

Universidade Federal do Rio Grande do Sul  
Escola de Engenharia  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura

**EFEITO DA VARIAÇÃO DE UMIDADE E SUCCÃO NO  
COMPORTAMENTO MECÂNICO E EM SIMULAÇÕES DE  
DESEMPENHO DE DOIS SOLOS UTILIZADOS EM  
PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS**

**Camila Kern**

Porto Alegre  
2022

CAMILA KERN

**EFEITO DA VARIAÇÃO DE UMIDADE E SUCCÃO NO  
COMPORTAMENTO MECÂNICO E EM SIMULAÇÕES DE  
DESEMPENHO DE DOIS SOLOS UTILIZADOS EM  
PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS**

Tese de doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura – PPGCI da  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, como parte  
dos requisitos para obtenção do título de Doutora em Engenharia

Porto Alegre  
2022

CAMILA KERN

**EFEITO DA VARIAÇÃO DE UMIDADE E SUCCÃO NO  
COMPORTAMENTO MECÂNICO E EM SIMULAÇÕES DE  
DESEMPENHO DE DOIS SOLOS UTILIZADOS EM  
PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS**

Esta tese de doutorado foi julgada adequada para a obtenção do título de doutora em Engenharia, Construção e Infraestrutura, e foi aprovada em sua forma final pelo professor orientador e pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, 12 de dezembro de 2022

Prof. Washington Peres Núñez  
Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil  
Orientador

Prof. Ângela de Moura Ferreira Danilevicz  
Coordenadora do PPGCI/UFRGS

**BANCA EXAMINADORA**

Prof.<sup>a</sup> Laura Maria Goretti da Motta (UFRJ)  
Dr.<sup>a</sup> pela Universidade Federal do Rio de Janeiro

Prof. Cezar Augusto Burkert Bastos (FURG)  
Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof.<sup>a</sup> Wai Ying Yuk Gehling (UFRGS)  
Dra. pela Universitat Politècnica de Catalunya

Prof. Jorge Augusto Pereira Ceratti (UFRGS)  
Dr. pela Universidade Federal do Rio de Janeiro

## RESUMO

KERN, C. Efeito da variação de umidade e sucção no comportamento mecânico e em simulações de desempenho de dois solos utilizados em pavimentos rodoviários. 2022. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura, UFRGS, Porto Alegre.

Para que um pavimento consiga desempenhar sua função corretamente, o seu dimensionamento deve ser eficaz e considerar todos os fatores que afetam o seu desempenho. Entre os principais fatores destacam-se mudanças climáticas e ambientais às quais o pavimento ficará exposto, sendo a variação de umidade um aspecto que merece atenção, pois pode afetar a resistência e a deformabilidade dos materiais. Assim, torna-se importante avaliar o comportamento de solos utilizados em pavimentos na sua condição não saturada. Neste contexto, o objetivo principal da tese foi avaliar o efeito da variação de umidade no comportamento de dois solos utilizados em sub-bases e reforços de subleito de pavimentos, com ênfase na influência da sucção nas respostas elásticas e plásticas, a partir de ensaios laboratoriais e análises de desempenho. Para isso desenvolveu-se um amplo programa experimental dividindo a pesquisa em duas etapas: análise laboratorial e previsão de desempenho. Em laboratório, foram realizados ensaios de caracterização dos solos, ensaios químicos e mineralógicos, além da obtenção de curvas características e ensaios de módulo de resiliência (MR) e deformação permanente (DP), adotando as energias de compactação normal e intermediária. Foram adotadas as variações de umidade de compactação de +1% e -2% em relação ao teor ótimo, para os ensaios de MR e DP. Adicionalmente, foram realizados ensaios de DP, na energia Intermediária, com variação de umidade na pós-compactação, simulando ciclos de umedecimento e secagem. Para a previsão de desempenho utilizaram-se os *softwares* MeDiNa e AASHTOWare considerando a variação de umidade em camadas de sub-base e reforço de subleito de pavimentos. De modo geral, o aumento da energia de compactação resultou em aumento na resistência à deformação, tanto nos ensaios de MR como de DP, independente da variação de umidade. Através das curvas características e de suas respectivas histereses foi possível correlacionar a sucção com os parâmetros avaliados, compreendendo que é possível obter sucções diferentes para um mesmo teor de umidade, a depender das características do próprio material. Quanto maior for a sucção matricial, maior é o MR e maior é a sua resistência a deformações plásticas, fato observado para os dois solos. Foram propostos modelos de previsão de MR e DP que consideram além da sucção, a variação de umidade, tanto no ramo úmido, como no ramo seco, em relação à umidade de compactação. Com relação à previsão de desempenho de pavimentos, foi prevista uma redução com as oscilações de umidade, mais evidente nas análises relacionadas aos ciclos de umedecimento e secagem e ao excesso de umidade nos solos. Associado a isso, há influência direta na redução de serventia do pavimento com o aumento do volume de tráfego e da carga por eixo. De fato, as variações de umidade na compactação e na pós-compactação demonstraram que podem reduzir significativamente a capacidade estrutural desses, considerando estes solos e as condições impostas. Entende-se que a presente tese contribui para um melhor entendimento do comportamento de solos utilizados em pavimentos e suscita o aprofundamento da discussão sobre o efeito da variação de umidade e sucção no desempenho dos mesmos quando empregados em pavimentos.

**Palavras-chave:** *solos não saturados; sucção; comportamento mecânico; modelos de previsão; análise de desempenho.*

## ABSTRACT

KERN, C. Effect of humidity and suction variation on mechanical behavior and on performance simulations of two soils used in road pavements. 2022. Thesis (Doctor in Engineering) – Graduate Program in Civil Engineering: Construction and Infrastructure, UFRGS, Porto Alegre.

For a pavement to be able to perform its function correctly, its design must be effective and consider all the factors that affect its performance. Among the main factors, climatic and environmental changes to which the pavement will be exposed stand out, with the variation in humidity being an aspect that deserves attention, as it can affect the strength and deformability of the materials. Thus, it becomes important to evaluate the behavior of soils used in pavements in their unsaturated condition. In this context, the main objective of the thesis was to evaluate the effect of moisture variation on the behavior of two soils used in sub-bases and subgrade reinforcements of pavements, with emphasis on the influence of suction on elastic and plastic responses, based on laboratory tests and performance analysis. For this, a broad experimental program was developed, dividing the research into two stages: laboratory analysis and performance prediction. In the laboratory, soil characterization tests, chemical and mineralogical tests were carried out, in addition to obtaining characteristic curves and resilience modulus (MR) and permanent deformation (DP) tests, adopting normal and intermediate compaction energies. Compaction moisture variations of +1% and -2% in relation to the optimum content were adopted for the MR and DP tests. Additionally, DP tests were carried out, at Intermediate energy, with post-compaction moisture variation, simulating wetting and drying cycles. For the performance prediction, the MeDiNa and AASHTOWare softwares were used, considering the variation of humidity in sub-base layers and pavement sub-grade reinforcement. In general, the increase in compaction energy resulted in an increase in resistance to deformation, both in MR and DP tests, independent of moisture variation. Through the characteristic curves and their respective hysteresis, it was possible to correlate the suction with the evaluated parameters, understanding that it is possible to obtain different suctions for the same moisture content, depending on the characteristics of the material itself. The greater the matricial suction, the greater the MR and the greater its resistance to plastic deformations, a fact observed for both soils. MR and DP prediction models were proposed that consider, in addition to suction, the variation in moisture, both in the wet branch and in the dry branch, in relation to compaction moisture. Regarding the prediction of pavement performance, a reduction was predicted with oscillations in humidity, more evident in the analyzes related to wetting and drying cycles and excess moisture in the soils. Associated with this, there is a direct influence on the reduction of pavement usefulness with the increase in traffic volume and axle load. In fact, moisture variations in compaction and post-compaction demonstrated that they can significantly reduce their structural capacity, considering these soils and the imposed conditions. It is understood that this thesis contributes to a better understanding of the behavior of soils used in pavements and raises the deepening of the discussion on the effect of variation in humidity and suction on their performance when used in pavements

**Keywords:** *unsaturated soils; suction; mechanical behavior; prediction models; performance analysis.*

A minha família.

Sem vocês nada disso seria possível.

## AGRADECIMENTOS

A maioria das pesquisas acadêmicas não são feitas por uma única pessoa, pois de alguma forma, todas elas possuem alguma contribuição externa. Muitas pessoas me auxiliaram nesta jornada, sendo grande parte delas, mencionadas nesta seção.

Agradeço ao professor e orientador Washington Peres Núñez, que esteve comigo durante os últimos sete anos, pelo acolhimento e incentivo na área acadêmica. Seus ensinamentos foram essenciais e me inspiram diariamente a ser uma pesquisadora/professora mais humana e justa. Obrigada pelos conselhos e momentos descontraídos que tornaram esta etapa mais leve e feliz.

A professora Wai Ying Yuk Gehling, minha incentivadora diária pelo trabalho com solos não saturados. Obrigada por me mostrar esta área rica e pouco desbravada da Mecânica dos Solos, como também acreditar no meu trabalho, até em momentos que eu mesma não acreditava.

Agradeço ao Prof. Luiz Antônio Bressani, e a prof. Wai Ying Yuk Gehling, por possibilitarem a utilização do espaço do Laboratório de Geotecnologia (LAGEOTEC), assim como agradeço ao técnico Jair Francisco Floriano da Silva pela ajuda com os ensaios e pelos momentos descontraídos no laboratório. Da mesma maneira agradeço aos professores Jorge Augusto Pereira Ceratti e Lélío Antônio Brito, que nunca mediram esforços para que eu conseguisse desenvolver minhas atividades no Laboratório de Pavimentação (LAPAV) e sempre se mostraram solícitos. Obrigada também pela oportunidade de trabalhar novamente no Programa de Treinamento em Engenharia Rodoviária (PETER), programa que sempre terá meu coração.

Ao longo destes anos, tive a ajuda de inúmeras pessoas, mas além do auxílio na pesquisa, algumas contribuíram para que esta jornada fosse mais leve, onde construímos também laços de amizade. Obrigada as amigas Deise Favero, Helena Strieder e Thaís Kleinert por todo apoio e por tornarem este período mais divertido. Sempre estaremos juntas. Da mesma forma agradeço aos amigos Bruna Diniz, Gabriel Schreinert, Lucas Malabarba, Matheus Matuella e William Fedrigo pelas risadas, cervejas e momentos de descontração. Sempre lembrarei dos dias de LAGEO lotado: de pessoas, de histórias, de amizade.

Agradeço também aos demais amigos do LAGEO e LAPAV que de alguma forma auxiliaram nos ensaios desta pesquisa: Ana Luíza Zottis, Ana Paula Zappe, Betânia Machado, Carine Molz,

Celso Romeiro, Daniel Fernandes, Daniel Martell, Everaldo Ritter, Felipe Pivetta, Gabriel Darci, Gracieli Colpo, Henrique Grimm, Larissa Guerra, Livia Oliveira, Lucas Heller, Luiza Godoi, Maria Bernadette Corrêa, Marlova Johnston, Mateus Freitas, Matheus Rodrigues, Natália Mensch, Rodrigo dos Santos e Sophia Hoppe. Em especial agradeço a Débora Cardoso, Eduarda Fontoura e Douglas Engelke (*in memoriam*), bolsistas que levo no coração como grandes amigos.

Agradeço aos professores Cezar Bastos, Jorge Augusto Pereira Ceratti, Laura Maria Goretti da Motta e Wai Ying Yuk Gehling por prontamente aceitarem participar das bancas de qualificação e defesa de tese. Muito obrigada pela disponibilidade e pelas contribuições que resultaram no aprimoramento deste trabalho.

Agradeço aos professores, funcionários e colegas do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura (PPGCI). À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e a PETROBRAS pelo auxílio financeiro concedido em diferentes momentos do período de doutoramento.

Agradeço ao meu pai Jeferson, eterno incentivador para que eu não abandonasse meus sonhos. Se me tornei engenheira foi porque passei boa parte da minha infância inventando brinquedos e mexendo em ferramentas dentro da sua oficina. À minha querida mãe Valmi, exemplo de mulher forte, determinada, que muitas vezes colocou os meus sonhos a frente dos seus. Obrigada por me incentivar a ser livre, a lutar pelos meus objetivos e pelo que é correto. Não menos importante, agradeço a minha irmã Carolina, minha primeira professora e amiga. Obrigada por todo apoio, conselhos e incentivo constante para que eu finalizasse esta etapa. Se eu cheguei até aqui foi porque minha família sempre colocou a educação em primeiro lugar e me fez ver que este caminho me levaria longe.

Ao meu noivo Carlos Eduardo Vendramin, amor da minha vida, meu companheiro há 14 anos e que eu espero que seja por muitos e muitos anos. Obrigada por todo carinho, colo e conforto, especialmente neste período de doutorado. Você mais do que ninguém esteve ao meu lado em todos os momentos difíceis e mesmo assim nunca largou a minha mão: obrigada por sonhar comigo.

Agradeço a todos os amigos e familiares que de alguma maneira estiveram presentes nesta caminhada. Foram cinco anos difíceis, com muitos percalços em razão de uma pandemia, mas que foram superados porque tive o apoio e a compreensão de todos vocês.

O importante é não parar de questionar.

A curiosidade tem sua própria razão de existir.

*Albert Einstein*

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>21</b>
1.1	<i>PROBLEMA DE PESQUISA E JUSTIFICATIVA.....</i>	<i>21</i>
1.2	<i>OBJETIVOS.....</i>	<i>23</i>
1.2.1	Objetivo geral .....	23
1.2.2	Objetivos específicos .....	23
1.3	<i>ESTRUTURA DA TESE.....</i>	<i>24</i>
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>26</b>
2.1	<i>SOLOS NÃO SATURADOS.....</i>	<i>26</i>
2.1.1	Origem e estrutura de solos não saturados .....	27
2.2	<i>SUCÇÃO.....</i>	<i>28</i>
2.2.1	Sucção Mátrica .....	29
2.2.2	Sucção Osmótica .....	30
2.2.3	Estágios de saturação.....	31
2.3	<i>CURVA CARACTERÍSTICA .....</i>	<i>32</i>
2.3.1	Curva característica unimodal .....	33
2.3.2	Curva característica bimodal .....	34
2.3.3	Fatores que influenciam a Curva Característica .....	37
2.3.4	Equações de ajuste para representar a Curva Característica.....	40
2.3.5	Métodos para a obtenção da Curva Característica.....	45
2.3.5.1	Método do Papel Filtro .....	45
2.4	<i>SOLOS NÃO SATURADOS EM PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS.....</i>	<i>46</i>
2.4.1	Comportamento resiliente.....	49
2.4.1.1	Influência da variação de umidade e sucção no MR .....	50
2.4.1.2	Modelos de previsão de MR considerando a influência da água e sucção...55	
2.4.2	Comportamento plástico.....	56
2.4.2.1	Influência da variação de umidade e sucção na DP.....	59
2.4.2.2	Modelos de previsão de DP considerando a influência da água e sucção ....	62
<b>3</b>	<b>PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS .....</b>	<b>64</b>

3.1	<i>PROCEDÊNCIA DOS SOLOS</i> .....	67
3.1.1	Argissolo.....	69
3.1.2	Solo Residual de Arenito Botucatu .....	70
3.2	<i>ENSAIOS DE LABORATÓRIO</i> .....	71
3.2.1	Caracterização dos solos.....	71
3.2.2	Compactação .....	73
3.2.3	Determinação da Curva Característica .....	74
3.2.3.1	Método do Papel Filtro .....	74
3.2.4	Ensaio Mecânicos .....	79
3.2.4.1	Preparação e moldagem dos corpos de prova.....	80
3.2.4.2	Determinação do Módulo de Resiliência .....	84
3.2.4.3	Determinação da Deformação Permanente .....	85
3.3	<i>ANÁLISES DE DESEMPENHO</i> .....	88
<b>4</b>	<b><i>APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS</i></b> .....	<b>91</b>
4.1	<i>CARACTERIZAÇÃO DOS SOLOS</i> .....	91
4.2	<i>CURVA CARACTERÍSTICA</i> .....	101
4.2.1	Modelos de ajuste da Curva Característica.....	102
4.2.2	Influência da Energia de Compactação .....	108
4.2.3	Influência da granulometria e mineralogia dos solos .....	111
4.2.4	Influência da História de Umedecimento e Secagem (Histerese) .....	114
4.3	<i>MÓDULO DE RESILIÊNCIA</i> .....	120
4.3.1	Influência do estado de tensões .....	121
4.3.1.1	Obtenção do Módulo de Resiliência estimado .....	132
4.3.2	Influência da energia de compactação.....	133
4.3.3	Influência da variação de umidade .....	136
4.3.3.1	Efeito da variação de umidade de compactação no módulo de resiliência	136
4.3.3.2	Relação entre a sucção medida após o ensaio e a sucção medida na CC ...	142
4.3.3.3	Relação entre o módulo de resiliência e a sucção .....	145
4.3.3.4	Previsão do MR considerando variações de umidade e sucção.....	147
4.4	<i>DEFORMAÇÃO PERMANENTE</i> .....	152

4.4.1	Análise do acúmulo de DP .....	153
4.4.2	Influência da energia de compactação .....	159
4.4.3	Influência da variação de umidade .....	161
4.4.3.1	Efeito da variação de umidade de compactação na DP .....	161
4.4.3.2	Efeito da variação de umidade de pós-compactação na DP .....	165
4.4.3.3	Relação entre a sucção medida após o ensaio e a sucção medida na CC ...	167
4.4.3.4	Relação entre DP e a sucção .....	175
4.4.3.5	Previsão de DP considerando variações de umidade e sucção .....	176
4.5	<i>ANÁLISE DO COMPORTAMENTO PLÁSTICO</i> .....	181
4.5.1	Efeito da variação de umidade de compactação na resposta plástica .....	182
4.5.2	Efeito da variação de umidade de pós-compactação na resposta plástica .....	186
4.6	<i>SÍNTESE DOS RESULTADOS OBTIDOS EXPERIMENTALMENTE</i> .....	188
4.7	<i>SIMULAÇÕES DE DESEMPENHO DE PAVIMENTO</i> .....	192
4.7.1	<i>Software MeDiNa</i> .....	192
4.7.2	<i>Software AASHTOWare Pavement ME Design</i> .....	196
4.8	<i>SÍNTESE DOS RESULTADOS OBTIDOS COM AS MODELAGENS</i> .....	201
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES E SUGESTÕES</b> .....	<b>203</b>
5.1	<i>CONCLUSÕES</i> .....	203
5.2	<i>SUGESTÕES</i> .....	206
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>207</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2-1 - Categorias da Mecânica dos Solos (adaptado de FREDLUND E RAHARDJO, 1993).....	27
Figura 2-2 - Componentes da sucção mátrica (FEUERHARMEL, 2007) .....	30
Figura 2-3 – Classificação do solo não saturado (WROTH; HOULSBY, 1985).....	31
Figura 2-4 - Curva característica unimodal (VANAPALLI <i>et al.</i> , 1999).....	33
Figura 2-5 – Curva característica bimodal (FEUERHARMEL <i>et al.</i> , 2005) .....	34
Figura 2-6 - Curva característica com formato de sela e provável variação da área de água em diferentes trechos (FEUERHARMEL, 2007).....	35
Figura 2-7 – Curva característica bimodal de um solo laterítico argilo-arenoso avermelhado (BASTOS, 1999) .....	36
Figura 2-8 – Curvas características bimodais de quatro solos do RS (SANTOS <i>et al.</i> , 2019)	36
Figura 2-9 – Histerese da curva característica (FREDLUND, 2002).....	39
Figura 2-10 – Curva característica para obtenção dos parâmetros do modelo de Fredlund e Xing (FREDLUND; XING, 1994) .....	41
Figura 2-11 - Parâmetros de ajuste da curva bimodal (ROCHA, 2013) .....	44
Figura 2-12 - Resposta da deformação permanente agrupada em níveis segundo a perspectiva dos estudos de Werkmeister <i>et al.</i> (2001).....	58
Figura 3-1 - Fluxograma dos procedimentos metodológicos da presente pesquisa .....	64
Figura 3-2 - Localização das jazidas dos solos coletados .....	68
Figura 3-3 - Solos utilizados na pesquisa: (a) Argissolo; (b) Solo Residual de Arenito Botucatu .....	69
Figura 3-4 - Jazida do solo AS localizada em Gravataí/RS: (a) panorama geral da jazida, (b) perfil estratigráfico do solo.....	70
Figura 3-5 - Jazida do solo SRA localizada em São Leopoldo/RS: (a) panorama geral da jazida, (b) perfil estratigráfico do solo .....	71
Figura 3-6 – Amostra de solo sendo esculpida com o auxílio do anel de PVC.....	76
Figura 3-7 – Etapas de fechamento da amostra: (a) colocação dos papéis filtro sobre a amostra; (b) amostra embalada com filme plástico; e (c) amostra embalada com papel alumínio e saco plástico, devidamente identificada .....	77
Figura 3-8 – Equipamento triaxial de cargas repetidas .....	80
Figura 3-9 – Molde utilizado para a moldagem dos corpos de prova .....	81

Figura 3-10 - Tentativa de umedecimento do CP através de saturação por capilaridade. (a) Primeiro ciclo de umedecimento com inchamento da base do CP. (b) partículas de solo que se desprenderam do CP com a saturação .....	83
Figura 4-1 - Análise granulométrica dos solos .....	92
Figura 4-2 - Classificação dos solos AS e SRA segundo a metodologia MCT (SCHREINERT, 2021).....	94
Figura 4-3 - Curva de compactação e saturação do solo AS .....	95
Figura 4-4 - Curva de compactação e saturação do solo SRA .....	96
Figura 4-5 - Difratograma do solo AS .....	100
Figura 4-6 - Difratograma do solo SRA .....	100
Figura 4-7 - Curva característica do solo AS na energia intermediária.....	105
Figura 4-8 - Curva característica do solo SRA na energia intermediária.....	105
Figura 4-9 - Curva característica do solo AS na energia normal.....	106
Figura 4-10 - Curva característica do solo SRA na energia normal .....	106
Figura 4-11 - Comparação entre as curvas características do solo AS obtidas para diferentes energias de compactação .....	108
Figura 4-12 - Comparação entre amostras com alto e baixo índice de vazios para o mesmo tamanho de grãos .....	110
Figura 4-13 - Comparação entre as curvas características do solo SRA obtidas para diferentes energias de compactação .....	110
Figura 4-14 - Comparação entre as curvas características dos solos AS e SRA considerando a energia intermediária de compactação .....	113
Figura 4-15 - Comparação entre as curvas características dos solos AS e SRA considerando a energia normal de compactação .....	113
Figura 4-16 - Influência da história de umedecimento e secagem para o solo AS-EI .....	115
Figura 4-17 - Influência da história de umedecimento e secagem para o solo AS-EN.....	115
Figura 4-18 - Influência da história de umedecimento e secagem para o solo SRA-EI.....	116
Figura 4-19 - Influência da história de umedecimento e secagem para o solo SRA-EN .....	116
Figura 4-20 - Variação de volume do solo SRA-EN durante os ciclos.....	118
Figura 4-21 - Gráficos de MR em função de $\sigma_3$ e $\sigma_d$ para o solo AS-EI .....	123
Figura 4-22 - Gráficos de MR em função de $\sigma_3$ e $\sigma_d$ para o solo AS-EN.....	124
Figura 4-23 - Gráficos de MR em função de $\sigma_3$ e $\sigma_d$ para o solo SRA-EI.....	125
Figura 4-24 - Gráficos de MR em função de $\sigma_3$ e $\sigma_d$ para o solo SRA-EN .....	126
Figura 4-25 - Valores de coeficiente de determinação utilizando os modelos da literatura...	129

Figura 4-26 - Comparação do MR observado <i>versus</i> modelado para o modelo composto....	130
Figura 4-27 - Comparação do MR observado <i>versus</i> modelado para o modelo universal.....	130
Figura 4-28 – Influência da energia de compactação no MR do solo AS.....	134
Figura 4-29 - Influência da energia de compactação no MR do solo SRA.....	135
Figura 4-30 - Aspecto das amostras compactadas na energia intermediária e com umidade acima da ótima (a) SRA (b) AS .....	137
Figura 4-31 - Influência da umidade de compactação no MR para o solo AS-EI.....	138
Figura 4-32 - Influência da umidade de compactação no MR para o solo AS-EN.....	138
Figura 4-33 - Influência da umidade de compactação no MR para o solo SRA-EI.....	138
Figura 4-34 - Influência da umidade de compactação no MR para o solo SRA-EN .....	139
Figura 4-35 - Valores de sucção obtidos após o ensaio de MR e pela CC para o solo AS-EI	142
Figura 4-36 - Sucções obtidas após o ensaio de MR e pela CC para o solo AS-EN.....	142
Figura 4-37 - Sucções obtidas após o ensaio de MR e pela CC para o solo SRA-EI.....	143
Figura 4-38 - Sucções obtidas após o ensaio de MR e pela CC para o solo SRA-EN .....	143
Figura 4-39 - Correlação entre a sucção obtida após o ensaio e a sucção estimada pela CC.	144
Figura 4-40 - Relação entre a sucção matricial e o MR estimado para o solo AS .....	146
Figura 4-41 - Relação entre a sucção matricial e o MR estimado para o solo SRA.....	146
Figura 4-42 - Comparação do MR observado <i>versus</i> modelado para o modelo de Freitas <i>et al.</i> (2020) .....	149
Figura 4-43 – Comparação da DP observada <i>versus</i> modelada para o modelo de Guimarães (2009) .....	159
Figura 4-44 - Influência da energia de compactação na DP para o solo AS considerando os pares de tensões ensaiados .....	160
Figura 4-45 - Influência da energia de compactação na DP para o solo SRA considerando os pares de tensões ensaiados.....	160
Figura 4-46 - Influência da variação de umidade na DP para o solo AS nas duas energias de compactação .....	163
Figura 4-47 - Influência da variação de umidade na DP para o solo SRA nas duas energias de compactação .....	164
Figura 4-48 - Gráfico de DP <i>versus</i> número de ciclos para o solo AS-EI considerando os pares 20x170 kPa e 20x190 kPa .....	166
Figura 4-49 - Gráfico de DP <i>versus</i> número de ciclos para o solo AS-EI considerando os pares 20x170 kPa e 20x190 kPa .....	166

Figura 4-50 – Sucções obtidas após o ensaio de DP (par de tensões 40x120 kPa) e pela CC para o solo AS-EI .....	171
Figura 4-51 – Sucções obtidas após o ensaio de DP (par de tensões 40x40 kPa) e pela CC para o solo AS-EM .....	171
Figura 4-52 – Sucções obtidas após o ensaio de DP (par de tensões 40x120 kPa) e pela CC para o solo SRA-EI.....	172
Figura 4-53 – Sucções obtidas após o ensaio de DP (par de tensões 40x40 kPa) e pela CC para o solo SRA-EN.....	172
Figura 4-54 - Correlação entre a sucção obtida após o ensaio de DP e a sucção estimada pela CC.....	173
Figura 4-55 - Relação entre a sucção e a DP final para o solo AS (par 40x120 kPa) .....	175
Figura 4-56 - Relação entre a sucção e a DP final para o solo SRA (par 40x120 kPa) .....	176
Figura 4-57 - Comparação da DP observada <i>versus</i> a modelada para o modelo proposto ....	181
Figura 4-58 - Análise gráfica da taxa de crescimento da DP para CPs que passaram ou não por ciclos de umedecimento e secagem (Solo AS).....	187
Figura 4-59 - Análise gráfica da taxa de crescimento da DP para CPs que passaram ou não por ciclos de umedecimento e secagem (Solo SRA) .....	187
Figura 4-60 - ATR final obtido na camada de sub-base para o solo AS utilizando o software MeDiNa .....	193
Figura 4-61 - ATR final obtido na camada de sub-base para o solo SRA utilizando o software MeDiNa .....	193
Figura 4-62 – Afundamentos plásticos obtidos para toda a estrutura do pavimento utilizando o solo AS na camada de sub-base (Software MeDiNa) .....	194
Figura 4-63 - Afundamentos plásticos obtidos para toda a estrutura do pavimento utilizando o solo SRA na camada de sub-base (Software MeDiNa).....	195
Figura 4-64 - Afundamentos plásticos da camada de sub-base considerando as variações de VDM e solo para uma carga de 8,2tf ( <i>Software AASHTOWare</i> ) .....	198
Figura 4-65 - Afundamentos plásticos totais do pavimento considerando as variações de VDM e solo para uma carga de 8,2tf ( <i>Software AASHTOWare</i> ).....	198
Figura 4-66 - Afundamentos plásticos da camada de sub-base considerando as variações de carga e solo para um VDM de 1000 ( <i>Software AASHTOWare</i> ).....	199
Figura 4-67 - Afundamentos plásticos totais do pavimento considerando as variações de carga e solo para um VDM de 1000 ( <i>Software AASHTOWare</i> ).....	200

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2-1 – Equações para curva característica unimodal com formato “S” .....	40
Tabela 2-2 – Equações de calibração do papel filtro (MARINHO, 1995) .....	46
Tabela 2-3 - Modelos de previsão de MR considerando parâmetros de umidade e sucção .....	56
Tabela 2-4 - Modelos de previsão de DP considerando parâmetros de umidade e sucção .....	62
Tabela 3-1 - Síntese dos ensaios mecânicos integrantes do programa experimental .....	66
Tabela 3-2 - Descrição dos locais de coleta dos solos em estudo .....	67
Tabela 3-3 – Corpos de prova a serem moldados para obtenção da curva característica.....	79
Tabela 3-4 - Pares de tensões indicados para a determinação da deformação permanente.....	86
Tabela 3-5 – Estrutura do pavimento para análise de desempenho.....	88
Tabela 3-6 – Valores de MR referente as variações de carga, tráfego e umidade utilizados no <i>software AASHTOWare</i> .....	90
Tabela 4-1 - Caracterização dos solos .....	93
Tabela 4-2 – Composição química dos solos .....	97
Tabela 4-3 - Análise mineralógica – Fluorescência de raios X (FRX) .....	99
Tabela 4-4 - Características iniciais das amostras utilizadas na determinação das curvas características dos solos AS e SRA .....	102
Tabela 4-5 - Coeficientes de determinação ( $R^2$ ) obtidos após o ajuste das curvas utilizando modelos da literatura .....	103
Tabela 4-6 - Valores de entrada de ar dos solos AS e SRA considerando as duas energias (valores obtidos graficamente) .....	104
Tabela 4-7 - Parâmetros utilizados para ajuste matemático das curvas dos solos AS e SRA nas duas energias.....	104
Tabela 4-8 - Parâmetros utilizados para ajuste matemático das curvas dos solos AS e SRA nas duas energias considerando ciclos de umedecimento e secagem .....	117
Tabela 4-9 - Síntese dos parâmetros obtidos para cada modelo a partir dos ensaios de MR .	128
Tabela 4-10 - Módulos de resiliência médios e estimados considerando todas as variáveis .	133
Tabela 4-11 - Módulos de resiliência estimados obtidos para solos compactados em diferentes teores de umidade iniciais.....	140
Tabela 4-12 – Coeficientes de determinação ( $R^2$ ) de modelos que consideram os efeitos de sucção e variação de umidade .....	148

Tabela 4-13 – Resultados da regressão de três modelos nacionais e do proposto na pesquisa .....	151
Tabela 4-14 - Resumo dos resultados obtidos nos ensaios de deformação permanentes com variação de umidade em relação a ótima.....	154
Tabela 4-15 - Parâmetros do modelo de deformação permanente de Guimarães (2009).....	157
Tabela 4-16 – Resumo dos dados obtidos para cada CP ensaiado para DP com relação a sucção .....	168
Tabela 4-17 - Sucções obtidas para os CPs que sofreram ciclos de secagem e umedecimento .....	174
Tabela 4-18 - Coeficientes de determinação ( $R^2$ ) de modelos que consideram os efeitos de sucção e variação de umidade na DP.....	177
Tabela 4-19 - Resultado da regressão de outros modelos nacionais e o proposto nesta pesquisa .....	180
Tabela 4-20 – Enquadramento dos solos estudados segundo a Teoria do <i>Shakedown</i> .....	183
Tabela 4-21 - Enquadramento dos solos segundo a Teoria do <i>Shakedown</i> considerando amostras que passaram ou não por ciclos de umedecimento e secagem.....	186

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AASHTO: *American Association of State Highway and Transportation Official*

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas

APTP: Área de Pesquisas e Testes de Pavimentos

ATR: Afundamento de Trilha de Roda

CP: Corpo de prova

CTC: Capacidade de Troca Catiônica

DAER: Departamento Autônomo de Estradas de Rodagem

DNER: Departamento Nacional de Estradas de Rodagem

DNIT: Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes

DP: Deformação Permanente

DPS: Dreno longitudinal profundo para cortes em solo

DRX: Difractometria de raios X

EICM: *Enhanced Integrated Climatic Model*

FRX: Fluorescência de raios X

HVS: *Heavy Vehicle Simulator*

IPR: Instituto de Pesquisas Rodoviárias

LAGEOTEC: Laboratório de Geotecnologia – UFRGS

LAPAV: Laboratório de Pavimentação – UFRGS

LL: Limite de Liquidez

LP: Limite de Plasticidade

LVDT: *Linear Variable Differential Transducer*

MCT: Miniatura Compactado Tropical

MEPDG: Mechanistic-empirical Pavement Design Guide

MR: Módulo de resiliência

NA: Nível de água

PEAS<sub>Max</sub>: Peso Específico Aparente Seco Máximo

RDT: *Rectilinear Displacement Transducer*

ROLAS: Rede Oficial de Laboratórios de Análise de Solo e de Tecido Vegetal dos Estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina

RTA: Rede Temática de Tecnologia em Asfaltos

S: Saturação

SEEPAV: Sistema de ensaios especiais de pavimentação

SUCS: Sistema único de classificação de solos

VEA: Valor de entrada de ar no solo

UFRGS: Universidade Federal do Rio Grande do Sul

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 PROBLEMA DE PESQUISA E JUSTIFICATIVA

Atualmente, o modal rodoviário é predominante no Brasil, tendo um importante papel na indução do desenvolvimento econômico e na integração nacional. Infelizmente a infraestrutura de transporte brasileira não acompanhou esse crescimento exponencial do tráfego e solicitações de carga impostas, sendo utilizado por muito tempo na área rodoviária um método de dimensionamento de pavimentos que não considerava novas tecnologias e descobertas em pesquisas que visavam diminuir os defeitos, garantindo sua vida de projeto.

Para que o pavimento consiga cumprir a função a qual foi destinado, seu dimensionamento deve ser realizado considerando fundamentalmente os materiais de cada camada da estrutura, as propriedades do solo do subleito, as características do ambiente local e do tráfego. Se o dimensionamento não levar em consideração algum desses itens, o pavimento irá apresentar defeitos graves antes de chegar à vida útil estipulada em projeto.

Em comparação com a maioria das estruturas na área da Engenharia Civil, a configuração de um pavimento é relativamente simples. No entanto, devido à complexidade do comportamento dos materiais constituintes sob cargas repetidas de tráfego e condições ambientais variadas, torna-se mais difícil a previsão do seu desempenho.

Atualmente, a comunidade técnico-científica vem buscando novas metodologias e soluções quanto ao dimensionamento e gerenciamento de pavimentos, procurando a evolução dos métodos dito empíricos para os mecanísticos-empíricos. No Brasil, este aspecto vem sendo discutido através do desenvolvimento do novo Método de Dimensionamento Nacional (MeDiNa).

Considerar as variações climáticas e ambientais as quais o pavimento ficará exposto é essencial para aumentar sua vida útil. As camadas constituintes do pavimento podem apresentar períodos de umidade acima ou abaixo do teor ótimo, dependendo de fatores externos como a variação do lençol freático, percolação, infiltrações laterais e verticais, precipitações, variações de temperatura, entre outros. Esta variação de umidade pode interferir de maneira negativa ou

positiva no desempenho do pavimento, afetando a resistência e a deformabilidade dos materiais, sujeito ao tráfego. Desta forma, torna-se de grande importância aprimorar o conhecimento acerca do comportamento dos materiais de pavimentação que possam ter seu comportamento afetado por este fator, além de aprofundar os estudos no desenvolvimento de modelos de previsão mais abrangentes, que incorporem esta variável aos métodos de dimensionamento mecanístico-empíricos.

Atualmente, ao se construir um pavimento é permitido que a umidade dos materiais utilizados nas camadas esteja entre  $\pm 2\%$  em relação à umidade ótima de projeto. Além disso, em rodovias bem projetadas, com sistemas de drenagem eficientes, esta variação de umidade tão elevada não ocorre, sendo o mais correto o pavimento manter uma umidade de equilíbrio, o que de certa forma impediria que toda estrutura deformasse excessivamente. Porém, há de se considerar que atualmente a malha rodoviária brasileira nem sempre apresenta condições favoráveis para este fim, além de que alguns materiais em específico podem apresentar elevada deformabilidade quanto à mínima elevação desta umidade em questão, sendo necessário maiores investigações acerca do seu comportamento.

Considerando este aspecto, os pavimentos devem ser projetados (e mantidos) para uma situação não saturada, na qual a sucção pode ter efeito positivo na resistência e na deformabilidade de solos, especialmente os finos. A sucção pode ser definida como uma pressão isotrópica resultante da interação entre o líquido e o gás nos poros do solo; desta forma ela influencia diretamente no comportamento de solos não saturados, já que a resistência e a deformabilidade são fortemente influenciadas pela água presente nos poros deste solo.

A preocupação com a interferência da água na vida útil de pavimentos não é recente. Em nível de pesquisa, nos últimos 40 anos se verifica um aumento de estudos, como os relatados por Villibor (1981), Brown (1996), Bernucci *et al.* (2000), Gehling *et al.* (2015), procurando entender como a água afeta a resistência de determinados materiais. Com relação à análise da influência direta da sucção, podemos citar as pesquisas de Edil e Motan (1979), Gonçalves (1999), Ceratti *et al.* (2004), Weber (2013), Freitas *et al.* (2020), entre outros, que mostraram o efeito da variação da sucção no módulo de resiliência de solos utilizados na pavimentação. Com relação a deformação permanente e a sucção, há poucos estudos encontrados na literatura, sendo a maioria em nível internacional, como os trabalhos de Jing *et al.* (2016) e Salour e Erlingsson (2017) e a nível nacional o trabalho realizado por Santos (2020). Por fim, alguns trabalhos

foram desenvolvidos correlacionando dados de laboratório e campo, como os realizados no Laboratório de Pavimentação (LAPAV) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), relatados por Núñez (1997), Rodrigues (1997) e Ramires (2010), porém bastante abrangentes referente a inclusão da sucção nas análises.

Frente a escassez de trabalhos relacionando a variação de umidade/sucção com a deformabilidade e desempenho de pavimentos, verifica-se a necessidade do desenvolvimento de mais estudos relacionados a estes assuntos, principalmente no que se refere a solos tropicais brasileiros.

Neste contexto, busca-se com a presente tese contribuir para o conhecimento acerca da influência da variação de umidade no comportamento de solos utilizados em camadas de pavimentos, compreendendo melhor o efeito da sucção nas respostas elásticas e plásticas obtidas. Também almeja-se fornecer dados para correlações futuras com resultados obtidos em ensaios acelerados com o simulador de tráfego nas pistas experimentais do LAPAV/UFRGS.

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 Objetivo geral

O objetivo geral da pesquisa relatada nesta Tese foi avaliar o efeito da variação de umidade no comportamento de dois solos utilizados em sub-bases de pavimentos, com ênfase na influência da sucção nas respostas elásticas e plásticas, a partir de ensaios laboratoriais e análises de desempenho.

### 1.2.2 Objetivos específicos

Para que seja possível alcançar o objetivo geral supracitado, foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- a) Investigar a influência da variação de +1% e -2% de umidade em relação ao teor ótimo, além de avaliar os efeitos da energia de compactação e tipo de solo nos resultados de ensaios de módulo de resiliência e deformação permanente;
- b) Avaliar a relação entre a sucção e a deformabilidade dos solos estudados, frente a análise das histereses obtidas nas curvas características;

- c) Propor a inserção da sucção e da variação de umidade em modelos de previsão que estimem módulo de resiliência e deformação permanente, considerando variações de umidade no ramo úmido e ramo seco da curva de compactação;
- d) Compreender o efeito de ciclos de secagem e umedecimento no comportamento quanto à deformação permanente dos solos em um único estado de tensões;
- e) Prever o desempenho de pavimentos expostos a variação de umidade através da utilização do *software* MeDiNa e do *software* AASHTOWare Pavement ME Design, considerando também diferentes volumes de tráfego e cargas de eixo;
- f) Contribuir com o entendimento do comportamento e influência da sucção na deformabilidade de solos tropicais utilizados na pavimentação.

### 1.3 ESTRUTURA DA TESE

Esta tese é composta de cinco capítulos, cujos conteúdos são apresentados a seguir.

No capítulo 1 do presente trabalho foi apresentada uma breve introdução à pesquisa, juntamente com o problema e a justificativa da importância de ser avaliado o comportamento dos solos não saturados investigados. Também são apresentados o objetivo geral e objetivos específicos que nortearam a realização da pesquisa.

O segundo capítulo apresenta o embasamento teórico necessário para a realização da pesquisa, dando ênfase para a importância de se estudar o comportamento de solos não saturados, a influência da presença de água nas camadas dos pavimentos, além de apresentar um extenso estudo bibliográfico acerca da influência da sucção no módulo de resiliência e na deformação permanente de solos.

Os procedimentos metodológicos presentes no capítulo 3 descrevem inicialmente as áreas escolhidas dentro do estado do Rio Grande do Sul para a coleta dos solos em estudo, bem como a localização destas jazidas. Para os ensaios de laboratório, apresenta o procedimento para preparação das amostras e como foram realizados os ensaios para análise do comportamento elástico e plástico dos materiais. Por fim são apresentadas as informações pertinentes as análises de desempenho realizadas utilizando os *softwares* MeDiNa e AASHTOWare Pavement ME Design.

O capítulo 4 apresenta os resultados obtidos em laboratório e as previsões de desempenho de pavimentos com camadas constituídas pelos dois solos estudados, além de discussões pertinentes quanto às respostas obtidas.

As principais conclusões da tese são apresentadas no capítulo 5, onde também são oferecidas sugestões para trabalhos futuros.

Os elementos pós-textuais são compostos pelas referências bibliográficas e os apêndices. Nos apêndices são apresentados alguns resultados que, por motivos de fluência da leitura, não foram incluídos no corpo do texto.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O presente capítulo apresenta um panorama geral sobre os temas abordados nesta tese. Primeiramente são apresentados os conceitos de solos não saturados e suas peculiaridades. Neste capítulo também é discutida a importância da sucção em solos não saturados e os métodos tradicionais para a obtenção do parâmetro. O entendimento do comportamento de solos não saturados em pavimentos rodoviários também é apresentado, ressaltando-se a importância do entendimento da deformação elástica e plástica nos mesmos.

### 2.1 SOLOS NÃO SATURADOS

Na Mecânica dos Solos Clássica, os primeiros estudos foram desenvolvidos com ênfase em solos saturados ( $S_r = 100\%$ ) ou secos ( $S_r = 0\%$ ). Porém, dependendo das condições climáticas predominantes nas regiões onde os solos se desenvolvem, os mesmos podem ter seu comportamento mecânico governado pelos princípios da Mecânica dos Solos Saturados ou Não Saturados. Abaixo do nível de água, a poropressão é positiva e os solos estão normalmente saturados. Acima deste nível a poropressão é geralmente negativa e os solos são classificados como não saturados.

A partir da década de 1960, a Mecânica dos Solos começou a dar importância, em suas pesquisas, à condição não saturada do solo. Trabalhos realizados por Bishop *et al.* (1960), Fredlund e Morgenstern (1977), Alonso *et al.* (1987), Fredlund e Rahardjo (1993), entre outros, auxiliaram no entendimento do comportamento destes materiais, porém muitos aspectos teóricos, métodos de previsão de propriedades, bem como a aplicação dos conceitos à prática de Engenharia Geotécnica ainda não se encontram completamente estabelecidos.

De acordo com Fredlund e Rahardjo (1993), a Mecânica dos Solos pode ser dividida conforme é apresentado na Figura 2-1.

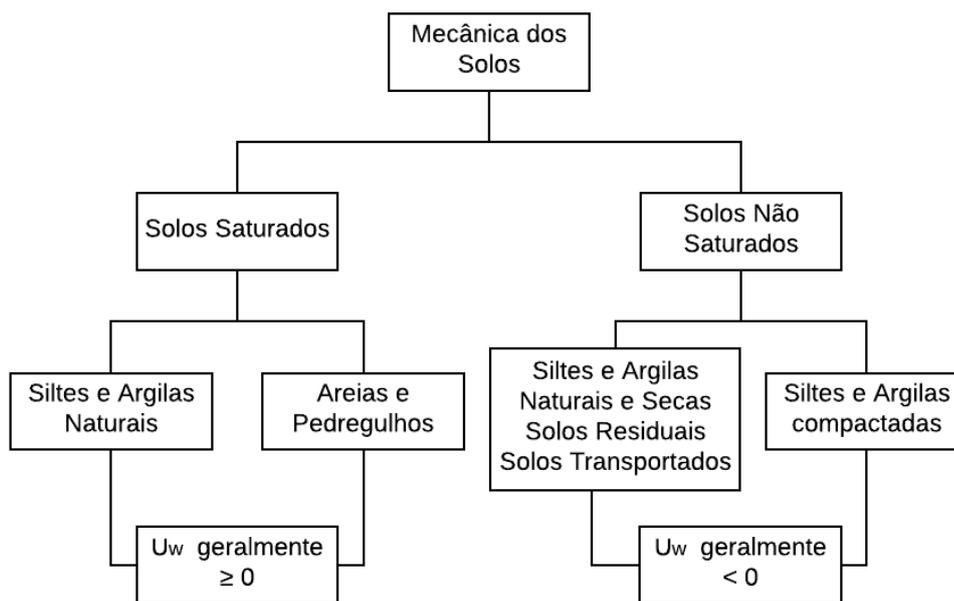


Figura 2-1 - Categorias da Mecânica dos Solos (adaptado de FREDLUND E RAHARDJO, 1993)

Inicialmente, os solos não saturados eram considerados um sistema trifásico, constituído por partículas sólidas e água e/ou ar em seus vazios (LAMBE E WHITMAN, 1979). Com os avanços dos estudos, a interface solo-água passou a ser considerada uma quarta fase independente, por apresentar características distintas dos materiais em volta. Esta quarta fase também é conhecida como membrana contrátil.

A existência de pequenas quantidades de ar torna o solo não saturado e faz com que seus poros se tornem compressíveis. A ocorrência de grandes quantidades de ar no seu interior cria uma fase contínua de ar nos poros. Esta fase ar, no elemento não saturado, passa a ser contínua quando o grau de saturação se encontra abaixo de 85-90% (FREDLUND, 1979).

### 2.1.1 Origem e estrutura de solos não saturados

Segundo Fredlund e Rahardjo (1993), o clima tem papel fundamental na identificação de solos não saturados. Qualquer solo próximo à superfície está sujeito a um ambiente mais seco e conseqüentemente sujeito a poropressão negativa de água e a uma possível dessaturação.

Alguns tipos de solos não saturados originam-se na forma saturada, como por exemplo, os solos sedimentares, onde a evaporação da água de um lago e a posterior secagem do solo ali depositado faz com que o nível de água se desloque para baixo da superfície. A tensão total nos

sedimentos de solo permanece constante, ao contrário da poropressão de água, que tem seu valor reduzido, tornando-se negativa.

De acordo com Pereira (2013), em solos granulares, os grãos tendem a formar pontes e arcos entre si, e com a aplicação de cargas externas, seus contatos acabam por desenvolver forças cisalhantes e normais, ocorrendo deslizamento entre grãos. O menisco gerado pela interface ar-água faz com que ocorra uma união entre os grãos. Assim, há uma maior capacidade de resistência às tensões cisalhantes geradas nos contatos por cargas externas aplicadas. Com o umedecimento do material, a união entre os grãos pode ser removida, ocorrendo o colapso do solo.

Já para solos argilosos, existe a tendência de formação de pacotes de partículas por meio de processos químicos. No caso de umedecimento de um solo argiloso sob carga, poderá ocorrer a quebra do pacote de partículas de argila ou a sua expansão. O comportamento geral deste tipo de solo vai depender da situação da carga aplicada e da variação da umidade do mesmo (PEREIRA, 2013).

Assim, o comportamento de solos não saturados depende de muitos aspectos: do processo de formação, grau de saturação, distribuição granulométrica, peso específico seco, estado de tensões, entre outros (ALONSO *et al.*, 1987; FREDLUND E RAHARDJO, 1993).

## 2.2 SUCÇÃO

Além das tensões geostáticas comuns em solos saturados, na condição não saturada surge uma pressão isotrópica resultante da interação entre o líquido e o gás nos poros do solo, denominada sucção.

Dentre as diversas definições existentes, Houston *et al.* (1994) afirmam que a sucção representa a tensão requerida para remover uma molécula de água do solo dentro da fase de vapor. Já Marinho (1994) define sucção como sendo a pressão isotrópica imposta pelo poro água para absorver mais água. Os valores de sucção variam de zero, quando o solo está saturado (todos os vazios preenchidos por água), até valores elevados, quando o solo está completamente seco.

A sucção no solo é denominada sucção total e é composta por dois componentes. A primeira delas é a matricial ou mátrica (relacionada à matriz do solo, ou seja, estrutura e composição das

partículas) e a segunda é a osmótica (devida a diferentes concentrações de sais dissolvidos na fase líquida). Pode-se definir a sucção total como à energia livre da água do solo tendo a sucção matricial e osmótica como componentes da energia livre, sendo dada pela Equação 1:

$$\Psi = (u_a - u_w) + \pi \quad (1)$$

Onde:

$\Psi$  = sucção do solo;

$(u_a - u_w)$  = sucção matricial;

$\pi$  = sucção osmótica;

$u_a$  = poropressão de ar;

$u_w$  = poropressão de água.

A sucção é normalmente expressa como unidade de pressão e as unidades mais utilizadas são kPa, atm, bar e pF. Geralmente, a análise da sucção em solos não saturados é realizada através de uma curva que representa a variação de sucção com o teor de umidade ou grau de saturação, denominada curva característica.

### 2.2.1 Sucção Mátrica

A sucção mátrica é definida pela diferença entre a poropressão do ar ( $u_a$ ) e a poropressão de água ( $u_w$ ). Houston *et al.* (1994) definem que a sucção mátrica é a afinidade que o solo tem com a água na ausência de qualquer gradiente de teor de sal na mesma. No caso em que não existem sais no fluido do solo, a sucção osmótica é nula e, portanto, a sucção mátrica é igual à sucção total.

A sucção mátrica é controlada por dois mecanismos distintos e experimentalmente inseparáveis: forças capilares e forças de adsorção (Figura 2-2). A parcela capilar está ligada com a macroestrutura, aos poros interligados nos quais a água flui devido a gradientes de pressão capilar. Já a parcela de adsorção está associada com a microestrutura, com a hidratação dos argilominerais (MONCADA, 2004).

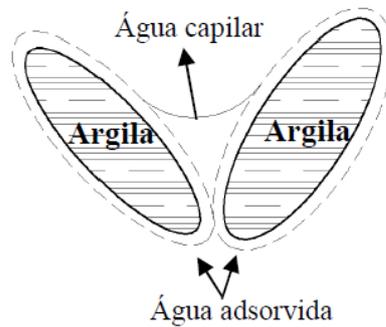


Figura 2-2 - Componentes da sucção mátrica (FEUERHARMEL, 2007)

De acordo com Pereira (2013), o perfil de sucção mátrica *in situ* é variável com o tempo, afetada por mudanças ambientais (estações chuvosas e secas). Estações secas resultam em um aumento do valor de sucção mátrica e, em estações chuvosas, ocorre uma redução. A vegetação também influencia no perfil de sucção mátrica do solo através de processos de evapotranspiração. Este processo resulta em pressões negativas, entre 1 e 2 MPa, removendo a água do solo e consequentemente aumentando a sucção.

### 2.2.2 Sucção Osmótica

A sucção osmótica é definida por Ridley (1995) como sendo a tensão adicional necessária para remover uma molécula de água, devido à presença de sais dissolvidos na fase água. Matematicamente, a sucção osmótica ( $\pi$ ) é expressa pela Equação 2, a seguir.

$$\pi = n \cdot R \cdot T \cdot c \quad (2)$$

Onde:

$n$  = número de moléculas por moles do sal;

$R$  = constante universal dos gases;

$T$  = temperatura absoluta;

$c$  = concentração do sal.

A sucção osmótica geralmente é desprezada na maioria dos problemas geotécnicos que envolvem solos não saturados, pelas seguintes razões:

- A concentração de sal no poro fluido, quando presente, é relativamente baixa ou praticamente não varia com as alterações ambientais (ZHAN, 2003);

- Um solo granular e livre de sais não tem sucção osmótica e a sucção total é igual à sucção matricial (SMITH; SMITH, 1998);
- Mesmo as variações na sucção osmótica apresentando efeito sobre o comportamento mecânico e hidráulico do solo, o efeito dessa variação não é tão significativo quanto o produzido por uma alteração na sucção mátrica (FREDLUND; RAHARDJO, 1993).

### 2.2.3 Estágios de saturação

Muitos pesquisadores propuseram diferentes classificações para o solo não saturado em função da forma e continuidade com que as fases água e ar podem estar presentes. Wroth e Houlsby (1985) classificaram os solos em três categorias. A primeira trata-se de uma fase ar contínua e fase água descontínua, que ocorre em baixos graus de saturação, onde a fase ar se apresenta na forma de canais e a água encontra-se retida, formando meniscos ao redor dos pontos de contatos dos grãos (Figura 2-3a).

A segunda categoria destina-se a fase ar e água contínuas, que ocorre para solos não saturados com grau intermediário de saturação (Figura 2-3b). Por fim, a terceira categoria, a fase água contínua e fase ar descontínua, para graus de saturação mais altos, ocorre quando a fase ar perde a continuidade e pode tornar-se oclusa na água (Figura 2-3c). Quando finalmente o ar não está mais presente nos vazios é obtida a saturação completa.

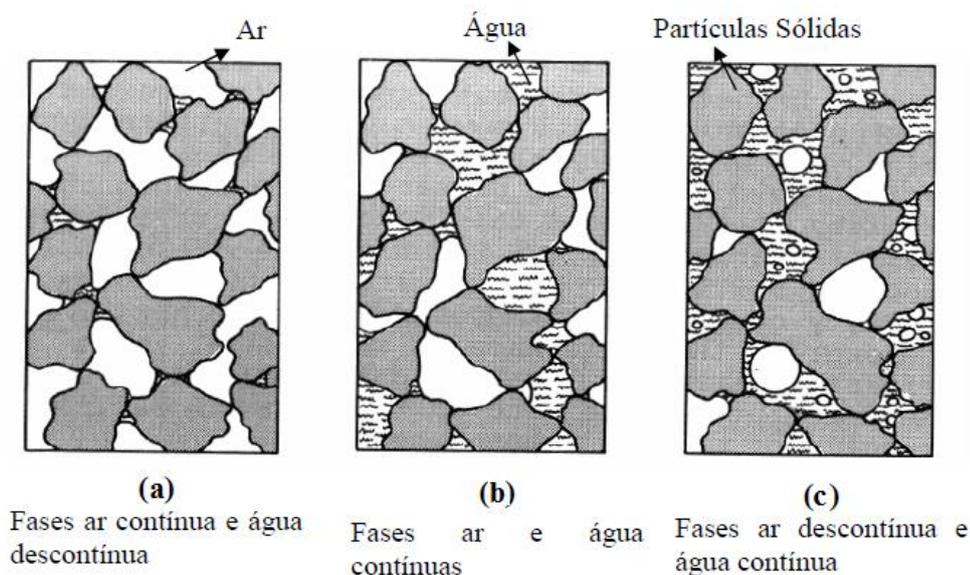


Figura 2-3 – Classificação do solo não saturado (WROTH; HOULSBY, 1985)

Conforme Fredlund (2000), o comportamento hidráulico e mecânico de um solo não saturado é fortemente influenciado pelos estágios de saturação. Para solos secos, o fluxo é controlado basicamente pela condutividade do ar e nesta situação a sucção atinge valores bastante elevados. Já para solos úmidos, grande parte dos vazios está preenchida por água e a sucção mátrica geralmente apresenta pequena influência no comportamento mecânico e hidráulico. Desta forma, as teorias propostas para solos não saturados foram desenvolvidas principalmente para o caso em que as fases água e ar são contínuas, sendo representada pela fase “b” da Figura 2-3, ocorrendo normalmente para graus de saturação entre 20 e 80%.

## 2.3 CURVA CARACTERÍSTICA

A curva característica, também chamada de curva de retenção, é uma das relações constitutivas mais importantes utilizadas para entender e interpretar a resposta de um solo não saturado. Esta curva representa a relação existente entre a quantidade de fluido presente nos poros do solo e a energia necessária para sua retirada (sucção). Quando o fluido em estudo é a água, sua quantificação pode ser expressa em termos de teor de umidade gravimétrico ( $w$ ), teor de umidade volumétrico ( $\theta$ ) ou grau de saturação ( $S_r$ ).

A determinação da curva característica é fundamental para o entendimento do comportamento do solo não saturado frente à variação de umidade e apresenta um papel similar à curva de adensamento para solos saturados (RAHARDJO E LEONG, 1997). As curvas características surgiram para estimar as propriedades dos solos não saturados. Elas são vistas como um ponto preponderante para a implementação da Mecânica dos Solos Não Saturados na prática (FREDLUND, 2002).

A curva característica pode apresentar diferentes formas:

- Unimodal (formato de S): Constitui o formato mais comum, amplamente estudado pela Mecânica dos Solos Não Saturados;
- Bimodal (formato de sela): existente em alguns solos, em especial em solos tropicais e subtropicais. Este comportamento também foi observado em alguns solos residuais e coluvionares (FEUERHARMEL *et al.*, 2006).

### 2.3.1 Curva característica unimodal

A curva característica fornece informações, como: a distribuição de tamanhos de poros, a quantidade de água contida nesses poros e o estado de tensão atuante no poro água (SILLERS *et al.*, 2001). Uma curva característica unimodal é apresentada na Figura 2-4 para valores de sucção entre 1 a 1.000.000 kPa (VANAPALLI *et al.*, 1999). Muitos resultados experimentais indicam a sucção de 1.000.000 kPa como o máximo valor de sucção da curva característica. A Figura 2-4 também apresenta uma curva de secagem ou de dessaturação e uma curva de umedecimento ou de absorção, sendo a diferença entre as duas curvas denominada de histerese.

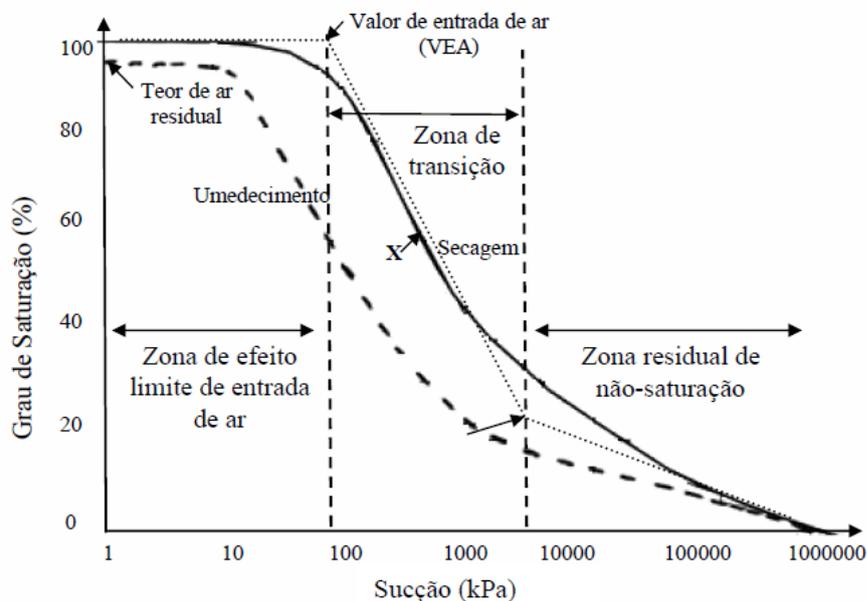


Figura 2-4 - Curva característica unimodal (VANAPALLI *et al.*, 1999)

A curva unimodal em formato de “S” apresenta três estágios de dessaturação: estágio de efeito limite de entrada de ar, estágio de transição e estágio residual de não saturação.

- a) **Estágio de efeito limite de entrada de ar:** O primeiro estágio inicia em um valor de sucção próximo a zero e estende-se até a sucção correspondente ao valor de entrada de ar do solo (VEA). O valor de entrada de ar, também chamado de pressão de borbulhamento, identifica o ponto em que o ar começa a entrar no maior poro do solo não saturado.
- b) **Estágio de transição:** O próximo estágio da curva característica é a zona de transição, a qual inicia na sucção correspondente ao valor de entrada de ar e termina na correspondente ao ponto de saturação residual. O solo inicia sua dessaturação e o teor

de umidade diminui progressivamente com o aumento da sucção. O menisco de água que se encontra ao redor das partículas de solo se reduz e perde sua forma contínua.

- c) **Estágio residual de não saturação:** O último estágio da curva característica é o estágio residual de não saturação que inicia no ponto de saturação residual e vai até a máxima sucção, ou seja, aquela correspondente a um teor de umidade muito próximo a zero. Esta zona é caracterizada pela ocorrência apenas de fluxo de vapor de água, onde pequenas variações no teor de umidade acarretam grandes aumentos na sucção.

### 2.3.2 Curva característica bimodal

A grande maioria das curvas características publicadas na literatura geotécnica apresenta forma similar à curva mostrada na Figura 2-4. Entretanto, as curvas características em formato “S” não representam bem o comportamento de dessaturação de muitos solos de origem residual ou sedimentar encontrados em regiões de clima tropical e subtropical (FEUERHARMEL *et al.* 2006). Estes solos apresentam microestrutura e macroestrutura bem definidas, onde a curva característica destes materiais sugere uma distribuição bimodal dos poros: macroporos, entre os agregados de argila, e microporos, no interior destes.

Uma curva característica bimodal é apresentada na Figura 2-5 com três estágios de dessaturação propostos: estágio de dessaturação dos macroporos, patamar intermediário e estágio de dessaturação dos microporos (FEUERHARMEL *et al.*, 2005).

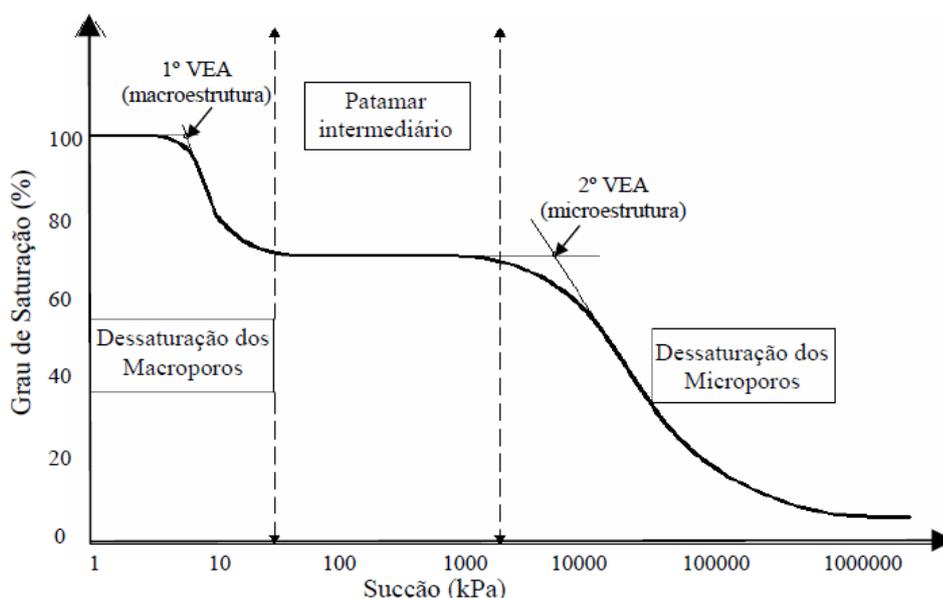


Figura 2-5 – Curva característica bimodal (FEUERHARMEL *et al.*, 2005)

- a) **Estágio de dessaturação dos macroporos:** Este inicia em um valor de sucção próximo a zero, onde os macroporos e microporos do solo se encontram na condição saturada. O solo permanece saturado até atingir o primeiro valor de entrada de ar (1° VEA), onde o ar começa a penetrar nos macroporos do solo. Após o 1° VEA ocorre a dessaturação da macroestrutura, reduzindo o grau de saturação com o aumento da sucção.
- b) **Patamar intermediário:** Neste segundo estágio o grau de saturação permanece aproximadamente constante com o aumento da sucção. Este patamar é associado provavelmente à ausência de poros de tamanho intermediário neste tipo de solo.
- c) **Estágio de dessaturação dos microporos:** O início do último estágio encontra-se próximo ao 2° VEA, o qual está relacionado à entrada de ar nos microporos do solo. Após este valor observa-se uma contínua redução da área de água com a sucção.

A Figura 2-6 ilustra uma curva característica com formato de sela e uma provável variação da área de água em cada um desses trechos. Nela observa-se o início da dessaturação dos macroporos existentes entre os microagregados de argila, com tamanho granular. Após, no patamar intermediário, a água restante encontra-se dentro da microestrutura, uma vez que o solo não apresenta tamanho de poro intermediário. Por fim, o último estágio corresponde a dessaturação da microestrutura do solo.

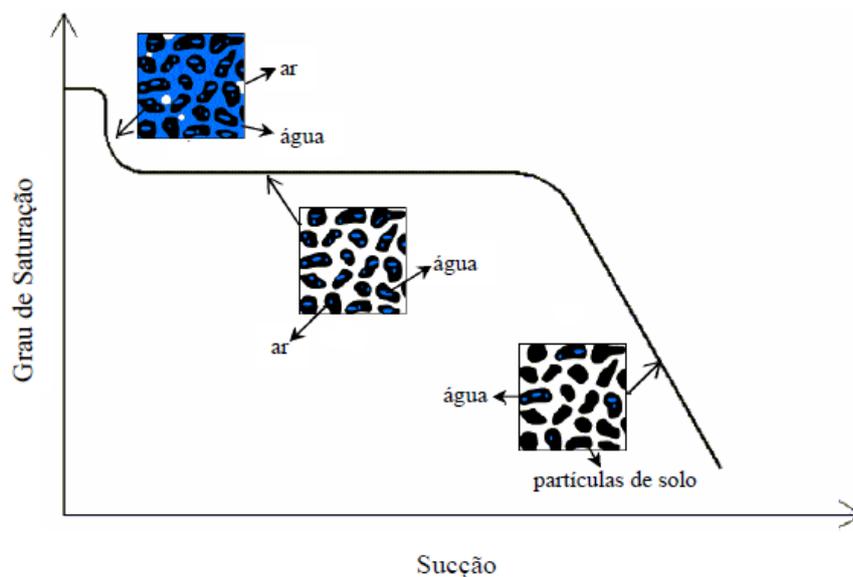


Figura 2-6 - Curva característica com formato de sela e provável variação da área de água em diferentes trechos (FEUERHARMEL, 2007)

Considerando os solos brasileiros, em seus estudos Bastos (1999) obteve uma curva característica bimodal para um solo laterítico argilo-arenoso avermelhado da região de Alvorada/RS, em amostras indeformadas (Figura 2-7).

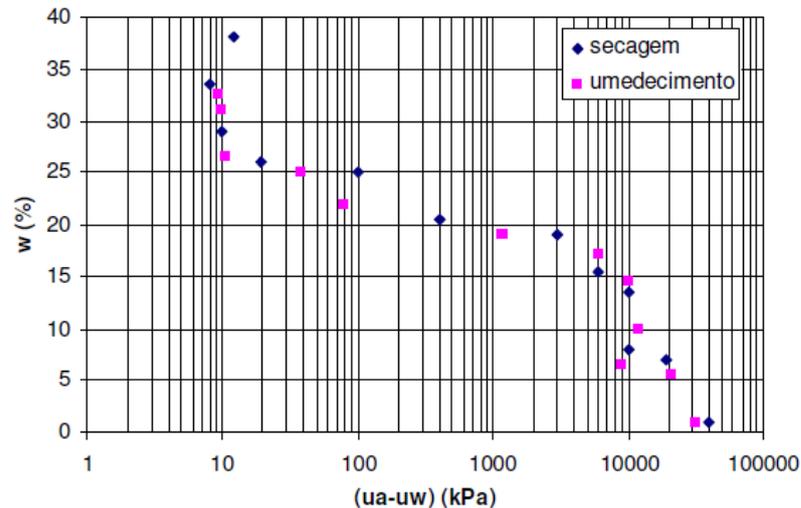


Figura 2-7 – Curva característica bimodal de um solo laterítico argilo-arenoso avermelhado (BASTOS, 1999)

Santos *et al.* (2019) obtiveram curvas características bimodais para quatro solos provenientes do estado do Rio Grande do Sul (Figura 2-8). Segundo os autores, este formato bimodal (duplo “S”) é típico de solos com comportamento laterítico.

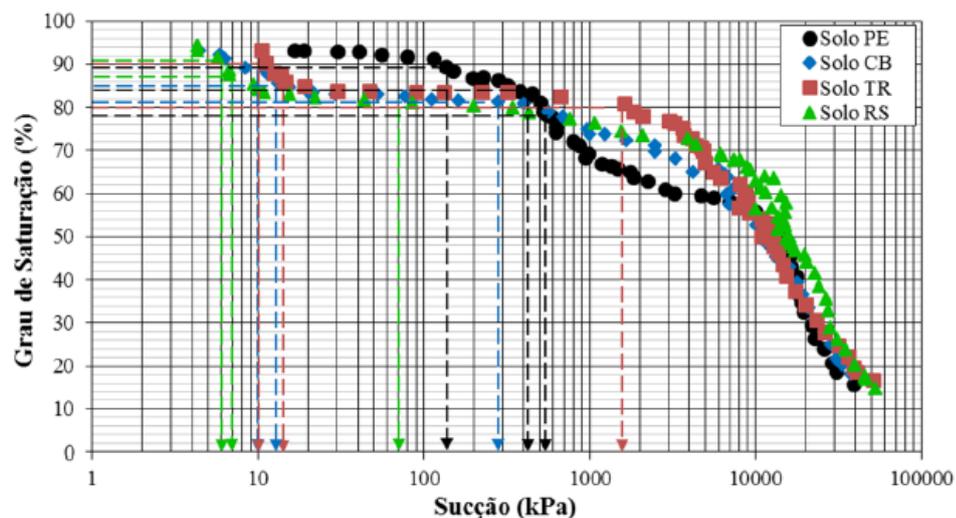


Figura 2-8 – Curvas características bimodais de quatro solos do RS (SANTOS *et al.*, 2019)

### 2.3.3 Fatores que influenciam a Curva Característica

Antigamente acreditava-se que a curva característica era representada por uma função biunívoca, onde para cada teor de umidade (ou grau de saturação) havia apenas uma sucção correspondente. Com o avanço das técnicas de medição de sucção, verificou-se que a curva era influenciada por diversos fatores.

Alguns destes fatores incluem: histórico de tensões, histórico de umedecimento e secagem, índice de vazios, energia de compactação, teor de umidade inicial, tipo e estrutura do solo (representado pelo tamanho dos grãos e estrutura mineralógica). Conforme Vanapalli *et al.*, (2004) e Zhou e Yu (2005), os fatores que parecem ter maior influência em solos de granulometria fina são a estrutura do solo e a sua história de tensões. Já Zaman e Khoury (2007) defendem que as alterações na sucção do solo são influenciadas pela compactação inicial e pelo teor de umidade.

- Tipo de solo

A granulometria influi nas forças capilares, pois, quanto mais fino o solo, maiores serão as forças capilares (FREDLUND; RAHARDJO, 1993). Os solos com granulometria mais grossa (pedregulhos e areias), apresentam largos poros interconectados e uma brusca variação no grau de saturação com a sucção (curva mais íngreme). Os solos que apresentam teor de finos maior (argilas) apresentam poros menores e tendem a apresentar uma curva mais suave, apresentando uma maior capacidade de armazenar água. Por fim, os solos siltosos apresentam um comportamento intermediário. Segundo Feuerharmel (2003), o valor de entrada de ar e o ponto de saturação residual aumentam com o aumento de teor de finos do solo. Além disso, quanto maior o teor de finos, mais difícil é a determinação do ponto de saturação residual na curva característica.

- Teor de umidade inicial

O teor de umidade inicial afeta consideravelmente a forma da curva característica, pois afeta a estrutura dos poros do solo. O solo compactado no ramo seco apresenta uma distribuição bimodal de tamanho de poros: macroporos grandes entre os torrões que não foram remoldados durante a compactação e microporos no interior destes. Por apresentar uma estrutura mais aberta, este material tende a perder água mais facilmente, o que resulta em um valor de entrada

de ar menor. Já o solo compactado no ramo úmido apresenta uma distribuição de tamanho de poros unimodal, onde os poros se encontram em microescala. As amostras compactadas no ramo úmido são mais homogêneas e apresentam maior capacidade de armazenar água. Então, se as amostras forem compactadas no ramo seco, a dessaturação das mesmas é governada pela macroestrutura. Caso sejam compactadas no ramo úmido, a dessaturação é governada pela microestrutura (VANAPALLI *et al.*, 1999).

- Índice de vazios

Com relação à variação do índice de vazios, Galliapoli *et al.* (2003) apresentaram uma relação para a variação do grau de saturação com a variação do índice de vazios (expressa através do volume específico,  $v$ , sendo  $v = 1 + e$ ). Os autores verificaram que quando o volume específico decresce, a dimensão dos vazios e a conexão entre esses vazios diminuem, com o solo apresentando a maior capacidade de retenção. Por outra perspectiva, com o aumento do volume específico o solo tende a apresentar uma estrutura mais aberta e dessatura mais rapidamente.

- Energia de compactação

O aumento da energia de compactação torna o solo mais denso, ou seja, o volume de vazios maiores é reduzido, aumentando sua capacidade de armazenamento e conseqüentemente seu valor de entrada de ar. Para sucções mais elevadas a influência da energia de compactação parece não ser perceptível na curva característica. Tinjum *et al.* (1997) verificaram a influência dessa variável sobre a curva característica de argilas compactadas. Foi observado que o valor de entrada de ar é geralmente maior e a inclinação da curva é ligeiramente mais íngreme para amostras compactadas com energia de compactação maior.

Além da energia de compactação, o processo de compactação em si também altera a estrutura do solo e o formato da curva característica. O comportamento de amostras compactadas ou remoldadas tem sido bem documentado na literatura, como no trabalho realizado por Feurharmel (2007).

- História de umedecimento e secagem

A curva característica não é uma função biunívoca e depende da trajetória de secagem ou umedecimento seguida, ou seja, o mesmo solo pode apresentar valores diferentes de sucção

para um mesmo teor de umidade, dependendo se foi atingido por umedecimento ou secagem, sendo denominado este aspecto de histerese.

As curvas de secagem e de umedecimento formam os limites extremos para a curva característica de um dado solo. As curvas de secagem e umedecimento também são assintóticas nos extremos, onde a umidade e a sucção tendem a zero, conforme pode ser visto na Figura 2-9.

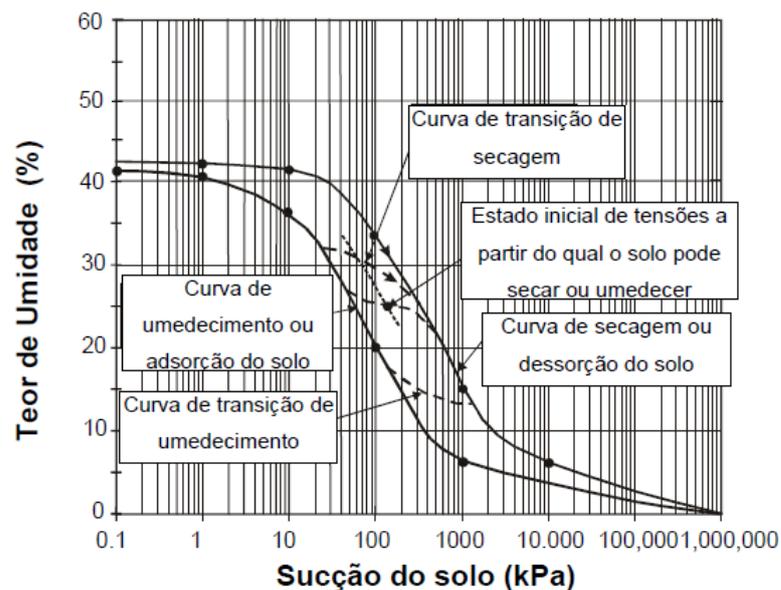


Figura 2-9 – Histerese da curva característica (FREDLUND, 2002)

As principais causas para a histerese da curva característica são: a geometria não uniforme dos poros intercomunicados por pequenas passagens, o efeito do ângulo de contato que varia em função da trajetória seguida, a ocorrência de bolhas de ar aprisionadas que influenciam a trajetória de umedecimento e as variações de volume sofridas por expansão e retração.

Segundo Marinho *et al.* (2015) a trajetória a ser utilizada para a construção da curva característica de determinado solo deve considerar a problemática que se quer retratar. O caminho de secagem é comumente utilizado por ser de fácil execução, porém se pode optar pela trajetória de umedecimento ou pela trajetória mista (parte das amostras são submetidas a secagem e parte ao umedecimento). Considerando solos empregados na pavimentação, ambas as trajetórias são importantes, visto que tanto a elevação quanto o rebaixamento do lençol freático podem resultar em possíveis alterações na capacidade de suporte (SANTOS, 2020).

### 2.3.4 Equações de ajuste para representar a Curva Característica

Dependendo de sua forma, a curva característica pode ser representada através de equações empíricas que correlacionam o valor da sucção com a quantidade de água nos poros (teor de umidade ou grau de saturação). Dentre as modelagens existentes, a maioria baseia-se na interdependência entre a forma da curva e a distribuição de tamanho dos poros. Entretanto, alguns modelos representam estimativas diretas a partir da distribuição granulométrica e de propriedades físicas do solo, não considerando a influência de aspectos como: arranjo estrutural, teor de umidade inicial, energia de compactação e estado de tensões.

A Tabela 2-1 apresenta as principais equações utilizadas para o ajuste da curva característica no formato unimodal, com formato de “S”.

Tabela 2-1 – Equações para curva característica unimodal com formato “S”

Referência	Equação	Descrição das Variáveis
Gardner (1958)	$S = \frac{1}{1 + a\Psi^n}$	$a$ e $n$ = parâmetros de ajuste
Brooks e Corey (1964)	$S = \left(\frac{\Psi_b}{\Psi}\right)^\Lambda$	$\Lambda$ – índice de distribuição de tamanho de poros
Van Genuchten (1980)	$S = \left[\frac{1}{1 + (a\Psi)^n}\right]^m$	$a$ , $m$ e $n$ = parâmetros de ajuste
Williams <i>et al.</i> (1983)	$\ln \Psi = a + b \ln \theta$	$a$ e $b$ = parâmetros de ajuste
McKee e Bumb (1987)	$S = \exp\left(\frac{a - \Psi}{n}\right)$	$a$ e $n$ = parâmetros de ajuste
Gallipoli <i>et al.</i> (2003)	$\Theta = \left[\frac{1}{1 + (\alpha\Psi)^n}\right]^m$ $\alpha = \phi(v - 1)^\Psi$	$v$ = volume específico $\phi$ , $\Psi$ = constantes do solo (correção do modelo de Van Genuchten (1980) para solos deformáveis)

(Adaptado de Feuerharmel, 2007)

Fredlund e Xing (1994) propuseram uma equação a partir da distribuição do tamanho dos poros e dos parâmetros obtidos a partir da curva característica. As equações 3 a 6 apresentam o modelo

proposto e a Figura 2-10 apresenta um procedimento para obtenção das variáveis necessárias para o cálculo dos parâmetros.

$$\theta = C_{\Psi} \frac{\theta_s}{\left[ \ln \left( e + \frac{\Psi}{a} \right) \right]^m} \quad (3)$$

$$C_{\Psi} = 1 - \frac{\ln \left( 1 + \frac{\Psi}{\Psi_r} \right)}{\ln \left( 1 + \frac{10^6}{\Psi_r} \right)} \quad (4)$$

$$m = 3,67 \ln \left( \frac{\theta_s}{\theta_i} \right) \quad (5)$$

$$n = \frac{1,31^{m+1}}{m\theta_s} 3,72s\Psi_i \quad (6)$$

Onde:

$\Psi_r$  = sucção correspondente ao ponto de saturação residual;

$a = \Psi_i$ , sucção correspondente ao teor de umidade volumétrica do ponto de inflexão ( $\theta_i$ );

$s$  = inclinação da curva;

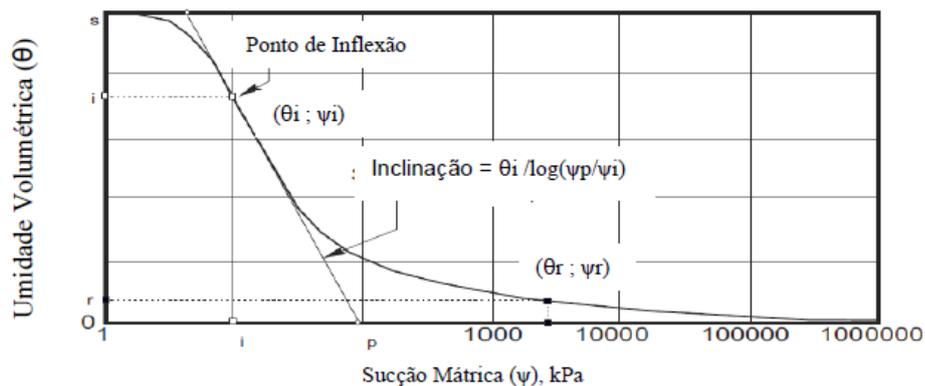


Figura 2-10 – Curva característica para obtenção dos parâmetros do modelo de Fredlund e Xing (FREDLUND; XING, 1994)

Com relação às curvas características bimodais, na literatura há poucas equações sugeridas para este tipo de formato, com “duplo S”.

