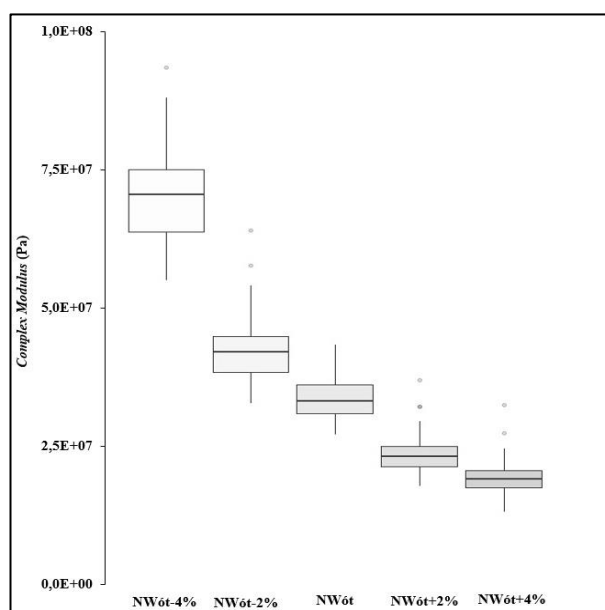
Fonte: Autor

Figura 3 – Medianas de G' à energia modificada

Fonte: Autor

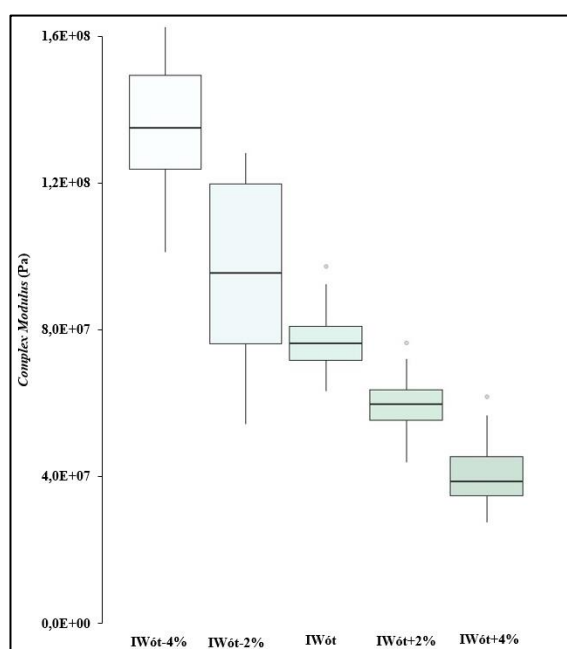
APÊNDICE B – ANÁLISES ESTATÍSTICAS DO *TESTE DE VARREDURA DE FREQUÊNCIA*

Figura 1 – Mediana, primeiro e terceiro quartil de módulo de armazenamento x deformação cisalhante – FS na energia normal



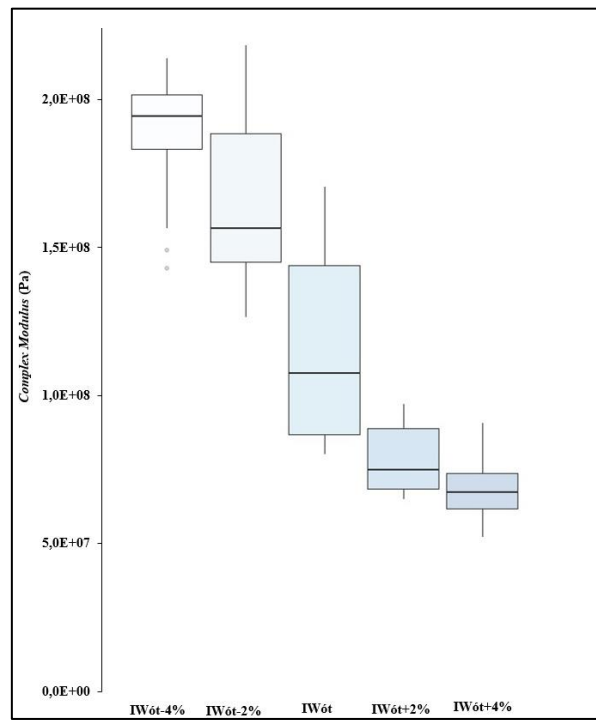
Fonte: Autor

Figura 2 – Mediana, primeiro e terceiro quartil de módulo de armazenamento x deformação cisalhante - FS na energia intermediária



Fonte: Autor

Figura 3 – Mediana, primeiro e terceiro quartil de módulo de armazenamento x deformação cisalhante - FS na energia modificada



Fonte: Autor