Gitirana Jr e Fredlund (2004) propuseram equações para modelar curvas características unimodais com um ponto de inflexão (Equação 7) ou com dois pontos de inflexão (Equação 8); e bimodais (Equação 9), com quatro pontos de inflexão. O modelo bimodal com quatro pontos de inflexão apresenta dois valores de entrada de ar e dois pontos de sucção residual distintos. Na Figura 2-11 é possível identificar os oito parâmetros que representam a curva bimodal pelo modelo proposto pelos autores. Estas equações podem ser utilizadas tanto para representar a trajetória de secagem como a de umedecimento da curva característica.

- Equação Unimodal com um ponto de inflexão:

$$S = \frac{\tan \theta (1 + r^2) \ln \left( \frac{\Psi}{\Psi_b} \right)}{(1 - r^2 \tan^2 \theta)} - \frac{(1 + \tan^2 \theta)}{(1 - r^2 \tan^2 \theta)} \sqrt{r^2 \ln^2 \left( \frac{\Psi}{\Psi_b} \right) + \frac{a^2 (1 - r^2 \tan^2 \theta)}{(1 + \tan^2 \theta)} + 1} \quad (7)$$

Onde:

$$\theta = \frac{-\lambda}{2} \text{ (ângulo de rotação da hipérbole);}$$

$$r = \frac{\lambda}{2} \text{ (ângulo de abertura da tangente);}$$

$$\lambda = \tan \left\{ \frac{1}{\left[ \ln \left( \frac{10^6}{\Psi_b} \right) \right]} \right\} \text{ (inclinação da dessaturação);}$$

- Equação Unimodal com dois pontos de inflexão:

$$S = \frac{S_1 - S_2}{1 + \left( \frac{\Psi}{\sqrt{\Psi_b \Psi_{res}}} \right)^a} + S_2 \quad (8)$$

Onde:

$$S_i = \frac{\tan \theta_i (1 + r_i^2) \ln \left( \frac{\Psi}{\Psi_i^a} \right)}{(1 - r_i^2 \tan^2 \theta_i)} + (-1)^i \times \frac{(1 + \tan^2 \theta_i)}{(1 - r_i^2 \tan^2 \theta_i)} \times \sqrt{r_i^2 \ln^2 \left( \frac{\Psi}{\Psi_i^a} \right) + \frac{a^2 (1 - r_i^2 \tan^2 \theta_i)}{(1 + \tan^2 \theta_i)} + S_1^a}$$

$$\theta = \frac{-(\lambda_{i-1} + \lambda_i)}{2}$$

$$\lambda_i = \arctan \left\{ \frac{(S_i^a - S_{i+1}^a)}{\left[ \ln \left( \frac{\Psi_{i+1}^a}{\Psi_i^a} \right) \right]} \right\}$$

$$r_i = \tan \left[ \frac{(\lambda_{i-1} - \lambda)}{2} \right]$$

$$d_j = 2 \times \exp \left[ \frac{1}{\ln \left( \frac{\Psi_{res}}{\Psi_b} \right)} \right]$$

$$i = 1, 2$$

$$S_1^a = 1; S_2^a = S_{res}; S_3^a = 0; \Psi_1^a = \Psi_b; \Psi_2^a = \Psi_{res}; \Psi_3^a = 10^6$$

- Equação para quatro pontos de inflexão (bimodal):

$$S = \left[ \frac{S_1 - S_2}{1 + \left[ \frac{\Psi}{\sqrt{\Psi_{b1} \times \Psi_{res1}}} \right]^{d_1}} + \frac{S_2 - S_3}{1 + \left[ \frac{\Psi}{\sqrt{\Psi_{b2} \times \Psi_{res1}}} \right]^{d_2}} + \frac{S_1 - S_2}{1 + \left[ \frac{\Psi}{\sqrt{\Psi_{b2} \times \Psi_{res2}}} \right]^{d_3}} + S_4 \right] \quad (9)$$

Onde:

$$d_j = 2 \times \exp \left[ \frac{1}{\ln \left( \frac{\Psi_{j+1}^a}{\Psi_j^a} \right)} \right]$$

$$j = 1, 2, 3$$

$$\Psi_1^a = \Psi_b; \Psi_2^a = \Psi_{res1}; \Psi_3^a = \Psi_{b2}; \Psi_4^a = \Psi_{res2}; \Psi_5^a = 10^6$$

$$\theta = \frac{-(\lambda_{i-1} + \lambda_i)}{2}$$

$$\lambda_i = \arctan \left\{ \frac{(S_i^a - S_{i+1}^a)}{\left[ \ln \left( \frac{\Psi_{i+1}^a}{\Psi_i^a} \right) \right]} \right\}$$

$$S_1^a = 1; S_2^a = S_{res1}; S_3^a = S_b; S_4^a = S_{res2}; S_5^a = 0$$

$$\lambda_0 = 0; i = 1, 2, 3, 4$$

$$S_i = \frac{\tan \theta_i (1+r_i^2) \times \ln \left( \frac{\Psi}{\Psi_i^a} \right)}{(1-r_i^2 \tan^2 \theta_i)} + (-1)^i \times \frac{(1+\tan^2 \theta_i)}{(1-r_i^2 \tan^2 \theta_i)} \times \sqrt{r_i^2 \ln^2 \left( \frac{\Psi}{\Psi_i^a} \right) + \frac{a^2 (1-r_i^2 \tan^2 \theta_i)}{(1+\tan^2 \theta_i)}} + S_1^a$$

a = variável de forma da hipérbole;

d, d<sub>1</sub>, d<sub>2</sub>, d<sub>3</sub> = fatores de peso;

r<sub>i</sub> = ângulo tangente de abertura da hipérbole;

$S$ ,  $S_b$  = primeiro e segundo graus de saturação;

$S_i$  = hiperbole individual;

$S_i^a$  = coordenada y do centro da hiperbole;

$S_{res}$ ,  $S_{res1}$ ,  $S_{res2}$  = graus de saturação residuais;

$\theta_i$  = ângulo de rotação;

$\Psi$  = sucção do solo;

$\Psi_b$ ,  $\Psi_{b1}$ ,  $\Psi_{b2}$  = valores de entrada de ar;

$\Psi_b^a$  = coordenada x do centro da hiperbole;

$\Psi_{res}$ ,  $\Psi_{res1}$ ,  $\Psi_{res2}$  = sucções residuais.

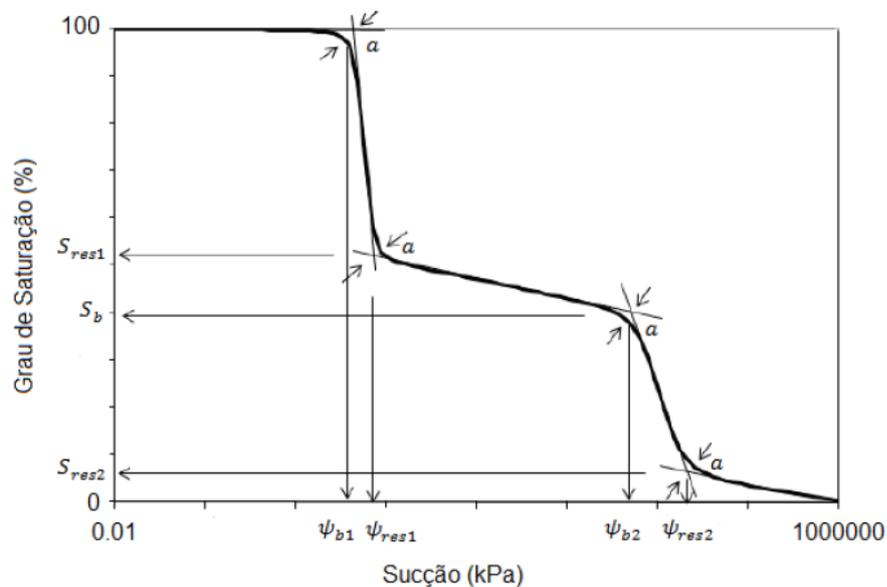


Figura 2-11 - Parâmetros de ajuste da curva bimodal (ROCHA, 2013)

O modelo bimodal com quatro pontos de inflexão apresenta os parâmetros  $\psi_{b1}$  (primeiro valor de entrada de ar),  $\psi_{res1}$  (primeiro valor de sucção residual) e  $S_{res1}$  (primeiro valor de saturação residual), que estão associados aos macroporos. O fator  $a$  apresentado define as transições ao longo dos pontos de quebra. Os demais dados estão relacionados aos microporos do solo analisado.

### 2.3.5 Métodos para a obtenção da Curva Característica

Para obter a curva característica existem diversos métodos e técnicas utilizados em campo e em laboratório. A determinação precisa da sucção é bastante difícil e as técnicas para medição estão em constante desenvolvimento. Algumas técnicas utilizadas são: placas de pressão, tensiômetros, centrífuga, psicrômetro e papel filtro. A seguir é apresentada uma descrição do método do papel filtro, o qual foi utilizado nesta tese para a obtenção da curva característica.

#### 2.3.5.1 Método do Papel Filtro

A técnica do papel filtro tem sido bastante utilizada para a medição da sucção em razão da simplicidade, do baixo custo e da possibilidade de medir sucção total ou mátrica em amplos limites. Além disso, a versatilidade desse método permite sua utilização tanto em laboratório como em campo.

O método consiste em provocar uma transferência de água do solo para um material poroso (papel filtro), até que o equilíbrio seja atingido. O equilíbrio é definido pela igualdade de sucções entre os materiais, porém com diferentes teores de umidade. Desta forma, conhecendo a relação entre sucção e a umidade deste material poroso, através de uma curva de calibração, é possível determinar esta relação também para o solo. O tempo de equilíbrio também é um fator de extrema importância para a obtenção da correta sucção (MARINHO, 1994).

A calibração do papel filtro é dependente do tipo de papel filtro a ser utilizado. Existem na literatura diversas equações de calibração, principalmente para os papéis filtro das marcas Whatman nº42 e Schleicher & Schuell nº589. Na Tabela 2-2 são apresentadas algumas equações de calibração para esses papéis, sugeridas por Marinho (1995). O autor recomenda que, ao se trabalhar com o papel filtro Whatman nº 42, sejam utilizadas as equações propostas por Chandler *et al.* (1992), as quais foram obtidas com um maior número de pontos que as de Greacen *et al.* (1987).

Marinho (1994) sugere que o papel filtro deve ser usado diretamente da caixa, contrariando o especificado na norma D5298 (ASTM, 2016). A norma aponta que o papel filtro deve ser seco em estufa por no mínimo 16 horas antes do uso. Segundo o autor este procedimento de secagem

pode afetar as características de absorção do papel resultando na alteração da curva de calibração.

Tabela 2-2 – Equações de calibração do papel filtro (MARINHO, 1995)

Papel	Calibração	Referência
Whatman nº42	$S(kPa) = 10^{(6,05-2,48 \log wp)}$ $wp > 47\%$	Chandler <i>et al.</i> (1992) (Sucção Mátrica)
	$S(kPa) = 10^{(4,84-0,0622 wp)}$ $wp \leq 47\%$	
Whatman nº 42	$S(kPa) = 10^{(2,412-0,0135 wp)}$ $wp > 45,3\%$	Greacen <i>et al.</i> (1987) ASTM-D5298-16 (Sucção Total)
	$S(kPa) = 10^{(5,327-0,0779 wp)}$ $wp \leq 45,3\%$	
Schleicher & Schuell nº589	$S(kPa) = 10^{(1,882-0,01202 wp)}$ $wp > 54\%$	ASTM-D5298-16 (Sucção Total)
	$S(kPa) = 10^{(5,056-0,0688 wp)}$ $wp \leq 54\%$	

Onde: S = sucção e wp = umidade do papel filtro.

Feuerharmel (2003) também destaca o uso do papel diretamente da caixa, estando ele na mesma condição em que foi utilizado durante seu processo de calibração (seco ao ar, úmido ou seco em estufa).

Algumas recomendações devem ser seguidas para garantir a obtenção da acurada medida da umidade através deste método: o tamanho do papel (quanto menor o tamanho, menor a sensibilidade da medida), o tempo de equilíbrio (no mínimo sete dias para a medição da sucção matricial), o conjunto amostra – papel filtro (deve ser firmemente envolvido com filme plástico e saco plástico para se evitar a perda de umidade ou um contato deficiente), entre outros. (FEUERHARMEL, 2003).

## 2.4 SOLOS NÃO SATURADOS EM PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS

O efeito indesejado da presença da umidade na diminuição das propriedades mecânicas de interesse da engenharia rodoviária não é preocupação recente dos engenheiros, já que a água é um dos fatores que lideram os danos causados aos pavimentos.

As variações ambientais (secagem e umedecimento) influenciam no comportamento mecânico, sendo estas: precipitações pluviométricas, temperatura, vegetação e vento (CERATTI *et al.*,

1996). Além disso, outros fatores como carregamento externo, tipo de solo e história geológica devem ser analisados no estudo do comportamento do material. É importante entender que dependendo do tipo de material empregado em determinada camada do pavimento, o clima vai atuar de forma distinta. As camadas asfálticas são mais sensíveis a temperatura, já as camadas não tratadas (base e subleito), são mais sensíveis a variações de umidade (TAKEDA, 2006).

Conforme Yoder e Witczack (1975), a umidade no subleito e nas camadas adjacentes é afetada por várias fontes de água, podendo ser através de fissuras no revestimento asfáltico, revestimentos permeáveis, movimentos laterais através do acostamento, movimentação do lençol freático, entre outros. Assim, o projeto e a execução do pavimento devem, sempre que necessário, prever sistemas de drenagem que impeçam que esta água atinja o subleito e as demais camadas, mesmo que por ascensão capilar, pois ela é prejudicial à capacidade de suporte do solo.

Em rodovias brasileiras bem projetadas e com sistemas de drenagem eficientes, o que se percebe é que existe uma umidade de equilíbrio no subleito, que é no máximo igual a umidade ótima de compactação na energia Proctor normal (MEDINA E MOTTA, 2015). Esta umidade de equilíbrio é dita como um valor médio da gama de variação do teor de umidade do solo de subleito ao longo dos anos, após a fase de acomodação dos primeiros meses de serviço.

Porém nos estudos realizados por Bernucci *et al.* (2000) foi verificado que a umidade de equilíbrio de bases de solos lateríticos estava abaixo dos valores utilizados na compactação. Segundo os autores, esta diminuição da umidade de equilíbrio se deu através dos efeitos da sucção e da temperatura na movimentação de água, dos efeitos do clima úmido e quente, combinados com as condições hidrológicas e do relevo da região em questão.

No Brasil, onde as chuvas intensas ocorrem com frequência, observam-se muitos problemas de drenagem de pavimentos. Os pavimentos bem drenados exigem gastos menores com manutenção e recuperação e resultam em maior vida útil, sendo mais econômicos ao longo do tempo. O DNIT através do IPR (Instituto de Pesquisas Rodoviárias) publicou em 2006 o Manual de Drenagem de Rodovias (DNIT, 2006a), fruto da revisão e atualização da primeira edição de 1990. De acordo com o manual, a falta de uma drenagem adequada provoca, de maneira geral, a redução da capacidade de suporte do solo de fundação, bombeamento de finos

do solo de subleito para os materiais granulares das demais camadas do pavimento e arraste de partículas de solo e materiais granulares superficiais.

Em relação a esta dificuldade de prever a umidade em campo, Gehling *et al.* (2015) citam que a condição não saturada da estrutura do pavimento e da terraplenagem é extremamente dinâmica quando contextualizada espacialmente. Existe certa dificuldade na análise da estrutura, pois enquanto *in situ* a situação é extremamente dinâmica, em laboratório ou mesmo em estudos pontuais de campo, geralmente os resultados de ensaio e o comportamento do solo em estado não saturado refletem o estado físico do solo, a porosidade e a umidade no momento do ensaio. Tais peculiaridades tornam o estudo dos solos não saturados mais complexo e relevante.

Kern (2017) avaliou a variação no nível do lençol freático às margens da BR-290/RS através de um medidor de nível de água (NA) durante oito meses e correlacionou com medidas de deflexão realizadas com a viga benkelman e simulações utilizando o *software Everstress 5.0*. Segundo a autora, o subleito da rodovia demonstrou estar mais seco no referido período do ano em que se realizaram os ensaios de campo, pois apresentou deflexões menores que as esperadas caso estivesse com a umidade ótima. Também com as medições mensais do NA verificou-se que o nível de água variava bastante conforme a incidência de chuvas no local (entre 2,29m e 3,19m de profundidade em relação ao topo do subleito), o que alterava a deformabilidade das camadas. Através das simulações realizadas verificou-se que um aumento de umidade de +2% em relação a umidade ótima na camada do subleito gerava deflexões até 20% maiores no topo do pavimento.

A avaliação de pavimentos através de pistas experimentais, onde se varia as condições de contorno conforme o interesse da pesquisa, já é prática no meio rodoviário e apresenta mais rapidamente os resultados requeridos. Um destes casos foi o estudo realizado por Ramires (2010) onde verificou a influência da profundidade do nível de água na sucção e na deflexão de pavimentos flexíveis. Para isso foram construídas duas pistas experimentais, onde as oscilações do nível do lençol freático sob o pavimento foram induzidas através da variação do nível de água em drenos profundos, construídos nas laterais das pistas experimentais. Os efeitos dos níveis de água no nível do lençol freático e na sucção dos solos de subleito foram avaliados com o auxílio de medidores de NA, piezômetros e tensiômetros. As medidas de deflexões foram realizadas para avaliar o efeito da deformabilidade elástica dos solos e seus reflexos no

comportamento estrutural dos pavimentos. Segundo a autora verificou-se relações entre as variáveis: nível de água, sucção e deflexão do pavimento. Constatou-se que com a redução do nível de água no subleito, ocorreu um aumento na sucção, o que provocou uma diminuição dos valores das deflexões no pavimento.

A análise da variação de umidade nas camadas do pavimento através de modelagens computacionais também é outro aspecto que vem ganhando espaço nos últimos anos. Afsharikia (2017) realizou um estudo paramétrico usando a análise do *software SVFlux* da *SoilVision* para modelar a variação da umidade do solo em razão da profundidade de influência e do tempo, considerando fatores ambientais e o tipo de solo. Para isso foi modelada a perda de umidade *versus* a profundidade durante a secagem de três tipos de solo (areia grossa, areia fina e argila). O *software* se limitou a avaliar a sensibilidade do teor de umidade nos três tipos de material juntamente com os principais parâmetros atmosféricos: temperatura, velocidade do vento e umidade relativa. Por fim, os três solos se mostraram sensíveis à temperatura, sendo a areia grossa a mais sensível a parâmetros atmosféricos.

O comportamento dos solos não saturados, apesar de, ainda, pouco considerado nos projetos e na execução das estruturas de pavimento, são definidores da qualidade técnica e econômica mais refinada do projeto e execução da obra. Conforme Medina e Motta (2015), a aplicação do conceito de sucção aos problemas de pavimentação e Mecânica dos Solos permite entender melhor o comportamento de solos parcialmente saturados. Como visto, a sucção está diretamente associada a variação de umidade, o que afeta diretamente a resistência e a deformabilidade dos solos (CERATTI *et al.*, 2004).

#### 2.4.1 Comportamento resiliente

O módulo de resiliência (MR) é um dos parâmetros mais importantes na caracterização do comportamento mecânico de agregados e solos, quando utilizados como camada estrutural de pavimentos. O ensaio de módulo de resiliência segue a norma DNIT-ME 134 (DNIT, 2018a).

Os parâmetros elásticos ou resilientes dos solos são obtidos em ensaios de cargas cíclicas. Nestes ensaios, os solos são submetidos a cargas repetidas de duração e frequência comparáveis às que ocorrem nos pavimentos. O módulo de resiliência, determinado nestes ensaios de

carregamentos repetidos, consiste na relação entre a tensão desvio aplicada e a sua respectiva deformação axial recuperável, conforme visto na Equação 10.

$$M_r = \frac{\sigma_d}{\varepsilon_r} \quad (10)$$

Onde:

$M_r$  = Módulo de Resiliência;

$\sigma_d$  = tensão desvio ( $\sigma_1 - \sigma_3$ );

$\varepsilon_r$  = deformação resiliente axial.

Existem alguns fatores que podem influenciar o comportamento resiliente dos solos: a intensidade de tensões; a razão de tensões principais ( $\sigma_1/\sigma_3$ ); o número de repetições da tensão-desvio; a história de tensões; a duração e frequência de aplicação da tensão-desvio; o tipo de agregado; a percentagem de material que passa na peneira 200; a densidade e umidade de compactação; o grau de saturação e método de compactação. Dentre os citados, o interesse maior para esse trabalho é a influência devido à umidade (sucção).

#### 2.4.1.1 Influência da variação de umidade e sucção no MR

A conseqüente redução do módulo resiliente com aumento do teor de umidade já vem sendo estudada e apresentada há vários anos por muitos autores (Dawson *et al.* (1996), Núñez (1997), Rodrigues (1997), Drumm *et al.* (1997), Yang *et al.* (2005), Takeda (2006), Silva (2009), Ramires (2010), Weber (2013), Kern (2017), Santos *et al.* (2019), Blackmore *et al.* (2019), entre outros). A resistência dos pavimentos vai depender do teor de umidade do subleito, o que torna necessário conhecer as alterações ocorridas ao longo do tempo e quais os fatores envolvidos.

Drumm *et al.* (1997) realizaram uma série de ensaios de MR em 11 solos de diferentes locais do estado americano do Tennessee, com uma gama de índices de plasticidade, sob condições não-saturadas e saturadas. Eles verificaram que todos os solos, que vão de A-4 a A-7-6 de acordo com a classificação da AASHTO, apresentaram uma diminuição do MR com o aumento do grau de saturação. O grau de redução dos valores de módulo variou de acordo com o tipo de solo.

Nos estudos realizados por Weber (2013), foi avaliada a influência da variação de umidade ( $\pm 2\%$  e  $\pm 4\%$ ) no módulo de resiliência de um material silto-argiloso, extraído próximo à região metropolitana de Porto Alegre/RS. O autor verificou que quanto menor o teor de umidade de compactação, maior o módulo de resiliência obtido, variando entre aproximadamente 50 MPa para a amostra 4% acima da umidade ótima, até 225 MPa para a amostra 4% abaixo da umidade ótima, tomando como referência os valores obtidos na tensão desvio de 69 kPa.

A avaliação do módulo resiliente em relação à variação de umidade, com ciclos de umedecimento e secagem nas amostras de solo também é necessária. Diversos autores (Ceratti *et al.* 2004; Zaman e Khoury, 2007; Weber, 2013; Kern 2017; etc) verificaram alterações no MR após amostras de solo passarem por estes ciclos, geralmente apresentando maiores valores de MR para amostras que passaram por ciclos de secagem do que para ciclos de umedecimento.

Conforme o trabalho realizado por Parreira e Gonçalves (2000), o umedecimento do solo também resulta na diminuição do módulo de resiliência e a secagem, em um aumento. Os autores estudaram o comportamento do módulo de resiliência para uma argila arenosa laterítica compactada na umidade ótima, variando o teor de umidade antes do ensaio. Foi verificado que ao ensaiar corpos de prova 1% acima da umidade ótima, o MR reduziu em 25%. Com a secagem em 2% de umidade, o MR apresentou um aumento de 24% e com a secagem de 11,2% resultou no aumento de 54%. Já para uma amostra seca, a qual foi umedecida até a umidade ótima, o MR reduziu em 55%.

Ceratti *et al.* (2004) avaliaram o comportamento do MR em um solo laterítico com a variação de umidade através de trajetórias de umedecimento e secagem. Segundo os autores, foi verificado que o MR era maior quando o solo era submetido à secagem e menor quando submetido a umedecimento.

Da mesma forma, Kern (2017) avaliou a influência da trajetória de secagem e umedecimento ( $\pm 1\%$  e  $\pm 2\%$ ) de um solo silto-argiloso de alta compressibilidade em relação ao módulo de resiliência. Segundo a autora, as amostras que passaram por trajetórias de umedecimento apresentaram módulos menores na umidade ótima e também não apresentaram elevada variação conforme o aumento das tensões desvio. Já as amostras que passaram por secagem apresentaram valores de MR mais elevados e variação desses valores conforme o aumento da tensão desvio.

Lima *et al.* (2018) verificaram a influência da umidade de compactação no comportamento elástico de um solo LG' do estado do Rio de Janeiro, utilizando as energias de compactação normal e intermediária e considerando cinco teores de umidade iniciais:  $W_{ótima}$ ,  $W_{ótima\pm 1\%}$  e  $W_{ótima\pm 2\%}$ . Foi observado que os módulos aumentaram quando a umidade inicial diminuiu e diminuíram com o aumento da umidade, sendo que as maiores variações de MR por energia ocorreram ao utilizar um maior teor de umidade de compactação.

Além de ensaios laboratoriais para a verificação da variação do MR com a adição ou perda de umidade, a análise computacional também auxilia nesta análise e pode prever o comportamento futuro das camadas do pavimento. Khoury *et al.* (2009) utilizaram um *software* com modelos que preveem mudanças no MR devido à umidade e temperatura: o MEPDG da AASHTO. Foram realizados ensaios em laboratório para verificar a variação do MR através de secagem e umedecimento de amostras ( $W_{ot+4\%}$  e  $W_{ot-4\%}$ ) para comparar com os resultados obtidos no *software*. Os resultados mostraram que as amostras mais secas exibiram valores mais elevados que as amostras sujeitas ao umedecimento.

Apesar de ainda existir poucos estudos no Brasil relacionando o módulo de resiliência e a sucção, sabe-se que além do estado de tensões, as variações ambientais, caracterizadas pela sucção, também provocam alterações nos valores de módulo de resiliência. Segundo Ceratti *et al.* (1996), a partir da determinação da curva característica de um solo é possível relacionar o MR e a sucção, além de se obter outras propriedades mecânicas deste material. Esta curva permite prever a magnitude da variação do módulo de resiliência devido a alterações ambientais (umidade). A seguir são apresentados alguns estudos realizados tanto em campo quanto em laboratório que correlacionam a sucção com o MR.

Gehling *et al.* (1998) analisaram a influência da sucção no módulo de resiliência de quatro solos típicos de subleito do Rio Grande do Sul, medindo-a através da técnica do papel filtro. Os ensaios realizados buscaram simular as alterações ambientais sofridas pelo solo em situações de campo e mostrar que os valores de módulos resilientes podem ser previstos a partir de valores de sucção e umidade que é dada pela curva característica do material. Foi constatado que o MR cresce com a sucção até um valor de sucção a partir do qual o MR decresce bruscamente ou permanece quase constante.

Convencionalmente, o ensaio de módulo resiliente realizado em laboratório pode ser realizado com diferentes teores de umidade nos quais a sucção matricial é geralmente desconhecida durante o teste. Yang *et al.* (2008) realizaram ensaios de sucção controlada para investigar a influência da sucção matricial no módulo resiliente, através da técnica de translação do eixo e compararam estes resultados com os obtidos através da curva característica. Os resultados indicaram que as sucções matriciais medidas na amostra são consistentes com as sucções matriciais deduzidas da curva característica, correspondente ao mesmo teor de umidade. Com relação à variação de umidade durante o ensaio, os resultados indicaram claramente que o aumento da sucção resulta em uma diminuição da deformação e, portanto, um aumento do MR. Para solos de subleito em condições de umidade próximas à saturação, pode ocorrer um declínio muito acentuado no módulo resiliente devido ao baixo nível de sucção matricial no solo.

Já no trabalho realizado por Salour *et al.* (2014) se avaliou o comportamento não saturado de duas areias siltosas de subleito quanto a interação entre o módulo de resiliência e a sucção. Foram realizados diversos ensaios triaxiais de carga repetida, usando a técnica de translação dos eixos, sob condições de sucção controlada (graus de saturação de 30%, 50%, 79,3% e 94,3%). Os resultados de laboratório indicaram uma clara dependência dos dois fatores: para o primeiro solo analisado, a mudança de 30% no grau de saturação para um estado quase saturado, resultou em uma redução da sucção de 444 kPa para 7 kPa, reduzindo o MR em 51%; já para o segundo solo, esta mesma variação do grau de saturação levou a sucção de 316 kPa para quase zero, reduzindo o MR em 48%. Porém, quando se diminuiu o grau de saturação, a sucção aumentou e houve um aumento do MR.

Han e Vanapalli (2016a) avaliaram a relação entre MR e sucção para três solos comumente utilizados no Canadá e, segundo os autores, a relação dos dois parâmetros é tipicamente não linear e é influenciada pelo nível de tensão e o tipo de solo. Também verificaram que o solo com maior plasticidade apresentou ser mais sensível às mudanças na sucção e no MR.

Os ciclos de secagem e umedecimento também desempenham um papel importante na correlação do módulo de resiliência com a sucção. Nos estudos realizados por Khoury e Zaman (2004) verificou-se que as mudanças de MR e sucção por processos de secagem e umedecimento são influenciadas pelo teor de umidade inicial do material. Para esta análise foram estudados um solo arenoso e outro argiloso de Oklahoma/EUA, que sofreram variações

de umidade de  $\pm 4\%$ . Foi visto que as alterações nos valores de MR e de sucção de amostras compactadas na umidade ótima e umedecidas ( $W_{ot+4\%}$ ) são diferentes das alterações correspondentes a amostras compactadas mais secas ( $W_{ot-4\%}$ ) e umedecidas para  $W_{ot+4\%}$ . Os valores de MR e de sucção também exibiram qualitativamente uma tendência similar devido às variações de umidade.

Complementarmente, Ceratti *et al.* (2004) avaliaram a influência das trajetórias de secagem, umedecimento e secagem seguida de umedecimento na deformação elástica de um solo laterítico. Para relacionar a variação de umidade e a sucção foi utilizada a técnica do papel filtro, obtendo-se a curva característica. Os autores observaram que com o aumento do teor de umidade (umedecimento) houve um decréscimo na sucção do solo, impactando em valores de MR menores. As amostras submetidas à secagem apresentaram MR próximos às aquelas ensaiadas na umidade ótima. Os corpos de prova que sofreram secagem seguida de umedecimento apresentaram módulos inferiores às amostras submetidas somente à secagem.

Ainda com relação a variação de umidade através de ciclos de umedecimento e secagem e a sua correlação com a sucção, pode-se citar os trabalhos desenvolvidos por Freitas *et al.* (2020) e Santos (2020). Freitas *et al.* (2020) estudaram os efeitos da umidade pós-compactação e da sucção na rigidez de dois solos tropicais de subleito do estado de Goiás, com variações de umidade dentro de uma faixa de  $-5\%$  a  $+2\%$ . Foi verificado um acréscimo no módulo resiliente com o decréscimo do grau de saturação, sendo mais representativo para o solo laterítico. Santos (2020) avaliou os efeitos da umidade de pós-compactação com variações de umidade de  $-4\%$ ,  $-2\%$  e  $+2\%$  em três solos de subleito do estado do Rio Grande do Sul. Segundo a autora, para os três solos, com o acréscimo de umidade se constatou uma redução da rigidez, assim como a rigidez tende a aumentar com a secagem, a depender do teor de umidade inicial.

No Brasil já foram realizados alguns estudos de campo que correlacionam o módulo de resiliência dos solos com a sucção, como os relatados nas pesquisas de Núñez (1997), Rodrigues (1997) e Ramires (2010). Com relação ao trabalho desenvolvido por Núñez, foi estudado o comportamento mecânico de pavimentos rodoviários delgados utilizando basaltos alterados em camadas de bases e sub-bases em 10 pistas experimentais. Para medir a sucção *in situ* foram instalados tensiômetros no pavimento com o objetivo de monitorar a sucção, tentando correlacionar este dado com os MR da camada. O autor observou uma tendência de crescimento

do módulo de resiliência com a sucção e uma boa semelhança dos valores obtidos *in situ* com os obtidos em laboratório.

Muitos dos estudos que correlacionam MR e sucção propõem modelos que podem ser aplicados na prática para os diversos materiais. Han e Vanapalli (2016b) apresentam um compilado destes modelos que foram propostos na literatura nas últimas quatro décadas para estimar ou prever a variação do módulo resiliente com relação à sucção do solo para materiais que compõem as camadas do pavimento. O objetivo era auxiliar e facilitar a escolha da equação mais adequada para prever o MR, considerando a influência da sucção do solo para o material em questão. Estudos mais recentes como o de Yao *et al.* (2018), Zhang *et al.* (2019), Freitas *et al.* (2020) e Santos (2020), também apresentam modelos que consideram parâmetros importantes para obter o módulo de resiliência: densidade (propriedade do solo), sucção matricial, variação de umidade e tensões confinante e desvio.

#### 2.4.1.2 Modelos de previsão de MR considerando a influência da água e sucção

Como a variação de umidade e a sucção podem afetar o desempenho de pavimentos, alguns autores propuseram modelos de previsão que consideram estes elementos, os quais encontram-se sintetizados na Tabela 2-3.

Dos sete modelos apresentados, três foram desenvolvidos por pesquisadores nacionais, considerando solos tropicais brasileiros. Gonçalves (1999) propôs um modelo baseado no comportamento de um solo areno-argiloso, cujas variáveis inseridas são a sucção e a tensão desvio. A equação proposta por Freitas *et al.* (2020) foi embasada em dois solos tropicais de natureza laterítica e não laterítica, considerando os efeitos da sucção, da variação de umidade e da variável do estado de tensões que apresenta a maior correlação com o MR. Já a equação proposta por Santos (2020) foi desenvolvida considerando três solos de diferentes regiões do Rio Grande do Sul, também considerando a variável do estado de tensões que apresenta maior correlação com o MR e a sucção propriamente dita.

Quanto aos modelos internacionais citados, eles levam em consideração alguns outros parâmetros específicos como o primeiro invariante de tensões e a tensão octaédrica (Liang *et al.* (2008), Houry *et al.* (2009) e Zhang *et al.* (2018)). Além disso, a equação proposta por Liang *et al.* (2008) também considera o parâmetro de Bishop para solos não saturados, assim como a equação proposta por Yang *et al.* (2005).

Tabela 2-3 - Modelos de previsão de MR considerando parâmetros de umidade e sucção

Modelo/Autor	Equação Matemática
Gonçalves (1999)	$MR = k_1 \times \sigma_d^{k_2} \times \psi^{k_3}$
Yang <i>et al.</i> (2005)	$MR = k_1 \times (\sigma_d + \chi_w \psi)^{k_2}$
Liang <i>et al.</i> (2008)	$MR = k_1 \times p_a \times \left(\frac{\theta + \chi_w \psi}{p_a}\right)^{k_2} \times \left(\frac{\tau_{oct}}{p_a} + 1\right)^{k_3}$
Khoury <i>et al.</i> (2009)	$MR = k_1 \times p_a \times \left(\frac{\theta}{p_a}\right)^{k_2} \times \left(k_4 \times \frac{\tau_{oct}}{p_a}\right)^{k_3} + \alpha_1 (u_a - u_w)^{\beta_1}$
Zhang <i>et al.</i> (2018)	$MR = k_0 \times p_a \times \left(\frac{\psi}{p_a} + 1\right)^{k_1} \times \left(\frac{\theta}{p_a}\right)^{k_2} \times \left(\frac{\tau_{oct}}{p_a} + 1\right)^{k_3}$
Freitas <i>et al.</i> (2020)	$MR = e^{k_1 - k_2(w - w_{opt})} \times \psi^{k_3} \times \Delta^{k_4}$
Santos (2020)	$MR = k_1 \times p_a \times \left(\frac{\Delta}{p_a}\right)^{k_2} \times \left(\frac{\psi}{p_a} + k_3\right)^{k_4}$

Notas:  $MR$  = módulo de resiliência para qualquer teor de umidade, grau de saturação ou sucção;  $\sigma_d$  = tensão desvio;  $\theta$  = primeiro invariante de tensões ( $\theta = \sigma_1 + 2\sigma_3 = \sigma_d + 3\sigma_3$ );  $p_a$  = pressão atmosférica;  $\tau_{oct}$  = tensão de cisalhamento octaédrica ( $\tau_{oct} = 13\sqrt{2} \sigma_d$ );  $\psi = (u_a - u_w)$  = sucção do solo;  $\chi_w$  = parâmetro de Bishop para solos não saturados: ( $\chi_w = ((u_a - u_w)b / (u_a - u_w))^{0,55}$ ), segundo Khalili e Khabbaz (1998);  $(u_a - u_w)b$  = valor de entrada de ar, equivalente a sucção matricial onde o ar começa a entrar nos macroporos do solo;  $w - w_{opt}$  = diferença entre um teor de umidade qualquer e a umidade ótima;  $\Delta$  = variável do estado de tensões que tem a maior correlação com o MR;  $k_0, k_1, k_2, k_3, k_4, \alpha_1$  e  $\beta_1$  = parâmetros dos modelos.

## 2.4.2 Comportamento plástico

Conforme Pinto e Preussler (2002) a ação das cargas de tráfego sobre os pavimentos flexíveis e semi-rígidos provoca deformações dos tipos permanente e recuperáveis. As deformações permanentes permanecem mesmo após cessar o efeito da atuação da carga, sendo acumuladas ao longo da vida do pavimento desde sua abertura ao tráfego. No pavimento, ela pode ser devido à camada de revestimento asfáltico ou às camadas abaixo do revestimento, e gera defeitos do tipo afundamento de trilha de roda (ATR).

Os ensaios para analisar o comportamento plástico dos materiais têm sido realizados essencialmente em equipamentos triaxiais de cargas repetidas, que simulam as passagens dos veículos por meio de aplicações cíclicas de diferentes pares de tensões. Atualmente, há uma norma brasileira para este tipo de ensaio, a DNIT 179/2018 (DNIT, 2018b).

O modelo mais utilizado na bibliografia para deformações permanentes foi por bastante tempo o de Monismith *et al.* (1975), pois delinea o comportamento em função do número de ciclos. Porém, segundo Guimarães (2009), este não considera o estado de tensões e tem acurácia reduzida à medida que se aplica um número maior de ciclos de carga.

Guimarães (2009) propõe a utilização de um modelo de regressão múltipla em função do estado de tensões e do número de ciclos (Equação 11). É uma ferramenta matemática que descreve de forma satisfatória o comportamento observado nos ensaios triaxiais.

$$\varepsilon_p(\%) = \varphi_1 \cdot \left(\frac{\sigma_3}{\rho_0}\right)^{\varphi_2} \cdot \left(\frac{\sigma_d}{\rho_0}\right)^{\varphi_3} \cdot N^{\varphi_4} \quad (11)$$

Onde:

$\varepsilon_p$  (%) = deformação permanente específica;

$\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4$  = parâmetros de regressão;

$\sigma_3$  = tensão confinante, em kgf/cm<sup>2</sup>;

$\sigma_d$  = tensão desvio, em kgf/cm<sup>2</sup>;

$\rho_0$  = tensão de referência (tensão atmosférica em 1 kgf/cm<sup>2</sup>);

N = número de ciclos de aplicação de carga.

Relacionado a obras de pavimentação, torna-se necessário a verificação da deformação permanente após um determinado número de aplicações de carga, assim como a natureza do carregamento cíclico imposto. Para a previsão do desempenho é de grande importância saber se um determinado pavimento experimentará acumulação progressiva de deformação permanente, ou se o aumento da deformação permanente cessará, resultando em uma resposta estável e totalmente resiliente (LEKARP E DAWSON, 1998). Essa problemática introduz ao princípio do *shakedown*.

Segundo Faria (1999, *apud* Guimarães, 2009) quando em um corpo submetido a um carregamento de cargas repetidas cessam as deformações permanentes, a partir de um determinado número de aplicações de cargas, diz-se que ele entrou em *shakedown*. A partir desse instante a resposta do material será estritamente elástica, e a inexistência de deformação plástica é justificada a partir do surgimento de tensões residuais.

O objetivo principal da “Teoria do *Shakedown*” é determinar as condições limites, para determinado carregamento, na qual ocorre a estabilização das deformações permanentes. Desta forma, considerando o conceito original da teoria, é possível classificar o comportamento em quatro categorias: puramente elástico, *Shakedown* elástico, *Shakedown* plástico e colapso incremental. A partir desta análise inicial, Werkmeister *et al.* (2001) verificaram que os comportamentos ideais apresentados pela teoria não se relacionam de forma direta com a resposta observada durante os ensaios triaxiais cíclicos. Sendo assim, sugeriram três comportamentos distintos: A, B e C, conforme apresentado na Figura 2-12.

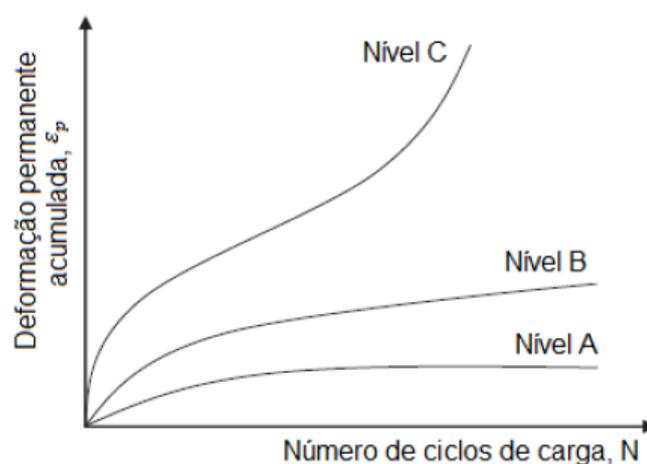


Figura 2-12 - Resposta da deformação permanente agrupada em níveis segundo a perspectiva dos estudos de Werkmeister *et al.* (2001)

Associado a isso, Guimarães (2009) propôs, a partir da observação de resultados de DP, a introdução de um quarto padrão de comportamento, o qual denominou de AB, para o qual a deformação permanente acumulada nos ciclos iniciais é bastante significativa (parecida com o comportamento tipo B), tornando-se constante (comportamento tipo A) após um determinado número de ciclos de carga.

A deformação permanente em materiais granulares e coesivos é influenciada por vários fatores como número de ciclos de carga, nível de tensão, histórico de tensões, teor de umidade, grau de compactação, teor de finos, forma da partícula e distribuição do tamanho dos grãos (LEKARP *et al.*, 2000; AHMED E ERLINGSSON, 2013). Neste trabalho, a ênfase será dada na influência do teor de umidade e sucção na resposta de deformação permanente.

#### 2.4.2.1 Influência da variação de umidade e sucção na DP

A variação do teor de umidade influencia de forma significativa nas camadas do pavimento, conforme já citado anteriormente. Porém, relacionado à deformação permanente, por ser um tema de pesquisa mais recente, os estudos sobre a influência da umidade e da sucção ainda são escassos, diferente da vasta gama de pesquisas relacionadas com o módulo de resiliência. Assim, na sequência são apresentados alguns trabalhos relacionados ao tema de interesse da presente tese.

Bayomy e Al-Sanad (1993) avaliaram dois solos arenosos de subleito do Kuwait frente a variação de umidade  $W_{ótima}$  e  $W_{ótima} \pm 2\%$  nos ensaios de deformação permanente. Foi verificado que as deformações obtidas se mostraram sensíveis tanto ao teor de umidade de compactação quanto ao nível de tensões aplicado.

O trabalho realizado por Guimarães (2001) verificou a influência da variação de umidade na deformação permanente em uma argila amarela do Rio de Janeiro e em uma laterita de Brasília. O autor ensaiou amostras em teores próximos da umidade ótima, com pequenas variações para ambos os ramos seco e úmido. O que se observou foi um acréscimo na deformação permanente para os corpos de prova mais úmidos.

Guimarães (2009) afirma que, em campo, o teor de umidade depende da umidade de compactação e da variação da umidade após a compactação. Mesmo que os cálculos do teor de água a ser adicionado tenham sido elaborados com boa acurácia, é comum admitir variações em torno do valor desejado. As normas técnicas brasileiras admitem uma variação de  $\pm 2\%$  em torno da umidade ótima, porém este fato não poderia ser levado em consideração ao se comparar solos predominantemente argilosos (com umidade de 20%, por exemplo) a solos arenosos finos ou pedregulhosos (com umidade em torno de 10%, por exemplo). O efeito causado por uma variação de 2% nestes dois casos é bem diferente.

Na pesquisa realizada por este mesmo autor, verificou-se que nos ensaios de deformação permanente realizados com solos argilosos ou areias argilosas, a variação de umidade admitida gerou uma diferença de valores de deformação permanente (DP) acumulada até cinco vezes superiores. Esta variação de umidade gerou uma diferença bem menos intensa quando se considerou o ensaio de MR. Ainda segundo o autor, a pesquisa da influência do teor de umidade

de compactação, variando em torno da umidade ótima, sobre a deformação permanente acumulada é desejável.

De modo a contribuir para o estudo da deformação permanente, Peraça (2007) avaliou solos de duas localidades do RS (São Martinho e Silveira Martins) quanto à variação de umidade e grau de compactação. Foram compactadas amostras nas condições ótimas ( $\gamma_{d_{max}}$  e  $W_{ótima}$ ), +2% e com 0,9  $\gamma_{d_{max}}$ , e ensaiadas utilizando um triaxial de cargas repetidas. Segundo o autor, para os dois solos, um aumento na umidade ótima de 2% em conjunto com um menor grau de compactação apresentou deformações 10 vezes maiores que as obtidas para os solos compactados nas condições ótimas. Considerando apenas o aumento da umidade, cada solo apresentou um comportamento diferente. O solo de São Martinho apresentou deformações superiores à condição ótima, porém não pior do que a condição com grau de compactação inferior. Já o solo de Silveira Martins apresentou deformações excessivas com o aumento de umidade, entrando em colapso.

Ribeiro (2013) estudou a influência da umidade de compactação em um solo arenoso laterítico do estado de São Paulo. As amostras foram compactadas na umidade ótima e  $\pm 1,5\%$  em relação a ótima. A autora afirma que o aumento da umidade inicial gerou um aumento da deformação permanente, tanto quanto maior a relação das tensões aplicadas.

Nos estudos realizados por Lima *et al.* (2019b), foi avaliado o potencial à deformação permanente de quatro solos brasileiros com diferentes teores de umidade na compactação ( $\pm 2\%$  em relação a umidade ótima). Foi visualizado que a deformação permanente aumentou quando o teor de umidade de compactação estava acima do ótimo e que o material no ramo úmido era mais propenso ao acúmulo de DP para níveis de tensões maiores. Além disso, a umidade comprometeu o desempenho do material para tensões mais altas, enquanto o material mais seco mostrou uma tendência à estabilização da deformação permanente.

A relação da deformação permanente com a sucção ainda é pouco discutida no meio acadêmico brasileiro, mas a nível internacional, algumas pesquisas já apresentam resultados satisfatórios.

Edil e Motan (1979) avaliaram dois materiais do estado americano de Wisconsin/EUA, onde verificaram que quanto maior o teor de umidade de compactação e de pós-compactação, maior a deformação permanente. Além disso, para os dois materiais estudados, observou-se um

decréscimo das deformações plásticas de 2,5 a 7 vezes com o aumento da sucção, dependendo da condição de compactação da amostra.

Já o trabalho apresentado por Jing *et al.* (2016) apresentou resultados referentes ao comportamento plástico de uma areia fina de Missilac/França. Foi considerada variações de umidade nas condições iniciais ( $\pm 2\%$  em relação a ótima) e nos teores de finos (4%, 7,5% e 15,3%). Os resultados mostraram uma significativa influência do teor de umidade e da fração de finos no comportamento à deformação permanente. A DP aumentou com o aumento da umidade e se verificou que a influência dos finos depende da sensibilidade das partículas à presença de água e do teor de umidade inicial. Além disso, foi possível correlacionar os resultados com valores de sucção, obtidos diretamente da curva característica do material, obtida pela técnica do papel filtro. Assim, observou-se que a DP diminui significativamente com o aumento da sucção.

Salour e Erlingsson (2017) avaliaram duas areias siltosas utilizadas no subleito de pavimentos em duas regiões da Suécia (Luleå e Torpsbruk), utilizando um triaxial de cargas repetidas em multiestágios. O ensaio triaxial multiestágios foi introduzido de modo a simular a real variação das tensões a qual o pavimento está sujeito. Os referidos testes foram realizados em amostras com diferentes teores de umidade e com controle de sucção através da utilização de um sistema triaxial capaz de controlar a água e a poropressão ao longo do ensaio. Os autores verificaram que uma redução no teor de umidade resulta em um decréscimo relevante nas deformações permanentes, evidenciando a significativa influência da variação de umidade pós-compactação nos valores de DP.

Além dos estudos relacionando a sucção com MR, Santos (2020) também avaliou a influência da sucção na deformação permanente para os mesmos solos. Conforme a autora, as deformações permanentes aumentaram com o aumento da umidade de compactação e de pós-compactação, independentemente do estado de tensões analisado. Com relação a sucção, se verificou uma redução da sucção matricial do solo devido ao acréscimo do teor de umidade, tanto na compactação, como na pós-compactação.

#### 2.4.2.2 Modelos de previsão de DP considerando a influência da água e sucção

Da mesma maneira que se destacou modelos de previsão para MR que considerassem a variação de umidade e sucção, também há na literatura modelos que relacionam estes parâmetros com a deformação permanente. Há de se mencionar que foram encontrados poucos dados na literatura acerca de modelos de previsão que incorporassem estas variáveis as deformações plásticas. Neste contexto destacam-se as pesquisas em nível nacional de Ribeiro (2013), Lima (2020) e Santos (2020), com equações apresentadas na Tabela 2-4.

Tabela 2-4 - Modelos de previsão de DP considerando parâmetros de umidade e sucção

<b>Modelo/ Autor</b>	<b>Equação Matemática</b>
Ribeiro (2013)	$\varepsilon_p = \theta_1 \times N^{\theta_2} \times \left(\frac{\sigma_d}{\sigma_3}\right)^{\theta_3} \times w^{\theta_4}$
Lima (2020)	$\varepsilon_p(\%) = \left(\frac{\sigma_3}{\sigma_{atm}}\right)^{\psi_0} \times \frac{\sigma_d}{\sigma_{atm}}^{\psi_1} \times N^{\psi_2} \times \left(\psi_3 \times w + \psi_4 \left(\frac{\sigma_d}{\sigma_{atm}} \times w\right) + \psi_5 \left(\frac{\sigma_d}{\sigma_{atm}} \times w^2\right) + \psi_6 \times w^2\right)$
Santos (2020)	$\varepsilon_p(\%) = \left(\frac{\sigma_3}{p_a}\right)^{\psi_1} \times \left(\frac{\sigma_d}{p_a}\right)^{\psi_2} \times N^{\psi_3} \times \left(e^{\psi_4 - \psi_5 \times (w - w_{opt})}\right) \times \left(\frac{\psi_m}{p_a}\right)^{\psi_6}$

Notas:  $\varepsilon_p$  = deformação permanente; N = número de aplicações de carga;  $\sigma_d$  = tensão desvio;  $\sigma_3$  = tensão confinante;  $\sigma_d/\sigma_3$  = razão das tensões; w = umidade de compactação (%); w-w<sub>opt</sub> = diferença entre um teor de umidade qualquer e a umidade ótima;  $\sigma_{atm}$  e  $p_a$  = pressão atmosférica;  $\psi_m$  = sucção matricial do solo;  $\theta_{1-i}$  = parâmetros do modelo;  $\psi_{0-i}$  = parâmetros do modelo.

Ribeiro (2013) propôs um modelo desenvolvido com base nos resultados experimentais de um solo arenoso laterítico compactado em diferentes teores de umidade iniciais em relação a umidade ótima ( $\pm 1,5\%$ ). A referida equação considera o número de ciclos de aplicação de carga, a umidade de compactação e a razão entre as tensões desvio e confinante.

No trabalho realizado por Lima (2020) foi apresentado um modelo de previsão de deformação permanente que considera os efeitos da umidade de compactação, utilizando como base a equação proposta por Guimarães (2009). A equação proposta foi embasada no estudo de quatro solos tropicais de diferentes classificações MCT, considerando a umidade ótima e acima da ótima.

Já a equação proposta por Santos (2020) foi desenvolvida considerando três solos de diferentes regiões do Rio Grande do Sul, considerando a umidade ótima e acima da ótima. Esta equação foi formulada a partir da equação proposta por Guimarães (2009), sendo adicionado os parâmetros de variação de umidade e sucção.

Como visto, há poucos estudos acerca da influência da variação de umidade e sucção no comportamento frente a deformação permanente de solos. O exposto evidenciou a relevância do tema desta tese e demonstrou a necessidade de ampliação do conhecimento com mais avanços nesta linha de pesquisa.

### 3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Neste capítulo serão apresentados os solos a serem utilizados no estudo, bem como os procedimentos e equipamentos adotados durante a realização do programa experimental. O programa experimental foi desenvolvido com o intuito de avaliar o efeito do grau de saturação no comportamento de solos empregados em pavimentos no Brasil, de modo a estimar o comportamento dos mesmos em campo considerando a influência da variação de umidade. Os ensaios realizados incluem ensaios de caracterização física e mineralógica, ensaios para a determinação da curva característica, módulo de resiliência e deformação permanente. Para melhor visualização e compreensão do programa experimental desenvolvido neste trabalho, são apresentadas na Figura 3-1, as etapas realizadas para alcançar os resultados.

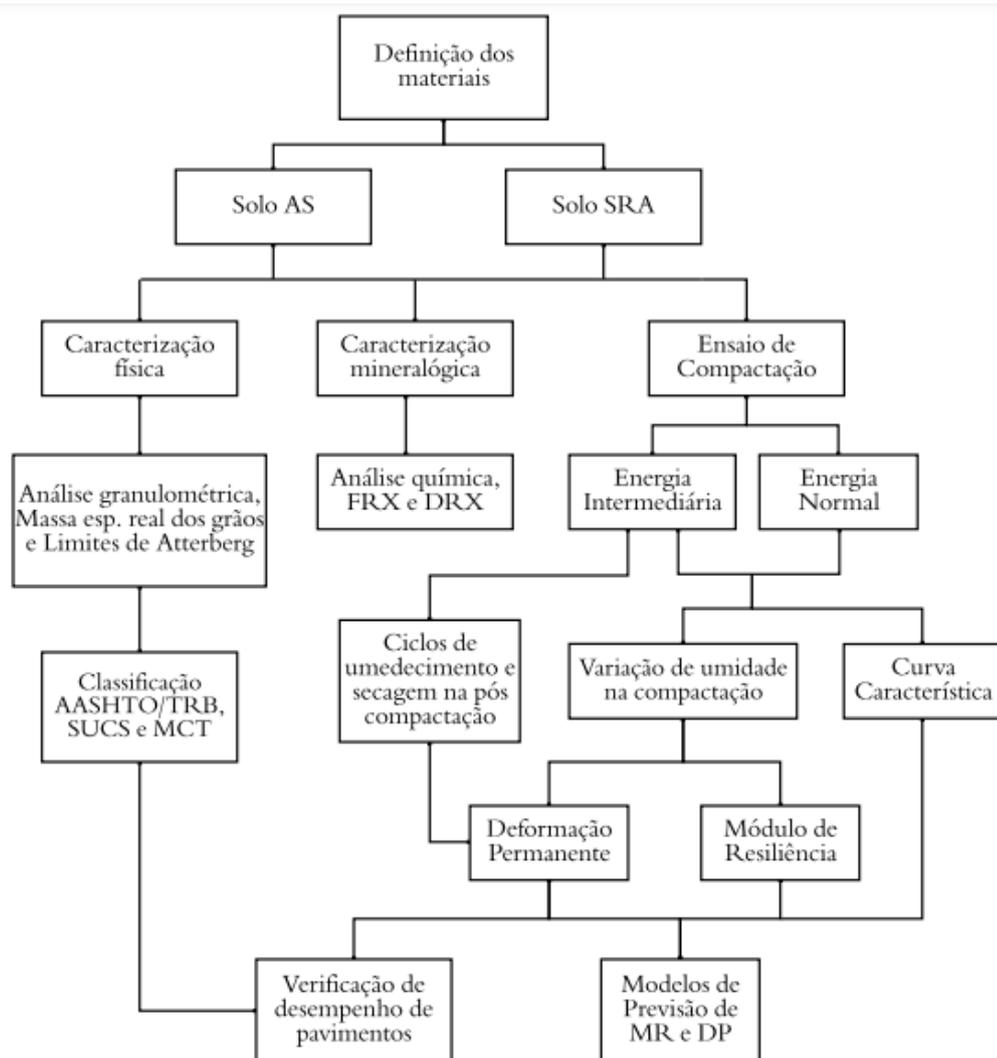


Figura 3-1 - Fluxograma dos procedimentos metodológicos da presente pesquisa

Os materiais utilizados na pesquisa correspondem a dois solos residuais, os quais foram coletados em jazidas de duas localidades do Rio Grande do Sul. Mais detalhes acerca da escolha, origem, coleta e caracterização destes materiais estão descritos no próximo subitem.

Além de analisar o comportamento de diferentes materiais utilizados em camadas de um pavimento, também se definiu a utilização de duas energias de compactação: normal e intermediária. A escolha destas duas energias ocorreu em razão da possível utilização destes solos como materiais a compor as camadas de subleito, reforço e sub-base de pavimentos. Outro ponto importante para a análise do comportamento e deformabilidade destes materiais foi a variação de umidade durante e após a compactação em +1% e -2% em relação a umidade ótima. Com esta variação se quis simular um possível erro de umidade durante a execução da camada do pavimento e variações de umidade que ocorrem com o tempo, em razão de variações do lençol freático, infiltrações, entre outros. Mais detalhes acerca da variação de umidade utilizada, método e energia de compactação estão descritos a seguir.

Os ensaios mecânicos foram realizados por meio do equipamento triaxial de cargas repetidas, o qual permite executar ambos os ensaios de módulo de resiliência (MR) e de deformação permanente (DP), dependendo da rotina experimental praticada. Os ensaios de MR e DP submetem os materiais a uma ampla gama de níveis de tensões, conforme as normas DNIT 134/2018-ME (DNIT, 2018a) e DNIT 179/2018-IE (DNIT, 2018b). Estes ensaios envolvem a aplicação de 18 e 9 pares de tensões, para MR e DP, respectivamente. Apenas para o ensaio de DP foram utilizados um número reduzido de pares de tensões (6) em razão da redução do plano experimental. Mais informações acerca das combinações e magnitudes adotadas para estes pares de tensões são descritas nos itens 3.2.4.2 e 3.2.4.3.

Outro ensaio realizado nesta pesquisa foi a construção de curvas características (CC) utilizando o método do papel filtro. Além da obtenção da curva para cada material e energia especificada, buscou-se também o melhor ajuste através de modelos matemáticos consagrados na literatura e sua histerese, com ciclos de secagem e umedecimento.

Por fim, objetivando uma melhor compreensão no que tange a dimensão e amplitude do programa experimental desenvolvido em laboratório, a Tabela 3-1 apresenta uma síntese em termos de materiais, ensaios, variáveis, ciclos e tempos associados a sua efetivação. Em resumo, o programa experimental envolveu a execução de 95 corpos de prova, considerando amostras

para ensaios de MR, DP e CC, além de um tempo médio total de 1594 horas de ensaio, considerando amostras ensaiadas diretamente no triaxial de cargas repetidas (MR e DP) e amostras que sofreram ciclos de umedecimento e secagem na curva característica (de 24 a 34 ciclos). Salienta-se, além disso, a inerente demanda de repetições em decorrência de imprevistos, que acabam por aumentar ainda mais a quantidade de moldagens, ensaios e ciclos. Mais detalhes acerca dos ensaios, definição de parâmetros, entre outros fatores, será apresentado na sequência.

Tabela 3-1 - Síntese dos ensaios mecânicos integrantes do programa experimental

Solo - Energia	Ensaio	Pares de tensões	Nº de ensaios	Horas/Ensaio	Ciclos	Horas
AS-EN	MR - 2%	18	2	0,92	-	1,84
	MR +1%	18	2	0,92	-	1,84
	DP - 2%	6	6	20,84	-	125,04
	DP +1%	6	6	20,84	-	125,04
	DP ciclos	1	1	4h por ciclo + 20,84h	2	28,84
	CC - sec/umed	-	3	2h por ciclo	34	68
	CC - umed/sec	-	3	2h por ciclo	24	48
AS-EI	MR - 2%	18	2	0,92	-	1,84
	MR +1%	18	2	0,92	-	1,84
	DP - 2%	6	6	20,84	-	125,04
	DP +1%	6	6	20,84	-	125,04
	DP ciclos	1	1	4h por ciclo + 20,84h	2	28,84
	CC - sec/umed	-	3	2h por ciclo	34	68
	CC - umed/sec	-	3	2h por ciclo	24	48
SRA - EN	MR - 2%	18	2	0,92	-	1,84
	MR +1%	18	2	0,92	-	1,84
	DP - 2%	6	6	20,84	-	125,04
	DP +1%	6	6	20,84	-	125,04
	DP ciclos	1	1	4h por ciclo + 20,84h	2	28,84
	CC - sec/umed	-	3	2h por ciclo	34	68
	CC - umed/sec	-	3	2h por ciclo	24	48
SRA - EI	MR - 2%	18	2	0,92	-	1,84
	MR +1%	18	2	0,92	-	1,84
	DP - 2%	6	6	20,84	-	125,04
	DP +1%	6	6	20,84	-	125,04
	DP ciclos	1	1	4h por ciclo + 20,84h	2	28,84
	CC - sec/umed	-	3	2h por ciclo	34	68
	CC - umed/sec	-	3	2h por ciclo	24	48

### 3.1 PROCEDÊNCIA DOS SOLOS

Os solos a serem utilizados na presente tese são oriundos de diferentes regiões do estado do Rio Grande do Sul. A localização das jazidas dos solos esta apresentada na Tabela 3-2 e apontado no mapa da Figura 3-2.

A escolha dos materiais foi feita baseada em diversos fatores, como:

- a) Variabilidade: buscou-se dois materiais com características distintas quanto aos aspectos físicos, geotécnicos e pedológicos;
- b) Disponibilidade: optou-se por selecionar materiais que já estavam sendo explorados em jazidas existentes e localizadas próximas ao município de Porto Alegre;
- c) Aplicabilidade: foram definidos materiais que possivelmente apresentassem uma maior abrangência de comportamento quanto a deformação permanente no emprego destes como camadas inferiores (sub-base e reforço) de pavimentos, mas que também fossem comumente utilizados no meio técnico e/ou estudados em pesquisas anteriores no campo da pavimentação.

É importante frisar que a presente pesquisa faz parte de um projeto a nível nacional, que pretende avaliar o comportamento mecânico de materiais granulares e solos tipicamente empregados em pavimentos no Brasil. A ampla pesquisa envolve a obtenção de dados por meio de ensaios em laboratório e em pistas experimentais e sua aplicação na calibração de modelos de previsão de desempenho, visando a incorporação em um método único de dimensionamento nacional (MeDiNa). A definição dos materiais nesta pesquisa também teve a influência do projeto como um todo, visto que os mesmos solos também estão sendo empregados nas camadas inferiores das pistas experimentais em construção que serão submetidas ao simulador de tráfego no LAPAV/UFRGS.

Tabela 3-2 - Descrição dos locais de coleta dos solos em estudo

Solo	Sigla	Município	Coordenadas	
			X	Y
Argissolo	AS	Gravataí/RS	51°02'33"W	29°53'31"S
Solo Residual de Arenito Botucatu	SRA	São Leopoldo /RS	51°10'26"W	29°42'56"S

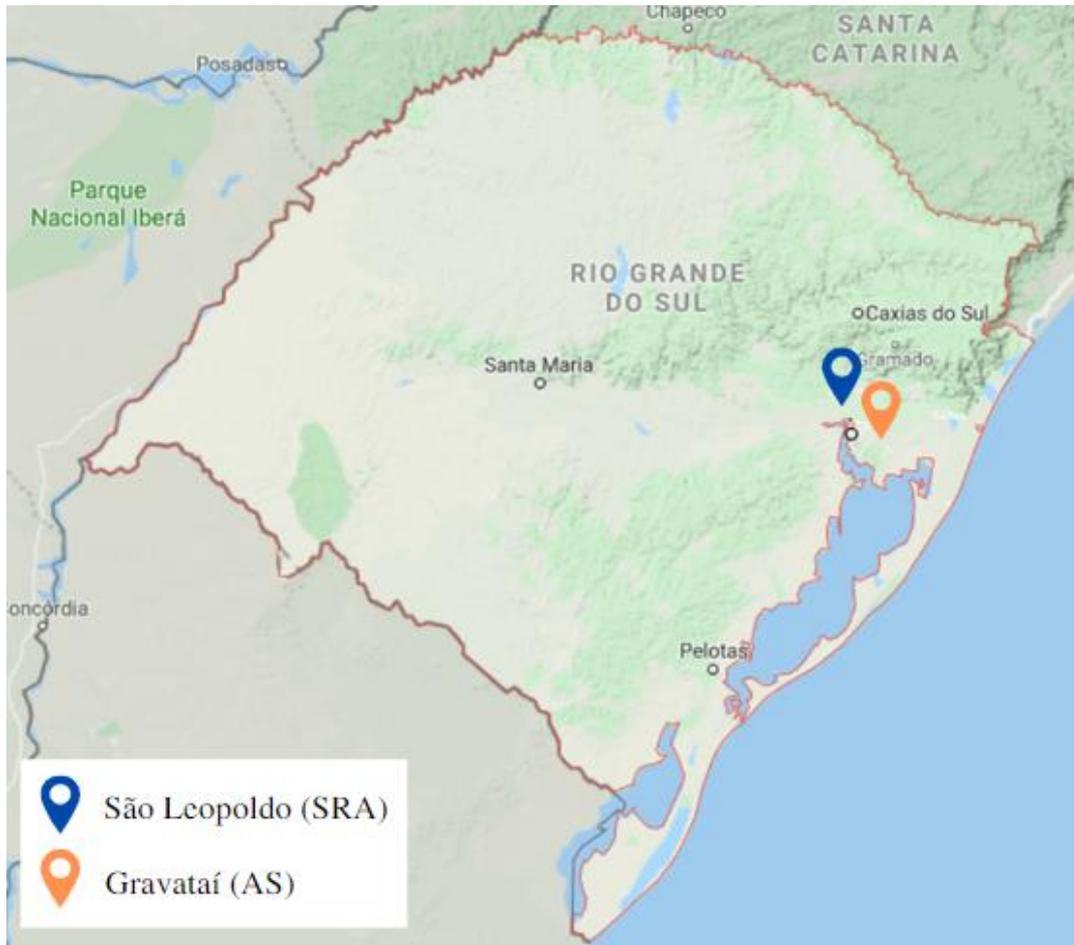


Figura 3-2 - Localização das jazidas dos solos coletados

Os dois solos coletados foram armazenados em bombonas de 50 litros, previamente identificadas e transportadas até o Laboratório de Pavimentação da UFRGS, em Porto Alegre – RS. Na Figura 3-3 são apresentados os solos, na condição natural, já secos e destorroados, que estão sendo estudados nesse trabalho. Nos próximos itens serão apresentados os mesmos em detalhes.



Figura 3-3 - Solos utilizados na pesquisa: (a) Argissolo; (b) Solo Residual de Arenito Botucatu

### 3.1.1 Argissolo

O Argissolo, designado nesta pesquisa como AS, foi coletado em uma jazida comercial no município de Gravataí, próximo à rodovia RS-118, conforme posição geográfica apresentada anteriormente na Tabela 3-2. Sua denominação na presente pesquisa provém do campo da pedologia, visto que, o solo em questão se enquadra no grupo de solos classificados na literatura atual como argissolos. Este material é um solo mineral com horizonte B textural, contendo argilas de atividade baixa, apresentando uma coloração avermelhada. Apresenta comportamento laterítico, tendendo a apresentar propriedades físico-mecânicas propícias ao seu emprego como material de pavimentação, segundo os conceitos da Metodologia MCT para classificação de solos tropicais (NOGAMI E VILLIBOR, 1981). A Figura 3-4 apresenta um registro fotográfico com detalhes da jazida explorada e do perfil estratigráfico do solo no local.

Este tipo de solo é comumente utilizado em obras rodoviárias e de terraplenagem no Rio Grande do Sul. Em pavimentação, estes solos normalmente surgem como opção de material constituinte do subleito e/ou reforço do subleito, podendo ser utilizado até mesmo em camadas de sub-base e/ou base. Por este motivo, um argissolo com comportamento laterítico proveniente da mesma região, já foi utilizado como reforço de subleito em pistas experimentais construídas no Laboratório de Pavimentação da UFRGS, conforme detalhado por Núñez (1997).



Figura 3-4 - Jazida do solo AS localizada em Gravataí/RS: (a) panorama geral da jazida, (b) perfil estratigráfico do solo

### 3.1.2 Solo Residual de Arenito Botucatu

O Solo Residual de Arenito Botucatu, designado nesta pesquisa como SRA, foi coletado em uma jazida comercial no município de São Leopoldo, na região de Vila Scharlau, ao longo da rodovia RS-240. Sua denominação na presente pesquisa é decorrente de sua formação e origem litológica, uma vez que se trata de um solo procedente do intemperismo físico e químico de afloramentos de arenito da Formação Botucatu. A Figura 3-5 apresenta um panorama geral da jazida explorada e o perfil estratigráfico do solo no local.

Este é um solo residual jovem (horizonte C saprolítico) proveniente da Formação Botucatu, uma formação geológica na Bacia do Paraná, com estrutura típica decorrente de deposição eólica. O solo saprolítico de arenito Botucatu, mais especificamente da localidade de Vila Scharlau, já é bastante difundido no meio acadêmico da UFRGS na área da engenharia civil. O material tem sido comumente estudado em dissertações e teses envolvendo a sua estabilização físico-química a partir de diferentes recursos (cimento, cal, fibras, etc.), seja no campo da pavimentação, seja no campo das fundações, podendo citar os trabalhos de Núñez (1991), Thomé (1999), Lopes Junior (2011), Winter (2018), entre outros. Apesar disso, são poucos os trabalhos acerca do comportamento deste solo para a pavimentação em seu estado compactado, ou seja, sem o emprego de estabilizantes, submetidos a ensaios pertinentes à mecânica dos pavimentos.



Figura 3-5 - Jazida do solo SRA localizada em São Leopoldo/RS: (a) panorama geral da jazida, (b) perfil estratigráfico do solo

Com base no mapa pedológico detalhado do estado do Rio Grande do Sul, bem como nas informações apresentadas por Santos *et al.* (2018) e Streck *et al.* (2008), foi possível classificar os solos segundo o SiBCS, os quais estão apresentados no item 4.1.

## 3.2 ENSAIOS DE LABORATÓRIO

Na sequência, são descritos os ensaios de laboratório utilizados na caracterização dos materiais, bem como os procedimentos adotados na compactação dos solos, assim como na moldagem dos corpos de prova. São indicadas as variações de umidades utilizadas e como ela foi realizada, bem como a quantidade de amostras estudadas no desenvolvimento deste trabalho.

### 3.2.1 Caracterização dos solos

As amostras de solo foram secas ao ar, destorroadas cuidadosamente com o auxílio de almofariz e mão de gral emborrachada (de modo a evitar a quebra dos grãos) e homogeneizadas, segundo a NBR 6457 (ABNT, 2016a). Após foi realizado o quarteamento das amostras, onde as mesmas foram armazenadas em sacos plásticos identificados, para posterior utilização.

No Laboratório de Geotecnologia da UFRGS (LAGEOTEC), foram realizados ensaios de caracterização básica dos solos. A massa específica real dos grãos dos solos é determinada de acordo com a NBR 6508 (ABNT, 1984). A análise granulométrica dos solos foi realizada por

peneiramento e sedimentação, conforme a NBR 7181 (ABNT, 2016b). Para o ensaio de sedimentação foi utilizado o defloculante hexametáfosfato de sódio com carbonato de sódio. A lavagem do material (suspensão) proveniente do ensaio de sedimentação foi realizada na peneira 0,075mm com água potável a baixa pressão, com movimentos circulares de peneiramento e sem auxílio das mãos do operador.

O limite de liquidez (LL) e o limite de plasticidade (LP) dos solos são determinados com base na NBR 6459 (ABNT, 2016c) e na NBR 7180 (ABNT, 2016d), respectivamente. Para os ensaios de Limites de Atterberg, utilizou-se o material passante na peneira #40 (0,42 mm). Quanto aos resultados de LP, esses correspondem à média de no mínimo três repetições, sendo que nenhuma deve diferir mais do que 5% da média.

Uma rotina comum na Engenharia Geotécnica era classificar o solo em função apenas dos limites de Atterberg e do tamanho das partículas. Mais recentemente, a estrutura, a mineralogia e a análise química foram incluídas como fatores que produzem um melhor conhecimento e entendimento do comportamento mecânico dos solos. Os métodos de caracterização mineralógica mais utilizados são: análise química, determinação da capacidade de troca de cátions, microscopia óptica e eletrônica, difração de raios-X e espectrometria de fluorescência de raios-X.

A composição química total dos solos, relacionada às características pedológicas, foi realizada pelo Laboratório de Análises de Solos da UFRGS, seguindo a Metodologia ROLAS (Rede Oficial de Laboratórios de Análise de Solo e de Tecido Vegetal dos Estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina). Com esta análise é possível verificar o potencial hidrogeniônico (pH), presença de matéria orgânica, capacidade de troca catiônica (CTC), saturação de bases e saturação de alumínio, além do teor de enxofre.

Para determinação dos óxidos mais abundantes em cada solo, foram realizadas análises por fluorescência de raios X (FRX) pelo Instituto Tecnológico de Micropaleontologia (ITT Fossil) da Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS) utilizando o método Omnian (semi-quantitativo) com o equipamento Epsilon 1. A amostra de 2g utilizada foi seca e passada na peneira 0,075mm (nº 200) para a realização do ensaio.

Também foi realizado o ensaio de difratometria de raios X (DRX), a fim de determinar os argilominerais e outros componentes cristalinos presentes nas frações mais finas dos solos. Esse

ensaio também foi realizado pelo Instituto Tecnológico de Micropaleontologia (ITT Fossil) da UNISINOS. As amostras foram secas, destorroadas e passadas na peneira 0,045 mm (n° 325) até se obter uma fração de 2g. As análises DRX foram realizadas pelo método do pó em um difratômetro de raios X Empyrean Panalytical, com configuração reflexão-transmissão com spinner ajustado em duas revoluções por segundo, em um range de 2 a 75° ( $2\theta$ ), com passo de 0,01 durante 100s, equipado com um tubo de cobre, operando a 40 kV e 40 mA. Foi utilizada geometria de feixe incidente Bragg-Brentano HD, fenda soller 0,02 rad, máscara fixa de 20 mm, fenda fixa anti-espalhamento de 1/4" e fenda fixa divergente de 1/16". No feixe difratado foi montada fenda anti-espalhamento 7,5 mm e fenda soller de 0,02 rad. O difratômetro foi equipado com detector de área PIXcel 3D Medipix3 com 255 canais.

De forma geral, a análise DRX identifica a estrutura cristalina dos minerais, diferentemente das análises FRX que é responsável por identificar os elementos químicos presentes nas amostras.

Além da classificação tradicional segundo o sistema AASHTO e SUCS (Sistema Unificado de Classificação dos Solos), os solos também foram classificados através da metodologia MCT (Miniatura, Compactado, Tropical), desenvolvida por Nogami e Villibor (1981). Esta classifica especialmente solos tropicais, subdividindo-os em duas classes: solos lateríticos (L) e não lateríticos (N). Os ensaios necessários a esta metodologia foram feitos pelo Laboratório de Geotecnia da COPPE/UFRJ, conforme detalhado por Lima (2020), bem como o enquadramento dos solos na classificação.

### 3.2.2 Compactação

Os ensaios de compactação dos solos foram realizados segundo a NBR 7182 (ABNT, 2016e). Quando do emprego da energia de compactação, optou-se por utilizar a energia normal e a energia intermediária em razão da possível utilização destes solos como materiais a compor as camadas de subleito, reforço e sub-base de pavimentos.

Para o uso da energia de compactação Proctor Normal foi utilizado o cilindro e o soquete pequeno, sendo aplicados 26 golpes em cada uma das três camadas. Já para o uso da energia de compactação Proctor Intermediária, utilizou-se o cilindro pequeno e o soquete grande, resultando em três camadas com 21 golpes aplicados em cada uma delas. As características e o número de golpes foram respeitados e se seguiu conforme o recomendado pela norma. Ressalta-

se, que as amostras de solo foram preparadas respeitando as dimensões dos cilindros usados, de acordo com a NBR 6457 (ABNT, 2016a).

Ao realizar os ensaios de compactação para os solos naturais, deve-se adicionar teores de umidade ao solo, considerando-se uma variação de 2% entre os pontos da curva. As misturas de solo e água ficam fechadas em sacos plásticos por um período de 24 horas, a fim de realizar a homogeneização das misturas.

No dia seguinte, compactam-se os pontos, pesa-se o molde com o material compactado, devendo-se retirar uma amostra de material para verificação da umidade. Organiza-se os resultados graficamente para obtenção dos parâmetros de massa específica aparente seca máxima e de teor de umidade ótimo.

### 3.2.3 Determinação da Curva Característica

A curva característica permite a visualização sobre a variação da sucção com diferentes teores de umidade que o solo pode apresentar. Apesar de ser um parâmetro essencial para o estudo de solos não saturados, a medição de valores precisos de sucção é ainda considerada difícil. A curva característica para os solos em estudo foi obtida através do método do papel filtro, sendo uma técnica simples, de baixo custo e com uma ampla faixa de medida de sucção (entre 30 a 30000 kPa). Este método apresenta apenas uma normatização internacional, a ASTM D 5298-16 (2016). Além de seguir as diretrizes da norma seguiram-se as instruções de execução do ensaio contidas em Marinho (1995) e Feuerharmel (2007). Este ensaio foi realizado no Laboratório de Geotecnologia da UFRGS.

#### 3.2.3.1 Método do Papel Filtro

O método do papel filtro consiste em colocar um pedaço de papel filtro em contato íntimo com uma amostra de solo até que seja estabelecido o equilíbrio de sucção mátrica entre o papel e a amostra. O valor de sucção é obtido através das curvas de calibração do papel filtro. O papel filtro utilizado neste trabalho foi o Whatman n°42, cuja umidade seco ao ar é de aproximadamente 6%. As equações de calibração para este papel foram apresentadas no item 2.3.5.1.

A seguir estão apresentados os materiais necessários para a execução da técnica, bem como o procedimento de ensaio a ser utilizado.

- Material

Os materiais utilizados para a medição da sucção mátrica através da técnica do papel filtro compreendem basicamente: anéis metálicos de 5 cm de diâmetro e 2 cm de altura, papel filtro Whatman n°42, balança com precisão de 0,0001g (para pesagem dos papéis filtro), balança com precisão de 0,01g (para pesagem das amostras ensaiadas), estufa de 60°C (para secagem do papel filtro), filme de PVC, papel alumínio, recipientes de vidro com tampa identificados (pesa filtro), tampas de cápsulas de alumínio identificadas, pinça metálica (para manusear o papel filtro), tesoura, conta-gotas e caixa de isopor (para armazenar as amostras durante o período de equalização e reduzir a variação de temperatura).

- Ensaio

O método do papel filtro é bastante simples, entretanto precauções devem ser tomadas durante a sua execução para evitar erros no valor de sucção obtido. O procedimento adotado para realizar o ensaio é seguido pelas instruções de execução do ensaio contidas em Marinho (1995) e Feuerharmel (2007), conforme dito anteriormente.

Para a preparação dos corpos de prova, os mesmos foram moldados na umidade ótima em um molde tripartido de 10 cm de diâmetro por 20 cm de altura, porém de duas maneiras distintas: para o solo SRA a compactação ocorreu por vibração e para o solo AS a compactação foi dinâmica, por impacto. A escolha destes dois métodos ocorreu em razão de que a compactação é um fator que apresenta uma significativa influência na forma como ocorre o acomodamento das partículas e conseqüentemente no comportamento do material frente aos esforços mecânicos. As normas do DNIT, aqui tidas como referência, especificam a utilização da tradicional compactação dinâmica por impacto do soquete Proctor. Nesta pesquisa, no entanto, buscou-se adotar o procedimento que melhor reproduza a compactação executada nas camadas *in situ*, condicionada ao tipo de material. Desta forma, para o solo SRA, tendo em vista sua composição granulométrica predominantemente granular, optou-se pelo emprego da compactação vibratória, realizada por meio de um martetele vibratório associado a uma sapata circular. Esta mesma diferenciação do método de compactação também foi utilizada para a moldagem dos corpos de prova para os ensaios de MR e DP.

Após a compactação, tanto dinâmica quanto vibratória, o solo foi extraído de dentro do molde tripartido para então, com a ajuda do anel de PVC (2 cm de altura por 5 cm de diâmetro), se esculpir a amostra deste anel, permanecendo esta até o final do ensaio. A Figura 3-6 mostra este processo sendo executado.



Figura 3-6 – Amostra de solo sendo esculpida com o auxílio do anel de PVC

Após o solo ser esculpido dentro do anel de PVC, os anéis são protegidos na parte inferior com uma camada de saco plástico e envolvidos nas laterais por fita durex. Este cuidado é tomado para evitar a possível perda de material durante o ensaio, além de evitar que o solo se desprenda do anel, em caso de retração do mesmo durante a trajetória de secagem.

O ponto de partida para as curvas características ocorreu na umidade ótima obtida através do ensaio de compactação, para a devida energia e, a partir daí as amostras foram umedecidas ou secadas. Este procedimento é recomendado para melhor reproduzir os ciclos de umedecimento e secagem que ocorrem com o material nas condições de campo.

Inicialmente foram colocados dois pedaços de papel filtro, com área superior a 2 cm<sup>2</sup>, na parte superior da amostra, sendo que eles não devem se sobrepor. O papel filtro deve ser utilizado diretamente da caixa, na condição seco ao ar e o seu manuseio durante todo o ensaio deve ser realizado com o auxílio de uma pinça metálica, para evitar qualquer alteração nas características originais do papel. Após a colocação dos papéis, a amostra foi protegida com filme plástico de PVC, papel alumínio e, por fim, um saco plástico lacrado, de forma a garantir que o fluxo ocorra somente entre o solo e o papel, sem interferência do ambiente externo. As etapas deste processo são apresentadas na Figura 3-7.

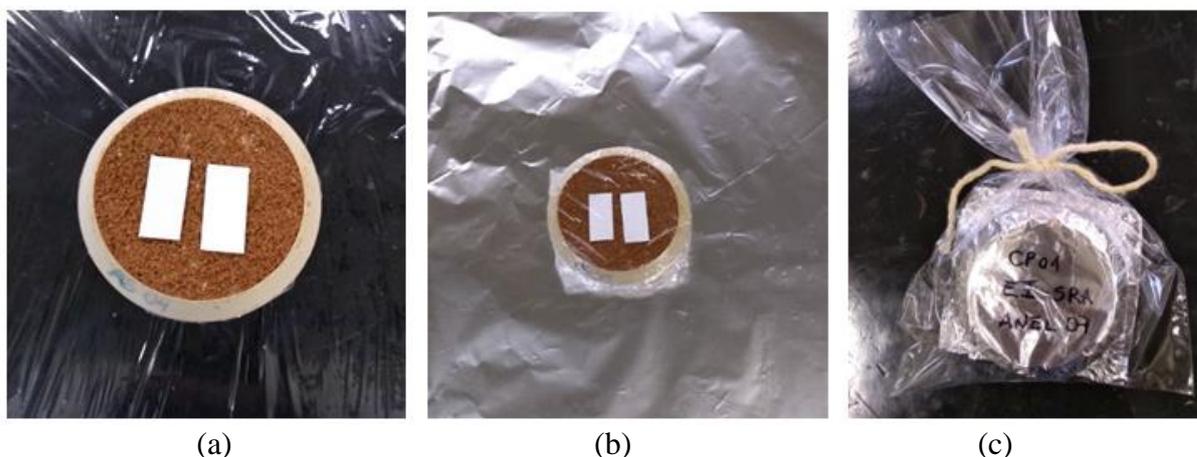


Figura 3-7 – Etapas de fechamento da amostra: (a) colocação dos papéis filtro sobre a amostra; (b) amostra embalada com filme plástico; e (c) amostra embalada com papel alumínio e saco plástico, devidamente identificada

As amostras já embrulhadas foram armazenadas em uma caixa de isopor até que o equilíbrio de sucção fosse alcançado. O período de equilíbrio a ser utilizado na medição da sucção mátrica foi de 7 dias para o solo SRA e de 14 dias para o solo AS. A norma ASTM D5298 (2016) recomenda um tempo de equilíbrio de 7 dias, independentemente do tipo e magnitude da sucção, porém optou-se por períodos de equilíbrio de sucção diferentes em razão do tipo de material analisado, onde o solo AS, por ser mais argiloso, poderia demorar mais tempo para equalizar. Depois de alcançado o equilíbrio, as amostras são desembulhadas, os papéis filtro são removidos rapidamente e colocados em um recipiente de vidro com tampa. Esta operação deve ocorrer entre 3 a 5 segundos, conforme recomendação da norma ASTM D5298 (2016), para que não haja ganho ou perda de umidade. Determina-se o peso úmido do papel filtro usando uma balança de precisão de 0,0001g.

Depois de obtido o peso úmido, o papel filtro foi retirado do recipiente e colocado em uma tampa de cápsula (previamente identificada com a mesma numeração do recipiente de vidro) e levado a uma estufa de 60°C durante 48 horas. A justificativa do uso desta estufa refere-se ao pouco uso da mesma no LAGEOTEC e conseqüentemente a que apresenta menor probabilidade de o papel filtro ser contaminado por partículas de outros solos.

Após a secagem, o papel filtro foi retirado da estufa e rapidamente colocado no mesmo recipiente de vidro no qual se obteve o peso úmido, determinando-se o peso seco do conjunto utilizando a balança de precisão de 0,0001g. Depois de obtido o peso seco do papel, o mesmo foi descartado e o vidro pesado. Estes dados possibilitam o cálculo do teor de umidade do papel

filtro, que é utilizado como dado de entrada na curva de calibração do papel para se obter a sucção existente na amostra. Este valor de sucção e o teor de umidade da amostra (ou grau de saturação) correspondem a um ponto da curva característica.

A obtenção do próximo ponto da trajetória de umedecimento ou secagem foi realizada modificando-se a umidade da amostra. Para isso deve-se controlar o peso da amostra em uma balança de precisão de 0,01g. As amostras em processo de umedecimento tiveram seu aumento no teor de umidade através da colocação de água destilada com o auxílio de um conta-gotas. Durante o processo de umedecimento é recomendado esperar no mínimo uma hora antes de colocar o papel filtro e fechar a amostra, para garantir que a água penetre na amostra e que o papel filtro não absorva água em quantidade maior que a gerada pelo fluxo dos dois materiais. Já para as amostras submetidas ao processo de secagem, as mesmas foram abertas ao ambiente, até que o teor de umidade reduzisse em relação ao valor medido anteriormente. Quando as amostras atingem o peso correspondente ao próximo ponto de umedecimento ou de secagem o procedimento descrito acima é repetido.

Para a obtenção da curva característica foram moldados seis corpos de prova para cada solo em uma determinada energia. Três corpos de prova sofreram o processo de umedecimento e os outros três, o processo de secagem, obtendo-se a histerese da curva e realizando assim, o ensaio, em triplicata. As energias utilizadas foram a intermediária e a normal. Na Tabela 3-3 são apresentadas as variações que foram utilizadas, totalizando 24 corpos de prova (CPs).

Tabela 3-3 – Corpos de prova a serem moldados para obtenção da curva característica

CP	Solo	Umidade Inicial (%)	Energia	Trajectoria
1	AS	21,4	Intermediária	S - U
2		21,4	Intermediária	S - U
3		21,4	Intermediária	S - U
4		21,4	Intermediária	U - S
5		21,4	Intermediária	U - S
6		21,4	Intermediária	U - S
7	SRA	11	Intermediária	S - U
8		11	Intermediária	S - U
9		11	Intermediária	S - U
10		11	Intermediária	U - S
11		11	Intermediária	U - S
12		11	Intermediária	U - S
13	AS	23,3	Normal	S - U
14		23,3	Normal	S - U
15		23,3	Normal	S - U
16		23,3	Normal	U - S
17		23,3	Normal	U - S
18		23,3	Normal	U - S
19	SRA	12,1	Normal	S - U
20		12,1	Normal	S - U
21		12,1	Normal	S - U
22		12,1	Normal	U - S
23		12,1	Normal	U - S
24		12,1	Normal	U - S

### 3.2.4 Ensaios Mecânicos

Os ensaios mecânicos (módulo de resiliência e deformação permanente) propostos nesta tese foram realizados no LAPAV, utilizando-se a câmara triaxial e os demais sistemas responsáveis pela aplicação e medição dos carregamentos, assim como pela leitura dos deslocamentos.

O equipamento triaxial de cargas repetidas utilizado para a execução de ensaios apresentado na Figura 3-8 é composto por sistemas de aplicação de cargas, de medição de cargas, de medição de deslocamentos, pórtico de reação, câmara triaxial e cilindro pneumático. As pressões

verticais e horizontais (confinantes) são aplicadas através de sistemas pneumáticos por intermédio de reguladores de pressão. O sistema de aquisição de dados do equipamento utilizado é o SEEPAV 8200 (Sistema de Ensaio Especial de Pavimentação). A seguir será apresentada a preparação dos corpos de prova e as peculiaridades de cada ensaio.

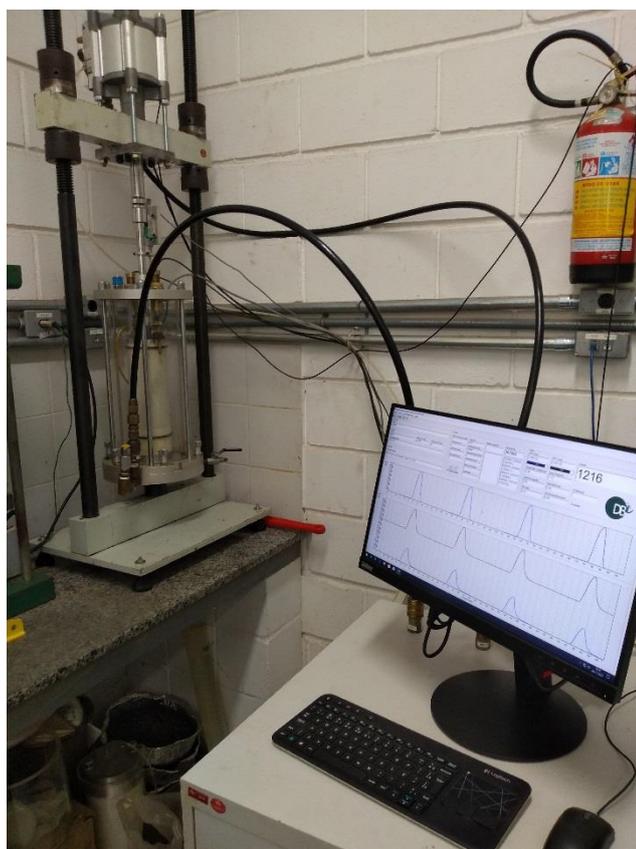


Figura 3-8 – Equipamento triaxial de cargas repetidas

#### 3.2.4.1 Preparação e moldagem dos corpos de prova

A preparação dos corpos de prova deve seguir o procedimento apresentado nas normas DNIT-ME 134 (DNIT, 2018a) e DNIT-ME 179 (DNIT, 2018b), para módulo de resiliência e deformação permanente, respectivamente.

Inicialmente, toma-se uma fração de solo que seja suficiente para preencher o molde de compactação no volume previsto e acrescenta-se a quantidade de água necessária para atingir a umidade desejada. Mistura-se bem até obter uma massa homogênea, onde a mesma deve ser colocada em um saco plástico hermeticamente fechado por um prazo de 12 horas, no mínimo.

Os corpos de prova cilíndricos devem ser preparados em molde metálico tripartido (Figura 3-9) de dimensões 200 mm x 100 mm (altura x diâmetro), sendo a compactação realizada dinamicamente por impacto de soquete, para o solo mais fino (AS), e por vibração, para o solo mais arenoso (SRA), conforme já citado anteriormente.

Segundo as duas normas, a compactação deve ser realizada em 10 camadas, visando uma adequada homogeneização da densidade em todo o CP, aplicando-se o número de golpes em cada camada necessários para se atingir o peso específico aparente seco máximo ( $PEAS_{Max}$ ) obtido nos ensaios de compactação, conforme a energia empregada (Normal e Intermediária, conforme abordado no item 3.2.2). No caso do solo SRA, esse controle era realizado a partir do ajuste da frequência do martetele, assim como pelo tempo de vibração mantido por camada.



Figura 3-9 – Molde utilizado para a moldagem dos corpos de prova

Após, pesa-se o corpo de prova, no molde, descontando-se em seguida a massa das partes metálicas. Através da divisão dessa massa pelo volume interno do cilindro, obtém-se a massa específica úmida do corpo de prova. Também deve-se pesar duas capsulas de solo para se obter uma aproximação da umidade média da amostra.

Por fim, o CP deve ser desmoldado com cuidado para não ocorrer o desprendimento de material. Para isso, retira-se cada uma das partes do molde, que deve deslizar pela superfície lateral do corpo de prova.

Para avaliar o comportamento do módulo de resiliência e da deformação permanente perante os diferentes teores de umidade, foram realizadas algumas variações de umidade antes mesmo

da compactação das amostras. A definição da faixa de variação da umidade de compactação foi embasada nos limites permitidos pelos órgãos de fiscalização rodoviários (DNIT e DAER) para a compactação das camadas de aterro e camada final de terraplenagem de subleitos rodoviários, que atualmente é de  $\pm 2\%$  considerando a umidade ótima dos solos. Apesar de admitir pequenas variações na umidade de compactação, as normativas exigem que a densidade seca máxima obtida no ensaio de compactação seja preservada, sendo este fator mantido fixo no presente trabalho. Um ponto importante a se destacar é que para o solo SRA o teor de umidade 2% acima da ótima resultou em valores de 100% de grau de saturação e valores de grau de compactação da ordem de 97%. Neste caso necessitou-se redefinir tal variação de umidade, utilizando uma variação de +1%, a qual também foi incorporada para o solo AS. Desta maneira fixou-se a variação em +1% e -2% em relação à umidade ótima do material na energia em questão, de forma a simular a variação de umidade permitida que pode ocorrer em campo durante a execução da camada.

Também foi avaliado, mas de forma simplificada (apenas um par de tensões), o efeito de ciclos de secagem e umedecimento no comportamento à deformação permanente dos dois solos em questão, representando seu comportamento em campo no pós-compactação. Como os materiais da presente tese serão utilizados na construção de pistas experimentais no LAPAV, pode-se fazer uma análise verificando as possíveis tensões e deformações que ocorrerão nas mesmas. Para isso foi utilizado o Programa de Análise Elástica de Múltiplas Camadas (AEMC) que calcula tensões e deformações em estruturas de pavimentos, desenvolvido para uso como um componente nos programas MeDiNa e BackMeDiNa. De posse da estrutura do pavimento da pista, das características dos materiais a serem utilizados e dos carregamentos impostos, é possível obter as tensões atuantes na camada de interesse (camada na qual se utilizarão os solos AS e SRA). As tensões obtidas com o *software* AEMC foram 20x170 kPa e 20x190 kPa para uma camada de sub-base, considerando carregamentos de 8,2t (eixo padrão) e 10t, respectivamente. Tentou-se utilizar também o par 20x210 kPa para a camada de sub-base, considerando um carregamento de 11tf, porém os corpos de prova romperam logo ao início do ensaio. De posse dessas tensões, os corpos de prova foram moldados na umidade ótima e passaram por dois ciclos completos de secagem e umedecimento, para enfim serem ensaiados com o devido par de tensão correspondente ao esperado em campo.

Inicialmente o ciclo de umedecimento seria realizado através do processo de saturação por capilaridade, onde o CP moldado na umidade ótima seria colocado sobre uma pedra porosa em um recipiente com água. O controle do grau de saturação seria feito por meio de pesagem do CP. Porém ao iniciar o primeiro ciclo de umedecimento verificou-se que o solo saturou de tal forma próximo a base que, iniciou um processo de desprendimento de partículas, tornando-o frágil ao toque. Além disso, neste local também se verificou um inchamento das partículas de solo, conforme pode ser visualizado na Figura 3-10.

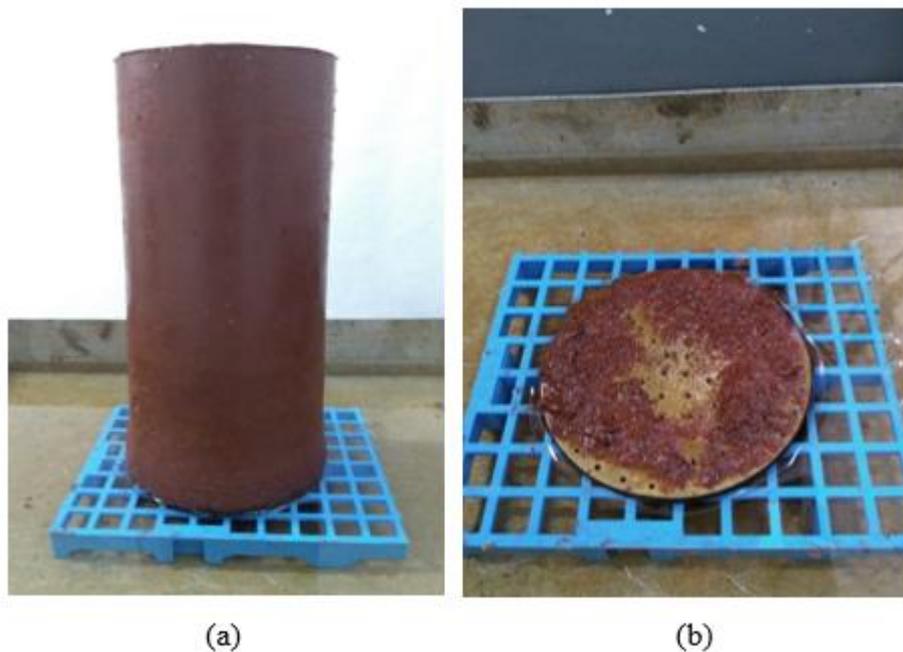


Figura 3-10 - Tentativa de umedecimento do CP através de saturação por capilaridade. (a) Primeiro ciclo de umedecimento com inchamento da base do CP. (b) partículas de solo que se desprenderam do CP com a saturação

Desta forma, utilizou-se o mesmo processo de umedecimento apresentado por Weber (2013) e Kern (2017), o qual se dava através do borrifamento de água no CP moldado, cuidando para adicionar a quantidade de água necessária para alcançar o teor de umidade desejado, mediante controle de peso. O ciclo de secagem foi realizado deixando o CP exposto ao ar, controlando a perda de peso e a perda de umidade. Após cada uma das etapas de umedecimento e secagem o CP era deixado ensacado por 24h para uniformizar a nova umidade obtida.

Por fim, após realizado os dois ciclos de umedecimento e secagem, a amostra que retornou a sua umidade ótima estava pronta para o ensaio de DP com os pares de tensões obtidos pelo *software* AEMC.

Outro aspecto que foi avaliado no comportamento elástico e plástico do material é quanto à sucção após o ensaio. Depois da realização de cada ensaio de MR e DP foi coletada uma amostra de solo do centro do corpo de prova e verificada a sucção do material através da técnica do papel filtro, descrita no item 3.2.3.1.

#### 3.2.4.2 Determinação do Módulo de Resiliência

O ensaio para a obtenção do módulo de resiliência foi realizado conforme a norma DNIT-ME 134 (DNIT, 2018a), onde a preparação e moldagem dos corpos de prova foi apresentado no item anterior.

O controle dos intervalos de aplicação de carga no triaxial é realizado através de um temporizador, onde para o ensaio de MR a duração do carregamento é de 0,1s, com uma frequência igual a 1 Hz. A deformação axial do CP é medida por um transdutor de deslocamento do tipo LVDT (*Linear Variable Differential Transformer*). O LVDT transforma as deformações do CP em um potencial elétrico que é transmitido para o programa de leitura, que recebe como dados de entrada as tensões confinantes e desvio, calculando automaticamente o módulo de resiliência para determinadas tensões.

Inicialmente é aplicada uma sequência de tensões para a fase de condicionamento de 500 ciclos cada, com a finalidade de confinar o corpo de prova, eliminando as imperfeições na moldagem e as irregularidades iniciais de contato.

Finalizada a fase de condicionamento, deve-se aplicar uma sequência de 18 pares das tensões indicadas na norma DNIT-ME 134 (DNIT, 2018a). Para cada par de tensões, aplica-se 100 ciclos de carga e realiza-se a aquisição de dados de pelo menos cinco repetições, sendo que para o cálculo do MR deve-se utilizar a média dessas cinco leituras.

Com os valores que serão obtidos no ensaio, determina-se o valor de MR para cada par de tensões, a partir da Equação 12. Dessa forma, será possível obter os parâmetros  $k_1$  e  $k_2$  para estimar o MR de cada solo e com a devida variação de umidade.

$$MR = \frac{\sigma_k}{\varepsilon_k} \quad (12)$$

Onde:

MR = módulo de resiliência, em MPa;

$\sigma_d$  = tensão desvio, em MPa;

$\varepsilon_d$  = deformação específica recuperável.

Para a obtenção do módulo de resiliência foram realizados ensaios com variação de +1% e -2% em relação a umidade ótima, antes da compactação, para cada material. Esta variação de umidade foi realizada para os corpos de prova moldados na energia normal e intermediária, sendo feito em duplicata. A definição de realizar os ensaios em duplicata se deu em razão da carência de material disponível. Desta forma, ao todo, foram ensaiados dois solos, em duas energias, com duas diferentes umidades e em duplicata, resultando em 16 corpos de prova. Os resultados dos ensaios de MR referente à umidade ótima dos solos AS e SRA podem ser encontrados no trabalho de Schreinert (2021).

#### 3.2.4.3 Determinação da Deformação Permanente

O ensaio para a obtenção da deformação permanente foi realizado conforme a norma DNIT-ME 179 (DNIT, 2018b), onde a preparação e moldagem dos corpos de prova foi apresentado no item 3.2.4.1.

Para o ensaio de deformação permanente a frequência a ser utilizada é de 2 Hz, onde a duração do pulso de carga é 0,1s e durante todo ensaio a tensão confinante é mantida constante. A deformação elástica do CP é medida por um transdutor de deslocamento do tipo LVDT e a deformação permanente do CP é medida por um transdutor de deslocamento do tipo RDT (*Rectilinear Displacement Transducer*).

Cada ensaio corresponde a um par de tensões aplicado a um corpo de prova. Para o ensaio de deformação permanente propriamente dito, é necessário um procedimento inicial de ajuste da prensa/corpo de prova, que atua como um “condicionamento”, onde é aplicado um par de tensões baixo para garantir total contato entre o pistão e o cabeçote, e entre o cabeçote e o corpo de prova, evitando que eventuais folgas ou ajustes da superfície sejam lidos como deformação

do corpo de prova. Desta forma, aplicam-se 50 ciclos de carga com o par de tensões correspondente a  $\sigma_3 = 30$  kPa e  $\sigma_d = 30$  kPa. Após a aplicação dos 50 ciclos de carga iniciais devem-se aplicar para cada corpo de prova no mínimo 150.000 (cento e cinquenta mil) ciclos de um par de tensões, o que resulta em aproximadamente 21 horas de ensaio para cada amostra.

A norma DNIT-ME 179/2018 pode ser utilizada para determinação da deformação permanente de um material para um dado estado de tensões específico ou para determinação de parâmetros de modelos matemáticos de deformação permanente para uso em projeto de dimensionamento de pavimentos. Para a modelagem pelo modelo de Guimarães (2009), a norma DNIT ME 179/2018 preconiza que ao todo devem ser realizados 9 ensaios válidos de deformação permanente, considerando 9 pares de tensão desvio e confinante. Entretanto, a mesma norma admite a realização de no mínimo 6 ensaios válidos, desde que as tensões adotadas compreendam a amplitude de tensões atuantes no material em campo. Em razão do tempo de realização dos ensaios, da necessidade de redução do programa experimental e devido a carência de material, optou-se pela realização do número mínimo de amostras, sendo os pares definidos com base no estudo de Lima *et al.* (2019a). Na Tabela 3-4 são apresentados os pares de tensões indicados por norma (nove pares) e destacado em negrito estão os pares utilizados nesta pesquisa (seis pares).

Tabela 3-4 - Pares de tensões indicados para a determinação da deformação permanente

Estágio	$\sigma_3$ (kPa)	$\sigma_d$ (kPa)	$\sigma_3/\sigma_d$	Número de repetições (N)
Procedimento inicial	30	30	2	50
<b>1</b>	<b>40</b>	<b>40</b>	<b>2</b>	
2	40	80	3	
<b>3</b>	<b>40</b>	<b>120</b>	<b>4</b>	
<b>4</b>	<b>80</b>	<b>80</b>	<b>2</b>	
5	80	160	3	Mínimo 150.000
<b>6</b>	<b>80</b>	<b>240</b>	<b>4</b>	
7	120	120	2	
<b>8</b>	<b>120</b>	<b>240</b>	<b>3</b>	
<b>9</b>	<b>120</b>	<b>360</b>	<b>4</b>	

Outro aspecto importante a se frisar é que o SEEPAV 8200 está programado para realizar leituras de DP apenas até os 145.000 ciclos de carga, inviabilizando a obtenção dos últimos 5000 ciclos. Porém, por ser uma parcela pequena e final de ciclos de carga, esta diferença não é significativa para o ensaio como um todo. Durante todo o ensaio são gerados relatórios apresentando o desenvolvimento da deformação permanente e a variação do módulo de resiliência (ou também das deformações resilientes).

Com os valores de deslocamentos plásticos obtidos durante o ensaio deve ser estimada a deformação específica permanente do material ensaiado para o estado de tensões utilizado no respectivo corpo de prova (Equação 13).

$$\varepsilon_p = \frac{\delta_p}{H_0} \quad (13)$$

Onde:

$\varepsilon_p$  = deformação específica plástica ou permanente acumulada;

$\delta_r$  = Deslocamento plástico ou permanente acumulado, mm;

$H_0$  = Altura de referência do medidor de deslocamento, descontado o deslocamento plástico ou permanente acumulado correspondente ao número de ciclo anterior, mm.

Para a obtenção da deformação permanente foram realizados ensaios com variação de +1% e -2% em relação a umidade ótima, antes da compactação, para cada material e cada energia. Desta forma, foram ensaiados dois solos, em duas energias, com duas diferentes umidades e seis corpos de prova (seis pares de tensões) para cada variável (solo, umidade e energia), resultando em 48 corpos de prova. Os resultados dos ensaios de DP referente a umidade ótima dos solos AS e SRA podem ser encontrados no trabalho de Schreinert (2021).

Para a obtenção da deformação permanente simulando a variação de umidade pós-compactação foram ensaiados dois solos, na energia intermediária, com dois pares de tensões diferentes (20x170 kPa e 20x190 kPa), resultando em quatro corpos de prova. Além disso, também foram ensaiados mais quatro CPs para os mesmos pares de tensões, porém sem passarem pelos ciclos de secagem e umedecimento, de modo a comparar a influência que estes ciclos apresentam no comportamento plástico dos materiais.

### 3.3 ANÁLISES DE DESEMPENHO

Para entender o comportamento dos solos estudados frente a variação de umidade foi realizada uma avaliação de desempenho utilizando os softwares MeDiNa e o *AASHTOWare Pavement ME Design* visando caracterizar as deformações permanentes ao longo da vida de um pavimento típico, variando as características do material de sub-base e reforço do subleito em função das diferentes condições de umidade de compactação.

Foram definidas duas estruturas de pavimento para análise, as quais condizem com as estruturas atualmente em fase de construção no LAPAV. Estas duas estruturas mantiveram os mesmos parâmetros para as camadas de revestimento, base e subleito, variando apenas o solo na camada de sub-base.

Algumas informações iniciais relacionadas à estrutura do pavimento estão apresentadas na Tabela 3-5.

Tabela 3-5 – Estrutura do pavimento para análise de desempenho

<b>Camada</b>	<b>Material</b>	<b>Espessura (cm)</b>	<b>Coefficiente de Poisson</b>
Revestimento	TSD	2,5	0,3
Base	BGS	15	0,35
Sub-base	Solo AS	15	0,4
	Solo SRA		
Reforço do Subleito	Solo AS	60	0,45
Subleito	-	-	0,45

Em relação aos dados de entrada de MR e DP no *software* MeDiNa, foram considerados os parâmetros  $k$  e  $\psi$  obtidos anteriormente com a variação de umidade (-2%, umidade ótima e +1%) utilizando o modelo composto e o modelo de Guimarães (2009), respectivamente. Não foi realizada a análise acerca dos ciclos de umedecimento e secagem visto que não foram realizados todos os ensaios necessários para obter os modelos de MR e DP. Apenas para a camada de base foi utilizado coeficientes obtidos no trabalho realizado por Malysz (2009), que são relativos a brita graduada (BGS). Além disso, outros parâmetros adicionais foram

considerados: módulo de resiliência de 1000 MPa para o Tratamento Superficial Duplo (TSD), tráfego de  $1 \times 10^6$  de carga por eixo padrão de 8,2tf e um período de projeto de 10 anos.

Para o software *AASHTOWare Pavement ME Design* não foi possível adicionar os modelos de MR, apenas um valor característico baseado na “melhor estimativa” (parâmetro de entrada nível 3), o qual foi obtido utilizando os modelos e considerando as tensões relativas as obtidas para camada de sub-base e reforço de subleito (20x170 kPa e 20x190 kPa considerando um eixo-padrão). Para as análises de variação de ciclos de umedecimento e secagem foi utilizado o MR inicial obtido no ensaio de DP (lembrando que os ensaios de DP com ciclos de umedecimento e secagem foram realizados com o par de tensões de 20x170 kPa), visto que não foi realizado os ensaios considerando todos os pares de tensões para obter o modelo experimental.

Em relação ao tráfego, o software permite realizar a análise de desempenho considerando um tráfego completamente discretizado, utilizando-se o espectro completo de uma carga por eixo, para cada tipo de eixo, porém se optou por considerar apenas um eixo simples de rodas duplas (ESRD) com variação de carga de 8,2 tf (eixo padrão) e 11 tf. Esta escolha foi feita de modo a simular as deformações plásticas que podem ocorrer nas pistas experimentais em construção no LAPAV e que serão ensaiadas com o simulador de tráfego. Além disso, para a carga de 8,2tf simulou-se VDMs (veículo médio diário) de 275 e 1000, de modo a verificar a influência do aumento de passagens de veículos/aumento da passagem do eixo do simulador nas pistas experimentais. Os valores utilizados de MR para a estrutura de pavimento proposta, em função da carga e variação de umidade, estão apresentados na Tabela 3-6.

Além destes dados já citados, outros parâmetros adicionais foram considerados: período de projeto de 10 anos, dados climáticos referente a Porto Alegre/RS, dados de limites de liquidez e plasticidade, classificação AASHTO/TRB, curva característica, curva granulométrica e massa específica relativo ao respectivo solo de análise, considerando as camadas de sub-base e reforço do subleito. Para as outras camadas se consideraram dados de *default* presentes no software: em relação ao revestimento asfáltico (penetração de 85-100), camada de brita graduada (classificação A-1-a, com MR de 276 MPa) e subleito (classificação A-2-4, com MR de 114 MPa).

Tabela 3-6 – Valores de MR referente as variações de carga, tráfego e umidade utilizados no *software AASHTOWare*

<b>Solo</b>	<b>Variação de umidade</b>	<b>Carga (tf)</b>	<b>VDM</b>	<b>MR sub-base</b>	<b>MR Reforço</b>
AS	-2	8,2	275 e 1000	277	105
	0	8,2	275 e 1000	265	203
	1	8,2	275 e 1000	128	67
	ciclos	8,2	275 e 1000	96	203
	-2	11	1000	262	105
	0	11	1000	247	203
	1	11	1000	117	67
	ciclos	11	1000	96	203
SRA	-2	8,2	275 e 1000	187	105
	0	8,2	275 e 1000	187	203
	1	8,2	275 e 1000	138	67
	ciclos	8,2	275 e 1000	82	203
	-2	11	1000	201	105
	0	11	1000	199	203
	1	11	1000	145	67
	ciclos	11	1000	82	203

## 4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos nesta pesquisa. Inicialmente são apresentados os resultados de caracterização física, química e mineralógica dos materiais estudados, assim como são apresentadas as curvas de compactação dos mesmos. Em seguida são analisados e discutidos os resultados das curvas características avaliando os modelos com os melhores ajustes, a influência da energia de compactação, a influência do método de compactação e a história de umedecimento e secagem.

Na sequência são avaliados os resultados obtidos nos ensaios triaxiais de cargas repetidas, com os ensaios de módulo de resiliência e deformação permanente relacionados com a sucção e a variação de umidade. Por fim, utilizaram-se os *softwares* MeDiNa e AASHTOWare para verificar o desempenho de pavimentos que passam por variação de umidade em suas camadas.

### 4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS SOLOS

Inicialmente são apresentados os resultados referentes aos ensaios básicos de caracterização, incluindo à massa específica real dos grãos, análise granulométrica e a os limites de Atterberg. Após é apresentado os resultados da análise química dos solos e as curvas de compactação.

As curvas granulométricas dos dois solos estudados podem ser observadas na Figura 4-1 e os resultados básicos de caracterização dos solos são apresentados na Tabela 4-1.

A partir dos resultados de análise granulométrica expostos na Figura 4-1 e na Tabela 4-1 verifica-se que o solo AS possui mais finos em sua composição (53% de argila) se comparado ao solo SRA, no qual, predomina a fração de areia (79%).

Com relação a massa específica real dos grãos, Pinto (2006) afirma que o peso específico dos grãos dos solos varia pouco de solo para solo, situando-se em torno de 2,7 g/cm<sup>3</sup>. Ainda segundo o autor, solos mais arenosos costumam apresentar pesos específicos em torno de 2,65 g/cm<sup>3</sup>, mesmo valor obtido para o Solo Residual de Arenito, que apresentou mais areia em sua composição. Já argilas lateríticas, em virtude da deposição de óxidos de ferro, apresentam valores mais próximos a 3,0 g/cm<sup>3</sup>.

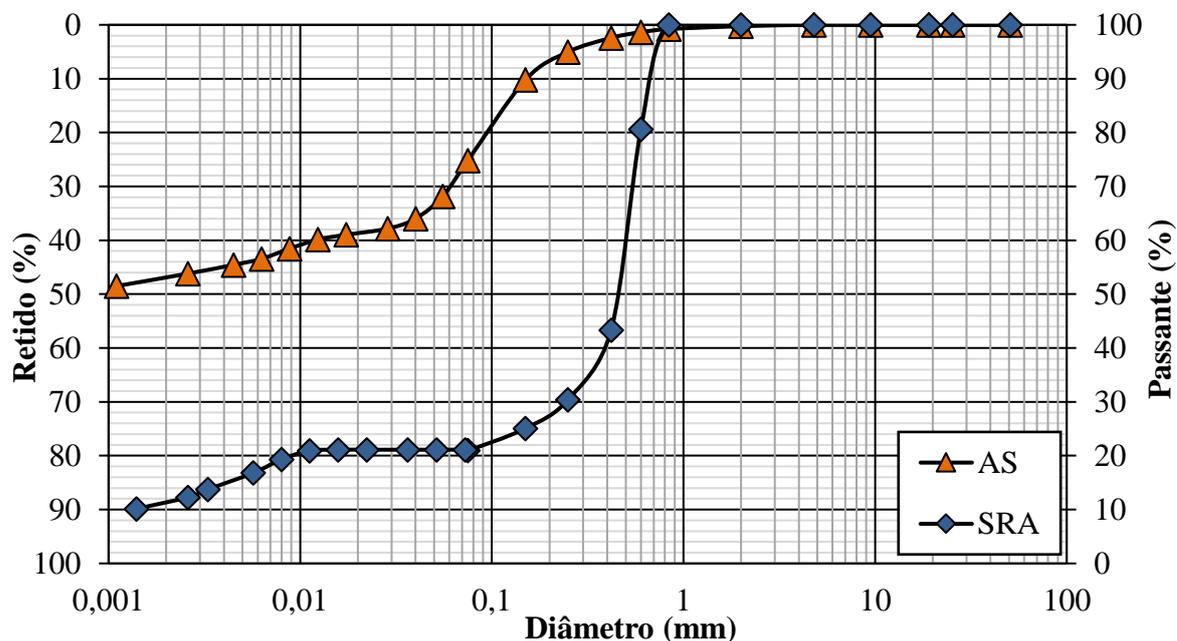


Figura 4-1 - Análise granulométrica dos solos

Quanto aos resultados obtidos a partir dos ensaios de Limites de Atterberg, verificou-se que o solo AS apresentou a maior plasticidade, com um IP de 20%, o que o classifica como de plasticidade média a alta, conforme Burmister (1949 *apud* DAS, 2007). Já o solo SRA foi classificado como de plasticidade média.

Considerando a classificação dos solos, o solo AS foi classificado como pertencente ao subgrupo (A-7-5) de acordo com o sistema rodoviário de classificação, também denominado como sistema de classificação de solos da AASHTO. Segundo o Manual de Pavimentação (DNIT, 2006b), os solos pertencentes a este grupo podem ser altamente elásticos e sujeitos a elevada mudança de volume. Porém, conforme verificado por Villibor e Nogami (2009), solos tropicais pertencentes ao mesmo grupo AASHTO podem ter comportamento bem distinto. Já o solo SRA foi classificado como A-2-6, segundo esta mesma classificação. Os solos classificados neste subgrupo abrangem materiais como pedregulho e areia grossa. Outra característica dos solos deste subgrupo é o índice de grupo entre zero e quatro, por apresentar IP maior que 10 e percentagem passando na peneira nº200 maior que 15.

Tabela 4-1 - Caracterização dos solos

Parâmetros	Solos		Referências normativas		
	AS	SRA			
MERG (g/cm <sup>3</sup> )	2,76	2,65	ABNT NBR 6508:1984		
Granulometria	Pedregulho (%)	0	0		
	Areia (%)	30	79		
	Silte (%)	17	9	ABNT NBR 7181:2016 e	
	Argila (%)	53	12	ABNT NBR 6502:1995	
	Cu	-	357		
	Cc	-	82		
	Consistência	LL (%)	50	32	ABNT NBR 6459:2016
LP (%)		30	21	ABNT NBR 7180:2016	
IP (%)		20	11		
Classificação	SUCS	CH	SC		
	SUCS (nomenclatura)	Argila de alta plasticidade com areia	Areia argilosa	ASTM D2487-17	
	AASHTO	A-7-5	A-2-6	AASHTO M 145-91	
	Índice de Grupo - IG	16	0		
	MCT	LG'	NA'	Nogami e Vilibor (1981)	
Compactação	Energia Normal	ωót (%)	23,3	12,1	ABNT NBR 7182:2016
		ρ <sub>d</sub> máx (g/cm <sup>3</sup> )	1,539	1,912	
		S (%)	81,2	82,7	
	Energia Intermediária	ωót (%)	21,4	11,0	ABNT NBR 7182:2016
		ρ <sub>d</sub> máx (g/cm <sup>3</sup> )	1,677	1,982	
		S (%)	91,7	86,1	

Os solos do presente estudo também foram classificados quanto ao sistema único de classificação de solos (SUCS), sendo que o solo AS novamente apresentou a classificação de

silte de alta compressibilidade (MH), ligeiramente abaixo da Linha A. Já o solo SRA foi classificado como uma areia argilosa (SC).

Embora consagrados internacionalmente, a utilização de métodos convencionais de classificação de solos, como o HRB e SUCS, ou correlações empíricas não permitem distinguir alguns tipos de solos. Muitas vezes estas correlações são restritas para solos de uma determinada região ou de uma certa formação geológica. Segundo Pinto (2006), correlações estabelecidas, considerando solos transportados, não se aplicam adequadamente a solos saprolíticos e lateríticos, que ocorrem em regiões tropicais. Desta maneira, correlações específicas a esses solos devem ser estabelecidas, baseadas principalmente na classificação MCT.

Pela classificação MCT, o solo AS apresentou comportamento laterítico, sendo classificado como um LG' (solo argiloso laterítico), característico de materiais provenientes de horizontes B. Já o solo SRA demonstrou um comportamento não laterítico, sendo definido como um NA' (solo siltoso não laterítico), algo esperado tendo em vista o seu caráter saprolítico. O enquadramento dos solos na classificação é apresentado na Figura 4-2.

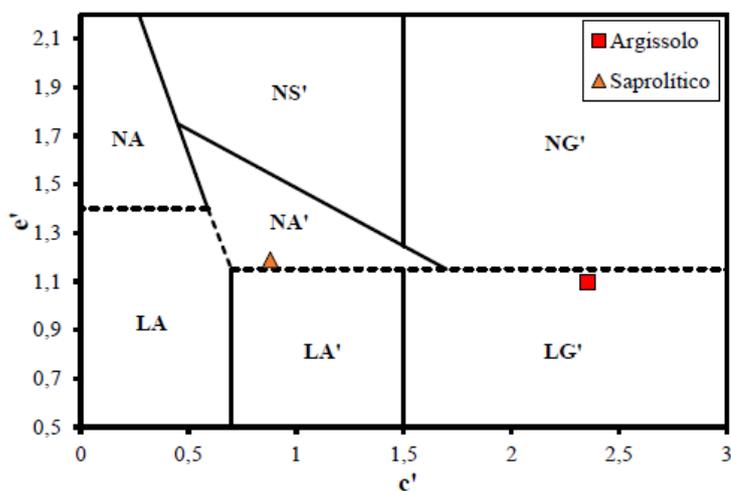


Figura 4-2 - Classificação dos solos AS e SRA segundo a metodologia MCT (SCHREINERT, 2021)

Os resultados dos ensaios de compactação dos solos SRA e AS nas energias normal e intermediária são apresentados respectivamente na Figura 4-3 e na Figura 4-4.

Segundo Pinto (2006), solos argilosos apresentam densidades secas baixas e umidades ótimas elevadas. Valores em torno de 25 a 30% de umidade ótima correspondem a densidades secas máximas de 1,4 a 1,5 g/cm<sup>3</sup> para este tipo de material, o que foi aproximadamente obtido para o solo AS. Solos que possuem mais areia em sua composição geralmente apresentam densidades secas elevadas, da ordem de 2 a 2,1 g/cm<sup>3</sup> e umidades ótimas baixas, de aproximadamente 9 a 10%, próximo ao obtido para o solo SRA. Ainda segundo o mesmo autor, o grau de saturação geralmente situa-se entre 80 a 90% na curva de compactação para materiais na umidade ótima.

Comparando as energias, uma maior energia de compactação conduz a uma maior densidade seca máxima e uma menor umidade ótima, deslocando a curva para a esquerda e para o alto. Geralmente a variação de umidade para um mesmo solo em energias diferentes fica em torno de 2%.

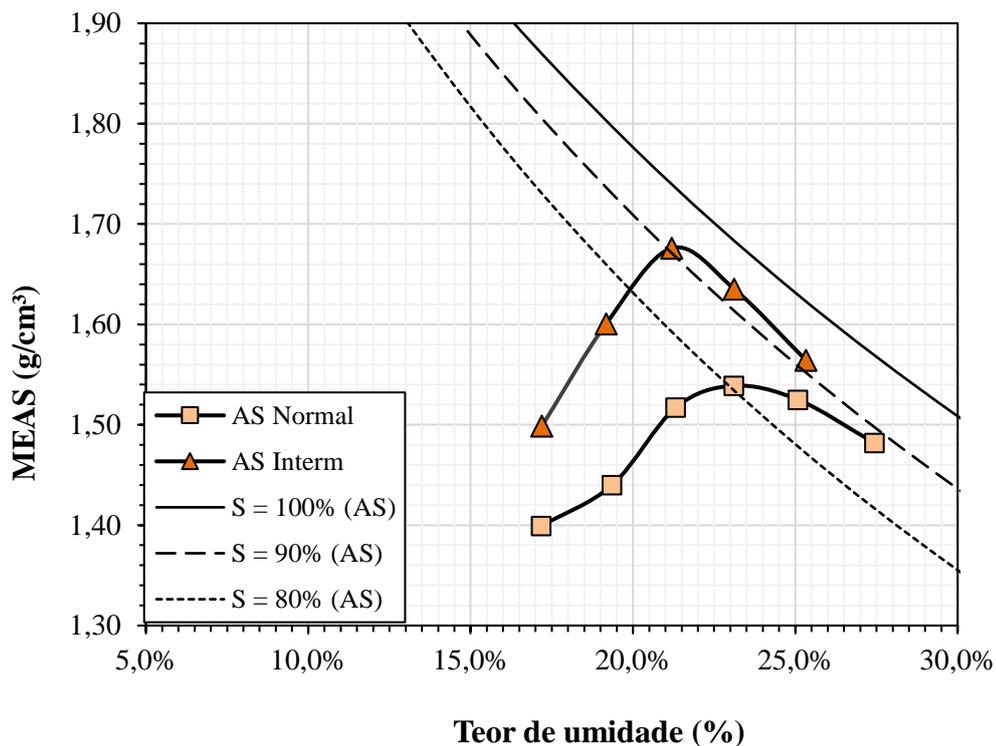


Figura 4-3 - Curva de compactação e saturação do solo AS

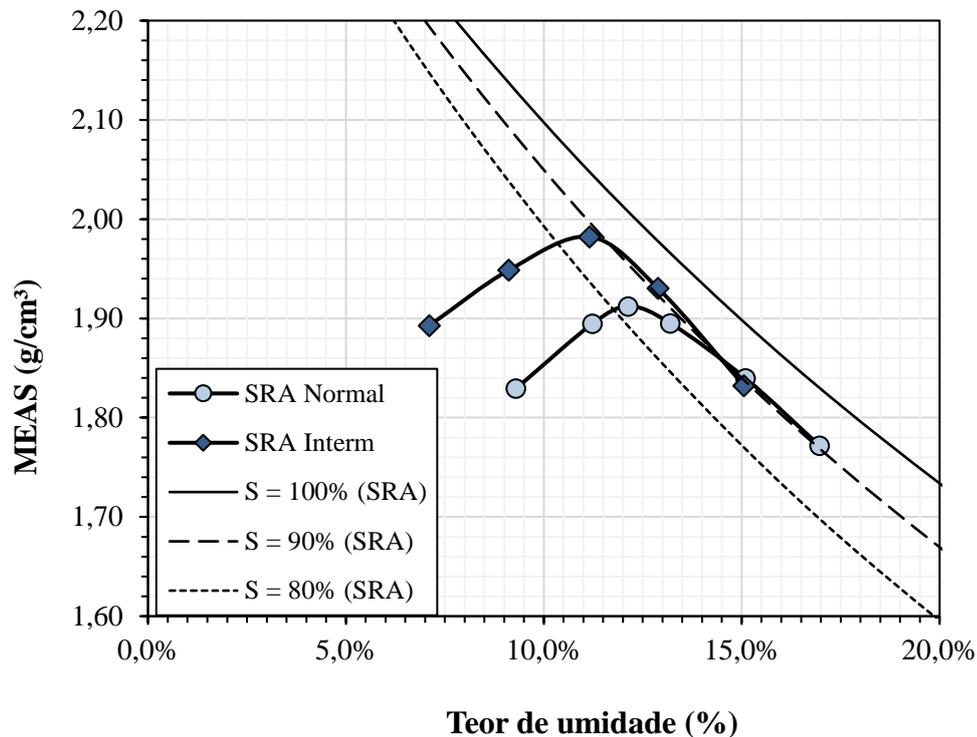


Figura 4-4 - Curva de compactação e saturação do solo SRA

A composição química dos solos foi analisada e é apresentada na Tabela 4-2.

Com relação à porcentagem de argila obtida para os dois solos, ressalta-se que os teores apresentados na Tabela 4-2 foram determinados pelo Laboratório de Análises de Solos da UFRGS, podendo haver alguma variação se comparado com a análise granulométrica a partir dos procedimentos de peneiramento e sedimentação realizados no LAGEOTEC. Destaca-se que houve uma diferença maior na porcentagem de argila do solo SRA (de 12% para 25%), fato que pode ser justificado pelo solo residual de arenito ter formação decorrente de deposição eólica, onde as estratificações podem não ser homogêneas, mesmo que a coleta tenha sido feita no mesmo local. Porém esta variação na porcentagem de argila obtida para o solo SRA também pode estar associada a utilização de procedimentos metodológicos diferentes.

Avaliando o pH dos solos em questão, os dois solos são classificados como fortemente ácidos, com variação de 4,4 a 4,5. Segundo Streck *et al.* (2008), os argissolos comumente apresentam elevada acidez.

Tabela 4-2 – Composição química dos solos

<b>Parâmetro</b>	<b>Solo AS</b>	<b>Solo SRA</b>
Argila (%)	54,0	25,0
pH (H <sub>2</sub> O)	4,5	4,4
Índice SMP	6,2	7,1
P (mg/dm <sup>3</sup> )	2,3	2,4
K (mg/dm <sup>3</sup> )	12,0	7,0
Matéria orgânica (%)	0,3	0,2
Al trocável (cmol <sub>c</sub> /dm <sup>3</sup> )	1,2	0,5
Ca trocável (cmol <sub>c</sub> /dm <sup>3</sup> )	0,9	0,5
Mg trocável (cmol <sub>c</sub> /dm <sup>3</sup> )	1,6	0,3
Al + H (cmol <sub>c</sub> /dm <sup>3</sup> )	3,5	1,2
CTC (cmol <sub>c</sub> /dm <sup>3</sup> )	6,0	2,1
Saturação por bases (%)	42,0	40
Saturação por alumínio (%)	32,1	37,9
Relação Ca/Mg	0,6	1,7
Relação Ca/K	29,0	28,0
Relação Mg/K	52,0	17,0
S (mg/dm <sup>3</sup> )	85,0	17,0
Zn (mg/dm <sup>3</sup> )	3,3	0,4
Cu (mg/dm <sup>3</sup> )	0,6	0,3
B (mg/dm <sup>3</sup> )	0,4	0,2
Mn (mg/dm <sup>3</sup> )	3,0	1,0

Quanto aos teores de fósforo (P) e potássio (K), Freire *et al.* (2013), classificam esses elementos quanto ao nível (baixo, médio, alto e muito alto). Com relação ao fósforo, os dois solos apresentaram nível baixo. O nível de potássio também foi classificado como baixo para os solos em questão.

A capacidade de troca catiônica (CTC) é influenciada pelos argilominerais presentes no solo, tanto quanto à constituição como quantificação dos mesmos, bem como pela matéria orgânica. Segundo Santos *et al.* (2018), quando um solo apresenta uma CTC igual ou superior a 27 cmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup>, considera-se que a fração argila é de atividade alta (Ta), de modo que a atividade baixa (Tb) corresponde a CTC inferior a 27 cmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup>. Para os solos estudados nesta pesquisa, verificou-se que a CTC dos solos variou de 2,1 a 6,0 cmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup>, apresentando atividade baixa (Tb), o que é esperado pelo elevado intemperismo do solo AS e pela natureza geológica do solo

SRA. Os baixos valores de CTC também podem indicar a possibilidade de ocorrência de argilominerais provenientes do grupo da caulinita.

Em relação à saturação por bases “V”, pedologicamente, solos com alta saturação são caracterizados como eutróficos e apresentam valores iguais ou superiores a 50%. Já solos com baixa saturação são caracterizados como distróficos e apresentam valores inferiores a 50% (SANTOS *et al.*, 2018). Os dois solos avaliados neste quesito apresentaram baixa saturação, não passando de 50%, logo são considerados distróficos.

Considerando a saturação por alumínio, utiliza-se o termo “álico” quando a saturação por alumínio é maior ou igual a 50%. Os solos estudados não apresentaram valores maiores que 40%, não sendo necessária a utilização do termo.

Segundo Freire *et al.* (2013), os solos tropicais apresentam, em sua maioria, baixa fertilidade natural, ou seja, elevada acidez, baixos teores de matéria orgânica, e baixos teores de Ca, Mg e K trocáveis e de P disponível. Essas características advêm de diversos fatores de formação do solo, mas, principalmente, da ação pretérita do clima.

Com base nos parâmetros químicos apresentados na Tabela 4-2 é possível tecer alguns comentários acerca da classificação pedológica dos solos utilizados na presente tese. Em relação ao solo AS, o mesmo é classificado como um argissolo, de modo que o elevado teor de argila (54%) é indicativo do horizonte B textural, sendo de atividade baixa. Estes solos também são geralmente bem drenados e profundos. O argissolo em questão apresentou baixa saturação por bases (42%), de modo a ser classificado como distrófico. Pela coloração e em conjunto com a análise do mapa pedológico, o presente solo pode ser classificado como um Argissolo Vermelho Amarelo distrófico.

Por fim, o solo SRA, classificado como um solo residual jovem, do ponto de vista pedológico, é um solo saprolítico de arenito, pertencente ao horizonte C, com estrutura típica decorrente de deposição eólica.

Os resultados obtidos dos ensaios de fluorescência de raios X (FRX) para os dois solos em questão são apresentados na Tabela 4-3.

Tabela 4-3 - Análise mineralógica – Fluorescência de raios X (FRX)

Óxido	AS	SRA
	Massa (%)	Massa (%)
SiO <sub>2</sub>	31,337	41,267
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	19,818	34,059
MgO	9,902	8,298
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10,416	4,074
PF <sup>1</sup>	3,14	4,017
Outros (< 2% cada)	2,335	0,929

<sup>1</sup> PF: perda ao fogo.

Com relação aos resultados obtidos das análises de fluorescência de raios X (FRX) verifica-se que os solos são compostos predominantemente de sílica (SiO<sub>2</sub>), refletindo a natureza quartzosa das suas frações granulares. Os dois solos também apresentam elevada quantidade de alumina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) em sua composição, mais presente no solo SRA, da ordem de 34%.

O ensaio de difração de raios X (DRX) também foi realizado e auxiliou na análise mineralógica dos solos. Ele consiste na incidência de um feixe monocromático de raios X sobre o material a ser analisado, onde o feixe interage com os átomos presentes na amostra, originando o fenômeno da difração. Segundo Resende *et al.* (2011) e Motta (2016), além da identificação dos minerais, o ensaio de DRX auxilia na determinação do grau de cristalinidade, na concentração do mineral e no tamanho das partículas: quanto menor e mais largo o pico obtido no difratograma, pior o grau de cristalinidade e menor o tamanho da partícula e a concentração do mineral. Para a realização das análises deste ensaio foi utilizado o software Match!3.

Na Figura 4-5e na Figura 4-6 são apresentados os difratogramas de raios X do solo AS e do solo SRA, respectivamente.

Avaliando inicialmente o resultado do ensaio de DRX do solo AS, verifica-se uma presença de quartzo e ilita com picos bem evidentes, o que corrobora com o obtido para o ensaio de FRX, que apresentou grandes quantidades de sílica (SiO<sub>2</sub>) e alumina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). Além disso, outros elementos encontrados pelo ensaio de FRX estão presentes nas fases observadas pela difratometria de raios X, onde a grande quantidade de sílica (SiO<sub>2</sub>) se encontra presente na caulinita, quartzo, ilita e montmorilonita. Já a quantidade de alumina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) também se encontra

presente na caulinita, montmorilonita e illita. Por fim, as quantidades de óxido de magnésio e ferro aparecem na montmorilonita e hematita, respectivamente.

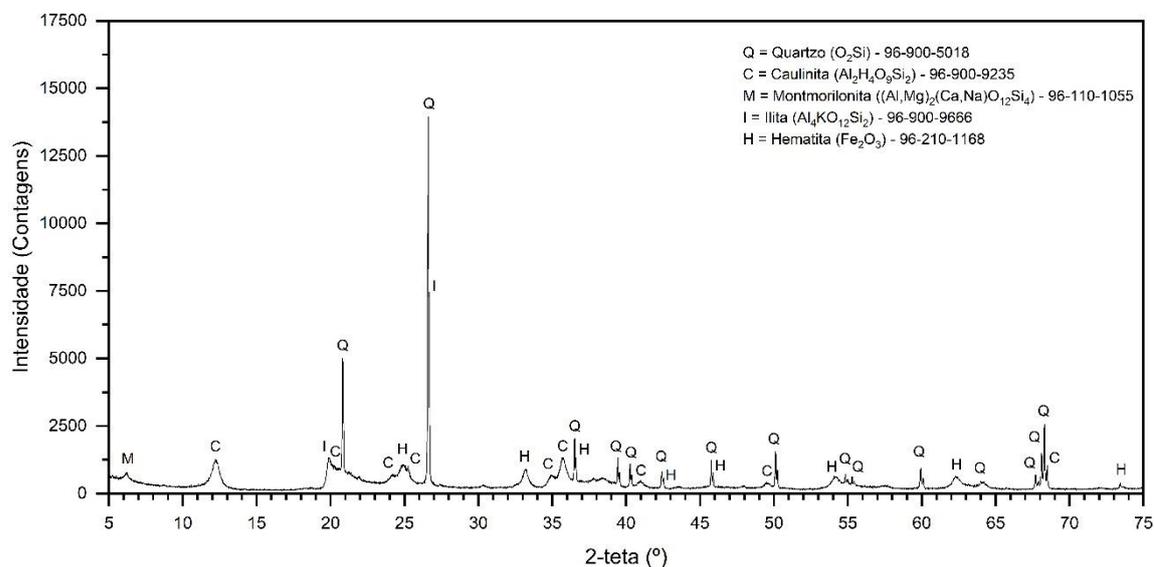


Figura 4-5 - Difratoograma do solo AS

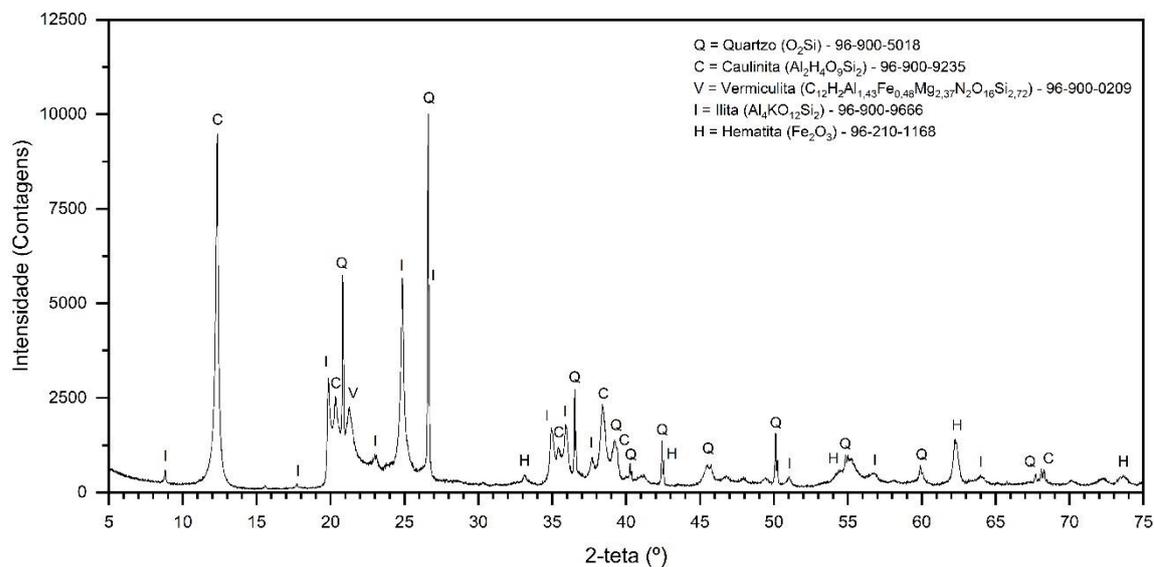


Figura 4-6 - Difratoograma do solo SRA

Em relação à resposta obtida para o solo SRA, se visualizou picos bem intensos de quartzo, caulinita e illita, resultado que também se encaixa com o observado no ensaio de FRX deste

solo, que apresentou elevada quantidade de sílica e alumina. O predomínio do argilomineral caulinita corroborou com os resultados obtidos para a capacidade de troca catiônica (CTC). Em relação ao grau de cristalinidade (determinado pela largura do pico à meia altura: quanto mais largo o pico, pior é seu grau de cristalinidade), Resende *et al.* (2011) afirmam que solos com menores teores de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  apresentam caulinita com maior grau de cristalinidade. Isso foi verificado para o solo SRA, onde se visualizou um teor baixo de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  e uma menor largura de pico a meia altura, apresentando caulinitas com maior grau de cristalinidade. Este fato já não foi evidente para o solo AS, onde os picos a meia altura são mais largos e há uma grande quantidade de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ .

Outro aspecto interessante foi quanto à presença expressiva de ilita no solo SRA, a qual é mais abundante nas rochas sedimentares. Este solo é proveniente do intemperismo do arenito, sendo a presença deste argilomineral resquícios de sua rocha mãe. Com relação à presença de quartzo nos dois solos, esta pode estar vinculada a maior quantidade de fração de areia nesses materiais.

## 4.2 CURVA CARACTERÍSTICA

A curva característica é considerada uma das principais relações constitutivas para entender e interpretar a resposta de um solo não saturado, fornecendo informações que auxiliam na solução de problemas dentro da engenharia geotécnica. Como apresentado na revisão da literatura, a quantidade de água contida nos vazios do solo pode ser representada pelo teor de umidade (gravimétrico ou volumétrico) ou pelo grau de saturação. Nesta pesquisa as curvas características dos solos estudados foram representadas pela sucção *versus* o grau de saturação, visto que há uma ampla utilização deste parâmetro em estudos relacionados à pavimentação.

Como apresentado no capítulo de metodologia, foi utilizada a técnica do papel filtro para a obtenção das curvas características, onde todas as amostras foram moldadas na umidade ótima, sofrendo ciclos de secagem e/ou umedecimento. Essa escolha foi feita com o objetivo de reproduzir com maior fidelidade o comportamento de saturação e dessaturação sofrido pelos solos em campo. Na Tabela 4-4 é apresentado alguns índices físicos iniciais das amostras ensaiadas.

Tabela 4-4 - Características iniciais das amostras utilizadas na determinação das curvas características dos solos AS e SRA

CP	Solo	W <sub>0</sub> (%)	e	Sr (%)	Energia de Compactação	Trajectoria
1	AS	21,4	0,708	82,1	Intermediária	S - U
2		21,4	0,640	91,7	Intermediária	S - U
3		21,4	0,642	91,2	Intermediária	S - U
4		21,4	0,638	91,2	Intermediária	U - S
5		21,4	0,638	91,1	Intermediária	U - S
6		21,4	0,643	92,2	Intermediária	U - S
7	SRA	11	0,342	88,2	Intermediária	S - U
8		11	0,339	88,3	Intermediária	S - U
9		11	0,342	88,0	Intermediária	S - U
10		11	0,364	80,7	Intermediária	U - S
11		11	0,356	82,9	Intermediária	U - S
12		11	0,343	86,2	Intermediária	U - S
13	AS	23,3	0,806	83,4	Normal	S - U
14		23,3	0,812	81,1	Normal	S - U
15		23,3	0,809	83,2	Normal	S - U
16		23,3	0,820	84,4	Normal	U - S
17		23,3	0,816	84,8	Normal	U - S
18		23,3	0,815	84,5	Normal	U - S
19	SRA	12,1	0,385	82,9	Normal	S - U
20		12,1	0,385	82,6	Normal	S - U
21		12,1	0,384	82,5	Normal	S - U
22		12,1	0,384	82,5	Normal	U - S
23		12,1	0,389	84,3	Normal	U - S
24		12,1	0,385	82,6	Normal	U - S

#### 4.2.1 Modelos de ajuste da Curva Característica

Diversas equações matemáticas foram propostas na literatura para representar a curva característica de um solo não saturado, tanto com ajustes unimodais ou bimodais, sendo as principais apresentadas no item 2.3.4 deste trabalho. Algumas destas equações foram avaliadas para o ajuste das curvas características dos solos AS e SRA nas duas energias estudadas e uma síntese da resposta obtida é apresentada na Tabela 4-5. Para facilitar o ajuste matemático, um ponto teórico com sucção igual a 1.000.000 kPa e grau de saturação de 0% foi adicionado a todas as curvas características.

Tabela 4-5 - Coeficientes de determinação ( $R^2$ ) obtidos após o ajuste das curvas utilizando modelos da literatura

Modelo	AS - EI	AS - EN	SRA - EI	SRA - EN
	$R^2$	$R^2$	$R^2$	$R^2$
Fredlund and Xing (1994)	0,94	0,94	0,95	0,97
Van Genuchten (1980)	0,85	0,89	0,94	0,93
Brooks and Corey (1964)	0,76	0,84	0,90	0,93
Gardner (1958)	0,96	0,93	0,95	0,97
Gitirana Jr e Fredlund (2004) - Unimodal (1 ponto)	0,80	0,89	0,88	0,92
Gitirana Jr e Fredlund (2004) - Unimodal (2 pontos)	0,91	1,00	0,99	0,99
Gitirana Jr e Fredlund (2004) - Bimodal (4 pontos)	0,99	0,99	0,99	0,99

Avaliando os coeficientes de determinação ( $R^2$ ) obtidos utilizando as equações de ajuste e o software Excel verifica-se que praticamente todos apresentaram desempenho satisfatório. Dentre os sete modelos avaliados, os que obtiveram melhor ajuste foram os modelos unimodal (que apresenta a curva em formato de “S” e considera dois pontos de inflexão) e bimodal (que apresenta a curva em formato de duplo “S” e considera quatro pontos de inflexão) de Gitirana Jr e Fredlund (2004). Mesmo os dois modelos apresentando desempenho satisfatório, o modelo bimodal se ajustou melhor com os pontos obtidos através do ensaio e permitiu uma melhor visualização do comportamento dos materiais. A equação utilizada para este modelo se encontra na revisão da literatura (equação 9).

Além do modelo unimodal de Gitirana e Fredlund (2004), os modelos de Fredlund e Xing (1994) e Gardner (1958) também apresentaram um ajuste muito satisfatório e estes ajustes são apresentados no APÊNDICE A deste trabalho para cada solo e energia estudada.

Ao utilizar a equação proposta por Gitirana Jr e Fredlund (2004) para curvas características bimodais estimou-se graficamente o valor de entrada de ar e sucção residual dos macroporos ( $\Psi_{b1}$  e  $\Psi_{res1}$ ) e dos microporos ( $\Psi_{b2}$  e  $\Psi_{res2}$ ). Estes valores estimados de primeiro e segundo valor de entrada de ar estão apresentados na Tabela 4-6 considerando os dois solos e duas

energias. As Figura 4-7, Figura 4-8, Figura 4-9 e Figura 4-10 apresentam as curvas características para os solos AS e SRA na energia intermediária e as curvas destes mesmos solos para a energia normal, respectivamente. Os parâmetros obtidos através do ajuste matemático utilizando o modelo de Gitirana Jr e Fredlund (2004) para as curvas bimodais obtidas estão apresentados na Tabela 4-7.

Tabela 4-6 - Valores de entrada de ar dos solos AS e SRA considerando as duas energias (valores obtidos graficamente)

<b>Solo</b>	<b>Energia</b>	<b>1° VEA (kPa)</b>	<b>2° VEA (kPa)</b>
AS	Intermediária	-	4100
SRA	Intermediária	-	2850
AS	Normal	5,5	5950
SRA	Normal	5,5	1600

Tabela 4-7 - Parâmetros utilizados para ajuste matemático das curvas dos solos AS e SRA nas duas energias

<b>Solo</b>	<b>Energia</b>	<b><math>\Psi_{b1}</math> (kPa)</b>	<b><math>S_b</math></b>	<b><math>\Psi_{res1}</math> (kPa)</b>	<b><math>S_{res1}</math></b>	<b><math>\Psi_{b2}</math> (kPa)</b>	<b><math>\Psi_{res2}</math> (kPa)</b>	<b><math>S_{res2}</math></b>	<b>a</b>
AS	Intermediária	1,04	0,926	9,19	0,958	4159,2	136204,7	0,010	0,044
SRA	Intermediária	1,87	0,609	5,58	0,940	2976,1	9753,6	0,184	0,048
AS	Normal	6,12	0,777	8,30	0,887	6066,7	25957,7	0,168	0,030
SRA	Normal	5,46	0,726	7,20	0,845	1511,2	10333,7	0,143	0,080

Onde: a = variável de forma da hiperbole;  $S_b$  = segundo grau de saturação;  $S_{res1}$ ,  $S_{res2}$  = graus de saturação residuais;  $\Psi_{b1}$ ,  $\Psi_{b2}$  = valores de entrada de ar e  $\Psi_{res1}$ ,  $\Psi_{res2}$  = sucções residuais.

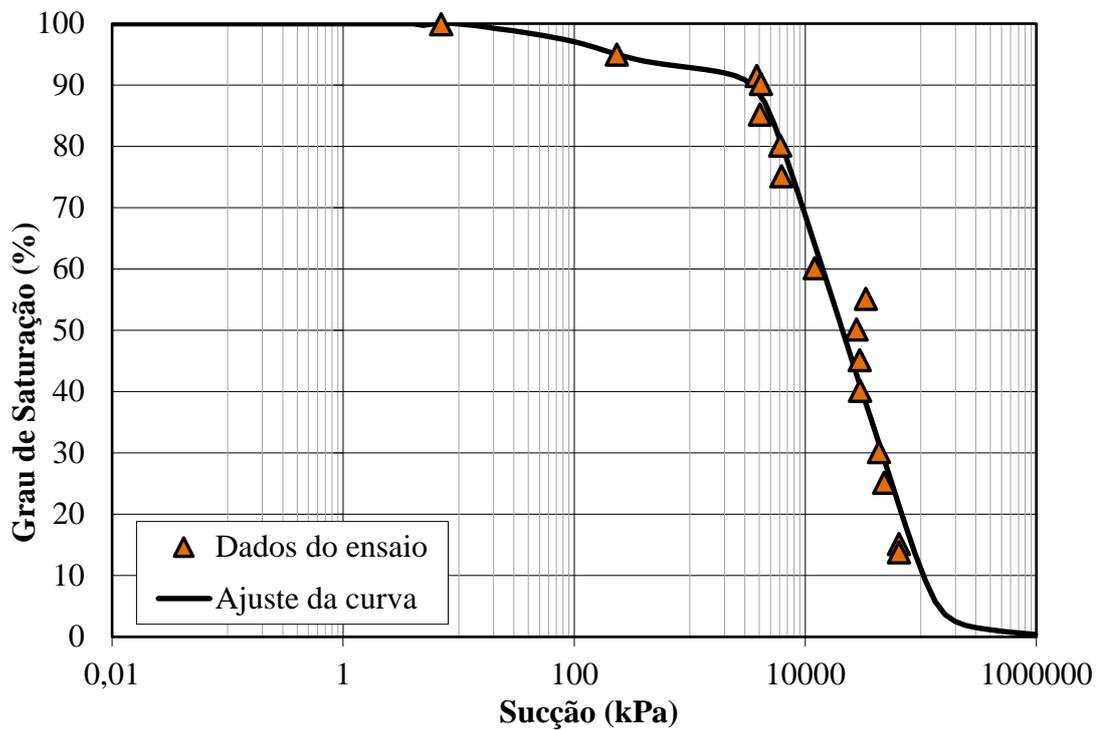


Figura 4-7 - Curva característica do solo AS na energia intermediária

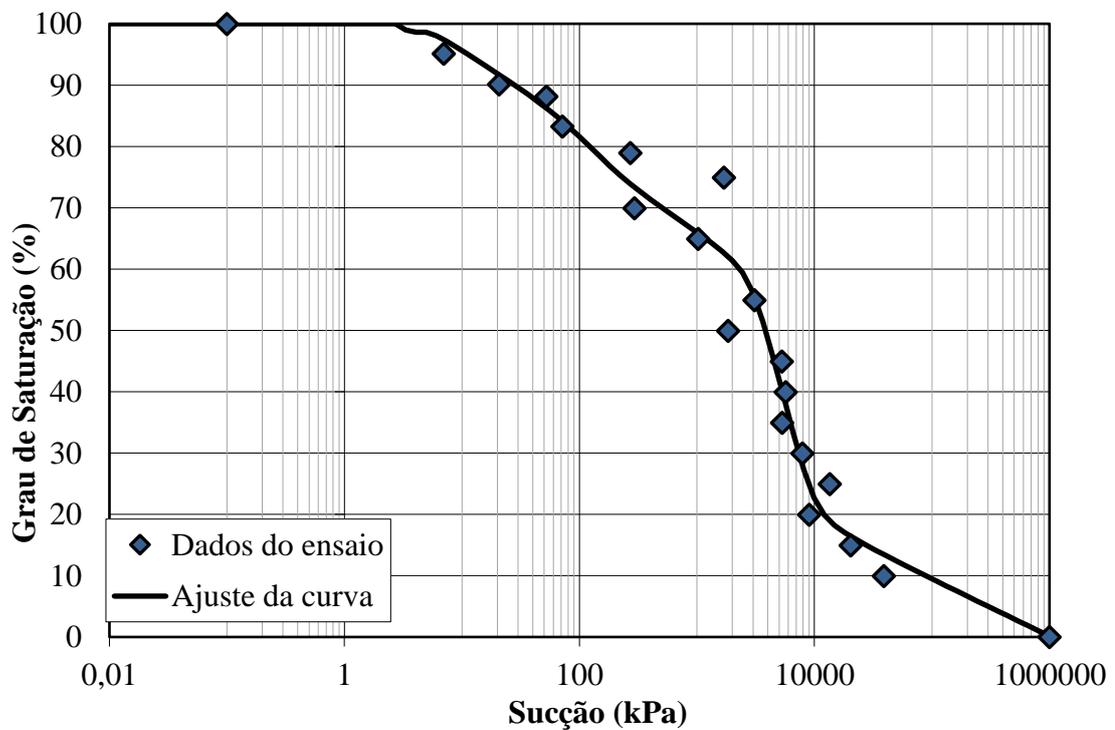


Figura 4-8 - Curva característica do solo SRA na energia intermediária

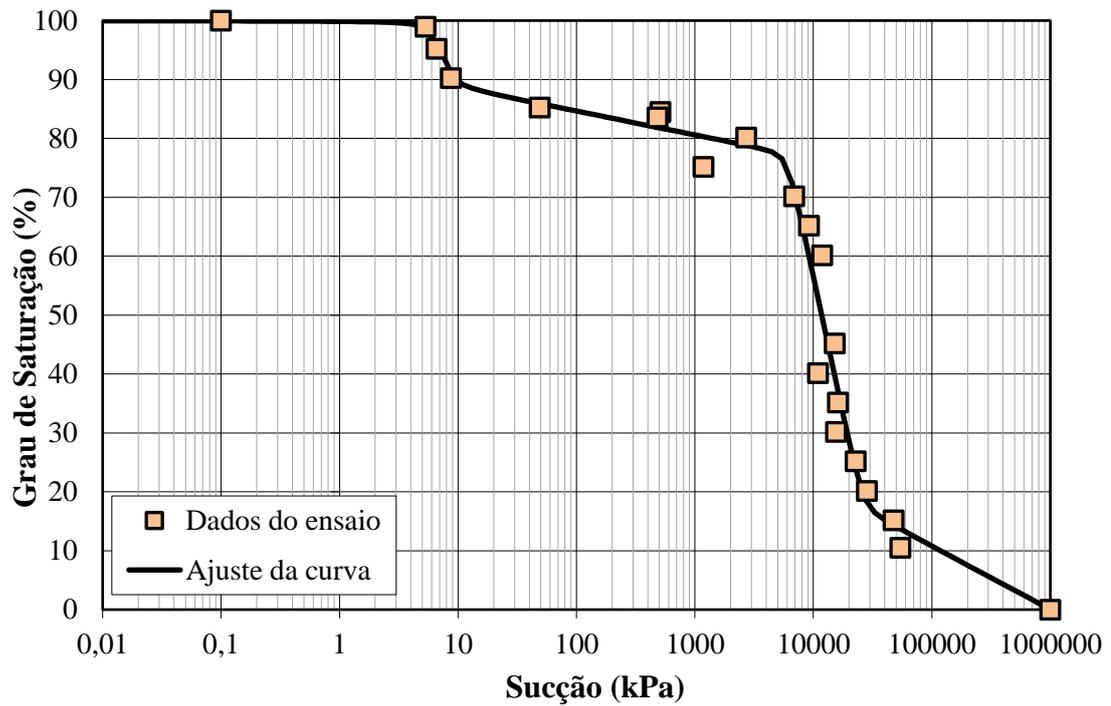


Figura 4-9 - Curva característica do solo AS na energia normal

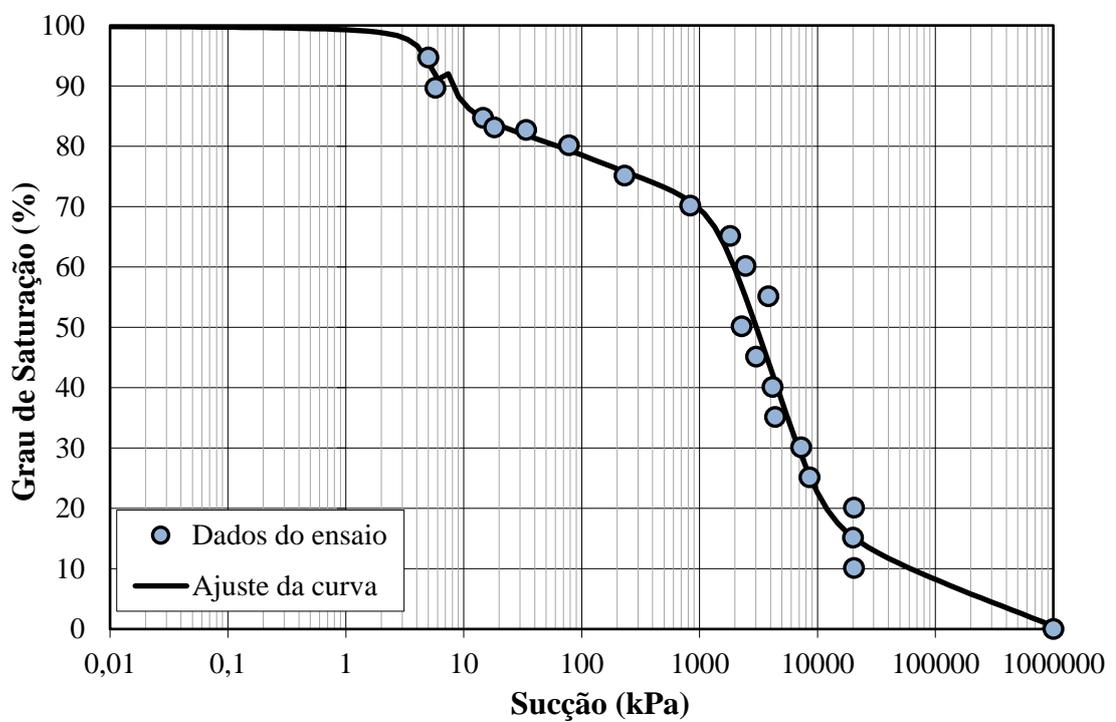


Figura 4-10 - Curva característica do solo SRA na energia normal

As curvas características apresentadas nestas figuras apresentam um formato bimodal (duplo “S”) caracterizado pela existência de dois valores de entrada de ar e um patamar intermediário.

Avaliando globalmente, os solos inicialmente apresentam um primeiro valor de entrada de ar menor que 10 kPa seguido por uma pequena dessaturação. Essa dessaturação inicial corresponde ao primeiro trecho da curva e ele ocorre para sucções bastante baixas. Essa pequena dessaturação é menos significativa para a energia intermediária.

Após essa dessaturação inicial, as curvas relativas ao solo AS apresentaram um patamar praticamente horizontal, onde o valor do grau de saturação diminuiu muito pouco conforme o aumento da sucção. Comportamento contrário foi visualizado para o solo SRA, o qual apresentou uma maior perda do grau de saturação neste patamar intermediário. Ao final deste segundo trecho ocorre o segundo valor de entrada de ar, onde se visualiza uma variação considerável do grau de saturação com a sucção para os dois solos e energias.

O comportamento observado nas curvas características indica que a microestrutura e a macroestrutura do solo comandam a entrada e a saída de água nos poros do solo. No primeiro trecho a dessaturação é governada pela macroestrutura, ou seja, os solos apresentam grumos ou partículas fortemente agregadas, onde tendem a perder água mais facilmente, já que apresentam uma estrutura mais granular. Mesmo o solo SRA sendo mais granular, o comportamento deste solo foi muito parecido com o solo AS considerando a mesma energia. Uma análise mais detalhada sobre a influência do tipo de material será abordada na sequência. Após o primeiro valor de entrada de ar, observa-se que um aumento da sucção não provoca uma variação significativa no teor de umidade (patamar intermediário), provavelmente porque a microestrutura do solo tem grande capacidade de retenção de água, ou seja, a água que se encontrava contínua entre os grumos já foi eliminada na dessaturação inicial e a água restante encontra-se dentro desses grumos. Após esta fase, a sucção atinge valores elevados, onde ela consegue ser capaz de vencer as forças capilares que mantinham as moléculas de água presas no interior dos grumos. Na curva isto é verificado no último trecho, quando se tem uma diminuição do grau de saturação devido a retirada progressiva de água da microestrutura do solo.

Nos próximos subitens será feita uma análise mais detalhada comparando as curvas características encontradas.

#### 4.2.2 Influência da Energia de Compactação

A influência da energia de compactação foi avaliada para os dois solos estudados. Conforme apresentado anteriormente no capítulo 3.2.2, o solo AS foi compactado utilizando esforço dinâmico e o solo SRA o esforço vibratório, no teor ótimo de compactação das energias Proctor normal e Proctor intermediário. Os parâmetros de compactação utilizados foram apresentados na Tabela 4-1.

A Figura 4-11 apresenta o ajuste das curvas características do solo AS moldado em diferentes energias de compactação. Os parâmetros de ajuste das curvas características conforme o modelo bimodal de Gitirana Jr. e Fredlund (2004) foram apresentados anteriormente na Tabela 4-7.

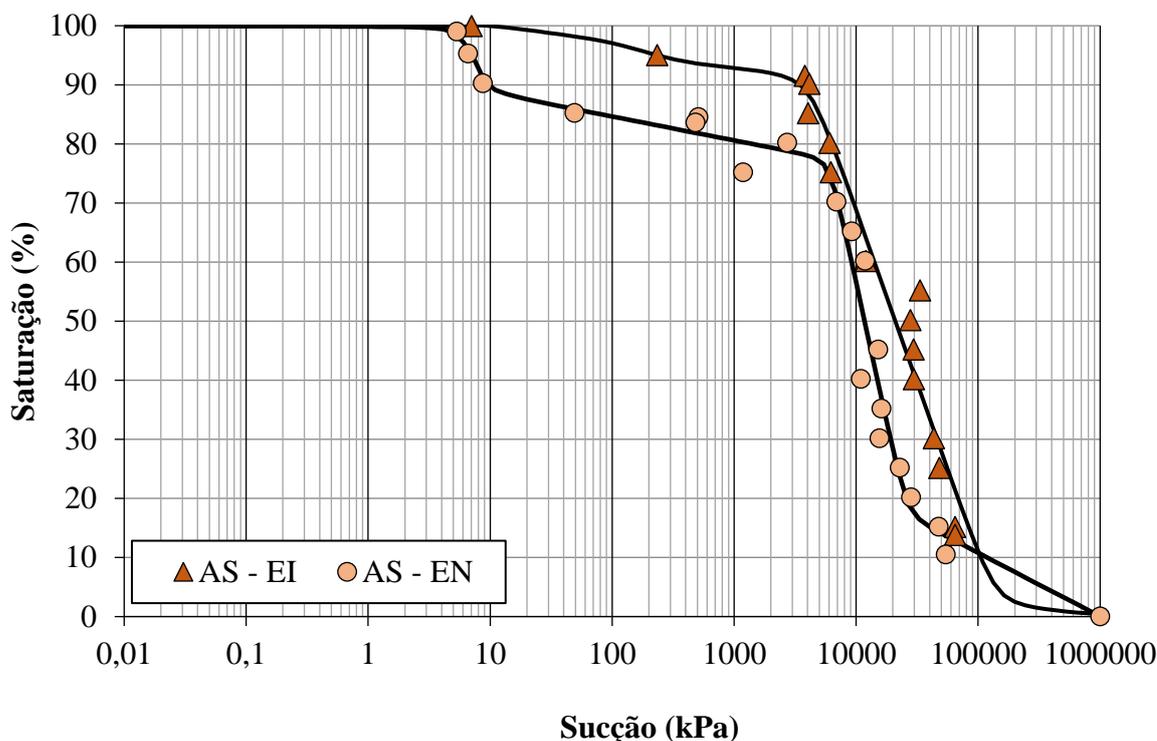


Figura 4-11 - Comparação entre as curvas características do solo AS obtidas para diferentes energias de compactação

Analisando a representação gráfica nota-se inicialmente que o formato da curva característica tende a mudar conforme se altera a energia de compactação. A curva obtida na energia normal apresenta o duplo “S” bem evidente, ao contrário da curva obtida na energia intermediária, onde ela se aproxima um pouco mais de um formato unimodal. Estas alterações no formato da curva são mais perceptíveis na região dos macroporos, onde a redução do volume altera o valor de

entrada de ar. Na região dos microporos não se tem uma alteração tão evidente. Este comportamento em relação à energia de compactação também foi visualizado em outros trabalhos como os de Otálvaro (2013), Queiroz (2015) e Burgos (2016).

Outro fato importante em relação a esta alteração na energia de compactação é a impossibilidade da definição gráfica do primeiro valor de entrada de ar, correspondente a zona dos macroporos (Tabela 4-6). Isso pode ser justificado pelo fato de que o método do papel filtro não apresenta valores tão precisos de leitura de sucção para valores abaixo de 10 kPa, conforme já exposto por Bastos (1999), Weber (2013), Heidemann (2015) e Santos (2020). Corroborando a isto, Otálvaro (2013) cita que o papel filtro não consegue, em alguns casos, capturar fielmente o valor de entrada de ar dos macroporos, o que justifica utilizar outros métodos para obter estes valores iniciais da curva característica.

Analisando a influência do índice de vazios inicial das amostras (vide Tabela 4-4) verifica-se que conforme se diminui este valor em razão da compactação realizada, a curva tende a se deslocar mais para cima, ou seja, apresenta uma maior capacidade de retenção de água para uma dado teor de umidade. Também se verifica que quanto menor o índice de vazios do solo, maior será sua capacidade de retenção de água entre o primeiro e o segundo valor de entrada de ar, fato também visto por Feurharmel (2007). Este comportamento pode ser explicado supondo que o tamanho dos agregados de partículas do solo seja o mesmo para todas as amostras e que a diferença se encontre na distribuição desses agregados, ou seja, no percentual de macroporos e microporos no solo, conforme ilustrado na Figura 4-12. Quando o solo apresenta um índice de vazios mais alto, o solo apresentaria um percentual de macroporos grande e um percentual de microporos pequeno, de modo que as partículas de argila agregadas se encontrassem dispersas. Por outro lado, quando o solo apresenta um índice de vazios mais baixo, o percentual de macroporos é pequeno e o de microporos é grande, a conexão entre os vazios são menores e a estrutura se apresenta mais fechada.

Considerando o solo SRA, a Figura 4-13 apresenta o ajuste das curvas características deste solo moldado em diferentes energias de compactação. Os parâmetros de ajuste das curvas características conforme o modelo bimodal de Gitirana Jr. e Fredlund (2004) foram apresentados anteriormente na Tabela 4-7.

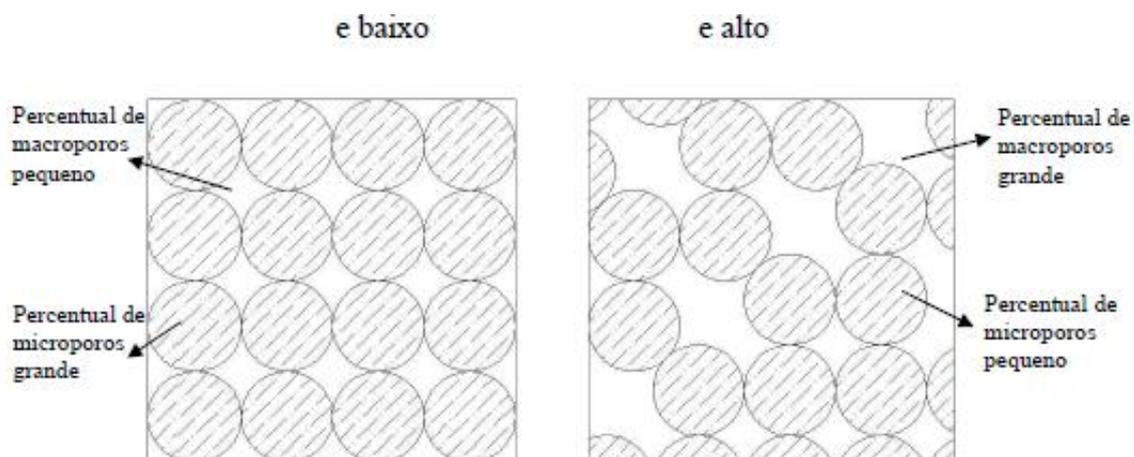


Figura 4-12 - Comparação entre amostras com alto e baixo índice de vazios para o mesmo tamanho de grãos

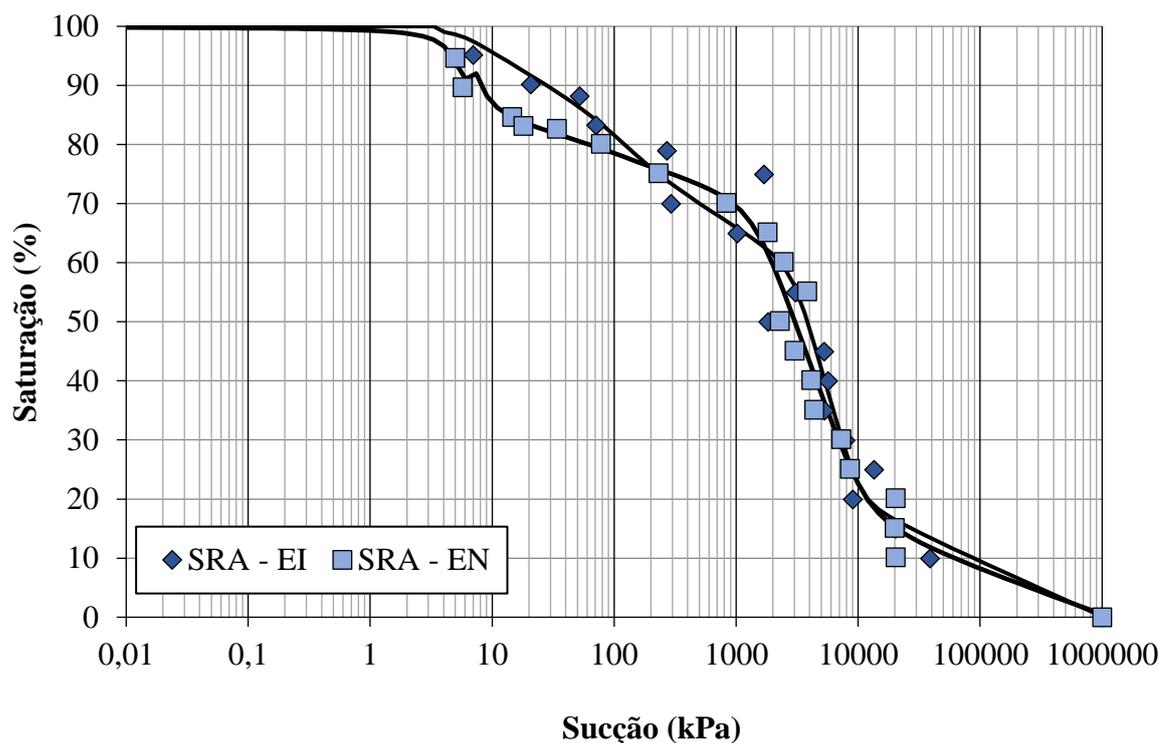


Figura 4-13 - Comparação entre as curvas características do solo SRA obtidas para diferentes energias de compactação

Inicialmente verifica-se que as constatações feitas para o solo AS considerando duas energias distintas em relação à mudança do formato da curva também são perceptíveis para o solo SRA. A curva obtida para uma energia intermediária se aproxima um pouco mais de um formato

unimodal e as diferenças são mais perceptíveis na região dos macroporos, onde a redução do volume altera o valor de entrada de ar. Na região dos microporos as duas curvas praticamente se sobrepõem.

Em relação ao índice de vazios, não se verificou um deslocamento da curva conforme a diminuição do mesmo, fato que foi verificado para o solo AS, que apresentava ser mais argiloso. Para este solo SRA em questão, não houve influência da energia de compactação na alteração da curva característica. Este fato foi verificado na pesquisa de Sugii *et al.* (2003) *apud* Vanapalli *et al.* (2002), o qual abordou a influência do esforço de compactação em um solo arenoso. Segundo Sugii *et al.* (2003), o solo arenoso estudado não apresentou curvas características distintas e sim uma única curva com os pontos obtidos sobrepostos. Este resultado evidencia que para solos arenosos, a distribuição do tamanho dos poros não é afetada pelas diferentes energias de compactação, não influenciando na curva característica e conseqüentemente na sucção desses materiais.

#### 4.2.3 Influência da granulometria e mineralogia dos solos

A influência das particularidades de cada solo foi avaliada em relação as suas características físicas, químicas e mineralógicas. A Figura 4-14 e Figura 4-15 apresentam o ajuste das curvas características dos solos AS e SRA moldados na energia intermediária e energia normal, respectivamente. Os parâmetros de ajuste das curvas características conforme o modelo bimodal de Gitirana Jr. e Fredlund (2004) foram apresentados anteriormente na Tabela 4-7.

Conforme as representações gráficas e de posse do conjunto de análises previamente apresentado, é possível observar que com o aumento da sucção, solos mais granulares apresentam uma taxa de dessaturação mais rápida devido ao fato de que solos granulares apresentam poros interconectados maiores (VANAPALLI *et al.*, 1999). Neste caso, as curvas características obtidas para o solo SRA nas duas energias apresentaram um formato muito parecido com as curvas obtidas para o solo AS (considerando a mesma energia), apenas com um leve deslocamento para a esquerda, apresentando um valor de entrada de ar e sucção residual menor. Por ser um material preponderantemente arenoso (79%) esperava-se que o solo SRA apresentasse valores mais baixos de VEA e uma alta taxa de dessaturação, assim como apresentado na literatura. No entanto, apenas se verificou um valor baixo de VEA e uma taxa

de dessaturação gradativa, com uma inclinação da curva mais suave, possivelmente devido ao predomínio de areia média/fina na fração granular deste solo. Comportamento parecido foi relatado por Santos (2020) para um solo residual de arenito, também da mesma região deste solo em estudo.

Para o solo AS, por ser um material predominantemente argiloso (53%), seria necessário valores de sucção maiores para ocorrer a drenagem livre nos poros, ou seja, o solo fino apresenta uma maior capacidade de retenção de água. Conforme se diminui o tamanho das partículas do solo, o VEA aumenta e a inclinação da curva se torna mais suave. Neste quesito, apenas a inclinação da curva não se apresentou diferente ao se comparar com o solo SRA, considerando as duas energias. Os valores de VEA obtidos para o solo AS nas duas energias também não foram elevados (menor de 10 kPa), mas foram maiores ao se comparar com o solo SRA, que é mais arenoso. Isso pode estar relacionado com uma presença preponderante de areia em sua composição ( $\pm 30\%$ ), o qual pode influenciar no comportamento apresentado para as curvas do solo AS.

Em relação à mineralogia pode-se tecer alguns comentários. O solo AS apresentou uma preponderante presença de quartzo, o que pode ter influenciado no formato da curva característica, já que possui presença de areia em sua composição. Porém este solo também mostrou uma pequena quantidade de montmorilonita, argilomineral que possui elevada força de adsorção e que pode apresentar sucções maiores. Para o solo SRA se visualizou elevada presença de illita e caulinita na pequena porcentagem de argila, as quais também podem ter impactado, principalmente no que se refere aos valores de entrada de ar. Isso pode ter corroborado para que as curvas dos solos ficassem mais próximas, mesmo sendo materiais bem diferentes (um mais arenoso e o outro mais argiloso).

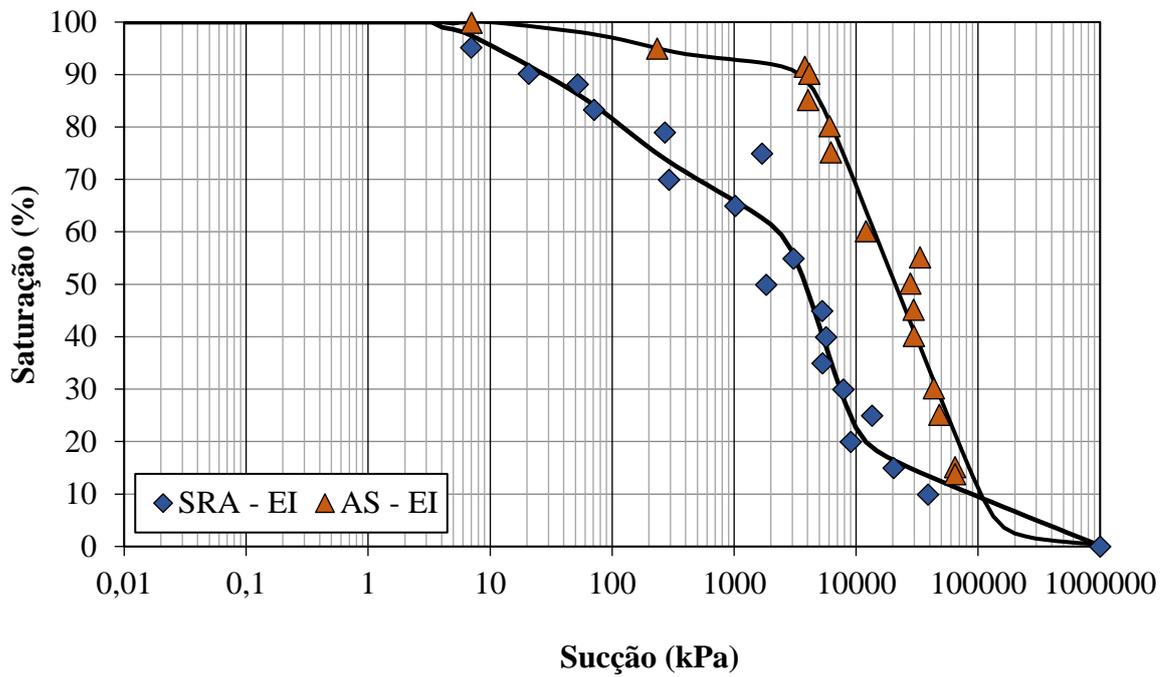


Figura 4-14 - Comparação entre as curvas características dos solos AS e SRA considerando a energia intermediária de compactação

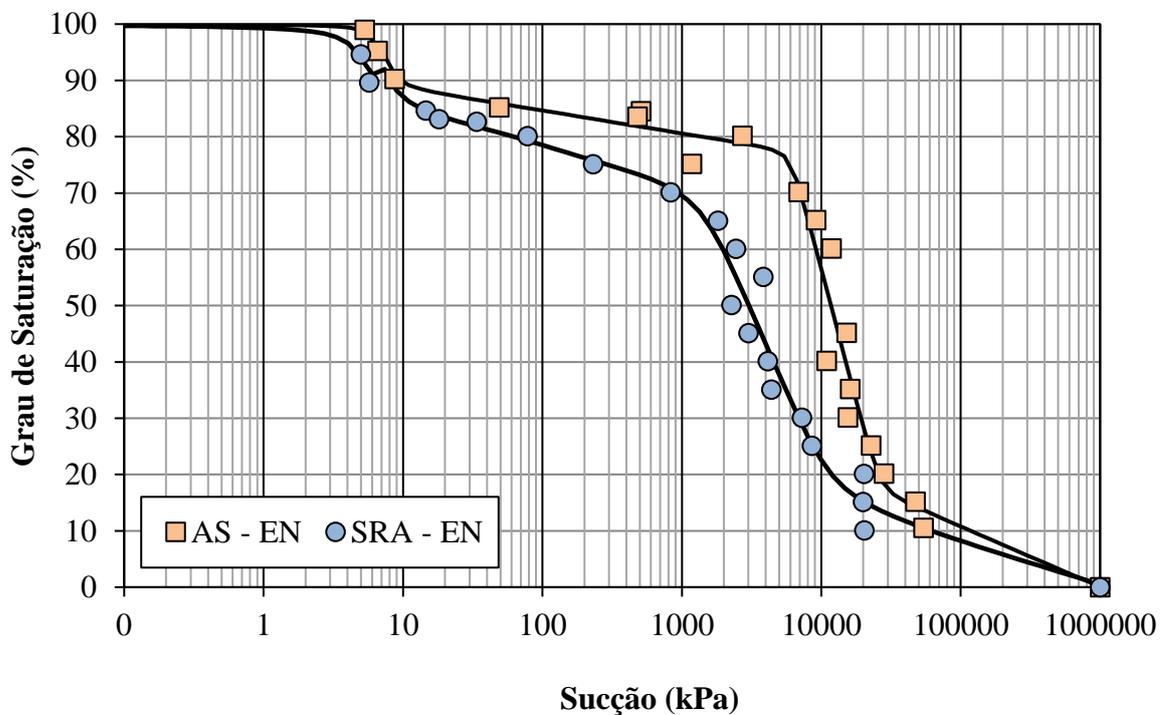


Figura 4-15 - Comparação entre as curvas características dos solos AS e SRA considerando a energia normal de compactação

#### 4.2.4 Influência da História de Umedecimento e Secagem (Histerese)

A histerese de uma curva característica corresponde à diferença entre as trajetórias de umedecimento e secagem. As curvas características dos dois solos estudados e nas duas energias de compactação propostas iniciaram-se no teor de umidade ótimo e a partir deste ponto algumas amostras foram submetidas ao ciclo de umedecimento-secagem e outras ao ciclo de secagem-umedecimento, conforme já apresentado na Tabela 4-4. Na Figura 4-16, Figura 4-17, Figura 4-18 e Figura 4-19 são apresentadas as curvas características com histerese para o solo AS e SRA nas energias intermediária e normal, respectivamente. Para facilitar o entendimento das figuras que representam as histereses, algumas informações são importantes:

- O ponto inicial das curvas, dado pela umidade ótima referente ao solo e energia de compactação aplicado, está representado por um “x” em verde;
- Todos os pontos apresentados são relativos as amostras que sofreram ciclos de secagem-umedecimento e umedecimento-secagem;
- A trajetória “secagem (2)” se refere ao caminho obtido com a secagem da amostra após seu umedecimento até a saturação completa (a qual iniciou na umidade ótima). Esta trajetória é apresentada por uma linha contínua;
- A trajetória “umedecimento (2)” se refere ao caminho obtido com o umedecimento da amostra após sua secagem até uma saturação próxima a zero. Esta trajetória é apresentada por uma linha pontilhada;
- As duas linhas (pontilhada e contínua) apresentadas nas figuras referem-se a histerese do referido solo e energia de compactação.

Na Tabela 4-8 é apresentado os parâmetros obtidos através do ajuste matemático utilizando o modelo e Gitirana Jr. e Fredlund (2004) para as curvas bimodais de umedecimento e secagem. Os parâmetros para as curvas iniciais foram apresentados anteriormente na Tabela 4-7.

Algumas observações quanto a magnitude da histerese na história de umedecimento e secagem desses materiais podem ser apresentadas.

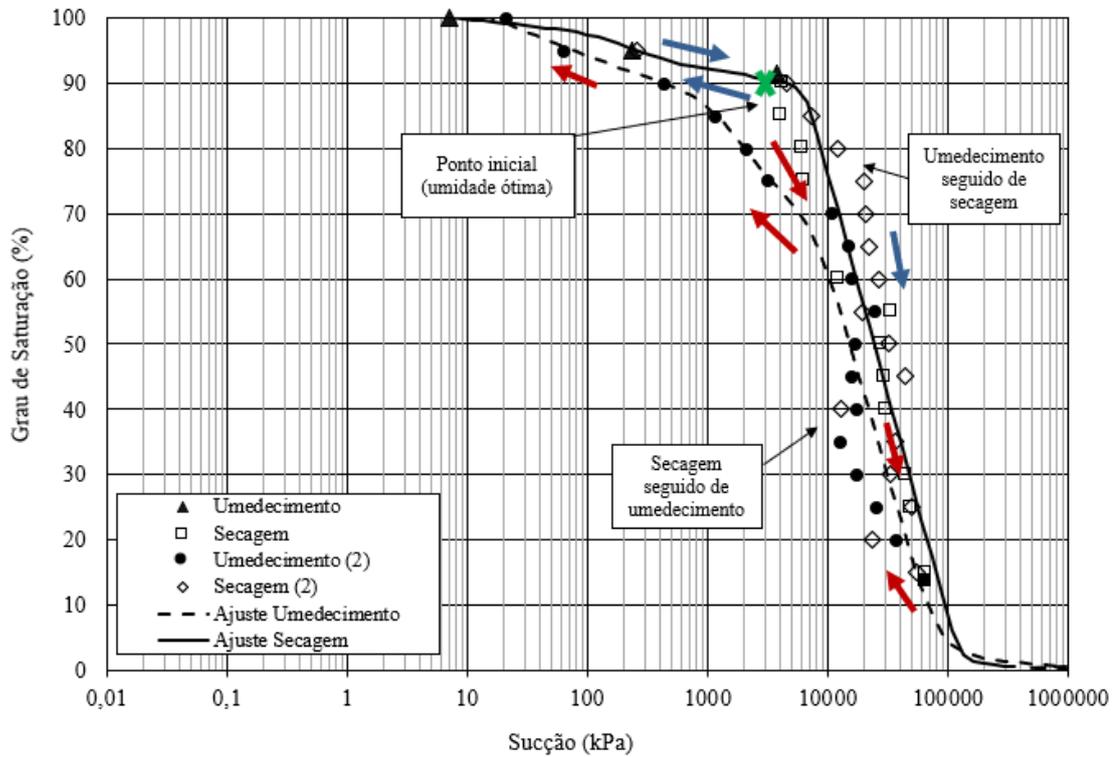


Figura 4-16 - Influência da história de umedecimento e secagem para o solo AS-EI

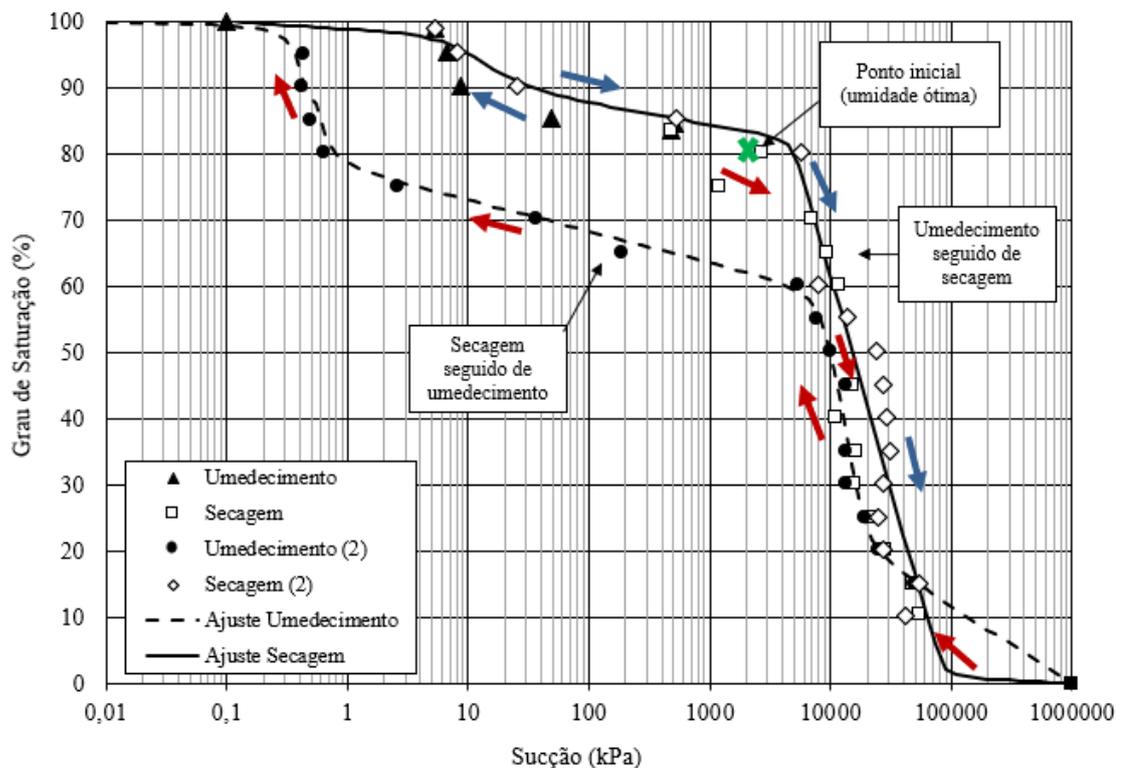


Figura 4-17 - Influência da história de umedecimento e secagem para o solo AS-EN

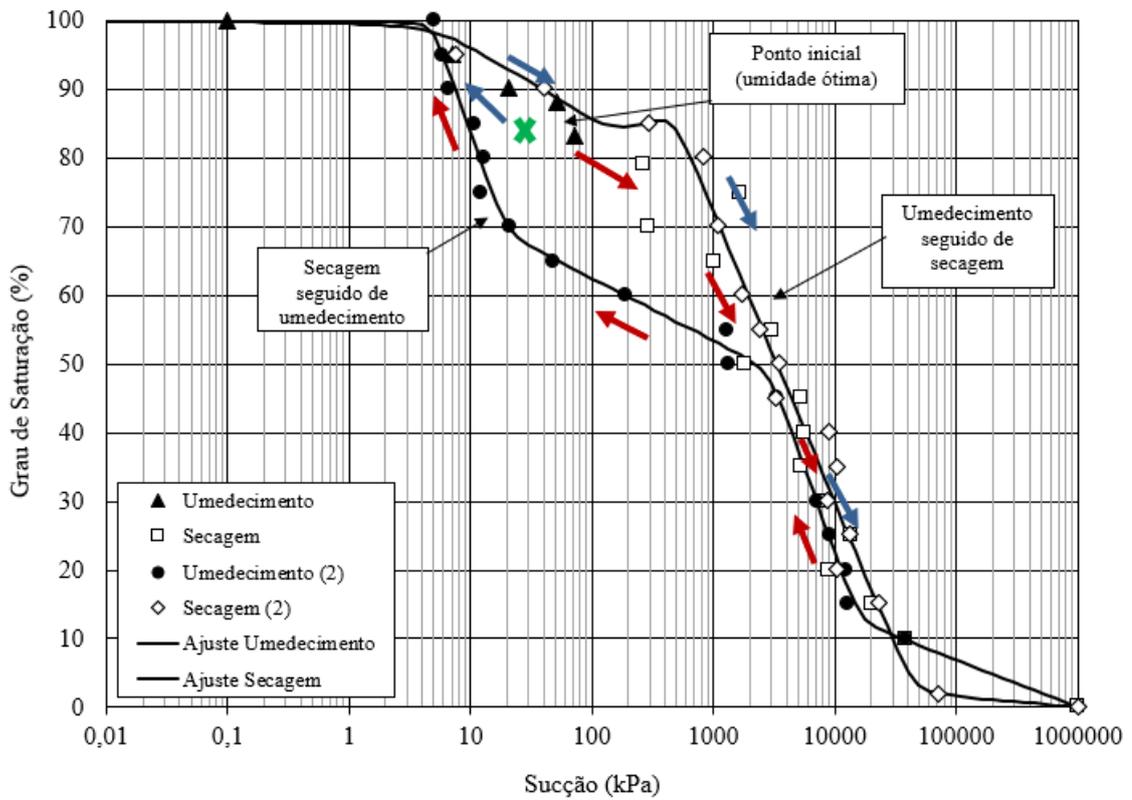


Figura 4-18 - Influência da história de umedecimento e secagem para o solo SRA-EI

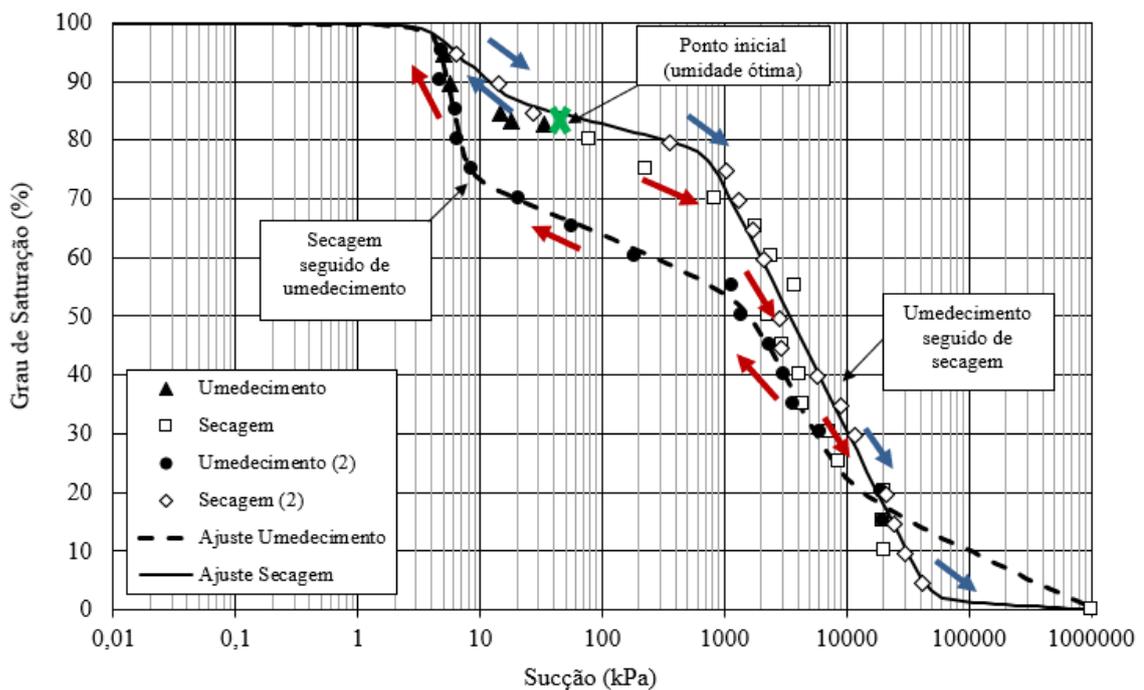


Figura 4-19 - Influência da história de umedecimento e secagem para o solo SRA-EN

Tabela 4-8 - Parâmetros utilizados para ajuste matemático das curvas dos solos AS e SRA nas duas energias considerando ciclos de umedecimento e secagem

Solo	Energia	Ciclo	$\Psi_{b1}$ (kPa)	$S_b$	$\Psi_{res1}$ (kPa)	$S_{res1}$	$\Psi_{b2}$ (kPa)	$\Psi_{res2}$ (kPa)	$S_{res2}$	a
AS	Int.	Umed	0,00	0,719	346,45	0,843	7772,7	79301,0	0,010	0,064
		Sec.	0,19	0,899	6,36	0,981	6333,9	125908,5	0,010	0,020
SRA	Int.	Umed	4,89	0,495	19,54	0,686	2935,1	15773	0,122	0,020
		Sec.	5,69	0,868	147,35	0,829	460,3	45043,7	0,018	0,020
AS	Norm.	Umed	0,41	0,597	0,58	0,781	9368,5	17382,7	0,196	0,073
		Sec.	0,00	0,823	0,03	0,990	4888,4	84532,9	0,010	0,020
SRA	Norm.	Umed	4,98	0,544	6,92	0,730	1770,8	7451,9	0,199	0,061
		Sec.	4,26	0,787	14,07	0,866	721,1	48745,8	0,014	0,02

Onde: a = variável de forma da hiperbole;  $S_b$  = segundo grau de saturação;  $S_{res1}$ ,  $S_{res2}$  = graus de saturação residuais;  $\Psi_{b1}$ ,  $\Psi_{b2}$  = valores de entrada de ar e  $\Psi_{res1}$ ,  $\Psi_{res2}$  = sucções residuais.

Inicialmente verifica-se para todas as amostras que a trajetória umedecimento-secagem não apresentou histerese (ciclo “umedecimento” e “secagem (2)”), indicando que o umedecimento não provoca grandes alterações no solo em si. Este fato parece indicar que o umedecimento não provocou grandes alterações na estrutura do solo, ou seja, provavelmente estes solos em campo já sofreram esta trajetória. Por outro lado, todas as amostras que iniciaram na trajetória de secagem e seguiram para umedecimento (ciclo “secagem” e umedecimento (2)”) apresentaram uma histerese pronunciada, podendo-se supor que essa elevada dessecação provocou uma alteração estrutural nos materiais não sofrida anteriormente.

Feuerharmel (2007) também visualizou este comportamento em dois solos coluvionares estudados e cita que a presença de histerese provavelmente não é uma propriedade intrínseca do solo, dependendo também da sua história de sucção e das trajetórias de umedecimento e secagem aplicadas ao solo até aquele momento.

Outro fator relevante visualizado foi para a histerese obtida no solo AS-EI. Para este solo na energia intermediária a histerese foi menos evidente se comparado ao obtido para o mesmo solo na energia normal. Segundo Marinho *et al.* (2015) este comportamento de diminuição do ciclo de histerese é comum visto que o índice de vazios inicial também é menor. Além disso, os

autores citam que estas diferenças também podem estar associadas a não uniformidade geométrica dos poros, diferente conectividade espacial dos poros durante os processos de secagem ou umedecimento e ar preso dentro da amostra de solo.

Associado a isso também pode estar o fato da variação volumétrica verificada durante a realização dos ciclos para as amostras ensaiadas. Verificou-se para os dois solos que houve variação volumétrica principalmente para os ciclos finais de secagem e umedecimento (curva correspondente a “Secagem (2)” e “Umedecimento (2)” das figuras já apresentadas), ou seja, após o solo já passar por um ciclo inicial, sendo referente ao segundo ciclo. Isto foi mais evidente para o solo SRA, o qual apresenta mais areia em sua composição e, como apresentado anteriormente, apresenta uma capacidade menor de retenção de água em seus poros. Este fato é perceptível na Figura 4-20, pois conforme se manuseava as amostras, verificava-se que a mesma se retraía em ciclos de secagem, soltando-se do anel, e se expandia ao ciclo de umedecimento.



Figura 4-20 - Variação de volume do solo SRA-EN durante os ciclos

Núñez (1991) avaliou um solo residual de arenito proveniente da mesma região do solo utilizado na presente pesquisa em relação a expansão obtida durante o ensaio de ISC. Foi verificado que a expansão atingiu um valor máximo de 1,6% para corpos de prova moldados na energia normal e 1,9% para corpos de prova moldados na energia intermediária. O autor afirmou que a provável expansão verificada se devia a presença de ilita e não atingindo valores

maiores por conta da presença de caulinita. A presença destes minerais também foi verificada no solo SRA através dos resultados de DRX realizados e já apresentados.

Outro fato importante em relação à histerese apresentada para os dois solos e nas duas energias, é que o maior espaçamento entre as curvas de secagem e umedecimento se dá entre 70 e 90% de grau de saturação. A literatura apresenta que geralmente quando o solo está em sua umidade ótima, que seria a umidade ideal de compactação do solo em campo, o seu grau de saturação situa-se entre 80 e 90%. A partir disso podemos tecer os seguintes comentários:

- Ao avaliar a histerese obtida, mais precisamente entre 70 e 90% de grau de saturação, temos muitas vezes uma variação de sucção bastante elevada, como a visualizada para o solo AS-EN, onde houve uma variação de 0,4 a 7000 kPa;
- Em campo, a partir da leitura de sucção da camada de interesse, nem sempre a sucção expressa realmente o que era esperado, visto que não se considera esta histerese e não se tem conhecimento dos ciclos de secagem e/ou umedecimento pelo qual o solo passou.

Relacionado a isso podemos citar o trabalho de Núñez (1997), que apresentou algumas conclusões ao verificar sucções extremamente baixas medidas em pistas experimentais construídas na área de pesquisas e testes em pavimentos no Laboratório de Pavimentação da UFRGS. Para realizar as medições, o autor utilizou três tensiômetros do tipo *Jet Fill*, com precisão de 1 kPa, instalados próximos às bordas das pistas. Estes tensiômetros realizavam leituras referente à camada de subleito, sendo este um argissolo vermelho proveniente da mesma região de onde se coletou o solo AS da presente pesquisa, também utilizando a energia normal. Segundo ele, durante as 75 semanas de leituras, raramente os valores de sucção superavam os 14 kPa, o que representava um grau de saturação bastante elevado (se comparado ao que era esperado para a umidade ótima, em torno de 1500 kPa), e em várias semanas foram registradas sucções nulas, correspondentes a 100% do grau de saturação. Associado a isso, também se verificou a cota de água através de um piezômetro, que indicou uma distância de 1,2 metros entre o nível de água e a camada de argissolo utilizada como subleito das pistas experimentais, mostrando que não havia influência do lençol freático nas sucções medidas. De posse disso, pode-se verificar que provavelmente estas sucções medidas em campo estavam associadas a histerese da curva característica do material, frente aos ciclos de secagem e umedecimento.

### 4.3 MÓDULO DE RESILIÊNCIA

O ensaio de módulo de resiliência é considerado atualmente o parâmetro mecânico mais estudado na pavimentação moderna, fato este justificável, sendo que está diretamente relacionado a rigidez e a capacidade de suporte dos materiais utilizados nas camadas do pavimento.

Nesta seção são apresentados e analisados os resultados obtidos a partir dos ensaios de MR, executados segundo os procedimentos detalhados no item 3.2.4.1 e 3.2.4.2. Foram realizados ensaios mecânicos para obtenção do módulo de resiliência dos dois solos em estudo, nas energias normal e intermediária e com variação de -2% e +1% em relação ao teor de umidade ótimo (reiterando que os ensaios na umidade ótima foram realizados por Schreinert (2021)).

Em um primeiro momento, os resultados encontrados são estudados sob a perspectiva gráfica em função das tensões aplicadas e pelo ajuste de modelos de regressão.

Os parâmetros obtidos em todos os CPs moldados para os ensaios de MR são apresentados em tabela no APÊNDICE B, assim como os índices físicos ótimos de compactação para cada solo e energia em estudo, a fins de comparação com aqueles atingidos nas amostras. Vale ressaltar que para cada uma das condições analisadas realizaram-se ensaios em duplicata, em razão do reduzido período para execução dos ensaios e falta de material.

Conforme dito anteriormente, a diminuição da variação de umidade de +2% para +1% foi necessária em razão de se atingir valores de 100% de grau de saturação e valores em torno de 97% para grau de compactação para o solo SRA. Algumas amostras foram moldadas nesta condição de +2% (com certa dificuldade, já que o solo estava muito úmido, de difícil compactação e aderindo às paredes do molde ao extraí-lo), porém aos primeiros impactos durante o ensaio já rompiam. Desta forma fixou-se esta variação de +1% para os dois solos em estudo.

A apresentação e análise dos resultados é apresentada na sequência e foi subdividida em subitens. Cada subitem relaciona o módulo de resiliência com uma das variáveis de estudo: estado de tensões, energia de compactação, umidade e sucção.

### 4.3.1 Influência do estado de tensões

O estado de tensões constitui um dos fatores que mais influenciam na rigidez de solos e materiais granulares, tornando-se neste sentido, a sua análise fundamental. Os modelos de previsão foram criados com o intuito de estimar valores de MR a partir de fatores que podem influenciar no comportamento resiliente de materiais utilizados na pavimentação. Desta forma, inicialmente é apresentado os MR modelados pelas principais equações matemáticas que retratam os estados de tensões atuantes no solo.

Em um primeiro momento são apresentados graficamente os dados dos MR obtidos com a variação de umidade em +1% e -2% nos ensaios em função da tensão confinante, da tensão desvio e do primeiro invariante de tensões, respectivamente, para os dois solos e nas duas energias de compactação em estudo (APÊNDICE C). Nestes gráficos também são apresentadas as respectivas linhas de tendência e os valores de MR para os referidos solos na umidade ótima, sendo estes resultados retirados do trabalho de Schreinert (2021) e colocados apenas para comparação conjunta. Além disso, na Figura 4-21, Figura 4-22, Figura 4-23 e Figura 4-24 são apresentados os resultados de MR em função da tensão confinante e da tensão desvio em conjunto (modelo composto), por meio de gráficos tridimensionais. Esta avaliação da resposta obtida utilizando o modelo composto permite realizar uma análise conjunta da influência de ambas as variáveis na resposta resiliente dos materiais.

Avaliando a influência do estado de tensões na resposta resiliente dos solos em estudo, constatou-se que, conforme já esperado, o solo AS evidenciou uma relação mais significativa com a tensão desvio ( $\sigma_d$ ), em razão de sua natureza argilosa/fina. Este material apresentou uma redução do MR em função do aumento de  $\sigma_d$ , sendo este um comportamento típico de materiais coesivos na literatura. Já o solo SRA, que apresenta uma granulometria mais grosseira, demonstrou ser mais dependente da tensão confinante ( $\sigma_3$ ), onde com o aumento da mesma houve um aumento na rigidez, sendo este comportamento representativo de materiais granulares. Além disso, se verificou a importância da avaliação conjunta da influência do par de tensões nos valores obtidos de MR para cada solo, pois analisando apenas uma variável pode-se induzir a conclusões precipitadas acerca do efeito desta resposta elástica dos materiais (mesmo que a influência de algum fator seja menos relevante que outro). No caso do invariante de tensões ( $\theta$ ), mesmo apresentando o somatório das tensões principais atuantes e abrangendo de certa forma

o estado de tensões como um todo, ainda não consegue de forma clara apresentar o comportamento resiliente dos materiais frente aos carregamentos impostos.

Considerando esta avaliação conjunta da influência do par de tensões, podemos verificar através das figuras já citadas que, para o solo AS, mesmo que seu comportamento frente à rigidez seja regido primordialmente pelo  $\sigma_d$ , ele apresenta também um efeito significativo de  $\sigma_3$  no MR do material. Em contrapartida, ao se avaliar o solo SRA, verifica-se uma maior influência quase que exclusivamente do  $\sigma_3$ , com pouca interação com  $\sigma_d$ .

Referente à capacidade elástica dos materiais, ou seja, a amplitude e variação do MR dos materiais entre si, apenas avaliando a partir de uma perspectiva visual dos gráficos, o solo AS na energia intermediária apresentou um melhor desempenho quando sujeito a baixos níveis de tensões, principalmente em relação ao  $\sigma_d$ , atingindo valores em um intervalo aproximado entre 200 e 400 MPa, considerando a variação de umidade estudada. Em contrapartida, considerando a energia normal, não se verificou este melhor desempenho em baixos níveis de tensões para este solo, o que mostra a influência da energia de compactação na rigidez do material. Para o solo SRA se verificou o contrário, ou seja, para níveis de tensões elevados, sobretudo quanto ao  $\sigma_3$ , o desempenho foi melhor, chegando a apresentar valores de MR entre 250 e 400 MPa, aproximadamente, para a energia intermediária e 350 e 150 MPa, para a energia normal, considerando a variação de umidade estudada. De modo geral, para os dois solos se verificou um aumento nos valores de MR com a elevação da energia de compactação, assim como um aumento dos valores de MR com uma umidade menor que a ótima. Em relação à variação de umidade é importante citar que não se verificou uma diferença expressiva na rigidez do material ao comparar os MR obtidos na umidade ótima e com -2% em relação a ótima. Apenas o solo AS na energia normal apresentou certa diferença, com valores mais expressivos ao ensaiar na umidade ótima, demonstrando a importância de se buscar sempre a umidade mais próxima da ideal. Uma avaliação mais detalhada em relação à influência da energia de compactação e da variação de umidade é apresentada nos subitens seguintes.

De modo geral, a partir de uma breve análise gráfica em função do estado de tensões, foi possível avaliar que existem diversas variáveis envolvidas. Todos estes fatores corroboram quanto à complexidade inerente ao estudo do comportamento resiliente de solos e com isso, almejou-se avaliar com maior profundidade estes fatores nos próximos subitens.

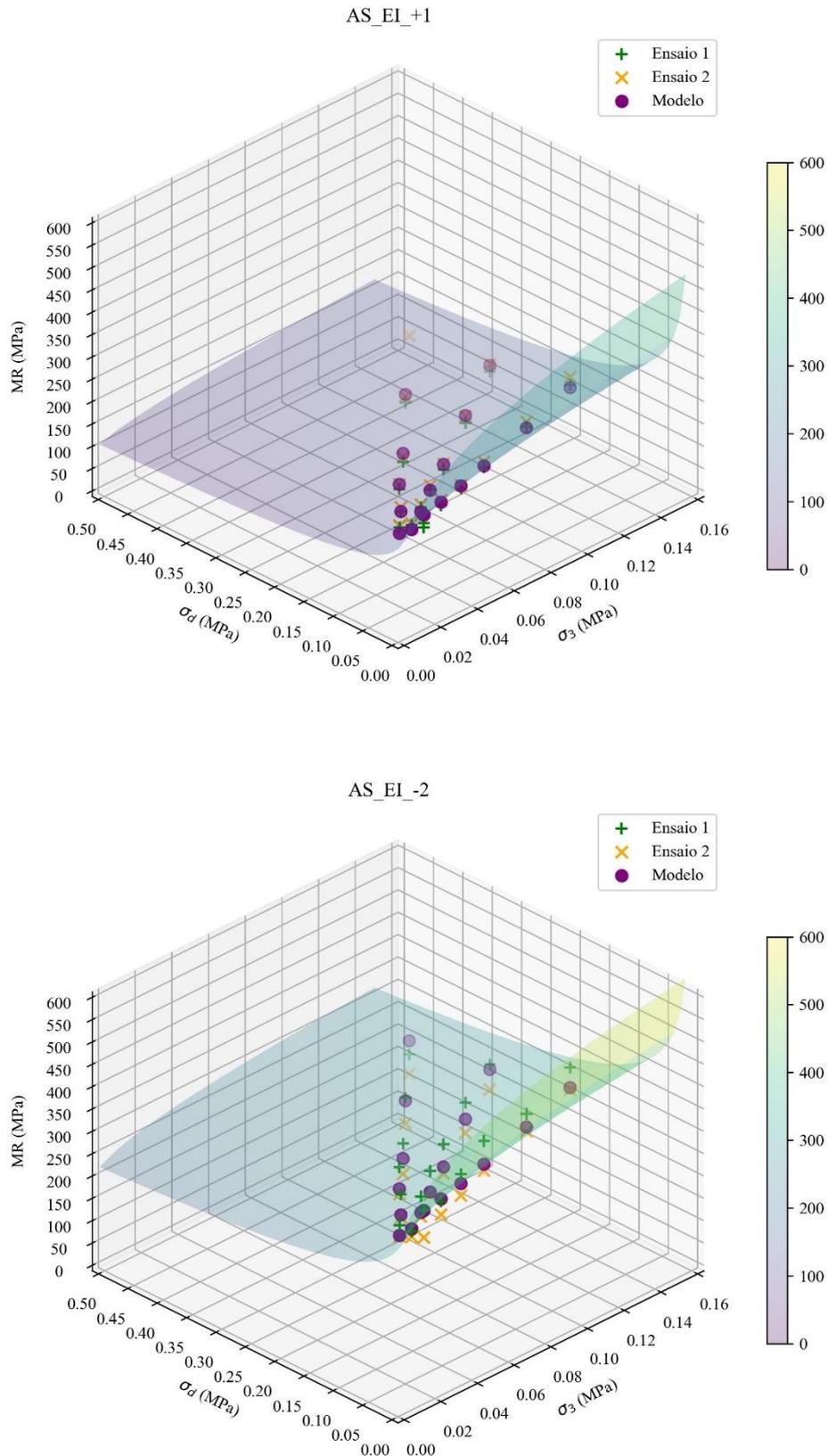


Figura 4-21 - Gráficos de MR em função de  $\sigma_3$  e  $\sigma_d$  para o solo AS-EI

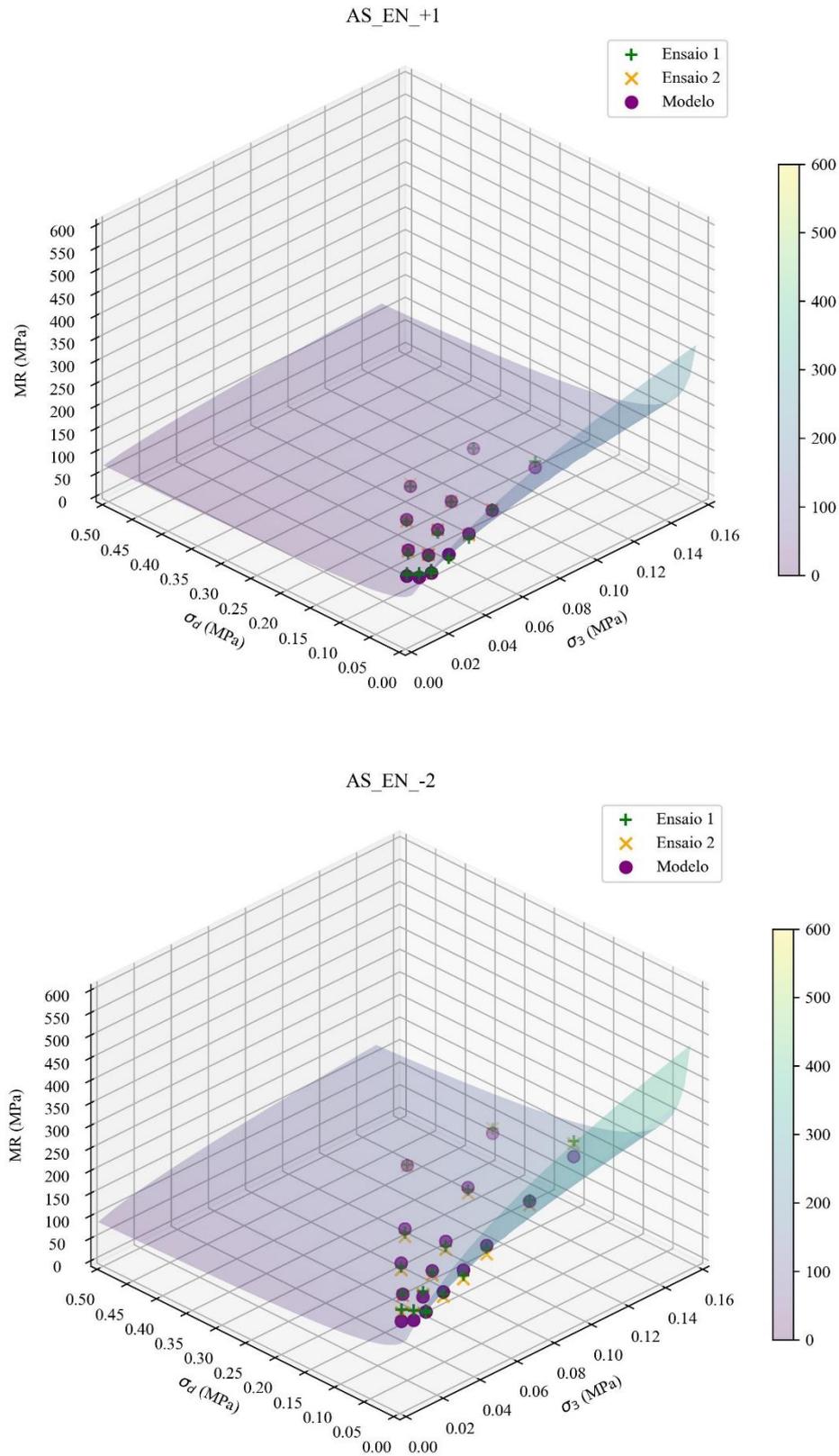


Figura 4-22 - Gráficos de MR em função de  $\sigma_3$  e  $\sigma_d$  para o solo AS-EN

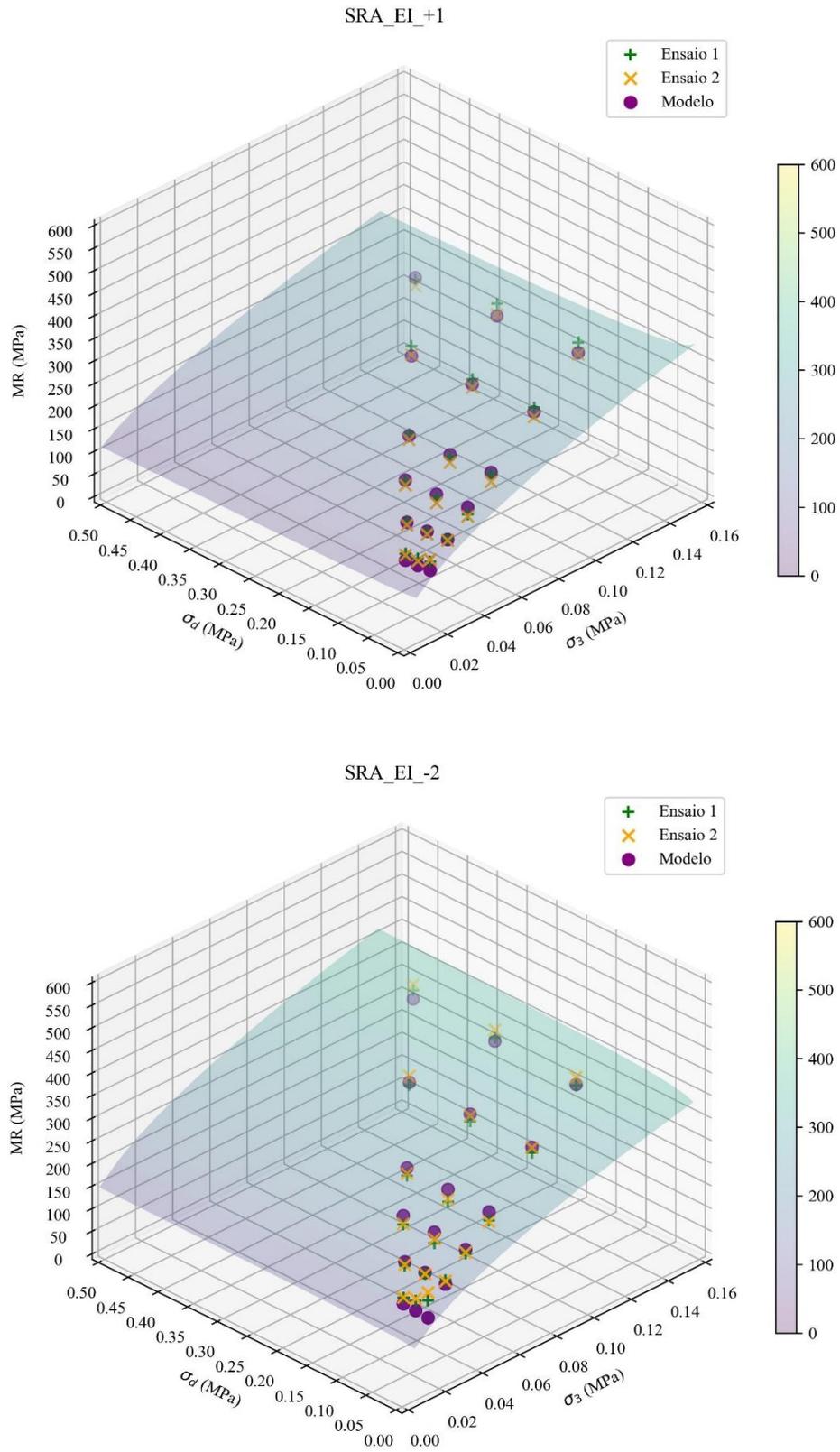


Figura 4-23 - Gráficos de MR em função de  $\sigma_3$  e  $\sigma_d$  para o solo SRA-EI

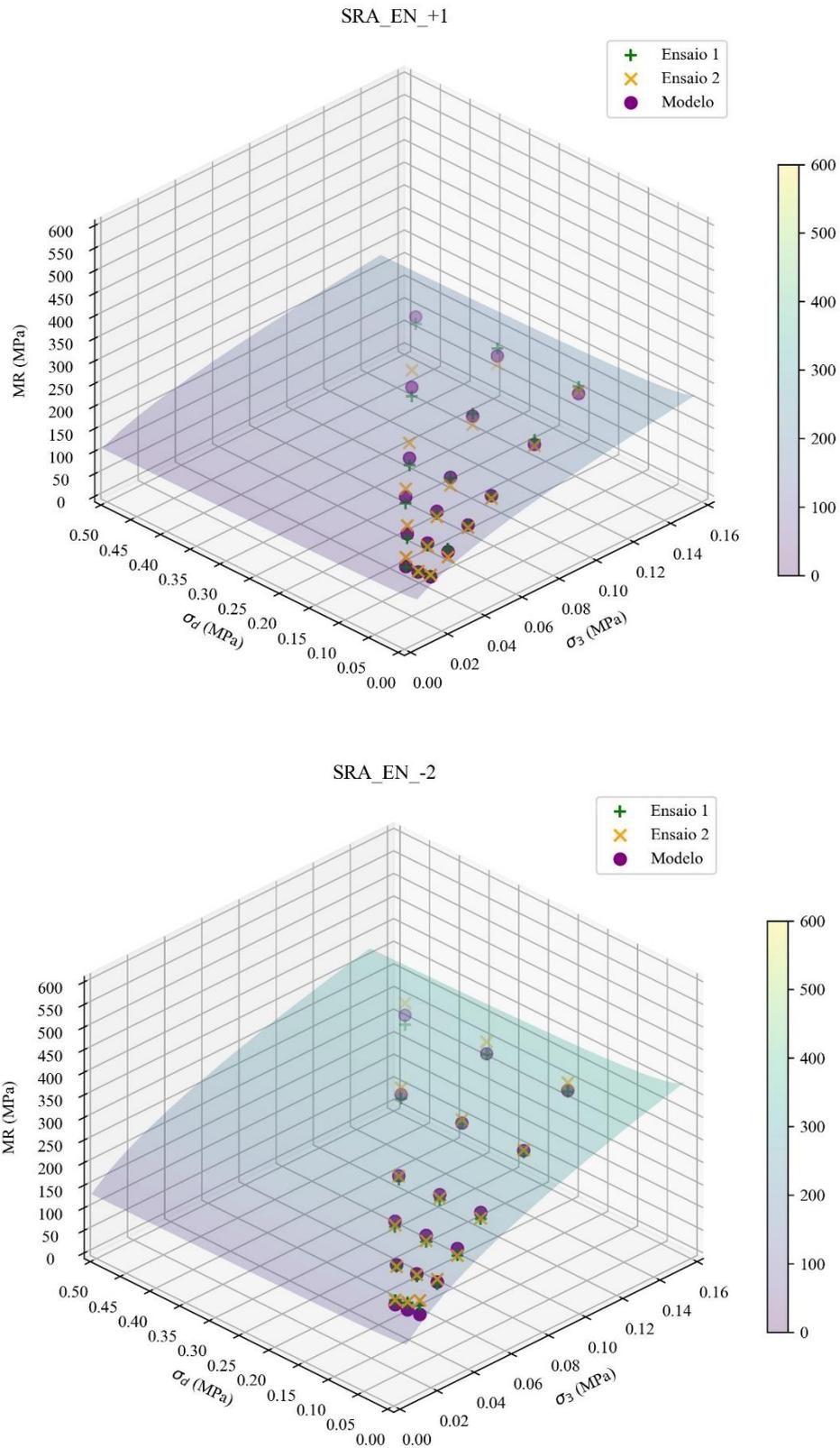


Figura 4-24 - Gráficos de MR em função de  $\sigma_3$  e  $\sigma_d$  para o solo SRA-EN

Além da apresentação dos resultados através da análise gráfica, outra abordagem bastante interessante e relevante é a avaliação através do ajuste do coeficiente de determinação ( $R^2$ ). A análise através destes modelos e seus respectivos coeficientes, juntamente com a análise gráfica, conduzem a conclusões pertinentes em relação ao estado de tensões na resposta resiliente dos solos.

A modelagem matemática foi realizada incorporando todos os valores de MR obtidos para as duas amostras (duplicata) nos 18 pares de tensões impostos no ensaio, totalizando 36 dados para cada conjunto. Apenas as amostras ensaiadas do solo AS na energia normal romperam antes da finalização do ensaio, independente da umidade utilizada. Os ajustes foram realizados por meio do método dos mínimos quadrados com o auxílio da ferramenta *Solver* do software *Excel*. É importante ressaltar que se optou por considerar como unidade de medida padrão o MPa, tanto para as variáveis de entrada ( $\sigma_3$ ,  $\sigma_d$ ,  $\theta$  e  $\tau_{oct}$ ), quanto para a variável resposta (MR).

A Tabela 4-9 apresenta uma síntese dos parâmetros obtidos para cada modelo considerado (tensão confinante, tensão desvio, primeiro invariante de tensões, modelo composto e modelo universal), além dos valores de coeficientes de determinação ( $R^2$ ), considerando variação de umidade, solo e energia de compactação.

Inicialmente percebe-se que a qualidade do ajuste proporcionada pelos diferentes modelos está associada ao tipo de material avaliado, conforme já mencionado anteriormente, tendo influência significativa no modo como se dá o efeito do estado de tensões no solo. Percebe-se para o solo AS que os modelos que utilizam a tensão desvio apresentam significância estatística maior do que o modelo que apenas considera a tensão confinante. De modo contrário, os valores de  $R^2$  maiores para o solo SRA foram obtidos para os modelos que utilizavam a tensão confinante preponderante a tensão desvio. Esta constatação já era esperada em razão da natureza dos solos estudados e complementa a avaliação feita na análise gráfica. Sob a análise da energia de compactação adotada, não se verificou grande influência deste quesito, em relação à sua significância estatística.

Considerando de modo geral os coeficientes de determinação obtidos, observa-se que os modelos que levam em consideração a tensão confinante ( $\sigma_3$ ), a tensão desvio ( $\sigma_d$ ) e o invariante de tensões ( $\theta$ ) não apresentaram um bom desempenho quando comparado aos demais modelos, conduzindo a valores de  $R^2$  inferiores. Em alguns casos específicos se verifica que os

coeficientes de determinação se aproximam bastante daqueles obtidos para outros modelos, os quais consideram mais de uma variável independente, mas ainda assim não apresentam o melhor comportamento. De posse disso, na mesma tabela (Tabela 4-9) é evidenciado em negrito o melhor modelo para cada solo e energia considerada, onde se constata que o modelo composto apresentou melhor desempenho se comparado aos outros estudados para o solo SRA (independente da energia), seguido do modelo  $k-\sigma_3$  e do modelo  $k-\theta-\tau_{oct}$ , respectivamente. Para o solo AS houve duas situações distintas: na energia normal o modelo composto se ajustou melhor, porém na energia intermediária se obteve o melhor comportamento utilizando o modelo universal ( $k-\theta-\tau_{oct}$ ), mas os valores de  $R^2$  obtidos nos dois modelos foram bastante próximos.

Tabela 4-9 - Síntese dos parâmetros obtidos para cada modelo a partir dos ensaios de MR

Modelos de previsão	Coef.	Solo - Energia de compactação - variação de umidade*							
		AS - EI		AS-EN		SRA - EI		SRA - EN	
		-2%	1%	-2%	1%	-2%	1%	-2%	1%
$\sigma_3$	$k_1$	272,114	129,681	193,419	115,253	889,938	704,304	748,181	363,000
	$k_2$	-0,065	-0,085	0,103	0,092	0,494	0,491	0,448	0,360
	$R^2$	0,08	0,09	0,10	0,05	0,92	0,94	0,95	0,80
$\sigma_d$	$k_1$	253,71	110,541	123,737	60,571	457,622	343,522	390,835	215,037
	$k_2$	-0,112	-0,173	-0,063	-0,136	0,322	0,294	0,271	0,218
	$R^2$	0,38	0,56	0,06	0,22	0,62	0,55	0,55	0,45
$\theta$	$k_1$	289,707	137,677	149,073	82,442	389,993	303,349	348,061	197,533
	$k_2$	-0,096	-0,141	0,029	-0,029	0,462	0,440	0,404	0,329
	$R^2$	0,19	0,25	0,09	0,01	0,87	0,83	0,85	0,71
$\sigma_3 - \sigma_d$	$k_1$	314,556	158,464	220,875	132,109	877,294	722,896	763,874	371,019
	$k_2$	0,158	0,264	0,42	0,446	0,467	0,535	0,484	0,404
	$k_3$	-0,216	-0,345	-0,332	-0,375	0,027	-0,044	-0,036	-0,045
	$R^2$	0,53	0,85	<b>0,73</b>	<b>0,89</b>	<b>0,92</b>	<b>0,94</b>	<b>0,95</b>	<b>0,81</b>
$\theta - \tau_{oct}$	$k_1$	3898,49	2182,56	1572,37	1095,111	1336,233	1091,104	1366,936	942,871
	$k_2$	0,227	0,301	0,462	0,505	0,564	0,708	0,621	0,555
	$k_3$	-0,922	-1,358	-1,313	-1,827	-0,232	-0,616	-0,505	-0,579
	$R^2$	<b>0,69</b>	<b>0,85</b>	0,53	0,66	0,88	0,91	0,90	0,80

\*Valores em negrito de  $R^2$  representam o melhor desempenho para cada solo/energia de compactação/variação de umidade.

Em relação a esta constatação, Santos (2020) evidenciou aspectos semelhantes a esses mencionados ao se utilizar ambos os modelos composto e universal, além dos modelos convencionais, no ajuste de MR para três solos residuais também provenientes do Rio Grande do Sul. Se verificou na pesquisa que estes dois modelos apresentaram as melhores regressões

para as diversas condições de análise, além de constatar que o modelo universal se mostrou mais adequado para solos argilosos, fato também verificado no presente trabalho. O mesmo fato também foi evidenciado por Schreinert (2021), o qual utilizou os mesmos solos provenientes desta pesquisa.

Para melhor visualizar o que foi exposto na Tabela 4-9, é apresentada na Figura 4-25 um gráfico de barras com os valores de  $R^2$  obtidos para todas as análises realizadas.

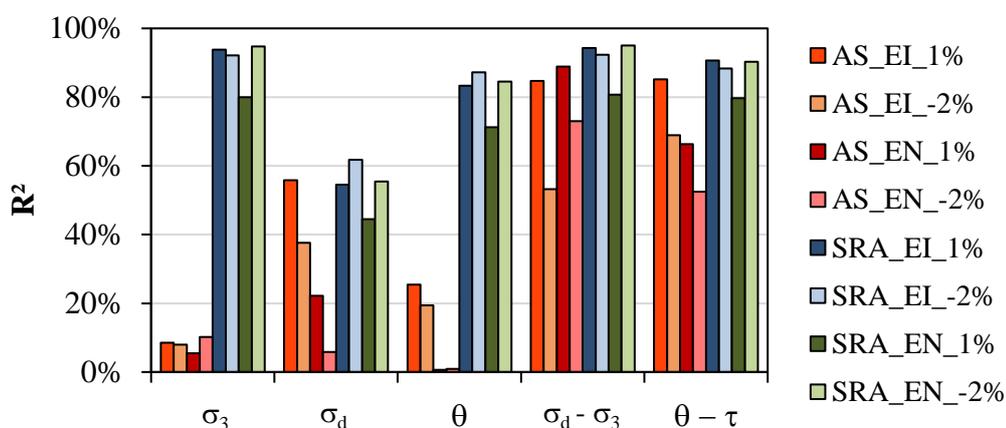


Figura 4-25 - Valores de coeficiente de determinação utilizando os modelos da literatura

Conforme mencionado anteriormente, a Figura 4-25 apresenta claramente que o modelo composto e o modelo universal se destacaram diante dos demais quanto à capacidade desempenhada. Em relação ao desempenho destes dois modelos, Takeda (2006) reitera que estes modelos são capazes de representar com precisão a variação do módulo resiliente em função do estado de tensões, principalmente relacionado aos solos tipicamente brasileiros.

O coeficiente de determinação ( $R^2$ ) fornece uma boa estimativa para avaliar a eficiência dos modelos, porém a compreensão em relação a dispersão representativa do ajuste dos dados é de difícil visualização. Para facilitar este entendimento é apresentado na Figura 4-26 e na Figura 4-27 gráficos relacionando os valores de MR observados no ensaio *versus* os valores obtidos na modelagem utilizando os modelos composto e universal, respectivamente. Os gráficos demonstram elevada acurácia dos modelos, apresentando significativa aderência dos dados à reta de igualdade. Além disso, se evidencia uma menor dispersão dos dados relativos ao solo

AS na energia intermediária (avaliando as duas unidades) dada pelo modelo universal, o qual se ajustou melhor aos valores de MR deste material.

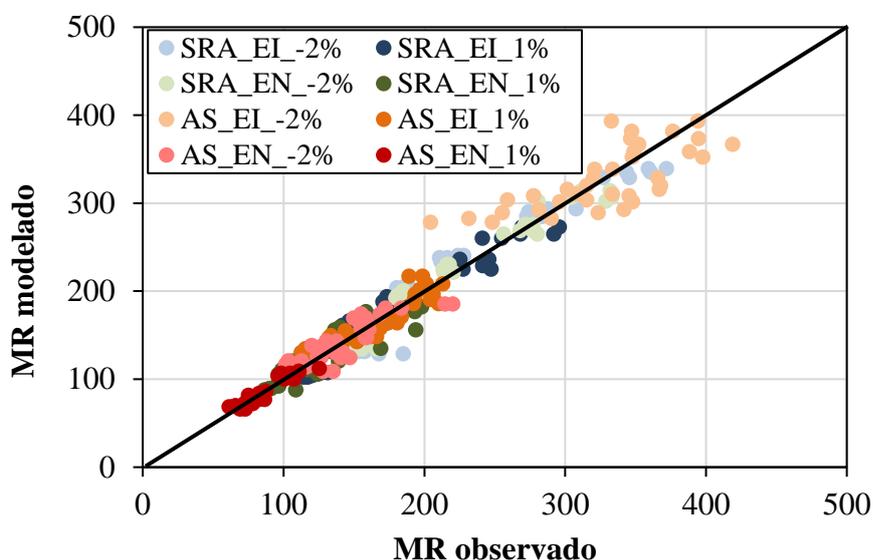


Figura 4-26 - Comparação do MR observado *versus* modelado para o modelo composto

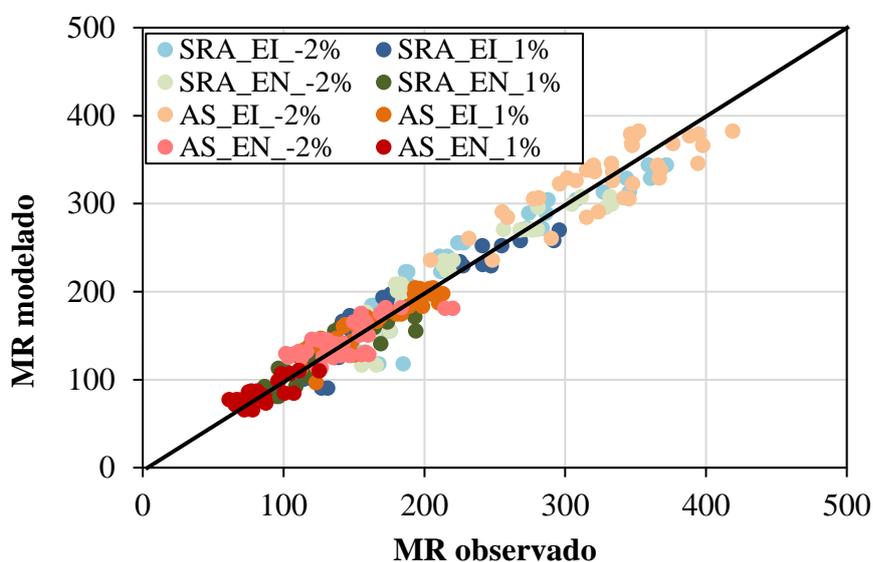


Figura 4-27 - Comparação do MR observado *versus* modelado para o modelo universal

Mesmo os dois modelos apresentando ótimos ajustes, o modelo composto vem se tornando uma unanimidade entre diversos pesquisadores brasileiros, já que sua eficiência é bastante difundida

e abrangente, juntamente com sua abordagem simplista e tangível quando às variáveis adotadas (FERREIRA, 2002; GUIMARÃES, 2009; LIMA, 2020; SCHREINERT, 2021). Segundo Malysz (2009), diferentemente de outros modelos que incorporam as tensões  $\sigma_3$  e  $\sigma_d$  implicitamente através de outros parâmetros ( $\theta$ ,  $\tau_{oct}$ , etc.), o modelo composto aplica essas variáveis de maneira direta, conferindo acurácia e simplicidade na regressão. Outro fator bastante relevante é que o modelo composto é o modelo atualmente empregado no novo método de dimensionamento nacional de pavimentos – MeDiNa. Considerando estes fatores apresentados optou-se pelo emprego do modelo composto como referência em análises neste item e nos subsequentes relacionados à influência da compactação e da umidade.

Ainda de posse dos dados apresentados na Tabela 4-9, também pode-se tecer alguns comentários acerca dos parâmetros  $k_1$ ,  $k_2$ , e  $k_3$  obtidos utilizando o modelo composto para os dois solos, nas duas energias e com diferentes umidades de compactação. Segundo Takeda (2006), a avaliação comparativa de  $k_2$  e  $k_3$ , que representam os expoentes das tensões confinante e desvio, respectivamente, possibilita associar os valores absolutos de cada um deles, a uma maior ou menor influência da variável ( $\sigma_3$  ou  $\sigma_d$ ) no MR do material em estudo. Além disso, expoentes positivos ou negativos permitem definir se a elevação de determinada tensão contribui para o aumento ou diminuição do MR.

Avaliando os parâmetros do modelo obtidos para cada solo separadamente, para o solo AS temos os coeficientes  $k_2$  (positivo) e  $k_3$  (negativo) exibindo valores de magnitude relativamente próxima ao se comparar as energias de compactação e variações de umidade. O leve aumento do parâmetro  $k_1$  e o decréscimo do parâmetro  $k_3$  com o aumento da energia de compactação mostra um comportamento típico de solos coesivos, com o módulo de resiliência sendo basicamente influenciado pela tensão desvio, onde ele aumenta conforme se diminui essa tensão. Em relação à variação de umidade se tem o mesmo cenário: com o solo mais seco, o parâmetro  $k_1$  aumenta e o parâmetro  $k_3$  diminui, mostrando a tendência de aumento do MR. Com isso, verifica-se que apesar do caráter argiloso do solo AS, a rigidez também se mostrou influenciada não somente pelo efeito negativo da tensão desvio, mas também pelo efeito positivo da tensão confinante, fato que também pode ser visualizado nos gráficos tridimensionais.

Em relação ao solo SRA verifica-se que a variável  $\sigma_3$  expressou grande significância, com coeficientes  $k_2$  positivos e elevados, variando entre 0,4 e 0,55. O coeficiente  $k_1$  também mostrou a mesma variação vista para o solo AS: ele aumenta com o aumento da energia de compactação e com a diminuição da umidade. O coeficiente  $k_3$ , relacionado a variável  $\sigma_d$ , se mostrou não significativa, com valores muito próximos a zero independente da energia utilizada e variação de umidade. Desta forma o solo SRA demonstrou ter um comportamento típico de solos granulares em termos resilientes, com grande influência da tensão confinante e pouca ou nenhuma influência da tensão desvio.

#### 4.3.1.1 Obtenção do Módulo de Resiliência estimado

O módulo de resiliência não linear, expresso por uma equação matemática obtida a partir da regressão dos dados experimentais, se mostra mais representativo que o cálculo de um MR médio, já que é dado em função das tensões atuantes na camada de interesse de solo ou material granular e não apenas da média dos valores de MR obtidos para os 18 pares de tensões durante o ensaio. Porém esta forma de representação é de difícil comparação e análise, já que há certa dificuldade na interpretação visual da relação entre as suas variáveis.

Para facilitar seu entendimento visto a elevada importância da análise da variação do MR em função do estado de tensões, calculou-se valores de módulos de resiliência estimados com base em um par de tensões passível de ocorrência de camadas de sub-base e reforço de subleito (energias intermediária e normal, respectivamente). O estado de tensão escolhido considerando uma camada de sub-base foi de  $\sigma_3= 0,020$  MPa e  $\sigma_d= 0,170$  MPa e para uma camada de reforço de subleito foi de  $\sigma_3= 0,010$  MPa e  $\sigma_d= 0,030$  MPa. Estes pares de tensões foram escolhidos frente a uma análise mecanicista realizada no software AEMC, considerando as pistas experimentais em construção no LAPAV utilizando o mesmo solo desta pesquisa em camadas de sub-base e reforço de subleito.

Os valores de MR médios e MR estimados calculados para os dois solos nas duas energias de compactação, considerando as duas variações de umidade estão apresentados na Tabela 4-10.

Tabela 4-10 - Módulos de resiliência médios e estimados considerando todas as variáveis

Solo	Energia de compactação	W ótima (%)	Varição de umidade	W utilizada (%)	MR médio (MPa)	MR estimado (MPa)
AS	Intermediária	21,4	-2	19,4	328	249
			0	21,2	318	247
			1	22,4	166	104
	Normal	23,3	-2	21,3	143	102
			0	22,6	208	145
			1	24,3	86	63
SRA	Intermediária	11	-2	9	228	135
			0	11,2	239	133
			1	12	182	96
	Normal	12,1	-2	10,1	216	93
			0	12,1	178	89
			1	13,1	132	68

\*MR obtido para o par de tensões  $\sigma_3= 0,020$  MPa e  $\sigma_d= 0,170$  MPa (energia intermediária) e  $\sigma_3= 0,010$  MPa e  $\sigma_d= 0,030$  MPa (energia normal).

Avaliando os valores obtidos de MR verifica-se que a maior variação entre MR médios e estimados ocorreu para o solo SRA, chegando a diferenças da ordem de 123 MPa. O solo AS apresentou comportamento semelhante, porém as diferenças não foram tão elevadas como as observadas para o solo SRA. Além disso, para todas as análises feitas, os MR estimados foram inferiores aos valores de MR médios. Apesar das diferenças verificadas acredita-se ser mais realista adotar tais valores para as análises subsequentes, ou seja, onde for utilizado valores de MR para comparação serão adotados os módulos estimados representativos do estado de tensões.

#### 4.3.2 Influência da energia de compactação

A energia de compactação tem influência preponderante na resposta resiliente do material e algumas análises são apresentadas neste item. Em itens anteriores este fato já foi mencionado, porém de forma superficial e apenas visual, através da interpretação gráfica. Neste momento buscou-se uma avaliação mais aprofundada que mostrasse o real efeito deste parâmetro no comportamento dos solos em estudo.

Na Figura 4-28 e na Figura 4-29 são apresentados gráficos de MR *versus* todos os estados de tensões simulados, considerando o mesmo solo e mesma variação de umidade, diferenciando apenas a própria energia utilizada.

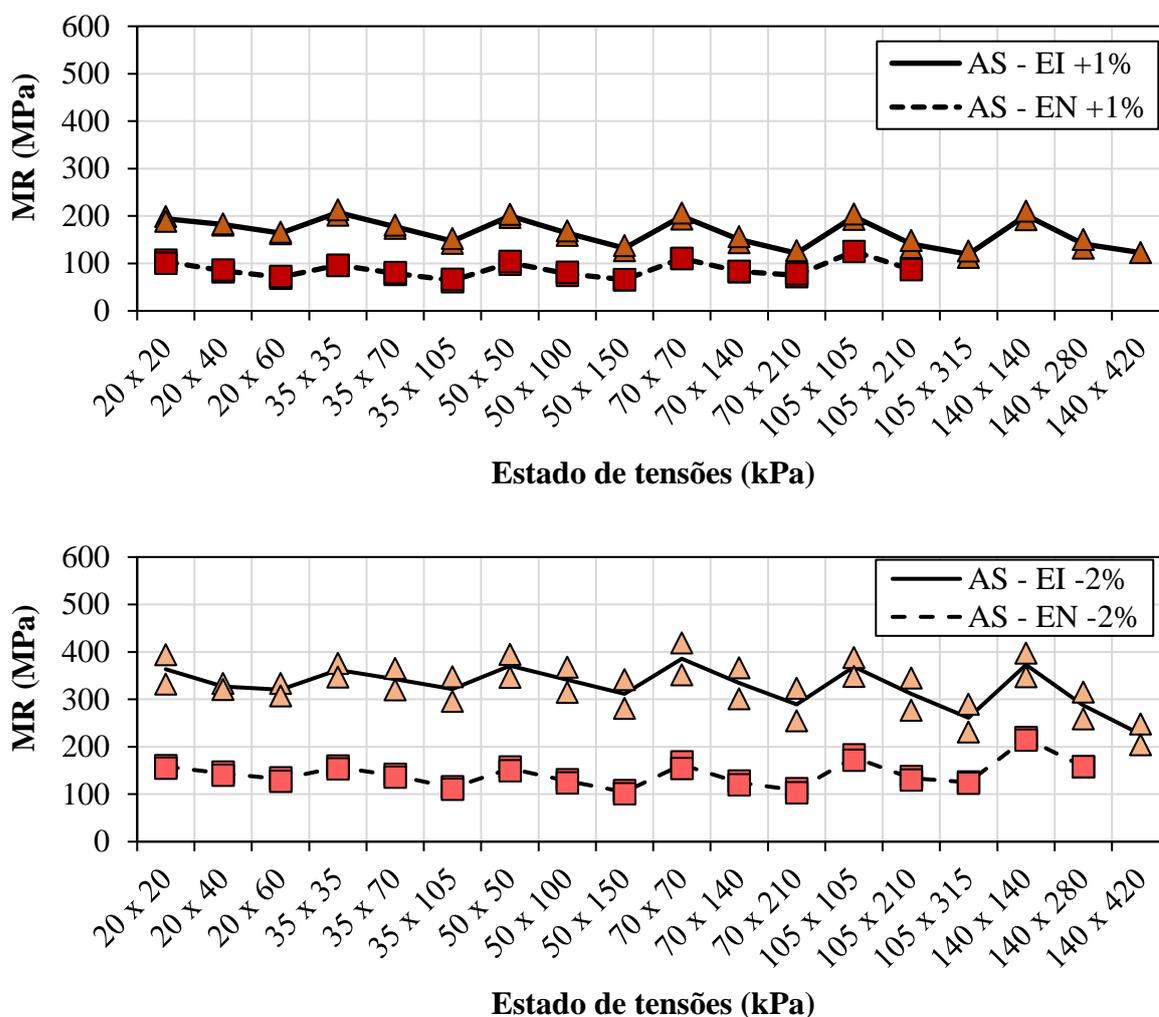


Figura 4-28 – Influência da energia de compactação no MR do solo AS

Observando primeiramente o comportamento visto para o solo AS na Figura 4-28, temos que o aumento da energia de compactação proporciona um aumento na rigidez do solo para qualquer nível de tensão aplicado, sendo mais evidente com o material em uma umidade menor que a ótima. O Outro fator relevante foi que ao aumentar a razão das tensões o MR diminuía levemente, apresentando um comportamento típico de solos coesivos. Avaliando os pares de tensões aplicados como um todo, não se verificou alteração da rigidez do material com o aumento das tensões impostas.

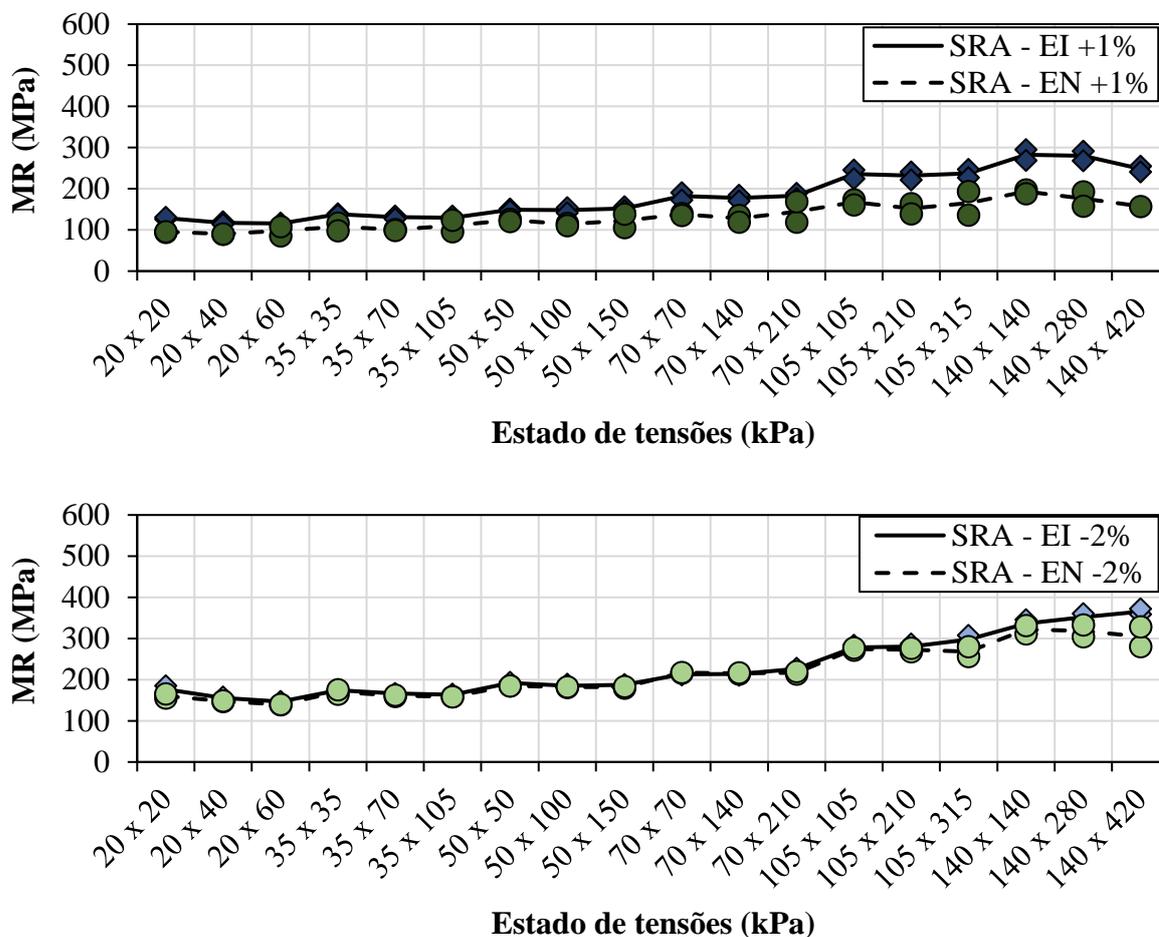


Figura 4-29 - Influência da energia de compactação no MR do solo SRA

Já o solo SRA apresentou um comportamento diferente, pois o aumento de energia não proporcionou um aumento tão elevado dessa rigidez do solo. Ao considerar uma umidade mais elevada se verifica um leve aumento desta rigidez, porém ao avaliar os resultados para uma umidade menor que a ótima, praticamente não se tem alteração nos resultados de MR obtidos (apenas perceptível para pares de tensões mais elevados). Este fato pode estar relacionado com o evidenciado na Figura 4-13, a qual apresenta as curvas características obtidas para este solo comparando as duas energias. Em síntese, a distribuição do tamanho dos poros do solo SRA não é afetada pelas diferentes energias de compactação, ou seja, mesmo alterando o índice de vazios da amostra a sua rigidez permanece praticamente constante, considerando-se uma mesma umidade e um mesmo nível de tensões. Por fim, considerando os diferentes pares de tensões aplicados, temos que ao aumentar a intensidade das tensões aplicadas, o MR tende também a aumentar, sendo este um comportamento típico de solos arenosos.

Schreinert (2021) avaliou a rigidez destes mesmos solos apresentados na presente pesquisa, comparando as energias de compactação, porém considerando sua umidade ótima. O ganho de rigidez ao aumentar a energia de compactação foi verificado nos dois solos (AS e SRA), porém bem mais evidente para o solo AS.

Assim, com base no apresentado, pode-se constatar que o acréscimo no esforço de compactação pode ou não produzir um ganho na rigidez dos solos, dependendo da natureza do solo em estudo, como também pode depender da umidade a qual o material se encontra.

#### 4.3.3 Influência da variação de umidade

O efeito da variação de umidade no módulo de resiliência foi avaliado visando um melhor entendimento do que ocorre durante o processo de compactação das camadas do pavimento, ou seja, a variação de umidade foi feita antes da compactação dos corpos de prova em laboratório. Para realizar estas análises incorporando os efeitos da sucção dividiu-se os itens em tópicos, de modo a facilitar o entendimento dos estudos realizados. Foram comparados os resultados obtidos frente a variação de +1% e -2% em relação a umidade ótima, apresentando juntamente os valores de umidade ótima obtidos no trabalho de Schreinert (2021), sendo que os procedimentos experimentais utilizados foram exatamente os mesmos nas duas pesquisas. Para entender a relação da sucção nos valores obtidos de MR, se relacionou a sucção obtida tanto após os ensaios realizados, quanto a sucção estimada pelas curvas características apresentadas no item 4.2.1. Foi verificado o efeito da sucção no MR através da utilização do MR estimado (4.3.1.1) e a sucção obtida ao final do ensaio, visto que esta se apresentou mais condizente com o valor real da amostra. Por fim, a relação entre a variação de umidade, sucção e módulo de resiliência é abordada e discutida em detalhes, relacionando todas as variáveis, analisando modelos da literatura e apresentando um modelo que incorpora estes parâmetros na previsão de rigidez dos solos em questão.

##### 4.3.3.1 Efeito da variação de umidade de compactação no módulo de resiliência

Como já citado anteriormente no item 3.2.4.1, as normativas rodoviárias brasileiras vigentes permitem que durante a compactação pode haver uma variação de  $\pm 2\%$  em relação à umidade ótima do material, desde que a massa específica seca máxima obtida em laboratório seja a mesma, como um grau de compactação maior que 100%. Nesta pesquisa buscou-se simular esta variação, porém utilizando +1% e -2% em relação à umidade ótima, visto que ao

utilizar umidades mais elevadas, tentando simular +2%, o solo SRA se apresentava totalmente saturado, com valores de grau de compactação da ordem de 97%, além de se apresentar mais frágil ao manuseio.

Mesmo utilizando esta variação de umidade menor, de +1% em relação à umidade ótima, para o solo SRA ainda era perceptível a influência que esta tinha em sua estrutura, como pode ser visto na Figura 4-30 (a). Para esta variação de umidade na energia intermediária, o grau de saturação ficava em torno de 93%, onde praticamente todas as amostras ensaiadas nesta condição apresentaram fissuras durante o desmolde e sensibilidade ao toque. Já para o solo AS, onde na energia intermediária o grau de saturação era em torno de 95%, a desmoldagem era bastante difícil, já que o solo aderiria às paredes do molde e em muitas amostras havia perda de material, como pode ser visualizado na Figura 4-30 (b).

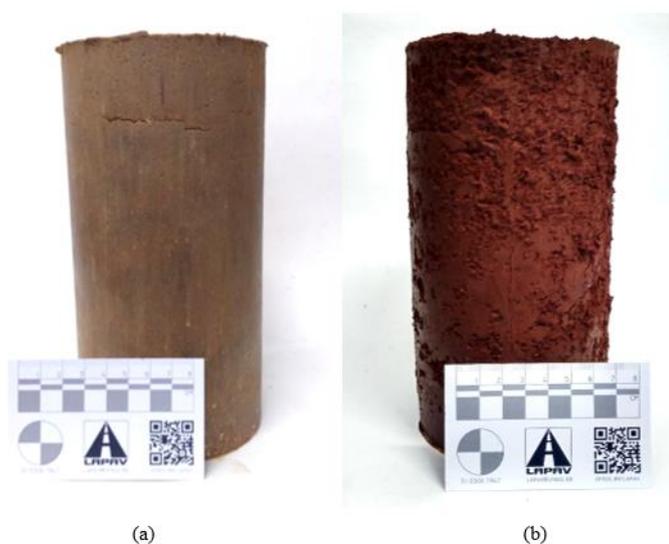


Figura 4-30 - Aspecto das amostras compactadas na energia intermediária e com umidade acima da ótima (a) SRA (b) AS

Para avaliar o efeito da variação de umidade nos resultados de módulos de resiliência é apresentado na Figura 4-31 a Figura 4-34 os MR obtidos em diferentes teores de umidade de compactação, considerando toda a faixa de tensões avaliada durante o ensaio. Também é apresentado os resultados obtidos por Schreinert (2021) para os mesmos solos em estudo, na umidade ótima, para fins de comparação.

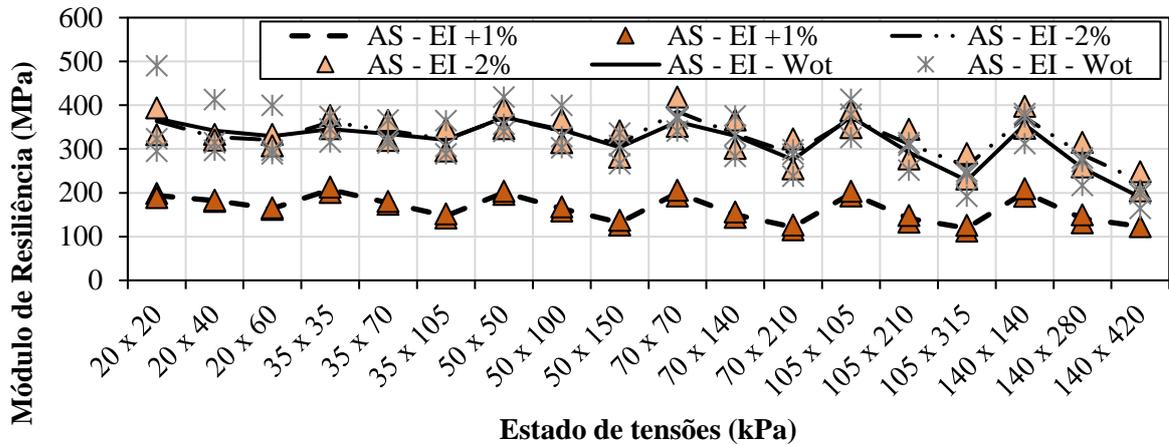


Figura 4-31 - Influência da umidade de compactação no MR para o solo AS-EI

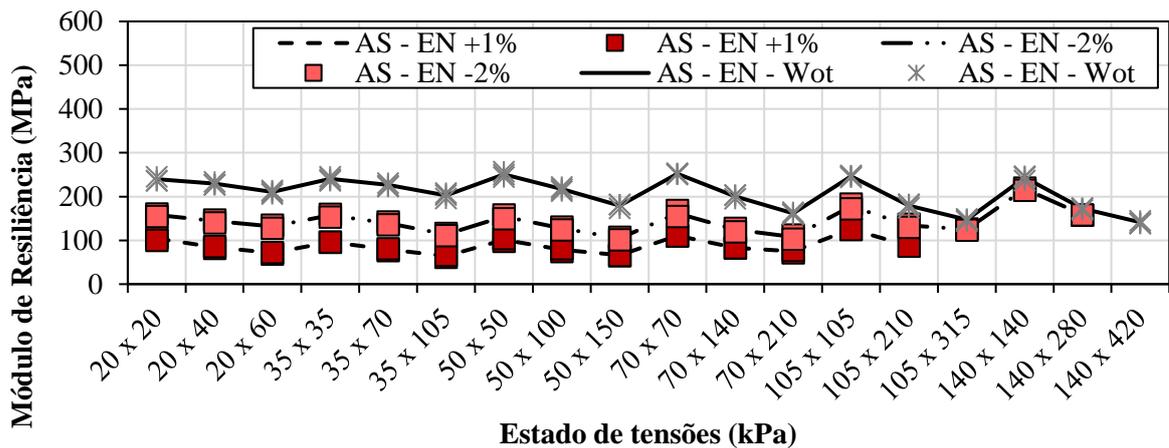


Figura 4-32 - Influência da umidade de compactação no MR para o solo AS-EN

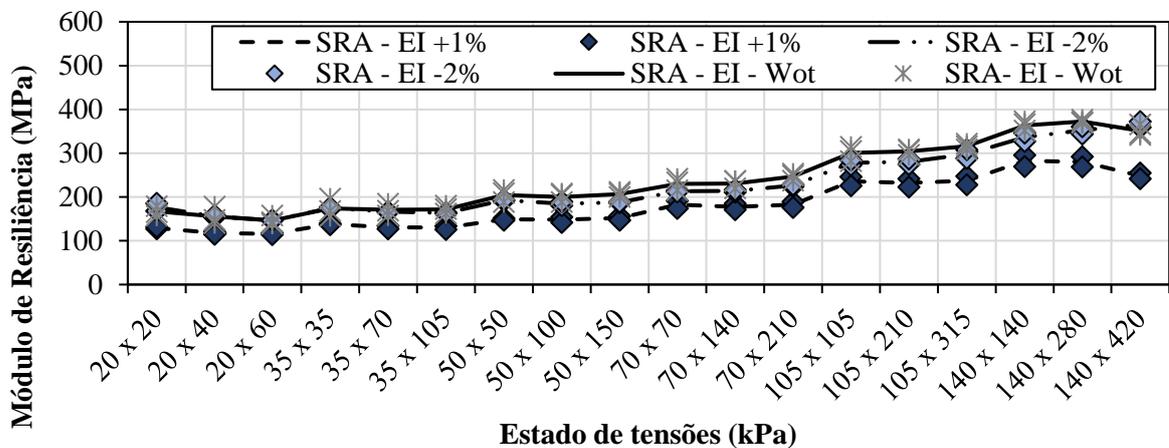


Figura 4-33 - Influência da umidade de compactação no MR para o solo SRA-EI

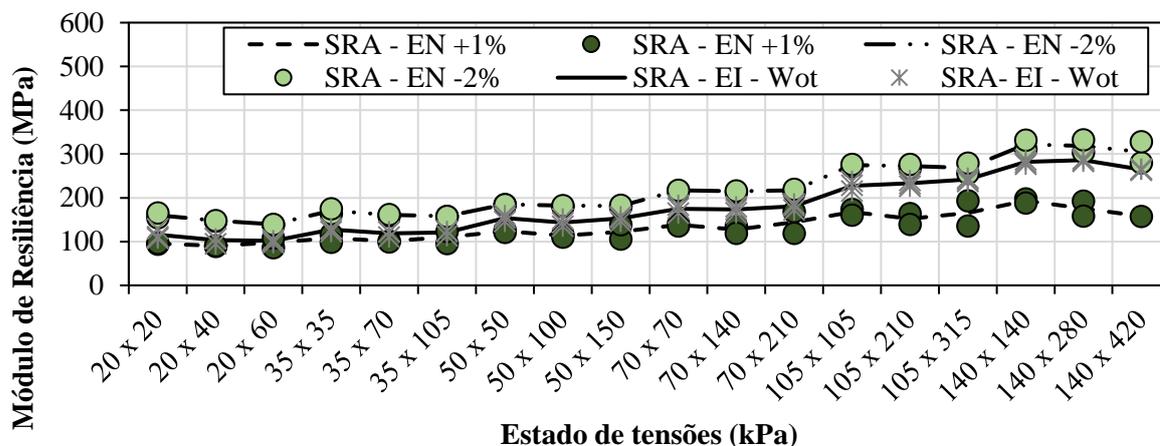


Figura 4-34 - Influência da umidade de compactação no MR para o solo SRA-EN

Avaliando os gráficos como um todo, verifica-se que para os dois materiais, nas duas energias de compactação, se teve o mesmo comportamento frente à variação de umidade de compactação: conforme o teor de umidade aumenta, o módulo de resiliência diminui. Este comportamento já era esperado e também foi visto por diversos autores (GONÇALVES, 1999; CERATTI *et al*, 2004; PERAÇA, 2007; KERN, 2017; LIMA *et al*, 2018, SANTOS, 2020; entre outros). Esta variação de rigidez em função do teor de umidade de compactação é dependente do material, energia de compactação e estado de tensões aplicado. Para o solo AS, as diferenças entre os MR obtidos para as diferentes umidades de compactação são ligeiramente mais significativas para menores níveis de tensões simulados. Já para o solo SRA se verifica um comportamento contrário: para níveis de tensões mais elevados há uma maior diferença nos valores de MR, mesmo que essa variação não seja tão significativa.

Outro ponto interessante é ao avaliar os resultados obtidos por Schreinert (2021) para os dois solos em questão na umidade ótima. Na energia intermediária, os dois solos apresentaram valores de MR muito próximos independente de o solo estar na umidade ótima ou mais seco, indicando que esta variação de umidade não afetaria a rigidez do material. Porém ao se avaliar a energia normal, o solo AS apresentou uma perda de rigidez elevada ao secar o mesmo e o solo SRA apresentou um ganho de rigidez com a secagem. De maneira geral, o umedecimento dos solos em questão trouxe uma perda de rigidez e que a secagem nem sempre apresenta benefícios, dependendo das características do material, energia de compactação e estado de

tensões aplicado. Desta forma, mesmo a variação de umidade estando dentro da especificação vigente, o mais adequado é o solo sempre se encontrar próximo da umidade ótima.

A Tabela 4-11 apresenta os módulos de resiliência estimados para os diferentes teores de umidade de compactação, juntamente com a umidade e saturação média obtida nos corpos de prova. Na mesma tabela também é apresentado os valores de sucção obtidos de duas formas distintas: a sucção obtida diretamente ao final do ensaio de MR, conforme detalhado no item 3.2.4.1 e a sucção retirada diretamente das curvas características apresentadas no item 4.2.1.

Tabela 4-11 - Módulos de resiliência estimados obtidos para solos compactados em diferentes teores de umidade iniciais

Solo	EC <sup>1</sup>	w ótima (%)	Variação de umidade	w média dos CPs (%) <sup>2</sup>	Sr médio (%) <sup>2</sup>	Sucção ensaio (kPa)	Sucção CC (kPa)	MR estimado (MPa) <sup>3</sup>	
AS	EI	21,4	-2	19,1	82,0	3729,9	5200	249	
			0	21,3	91,5	792,1	2200	247	
	EN	23,3	1	22,4	95,9	390	500	104	
			-2	21,1	73,5	1398,5	6500	102	
	SRA	EI	11	0	22,6	80,8	2670,8	1600	211
				1	24,2	84,2	135,6	190	63
EN		12,1	-2	9,3	72,7	640,7	950	135	
			0	11,2	87,8	64,7	60	133	
EN		12,1	1	12,3	97,6	27,1	13	96	
			-2	10,2	71,0	267,9	920	93	
EN	12,1	0	12,1	82,7	25	30	89		
		1	13,0	89,0	12,53	8	68		

Notas: <sup>1</sup> Energia de compactação. <sup>2</sup> Média dos ensaios realizados em duplicata. <sup>3</sup> MR obtido para o par de tensões  $\sigma_3 = 0,020$  MPa e  $\sigma_d = 0,170$  MPa (energia intermediária) e  $\sigma_3 = 0,010$  MPa e  $\sigma_d = 0,030$  MPa (energia normal).

Analisando a tabela citada, primeiramente podemos confirmar as afirmações feitas anteriormente em relação ao ganho ou perda de rigidez com a secagem e umedecimento, respectivamente. Os dois solos na energia intermediária apresentaram uma variação muito baixa de MR ao se comparar o teor de umidade ótimo com -2%, onde os dois solos apresentaram um ganho de rigidez, mesmo esta variação não chegando a 2%. Mesmo com uma baixa variação nos valores de MR estimados, ao se comparar a sucção dos materiais, o ganho com a secagem é relativamente alto, sendo mais perceptível para o solo AS, podendo ser explicado pela sua estrutura e composição.

Para a energia normal, o ganho de rigidez com a secagem do solo SRA foi baixa, em torno de 5% e para o solo AS, houve uma elevada perda de rigidez com a secagem, em torno de 30% (comparando com a umidade ótima). Esta perda tão elevada de rigidez com a secagem não era esperada, porém ao se avaliar os resultados obtidos na umidade ótima de Schreinert (2021), se verificou que estas amostras apresentaram uma umidade menor a ótima quando compactadas, em torno de -1%, o que resultou em maiores valores de MR e sucção, conforme exposto na Tabela 4-11.

Por fim, avaliando os resultados de MR obtidos nas variações de umidade limites as permitidas pela legislação (com os valores utilizados de +1% e -2% em relação a ótima) temos que o maior ganho de rigidez se deu para o solo AS-EI, com um aumento de 140%, seguido do solo AS-EN, SRA-EI e SRA-EN, com 62%, 40% e 37%, respectivamente. Como visto anteriormente, o solo SRA não apresenta uma influência tão elevada com a variação de umidade, muito em razão de sua composição e estrutura. Já o solo AS é diretamente influenciado por essa variação, pois a perda de umidade aumenta a atuação da capilaridade, resultando em um comportamento resiliente superior e conseqüentemente também um aumento na sucção. De modo geral, com o aumento do MR se tem também um aumento da sucção matricial no solo, onde a alta sucção produz um efeito de enrijecimento nos corpos de prova devido ao aumento da rigidez do esqueleto do solo, resultando em um maior MR (YANG *et al.*, 2005).

Maiores detalhes quanto à análise da sucção das amostras ensaiadas em comparação com o obtido pelas curvas características será apresentada a seguir, assim como uma análise mais detalhada do efeito da sucção no MR.

#### 4.3.3.2 Relação entre a sucção medida após o ensaio e a sucção medida na CC

As análises apresentadas anteriormente evidenciaram que a variação de umidade na compactação apresenta significativa influência no comportamento resiliente dos solos em estudo, além de estar associada a sucção. Para a pesquisa em questão se obteve valores de sucção das amostras de MR de duas maneiras distintas: após o ensaio de MR foi extraída uma amostra do corpo de prova, onde se mediu a sucção através da técnica do papel filtro, e pelo ensaio ser feito em duplicata, se utilizou o valor médio de sucção; através da saturação média obtida pelos ensaios em duplicata (conforme a umidade de ensaio arbitrada) se obteve a sucção matricial através da curva característica apresentada anteriormente no item 4.2.1.

No gráfico da Figura 4-35, Figura 4-36, Figura 4-37 e Figura 4-38 é apresentado uma comparação entre os valores obtidos de sucção no ensaio de MR e na curva característica, além dos respectivos valores estimados de MR. Lembrando que os valores respectivos de sucção estão apresentados na Tabela 4-11.

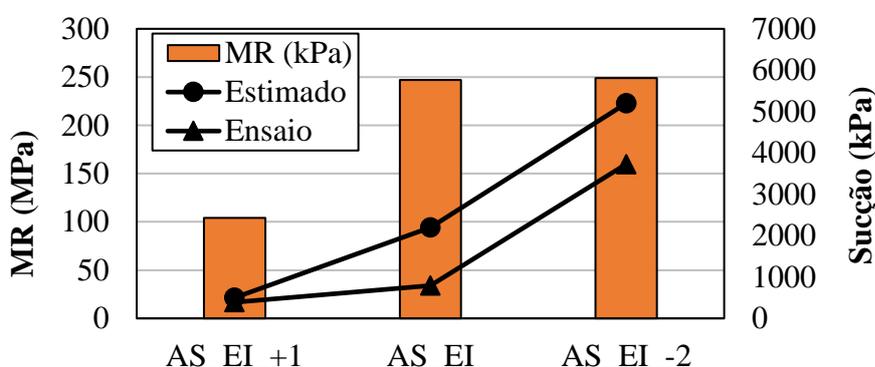


Figura 4-35 - Valores de sucção obtidos após o ensaio de MR e pela CC para o solo AS-EI

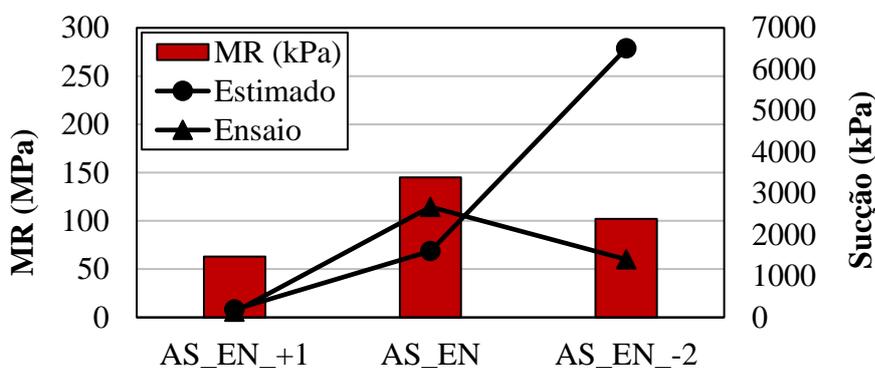


Figura 4-36 - Sucções obtidas após o ensaio de MR e pela CC para o solo AS-EN

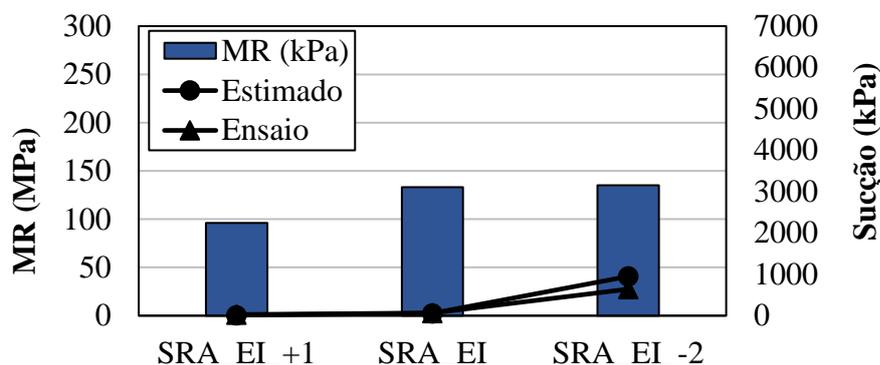


Figura 4-37 - Sucções obtidas após o ensaio de MR e pela CC para o solo SRA-EI

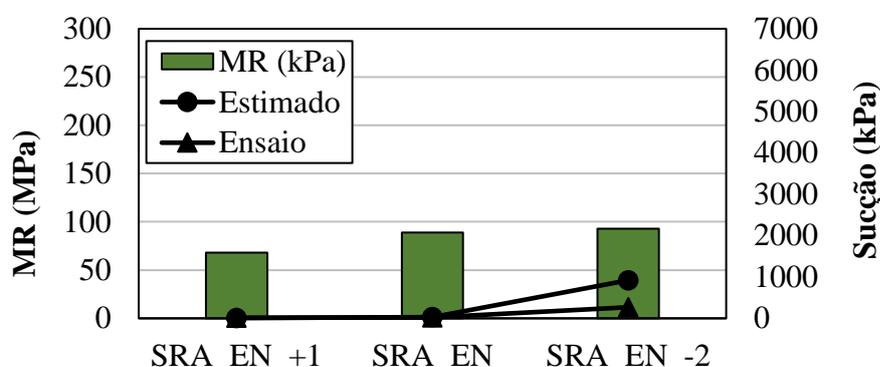


Figura 4-38 - Sucções obtidas após o ensaio de MR e pela CC para o solo SRA-EN

Ao analisar as diferenças entre os valores de sucção obtidos diretamente após a retirada da amostra do ensaio de MR e da curva característica, verifica-se que de modo geral os valores estimados pelas curvas são ligeiramente superiores aos obtidos após o ensaio. Para o solo SRA a diferença é praticamente imperceptível considerando o material mais úmido ou na umidade ótima de compactação.

Para o solo AS na energia intermediária, as maiores diferenças foram perceptíveis para a umidade ótima e 1% acima da ótima, ainda com os valores estimados através da CC superiores. Esta diferença nos valores de sucção obtidos já era esperada visto a grande diferença do modo de obtenção dos mesmos. No ensaio de MR a amostra passa por diversos pares de tensões e tem sua análise de sucção apenas após o ensaio. Já a obtenção da sucção pela CC se dá de forma estimada em razão da construção desta mesma curva durante o umedecimento ou secagem do material. Ainda assim, estas variações de sucções obtidas pelas duas metodologias apresentam valores que se encontram dentro da histerese obtida para este determinado solo, ou seja,

considerando uma mesma umidade (e grau de saturação) os dois valores de sucção coletados se encontram dentro da variação da sucção provocada pela variação da forma de obtenção dos valores de umidade (histerese da curva de sucção - Figura 4-16). Isto nos possibilita entender que não é somente o valor estimado de MR que nos apresenta o comportamento real do solo, mas que ele é dependente da sucção a qual possui naquele momento e a sua histerese frente a ciclos de umedecimento e secagem.

O solo AS na energia normal já havia apresentado variação nos resultados estimados de MR, onde a maior rigidez foi registrada para o solo na umidade ótima. Por consequência os valores obtidos de sucção diretamente após o ensaio corroboraram para este fato e apenas a sucção estimada apresentou crescimento considerando a amostra mais seca (com -2% em relação à umidade ótima). É importante frisar novamente que estes valores de sucção obtidos e estimados para o solo AS-EN também estão dentro da histerese obtida para este solo e que nem sempre esta sucção lida está representando concretamente o comportamento do material, a depender do histórico de umedecimento e secagem a qual ele passou.

Para avaliar a relação entre estas duas variáveis, sucção estimada pela CC e sucção obtida após o ensaio de MR, considerou-se os valores de sucção obtidos para as duas variações de umidade realizadas e na umidade ótima, os quais são apresentados na Figura 4-39.

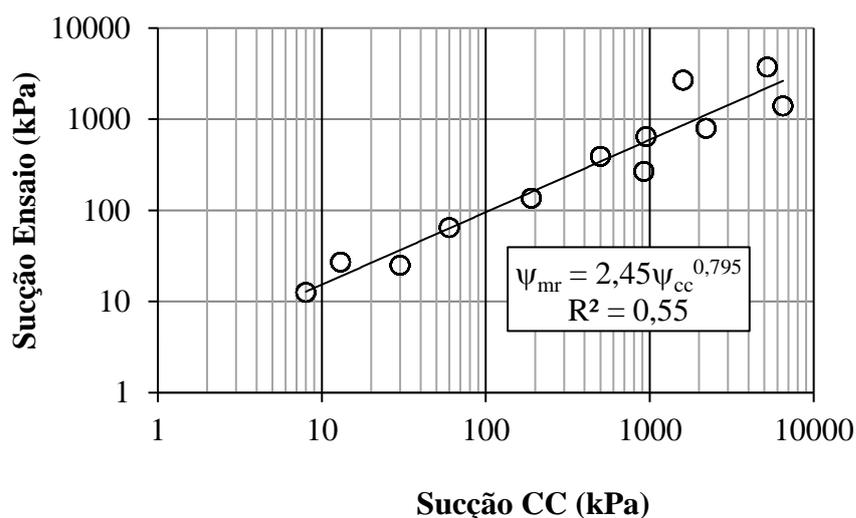


Figura 4-39 - Correlação entre a sucção obtida após o ensaio e a sucção estimada pela CC

É perceptível através do coeficiente de determinação ( $R^2$ ) apresentado que não houve um bom ajuste dos dados e que já era corroborado pelas diferenças encontradas nos valores de sucção estimados. Mesmo que os valores de sucção para um mesmo grau de saturação estejam dentro da histerese do material, verifica-se que o mais adequado seria a utilização de valores de sucção obtidos diretamente após o ensaio de MR, ou se possível, durante o ensaio, e não os estimados pela curva característica. A leitura da sucção diretamente após o ensaio, apresenta um valor mais fiel de sucção relativa às condições impostas ao material em estudo. Estes valores de sucção auferidos através da curva característica podem ter influência do patamar intermediário das curvas bimodais ou até mesmo em decorrência do próprio ajuste matemático das CC, que eventualmente pode apresentar valores discrepantes.

Dito isto, de posse dos valores de sucção para cada variável analisada, optou-se por utilizar nas análises apresentadas nos próximos itens os valores de sucção obtidos diretamente após o ensaio, que representam mais fielmente o comportamento das amostras no ensaio de MR e por consequência tem relação direta com os valores de MR obtidos.

#### 4.3.3.3 Relação entre o módulo de resiliência e a sucção

Nos itens anteriores se deu enfoque na influência da umidade na rigidez dos solos estudados e na relação entre a sucção medida após o ensaio e a sucção obtida através da curva característica. Em síntese se evidenciou que a variação de umidade apresenta forte influência na rigidez dos solos em questão, destacando a perda de rigidez com o aumento da umidade. Em alguns casos a diminuição de umidade não apresentou alterações nas leituras de MR ou até mesmo apresentou menor rigidez para um solo mais seco. Como citado anteriormente, isso explicita que a sucção pode estar associada a esta mudança de rigidez do material, a qual é dependente de outros fatores como granulometria, mineralogia e estrutura.

Neste item é apresentada uma correlação direta entre a sucção e o módulo de resiliência, onde inicialmente ao se avaliar os valores obtidos de sucção e MR estimado apresentados anteriormente na Tabela 4-11, se pode verificar que o MR tende a aumentar com o aumento da sucção matricial, semelhante ao observado por Gonçalves (1999), Ceratti *et al.* (2004), Weber (2013), Zhang *et al.* (2018), Freitas *et al.* (2020) e Santos (2021). A Figura 4-40 e a Figura 4-41 ilustram bem esta relação, ressaltando que o valor de MR é equivalente ao valor estimado utilizando os coeficientes obtidos para o modelo composto (Tabela 4-9) e os pares de tensões

utilizados foram  $\sigma_3 = 0,020$  MPa e  $\sigma_d = 0,170$  MPa (energia intermediária) e  $\sigma_3 = 0,010$  MPa e  $\sigma_d = 0,030$  MPa (energia normal). Além disso também se utilizou os coeficientes obtidos para o modelo composto na umidade ótima, extraídos de Schreinert (2021) e o valor de sucção apresentado é referente ao obtido após o ensaio de MR, utilizando a técnica do papel filtro.

Avaliando as duas figuras citadas se verifica um acréscimo de MR com o acréscimo da sucção. Este aumento expressivo do MR relacionado com o aumento da sucção para o solo AS já era esperado, visto sua natureza mais coesiva e sua estrutura, sendo análogo ao constatado por Gonçalves (1999) em sua pesquisa. Este aumento da sucção gera um enrijecimento do material devido ao aumento de rigidez do esqueleto do solo, resultando em um maior MR, como já citado anteriormente.

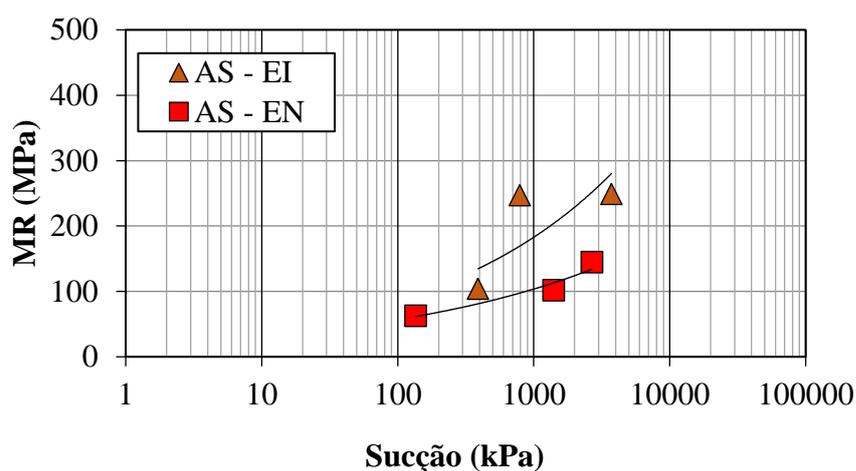


Figura 4-40 - Relação entre a sucção matricial e o MR estimado para o solo AS

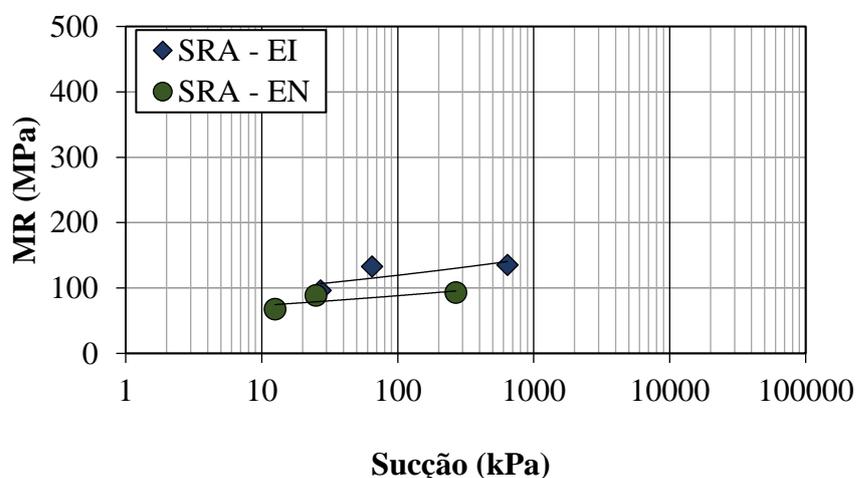


Figura 4-41 - Relação entre a sucção matricial e o MR estimado para o solo SRA

Para a energia intermediária se verificou que o aumento do MR com a sucção não foi tão expressivo, sendo que após certo ponto o valor de MR aparenta se manter constante. Este comportamento é bastante parecido com o observado por Ceratti *et al.* (2004).

Essas variações do MR com a sucção nos mostram que a umidade ótima de compactação resulta nas melhores condições de rigidez frente a esta janela de variação permitida pela legislação brasileira ( $\pm 2\%$  em relação a umidade ótima). Em alguns casos (dependendo da natureza do solo) uma umidade menor pode trazer uma maior rigidez, porém como visto na presente pesquisa, a preferência pela compactação no teor ótimo apresenta mais benefícios.

Por fim, se comprovou mais uma vez que existe uma relação direta entre a rigidez dos solos, umidade e sucção. Além de ser um parâmetro importante para compreender o comportamento de solos não saturados, a sucção retrata as oscilações de rigidez de uma forma muito mais adequada do que o próprio teor de umidade (SANTOS, 2020).

#### 4.3.3.4 Previsão do MR considerando variações de umidade e sucção

Anteriormente no item 4.3.1 realizou-se algumas análises acerca de modelos que retratassem da melhor forma o comportamento dos solos frente às tensões aplicadas. O modelo que apresentou o melhor ajuste foi o modelo composto, que considera as tensões desvio e confinante. Apesar dos coeficientes  $k_1$ ,  $k_2$  e  $k_3$  evidenciarem algumas mudanças no comportamento resiliente dos solos com o aumento ou redução do teor de umidade, ele não considera diretamente os efeitos da sucção e variação de umidade na previsão da rigidez destes materiais. Desta forma, acredita-se que modelos mais complexos, que contemplem estas variáveis, possam apresentar melhores ajustes e retratar de forma mais fiel o comportamento destes solos.

Dito isto, na Tabela 4-12 é apresentado os coeficientes de determinação ( $R^2$ ) obtidos para modelos testados dentre os já citados na revisão bibliográfica. A grande maioria dos modelos existentes na literatura foram elaborados com base em solos de clima temperado e fundamentados nos modelos de previsão da AASHTO. Junto a estes também foram utilizados três modelos nacionais (Gonçalves (1999), Freitas *et al.* (2020) e Santos (2020)), sendo embasados em solos tropicais e cuja estrutura se encontra mais próxima ao modelo composto.

Conforme visto na Tabela 4-12 o solo SRA apresentou os melhores ajustes ao se utilizar tanto os modelos internacionais, como os nacionais, com valores de  $R^2$  superiores a 0,50. O solo AS se ajustou bem em alguns modelos, porém considerando os valores obtidos na energia intermediária, ele se mostrou pouco ajustável pela maioria das equações. Este fato também foi visto anteriormente ao se utilizar os modelos convencionais que não incorporam o efeito da umidade, como os que consideram a tensão desvio e confinante, por exemplo.

Tabela 4-12 – Coeficientes de determinação ( $R^2$ ) de modelos que consideram os efeitos de sucção e variação de umidade

Modelos de previsão	AS		SRA	
	EI	EN	EI	EN
	$R^2$	$R^2$	$R^2$	$R^2$
Gonçalves (1999)*	0,43	0,79	0,55	0,62
Yang <i>et al.</i> (2005)	0,08	0,03	0,54	0,48
Liang <i>et al.</i> (2008)	0,20	0,13	0,76	0,64
Khoury <i>et al.</i> (2009)	0,49	0,93	0,79	0,88
Zhang <i>et al.</i> (2018)	0,49	0,90	0,77	0,83
Freitas <i>et al.</i> (2020)*	0,79	0,84	0,80	0,95
Santos (2020)*	0,30	0,84	0,85	0,88

\*Modelos propostos com base em solos tropicais.

Dentre os modelos internacionais podemos citar os de Khoury *et al.* (2009) e Zhang *et al.* (2018) que apresentaram desempenho mais satisfatório. Para os modelos nacionais, o modelo de Freitas *et al.* (2020), que considera a sucção, a diferença de umidade em relação ao teor ótimo e a variável de tensão que possui maior correlação com os dados de MR, foi a que se destacou com valores de  $R^2$  excelentes, superiores a 0,79. Os outros modelos nacionais como o Santos (2020) e Gonçalves (1999) também apresentaram ajustes consideráveis, porém o modelo de Gonçalves (1999), por considerar apenas a tensão desvio e a sucção, apresentou valores de  $R^2$  inferiores. Constata-se neste quesito que o bom ajuste dos solos avaliados com os modelos nacionais se deve ao fato de estes modelos serem embasados em solos tropicais.

Da mesma forma que se relacionou os valores de MR observados no ensaio *versus* os valores de MR obtidos na modelagem utilizando os modelos composto e universal apresentados no item 4.3.1, realizou-se esta mesma análise para o modelo que obteve maior significância dentre os que inserem a variável sucção, o modelo de Freitas *et al.* (2020). O gráfico com esta relação é apresentado na Figura 4-42.

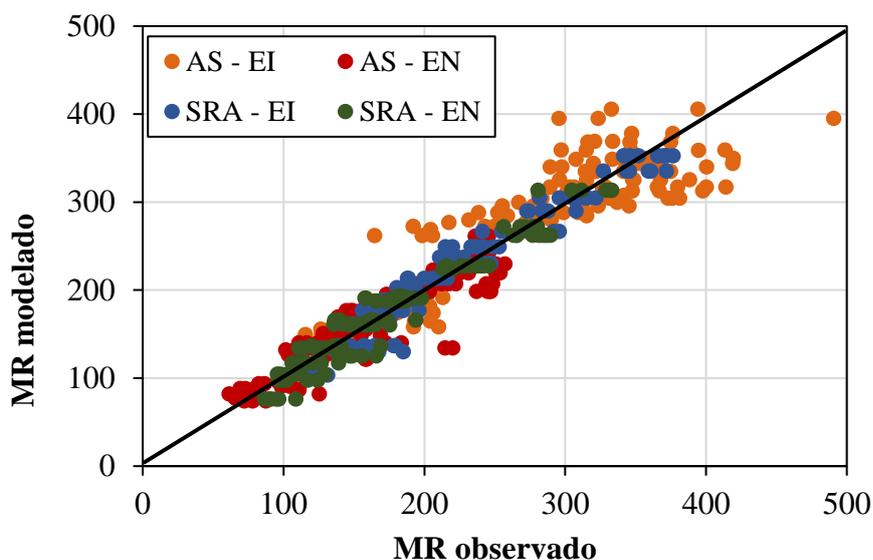


Figura 4-42 - Comparação do MR observado versus modelado para o modelo de Freitas *et al.* (2020)

A Figura 4-42 demonstra elevada acurácia do modelo, apresentando significativa aderência dos dados à reta de igualdade. Apenas os dados relativos ao solo AS na energia intermediária se apresentam mais dispersos, o que é corroborado pelo valor de  $R^2$  obtido na modelagem (0,79).

Avaliando estes modelos que apresentaram melhor desempenho e os parâmetros utilizados, idealizou-se um modelo de previsão que alia a concepção do modelo composto, atual modelo utilizado no Brasil para avaliação do comportamento resiliente dos solos, com a incorporação do efeito da variação de umidade e sucção. Este modelo é apresentado na Equação 14.

$$MR = k_1 \times e^{k_2 - k_3(w - w_{ot})} \times \sigma_3^{k_4} \times \sigma_d^{k_5} \times \Psi^{k_6} \quad (14)$$

Onde:

MR é o módulo de resiliência, em MPa;

$w - w_{ot}$  é a diferença entre um teor e umidade qualquer e a umidade ótima;

$\sigma_3$  é a tensão confinante, em kPa;

$\sigma_d$  é a tensão desvio, em kPa;

$\psi$  é a sucção matricial do solo, em kPa;

$k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$ ,  $k_4$ ,  $k_5$  e  $k_6$  são os parâmetros de regressão do modelo.

O modelo de regressão apresentado foi elaborado com base nos modelos de Freitas *et al.* (2020) e no próprio modelo composto. Inicialmente adotou-se uma estrutura que incorporava o modelo de Zhang *et al.* (2018), com a tensão octaédrica e o primeiro invariante de tensões, além da variável sucção. O efeito das variáveis foi bastante significativo para o solo SRA, porém não apresentou boa correlação com o solo AS. A partir deste ponto, tentou-se inserir a variável proposta por Freitas *et al.* (2020) e Santos (2020) que se refere ao estado de tensões que possui a maior correlação com o MR. Os resultados foram satisfatórios, porém se percebeu que a incorporação das duas variáveis à equação, tensão desvio e tensão confinante, era mais significativa, visto que os dois solos apresentam influência significativa dos dois parâmetros. Por fim, a variável de variação de umidade incorporada por Freitas *et al.* (2020) também se mostrou significativa, sendo adicionada ao modelo proposto.

Para verificar a relevância do modelo, a Tabela 4-13 apresenta os resultados obtidos ( $R^2$  e coeficientes  $k$ ) para os três modelos nacionais, além do proposto na presente pesquisa. Também é apresentado o valor da raiz quadrada do erro médio (RMSE), o qual mede a diferença entre os valores previstos pelo modelo e os valores observados.

De posse dos dados da Tabela 4-13 temos que o modelo proposto apresentou o melhor ajuste, com coeficientes de determinação ( $R^2$ ) entre 0,82 e 0,95 e também menores valores de RMSE, demonstrando boa acurácia.

Tabela 4-13 – Resultados da regressão de três modelos nacionais e do proposto na pesquisa

Solo Energ.	Modelos de previsão	Parâmetros dos modelos*						R <sup>2</sup>	RMSE
		k1	k2	k3	k4	k5	k6		
AS -EI	Gonçalves (1999)	148,48	-0,135	0,179	-	-	-	0,43	65,71
	Freitas et al. (2020)	71,04	7,516	-9,685	-	-	-	0,79	40,03
	Santos (2021)	1,817	0	0	0,179	-	-	0,304	72,65
	<b>Modelo Proposto</b>	<b>4,064</b>	<b>70,125</b>	<b>7,589</b>	<b>0,151</b>	<b>-0,237</b>	<b>-9,78</b>	<b>0,82</b>	<b>36,69</b>
AS -EN	Gonçalves (1999)	24,709	-0,142	0,348	-	-	-	0,79	26,25
	Freitas et al. (2020)	3,327	-0,086	0,339	-	-	-	0,84	22,67
	Santos (2021)	0,012	-0,145	23,551	1,324	-	-	0,84	22,67
	<b>Modelo Proposto</b>	<b>269,456</b>	<b>-2,47</b>	<b>-0,085</b>	<b>0,258</b>	<b>-0,311</b>	<b>0,33</b>	<b>0,92</b>	<b>16,08</b>
SRA -EI	Gonçalves (1999)	40,694	0,315	0,042	-	-	-	0,55	48,48
	Freitas et al. (2020)	8,016	1,242	-1,105	0,499	-	-	0,95	16,8
	Santos (2021)	2,755	0,498	0	0,041	-	-	0,85	28,27
	<b>Modelo Proposto</b>	<b>1,664</b>	<b>7,509</b>	<b>1,242</b>	<b>0,497</b>	<b>0,002</b>	<b>-1,106</b>	<b>0,95</b>	<b>16,53</b>
SRA -EN	Gonçalves (1999)	27,365	0,297	0,12	-	-	-	0,62	38,95
	Freitas et al. (2020)	4,669	0,635	-0,461	0,484	-	-	0,95	14,89
	Santos (2021)	2,427	0,48	0	0,12	-	-	0,88	21,47
	<b>Modelo Proposto</b>	<b>210,123</b>	<b>-0,655</b>	<b>0,637</b>	<b>0,51</b>	<b>-0,026</b>	<b>-0,462</b>	<b>0,95</b>	<b>14,72</b>

Notas: \* Considerando MR em MPa e tensões e sucções em kPa; RMSE é a raiz quadrada do erro médio (MPa);

#### 4.4 DEFORMAÇÃO PERMANENTE

O estudo da deformação permanente é um assunto unânime na área de pavimentação asfáltica, visto seu significativo papel como mecanismo de deterioração estrutural e funcional, resultando em perda em termos de serventia, conforto e segurança. Porém relacionado à pesquisa, este tema ainda apresenta algumas lacunas, pois há uma elevada complexidade associada ao modo como se dá a evolução das deformações plásticas considerando diferentes materiais com diferentes propriedades. Além disso, soma-se a dificuldade envolvida em reproduzir em laboratório o que é visto em campo, em relação ao estado de tensões que abrange as cargas cíclicas. Para contribuir com estas deficiências o presente trabalho se propôs a estudar este assunto, considerando as oscilações de umidade previamente aceitas pelas normas.

Neste capítulo são apresentados os ensaios de deformação permanente realizados conforme apresentado no item 3.2.4.1 e 3.2.4.3 em relação a preparação dos corpos de prova e do ensaio propriamente dito, respectivamente. Os corpos de prova ensaiados tiveram variação de umidade de +1% e -2%, seguindo as mesmas prerrogativas impostas para o ensaio de MR, porém esta variação de umidade não ocorreu apenas na compactação, mas também após a compactação do CP. Para cada variável de umidade analisada, optou-se por ensaiar 6 CPs e não 9 CPs, pois como dito anteriormente, não havia tempo hábil e material suficiente para todos os ensaios serem realizados. Como a norma DNIT-ME 179 (2018b) permite esta redução de análises sem que se perca qualidade no modelo, optou-se por este ajuste. Outro fator importante é que todas as amostras ensaiadas foram conduzidas até os 145000 ciclos ou até a ausência de leitura por parte do RDT, devido ao excesso de deformação permanente.

Para facilitar a leitura deste item, ele foi organizado da seguinte forma: análise do acúmulo de deformação permanente para cada variável analisada (energia e variação de umidade); análise dos resultados obtidos para estas variações de umidade tanto na compactação das amostras (simulando esta variação de umidade ocorrida durante a compactação da camada em campo) como a variação de umidade ocorrida após a compactação (simulando as variações de umidade que ocorrem com o tempo, após a conclusão da camada de interesse); relação entre a sucção obtida após o ensaio e a obtida através da curva característica; relação entre a deformação permanente com a variação de umidade e sucção, utilizando modelos da literatura que consideram estas variáveis e ajuste matemático dos dados experimentais pelo modelo de

Guimarães (2009), incluindo uma proposta de adaptação deste modelo com a inserção de variáveis como a umidade e a sucção.

#### 4.4.1 Análise do acúmulo de DP

O resumo dos parâmetros físicos obtidos nas moldagens dos CPs para todas as amostras ensaiadas, assim como as curvas de deformação permanente acumulada obtida para os dois solos, nas duas energias, considerando os seis pares de tensões e as variações de umidade simuladas nesta pesquisa (variação de umidade na compactação) encontram-se no Apêndice D e E respectivamente. Destaca-se que as figuras apresentadas no Apêndice E são representativas do acúmulo da deformação axial permanente ( $\epsilon_p$ ) no transcorrer dos ensaios em função do número de ciclos de carga (N) aplicado e do par de tensões ( $\sigma_3 \times \sigma_d$ ) atuante. Além disso, optou-se pela representação gráfica em termos relativos, em %, segundo a definição de deformação específica, ao invés do emprego em termos absolutos, em mm. Esta consideração viabiliza a estimativa direta de deslocamentos/afundamentos plásticos contemplando camadas de variadas espessuras ou CPs de diferentes alturas. Em relação aos eixos, optou-se por manter uma escala equivalente para cada par de gráficos de um mesmo solo e energia, buscando em um primeiro momento apresentar uma comparação entre os resultados obtidos com diferentes umidades de compactação.

Por fim, a Tabela 4-14 apresenta de forma sintetizada, os dados experimentais alcançados nos ensaios de DP em função das variáveis consideradas, sendo exibidas a magnitude de  $\epsilon_p$  (%) para certos valores de N ciclos de carga e o valor de  $\epsilon_p$  (mm) acumulado ao final do ensaio.

Avaliando de modo geral tanto as figuras apresentadas no Apêndice F quanto a Tabela 4-14, fica evidente que a variação de umidade de -2% para +1% em relação à umidade ótima influencia diretamente na resposta plástica dos solos estudados. Para o solo AS na energia intermediária se verificou variações entre 0,02 a 4%, considerando a porcentagem de deformação máxima alcançada com estas variações de umidade. Já para o mesmo solo na energia normal os CPs ensaiados com o par de tensões 120 x 360 kPa romperam aos 200 ciclos iniciais ficou evidente, considerando os ensaios com os outros pares de tensões, que os CPs moldados na energia normal apresentaram uma deformação maior.

Tabela 4-14 - Resumo dos resultados obtidos nos ensaios de deformação permanentes com variação de umidade em relação a ótima

Solo	Var. de umidade	CP	$\sigma_3$ (kPa)	$\sigma_d$ (kPa)	$\epsilon_p$ (%) para N ciclos							$\epsilon_p$ (mm)
					100	1000	5000	10k	50k	105k	145k	
AS-EI	-2	1	40	40	0,001	0,008	0,015	0,016	0,015	0,016	0,016	0,03
		3	40	120	0,002	0,008	0,014	0,019	0,023	0,036	0,300	0,06
		4	80	80	0,001	0,001	0,003	0,003	0,012	0,031	0,029	0,06
		6	80	240	0,003	0,053	0,075	0,084	0,122	0,153	0,161	0,32
		8	120	240	0,023	0,039	0,056	0,064	0,09	0,108	0,109	0,22
		9	120	360	0,086	0,178	0,225	0,242	0,286	0,228	0,288	0,58
	1	1	40	40	0,217	0,376	0,454	0,483	0,543	0,563	0,568	1,15
		3	40	120	0,522	0,796	0,88	0,905	0,975	0,995	0,995	2,00
		4	80	80	0,186	0,273	0,311	0,33	0,371	0,389	0,394	0,79
		6	80	240	0,976	1,537	1,673	1,708	1,773	1,803	1,808	3,61
		8	120	240	1,037	0,667	1,821	0,876	1,96	1,995	2,005	4,04
		9	120	360	1,686	3,391	3,727	3,819	3,984	4,036	4,058	8,09
AS-EN	-2	1	40	40	0,073	0,119	0,138	0,144	0,158	0,167	0,172	0,34
		3	40	120	0,138	0,189	0,203	0,208	0,235	0,265	0,26	0,52
		4	80	80	0,173	0,232	0,27	0,287	0,313	0,325	0,325	0,63
		6	80	240	0,404	1,190	1,385	1,457	1,595	1,649	1,674	3,35
		8	120	240	1,628	2,457	2,566	2,602	2,675	2,705	2,718	5,39
		9	120	360	3,741 <sup>1</sup>	-	-	-	-	-	-	-
	1	1	40	40	0,306	0,446	0,499	0,516	0,527	0,532	0,551	1,08
		3	40	120	0,369	0,587	0,662	0,687	0,743	0,788	0,779	1,55
		4	80	80	0,457	0,607	0,669	0,695	0,741	0,762	0,772	1,50
		6	80	240	1,313	2,331	2,514	2,57	2,671	2,732	2,742	5,41
		8	120	240	2,538	5,713	6,067	6,168	6,218	6,269	6,269	12,4
		9	120	360	4,72 <sup>1</sup>	-	-	-	-	-	-	-
SRA-EI	-2	1	40	40	0,001	0,004	0,019	0,024	0,053	0,056	0,054	0,11
		3	40	120	0,091	0,123	0,132	0,138	0,157	0,173	0,177	0,35
		4	80	80	0,001	0,012	0,018	0,022	0,039	0,059	0,061	0,12
		6	80	240	0,002	0,008	0,016	0,02	0,028	0,034	0,039	0,08
		8	120	240	0,053	0,076	0,088	0,094	0,105	0,12	0,13	0,26
		9	120	360	0,046	0,072	0,105	0,126	0,205	0,214	0,214	0,43
	1	1	40	40	0,023	0,055	0,077	0,087	0,107	0,122	0,123	0,25
		3	40	120	0,294	0,411	0,444	0,462	0,531	0,56	0,579	1,15
		4	80	80	0,111	0,147	0,167	0,184	0,223	0,232	0,237	0,48
		6	80	240	1,083	1,698	1,742	1,762	1,832	1,868	1,883	3,75
		8	120	240	0,82	1,333	1,386	1,413	1,497	1,536	1,545	3,08
		9	120	360	0,63	1,607	1,647	1,672	1,743	1,79	1,81	3,66
SR A-	-2	1	40	40	0,043	0,074	0,091	0,098	0,104	0,109	0,116	0,23

	3	40	120	0,072	0,111	0,134	0,146	0,19	0,218	0,222	0,44
	4	80	80	0,077	0,108	0,124	0,139	0,152	0,159	0,165	0,33
	6	80	240	0,089	0,141	0,17	0,183	0,237	0,285	0,308	0,60
	8	120	240	0,073	0,114	0,137	0,15	0,194	0,227	0,23	0,46
	9	120	360	0,131	0,233	0,276	0,297	0,372	0,436	0,453	0,93
	1	40	40	0,082	0,133	0,149	0,165	0,233	0,253	0,258	0,51
	3	40	120	1,911	3,254	3,332	3,349	3,394	3,43	3,446	6,69
1	4	80	80	0,32	0,436	0,471	0,486	0,539	0,554	0,575	1,13
	6	80	240	2,078	5,492	5,716	5,739	5,802	5,845	5,873	11,85
	8	120	240	1,075	2,9	2,993	3,02	3,098	3,135	3,149	6,40
	9	120	360	3,574 <sup>2</sup>	-	-	-	-	-	-	-

<sup>1</sup>AS-EN-2% e AS-EN+1% romperam aos 200 ciclos. <sup>2</sup>SRA-EN+1% rompeu aos 500 ciclos.

Para o solo SRA na energia intermediária as variações obtidas ficaram entre 0,03 e 2%, considerando a porcentagem de deformação máxima alcançada com estas variações de umidade. Considerando a energia normal, a variação ficou entre 0,12 e 6%, sendo que o CP ensaiado com o par de tensões de 120 x 360 kPa, com 1% a mais de umidade em relação a ótima, rompeu aos 500 ciclos.

De modo geral, a influência da variação de umidade, assim como a variação de energia influenciou diretamente na deformação permanente dos solos em questão. De maneira superficial verificou-se um melhor desempenho do solo SRA, ainda mais considerando a energia intermediária, em relação ao solo AS. Considerando o critério de ruptura/limite da camada com 5% de DP acumulada, considerado por alguns métodos como o caso do MeDiNa, o solo AS na energia normal ficou mais evidente, onde para as amostras com +1% em relação a ótima romperam ou deformaram excessivamente, para pares de tensões mais elevados (120 x 360 e 120 x 240 kPa, respectivamente). Novamente para esta mesma energia, porém -2% de umidade em relação a ótima, apenas o último par de tensões levou o CP ao colapso. Já para o solo SRA apenas os CPs moldados na energia normal e mais úmidos apresentaram deformação excessiva (120 x 240 kPa) e ruptura (120 x 360 kPa). Para os demais pares de tensões, a DP variou bastante, mostrando elevada influência da energia de compactação e da umidade arbitrada. Estas análises mais detalhadas são discutidas nos próximos itens.

Analisando os resultados obtidos somente para o par de tensões de 40x40 kPa, cujo nível de tensões seria mais coerente com o estimado para uma camada de reforço de subleito (energia normal), conforme as análises realizadas no AEMC, verifica-se que as deformações

permanentes totais foram inferiores a 1,0mm na condição mais seca (-2% em relação a umidade ótima), o que segundo Guimarães (2009), tornaria muito pequena a probabilidade de ocorrer afundamentos no pavimento. Ao se considerar uma condição mais úmida (+1% em relação a umidade ótima), observam-se deformações de 1,08 mm para o solo AS e 0,51 mm para o solo SRA. Estes resultados nos mostram que, do ponto de vista plástico, houve pouca variação de deformação permanente com a variação de umidade, considerando apenas este par de tensões. Porém ao se considerar um par um pouco mais elevado (40x120 kPa, por exemplo, ainda na energia normal), as deformações já aumentam rapidamente, principalmente o solo SRA, com deformações da ordem de 6,69 mm, demonstrando ser bastante sensível a estas pequenas variações de umidade e cargas aplicadas.

Ao se avaliar os resultados obtidos para o par de tensão de 40x120 kPa, que seria o par mais coerente com o estimado para a camada de sub-base (energia intermediária), temos valores de 0,06 mm e 0,35 mm para os solos AS e SRA, respectivamente, considerando-os mais secos. Já com +1% de umidade em relação a ótima, temos 2,0 mm e 1,15 mm de deformação permanente para o solo AS e para o solo SRA, respectivamente, o que representa deformação mais elevada para esta camada. Mesmo assim, considerando este par de tensões, as deformações ficaram abaixo do limite de 5% (em relação a espessura da camada) permitidos segundo o *software* MeDiNa.

Um ponto interessante a se considerar é que quando aumentamos a energia de compactação, temos uma redução do índice de vazios associada a uma consequente elevação no grau de saturação do material. Desta forma temos um impacto positivo (gerado pelo aumento da densidade) e negativo (gerado pelo aumento da saturação) em relação a resistência a DP de solos. Em relação a esta pesquisa, ao aumentarmos ainda mais a umidade dos solos, temos um aumento da saturação, o que leva a uma menor resistência do mesmo, da mesma forma que, ao diminuirmos a sua umidade, temos uma diminuição da saturação, o que leva à uma maior resistência. Esta constatação pode explicar a elevada diferença de resistência obtida com a variação de umidade e energia de compactação visualizada nos resultados obtidos.

Além da análise visual do acúmulo de DP, outra abordagem bastante relevante na interpretação dos resultados é a realização do ajuste em modelos de previsão comumente empregados na literatura no estudo do comportamento plástico de solos utilizados na pavimentação. Existem diversos modelos de previsão para este fim, mas optou-se por ajustar os dados experimentais

obtidos em laboratório pelo modelo de Guimarães (2009), já que este é o modelo inserido no software MeDiNa para a previsão de deformação permanente em pavimentos e é a partir deste modelo que será apresentado uma nova proposta com a inserção do parâmetro de sucção.

Os parâmetros do modelo proposto por Guimarães (2009) para os dois solos, nas duas energias e nas duas variações de umidade estudadas encontram-se apresentados na Tabela 4-15, considerando a variação de umidade na compactação. Salienta-se que as análises consideraram todos os resultados válidos, incluindo aqueles que apresentaram excesso de deformação permanente.

Tabela 4-15 - Parâmetros do modelo de deformação permanente de Guimarães (2009)

Solo	Energia de compactação	Variação de umidade	Parâmetros Modelo de Guimarães (2009)				
			$\psi_1$	$\psi_2$	$\psi_3$	$\psi_4$	$R^2$
AS	Intermediária	-2%	0,001	-0,740	2,960	0,172	0,98
		1%	0,168	-0,059	1,568	0,107	0,93
	Normal	-2%	0,172	1,382	1,670	0,100	0,93
		1%	0,545	1,982	0,924	0,121	0,93
SRA	Intermediária	-2%	0,007	-0,821	0,905	0,177	0,47
		1%	0,172	-0,235	1,144	0,100	0,84
	Normal	-2%	0,026	-0,152	0,651	0,160	0,87
		1%	0,164	-1,559	2,322	0,114	0,90

Segundo a Tabela 4-15 temos que os coeficientes de determinação ( $R^2$ ) evidenciaram ajustes satisfatórios por parte do modelo, com valores elevados para quase todas as condições de umidade analisadas. A única exceção refere-se ao solo SRA na energia intermediária, considerando -2% em relação a umidade ótima. Inicialmente, ao se avaliar os resultados, verificou-se deformações muito baixas para o CP ensaiado com o par de tensões 80 x 240 kPa, menores que as obtidas para o par de 40 x 40 kPa e 80 x 80 kPa, por exemplo. Este CP foi remoldado com um criterioso cuidado em relação aos índices físicos e novamente apresentou baixas deformações. Acredita-se que esta variação de deformação não seja tão relevante visto que para esta configuração de variáveis (SRA-EI-2%), as maiores deformações foram da ordem

de 0,20%, ainda assim muito baixas. Porém esta diferença para este CP em questão tornou o ajuste do modelo Guimarães (2009) não tão efetivo.

Ao avaliar as constantes de regressão, inicialmente pelo parâmetro  $\psi_2$ , verifica-se que quase em sua totalidade as variáveis analisadas apresentaram estas constantes negativas, aspecto esse já esperado, visto que retrata um efeito positivo na resistência de DP em função da elevação de  $\sigma_3$ . Apenas o solo AS na energia normal apresentou este parâmetro como positivo, demonstrando uma influência negativa na resistência a DP do solo. Relacionado ao parâmetro  $\psi_3$ , que possui relação direta com a tensão desvio, os valores foram positivos e bastante superiores aos obtidos para os outros coeficientes. Este comportamento já era esperado visto que a deformação permanente tende a aumentar com o aumento da tensão desvio. Por fim, o parâmetro  $\psi_4$ , correspondente ao número de aplicações de carga, apresentou valores também positivos, indicando que as deformações permanentes tendem a aumentar com o aumento de número de ciclos de carga.

Em síntese, evidencia-se a relevância da influência do estado de tensões na resposta plástica dos materiais. De modo geral não foram observadas tendências entre os parâmetros do modelo e as variações de umidade e energia propostas. Também não se verificou diferenças nas magnitudes e nos sinais destas constantes quando comparadas aos valores usuais presentes em outros estudos, como o de Zago (2016), Santos (2020) e Schneinert (2021), este último enfatizado por utilizar os mesmos solos da presente pesquisa.

Conforme já apresentado nas análises de MR, uma forma alternativa de se ter uma sensibilidade acerca da eficiência dos modelos de previsão é por meio de gráficos contendo os dados observados em relação aos modelados, juntamente com a reta de igualdade. Na Figura 4-43 é apresentado o gráfico em questão elaborado para o modelo de Guimarães (2009).

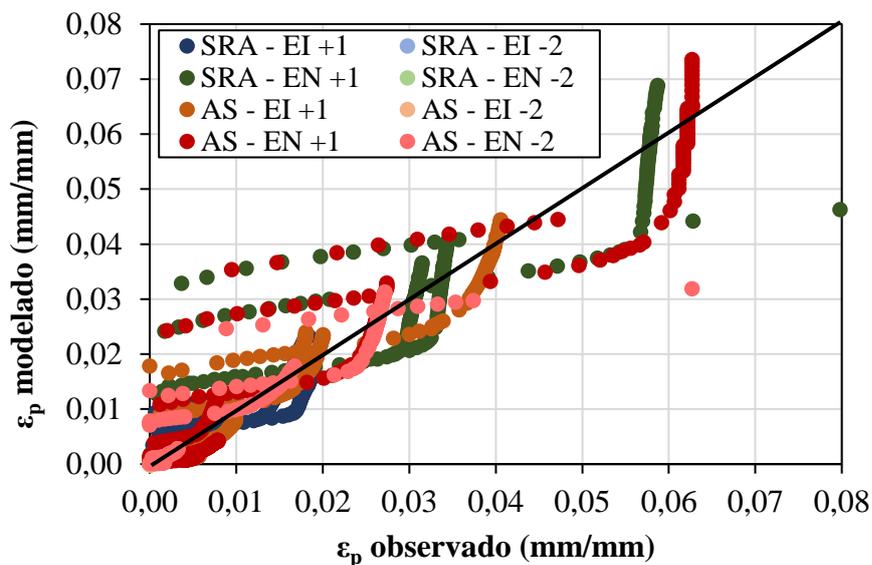


Figura 4-43 – Comparação da DP observada *versus* modelada para o modelo de Guimarães (2009)

Considerando a comparação apresentada na Figura 4-43, temos que para as amostras ensaiadas com maiores umidades (+1% em relação a umidade ótima) e com menores energias, a DP apresenta-se mais elevada e mais dispersa em relação à proximidade com a reta de igualdade.

#### 4.4.2 Influência da energia de compactação

A energia de compactação tem influência preponderante na resposta resiliente do material, como apresentado anteriormente nas análises de MR. Neste item é apresentada a influência deste parâmetro frente a resposta plástica do material, avaliando os pares de tensões ensaiados.

Inicialmente se avaliou a influência do estado de tensões atuante no comportamento plástico dos solos estudados. Na Figura 4-44 e Figura 4-45 são apresentados gráficos relacionando os pares de tensões ( $\sigma_3 \times \sigma_d$ ) aplicados durante o ensaio com as deformações permanentes alcançadas por cada um desses pares ao final do ensaio, ou seja, para  $N = 145.000$  ciclos de carga.

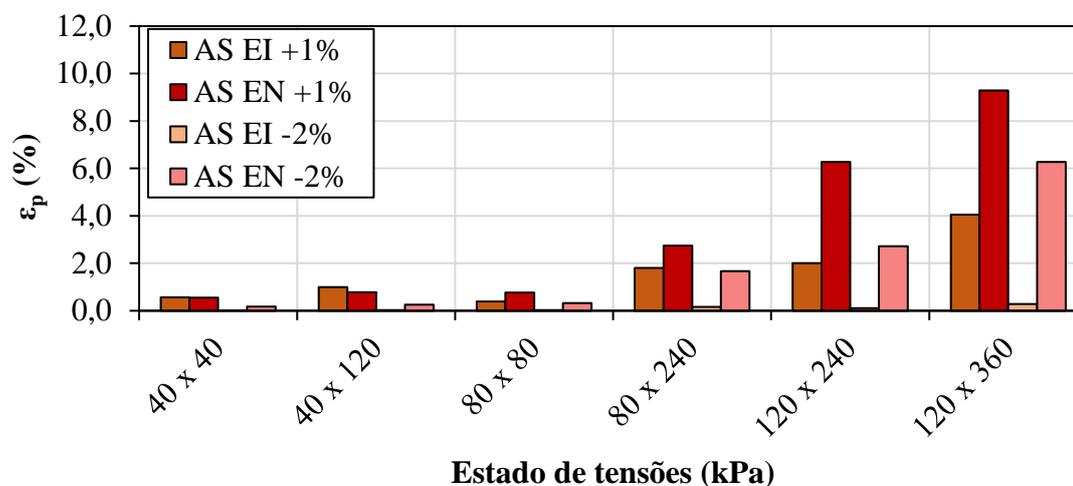


Figura 4-44 - Influência da energia de compactação na DP para o solo AS considerando os pares de tensões ensaiados

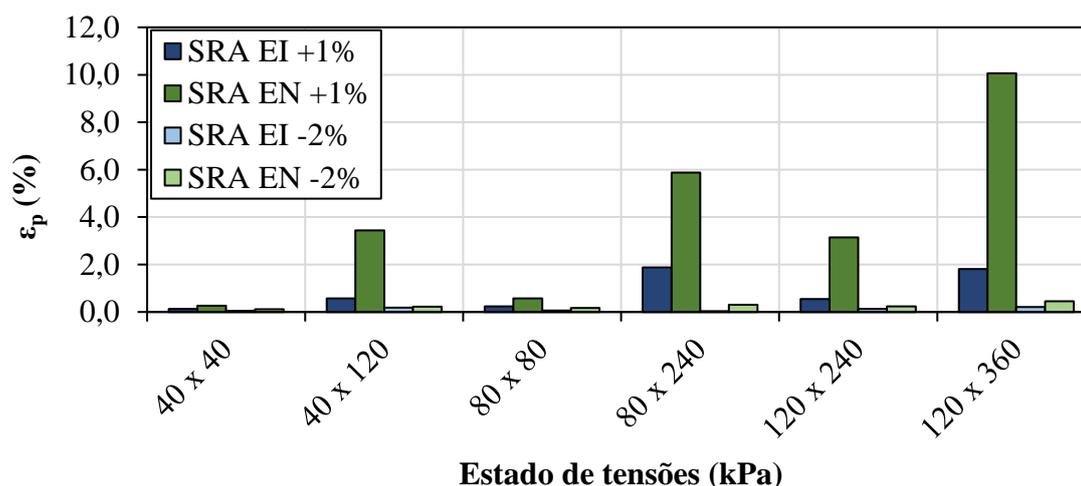


Figura 4-45 - Influência da energia de compactação na DP para o solo SRA considerando os pares de tensões ensaiados

Observando primeiramente o comportamento visto para o solo AS na Figura 4-44, temos que o aumento da energia de compactação proporciona uma notável redução no valor de DP acumulada, tanto considerando o solo mais úmido, quanto mais seco. Contudo, para níveis de tensões menores, estas reduções observadas não foram tão significativas, ou seja, somente para pares de tensões mais elevados se verificou esta redução mais acentuada da DP acumulada. Considerando as variações de umidade impostas, a variação de -2% em relação a umidade ótima apresentou mais impacto frente a mudança de energia de compactação.

Para o solo SRA (Figura 4-45) também se verificou, de modo geral, que o aumento da energia de compactação proporciona uma redução no valor de DP acumulada. Porém esta redução foi

muito mais evidente ao se considerar a variação de umidade em +1%. Para o solo mais seco (-2%), independente do par de tensão avaliado, esta variação foi relativamente baixa, assim como as deformações permanentes obtidas. Já considerando o solo mais úmido, as deformações verificadas com a troca de energia foram bastante expressivas, onde para o par 120 x 360 kPa, por exemplo, a deformação acumulada era de 2% na energia intermediária e passou para 10% (vindo ao colapso) para a energia normal. Esta variação de rigidez frente a mudança de umidade era esperada, visto o solo SRA ser mais arenoso.

Por fim, considerando o exposto referente aos dois solos, esse impacto positivo gerado pelo aumento da energia de compactação também já foi relatado em outros estudos envolvendo diversos tipos de materiais para pavimentação (ZAGO, 2016; SANTOS, 2020; e SCHREINERT; 2021).

#### 4.4.3 Influência da variação de umidade

Conforme já visto nas análises acerca do Módulo de Resiliência, a umidade é um dos principais fatores externos que influencia no desempenho mecânico de solos utilizados na pavimentação. A sua avaliação é de suma importância e por isso também foi analisada a sua variação nas características de deformação permanente dos dois solos em estudo e nas duas energias consideradas.

Neste item é apresentado os resultados acerca da análise da variação de umidade na compactação e no pós-compactação das amostras. Também é verificada a relação entre estas variações e a sucção obtida, a relação entre a sucção obtida no ensaio e a medida pela CC, bem como a previsão de um novo modelo que incorpora esta variável.

##### 4.4.3.1 Efeito da variação de umidade de compactação na DP

Na Figura 4-46 e na Figura 4-47 são apresentadas a influência da variação de umidade considerada na relação entre as deformações permanentes específicas (%) e o número de ciclos de aplicação de carga (N), considerando os resultados dos estados de tensões referentes aos pares 40x40 kPa e 40x120 kPa e as duas energias de compactação. Os pares de tensões foram escolhidos por serem mais próximos aos arbitrados nas análises realizadas anteriormente (10x30 kPa e 20x170 kPa) como sendo passíveis de ocorrência em camadas de sub-base e reforço do subleito (energias intermediária e normal, respectivamente) considerando um eixo

padrão. As variações de umidade consideradas foram as arbitradas na presente pesquisa (-2% e +1%), além dos resultados obtidos por Schreinert (2021) para os mesmos solos na umidade ótima, a título de comparação. Optou-se também por manter o limite do eixo das ordenadas em 5%, visto que este é considerado pelo MeDiNa como sendo o critério de ruptura/limite da camada, além de facilitar a comparação entre os diferentes materiais, energias e teores de umidade. Os gráficos referentes aos outros pares de tensões ensaiados encontram-se no Apêndice F.

Analisando as duas figuras apresentadas, inicialmente constata-se que as deformações permanentes aumentam com o aumento do teor de umidade, independente do estado de tensões avaliado. Este comportamento corrobora com o exposto em outras pesquisas a nível nacional e internacional (GUIMARÃES, 2009; PUPPALA *et al.*, 2009; JING *et al.*, 2016; LIMA *et al.*, 2019b; SANTOS, 2020). De modo geral, os comportamentos plásticos visualizados para os dois solos seguiram uma mesma tendência inicial, com altas taxas de acréscimo de DP nos primeiros ciclos de carregamento, tanto maiores quanto maior o estado de tensões aplicado. Com o aumento do número de ciclos de carga, estas deformações permanentes tenderam a estabilização, considerando os dois pares de tensões avaliados e as variações de umidade.

Verificou-se que o comportamento depende do tipo de solo, da condição de umidade avaliada e do estado de tensões aplicado, já que para níveis mais altos de tensões (conforme apresentado no Apêndice F) houve até mesmo o colapso incremental do solo.

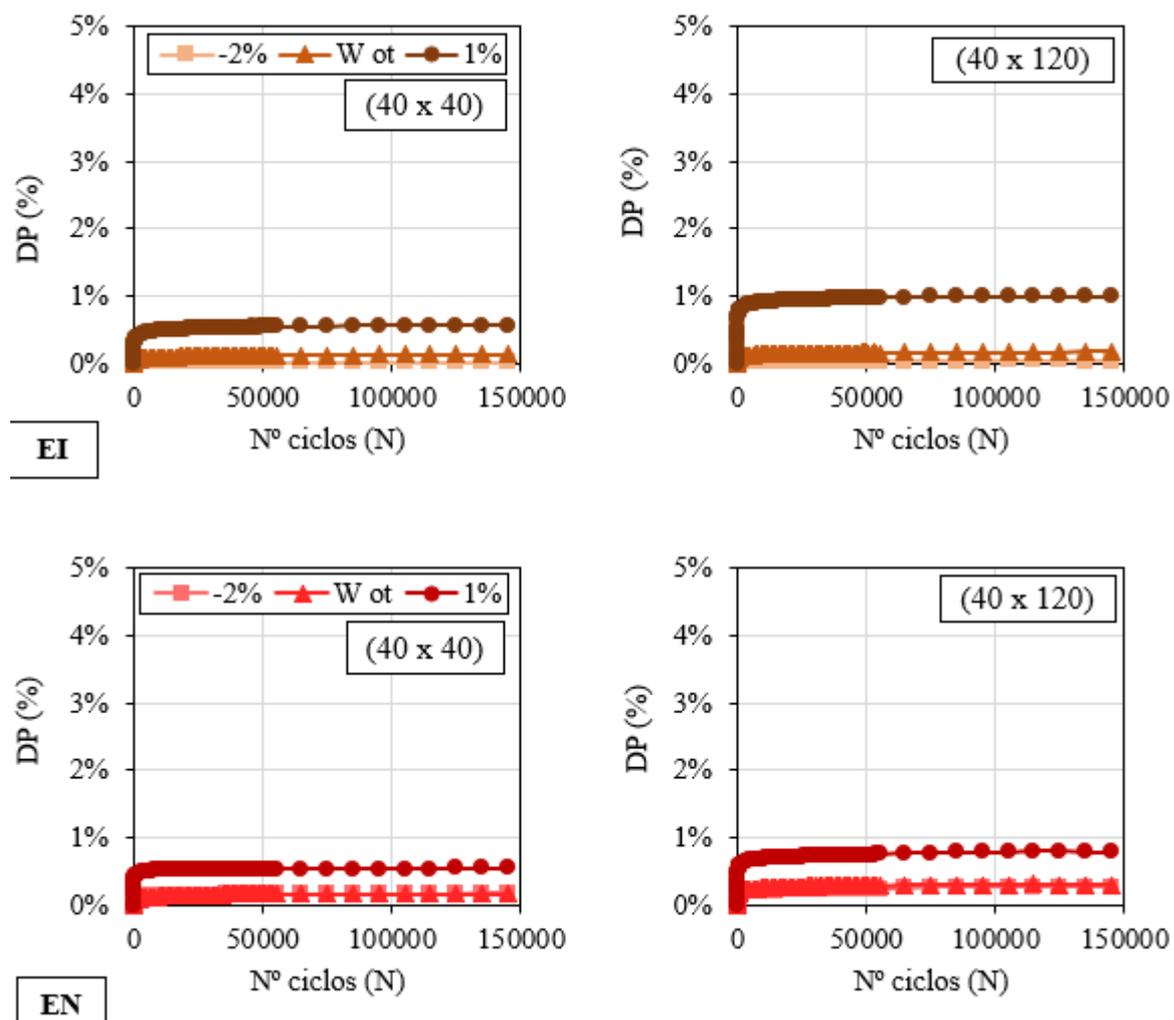


Figura 4-46 - Influência da variação de umidade na DP para o solo AS nas duas energias de compactação

Considerando cada gráfico separadamente, a fim de compreender a influência apenas da variação de umidade, se verificou uma tendência de deformação muito próxima entre a variação de -2% e os resultados obtidos no devido teor ótimo, para todos os gráficos apresentados. Comportamento bem diferente se verificou ao adicionar +1% de umidade na compactação dos CPs, onde as deformações foram bastante superiores, ressaltando a curva obtida para o solo SRA na energia normal, que chegou a uma deformação permanente acima de 3%. Estes fatos corroboram com o apresentado em relação aos resultados de MR: uma variação de umidade abaixo da ótima nem sempre traz benefícios, geralmente a resistência do solo acaba sendo muito próxima da obtida com a umidade ótima. Além disso, mesmo que apresente certo ganho de resistência, o material pode sofrer mais deformações com as variações de umidade que podem

ocorrer em campo, relacionadas com as oscilações do lençol freático e variações climáticas. Também verificamos esta relação ao considerar o solo mais úmido, ou seja, ao umedecer excessivamente o solo, ele perde parte de sua resistência, aumentando as deformações obtidas. Em relação aos gráficos apresentados no Apêndice F, apenas na energia normal e em estados de tensões mais elevados, se verificou deformações menos próximas para a variação de -2% e a umidade ótima.

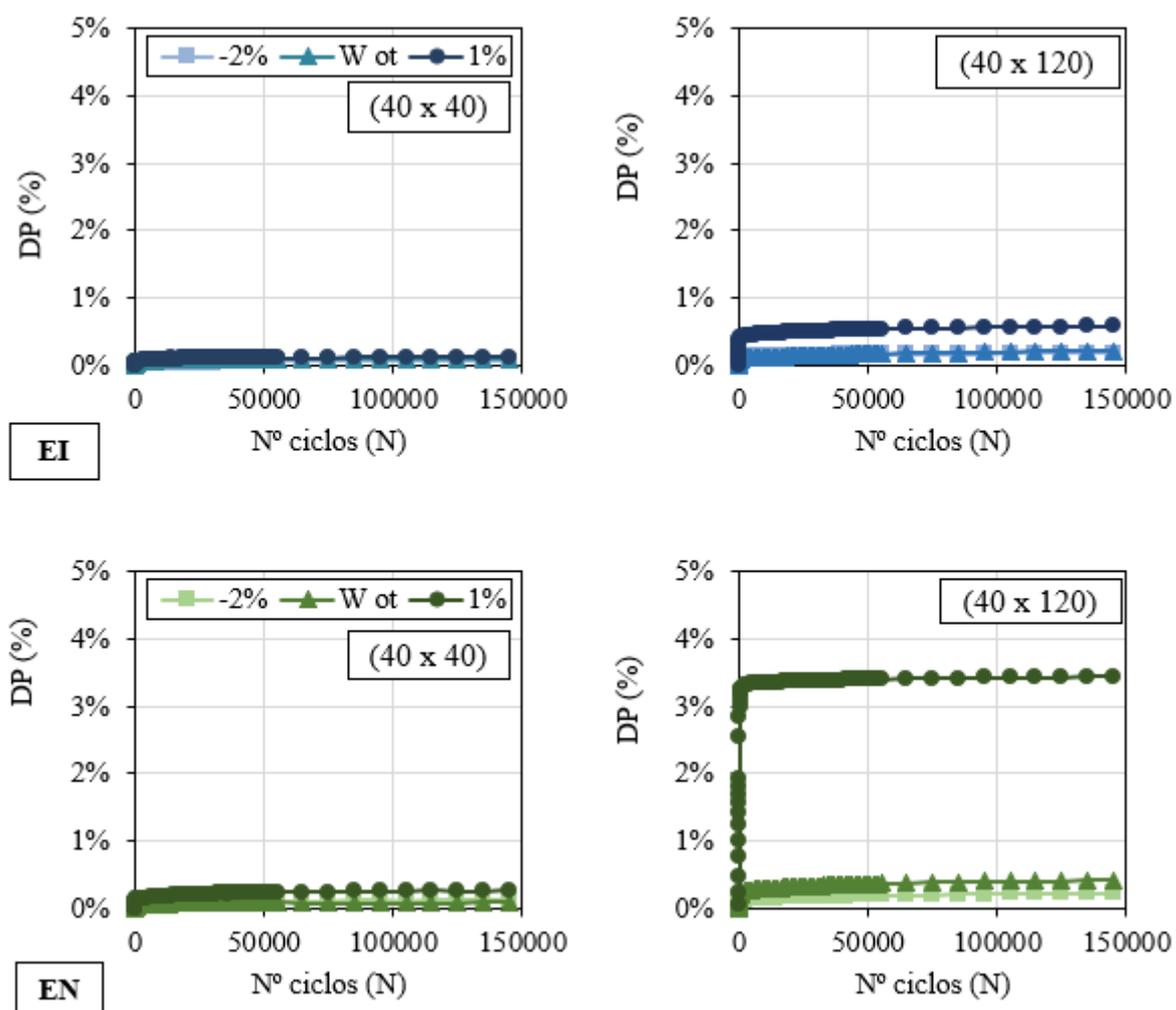


Figura 4-47 - Influência da variação de umidade na DP para o solo SRA nas duas energias de compactação

Outro ponto interessante e que cabe destacar frente as figuras apresentadas acima é a influência da energia de compactação. Os dois solos apresentaram comportamentos diferentes, pois o solo AS não demonstrou um aumento tão elevado das deformações com a mudança de energia, diferentemente do solo SRA, o qual teve um aumento bastante evidente, ainda mais para um

estado de tensão mais elevado. Este fato já foi mencionado anteriormente no item 4.4.2 e se verificou deformações acumuladas muito mais superiores para outros pares, como por exemplo, o par 120 x 360 kPa.

#### 4.4.3.2 Efeito da variação de umidade de pós-compactação na DP

Além de realizar ensaios de deformação permanente com variação de umidade na compactação, realizou-se alguns ensaios adicionais para verificar a influência da variação de umidade na pós compactação. Como citado no item 3.2.4.1 estas amostras foram compactadas na umidade ótima e passaram por dois ciclos de secagem e umedecimento, retornando à umidade ótima.

Após a realização dos ciclos de umedecimento e secagem os CPs estavam prontos para o ensaio de deformação permanente. Dois pares de tensões foram escolhidos para o ensaio de DP: 20x170 kPa e 20x190 kPa. Estes pares foram obtidos através do software AEMC, considerando carregamentos de 8,2t (eixo padrão) e 10t, conforme já citado no item 3.2.4.1.

A título de comparação, na Figura 4-48 e Figura 4-49 são apresentados os gráficos de DP (%) por número de ciclos aplicados (N) para os solos AS e SRA, respectivamente, considerando amostras que passaram por ciclos de umedecimento e secagem e amostras que não passaram por estes ciclos. As amostras que não passaram pelos ciclos foram apenas umedecidas na respectiva umidade ótima e ensaiadas, a título de comparação.

Avaliado a Figura 4-48 e Figura 4-49 percebe-se inicialmente que os ciclos de umedecimento e secagem influenciam fortemente no aumento das deformações plásticas, onde a maioria das amostras que passaram por ciclos chegaram a sofrer ruptura.

O solo AS apresentou deformações mais elevadas que o solo SRA considerando as amostras que não passaram pelos ciclos de umedecimento e secagem, porém ao se considerar os ciclos, o solo SRA demonstrou ser mais sensível a essa variação de umidade, onde as duas amostras romperam logo no início do ensaio. Este fato evidenciado é bastante interessante visto que os resultados obtidos anteriormente na análise de acúmulo de DP evidenciaram um comportamento pior do solo AS, além dos resultados acerca da comparação da variação de umidade de compactação. Também podemos destacar que para os ensaios de MR, o solo SRA se mostrou menos suscetível as variações no teor de umidade de compactação.

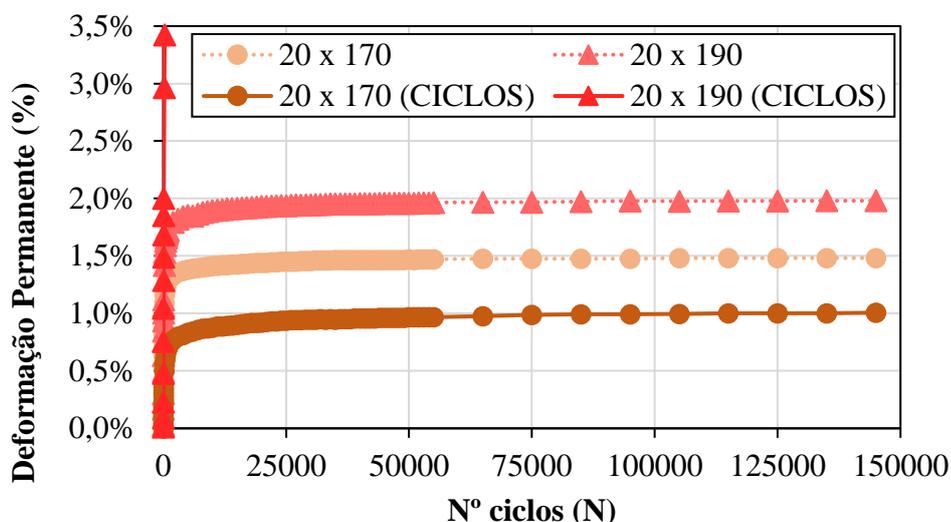


Figura 4-48 - Gráfico de DP *versus* número de ciclos para o solo AS-EI considerando os pares 20x170 kPa e 20x190 kPa

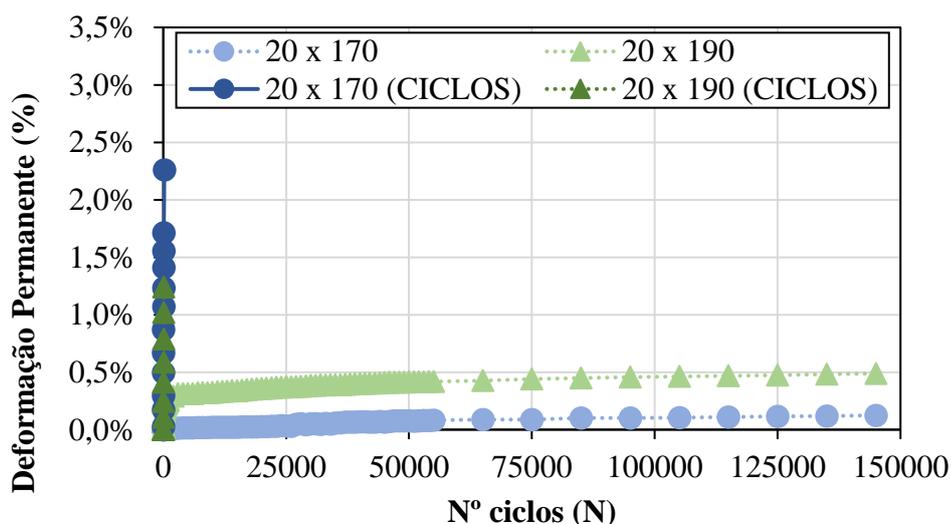


Figura 4-49 - Gráfico de DP *versus* número de ciclos para o solo AS-EI considerando os pares 20x170 kPa e 20x190 kPa

Diversas pesquisas como as apresentadas por Guimarães (2009), Salour e Erlingsson (2017), Lima (2020) e Santos (2020) mostram que há um aumento das deformações plásticas com o acréscimo do teor de umidade pós-compactação, porém ainda é escasso o estudo acerca dos efeitos dos ciclos de umedecimento e secagem no comportamento de solos.

Diante do exposto, comprova-se que a variação do teor de umidade na pós-compactação é bastante nociva ao comportamento plástico dos solos utilizados em pavimentação, destacando o comportamento do solo SRA.

#### 4.4.3.3 Relação entre a sucção medida após o ensaio e a sucção medida na CC

Dando continuidade as análises realizadas acerca da influência da sucção, assim como avaliado para os ensaios de MR, também se avaliou este parâmetro associado aos resultados de DP. Para este ensaio em questão novamente se obteve valores de sucção de duas maneiras distintas: após o ensaio de DP para cada par de tensão era extraída uma amostra do CP, onde se media a sucção através da técnica do papel filtro; e, através da saturação obtida pelo ensaio se obteve a sucção matricial através da curva característica apresentada anteriormente no item 4.2.1, utilizando o ajuste de Gitirana Jr. e Fredlund (2004). É importante frisar que se separou as análises de DP *versus* sucção em dois grupos: das amostras que sofreram variação de umidade na compactação e das amostras que sofreram variação de umidade na pós-compactação.

Inicialmente é apresentada a Tabela 4-16 com as informações de cada CP relativo a cada par de tensão ensaiado relacionado a suas variáveis, considerando a variação de umidade na compactação. Nesta tabela temos os dados de deformação permanente final (%), após os 145000 ciclos, o valor de sucção obtido diretamente após o ensaio e a sucção obtida pela curva característica. É importante destacar que os CPs que romperam durante o ensaio não tiveram suas amostras coletadas para verificação de sucção, já que suportaram poucos ciclos de carga. Além disso para as amostras do solo AS na energia intermediária, o grau de saturação foi bastante elevado, chegando a 100% em algumas amostras. Neste caso, se considerou uma saturação teórica de 100% e uma sucção de 1 kPa referente a curva característica.

Analisando os valores de sucções obtidos para cada par de tensão, podemos perceber que para os CPs mais úmidos (+1%) os valores de sucção obtidos com o ensaio geralmente eram maiores que os estimados, considerando o grau de saturação obtido. Já para CPs mais secos (-2%) se verificou maiores sucções considerando os valores estimados, retirados da curva característica. Mesmo assim não se verificou uma tendência clara nos resultados, pois os valores obtidos foram bastante dispersos considerando a maioria das variáveis analisadas e comparando os dois métodos de obtenção de sucção. Esta variação discrepante entre os valores obtidos no ensaio e os estimados podem ter influência direta pela curva característica modelada, através do patamar característico presente na CC, como também pelo modo como foi coletada a sucção através do ensaio, visto que o mais correto seria a leitura deste parâmetro durante a realização do teste.

Tabela 4-16 – Resumo dos dados obtidos para cada CP ensaiado para DP com relação a sucção

Solo	EC <sup>1</sup>	W (%)	Varição de Umidade	Sr (%)	$\sigma_3$ (kPa)	$\sigma_d$ (kPa)	$\epsilon_p$ (%) final	Sucção ensaio (kPa)	Sucção CC (kPa)
AS	EI	22,4	1	100*	40	40	0,568	2724	1
				100*	40	120	0,995	875	1
				100*	80	80	0,394	2451	1
				100*	80	240	1,808	958	1
				99,3	120	240	2,005	354	20
				100*	120	360	4,058	1114	1
AS	EI	21,4	0	93,9	40	40	0,132	274	750
				91,8	40	120	0,178	1082	2050
				90,6	80	80	0,204	3408	2800
				91,9	80	240	0,226	2448	2000
				91,9	120	240	0,37	4079	2000
				92	120	360	0,937	972	1850
AS	EI	19,4	-2	88,39	40	40	0,016	1850	3910
				90,94	40	120	0,030	1750	3250
				88,69	80	80	0,029	5285	3900
				89,4	80	240	0,161	2379	3850
				87,1	120	240	0,109	3957	4850
				80,42	120	360	0,288	3832	6200
AS	EN	24,3	1	90,4	40	40	0,551	120	8,5
				83,2	40	120	0,779	378	215
				94,2	80	80	0,772	607	6,5
				90,4	80	240	2,742	249	8,5
				90,4	120	240	6,269	271	8,5
				95,6	120	360	-	-	5,5
AS	EN	23,3	0	82,5	40	40	0,159	384	305
				82,6	40	120	0,299	849	300
				82,7	80	80	0,179	623	360
				82,5	80	240	0,903	1338	305
				81,5	120	240	1,401	1335	405
				82,2	120	360	5,313	1974	310
AS	EN	21,3	-2	74	40	40	0,172	2963	5500
				79,4	40	120	0,26	1424	3950
				75,7	80	80	0,325	2102	5900
				72,9	80	240	1,674	1280	6100
				82,3	120	240	2,718	1445	350
				84,2	120	360	-	-	150
SRA	EI	12	1	87,7	40	40	0,123	25	49
				89,8	40	120	0,579	42	32

				87,7	80	80	0,237	45	49
				83,2	80	240	1,883	38	85
				92,3	120	240	1,545	27	18
				86,3	120	360	1,810	30	62
				88	40	40	0,085	44	45
				86,2	40	120	0,211	50	55
				86,9	80	80	0,102	27	52
				88	80	240	0,269	36	45
				85,5	120	240	0,241	48	59
				87,2	120	360	0,36	49	47
				61,5	40	40	0,054	626	1950
				70,7	40	120	0,177	688	500
				62,1	80	80	0,061	345	1750
				63,2	80	240	0,039	995	1600
				62,5	120	240	0,130	575	1720
				64,9	120	360	0,214	1439	1550
				90,6	40	40	0,258	21	9
				97,3	40	120	3,446	6	3,8
				93,4	80	80	0,575	8	5
				85,1	80	240	5,873	26	15
				82,1	120	240	3,149	19	30
				88,6	120	360	-	-	10
				82,5	40	40	0,082	29	30
				82,8	40	120	0,419	34	28
				83	80	80	0,165	32	25
				83,1	80	240	1,101	29	24
				83,5	120	240	0,370	42	20
				82,9	120	360	1,686	53	27
				68,9	40	40	0,116	132	1200
				65,5	40	120	0,222	522	1750
				64,6	80	80	0,165	294	1800
				74,9	80	240	0,308	224	400
				66,5	120	240	0,230	136	1500
				59,3	120	360	0,453	83	2050

Notas: <sup>1</sup> Energia de compactação. Saturação teórica utilizada para CPs que alcançaram saturação completa, adotando-se uma sucção padrão de 1 kPa.

Em relação aos resultados de deformação permanente final (%) e as sucções obtidas pelo ensaio, percebeu-se de modo geral que com o aumento da sucção, há uma maior resistência à ocorrência de deformações plásticas, ou seja, quanto mais seco o CP, maior a sucção obtida e maior a resistência a DP. Porém não se verificou uma tendência clara quanto a análise de um mesmo

solo, mesma energia e mesma umidade, considerando apenas o estado de tensões. A acurácia da leitura de sucção diretamente após o ensaio pode ser levada em conta nesse aspecto, pois o ideal seria obter a leitura de sucção durante todo o ensaio de DP.

Novamente relacionando os dois métodos de obtenção da sucção, mesmo com esta elevada variação verificada, estes valores se encontram dentro da histerese obtida com a curva característica apresentada, ou seja, considerando uma mesma umidade (e grau de saturação) os dois valores de sucção coletados encontram-se dentro da variação da sucção provocada pela variação da forma de obtenção dos valores de umidade (histerese da curva de sucção). Esta constatação só não é verdadeira para o solo AS-EI+1% onde se considerou uma saturação teórica de 100% para estas amostras com umidade elevada. Desta forma, fica evidente que os ciclos de umedecimento e secagem se tornam importantes para avaliação da sucção e resistência do solo, muito mais do que simplesmente a consideração da umidade arbitrada.

Para corroborar com os resultados já comentados é apresentado entre a Figura 4-50 e a Figura 4-53 algumas comparações entre os valores obtidos de sucção no ensaio de DP e na curva característica, além das respectivas deformações permanentes finais. Em relação a estas figuras, se tomou como partida duas análises distintas: a Figura 4-50 e a Figura 4-52, que apresentam os resultados para a energia intermediária para os solos AS e SRA, respectivamente, são baseadas nos resultados obtidos para o par de tensões de 40x120 kPa, o qual se aproxima mais as tensões verificadas para uma camada de sub-base. Já a Figura 4-51 e a Figura 4-53, que apresentam os resultados para a energia normal para os solos AS e SRA, respectivamente, são baseadas nos resultados obtidos para o par de tensões de 40x40 kPa, o qual se aproxima mais às tensões verificadas para uma camada de reforço de subleito.

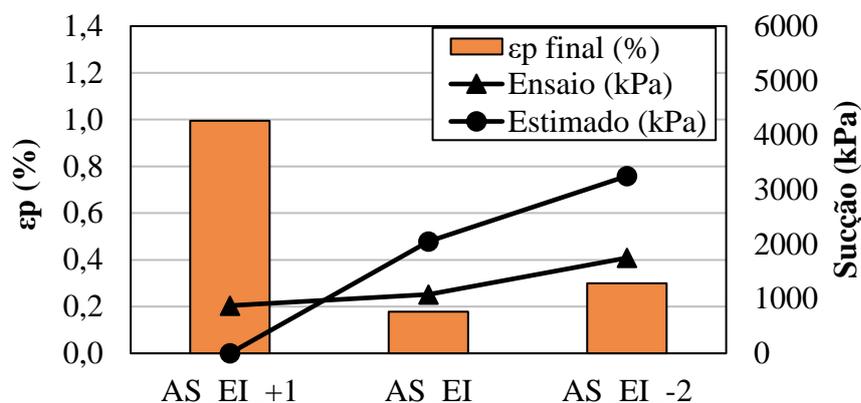


Figura 4-50 – Sucções obtidas após o ensaio de DP (par de tensões 40x120 kPa) e pela CC para o solo AS-EI

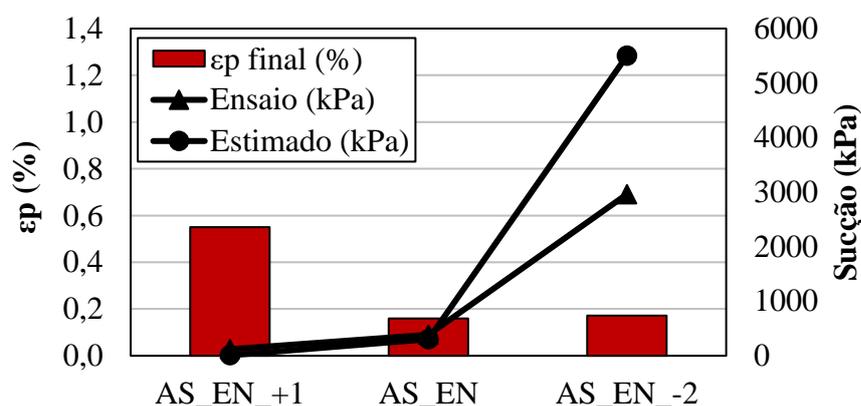


Figura 4-51 – Sucções obtidas após o ensaio de DP (par de tensões 40x40 kPa) e pela CC para o solo AS-EM

Ao analisar os valores de sucção obtidos diretamente após a retirada da amostra do ensaio de DP e da curva característica, juntamente com os resultados de deformação permanente final (%), confirma-se a constatação feita anteriormente: com o aumento da sucção se tem uma maior resistência a deformações plásticas no solo. Para os dois pares de tensões em questão, também se visualizou que as sucções estimadas foram maiores que as obtidas após o ensaio, ainda mais considerando o solo AS. Esta constatação também foi apresentada nas análises realizadas acerca dos resultados de MR e muito provavelmente se dê em razão da grande diferença do modo de obtenção desta sucção.

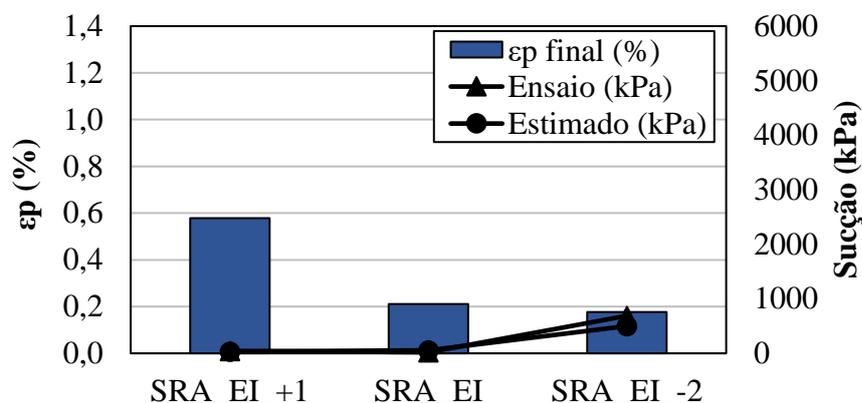


Figura 4-52 – Sucções obtidas após o ensaio de DP (par de tensões 40x120 kPa) e pela CC para o solo SRA-EI

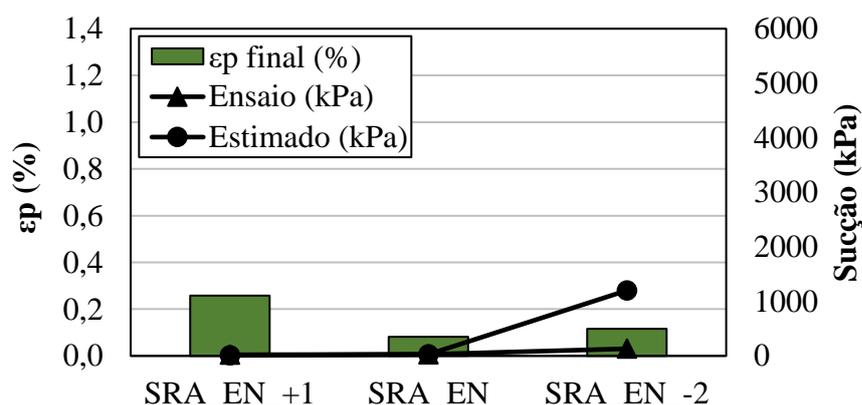


Figura 4-53 – Sucções obtidas após o ensaio de DP (par de tensões 40x40 kPa) e pela CC para o solo SRA-EN

Para avaliar a relação entre estas duas variáveis, sucção estimada pela CC e sucção obtida após o ensaio de DP, considerou-se os valores de sucção obtidos para as duas variações de umidade realizadas e na umidade ótima, os quais são apresentados na Figura 4-54.

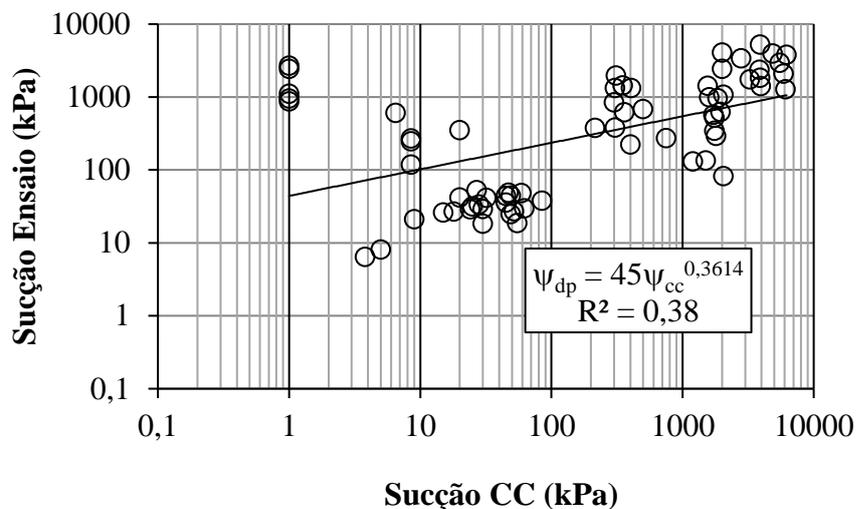


Figura 4-54 - Correlação entre a sucção obtida após o ensaio de DP e a sucção estimada pela CC

Da mesma maneira que se visualizou um mal ajuste dos dados para o ensaio de MR, se visualizou também este cenário para o ensaio de DP. Este inadequado ajuste dos dados é corroborado pelas diferenças encontradas nos valores de sucção estimados e do ensaio. O ajuste se torna mais coerente ao se excluir os dados relativos à saturação teórica de 100%, onde se arbitrou sucções iguais a 1 kPa (solo AS-EI+1%). Desta forma o ajuste dos dados apresentaria um  $R^2$  de 0,55.

Conforme já abordado no item relacionado aos resultados de MR, mesmo que os valores de sucção para um mesmo grau de saturação estejam dentro da histerese do material, verifica-se que o mais adequado seria a utilização de valores de sucção obtidos diretamente após o ensaio, ou se possível, durante o ensaio, e não os estimados pela curva característica. A leitura da sucção diretamente após o ensaio, apresenta um valor mais fiel de sucção relativa às condições impostas ao material em estudo. Desta forma, de posse dos valores de sucção para cada variável analisada, optou-se por utilizar nas análises apresentadas nos próximos itens os valores de sucção obtidos diretamente após o ensaio de DP (assim como o realizado nas análises de MR).

Além das análises da influência da sucção acerca da variação de umidade na compactação, também se obteve os valores de sucção para as amostras ensaiadas com variação de umidade pós-compactação. Na Tabela 4-17 é apresentado os valores de sucção obtidos para as amostras que sofreram e não sofreram ciclos de umedecimento e secagem na pós-compactação, a título

de comparação entre elas. Novamente se reitera que os pares de tensões ensaiados são os obtidos através da análise realizada no software AEMC referente às tensões verificadas para uma camada de sub-base relativa as pistas experimentais em construção no LAPAV, conforme item 3.2.4.1.

Tabela 4-17 - Sucções obtidas para os CPs que sofreram ciclos de secagem e umedecimento

<b>Material</b>	<b>Ciclos</b>	<b><math>\sigma_3</math> (kPa)</b>	<b><math>\sigma_d</math> (kPa)</b>	<b><math>\epsilon_p</math> (%) final</b>	<b>Sucção ensaio</b>	<b>Sucção CC</b>
AS - EI	Não	20	170	1,48	3138	2600
	Sim	20	170	1,01	603	4700
	Não	20	190	1,98	1659	2750
	Sim	20	190	8,67 <sup>1</sup>	376,21	5050
SRA - EI	Não	20	170	0,13	227	120
	Sim	20	170	2,26 <sup>2</sup>	27	220
	Não	20	190	0,49	114	115
	Sim	20	190	1,24 <sup>3</sup>	35	200

Notas: <sup>1</sup>Rompeu aos 16000 ciclos. <sup>2</sup>Rompeu aos 90 ciclos. <sup>3</sup>Rompeu aos 200 ciclos.

Avaliando os dados apresentados Tabela 4-17, primeiramente verificamos novamente a disparidade dos resultados de sucção obtidos logo após o ensaio de DP ao se comparar com a sucção obtida pela curva característica. Quase em sua totalidade, os valores advindos da CC apresentaram ser superiores aos coletados para as amostras do ensaio, da mesma forma que visualizado anteriormente para as amostras que tiveram sua variação de umidade na compactação (mais evidente para a variação de -2%).

Outro fator importante a se analisar é a variação da sucção ao se comparar as amostras que sofreram ciclos de umedecimento e secagem com as amostras que não passaram por estes ciclos. As amostras que passaram pelos ciclos apresentaram ao final do ensaio uma sucção bem inferior, independentemente do tipo de solo, estando isso relacionado a presença desta água nos microporos e macroporos do solo. Esta sucção inferior obtida corrobora com o elevado acúmulo de deformação permanente verificado anteriormente no item 4.4.3.2. Este fato pode ter relação com os resultados obtidos por Núñez (1997) e já explanados no item 4.2.4, onde o autor obtinha em campo sucções muito baixas (em torno de 14 kPa) sendo que o esperado era valores próximos a 1500 kPa. Como em campo o material acaba passando com ciclos de umedecimento e secagem, esta sucção obtida geralmente acaba se apresentando ligeiramente mais baixa que a sucção estimada em laboratório.

#### 4.4.3.4 Relação entre DP e a sucção

Anteriormente se deu o enfoque nas análises acerca da influência da variação de umidade na deformação permanente do material e a relação entre os dois diferentes métodos para obtenção da sucção. De maneira geral se verificou que a umidade e sucção apresentam influência na rigidez dos solos em questão, pois o comportamento mecânico observado pode ser relacionado com a redução da sucção do solo devido ao aumento do teor de umidade. Desta forma os efeitos são estes que foram apresentados nas análises anteriores: com o aumento da umidade, o arranjo de partículas é modificado ao mesmo tempo que a fase ar se torna oclusa, resultando em um decréscimo de sucção e conseqüentemente um aumento das deformações plásticas.

Na Figura 4-55 e na Figura 4-56 é apresentada uma relação entre a sucção obtida após o ensaio e a deformação permanente final para o solo AS e SRA respectivamente. Os dados utilizados estão apresentados na Tabela 4-16 vista anteriormente, sendo considerados apenas os resultados referentes aos pares de interesse (40x40 kPa para energia normal e 40x120 kPa para a energia intermediária).

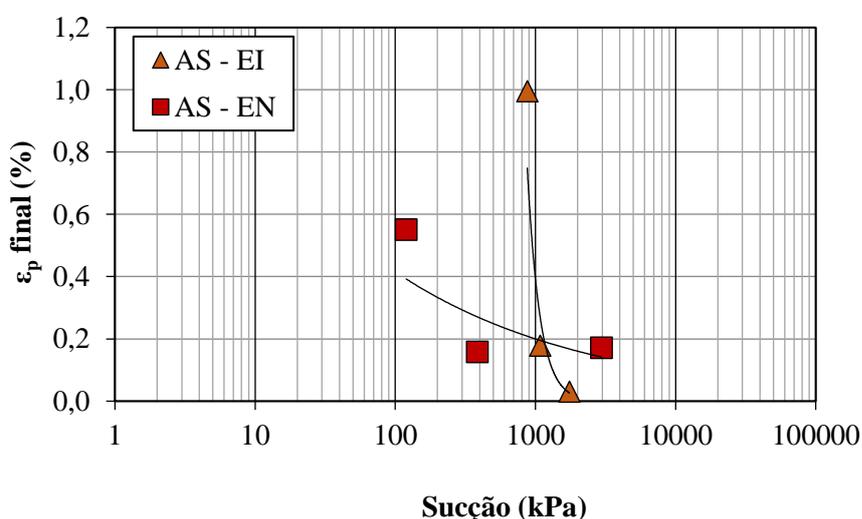


Figura 4-55 - Relação entre a sucção e a DP final para o solo AS (par 40x120 kPa)

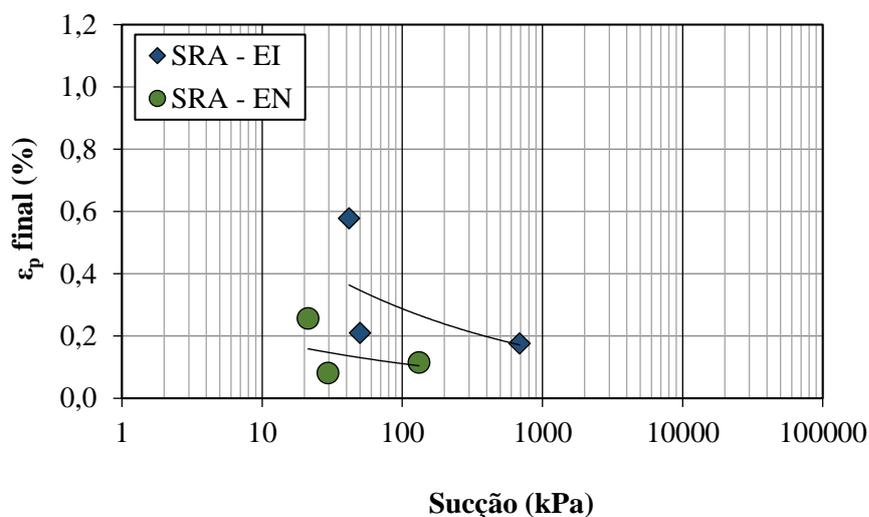


Figura 4-56 - Relação entre a sucção e a DP final para o solo SRA (par 40x120 kPa)

Analisando as duas figuras citadas verifica-se que com o aumento da sucção há uma maior resistência à ocorrência de deformações plásticas, fato já exposto anteriormente e que é concordante com os estudos de Jing *et al.* (2016) e Santos (2020). Esta variação foi mais evidente para o solo AS. Esta maior variação também foi percebida quando avaliada a relação entre a sucção e o MR, o que provavelmente está associado à sua textura mais fina (natureza do material) e indica que grande parte da rigidez medida pode ser atribuída a sucção, que, quando o solo se encontra saturado deixa de atuar. É importante frisar novamente que o solo AS na energia intermediária, considerando +1% em relação a umidade ótima apresentou graus de saturação em torno de 100% e que isso corroborou para as elevadas deformações.

Em relação ao solo SRA, este também apresentou diminuição da DP final com o aumento da sucção, porém não tão evidente. O que se percebe nestes resultados é que para as amostras na umidade ótima e mais secas (-2%), a deformação permanente final praticamente não se alterou, o que também corroborou para que o ajuste em razão de uma função potencial não fosse tão efetivo. Anteriormente nas análises de MR, também já havia sido exposta esta situação, onde não se teve um aumento linear do MR com o aumento da sucção.

#### 4.4.3.5 Previsão de DP considerando variações de umidade e sucção

Anteriormente no item 4.4.1 utilizou-se o modelo de previsão de deformação permanente elaborado por Guimarães (2009) para verificar se os dados coletados através dos ensaios apresentavam um bom ajuste frente ao modelo. Além disso, no item 4.4.3.4 abordou-

se a relação entre a deformação permanente e a sucção, evidenciando a importância da incorporação deste parâmetro na análise da resposta plástica de materiais de pavimentação. Desta forma, realizou-se também o ajuste dos dados obtidos nos ensaios com modelos que incorporam a sucção, mesmo que atualmente haja poucas pesquisas que relacionam a deformação permanente com este parâmetro.

Inicialmente, durante a organização dos dados para modelagem, verificou-se que alguns resultados estavam impedindo que o ajuste dos modelos fosse eficiente, sendo estes associados a corpos de prova que entraram em colapso durante a realização do ensaio triaxial. Segundo Santos (2020), esta dispersão dos dados referente as amostras que deformaram excessivamente pode estar associada a falta de precisão das leituras de deformação permanente devido a rápida ruptura do CP. Ainda segundo a autora, essa dispersão dos dados pode alterar completamente a análise, prejudicando a qualidade estatística do modelo.

Relacionado a isso, alguns autores relatam a necessidade do tratamento de dados para uma boa modelagem. Guimarães (2009) afirma que precisou eliminar alguns pontos que estavam fora do intervalo representado pela média  $\pm 2.\mu$  (desvio padrão). Lima (2020) também cita que foi necessário realizar o tratamento dos dados experimentais e Santos (2020) optou por descartar os três primeiros ciclos iniciais de cada ensaio e os dados relativos aos CPs que deformaram excessivamente. Desta forma, optou-se também por descartar estas leituras obtidas dos CPs que deformaram excessivamente, vindo a colapso, com o intuito de melhorar o ajuste a outros modelos da literatura e também melhorar a regressão do modelo proposto na presente pesquisa.

Na Tabela 4-18 é apresentado os coeficientes de determinação ( $R^2$ ) obtidos para modelos testados dentre alguns já citados na revisão bibliográfica, considerando as variáveis analisadas.

Tabela 4-18 - Coeficientes de determinação ( $R^2$ ) de modelos que consideram os efeitos de sucção e variação de umidade na DP

Modelos de previsão	AS		SRA	
	EI	EN	EI	EN
	$R^2$	$R^2$	$R^2$	$R^2$
Ribeiro (2013)	0,39	0,12	0,51	0,59
Lima (2020)	0,78	0,55	0,74	0,71
Santos (2020)	0,95	0,94	0,90	0,96

Conforme visto na Tabela 4-18 o ajuste obtido para os dois solos e nas duas energias em questão foram bem parecidos ao se considerar o mesmo modelo, diferindo apenas para o solo AS na energia normal, que apresentou coeficientes mais baixos. Em relação aos modelos, o modelo de Ribeiro (2013) não apresentou um bom ajuste com os dados obtidos nos ensaios, mesmo sendo um modelo baseado no modelo de Guimarães (2009), contando apenas com a incorporação adicional da umidade. Santos (2020) em suas análises frente a utilização de modelos que contemplem a variável de sucção também evidenciou este fato, citando ainda que os parâmetros das regressões deste modelo eram questionáveis. O modelo de Lima (2020), também elaborado com base no modelo de Guimarães (2009), apresentou um ajuste melhor, porém também não considera a sucção em si, apenas a variação de umidade.

Por fim, o modelo que apresentou o melhor ajuste foi o de Santos (2020), que também foi elaborado com base no modelo de Guimarães (2009), e apresenta os parâmetros de sucção e variação de umidade em sua composição. Este modelo apresentou coeficientes excelentes, acima de 0,90, demonstrando excelência quanto a sua utilização com os dados obtidos nos ensaios de DP.

É importante frisar que estas variações nos ajustes dos modelos também podem sofrer influência das variações de umidade incorporadas a sua formulação. O modelo apresentado por Ribeiro (2013) considera a variação de umidade tanto acima como abaixo da umidade ótima. Já os modelos de Lima (2020) e Santos (2020) foram criados a partir de dados que consideram apenas a variação de umidade acima da ótima.

Avaliando os modelos que apresentaram melhor desempenho e os parâmetros utilizados, idealizou-se um modelo que alia a concepção inicial do modelo de Guimarães (2009), com a incorporação das variáveis de interesse: sucção e umidade. O modelo é apresentado na Equação 15:

$$\varepsilon_p = \psi_1 + \sigma_3^{\psi_2} \times \sigma_d^{\psi_3} \times N^{\psi_4} \times \left( e^{\psi_5 - \psi_6 \times (w - w_{opt})} \right) \times \left( \frac{\psi}{w} \right)^{\psi_7} \quad (15)$$

Onde:

$\varepsilon_p$  (%) = deformação permanente específica (%);

$\sigma_3$  = tensão confinante, em kPa;

$\sigma_d$  = tensão desvio, em kPa;

$N$  = número de ciclos de carga;

$w - w_{ot}$  = diferença entre um teor e umidade qualquer e a umidade ótima;

$\psi$  = sucção matricial do solo, em kPa;

$w$  (%) = teor de umidade de compactação (umidade ótima, acima ou abaixo da ótima);

$\psi_1, \psi_2, \psi_3, \psi_4, \psi_5, \psi_6$  e  $\psi_7$  = parâmetros de regressão do modelo.

O modelo de regressão apresentado foi elaborado com base nos modelos apresentados anteriormente, mas dando ênfase ao modelo proposto por Guimarães (2009), de modo a complementá-lo frente a inserção de parâmetros como a sucção, teor de umidade e variação do teor de umidade. Desta forma, partiu-se inicialmente do modelo de Guimarães (2009), permanecendo com os parâmetros de tensão desvio, tensão confinante e número de ciclos de carga. Primeiramente buscou-se apenas incorporar a sucção na nova equação, de modo a simplificar o conjunto, porém não se verificou uma boa correlação com o solo AS. A partir deste ponto, além de adicionar a sucção, tentou-se inserir a variável proposta anteriormente no modelo obtido de MR em relação a variação de umidade, por meio de uma relação exponencial. Ademais, optou-se também por inserir o próprio teor de umidade de compactação, o qual também foi proposto no modelo de Lima (2020). Por fim, o modelo obtido apresentou elevada acurácia, onde se conseguiu associar aos parâmetros já consagrados, parâmetros novos que se somam na análise da influência desta variação de umidade em campo.

Para verificar a relevância do modelo, a Tabela 4-19 apresenta os resultados obtidos ( $R^2$  e coeficientes  $\psi$ ) para os dois modelos nacionais, além do proposto na presente pesquisa, considerando os dados experimentais na umidade ótima (SCHREINERT, 2021) e nas condições de umedecimento (+1%) e secagem (-2%).

De posse dos dados da Tabela 4-19 temos que o modelo proposto apresentou o melhor ajuste, com valores de  $R^2$  acima de 0,90, mostrando-se potencialmente preditivo. Vale destacar que os modelos de Lima (2020) e Santos (2020) apresentam peculiaridades já citadas anteriormente que diferem do proposto nesta pesquisa. Lima (2020) elaborou seu modelo a partir de variações somente acima da umidade ótima e considerando apenas a umidade de compactação, apresentando o parâmetro da umidade como o diferencial frente ao modelo de Guimarães (2009). Já o modelo proposto por Santos (2020) é baseado a partir de variações também somente acima da umidade ótima, mas considera variações de umidade tanto na compactação como

umedecimento pós-compactação. O modelo desta autora considera a variação de umidade e a sucção como parâmetros adicionais ao modelo de Guimarães (2009).

Tabela 4-19 - Resultado da regressão de outros modelos nacionais e o proposto nesta pesquisa

Coef.	Modelo Proposto				Modelo Lima (2020)				Modelo Santos (2020)			
	Solo AS		Solo SRA		Solo AS		Solo SRA		Solo AS		Solo SRA	
	EI	EN	EI	EN	EI	EN	EI	EN	EI	EN	EI	EN
$\psi_0$	-	-	-	-	0,013	1,838	-0,439	-1,324	-	-	-	-
$\psi_1$	-0,02	3,506	1,141	1,980	1,003	1,724	2,748	0,382	0,050	2,277	-0,008	-1,69
$\psi_2$	1,691	15,66	1,183	4,107	0,108	0,106	0,102	0,105	1,490	0,811	1,139	2,836
$\psi_3$	0,112	0,114	0,104	0,110	-0,037	-0,108	-0,027	0,038	0,108	0,105	0,101	0,105
$\psi_4$	-11,5	-84,7	-10,08	-13,92	-0,013	0,032	0,006	-0,100	-3,43	2,036	-3,115	-4,13
$\psi_5$	-1,74	3,22	-2,384	-1,722	0,001	-0,002	-0,001	0,010	-1,61	0,705	-2,091	-1,67
$\psi_6$	-0,01	-5,85	0,580	-0,598	0,002	0,006	0,003	-0,004	0,049	-1,74	0,655	-0,20
$\psi_7$	0,083	0,281	0,039	0,141	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>R<sup>2</sup></b>	<b>0,96</b>	<b>0,95</b>	<b>0,90</b>	<b>0,96</b>	0,78	0,55	0,74	0,71	0,95	0,94	0,90	0,96

Para corroborar com a análise do modelo proposto, na Figura 4-57 é apresentada a comparação entre a DP observada experimentalmente e a DP modelada. Nesta análise verifica-se que os valores observados e os previstos pelo modelo se mostraram muito próximos entre si, demonstrando que o modelo proposto é válido e altamente preditivo, sendo indicado para a previsão do comportamento plástico de solos submetidos a variações de umidade durante a sua compactação.

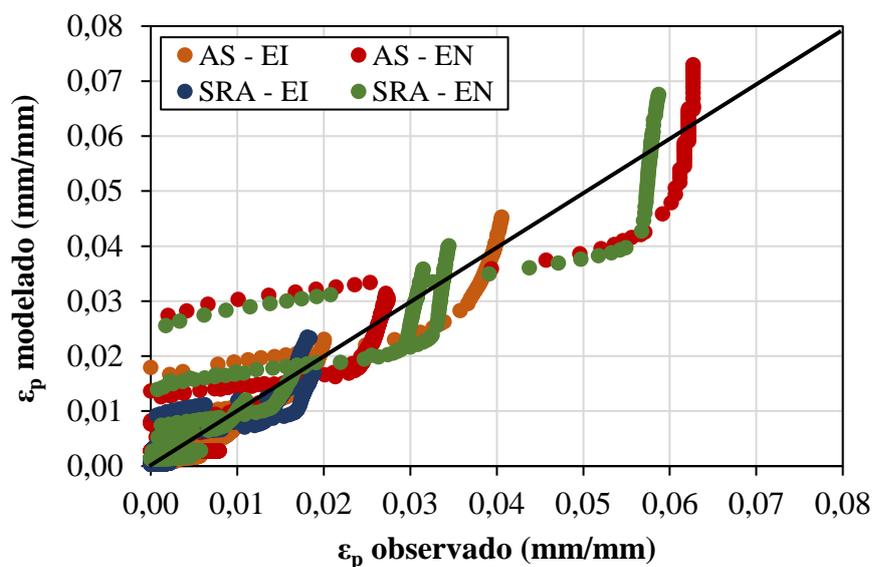


Figura 4-57 - Comparação da DP observada *versus* a modelada para o modelo proposto

A julgar pelo escasso número de modelos que levam em consideração a umidade e/ou a sucção, não se encontrou outras pesquisas que considerassem tanto a variação para mais ou para menos em função da umidade ótima. Como visto nos resultados apresentados nesta pesquisa tanto de MR como de DP, a consideração do solo mais seco nem sempre apresenta ganhos na rigidez do solo, sendo uma variável a ser analisada com mais afinco. Desta forma, considera-se que o modelo proposto, incorporando a sucção, juntamente com o teor de umidade e a variação do teor de umidade, bastante promissor. Ressalta-se também a importância e a necessidade de mais estudos acerca da relação entre estes parâmetros, visando a validação deste modelo para outros materiais, assim como a validação de modelos já existentes.

#### 4.5 ANÁLISE DO COMPORTAMENTO PLÁSTICO

Para avaliar a deformabilidade plástica dos solos em estudo, os mesmos foram enquadrados segundo a Teoria do *Shakedown*, através de representações gráficas que expressam a relação entre a deformação permanente acumulada ( $\epsilon_p$ ) e a taxa de acréscimo da deformação permanente ( $\epsilon'_p$ ), conforme proposto por Dawson e Wellner (1999). Atualmente este conceito está inserido em normativas que avaliam a deformação permanente em materiais de pavimentação, como a DNIT-ME 179 (DNIT, 2018b) utilizada para realizar os ensaios desta pesquisa. Porém ainda não há uma unanimidade na literatura com relação ao método empregado

na definição dos limites do *Shakedown* e conseqüentemente no enquadramento correto da resposta plástica dos materiais nas regiões de comportamento (A, B, AB e C).

A análise da estabilização das deformações permanentes foi realizada conforme a metodologia proposta por Lima (2020), a qual envolve uma análise conjunta do gráfico contendo as curvas de acúmulo da DP ( $\epsilon_p \times N$ ) e do gráfico relativo à taxa de acréscimo da DP, considerando uma escala fixa para o eixo das abscissas. Além disso, em alguns casos foi necessária a projeção da DP para um número maior de ciclos de carregamento, sendo esta extrapolação efetuada a partir do ajuste do modelo de Guimarães (2009). A escolha desta metodologia levou em consideração que a mesma foi proposta a partir da análise de solos tropicais brasileiros, considerando suas peculiaridades. Outras metodologias como a proposta pela norma europeia CEN (2004) são mais conservadoras e também não possuem uma classificação para materiais que deformam excessivamente no início do ensaio (comportamento AB).

#### 4.5.1 Efeito da variação de umidade de compactação na resposta plástica

Os gráficos utilizados para a análise de *shakedown* considerando as amostras que tiveram variação de umidade na compactação estão apresentados no Apêndice G, onde se adotou uma escala fixa para o eixo horizontal com o valor máximo de  $50 \times 10^{-3}$ , segundo recomendação da metodologia proposta por Lima (2020). Na Tabela 4-20 é apresentado um resumo dos resultados obtidos e o respectivo enquadramento, para os dois solos, para duas energias de compactação e para duas variações de umidade.

Primeiramente, constata-se através da Tabela 4-20 que, para os dois solos, quanto maior a energia de compactação e menor a umidade avaliada, mais propício é para o solo atingir o estado de *shakedown*. Esse comportamento também foi visualizado em algumas amostras para uma energia menor e considerando o solo mais úmido, considerando baixos níveis de tensões.

Tabela 4-20 – Enquadramento dos solos estudados segundo a Teoria do *Shakedown*

Mat.	Variação de umidade	CP	$\sigma_3$ (kPa)	$\sigma_d$ (kPa)	$\sigma_d/\sigma_3$ (kPa)	$\epsilon_p$ (%) final	Class.	Tráfego $N \leq 5 \times 10^5$	Tráfego $N > 5 \times 10^5$
AS - EI	1	1	40	40	1	0,568	A	Sim	Sim
		3	40	120	3	0,995	A	Sim	Sim
		4	80	80	1	0,394	A	Sim	Sim
		6	80	240	3	1,808	AB	Sim	Sim*
		8	120	240	2	2,005	AB	Sim	Sim*
		9	120	360	3	4,058	B	Não	Não
AS - EI	-2	1	40	40	1	0,016	A	Sim	Sim
		3	40	120	3	0,3	A	Sim	Sim
		4	80	80	1	0,029	A	Sim	Sim
		6	80	240	3	0,161	A	Sim	Sim
		8	120	240	2	0,109	A	Sim	Sim
		9	120	360	3	0,288	A	Sim	Sim
AS - EN	1	1	40	40	1	0,551	A	Sim	Sim
		3	40	120	3	0,779	A	Sim	Sim
		4	80	80	1	0,772	A	Sim	Sim
		6	80	240	3	2,742	B	Sim*	Não
		8	120	240	2	6,269	C	Não	Não
		9	120	360	3	-	C	Não	Não
AS - EN	-2	1	40	40	1	0,172	A	Sim	Sim
		3	40	120	3	0,26	A	Sim	Sim
		4	80	80	1	0,325	A	Sim	Sim
		6	80	240	3	1,674	B	Sim	Sim*
		8	120	240	2	2,718	B	Sim*	Não
		9	120	360	3	-	C	Não	Não
SRA - EI	1	1	40	40	1	0,123	A	Sim	Sim
		3	40	120	3	0,579	B	Sim	Sim
		4	80	80	1	0,237	A	Sim	Sim
		6	80	240	3	1,883	B	Sim	Sim*
		8	120	240	2	1,545	B	Sim	Sim*
		9	120	360	3	1,81	B	Sim	Sim*
SRA - EI	-2	1	40	40	1	0,054	A	Sim	Sim
		3	40	120	3	0,177	A	Sim	Sim
		4	80	80	1	0,061	A	Sim	Sim
		6	80	240	3	0,039	A	Sim	Sim
		8	120	240	2	0,13	A	Sim	Sim
		9	120	360	3	0,214	B	Sim	Sim

Efeito da variação de umidade e sucção no comportamento mecânico e em simulações de desempenho de dois solos utilizados em pavimentos rodoviários

SRA - EN	1	1	40	40	1	0,258	A	Sim	Sim
		3	40	120	3	3,446	AB	Sim*	Não
		4	80	80	1	0,575	A	Sim	Sim
		6	80	240	3	5,873	C	Não	Não
		8	120	240	2	3,149	B	Não	Não
		9	120	360	3	-	C	Não	Não
SRA - EN	-2	1	40	40	1	0,116	A	Sim	Sim
		3	40	120	3	0,222	A	Sim	Sim
		4	80	80	1	0,165	A	Sim	Sim
		6	80	240	3	0,308	B	Sim	Sim
		8	120	240	2	0,23	B	Sim	Sim
		9	120	360	3	0,453	B	Sim	Sim

Em síntese, a resposta plástica dos materiais (considerando suas respectivas variações) se enquadraram em sua maioria na região A, ou seja, abaixo do limite de *shakedown* plástico em 56% dos casos, indicando que para estas condições poderia ocorrer tendência de estabilização ou acomodamento no acúmulo de DP. Para 27% dos casos o enquadramento se deu na região B, ou seja, ultrapassando o limite de *shakedown*, porém ainda inferior ao limite de fluência plástica, sendo necessário uma análise mais rigorosa quando a possibilidade de uso em pavimentos. Considerando a região C, que seria o caso de um colapso incremental, com um nível de tensões superior ao limite de fluência plástica, 11% das amostras apresentaram esta condição, sendo mais presente em pares de tensões mais elevados, energias mais baixas e umidade elevada. Neste caso, a utilização do material caracterizado como região C não é indicado para pavimentação. Por fim, considerando a região AB, onde os materiais deformam bastante inicialmente e após um certo número de ciclos há um acomodamento apresentando o *shakedown*, apenas 6% evidenciaram esta tendência.

Ao comparar os dois solos em estudo, de modo geral, o solo AS apresentou melhor desempenho mecânico em comparação com o solo SRA, tendo como critério de análise unicamente o potencial de estabilização das deformações plásticas expresso pelos dois materiais frente aos diversos níveis de tensões e variações de umidade impostas. Anteriormente, no item 4.4.1, onde se avaliou apenas a magnitude das curvas de acúmulo de DP verificou-se o contrário, ou seja, o desempenho se mostrou superior para o solo SRA. Esta diferença de desempenho dos solos em relação ao parâmetro analisado também foi apresentada por Schreinert (2021) para os mesmos solos em estudo, porém considerando os CPs na umidade ótima.

O que se percebe é que o solo AS tende a deformar mais que o solo SRA para poucos ciclos de carga, porém após um certo nível de ciclos o material tende a se acomodar. Já o solo SRA apresenta para alguns níveis de tensões um comportamento do tipo B, onde não ocorre estabilização das deformações permanentes acumuladas, ou seja, elas continuam a aumentar, porém a uma velocidade lenta. Santos (2020) em sua pesquisa também avaliou um solo residual de arenito originário da mesma região de coleta do solo SRA e verificou este mesmo comportamento quanto a não ocorrência da estabilização das deformações, indicando sua utilização apenas para situações de tráfego leve, dependendo do nível de tensões atuante na camada de aplicação do material.

Para auxiliar na escolha dos materiais a serem utilizados em pavimentos, buscando uma compreensão ainda mais prática em relação ao seu desempenho, utilizou-se o critério proposto por Lima (2020), que se baseia unicamente nos resultados de deformação permanente acumulada ao final do ensaio e o comportamento manifestado quanto à Teoria do *Shakedown*. Na Tabela 4-20 também é apresentada essa qualificação para os solos/energias/variação de umidade propostos na presente tese, considerando os seis pares de tensões abrangidos. Em relação a proposta desenvolvida por Lima (2020), considerando um tráfego leve ( $N \leq 5 \times 10^5$ ), os solos se mostraram bastante adequados. A exceção se deu em cinco casos em que se atingiu um comportamento do tipo C, caracterizado pelo colapso incremental do material, o que inviabiliza a aplicação em camadas de pavimentos. Além disso mais dois casos apresentaram resultado peculiar: AS-EI+1% (120x360 kPa aplicado) e SRA-EI+1% (120x240 kPa aplicado), os quais tiveram deformações excessivas.

Avaliando para um tráfego mais pesado ( $N > 5 \times 10^5$ ), o desempenho dos solos também se enquadraram como satisfatório de maneira geral, contudo, além dos casos relatados anteriormente para o tráfego leve, constatou-se também casos que, segundo Lima (2020), exigem uma análise mais precisa quanto ao emprego ou não do material em pavimentos (representados por um “Sim\*” na Tabela 4-20). Desta forma, solos que acabaram sendo adequados para tráfego leve ao se considerar um “Sim\*” foram considerados inadequados ao se aumentar o tráfego previsto (ocorreram três casos).

#### 4.5.2 Efeito da variação de umidade de pós-compactação na resposta plástica

Assim como se realizou uma análise de *shakedown* para as amostras ensaiadas com variação de umidade na compactação, também se realizou esta análise para as amostras ensaiadas com variação de umidade pós-compactação. Na Figura 4-58 e na Figura 4-59 são apresentados os gráficos com os resultados obtidos, onde novamente se adotou uma escala fixa para o eixo horizontal com o valor máximo de  $50 \times 10^{-3}$ , segundo recomendação da metodologia proposta por Lima (2020). Na Tabela 4-21 é apresentado um resumo dos resultados obtidos e o respectivo enquadramento, para os dois solos, considerando os dois pares de tensões, para amostras que passaram ou não por ciclos de umedecimento e secagem.

Tabela 4-21 - Enquadramento dos solos segundo a Teoria do Shakedown considerando amostras que passaram ou não por ciclos de umedecimento e secagem

Material	Ciclos	$\sigma_3$ (kPa)	$\sigma_d$ (kPa)	$\epsilon_p$ (%) final*	Classificação
AS - EI	Não	20	170	1,48	AB
	Sim	20	170	1,01	B
	Não	20	190	1,98	B
	Sim	20	190	8,67 <sup>1</sup>	C
SRA - EI	Não	20	170	0,13	B
	Sim	20	170	2,26 <sup>2</sup>	C
	Não	20	190	0,49	B
	Sim	20	190	1,24 <sup>3</sup>	C

Nota: <sup>1</sup>Rompeu aos 16000 ciclos. <sup>2</sup>Rompeu aos 90 ciclos. <sup>3</sup>Rompeu aos 200 ciclos.

Conforme a Tabela 4-21, apenas o CP ensaiado com o par de tensão 20x170 kPa sem passar pelos ciclos de umedecimento e secagem (AS-EI) apresentou acomodamento plástico, porém sofrendo inicialmente significativas deformações (classificação AB). Os outros corpos de prova que não sofreram ciclos, mas foram ensaiados também com outros pares de tensões apresentaram contínua deformação permanente com o aumento do número de ciclos de carga (classificação B). Por fim, três amostras que passaram pelos ciclos de umedecimento e secagem apresentaram colapso incremental, dando ênfase às amostras do solo SRA, as quais romperam rapidamente, não passando dos 200 ciclos de carga.

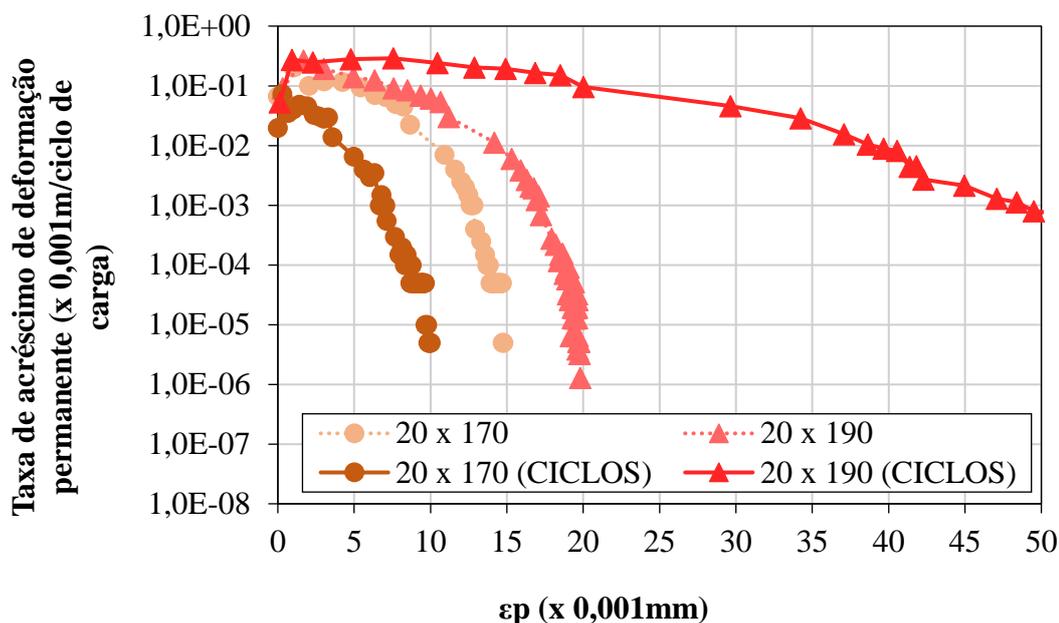


Figura 4-58 - Análise gráfica da taxa de crescimento da DP para CPs que passaram ou não por ciclos de umedecimento e secagem (Solo AS)

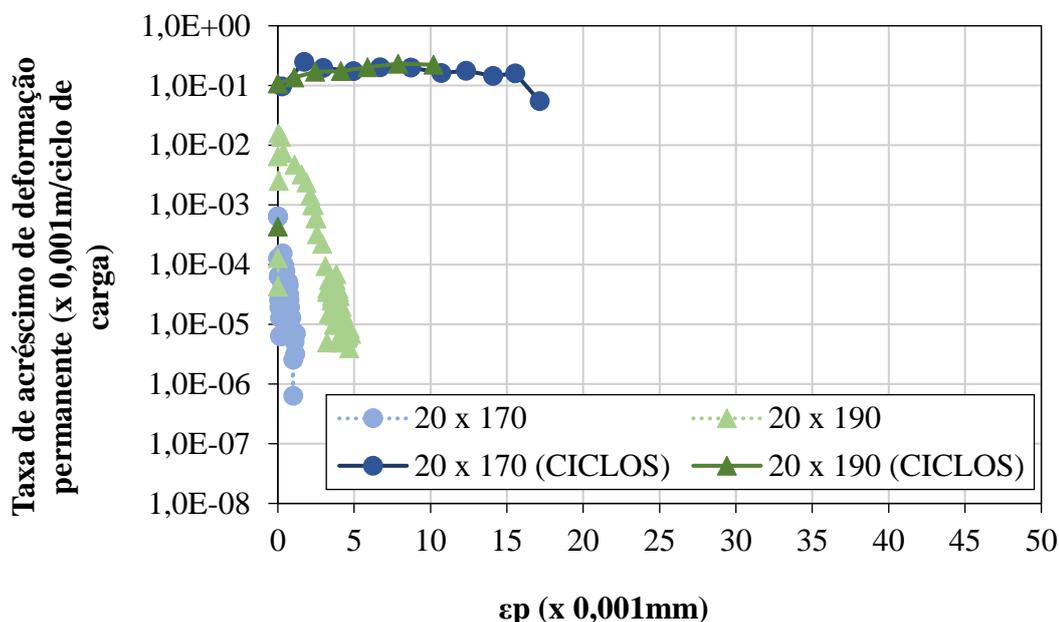


Figura 4-59 - Análise gráfica da taxa de crescimento da DP para CPs que passaram ou não por ciclos de umedecimento e secagem (Solo SRA)

Novamente, ao comparar os dois solos em estudo, o solo AS apresentou melhor desempenho mecânico em comparação com o solo SRA, tendo como critério de análise unicamente o potencial de estabilização das deformações plásticas expresso pelos dois materiais frente aos

níveis de tensões utilizados. Anteriormente, no item 4.4.3.2 também se obteve esta resposta, quando analisado apenas a magnitude das curvas de acúmulo de DP.

O que se percebe de modo geral, avaliando os dois solos, é que ao considerar ciclos de umedecimento e secagem há uma piora no comportamento, ou seja, para as situações analisadas, o solo tende a continuar acumulando deformação permanente com o aumento de ciclos (mesmo que a uma velocidade lenta) ou apresenta ruptura. O solo SRA já havia apresentado anteriormente, quando analisado apenas a variação de umidade na compactação, uma tendência de continuar deformando com o aumento dos ciclos de carga, o que já demonstrava não ser adequada a sua utilização para pavimentos de tráfego elevado.

Também há de se considerar que os ciclos de umedecimento e secagem foram realizados com as amostras não confinadas, ou seja, não considerando as tensões geostáticas que estariam presentes ao se considerar um ponto no centro da camada de sub-base do pavimento. Este fator, assim como outros detalhes de execução dos ciclos de umedecimento e secagem podem influenciar na resposta obtida, sendo sugerido uma maior atenção a esta questão em pesquisas futuras.

#### 4.6 SÍNTESE DOS RESULTADOS OBTIDOS EXPERIMENTALMENTE

Os resultados obtidos a partir dos ensaios laboratoriais possibilitaram compreender os efeitos da variação de umidade nos solos estudados. É possível afirmar de maneira geral que o comportamento dos dois solos foi influenciado pela variação de umidade, tanto a de compactação, como as decorrentes de ciclos de secagem e umedecimento.

Com relação as curvas características:

- As quatro curvas características obtidas relacionadas aos dois solos estudados e nas energias normal e intermediária ficaram melhor modeladas utilizando o ajuste bimodal de Gitirana Jr e Fredlund (2004), se comparado a outros modelos da literatura.
- Ao correlacionar a energia de compactação, verificou-se que para o solo SRA as curvas praticamente se sobrepõem, fato que ocorre em razão de sua natureza arenosa. Este fato não ocorreu para o solo AS, onde a curva referente a energia intermediária se deslocou

mais para cima, apresentando uma maior capacidade de retenção de água para uma dada sucção com o aumento da energia de compactação.

- A avaliação da história de umedecimento e secagem (histerese) mostrou que o ciclo “umedecimento-secagem” não apresentou histerese, demonstrando que o umedecimento a partir da umidade ótima e após sua secagem não provoca grandes alterações na estrutura do solo. Por outro lado, o ciclo “secagem-umedecimento” partindo da umidade ótima, apresentou uma histerese pronunciada supondo-se que essa elevada dessecação provocou uma alteração estrutural nos materiais não sofrida anteriormente.
- As histereses obtidas para os dois solos e para as duas energias de compactação mostraram elevada variação do grau de saturação, assim como para as sucções previstas. Isto demonstra que a elevada variação de sucção presente na referida histerese pode auxiliar e até mesmo explicar valores de sucções lidos em campo. Acredita-se que estas curvas obtidas irão ser de grande valia para analisar as sucções obtidas em campo nas pistas experimentais em construção no LAPAV.

Com relação aos resultados de ensaios de MR:

- O estado de tensões se mostrou um fator fundamental e de grande influência na rigidez dos solos estudados. Mesmo que solos argilosos apresentem uma relação mais significativa com a tensão desvio e solos arenosos apresentem uma relação mais significativa com a tensão confinante, a análise conjunta do par de tensões através do modelo composto se mostrou mais eficaz e apresentou as melhores regressões se comparado com outros modelos. Desta forma, para fins de dimensionamento concluiu-se que o modelo mais indicado para a previsão de MR é o modelo composto, até mesmo por também ser utilizado na nova metodologia de dimensionamento de pavimentos asfálticos (MeDiNa).
- Constatou-se que o aumento da energia de compactação, de Normal para Intermediária, gerou um notável crescimento nos valores de MR. Ademais, identificou-se certa constância nos valores obtidos em relação a variação do nível de tensões para o solo AS, enquanto para o solo SRA houve um crescimento a partir do aumento das tensões atuantes.

- O MR estimado com emprego dos modelos laboratoriais foi utilizado para facilitar algumas análises acerca do comportamento dos solos frente a variação de umidade e por se mostrar mais representativo ao estado de tensões. Para isso se consideraram as tensões obtidas com o auxílio do *software* AEMC, que eram representativas dos valores estimados na camada de sub-base e reforço de subleito dos pavimentos experimentais em construção no LAPAV. Em relação a essa variação de umidade na compactação, verificou-se que conforme o teor de umidade aumenta, o módulo de resiliência diminui consideravelmente. Não foram visualizadas alterações no valor de MR medidos na umidade ótima e na ótima -2%, o que demonstra que a secagem nem sempre apresenta benefícios em relação a rigidez, dependendo das características do material, energia e formato da curva de compactação e de tensões atuantes.
- Verificaram-se relações diretas entre os valores de MR e o comportamento laterítico ou não laterítico dos solos, mostrando coerência com o esperado a partir da classificação MCT e destacando-se o melhor comportamento elástico do solo AS.
- Foi observado que o módulo de resiliência tende a aumentar com o aumento da sucção matricial, se mostrando mais evidente para o solo AS, em razão de ser um solo mais fino. O solo SRA não demonstrou um aumento tão expressivo, com pequena variação do MR com o aumento da sucção matricial.
- Diversos modelos da literatura que consideram o teor de umidade ou a sucção como parâmetro de entrada foram avaliados. Para obter maior acurácia e tendo em vista desenvolver um modelo que considere juntamente o estado de tensões, foi desenvolvido um modelo que agrega a sucção e a variação do teor de umidade.

Com relação aos resultados de ensaios de DP:

- Foram realizados ensaios de deformação permanente para os dois solos considerando a variação da energia de compactação e a variação de umidade tanto na compactação, quanto pós-compactação, simulando ciclos de umedecimento e secagem. De modo geral, as deformações permanentes tendem a aumentar significativamente durante a aplicação dos primeiros milhares de ciclos de carga e depois as deformações continuam acumulando-se com uma taxa de crescimento mais baixa. Se verificou que o aumento absoluto da deformação permanente é maior quanto maior o teor de umidade do corpo

de prova ensaiado, maior o nível de tensão desvio aplicado ao material e maior for a razão de tensões, de acordo com os materiais avaliados.

- Evidenciou-se que o aumento da energia de compactação gerou notáveis reduções nos valores de DP acumulada para os dois solos em estudo, independente da variação de umidade considerada. Porém, destaca-se que este efeito não se estendeu de maneira representativa para todo espectro de tensões, visualizando-se reduções significativas apenas nos pares de tensões e umidades mais elevadas.
- De modo geral, as deformações permanentes aumentam quando o teor de umidade de compactação encontra-se acima do ótimo e quando o corpo de prova é submetido a maiores níveis de tensões, podendo sofrer ruptura. Considerando o ramo seco, as deformações permanentes não foram tão elevadas, ficando próximo aos resultados obtidos de DP para a umidade ótima de compactação.
- Em relação a variação de umidade pós-compactação, ou seja, realizando dois ciclos completos de secagem e umedecimento, verifica-se que este fator influencia mais a deformação permanente dos solos estudados do que a própria umidade na compactação. O solo AS apresentou maiores deformações em ensaios sem ciclos de umedecimento e secagem; porém o solo SRA demonstrou ser mais sensível às variações de umidade geradas pelos ciclos, com amostras rompendo no início do ensaio.
- De modo geral, com o aumento da sucção há uma maior resistência à ocorrência de deformações plásticas. A variação dos valores de sucção foi mais evidente para o solo AS, o que provavelmente está associado a sua granulometria, onde grande parte da rigidez pode ser atribuída à sucção que deixa de existir quando o solo se encontra saturado.
- As sucções obtidas em amostras que passaram pelos dois ciclos completos de umedecimento e secagem apresentaram resultados marcadamente diferentes às correspondentes a amostras que não passaram por estes ciclos. As amostras que passaram pelos ciclos apresentaram sucções relativamente baixas e que estão associadas as elevadas deformações permanentes registradas, ou até mesmo a tendência à ruptura.
- Os ajustes dos parâmetros dos modelos de previsão de deformação permanente que incorporam esta variação de umidade e/ou sucção foram avaliados e nem todos apresentaram boa acurácia nas previsões. Por isso se propôs um novo modelo tendo como base aquele apresentado por Guimarães (2009), incorporando-se parâmetros

como sucção, teor de umidade de compactação e variação de umidade. Este novo modelo apresentou bom ajuste e abrange a variação de umidade tanto referente ao ramo úmido, quanto ao ramo seco.

- Avaliando os dois solos em estudo quanto ao comportamento plástico, o solo AS tende a se deformar mais que o solo SRA para poucos ciclos de carga, porém após um certo nível de ciclos o material tende a se acomodar. Já o solo SRA apresenta para alguns níveis de tensões um comportamento do tipo B, onde não ocorre estabilização das deformações permanentes acumuladas, ou seja, elas continuam a aumentar, porém a uma velocidade lenta.
- A resposta plástica dos solos aos ciclos de umedecimento e secagem mostraram que há uma piora no comportamento, ou seja, o solo tende a continuar acumulando deformações permanentes ou apresenta ruptura. Desta forma, entende-se que este comportamento deve ser um critério para não se selecionar este material para uma camada de pavimento, a menos que seja feita uma análise criteriosa quanto as formas de se evitar a entrada de água.

## 4.7 SIMULAÇÕES DE DESEMPENHO DE PAVIMENTO

Visando avaliar o desempenho de um pavimento frente às variações de umidades consideradas em relação a camada de sub-base, utilizou-se dois *softwares* consagrados para este fim: MeDiNa e *AASHTOWare Pavement ME Design*. Estes dois softwares realizam verificações e dimensionamentos mecânicos-empíricos de pavimentos, sendo o MeDiNa o novo método nacional utilizado para este fim e o *AASHTOWare Pavement ME Design* uma das ferramentas mais completas e consagradas para análise de desempenho estrutural e funcional de pavimentos. Para todas as análises realizadas nestes *softwares*, optou-se por apresentar os resultados em função do afundamento em trilha de roda (ATR) da camada de sub-base (camada de interesse na análise) e afundamento total do pavimento, em relação ao período de projeto.

### 4.7.1 *Software* MeDiNa

As simulações com o *software* MeDiNa resultaram em diferentes níveis de ATR quando as propriedades dos dois solos em estudo com diferentes umidades foram usadas como dados de entrada para a camada de sub-base. Os afundamentos plásticos acumulados na camada de sub-base no final do período de projeto de 10 anos, considerando as variações de umidade

propostas além da consideração de ciclos de umedecimento e secagem estão apresentados na Figura 4-60 e na Figura 4-61 para o solo AS e SRA, respectivamente. Os resultados dos afundamentos considerando cada um dos meses do período de projeto encontram-se no APÊNDICE H.

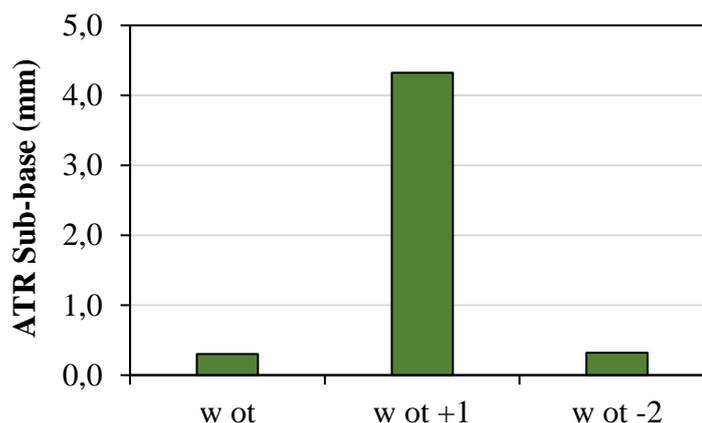


Figura 4-60 - ATR final obtido na camada de sub-base para o solo AS utilizando o software MeDiNa

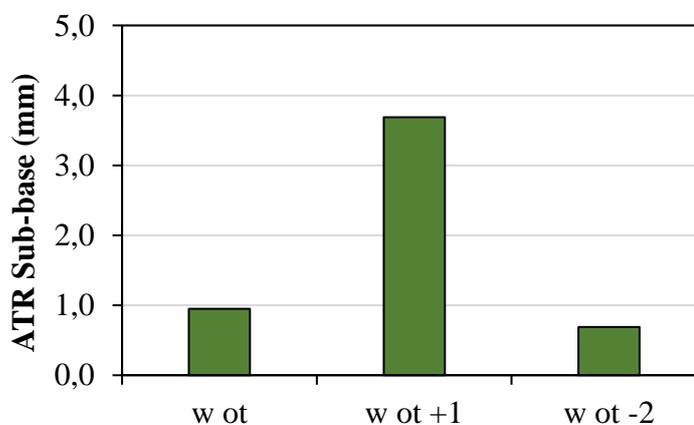


Figura 4-61 - ATR final obtido na camada de sub-base para o solo SRA utilizando o software MeDiNa

Observando os valores obtidos de ATR para as duas estruturas propostas, diferenciando apenas o solo da camada de sub-base, verifica-se que o maior afundamento foi obtido para a estrutura que possui o solo AS, com variação de umidade de +1% em relação a umidade ótima, chegando a um valor máximo de 4,3mm, após o período de 10 anos de projeto. Para as outras variações de umidade, a camada de sub-base do solo AS apresentou pequenos afundamentos, em média 0,3mm. Considerando a Figura 4-61, relativa a utilização do solo SRA na camada de sub-base, a variação de umidade de +1% também apresentou o maior afundamento, com um valor de

3,7mm. Um fato relevante é que para as outras variações de umidade, os ATRs do solo SRA foram ligeiramente maiores que os verificados para o solo AS, conforme se compara a Figura 4-60 com a Figura 4-61.

Além de avaliar o afundamento ocorrido somente na camada de sub-base, o *software* MeDiNa também apresenta como resposta o ATR total do pavimento considerando todo o período de projeto, desde o primeiro até o último mês considerado. Estes afundamentos relativos à estrutura completa do pavimento (considerando todas as camadas) podem ser visualizados na Figura 4-62 e na Figura 4-63 para o solo AS e SRA, respectivamente.

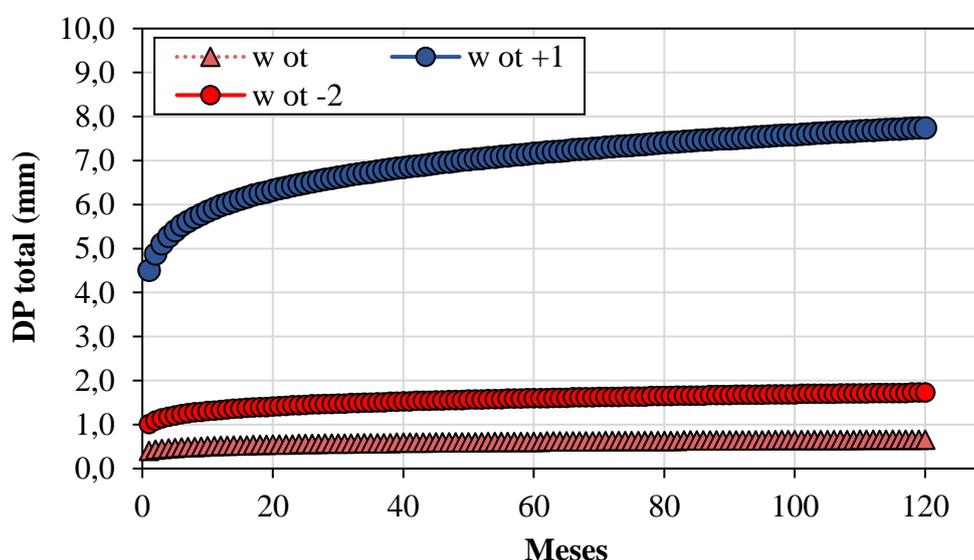


Figura 4-62 – Afundamentos plásticos obtidos para toda a estrutura do pavimento utilizando o solo AS na camada de sub-base (Software MeDiNa)

Em um primeiro momento temos que no início da vida útil do pavimento ocorre uma acentuada deformação plástica antes do acomodamento, fato também verificado nos ensaios de DP em laboratório. Conforme visualizado nas figuras anteriores, os maiores afundamentos totais resultaram da estrutura composta pelo solo AS, conforme já visto na análise unitária da camada de sub-base. Para os dois solos, os maiores ATRs resultaram da variação de umidade de +1%, a qual apresentou valores bastante discrepantes se comparados com as outras variações propostas e condizem os resultados obtidos em laboratório.

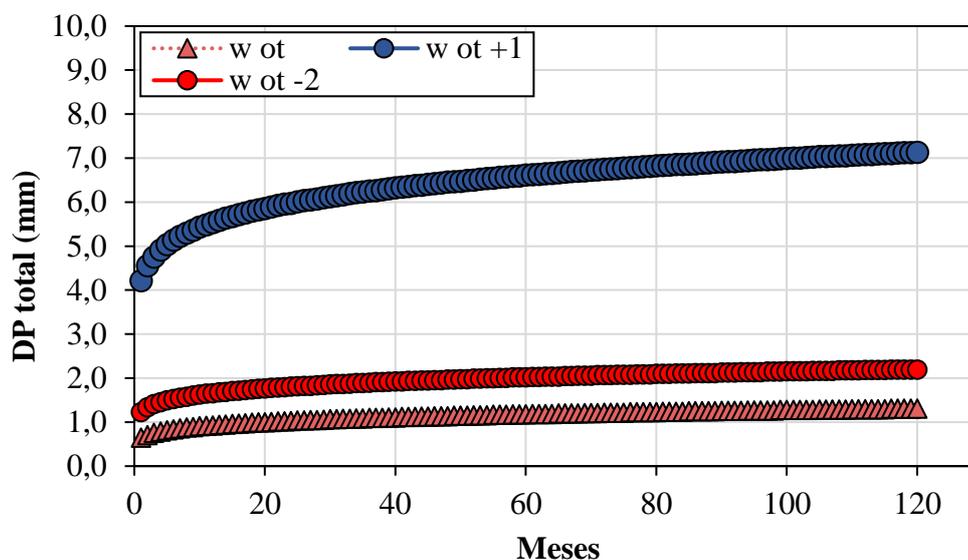


Figura 4-63 - Afundamentos plásticos obtidos para toda a estrutura do pavimento utilizando o solo SRA na camada de sub-base (Software MeDiNa)

É importante frisar que o software MeDiNa apresentou algumas restrições para realizar a modelagem:

- Ao se adicionar uma camada de TSD ao revestimento, o programa não permite que se adicione um tráfego maior que  $1 \times 10^6$ , e este fator se mostrou importante para as análises, visto que se terá a simulação de um tráfego mais elevado nas pistas experimentais em construção;
- Não foi possível a troca da camada de TSD por CA para tentar aumentar o tráfego, pois não é permitido camadas de CA inferiores a 5cm. Desta forma, se deu prioridade em manter a espessura de 2,5cm nas análises para ficarem mais condizentes com as pistas experimentais em construção.

Independente destas restrições, enfatiza-se a importância desta nova metodologia que atualmente vem sendo incorporada no dimensionamento de pavimentos asfálticos no Brasil. A inserção de análises referente ao módulo de resiliência e a deformação permanente das camadas torna o método muito mais eficaz e seguro em relação a metodologia utilizada anteriormente. Reitera-se que a calibração do software está em andamento e que melhorias serão incorporadas gradativamente, como por exemplo a possível inserção de dados referente a variações climáticas (dados de precipitação, temperatura ou até mesmo de sucção dos materiais).

Mesmo com algumas divergências na utilização do software MeDiNa, os resultados obtidos mostraram que o aumento do teor de umidade de compactação pode afetar significativamente o comportamento mecânico dos solos, fato também exposto por Lima (2020). A DP aumenta consideravelmente à medida que o teor de umidade da compactação aumenta no ramo úmido.

#### 4.7.2 *Software AASHTOWare Pavement ME Design*

Em relação ao *software AASHTOWare* as simulações também resultaram em diferentes níveis de ATR quando alterado os parâmetros relativos aos dois solos de estudo, cargas e VDMs utilizados. Os afundamentos plásticos acumulados na camada de interesse (sub-base) e em todo o pavimento estão apresentados graficamente no APÊNDICE I para cada uma das variáveis analisadas e considerando o período de projeto de 10 anos. Os afundamentos relativos a algumas outras camadas (reforço de subleito e subleito) também estão apresentadas no APÊNDICE I e se mostram importantes para explicar o ATR total obtido. Por fim, no APÊNDICE J está exposto em tabelas os valores obtidos de afundamentos considerando cada mês do período de projeto. Algumas considerações acerca destes resultados são apresentadas neste item.

Diferentemente do que se visualizou com o *software MeDiNa*, avaliando apenas a camada de sub-base, o *software AASHTOWare* apresentou maiores afundamentos considerando as variações de umidade simuladas com os ciclos de umedecimento e secagem. Esta constatação se deu para todas as análises realizadas quando avaliada apenas a camada de sub-base: para o solo AS e SRA, para as duas considerações de carga de 8,2tf e 11tf e também para os VDMs de 275 e 1000.

Já avaliando a deformação total do pavimento, temos que a pior situação ocorreu para a variação de umidade de +1% em relação a umidade ótima, também considerando todas as variáveis analisadas e corroborando com o obtido com o software MeDiNa. Esta diferença de influência para a camada de sub-base e o pavimento como um todo é justificado pelos ATRs obtidos na camada de reforço de subleito, também apresentado no APÊNDICE I. Neste gráfico citado é perceptível a diferença de afundamento quando comparado a variação de umidade de +1% com a simulação dos ciclos, tendo esta camada influenciado fortemente no resultado obtido para todo o pavimento. É importante citar que ao realizar a simulação de um pavimento que passa por ciclos de umedecimento e secagem (dois ciclos completos), apenas a camada de sub-base

recebeu dados equivalentes a isso, ou seja, apenas estes referidos solos foram ensaiados na energia intermediária e passaram por ciclos. Os dados relativos as outras camadas não consideraram ciclos, em razão da disponibilidade de tempo e material, sendo utilizados dados de umidade ótima. Isto corrobora com o resultado obtido na camada de reforço, onde a variação de umidade +1% foi mais danosa. Muito provavelmente se tivesse sido realizado ensaios de ciclos de umedecimento e secagem com o material da camada de reforço, este apresentaria os maiores afundamentos, se comparado com outras variações de umidade testadas e poderia resultar em maiores afundamentos totais no pavimento.

Além disso, verificou-se também que o solo SRA apresentou as maiores deformações, tanto na camada de sub-base como no pavimento como um todo, se comparado ao solo AS. Este fato pode estar correlacionado com a sucção do material. Avaliando a variação do grau de saturação relacionado com a variação de umidade considerada, temos entre 95% a 83% para o solo AS na energia intermediária. A variação de sucção estimada com a curva característica para estes graus de saturação seria entre 200 a 7000 kPa. Já para o solo SRA ter-se-ia uma variação do grau de saturação entre 94 e 70%, com sucções entre 10 e 500 kPa. A partir destas variações de sucção para cada um dos solos pode-se perceber que este parâmetro está fortemente relacionado com a rigidez do material e influencia diretamente nas deformações obtidas. Para corroborar com o exposto, no item 4.4.3.3 foi apresentado valores de sucções obtidas após o ensaio de DP, onde também se verificou valores muito maiores para o solo AS se comparado ao solo SRA, muito em parte devido ao solo ser mais fino, com poros de menor tamanho. Além disso, futuramente com as leituras de sucção que serão feitas em campo, nas pistas experimentais, poderá se visualizar mais claramente como de fato este parâmetro influencia o desempenho do pavimento durante sua vida de serviço.

Tentando correlacionar algumas variáveis, verificando primeiramente a influência do aumento do VMD de 275 para 1000, considerando um carregamento de 8,2tf, temos na Figura 4-64 esta comparação considerando apenas afundamentos na camada de sub-base e na Figura 4-65 esta comparação considerando o pavimento em sua totalidade. Para estas duas figuras temos as análises realizadas para a umidade ótima, as variações de +1% e -2% em relação a umidade ótima e considerando os dois ciclos completos de umedecimento e secagem.

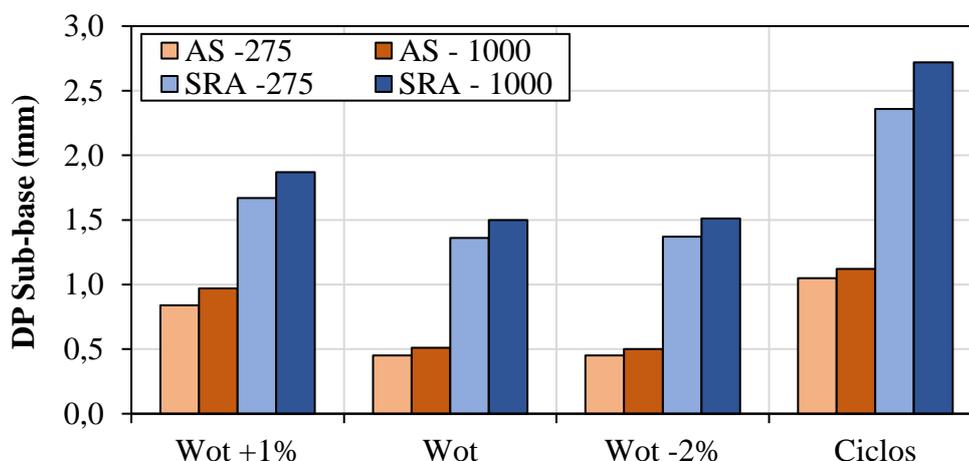


Figura 4-64 - Afundamentos plásticos da camada de sub-base considerando as variações de VDM e solo para uma carga de 8,2tf (*Software AASHTOWare*)

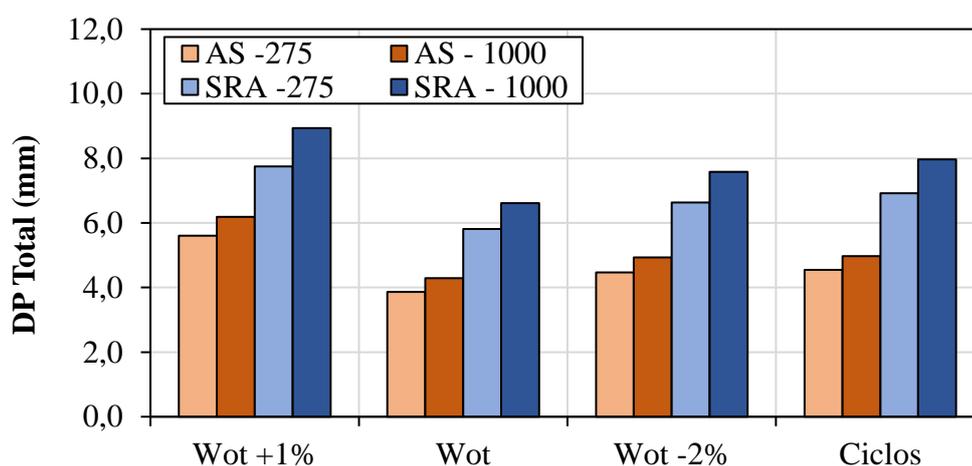


Figura 4-65 - Afundamentos plásticos totais do pavimento considerando as variações de VDM e solo para uma carga de 8,2tf (*Software AASHTOWare*)

Segundo a Figura 4-64, que considera apenas as deformações da camada de sub-base, se verifica que com o aumento do tráfego temos um leve aumento nos afundamentos plásticos, avaliando cada solo separadamente. Este aumento só não se mostrou tão discrepante se comparado com o aumento de ATR ao se comparar os dois solos em estudo. Esta maior deformação plástica vista para o solo SRA também foi apontada nos ensaios de DP com ciclos de umedecimento e secagem, porém não foi perceptível nos ensaios de DP considerando as variações de +1% e -2%. A Figura 4-64 também confirma a afirmação realizada anteriormente que as deformações foram mais severas com a consideração dos ciclos de umedecimento e secagem (dois ciclos completos).

Avaliando a deformação total obtida no pavimento, segundo a Figura 4-65, fica evidente que a variação de +1% apresentou as maiores deformações após o período de 10 anos de projeto. Considerando esta pior variação, temos a pior situação com 5,6mm e 7,8mm para o solo AS e para o solo SRA, respectivamente, considerando um VDM de 275. Já considerando um VDM de 1000, temos 6,2mm e 8,9mm para os solos AS e SRA, respectivamente. Este aumento de ATR para o solo AS é de aproximadamente 10% e para o solo SRA de aproximadamente 13%. Em relação a comparação dos solos, novamente fica evidente que o solo SRA apresentou ser mais suscetível a deformações plásticas que o solo AS.

Outra análise realizada foi com a intenção de verificar a influência do aumento de carga de 8,2tf para 11tf, considerando um VDM de 1000. Neste sentido, na Figura 4-66 é apresentada esta verificação para a camada de sub-base e na Figura 4-67 é apresentada esta verificação considerando o pavimento em sua totalidade.

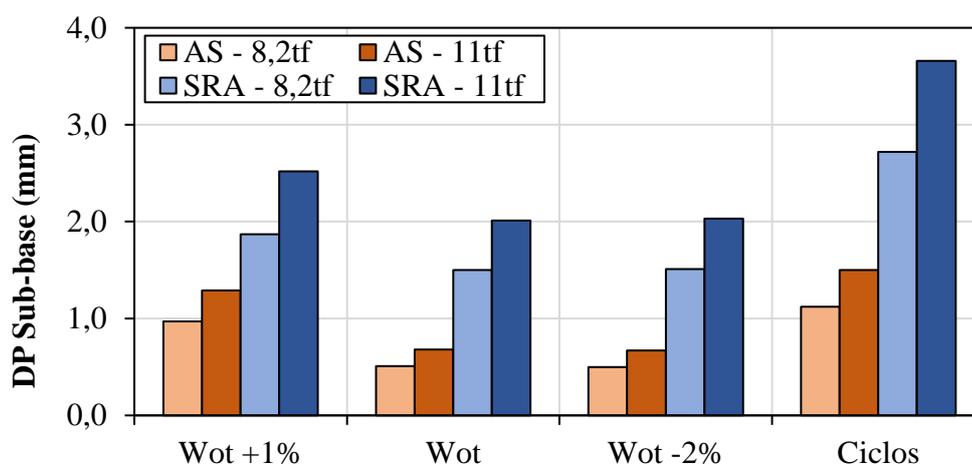


Figura 4-66 - Afundamentos plásticos da camada de sub-base considerando as variações de carga e solo para um VDM de 1000 (Software AASHTOWare)

Conforme apresentado na Figura 4-66 a alteração da carga de 8,2tf para 11tf influenciou no aumento de ATR para os dois solos, mais evidente para o solo SRA. Novamente a pior situação verificada entre as variações feitas foi em relação aos ciclos de secagem e umedecimento. Avaliando somente o resultado obtido com os ciclos de umedecimento e secagem, houve um aumento de 35% como o aumento de carga para o solo AS e 34% para o solo SRA.

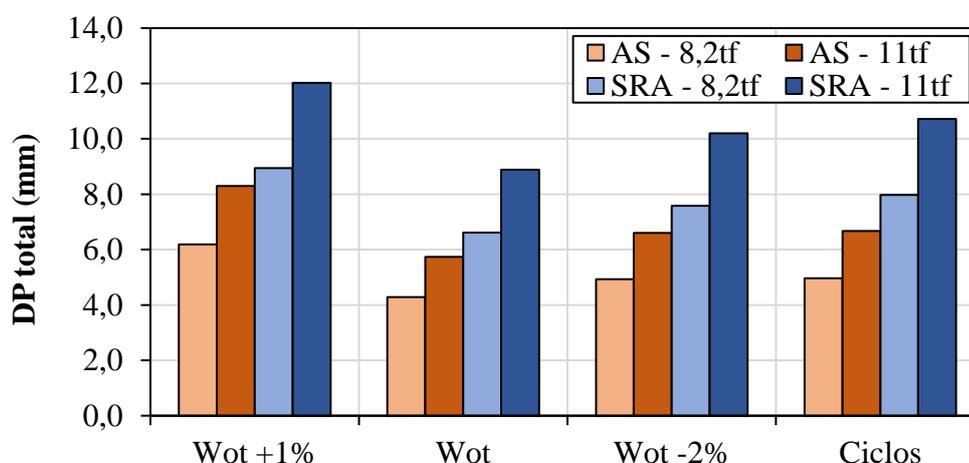


Figura 4-67 - Afundamentos plásticos totais do pavimento considerando as variações de carga e solo para um VDM de 1000 (Software AASHTOWare)

Em relação aos afundamentos totais do pavimento, conforme apresentado na Figura 4-67, novamente os maiores afundamentos foram visualizados para a variação de umidade de +1% em relação a umidade ótima, influenciado pelas grandes deformações verificadas na camada de reforço de subleito (APÊNDICE I e J). Avaliando somente o resultado obtido com esta pior variação, de +1%, se verificou um aumento muito parecido com o obtido para a camada de sub-base, sendo esta de 34% com o aumento de carga tanto para o solo AS quanto para o solo SRA.

De modo geral, o que se verifica é que o aumento de carga é muito mais danoso ao pavimento analisado do que o aumento do tráfego. Os afundamentos obtidos na pior situação (solo SRA, com carga de 11tf, VDM de 1000 e variação de umidade de +1%) chegaram próximos a 12mm após 10 anos de vida útil, influenciando diretamente o desempenho do pavimento.

Outro fato importante em relação ao *software AASHTOWare* é que o mesmo consegue prever com mais acurácia a influência das variações de umidade por considerar o clima local e permitir a inserção da curva característica. De fato, se verificou a influência danosa dos ciclos de umedecimento e secagem do material no desempenho do pavimento.

Além disso, é importante frisar que o *software AASHTOWare* apresentou uma restrição quanto a análise de resposta da evolução do MR com o tempo, o que era esperado que ocorresse e que auxiliasse no entendimento das deformações obtidas. Ao realizar a análise o software considera que o pavimento é formado pelas camadas de revestimento, base e subleito, e caso se queira adicionar mais camadas, elas são aceitas como “sub-camadas” junto a uma das camadas

principais, o que no caso da presente análise seria a adição da sub-base e do reforço do subleito a esta camada principal de base. Desta forma, quando analisamos o relatório de saída, precisamos avaliar com cuidado quais respostas são para cada uma destas “sub-camadas”. De certa forma o software apresenta esta variação do MR, porém apenas a primeira “sub-camada” desta camada principal apresenta esta mudança com a variação climática, que seria a camada de base propriamente dita. As outras “sub-camadas” de sub-base e reforço não apresentam variações de MR com o tempo.

Esta limitação impediu que se aprofundasse a análise acerca da influência da variação climática na rigidez das camadas, o que poderia explicar com mais detalhes os resultados de ATR obtidos. Todavia, mesmo sem esta análise adicional, verificou-se que estas variações de umidade influenciam diretamente o desempenho do pavimento durante a vida útil estimada, mesmo sendo variações de umidade permitidas pelas normas vigentes. Reitera-se novamente a importância de evitar que haja estas variações durante a construção e principalmente durante a vida útil do pavimento, investindo fortemente em uma drenagem eficiente.

#### 4.8 SÍNTESE DOS RESULTADOS OBTIDOS COM AS MODELAGENS

- O *software* MeDiNa foi utilizado para avaliar o desempenho quanto a exposição do pavimento a variações de umidade na compactação, considerando-se a carga de eixo padrão. Se verificou que a variação de +1% em relação a umidade ótima foi a mais danosa, considerando os dois solos, apresentando os maiores afundamentos tanto na camada de interesse (sub-base) como no pavimento como um todo.
- Considerando a variação de +1% de umidade, o afundamento plástico total do pavimento foi 4 vezes superior ao correspondente à umidade de -2%, considerando o solo AS. Já para o solo SRA este aumento foi 3 vezes superior. Os corpos de prova compactados e ensaiados na umidade ótima apresentaram o melhor desempenho para um dado período de análise, com afundamentos próximos a 1 mm para os dois solos.
- As análises com o *software* AASHTOWare apresentaram maiores deformações considerando os ciclos de umedecimento e secagem ao se avaliar a camada de interesse, sub-base. Para o pavimento como um todo a maior influência foi vista para a variação de umidade de +1%, visto sua elevada relevância na deformação da camada de reforço do subleito.

- Com relação ao volume de tráfego, o aumento dos ATRs foi mais evidente para o solo SRA do que para o solo AS e mais expressivo ao se considerarem os dois ciclos completos de umedecimento e secagem. Avaliando a pior situação na camada de sub-base, o aumento do tráfego resultou em um aumento no ATR próximo de 7% para o solo AS e 15% para o solo SRA. Para o pavimento como um todo, o aumento do ATR para o solo AS foi de 10% e para o solo SRA de 13%.
- A degradação decorrente do aumento da carga de eixo também foi avaliada e mostrou causar maior dano que o aumento do volume de tráfego. Novamente o efeito foi mais severo quando se consideraram os dois ciclos completos de umedecimento e secagem nos solos empregados na camada de sub-base, com um aumento dos ATRs próximo a 35%.
- Independente da análise de volume de tráfego ou carga por eixo, a comparação dos afundamentos obtidos para as duas estruturas, diferenciando apenas os dois solos na camada de sub-base, para ciclos de umedecimento e secagem, foi bastante impactante. Ao avaliar o volume de tráfego, o pavimento constituído pelo solo SRA na camada de sub-base apresentou um aumento de 143% no ATR em comparação com o pavimento constituído pelo solo AS. Em relação ao efeito da carga, novamente o pavimento com o solo SRA apresentou as maiores deformações, com um aumento de 144% em relação aos afundamentos verificados para o pavimento com o solo AS. Isto corrobora com os resultados de laboratório obtidos com os ciclos de umedecimento e secagem, onde o solo SRA foi muito mais afetado pelas variações de umidade que o solo AS.

## 5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

### 5.1 CONCLUSÕES

A presente tese teve como objetivo geral avaliar o efeito da variação de umidade e da sucção no comportamento de dois solos utilizados em sub-bases de pavimentos através de ensaios laboratoriais e modelagens computacionais para verificação de desempenho. A partir da metodologia proposta foi possível compreender mais claramente o comportamento de materiais utilizados em camadas de pavimentos quanto a influência da presença de água, segundo a variação de umidade permitida pelas normativas brasileiras em relação a compactação das camadas.

Além da variação de umidade na compactação, também foi avaliada a possível influência da variação de umidade pós-compactação, com ciclos de umedecimento e secagem, que simulam a variação de umidade ocorrida em campo durante a vida útil do pavimento. Ainda, dentro dos objetivos específicos da pesquisa buscou-se avaliar conjuntamente as respostas obtidas nos ensaios de DP e MR correlacionando com a sucções dos solos obtidas nos ensaios e pelas curvas características. Adicionalmente buscou-se desenvolver modelos de previsão de MR e DP que incluíssem esta variável de grande importância dentro do entendimento de solos não saturados.

Dito isso, neste capítulo são descritas as principais conclusões obtidas a partir da apresentação e análise dos resultados.

- Mostrou-se que a sucção matricial é um parâmetro fundamental na compreensão do comportamento de solos não saturados. Através das curvas características obtidas e das respectivas histereses, foi possível avaliar a sua relação com a rigidez dos solos, com as características de deformação permanente dos materiais e com o desempenho de pavimentos. Desta forma, se verificou que para um mesmo material, quanto maior for sua sucção matricial, maior é o seu MR e maior é a sua resistência a deformações plásticas.
- O aumento da energia de compactação resultou em um melhor rearranjo das partículas, resultando diretamente em uma maior resistência a deformações tanto no ensaio de MR quanto no ensaio de DP.

- Os resultados de módulo de resiliência mostraram uma tendência de aumento com o aumento da sucção matricial (e diminuição da umidade), sendo mais evidente para o solo AS do que para o solo SRA.
- A deformação permanente demonstrou ser influenciada pela variação de umidade, mais predominantemente no ramo úmido, onde para pares de tensões mais elevados houve o colapso de algumas amostras. Na análise à luz da teoria do *Shakedown*, o solo AS destacou-se pelo seu ganho de rigidez associado ao carregamento e tendendo, na grande maioria dos casos, ao acomodamento das deformações plásticas. Já o solo SRA não demonstrou indícios de estabilização para altos níveis de tensão, ou seja, ele tende a continuar acumulando deformações permanentes ao longo de sua vida útil.
- Ainda em relação a deformabilidade plástica dos solos verificou-se que para um mesmo teor de umidade podem-se ter diferentes respostas do material, tendo influência dos ciclos de umedecimento e secagem realizados antes do ensaio de DP. Apesar de apresentarem a mesma umidade no momento do ensaio, suas sucções são distintas, pois a sucção considera outros fatores que influenciam no comportamento hidromecânico dos solos, como a estrutura e mineralogia. A resposta para esta constatação possui relação com as histereses obtidas nas curvas características, as quais apresentaram diferentes sucções para um mesmo grau de saturação. Desta forma a sucção demonstra ser uma variável de excelência para representar os efeitos da variação de umidade no comportamento de solos submetidos a carregamentos cíclicos, sendo esta uma das principais contribuições desta pesquisa, visto a escassez de estudos nacionais sobre este assunto.
- Em razão da boa correlação da sucção com o comportamento dos dois solos estudados, foram propostos modelos de previsão de MR e DP que incorporassem o efeito desta variável. O modelo proposto de MR considerou a sucção e a variação de umidade e se apresentou como uma adaptação ao modelo composto, que considera as tensões desvio e confinante. Já o modelo proposto de DP considerou a sucção, a variação de umidade e umidade de compactação, procurando-se realizar uma adaptação ao modelo de Guimarães (2009). Os modelos demonstraram um excelente ajuste frente a formulação proposta e são válidos para a previsão do comportamento de solos submetidos a variação de umidade tanto considerando o ramo úmido, quanto o ramo seco, em relação a umidade de compactação (sendo necessária a validação para outros solos).

- A utilização dos *softwares* MeDiNa e *AASHTOWare* complementou a análise relacionada ao dano da variação de umidade no desempenho dos pavimentos. O *software* MeDiNa, atualmente utilizado para dimensionamento e análise de pavimentos no Brasil, demonstrou que a variação no ramo úmido foi a mais danosa para os dois solos, apresentando os maiores afundamentos tanto na camada de sub-base como no pavimento como um todo.
- O *software* *AASHTOWare* é atualmente uma das ferramentas mais completas para análise de desempenho estrutural e funcional de pavimentos e considera características de clima em suas análises, assim como a curva característica dos solos. Utilizando esta ferramenta se visualizou maiores deformações na camada de sub-base considerando ciclos de umedecimento e secagem, corroborando com o visualizado nos ensaios de laboratório. Considerando as variações de umidade, quanto maior o volume de tráfego e a carga por eixo, maiores são os afundamentos para o período de projeto estipulado, sendo a carga o fator mais impactante. Em relação aos dois solos, o solo SRA apresentou o pior desempenho durante o período de projeto estimado.

No geral, os resultados obtidos nesta pesquisa evidenciaram o efeito nocivo de se compactar solos acima do teor de umidade ótimo no comportamento quanto a deformações elásticas e permanentes. Os materiais estudados nesta tese apresentaram comportamentos aceitáveis para uso em pavimentação, desde que devidamente compactados e protegidos do umedecimento. De fato, as variações de umidade de compactação e pós-compactação demonstraram que estas variações podem inviabilizar a utilização destes materiais nas camadas do pavimento, reiterando a elevada importância de se projetar um sistema de drenagem eficiente. Desta forma, se verificou que o atual limite padrão de variação de umidade de compactação em campo adotado no Brasil,  $\pm 2\%$  em relação a umidade ótima, não é adequado para todos os tipos de solos, devendo ser cuidadosamente utilizado ou revisto pelo projetista em relação aos materiais disponíveis.

Por fim, ressalta-se a importância do estudo realizado que contribui ainda mais para a disseminação acerca da relevância da sucção no comportamento de materiais utilizados na pavimentação, além de fornecer dados que podem auxiliar na ampliação do banco de dados do MeDiNa. Esta pesquisa também proporcionou subsídios para as análises futuras abrangendo os

resultados que serão obtidos em ensaios acelerados com o simulador de tráfego nas pistas experimentais do LAPAV/UFRGS.

## 5.2 SUGESTÕES

Ao longo do desenvolvimento da pesquisa surgiram dúvidas e ideias que poderiam complementar as análises realizadas e contribuir ainda mais quanto a probabilidade da ocorrência da variação do grau de saturação nas camadas inferiores de pavimentos. Por motivos de limitação de tempo, de disponibilidade de materiais e da necessidade de delimitar a quantidade de análises, elas não foram realizadas. Desta forma, estas análises foram incluídas como sugestões para trabalhos futuros:

- Realizar ensaios de placa de sucção para determinar o comportamento da curva característica para valores abaixo de 10 kPa, obtendo assim um valor mais preciso do primeiro valor de entrada de ar;
- Considerar a utilização da energia modificada para a avaliação da variação de umidade;
- Complementar as análises relacionadas aos ciclos de umedecimento e secagem almejando desenvolver um modelo de DP e MR que contemple este parâmetro;
- Realizar ensaios de DP e MR com leituras simultâneas de sucção durante o ensaio propriamente dito;
- Propor melhorias no protocolo de preparação das amostras utilizadas considerando as variações de umidade pós-compactação para ensaio de DP e MR;
- Ampliar as análises com o *software AASHTOWare* aprofundando os estudos acerca das variações de MR encontradas durante o período de projeto;
- Avaliar sucções obtidas em campo utilizando tensiômetros, para fins de comparação com valores obtidos em laboratório;
- Realizar a coleta de amostras de campo (pistas experimentais) para avaliação de umidade ensaios adicionais laboratoriais.

## REFERÊNCIAS

AFSHARIKIA, z. **Parametric study of soil drying in the field for compaction quality assurance**. Msc thesis. Faculty of the Graduate School of the University of Maryland, 2017.

AHMED A. W., ERLINGSSON, S. Evaluation of permanent deformation models for unbound granular materials using accelerated pavement tests. **Road Materials and Pavement Design**. 14:1, 178-195. 2013.

ALONSO, E. E; GENS, A.; HIGHT, D. W. Special problems soils. **General Report In 9<sup>th</sup> European Conference on Soil Mechanics and Foundation engineering**, Dublin. **Proceedings...**, v.3,p. 1087-1146, 1987.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM 5298/2016: Standard Test Method for Measurement of Soil Potential (Suction) Using Filter Paper**. Annual Book of ASTM Standards, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6508: Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm - determinação da massa específica**, Rio de Janeiro, 1984.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181: Solo – análise granulométrica**, Rio de Janeiro, 2016 (b).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6459: Solo – determinação do Limite de Liquidez**, Rio de Janeiro, 1984 (c).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7180: Solo – determinação do Limite de Plasticidade**, Rio de Janeiro, 1984 (d).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7182: Solo - ensaio de compactação**, Rio de Janeiro, 1986 (e).

BASTOS, C. A. B. **Estudo geotécnico sobre a erodibilidade de solos residuais não saturados**. Tese de doutorado em Engenharia – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 267 p. 1999.

BAYOMI, F. M.; AL-SANAD, H. A. Deformation characteristics of subgrade soils in Kuwait. **Transportation Research Record 1406**, Washington, DC, No. 146, pp. 77-87, 1993.

BERNUCCI, L. L. B.; CAMACHO, J.; MARINHO, F. A. M.; NOGAMI, J. S.. Efeitos da sucção e da temperatura na movimentação d'água em pavimentos construídos com solos lateríticos. **Anais..** Rio de Janeiro: ANPET, 2000.

BISHOP, A. W.; ALPAN, I.; BLIGHT, G. E.; DONALD, I. B. Factors controlling the strength of partly saturated cohesive soils. **In: ASCE Research Conference on Shear Strength of Cohesive Soils**. University of Colorado. P. 503-532, 1960.

BLACKMORE, L.; CLAYTON, C.; POWRIE, W.; PRIEST, J. A.; OTTER, L. Saturation and its effect on the resilient modulus of a pavement formation material. **Géotechnique**, 1 – 11. 2019.

BROOKS, R. H.; COREY, A. T. **Hydraulic properties of porous media**. Colorado State University (Fort Collins). Hydrology Paper. N.3, 1964.

BROWN, S. F. Soil mechanics in pavement engineering. **Geotechnique**, v.46 n° 3, p. 383-426, 1996.

BURGOS, J. F. **Influência da microestrutura no comportamento mecânico dos solos tropicais naturais e compactados**. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, Brasília, 149p., 2016.

CEN. EN 13286-7. **Repeated load triaxial test**, Comité Européan de Normalisation, 2004.

CERATTI, J. A. P., GEHLING, W. Y. Y., BICA, A. V. D., RODRIGUES, M. R. Influência da sucção no módulo de resiliência de um solo típico do Rio Grande do Sul. **Anais da Reunião Anual de Pavimentação**. Salvador, BA. p. 540-555, 1996.

CERATTI, J. A. P., GEHLING, W. Y. Y. e NÚÑEZ, W. P. Seasonal variations of a subgrade soil resilient modulus in southern Brazil. **Transportation Research Record**, Washington, D. C., v 1874, p 165-173, 2004.

CHANDLER, R.J.;CRILLY, M.S.; MONTGOMERYSMITH,G. A Low-Cost Method of Assessing Clay Dessication for Low-Rise Buildings. **Proc. of the Institute of Civil Engineering**, Vol. 92, N° 2, p. 82-89. 1992.

DAS, B. M. **Fundamentos da Engenharia Geotécnica**. 6 ed. São Paulo: Thomson Learning,2007.

DAWSON, A. R., PAUTE, J. L., THOM, N. H. **Mechanical Characteristic of Unbound Granular Materials as a Function of Condition**. Flexible Pavements, p. 35-45, ed. A. Gomes Correia. 1996.

DAWSON, A. R.; WELLNER, F. **Plastic behavior of granular materials**. Report ARC Project 933, University of Nottingham, United Kingdom, 1999.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). **Manual de drenagem de rodovias**. Rio de Janeiro, 2006a.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). **Manual de pavimentação**, Rio de Janeiro, 2006b.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 134: Pavimentação – Solos – Determinação do Módulo de Resiliência – Método de Ensaio**. Rio de Janeiro, 2018a. 11p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT-IE 179/2018: Pavimentação – Solos – Determinação da deformação permanente de solos, brita graduada e materiais não estabilizados – Instrução de ensaio**. Rio de Janeiro, 2018b. 11 p.

DRUMM, E. C.; REEVES, J. S.; MADGETT, M. R. Subgrade Resilient Modulus Correction for Saturation Effects. **Journal of Geotechnical And Geoenvironmental Engineering**, [s.l.], v. 123, n. 7, p.663-670, jul. 1997.

EDIL, T. B.; MOTAN, S. E. Soil-water potential and resilient behavior of subgrade soils. **Transportation Research Record**, Washington, D.C., No. 705, pp. 54-63, 1979.

FERREIRA, J. G. H. M. **Elaboração e análise de base de dados de ensaios triaxiais dinâmicos da COPPE/UFRJ**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 251p., 2002.

FEUERHARMEL, C. **Aspectos do comportamento não saturado de dois solos coluvionares – Gasoduto Bolívia-Brasil**. 128 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2003

FEUERHARMEL, C. **Estudo da resistência ao cisalhamento e da condutividade hidráulica de solos coluvionares não saturados da Formação Serra Geral**. Tese de Doutorado. Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 329p. 2007.

FEUERHARMEL, C.; GEHLING, W. Y. Y.; BICA, A. V. D. Determination of the soil-water characteristic curve of undisturbed colluviums soils. **In: International Symposium Advanced Experimental Unsaturated Soil Mechanics**. Experus 2005. Trento (Itália). Proceedings... v.1, p 345-349, 2005.

FEUERHARMEL, C.; GEHLING, W. Y. Y.; BICA, A. V. D. The use of filter-paper and suction-plate methods for determining the soil-water characteristic curve of disturbed colluviums soils. **Geotechnical Testing Journal**. v.29, p. 419-425, 2006.

FREDLUND, D. G. Second Canadian Geotechnical Colloquium: Appropriate concepts and technology for unsaturated soils. **Canadian Geotechnical Journal**. Vol. 16, p. 121-139, 1979.

FREDLUND, D. G. The implementation of unsaturated soil mechanics into geotechnical engineering, The 1999 R.M. Hardy Lecture, **52<sup>nd</sup> Canadian Geotechnical Conference**, Canadian Geotechnical Journal, 2000.

FREDLUND, D. G. Use of soil-water characteristic curves in the implementation of unsaturated soil mechanics. **In: 3<sup>rd</sup> International Conference on Unsaturated Soils, UNSAT 2002**, Recife (Brasil), **Proceedings...**, v.3, p. 887-902, 2002.

FREDLUND, D. G.; MORGENSTERN, N. R. Stress state variables for unsaturated soils. **Journal of the Geotechnical Engineering Division**, ASCE, v.103, p. 447-466, 1977.

FREDLUND, D. G.; RAHARDJO, H. **Soil Mechanics for Unsaturated Soils**. New York, Ed. John Wiley & Sons, 1993.

FREDLUND, D. G.; XING, A. Equations for the soil-water characteristic curve. **Canadian Geotechnical Journal**. *J.*, 31: 521-532, 1994.

FREIRE, L. R. ET AL. **Manual de calagem e adubação do Estado do Rio de Janeiro**. Seropédica, RJ: Embrapa; Editora Universidade Rural, 2013.

FREITAS, J. B.; REZENDE, L. R.; GITIRANA JR., G. F. N. Prediction of the resilient modulus of two tropical subgrade soils considering unsaturated conditions. **Engineering Geology**, vol. 270, 2020. DOI: 10.1016/j.enggeo.2020.105580

GALLIPOLI, D.G; WHEELER, S. J.; KARSTUNEN, M. Modeling the variation of degree of saturation in a deformable unsaturated soil. **Geotechnique**. v.53(1). P. 105-112, 2003.

GARDNER, W. R. Some Steady-State of the Unsaturated Moisture Flow Equation with application to Evaporation from Water Table - **Soil Sci.**, No. 85, Vol.3, p. 228-232, 1958.

GEHLING, W. Y. Y., CERATTI, J. A. P., NÚÑEZ, W. P., RODRIGUES, M. R. A study of the influence of suction on the resilient behaviour of soils from southern Brazil. **International Conference on Unsaturated Soils**. Pequim, China. Vol. 1, p. 47-53, 1998.

GEHLING, W. Y. Y., REZENDE, L. R., LUCENA, L. C. F. L., BERNUCCI, L. L. B., NÚÑEZ, W. P., CERATTI, J. A. P., CAMAPUM DE CARVALHO, J. **Estruturas de pavimento no contexto dos solos não saturados. Capítulo do livro: Solos não saturados no contexto geotécnico**. São Paulo: Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 2015.

GITIRANA Jr., G. F. N.; FREDLUND, D. G. A soil-water characteristic curve equation with independent properties. Technical Note, ASCE **Journal of Geotechnical and Environmental Engineering**, v 130(2), p. 209-213, 2004.

GONÇALVES, R. F. **Estudo da influência da variação do teor de umidade no valor do módulo de resiliência de um solo argiloso encontrado em subleito de rodovias no interior paulista**. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo, 149p., 1999.

GREACEN, E. L.; WALKER, G. R.; COOK, P. G. Evaluation of the filter paper method for measuring soil water suction. **International Conference on Measurement of Soil and Plat Water Status**. p. 137 – 143. 1987.

GUIMARÃES, A. C. R. **Estudo de deformação permanente em solos e teoria do *shakedown* aplicada a pavimentos flexíveis**. Tese de Mestrado. Programa de Engenharia Civil da COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro, 279p., 2001.

GUIMARÃES, A. C. R. **Um método mecanístico-empírico para a previsão da deformação permanente em solos tropicais constituintes de pavimentos**. Tese de doutorado (Doutorado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio de Janeiro. COPPE. Rio de Janeiro, 2009.

HAN, Z.; VANAPALLI, S. K. Relationship between resilient modulus and suction for compacted subgrade soils. **Engineering Geology**. v.211. p. 85-97, 2016a.

HAN, Z.; VANAPALLI, S. K. State-of-art: Prediction of Resilient Modulus of Unsaturated Subgrade Soils. **International Journal of Geomechanics**. v.16 (4), 2016b.

HEIDEMANN, M. **Estudo dos solos de uma encosta instável em São José – SC: Intemperismo e comportamento geotécnico**. Tese (doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Porto Alegre, 298 p., 2015.

HOUSTON, S. L.; HOUSTON, W. N.; WAGNER, A. M. Laboratory filter paper suction measurements. **Geotechnical Testing Journal**. V.17 (2). P. 185-194, 1994.

JING, P.; NOWAMOOZ, H.; CHAZALLON, C. Permanent deformation behaviour of a granular material used in low-traffic pavements. **Road Materials and Pavement Design**, vol. 19 (2), pp. 289-314, 2016.

KERN, C. **Análise de desempenho de pavimentos da Rede Temática do Asfalto no Rio Grande do Sul – A avaliação de um pavimento submetido à oscilação do lençol freático**.

167 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

KHOURY, N.; BROOKS, R.; ZAMAN, M.; KHOURY, C.. Variations of Resilient Modulus of Subgrade Soils with Postcompaction Moisture Contents. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, [s.l.], v. 2101, p.72-81, dez. 2009.

KHOURY, N.; ZAMAN, M. Correlation Between Resilient Modulus, Moisture Variation, and Soil Suction for Subgrade Soils. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, [s.l.], v. 1874, p.99-107, jan. 2004.

LAMBE, T. W.; WHITMAN, R. V. **Soil Mechanics**. New York, Ed. John Wiley & Sons, 1979.

LEKARP, F; DAWSON, A. Modelling permanent deformation behavior of unbound granular materials. **Construction and Building Materials**, vol. 12, No. 1, pp. 9-18, Elsevier Science Ltd, 1998.

LEKARP, F., ISACSSON, U., DAWSON, A. State of the Art – II: Permanent strain response of unbound aggregates. **Journal of Transportation Engineering ASCE/ January/February**, 2000.

LIANG, R. Y.; RABAB'AH, S.; KHASAWNEH, M. Predicting Moisture-Dependent Resilient Modulus of Cohesive Soils Using Soil Suction Concept. **Journal of Transportation Engineering**, vol. 134, No. 1, pp. 34-40, 2008. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-947X(2008)134:1(34)

LIMA, C. D. A.; Motta, L. M. G.; Guimarães, A. C. R.; Aragão, F. T. S. Contribution to the study of Brazilian tropical soils as pavement materials. **In: 13th ISAP (International Society for Asphalt Pavements) Conference on Asphalt Pavements, ISAP 2018, Proceedings...**, Fortaleza, CE, 2018.

LIMA, C. D. A.; MOTTA, L. M. G.; ARAGÃO, F. T. S. Análise das tensões aplicadas nos ensaios de deformação permanente de solos e britas para o dimensionamento mecanístico-empírico de pavimentos. **In: 33º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes da ANPET, 33º ANPET, Balneário Camboriú, Anais...**, pp. 1222-1233, 2019a.

LIMA, C. D. A.; MOTTA, L. M. G.; ARAGÃO, F. T. S. Effects of compaction moisture content on permanent deformation of soils subjected to repeated triaxial load tests. **Transportation Research Record**. 2673(2), 466-476, 2019b.

LIMA, C. D. A. **Avaliação da deformação permanente de materiais de pavimentação a partir de ensaios triaxiais de cargas repetidas**. Tese (doutorado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE), Rio de Janeiro, 428p., 2020.

LOPES JR, L. S. **Metodologia de Previsão do Comportamento Mecânico de Solos Tratados com cal**. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

MALYSZ, R. **Desenvolvimento de um equipamento triaxial de grande porte para avaliação de agregados utilizados como camada de pavimentos**. Tese de doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 350 p, 2009.

MARINHO, F. A. M. **Shrinkage Behavior of some Plastic Soils**. PhD Thesis – Imperial College, University of London, 216p, 1994.

MARINHO, F. A. M. A técnica do papel filtro para a medição de sucção. **In: Encontro sobre solos não saturados**. Porto Alegre, **Anais...** p. 112-125, 1995.

MARINHO, F. A. M.; SOTO, M. A. A.; GITIRANA JR, G. F. N. Instrumentação de laboratório e campo e a medição da curva de retenção. In: CAMAPUM DE CARVALHO, J. et al. (Orgs.) **Solos não saturados no contexto geotécnico**. ABMS, cap. 10, São Paulo, p. 231-256, 2015.

MCKEE, C.; BUMB, A. Flow-testing coalbed methane production wells in presence of water and gas. **SPE Formation Evaluation**, vol. 2, no. 4, pp. 599–608, 1987.

MEDINA, J.; MOTTA, L. M. G. **Mecânica dos pavimentos**. Rio de Janeiro: Ed. UFRJ, 3ª ed., 2015.

MONCADA, M. P. H. **Estudo em laboratório de características de colapso e transporte de solutos associados à infiltração de licor cáustico em um solo laterítico**. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 219p, 2004.

MONISMITH, C. L., OGAWA, N., FREEME, C. R. Permanent Deformation Characteristics of Subgrade Soils Due to Repeated Loading. **54° Annual Meeting of TRB**. Washington. 1975.

MOTTA, M. F. B. **Caracterização físico-hídrico-estrutural e efeito do aumento da pressão do ar na resistência de solos tropicais não saturados**. Tese (Doutorado), Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 350p., 2016.

NOGAMI, J.S. E VILLIBOR, D.F. (1981) Uma Nova Classificação de Solos para Finalidades Rodoviárias. **In: Simpósio Brasileiro de Solos Tropicais em Engenharia**, Rio de Janeiro. **Anais...** COPPE/UFRJ – CNPq - ABMS, Rio de Janeiro, p. 30-41.

NÚÑEZ, W. P. **Estabilização físico-química de um solo residual de Arenito Botucatu visando seu emprego na pavimentação**. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1991.

NUNEZ, W.P. **Análise experimental de pavimentos rodoviários delgados com basaltos alterados**. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 291 p, 1997.

OTÁLVARO, I. F. **Comportamento hidromecânico de um solo tropical compactado**. 122 f. Tese de Doutorado, Universidade de Brasília, Brasília, 2013.

PARREIRA, A. B., GONÇALVES, R. F. The influence of moisture content and soil suction on the resilient modulus of a lateritic subgrade soil. **GeoEng – An International Conference on Geotechnical & Geological Engineering**. Melbourne, Austrália, 2000.

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

PEREIRA, P. **Comportamento Mecânico saturado e não saturado de um solo coluvionar de arenito**. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 305 p, 2013.

PINTO, C. D. S. **Curso básico de mecânica dos solos**. 3 ed. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

PINTO, S.; PREUSSLER, E. **Pavimentação rodoviária, conceitos fundamentais sobre pavimentos flexíveis**. Editora Copiarte, Rio de Janeiro – RJ, 259 p., 2002.

PUPPALA, A. J.; SARIDE, S.; CHOMTID, S. Experimental and modeling studies of permanent strains of subgrade soils. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, pp. 1379-1389, 2009. DOI: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000163

QUEIROZ, A. C. G. **Estudo do comportamento microestrutural de solos tropicais compactados**. Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 108p., 2015.

RAHARDJO, H.; LEONG, E. C. Soil-water characteristic curves and flux boundary problems. **Unsaturated Soil Engineering Practice** ASCE, Geotechnical Special Publication n. 68, New York, p. 88-112, 1997.

RAMIRES, M. C. P. **Estudo dos efeitos da presença do nível de água no comportamento de dois solos lateríticos utilizados em fundações de rodovias no Rio Grande do Sul**. Tese, 261 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

RESENDE, M.; CURI, N.; KER, J.C.; REZENDE, S.B. **Mineralogia de solos brasileiros: Interpretação e aplicações**. 2ª ed. Lavras: UFLA, 192p., 2011.

RIBEIRO, M. M. P. **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, 119p., 2013.

RIDLEY, A. M. Discussion on “Laboratory Filter Paper Suction Measurements” by Sandra L. Houston, Willian N. Houston and Anne-Marie Wagner. **Geotechnical Testing Journal**, v.18(3). p. 391-396, 1995.

ROCHA, M. F. **Influência do perfil de sucção em obras de contenção em solos não saturados**. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Civil, Goiânia, 271p., 2013.

RODRIGUES, M. R. **Influência da sucção no módulo de resiliência de solos típicos de subleito de pavimentos do Rio Grande do Sul**. 106 f. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1997.

SALOUR, F.; ERLINGSSON, S. Permanent deformation characteristics of silty sand subgrades from multistage RLT tests. **International Journal of Pavement Engineering**, vol. 18 (3), pp. 236-246, 2017. DOI: 10.1080/10298436.2015.1065991

SALOUR, F.; ERLINGSSON, S.; ZAPATA, C. E. Resilient modulus modeling of unsaturated subgrade soils with matric suction control. **In Asphalt Pavements - Proceedings of the International Conference on Asphalt Pavements, ISAP 2014** (v. 2, pp. 1145-1154). Taylor and Francis - Balkema. 2014.

SANTOS, T. A. **A influência da sucção na deformabilidade de subleitos rodoviários: efeito da variação de umidade, método de compactação e gênese dos solos**. 407 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2020.

SANTOS, H. G.; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C.; OLIVEIRA, V. A.; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A.; ARAÚJO FILHO, J. C.; OLIVEIRA, J. B.; CUNHA, T. J. F. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 4 ed., Embrapa, Brasília - DF, 2018.

SANTOS, T. A.; 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**. v. 27 (1). 2019.

SCHREINERT, G. G. **Estudo do comportamento mecânico de solos residuais para emprego em pavimentação**. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 287 p., 2021.

SILLERS, W. S.; FREDLUND, D. G.; ZAKERZADEH, N. Mathematical attributes of some soil-water characteristic curve models. **Geotechnical and Geological Engineering**. v. 19, p. 243-283, 2001.

SILVA, B. A. **Análise mecânica de um modelo rodoviário submetido a oscilação do lençol freático simulada em um modelo físico de verdadeira grandeza**. 304 f. Tese de doutorado em Engenharia. Programa de Pós-Graduação da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

SMITH, G. N.; SMITH, I. G. N. **Elements of soils mechanics**. 7<sup>th</sup> ed. London Ed. **Blackwell science**. 494p, 1998.

STRECK, E. V.; KAMPF, N.; DALMOLIN, R. S. D.; KLAMT, E.; NASCIMENTO, P. D.; SCHNEIDER, P.; ... & PINTO, L. F. S. **Solos do Rio Grande do Sul**. 2<sup>o</sup> Ed. Porto Alegre: EMATER/RS, 2008. 222p.

TAKEDA, M. C. **A Influência da Variação da Umidade Pós-compactação no Comportamento Mecânico de Solos de Rodovias do Interior Paulista**. Tese de Doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. São Carlos, SP. 2006, 199p.

TINJUM, J. M.; BENSON, C. H.; BLOTZ, L. R. Soil-water characteristic curves for compacted clays. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**. v.123(11), p. 1060-1069, 1997.

THOMÉ, A. **Comportamento de fundações superficiais apoiadas em aterros estabilizados com resíduos industriais**. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1999.

VAN GENUCHTEN, M. T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science of America Journal**. v. 44. P. 892-898, 1980.

VANAPALLI, S. K.; FREDLUND, D. G.; PUFAHL, D. E. The influence of soil structure and stress history on the soil-water characteristic of a compacted till. **Geotechnique**. v. 49(2). p. 143-159, 1999.

VANAPALLI, S. K.; SALINAS, L.M.; AVILA, D.; KARUBE, D. Suction and storage characteristic of unsaturated soils. **In: 3<sup>rd</sup> International Conference on Unsaturated Soils, UNSAT 2002, Recife, Brasil, Proceedings...**, vol.3, pp. 1045-1070, 2002.

VILLIBOR, D. F. **Pavimentos econômicos, novas considerações**. Tese de doutorado. Departamento de Vias de Transportes e Topografia. Escola de Engenharia de São Carlos da USP, São Paulo, SP. 1981.

VILLIBOR, D. F., NOGAMI, J. S. **Pavimentos Econômicos: Tecnologia do Uso dos Solos Finos**. Arte e ciência, São Paulo, SP. 2009.

WEBER, R. C. **Avaliação das trajetórias de umedecimento e secagem na deformabilidade elástica de solos compactados**. 140 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

WERKMEISTER, S. **Permanent deformation behaviour of unbound materials in pavement constructions**. Tese de doutorado, Dresden University of Technology. 2003.

WERKMEISTER, S.; DAWSON, A. R.; WELLNER, F. Permanent deformation behavior of granular materials and the shakedown concept. **Transportation Research Record** 1757, paper nº 01-0152, Washington, DC, 2001.

WHOTH, C. P.; HOULSBY, G. T. Soil mechanics: property characterization and analysis procedure. In: **11<sup>th</sup> ICSMFE**, San Francisco, **Proceedings...**, v.1, p. 1-55, 1985.

WILLIAMS, J.; PREBBLE, R.E.; WILLIAMS, W.T.; HIDNETT, C.T. The Influence of texture, structure and clay mineralogy on the soil moisture characteristic curve. **Australian J. Soil Res.**, 21, pp.15-32, 1983.

WINTER, D. **Resistência, rigidez e durabilidade de solos arenosos estabilizados com materiais mais sustentáveis**. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

YANG, S.; LIN, H.; HUANG, W. Suction-controlled laboratory test on resilient modulus of unsaturated compacted subgrade soils. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**. V. 134 (9). September 2008.

YANG, S.; HUANG, W.; TAI, Y. Variation of Resilient Modulus with Soil Suction for Compacted Subgrade Soils. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, [s.l.], v. 1913, p.99-106, jan. 2005.

YAO, Y.; ZHENG, J.; ZHANG, J.; PENG, J.; LI, J. Model for predicting resilient modulus of unsaturated subgrade soils in South China. **Journal of Civil Engineering**. v. 22 (6). 2018.

YODER, E. J.; WITCZAK, M W., 1975, **Principles of pavement design**. 2ª ed. EUA: Wiley-Interscience Publication.

ZAGO, J. P. **Estudo da deformação permanente de três solos típicos de subleitos rodoviários de Santa Maria - RS**. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Santa Maria, 225p., 2016.

ZAMAN, M.; KHOURY, N. **Effect of soil suction and moisture on resilient modulus of subgrade soils in Oklahoma – Final Report (DRAFT)**. Oklahoma Department of Transportation, 2007.

ZHAN, L. **Field and laboratory study of an unsaturated expansive soil associated with rain-induced slope instability**. PhD Thesis – Hong Kong University of Science and Technology – Honk Kong – China. 490p, 2003.

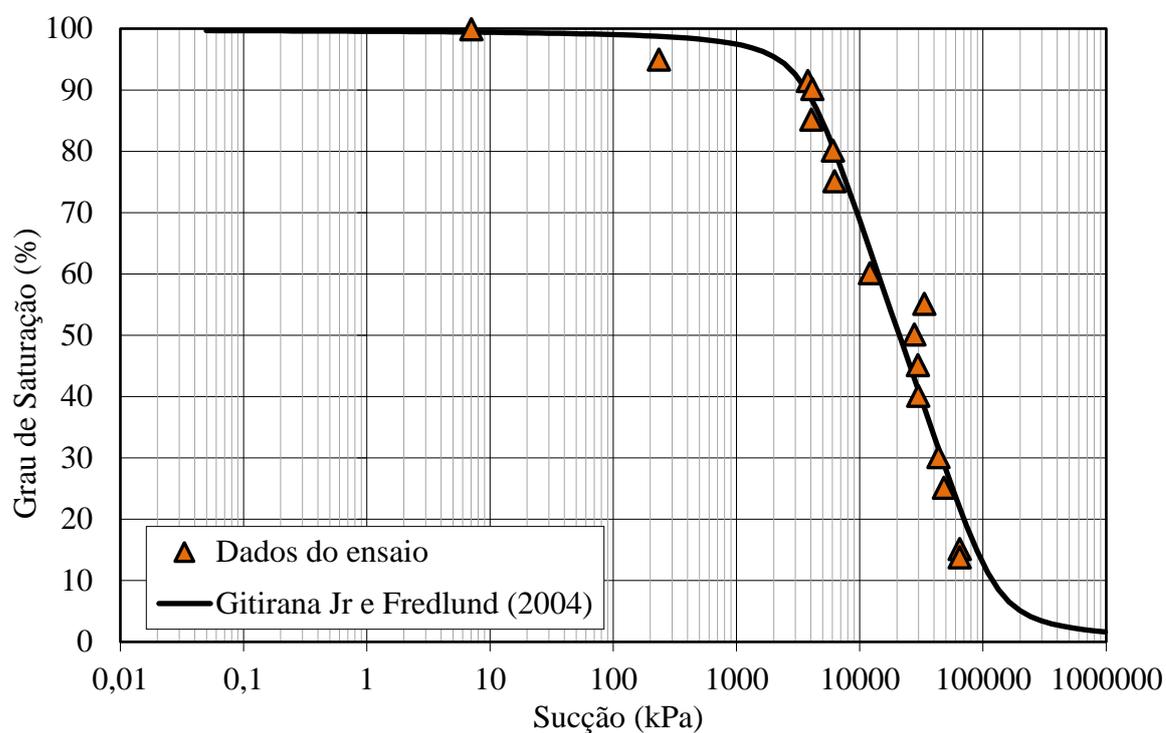
ZHANG, J.; PENG, J.; LIU, W.; LU, W. Predicting resilient modulus of fine-grained subgrade soils considering relative compaction and matric suction. **Road Materials and Pavement Design**. 1-13. 2019.

ZHANG, J. et al. Variation of resilient modulus with soil suction for cohesive soils in South China. **International Journal of Civil Engineering**, 16, pp. 1655-1667, 2018.

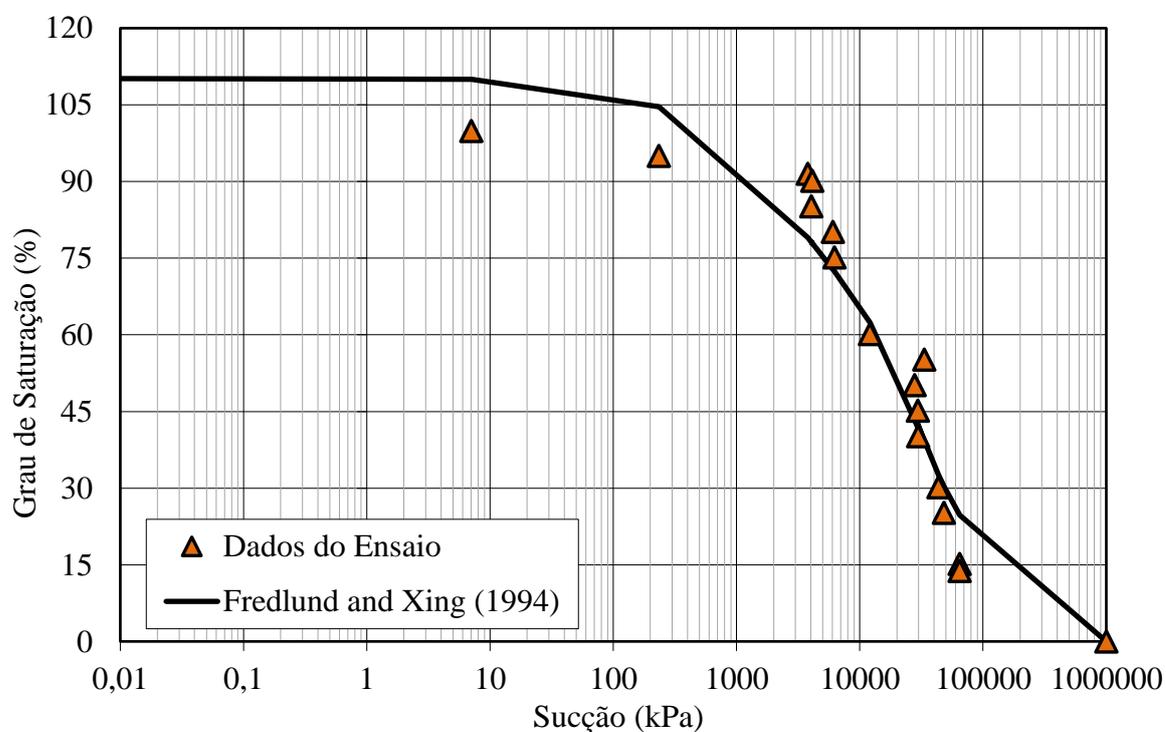
ZHOU, J. YU, J. L. Influences affecting the soil-water characteristic curve. **Journal of Zhejiang University Science**. v. 6A(8), p. 797-804, 2005.

## APÊNDICE A

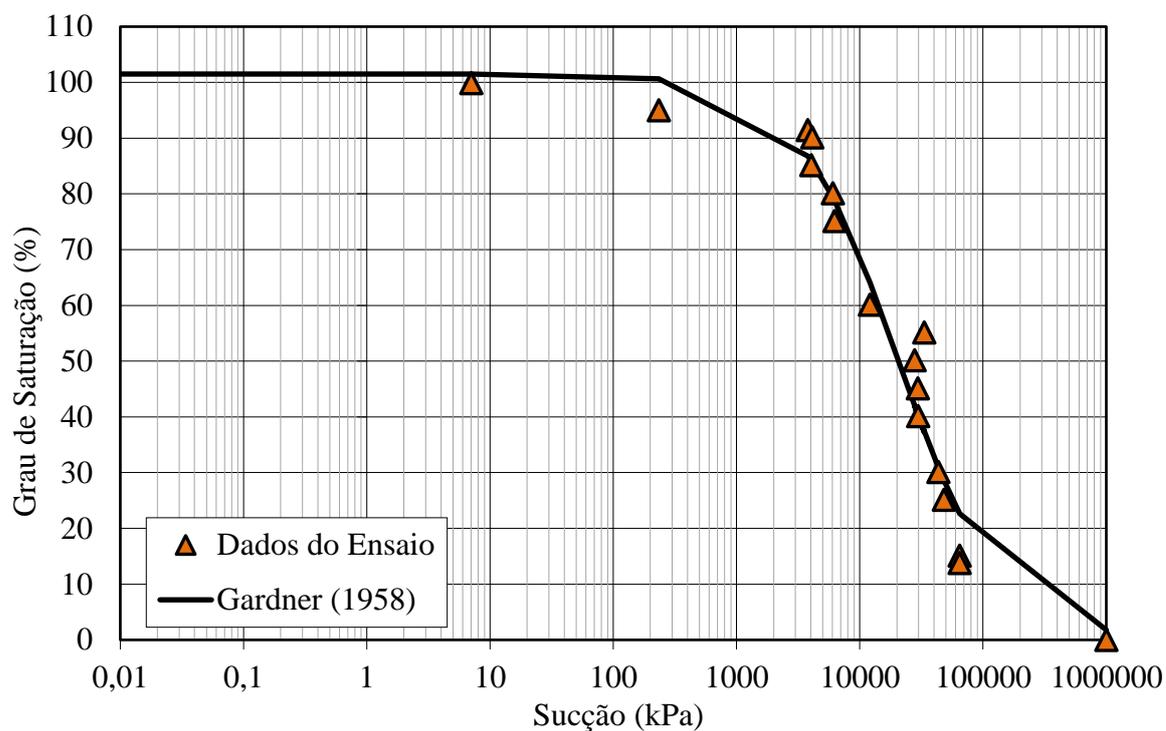
Gráficos de modelagens das curvas características utilizando os modelos de Gitirana Jr. e Fredlund – dois pontos de inflexão (2004), Fredlund e Xing (1994) e Gardner (1958)



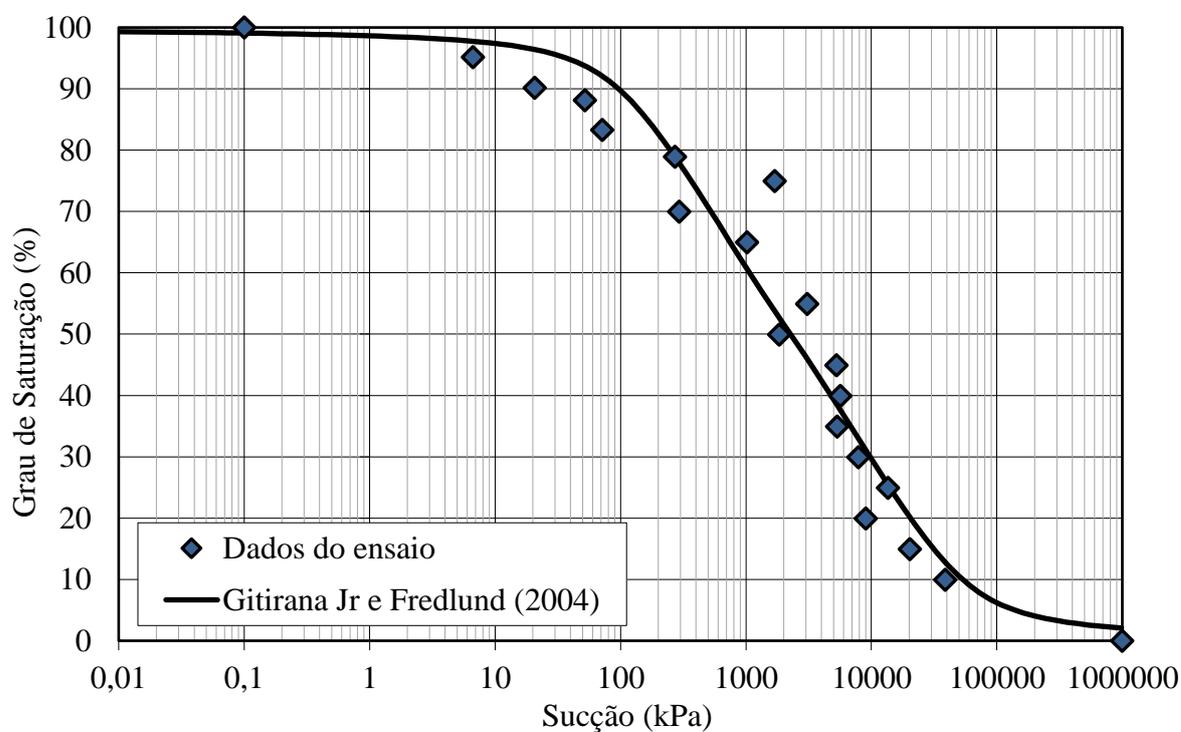
Ajuste da curva característica do solo AS-EI pelo modelo de Gitirana Jr e Fredlund (2004) – Unimodal (dois pontos)



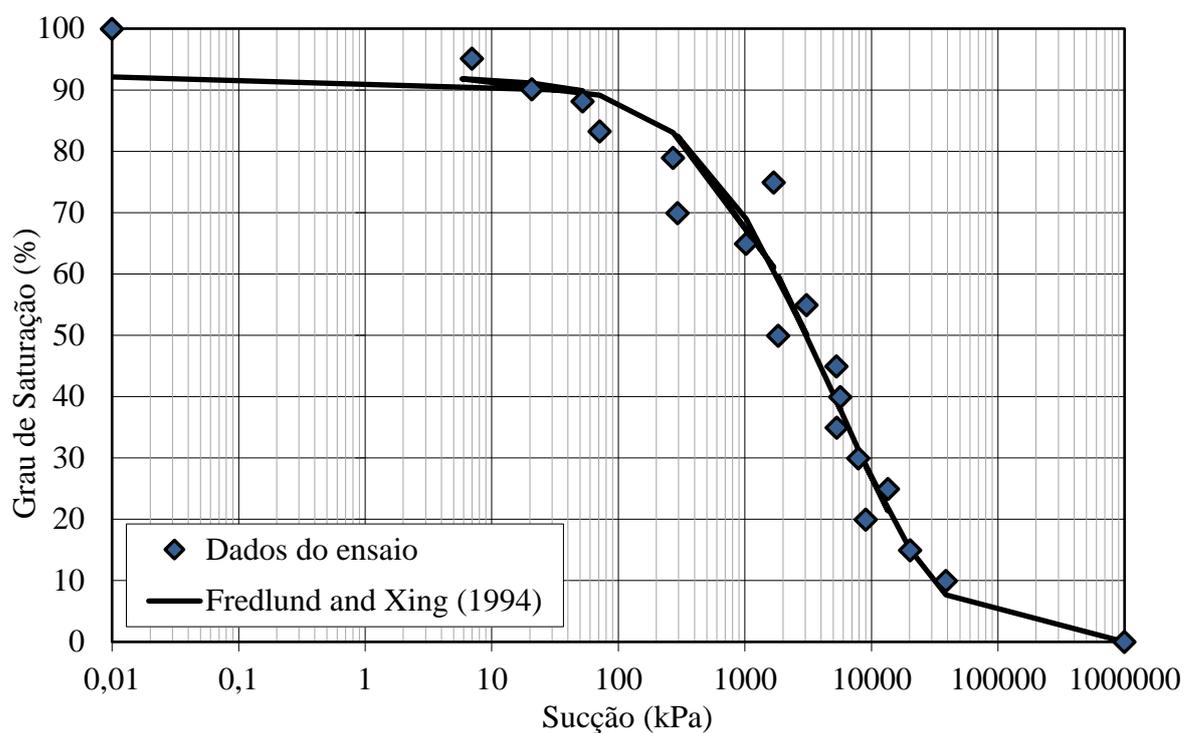
Ajuste da curva característica do solo AS-EI pelo modelo de Fredlund e Xing (1994)



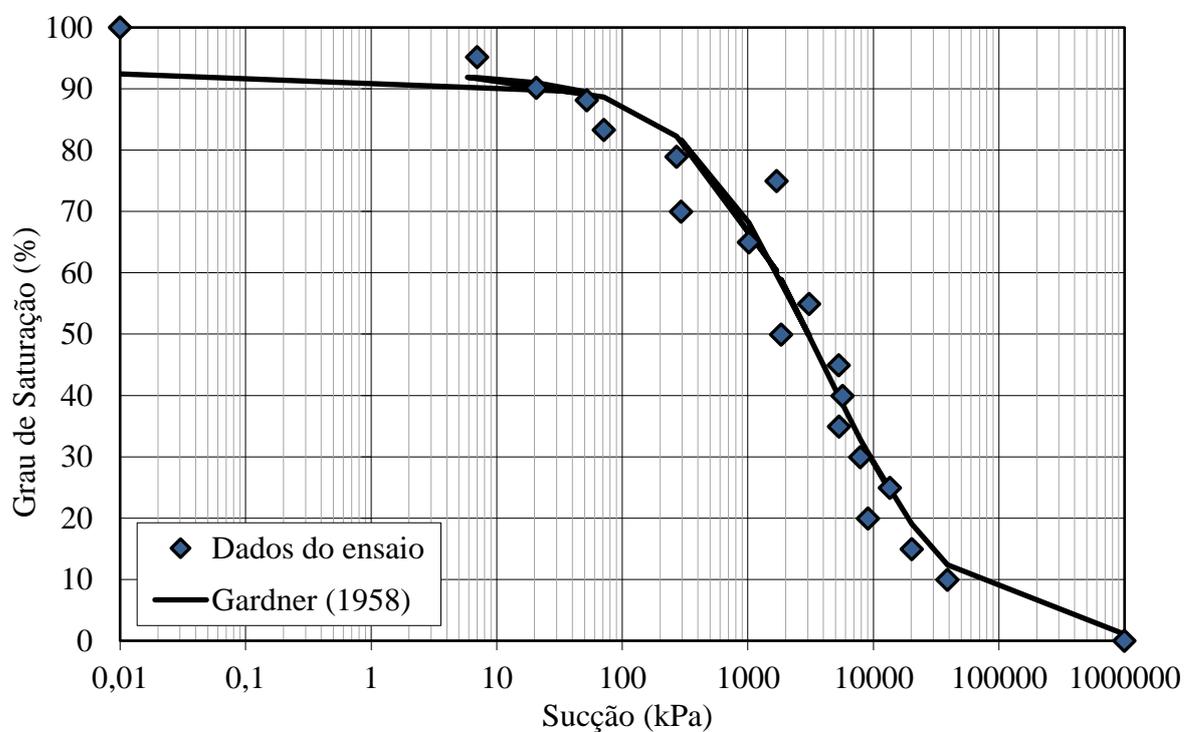
Ajuste da curva característica do solo AS-EI pelo modelo de Gardner (1958)



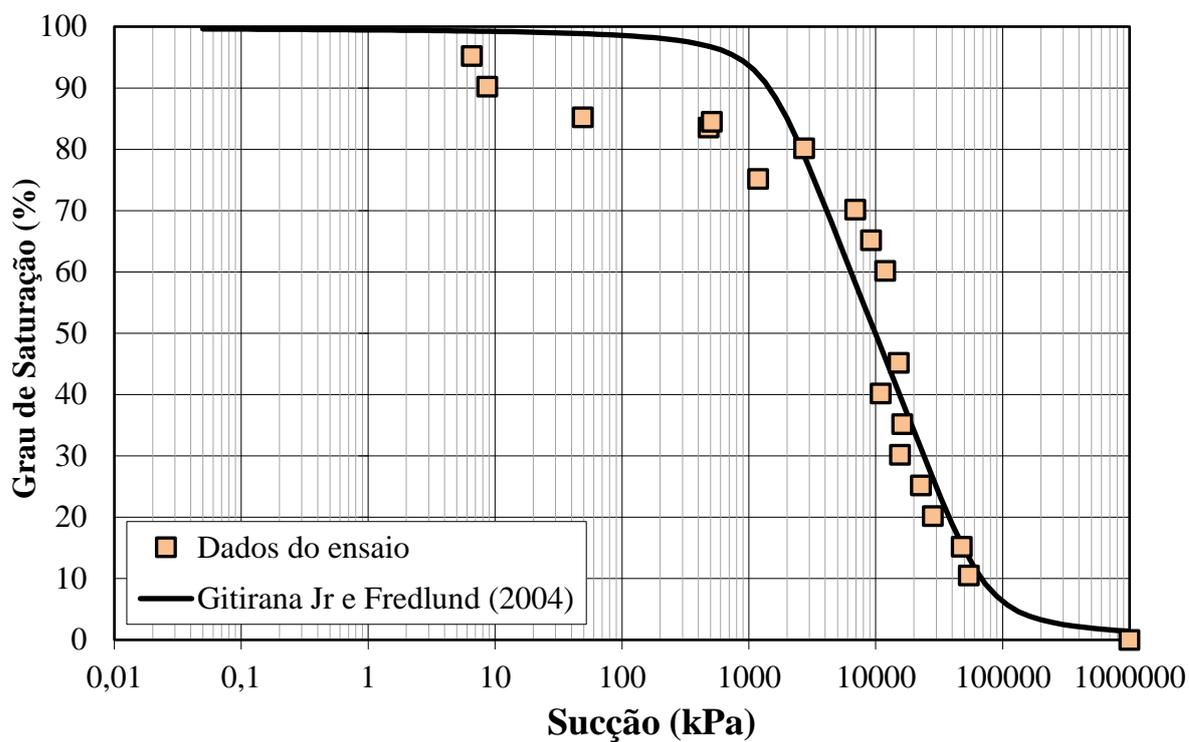
Ajuste da curva característica do solo SRA-EI pelo modelo de Gitirana Jr e Fredlund (2004) – Unimodal (dois pontos)



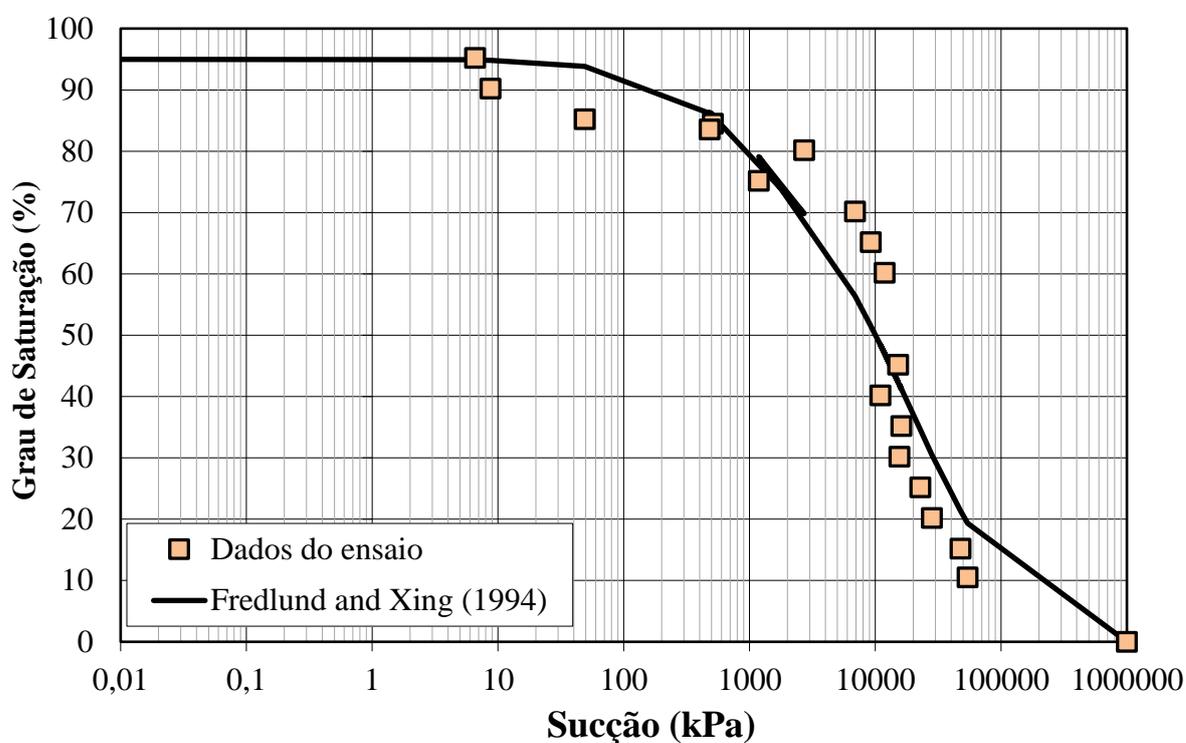
Ajuste da curva característica do solo SRA-EI pelo modelo de Fredlund e Xing (1994)



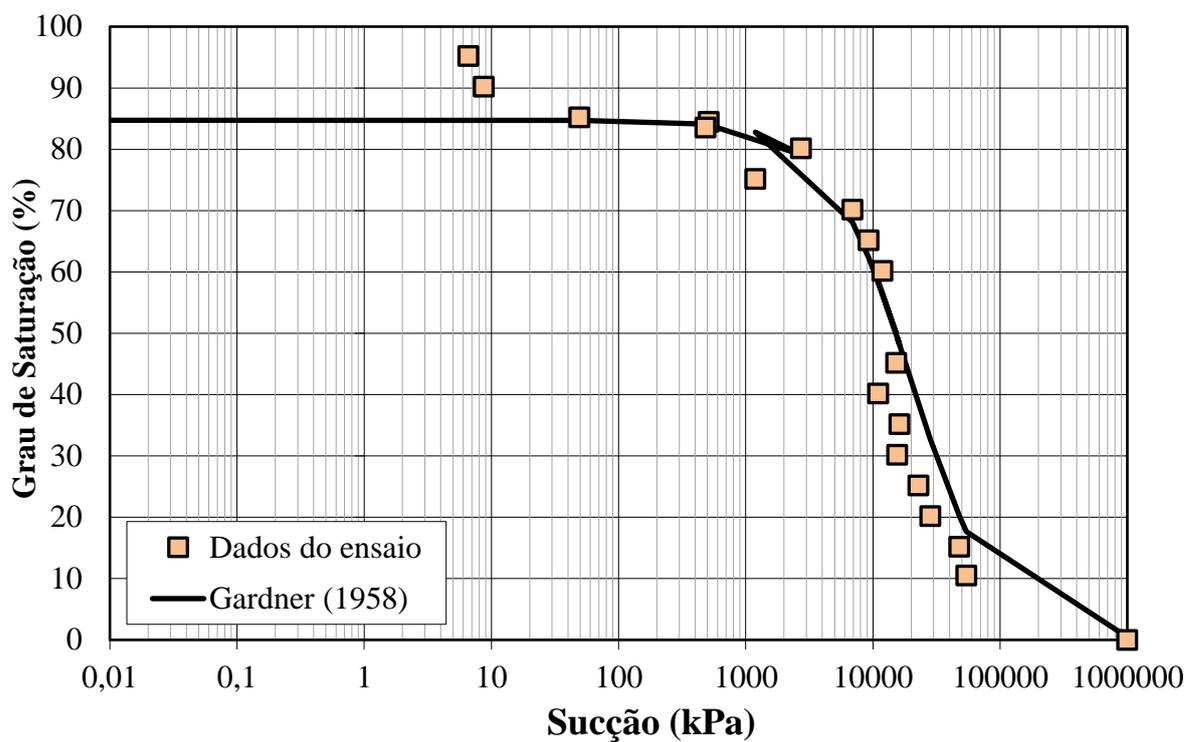
Ajuste da curva característica do solo SRA-EI pelo modelo de Gardner (1958)



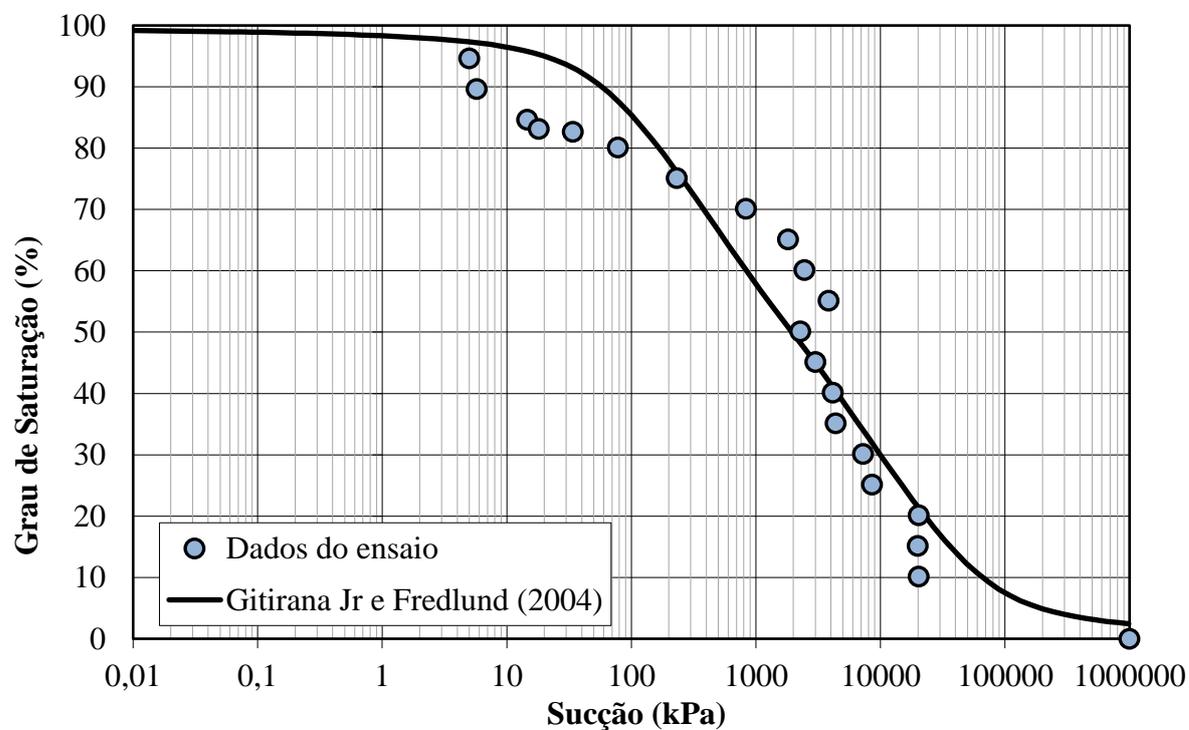
Ajuste da curva característica do solo AS-EN pelo modelo de Gitirana Jr e Fredlund (2004) – Unimodal (dois pontos)



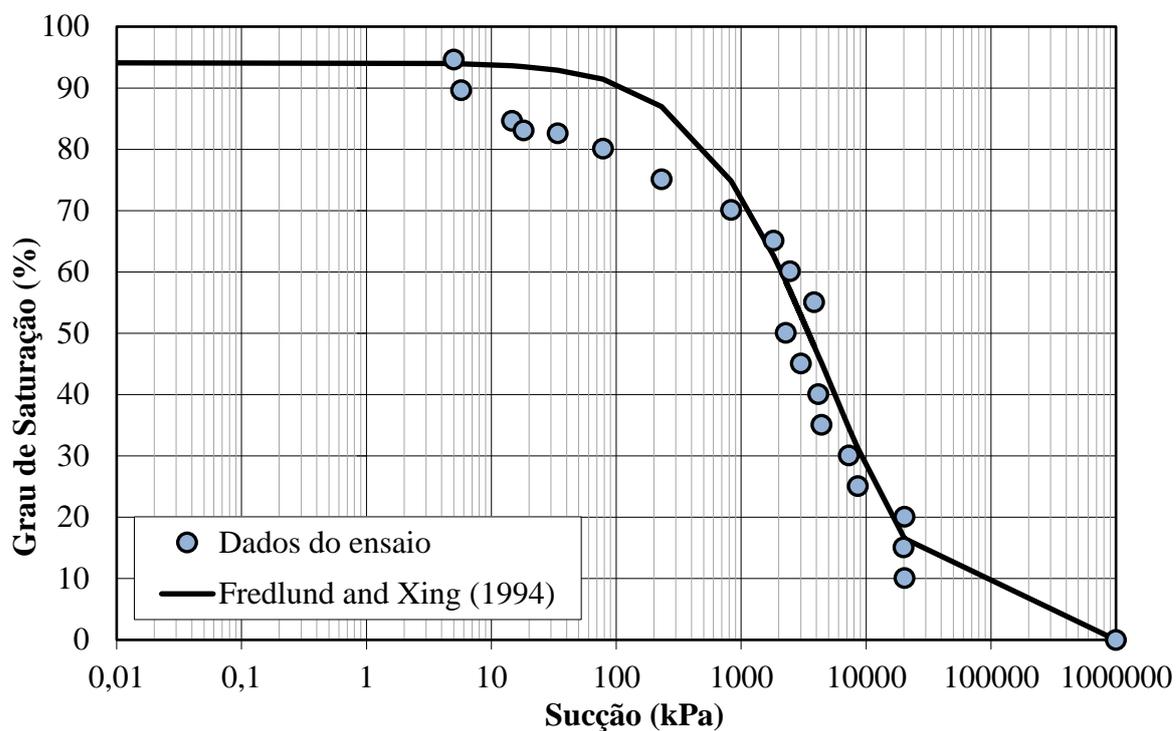
Ajuste da curva característica do solo AS-EN pelo modelo de Fredlund e Xing (1994)



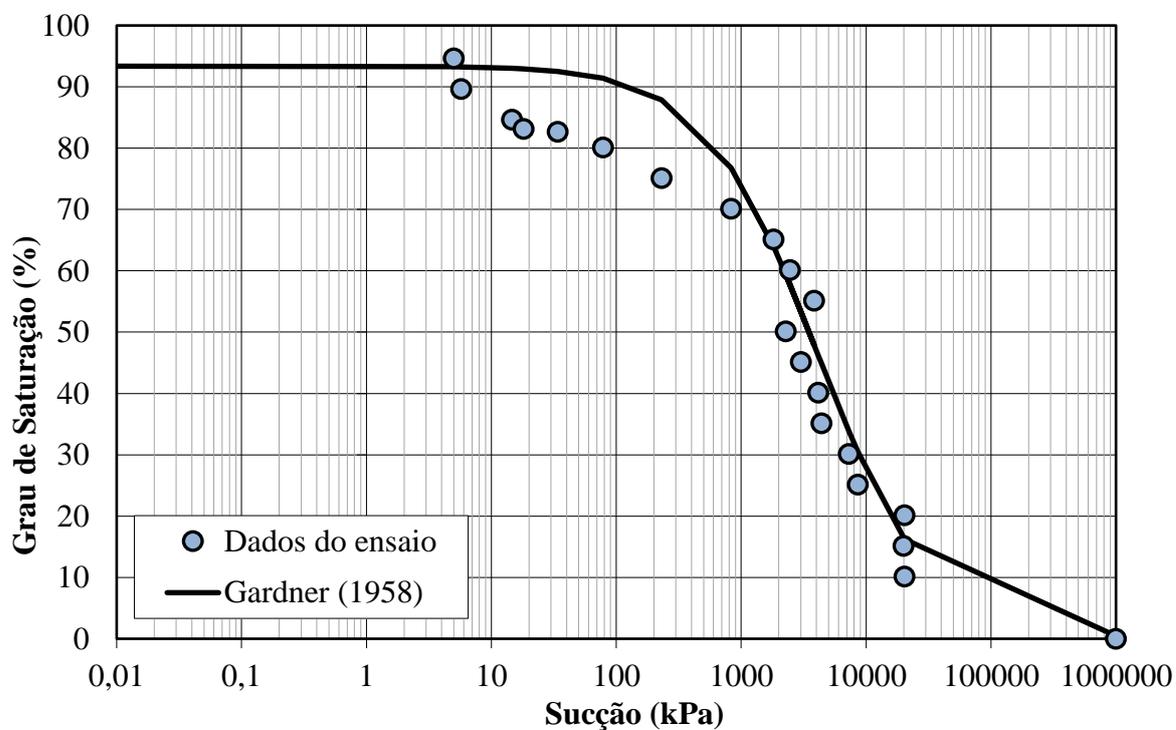
Ajuste da curva característica do solo AS-EN pelo modelo de Gardner (1958)



Ajuste da curva característica do solo SRA-EN pelo modelo de Gitirana Jr e Fredlund (2004)  
– Unimodal (dois pontos)



Ajuste da curva característica do solo SRA-EN pelo modelo de Fredlund e Xing (1994)



Ajuste da curva característica do solo SRA-EN pelo modelo de Gardner (1958)

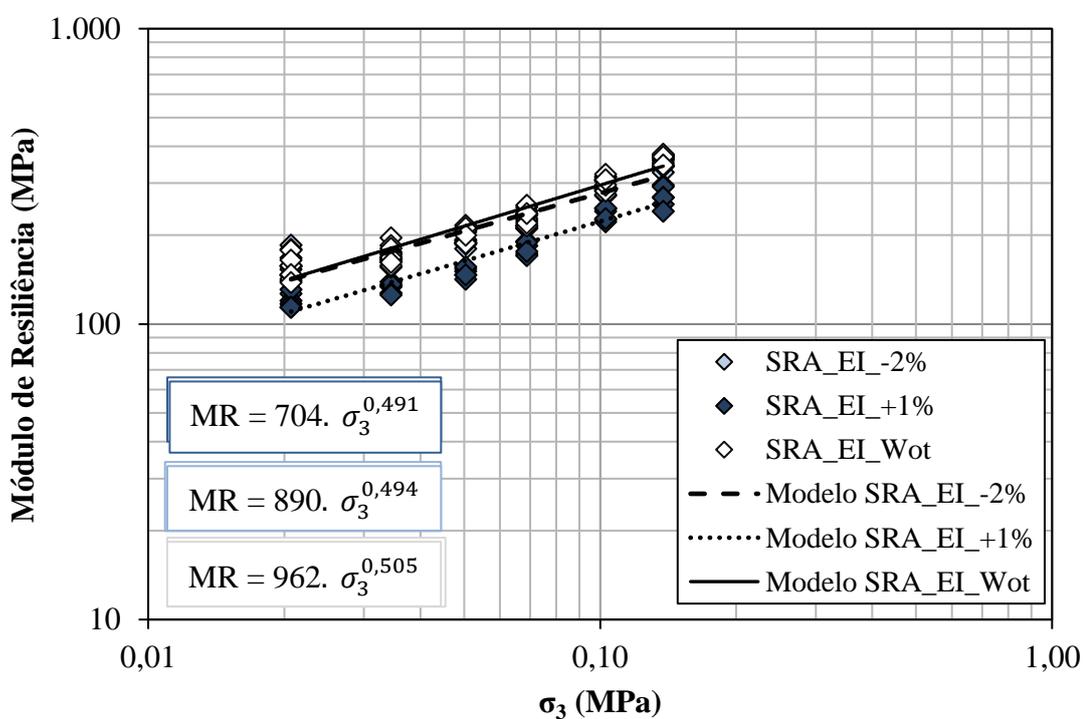
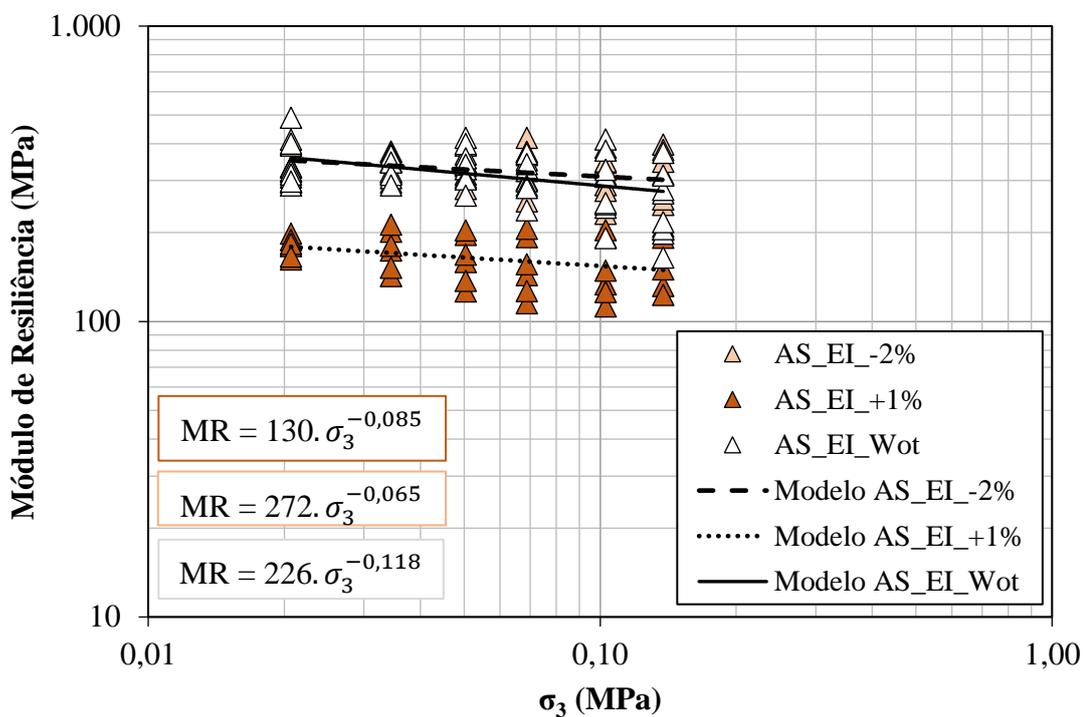
## **APÊNDICE B**

Resumo dos parâmetros físicos alcançados nas moldagens dos CPs para os ensaios de MR

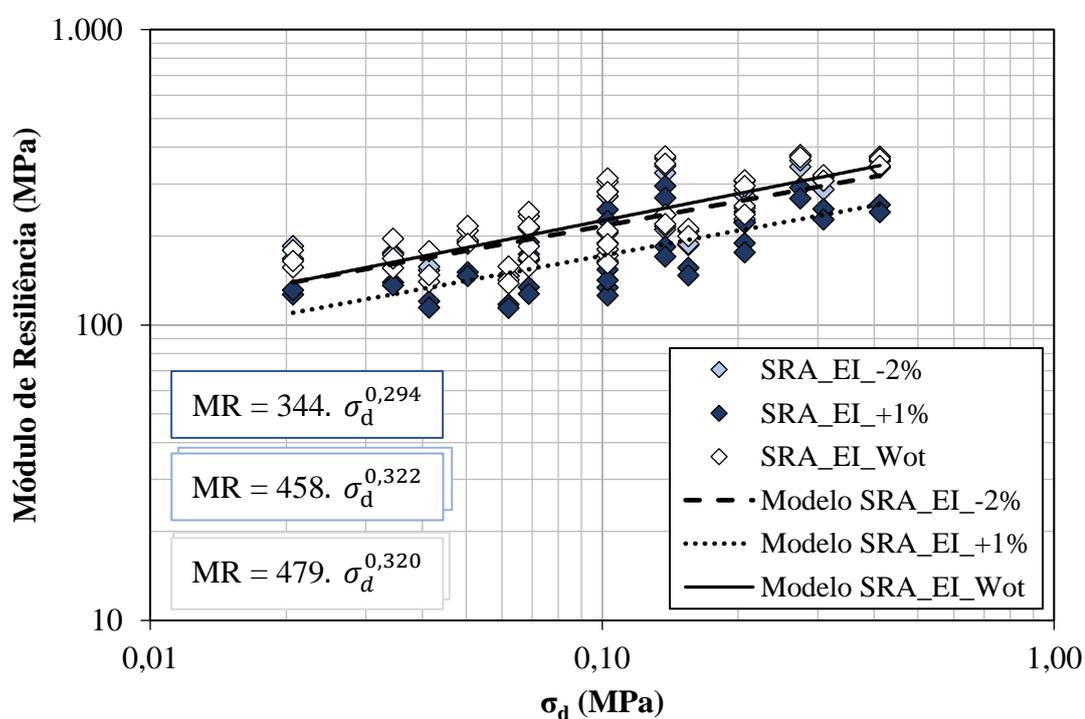
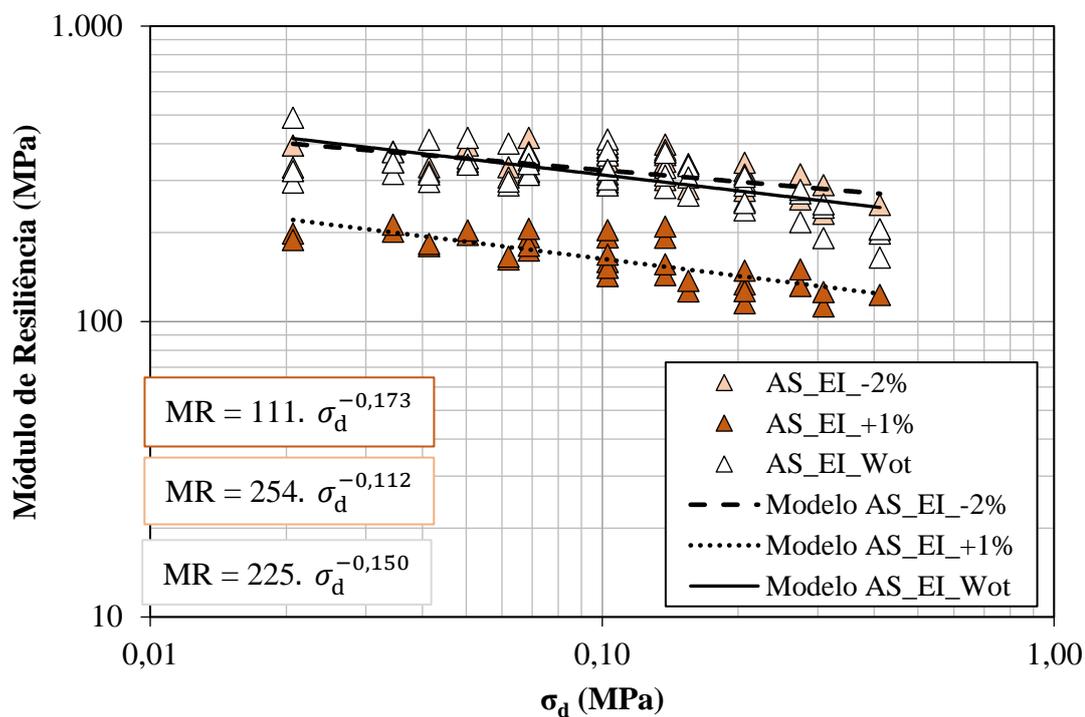
Solo	Energia de compactação	Variação de umidade	Índices físicos				Parâmetros obtidos na compactação dos CPs					
			w (%)	$\rho_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	e	S (%)	CP	w (%)	$\rho_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	GC (%)	e	S (%)
AS	Intermediária	-2	19,4	1,677	0,643	83,1	1	19,1	1,671	99,6	0,649	81,7
			2	19,2	1,669	99,5	0,651	82,3				
		1	22,4	1,677	0,643	96,0	1	22,6	1,657	99,8	0,663	96,6
			2	22,2	1,619	96,6	0,702	95,1				
	Normal	-2	21,3	1,539	0,791	74,2	1	21,2	1,531	99,5	0,800	73,7
			2	21,0	1,532	99,6	0,799	73,2				
		1	24,3	1,539	0,791	84,7	1	23,9	1,589	103,2	0,734	83,1
			2	24,5	1,557	101,2	0,770	85,4				
SRA	Intermediária	-2	9	1,982	0,339	70,4	1	9,5	1,886	95,2	0,407	74,1
			2	9,1	1,895	95,6	0,401	71,2				
		1	12	1,982	0,339	93,9	1	12,4	1,944	98,1	0,365	96,8
			2	12,6	1,948	98,3	0,363	98,3				
	Normal	-2	10,1	1,912	0,388	69,1	1	10,7	1,886	98,6	0,407	72,9
			2	10,1	1,888	98,7	0,406	69,0				
		1	13,1	1,912	0,388	89,6	1	12,9	1,900	99,4	0,397	88,0
			2	13,2	1,911	99,9	0,389	90,1				

## **APÊNCICE C**

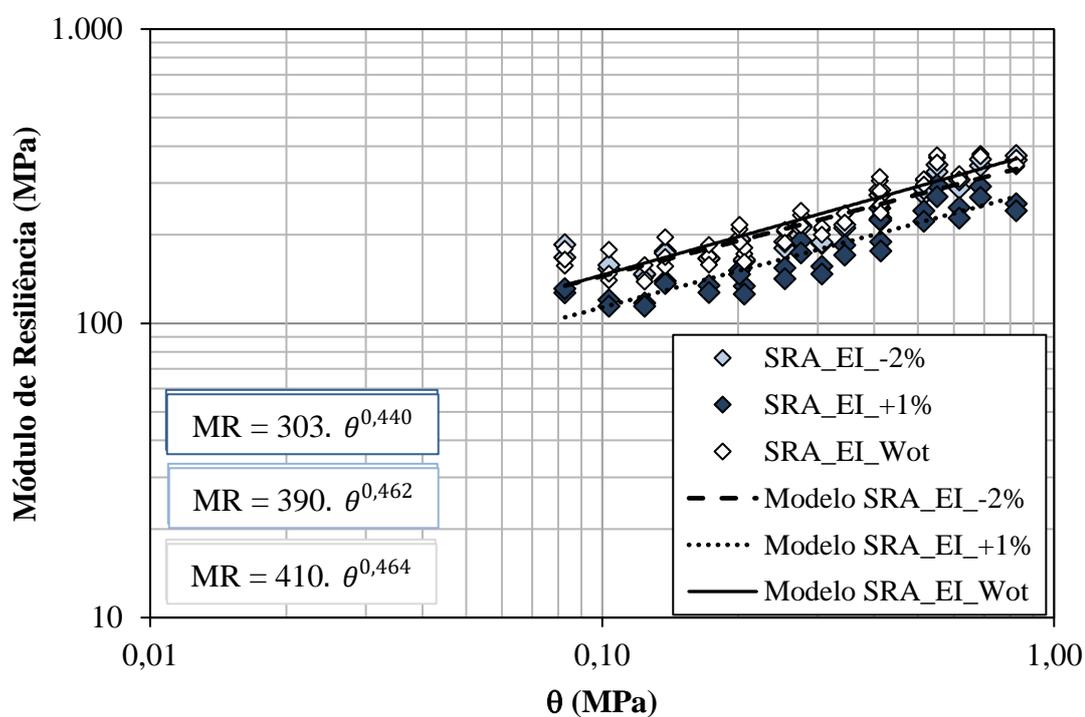
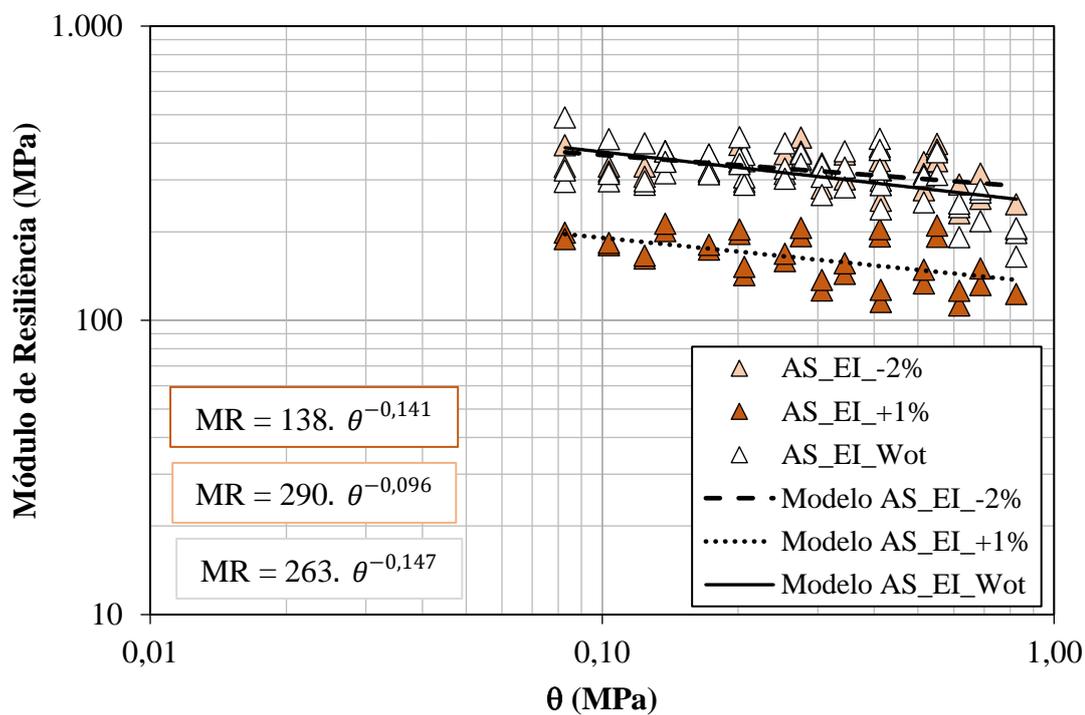
Gráficos obtidos para os modelos que consideram a tensão desvio, tensão confinante e primeiro invariante de tensões para obtenção de MR



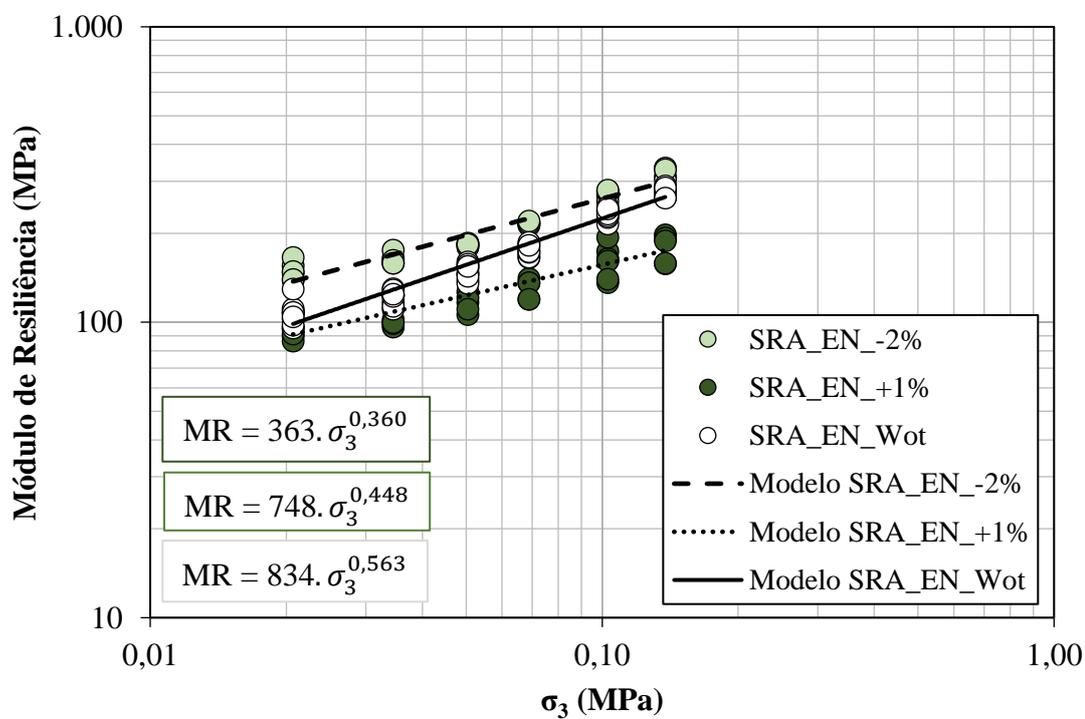
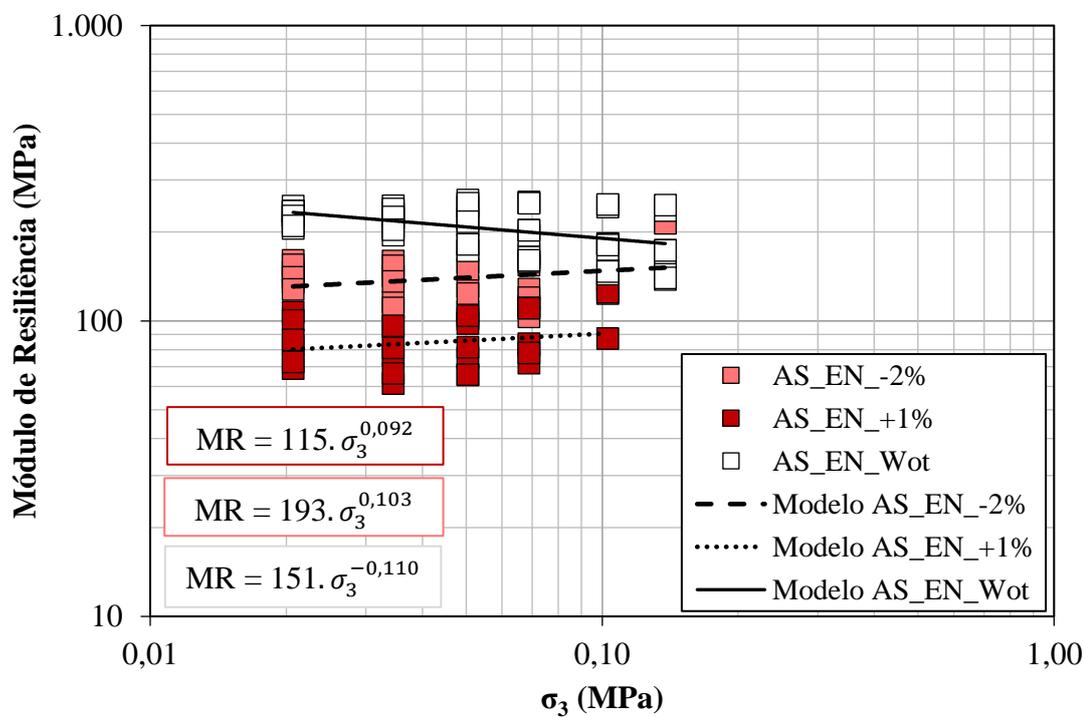
Gráficos de MR versus  $\sigma_3$  para os dois solos em estudo na energia intermediária



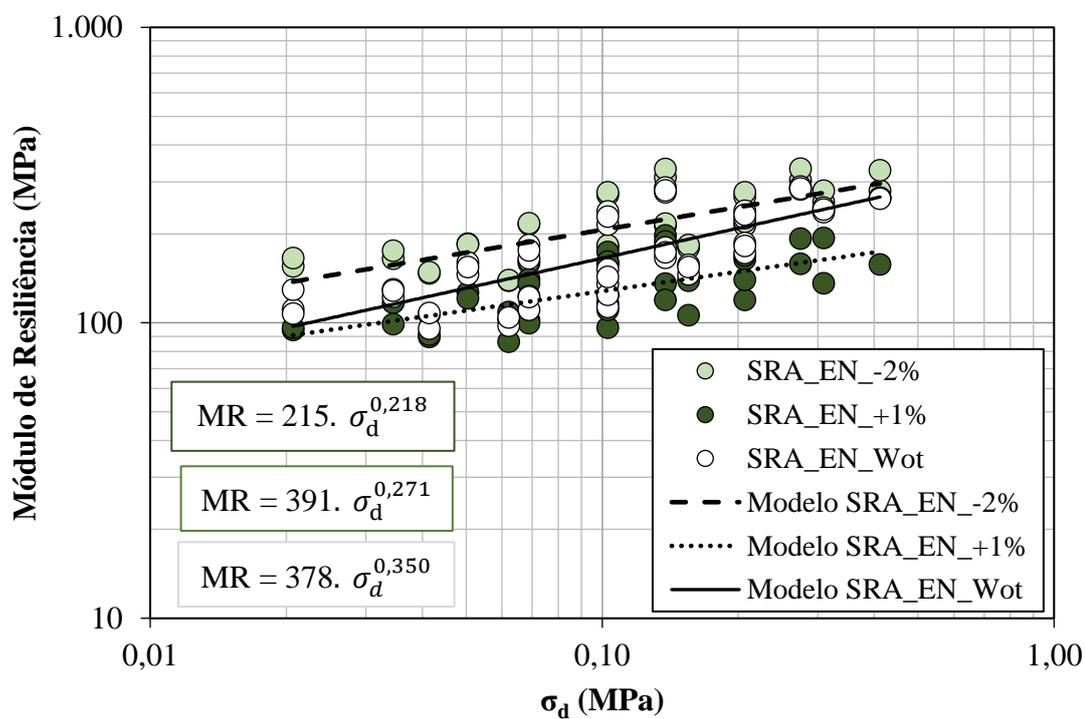
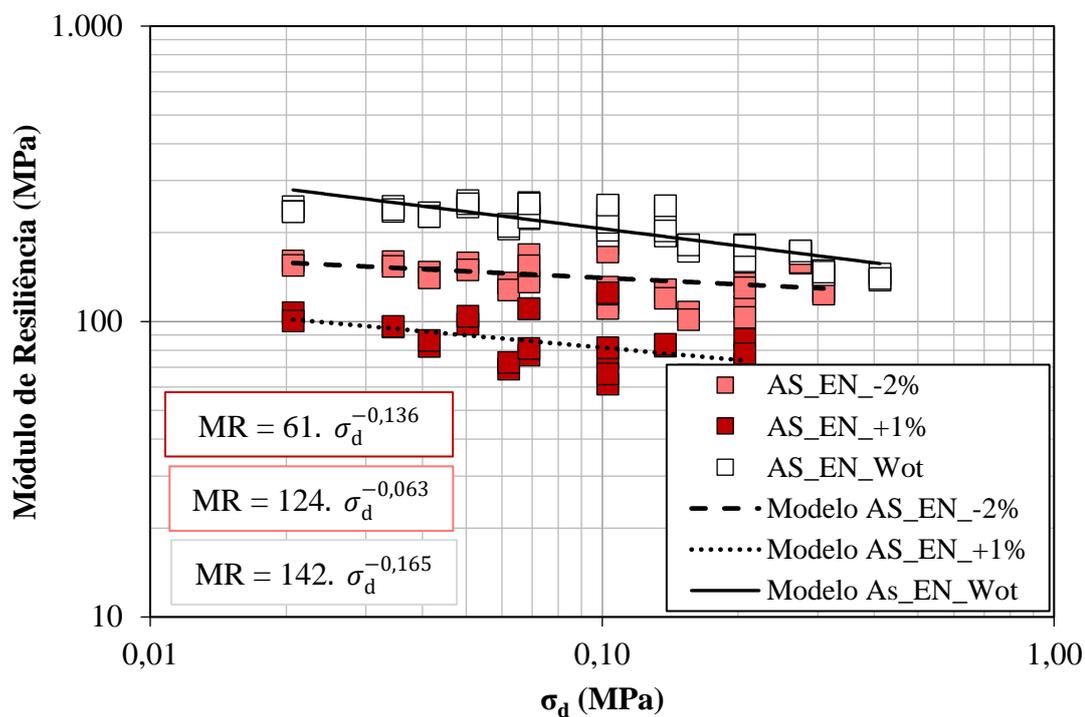
Gráficos de MR versus  $\sigma_d$  para os dois solos em estudo na energia intermediária



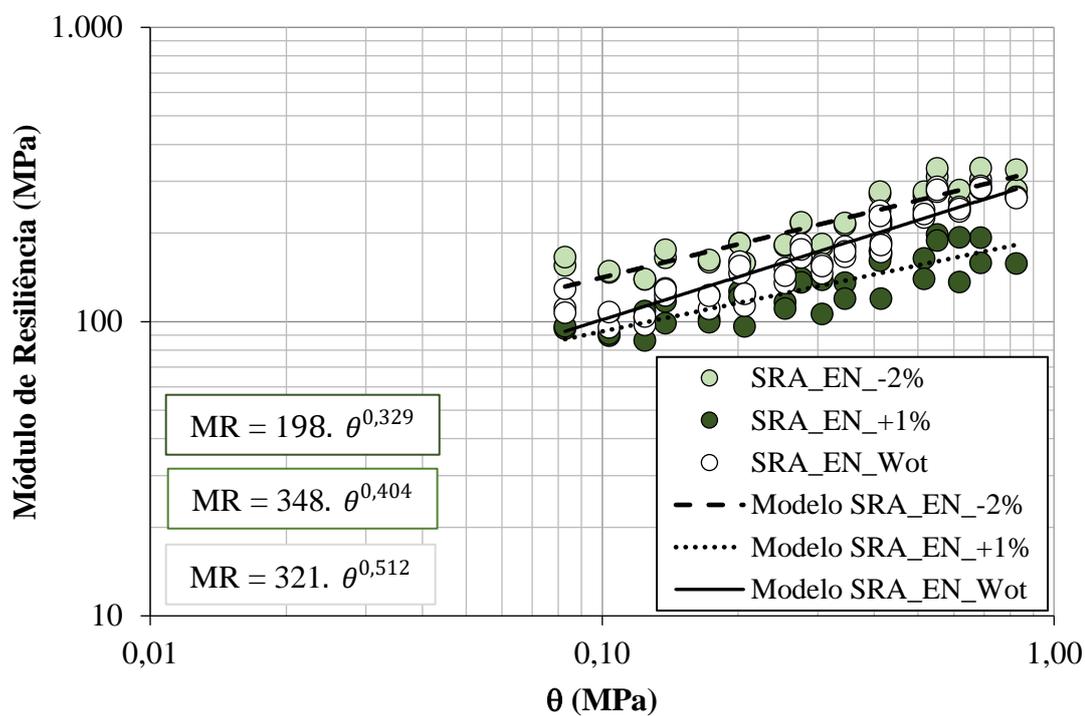
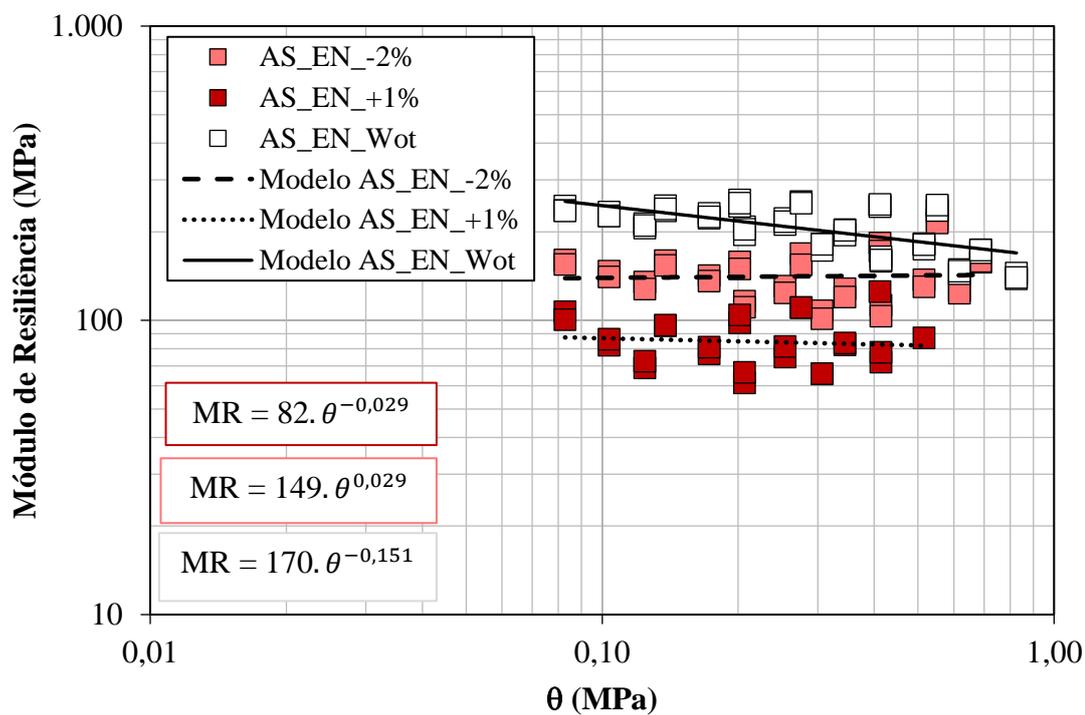
Gráficos de MR versus  $\theta$  para os dois solos em estudo na energia intermediária



Gráficos de MR versus  $\sigma_3$  para os dois solos em estudo na energia normal



Gráficos de MR versus  $\sigma_d$  para os dois solos em estudo na energia normal



Gráficos de MR versus  $\theta$  para os dois solos em estudo na energia normal

## **APÊNDICE D**

Resumo dos parâmetros físicos obtidos nas moldagens dos CPs para os ensaios de DP

Material	Variação de umidade	CP	$\sigma_3$ (kPa)	$\sigma_d$ (kPa)	Índices físicos				Parâmetros obtidos na compactação dos CPs				
					w (%)	$\rho_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	e	S (%)	w (%)	$\rho_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	GC (%)	e	S (%)
AS-EI	-2	1	40	40					19,2	1,685	100	0,575	88,4
		3	40	120					20,1	1,674	100	0,586	90,9
		4	80	80	19,4	1,677	0,643	83,1	19,2	1,686	101	0,574	88,7
		6	80	240					19,3	1,689	101	0,572	89,4
		8	120	240					18,9	1,686	101	0,575	87,1
		9	120	360					19,5	1,655	99	0,672	80,4
	1	1	40	40					23,1	1,652	98,5	0,606	101,3
		3	40	120					22,7	1,671	99,6	0,589	102,5
		4	80	80	22,4	1,677	0,643	96,0	22,9	1,67	99,6	0,589	103,4
		6	80	240					22,4	1,678	100,1	0,582	102,2
		8	120	240					22,1	1,668	99,5	0,591	99,3
		9	120	360					21,9	1,689	100,7	0,571	100,7
AS-EN	-2	1	40	40					21,5	1,533	100	0,804	74,0
		3	40	120					21,8	1,546	102	0,695	79,4
		4	80	80	21,3	1,539	0,791	74,2	21,5	1,548	101	0,787	75,7
		6	80	240					21,9	1,511	98	0,831	72,9
		8	120	240					21,4	1,57	102	0,691	82,3
		9	120	360					21,8	1,568	102	0,693	84,2
	1	1	40	40					23,9	1,569	102	0,697	90,4
		3	40	120					24,2	1,534	100	0,804	83,2
		4	80	80	24,3	1,539	0,791	84,7	23,8	1,589	103	0,671	94,2
		6	80	240					23,8	1,569	102	0,697	90,4
		8	120	240					23,7	1,564	102	0,697	90,4

SRA-EI	-2	9	120	360	9	1,982	0,339	70,4	23,9	1,596	104	0,663	95,6
		1	40	40					9	1,968	99	0,406	61,5
		3	40	120					8,9	1,987	100	0,336	70,7
		4	80	80					9,1	1,996	99	0,407	62,1
		6	80	240					8,7	1,941	98	0,367	63,2
		8	120	240					8,6	1,964	99	0,351	62,5
		9	120	360					8,6	1,973	100	0,345	64,9
	1	1	40	40	12	1,982	0,339	93,9	12	1,947	98	0,363	87,7
		3	40	120					11,5	1,981	100	0,34	89,8
		4	80	80					11,7	1,963	99	0,352	87,7
		6	80	240					12,2	1,968	99	0,406	83,2
		8	120	240					11,8	1,982	100	0,339	92,3
		9	120	360					11,6	1,956	99	0,357	86,3
		SRA-EN	-2	1					40	40	10,1	1,912	0,388
3	40			120	10,7	1,907	100	0,451	65,5				
4	80			80	10	1,879	98	0,413	64,6				
6	80			240	10,2	1,949	102	0,362	74,9				
8	120			240	10,1	1,893	99	0,402	66,5				
9	120			360	9,6	1,858	97	0,429	59,3				
1	1			40	40	13,1	1,912	0,388	89,6	13,3			
	3		40	120	13,5					1,942	102	0,367	97,3
	4		80	80	13,4					1,922	101	0,38	93,4
	6		80	240	13					1,887	99	0,406	85,1
	8		120	240	13					1,867	98	0,421	82,1
	9		120	360	13,1					1,907	100	0,392	88,6

## **APÊNCICE E**

### **Resultados de DP**

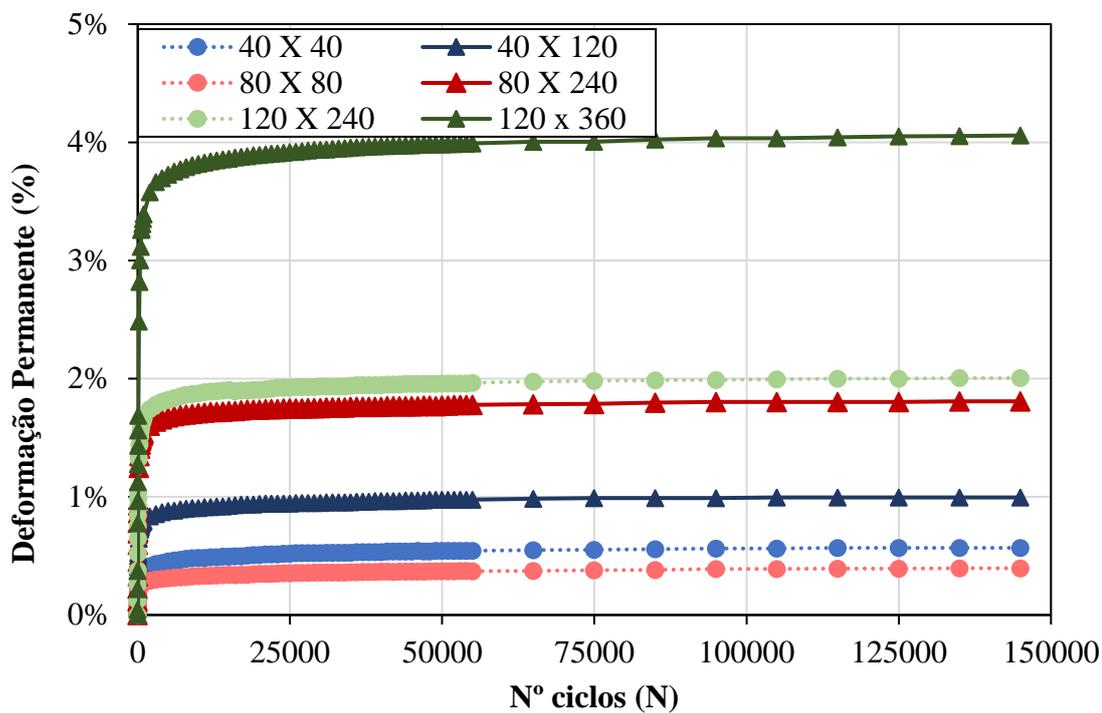


Gráfico de DP x número de ciclos para o solo AS-EI com +1% de umidade em relação a umidade ótima

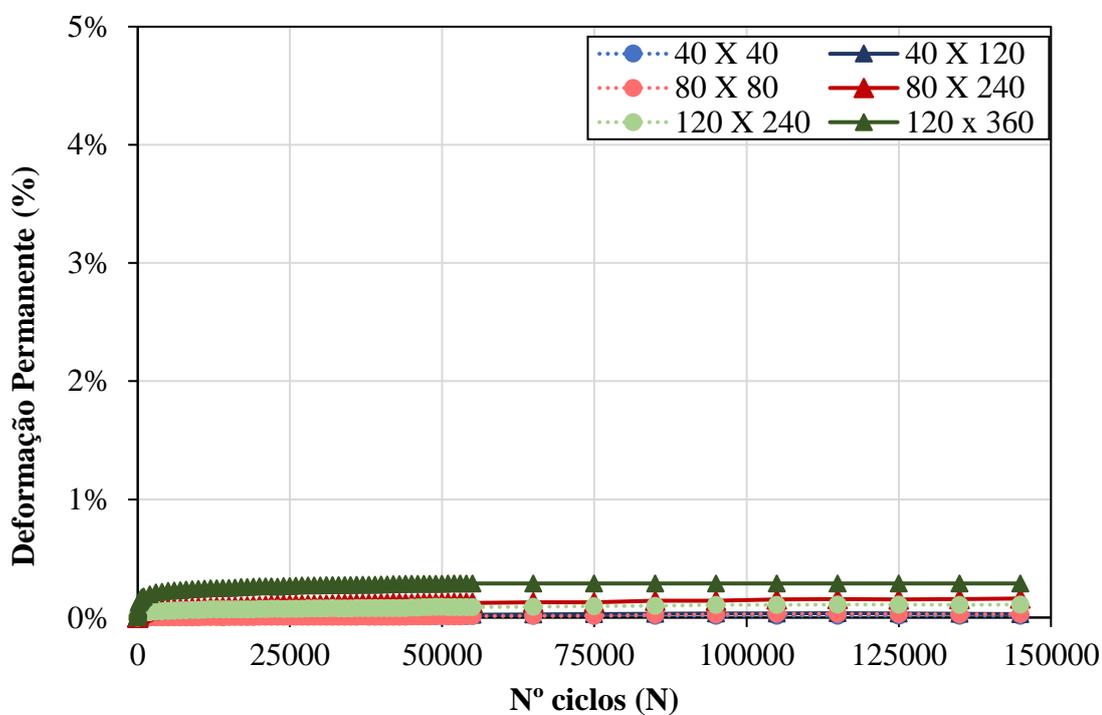


Gráfico de DP x número de ciclos para o solo AS-EI com -2% de umidade em relação a umidade ótima

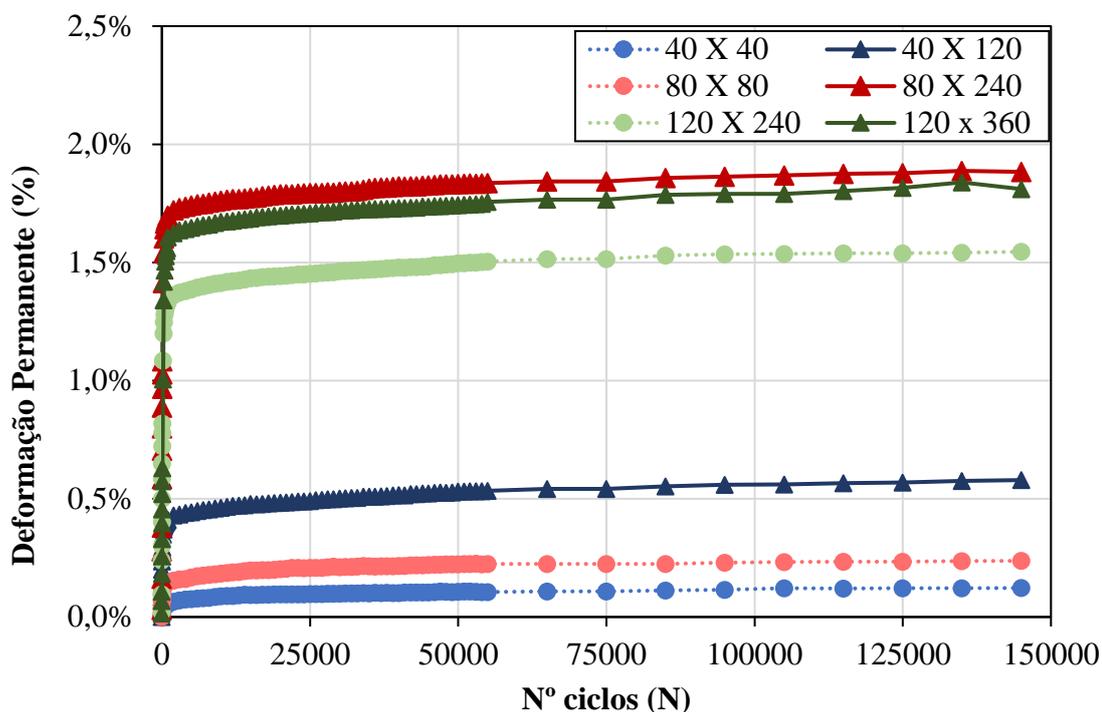


Gráfico de DP x número de ciclos para o solo SRA-EI com +1% de umidade em relação a umidade ótima

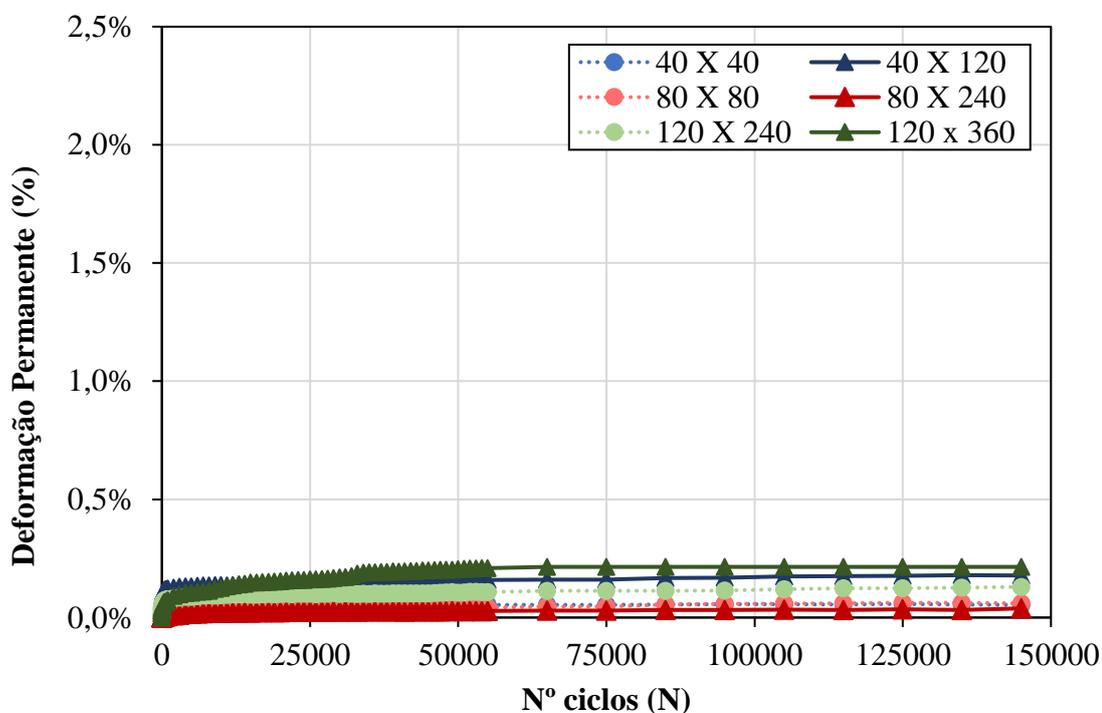


Gráfico de DP x número de ciclos para o solo SRA-EI com -2% de umidade em relação a umidade ótima

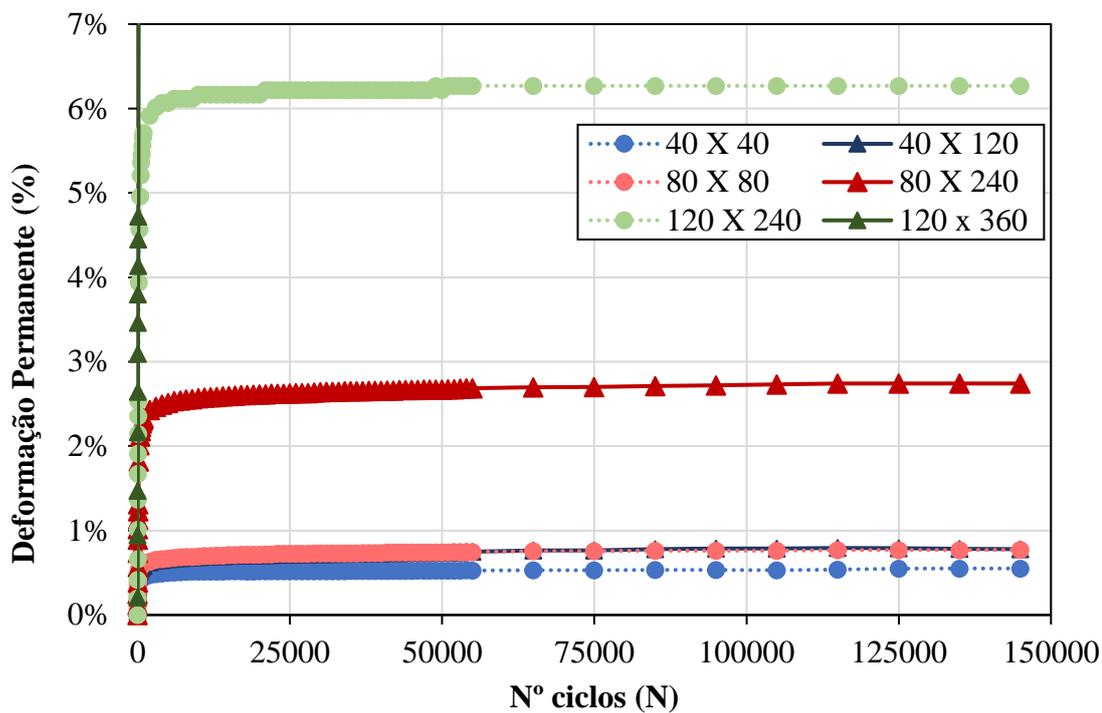


Gráfico de DP x número de ciclos para o solo AS-EN com +1% de umidade em relação a umidade ótima

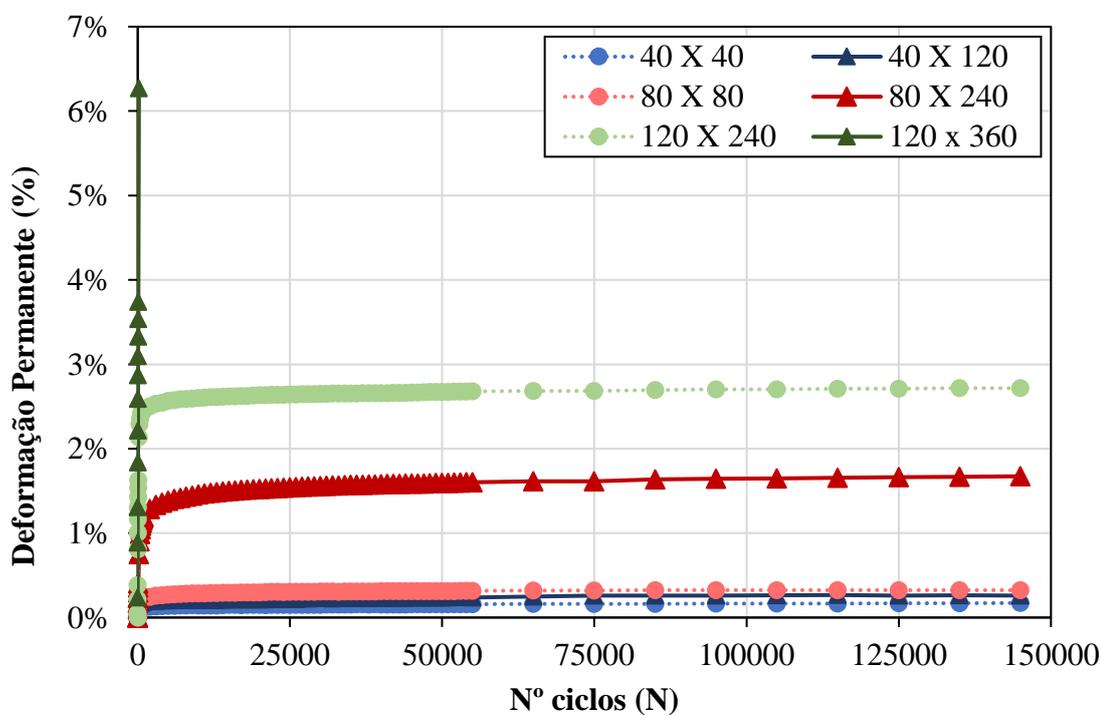


Gráfico de DP x número de ciclos para o solo AS-EN com -2% de umidade em relação a umidade ótima

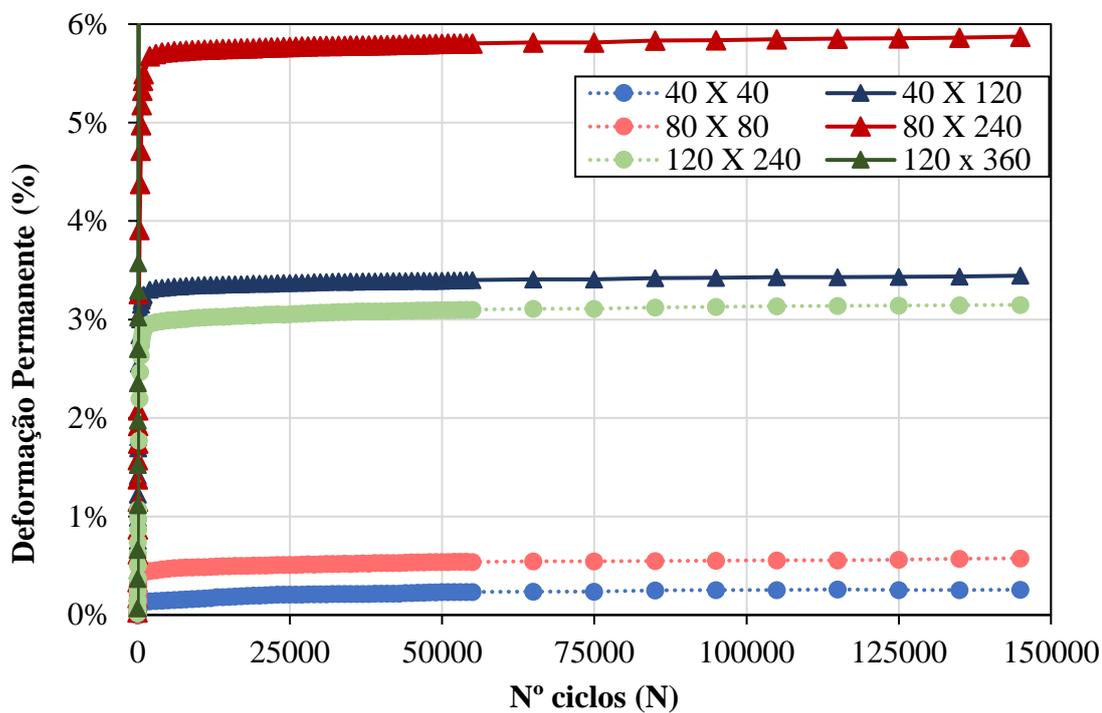


Gráfico de DP x número de ciclos para o solo SRA-EN com +1% de umidade em relação a umidade ótima

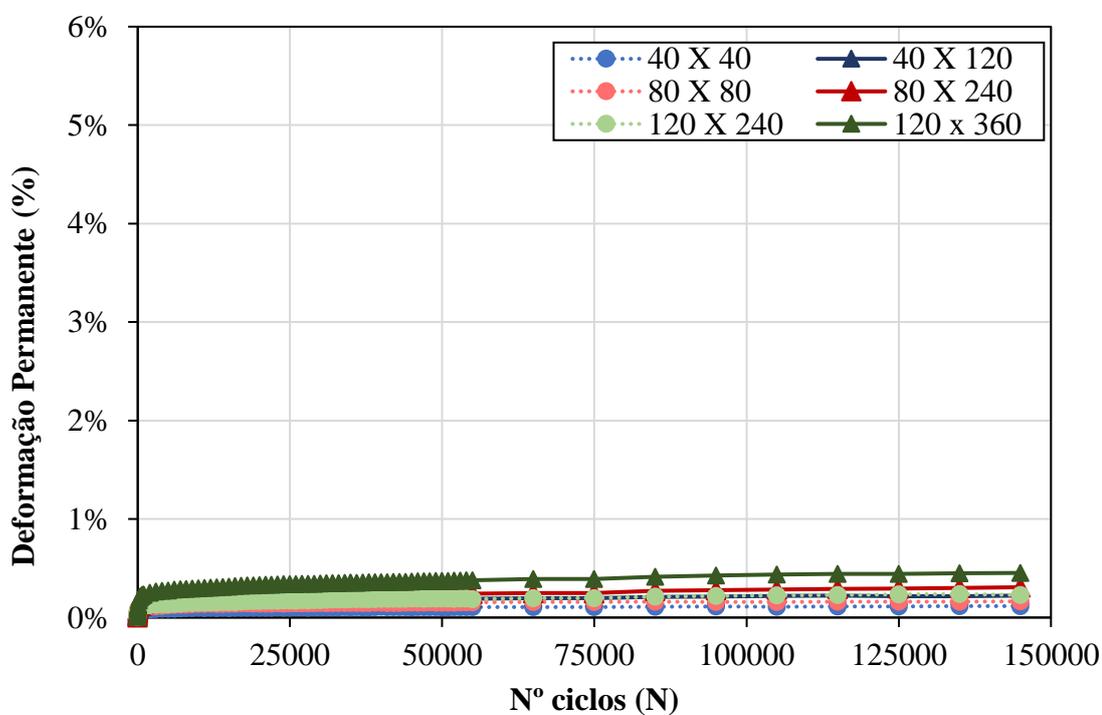
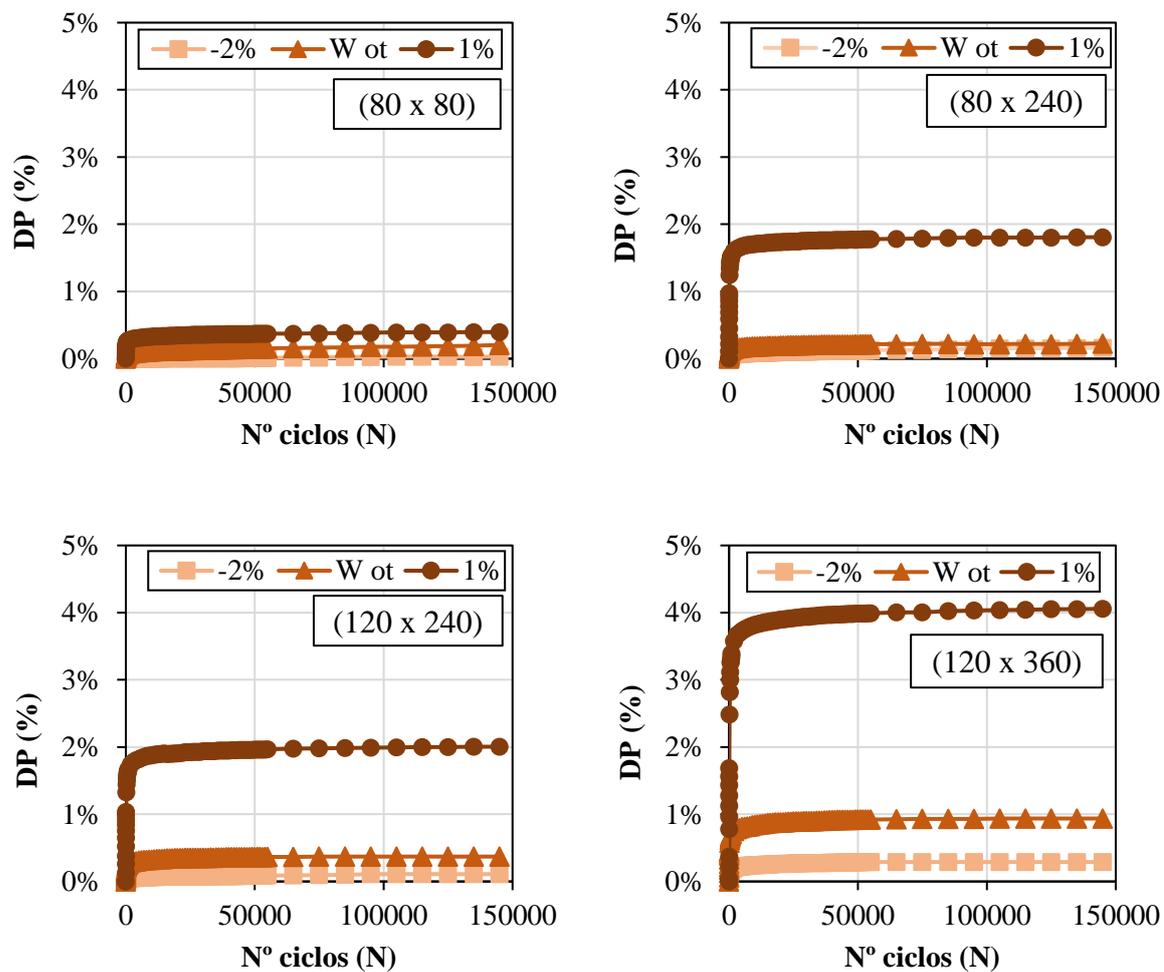


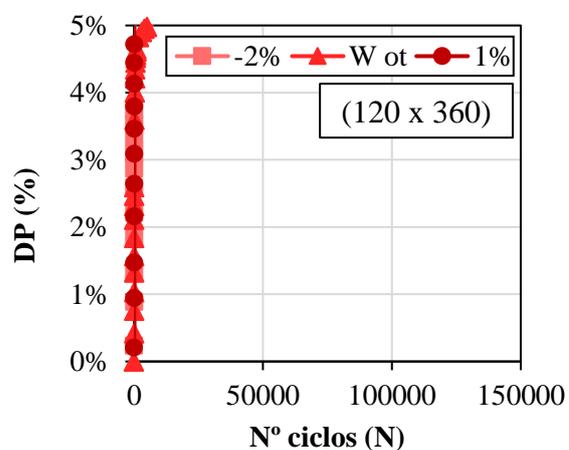
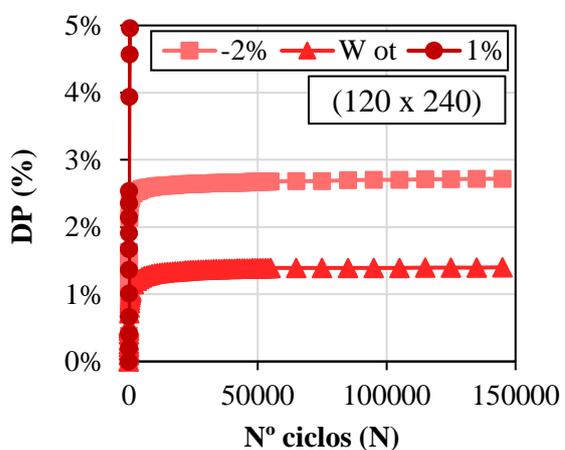
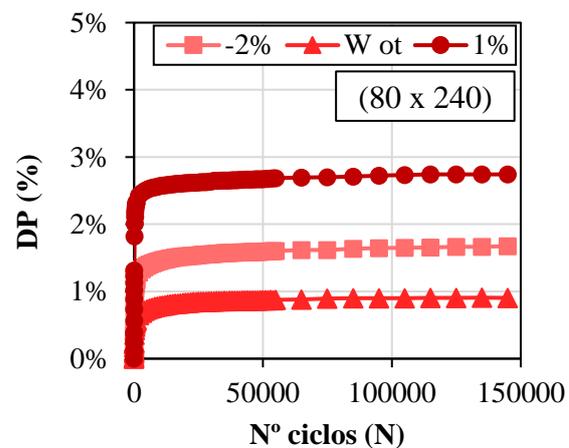
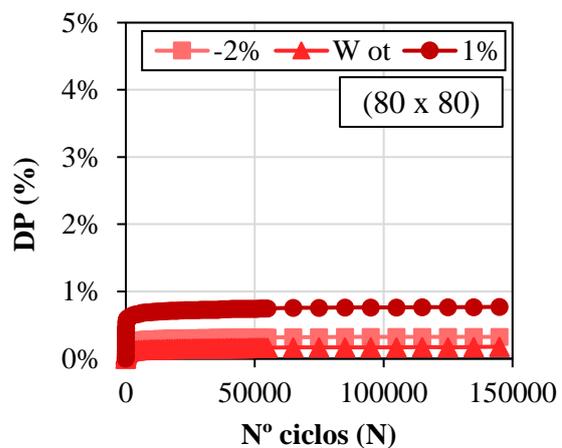
Gráfico de DP x número de ciclos para o solo SRA-EN com -2% de umidade em relação a umidade ótima

## **APÊNDICE F**

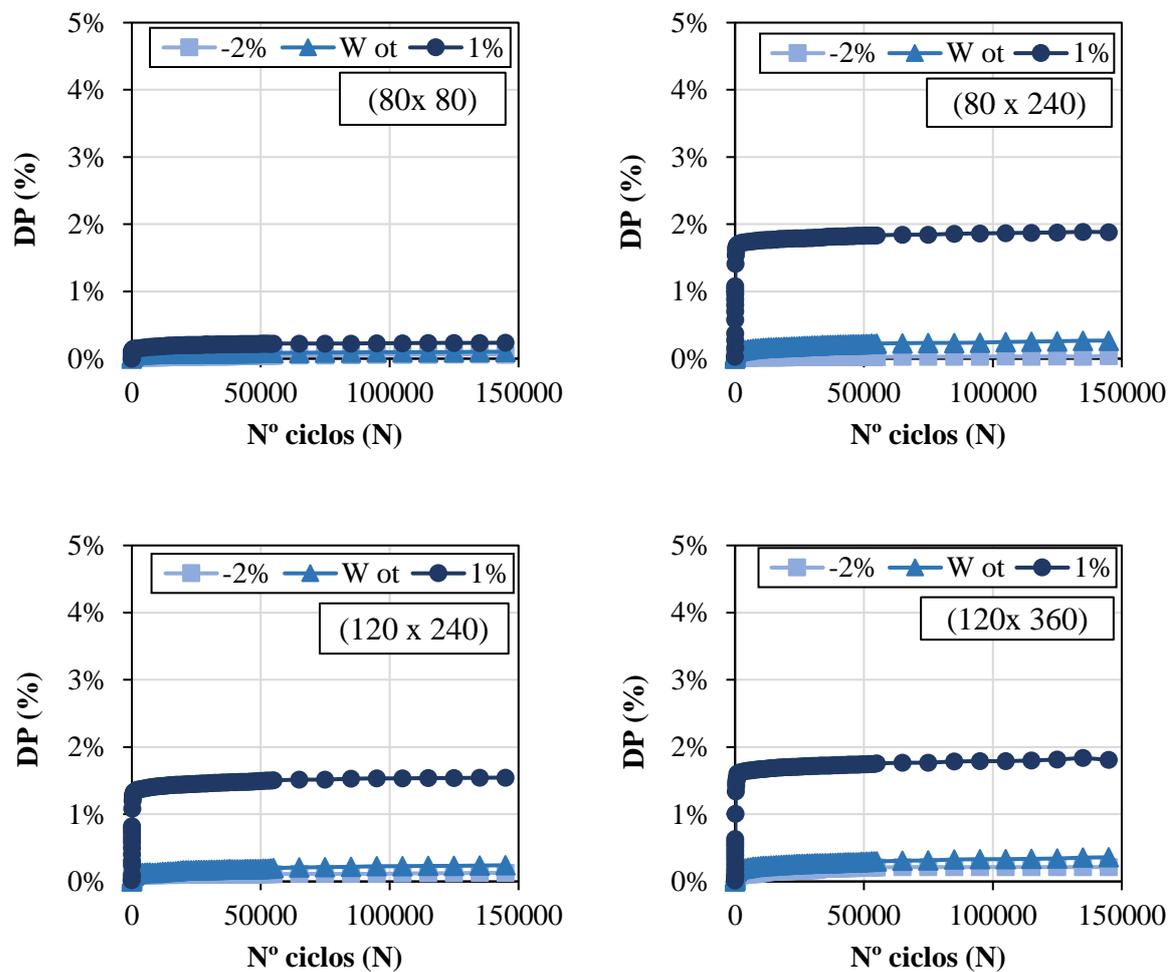
Influência da variação de umidade na DP considerando os pares de tensões 80x80, 80x240, 120x240 e 120x360 kPa



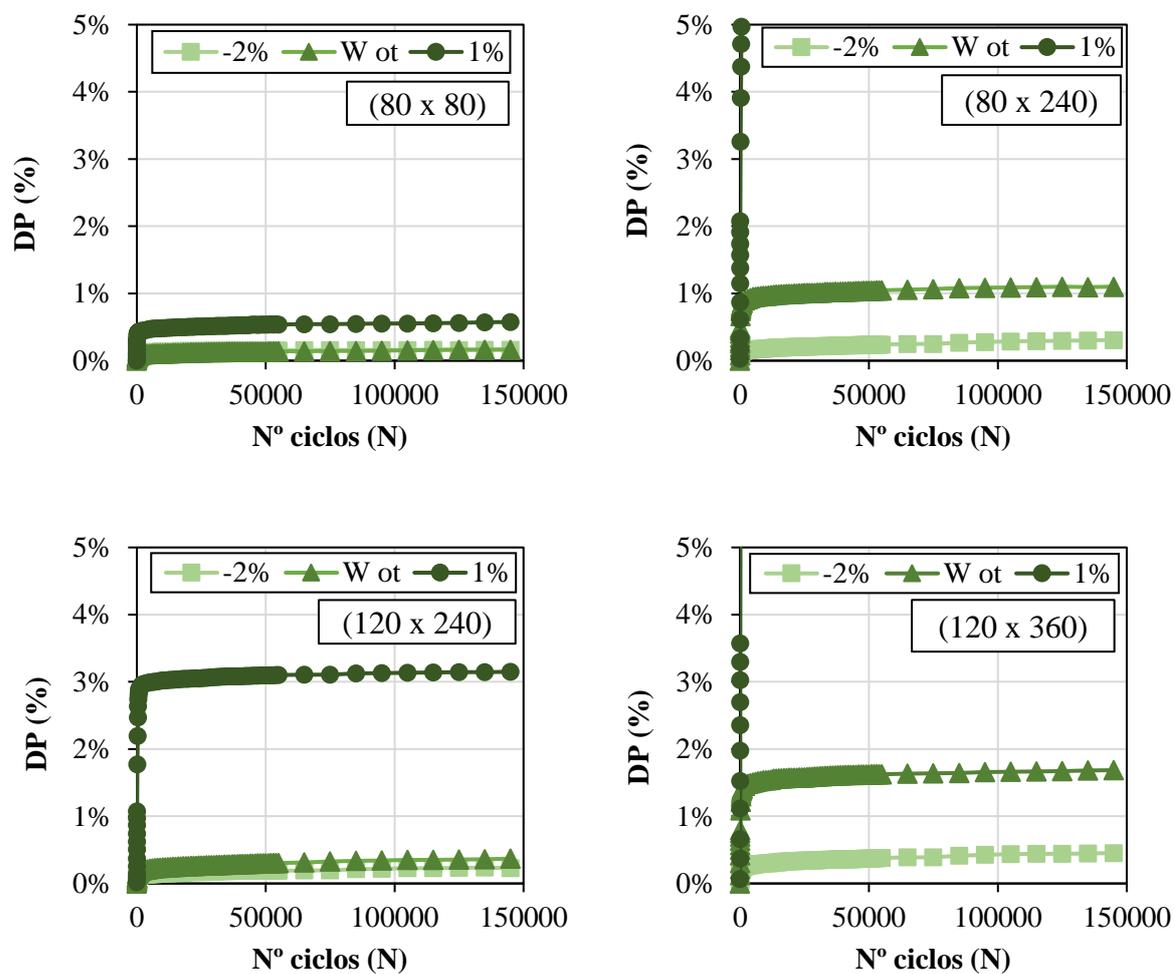
Influência da variação de umidade na DP para o solo AS na energia intermediária



Influência da variação de umidade na DP para o solo AS na energia normal



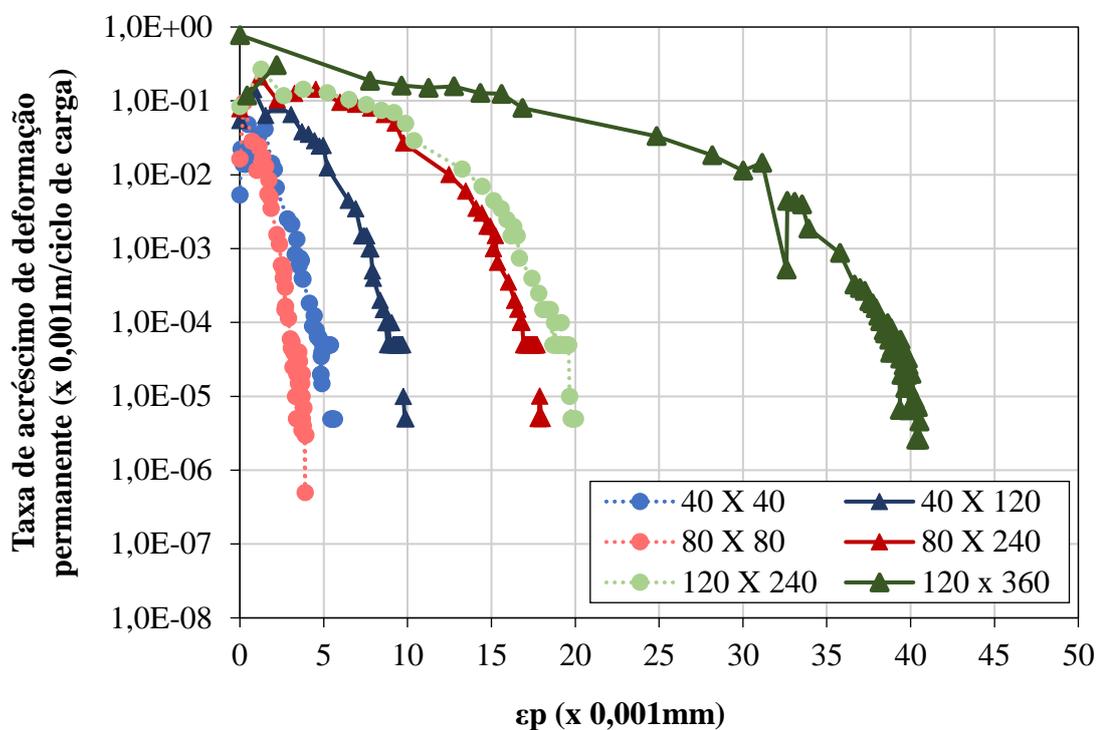
Influência da variação de umidade na DP para o solo SRA na energia intermediária



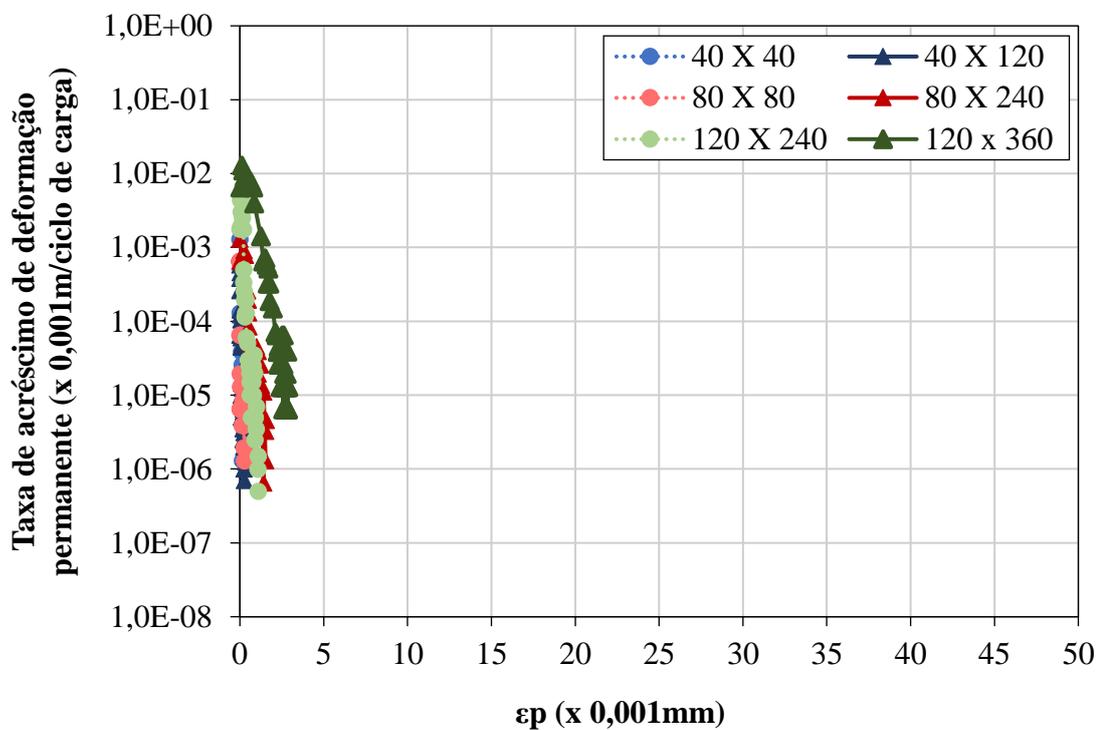
Influência da variação de umidade na DP para o solo SRA na energia normal

## APÊNDICE G

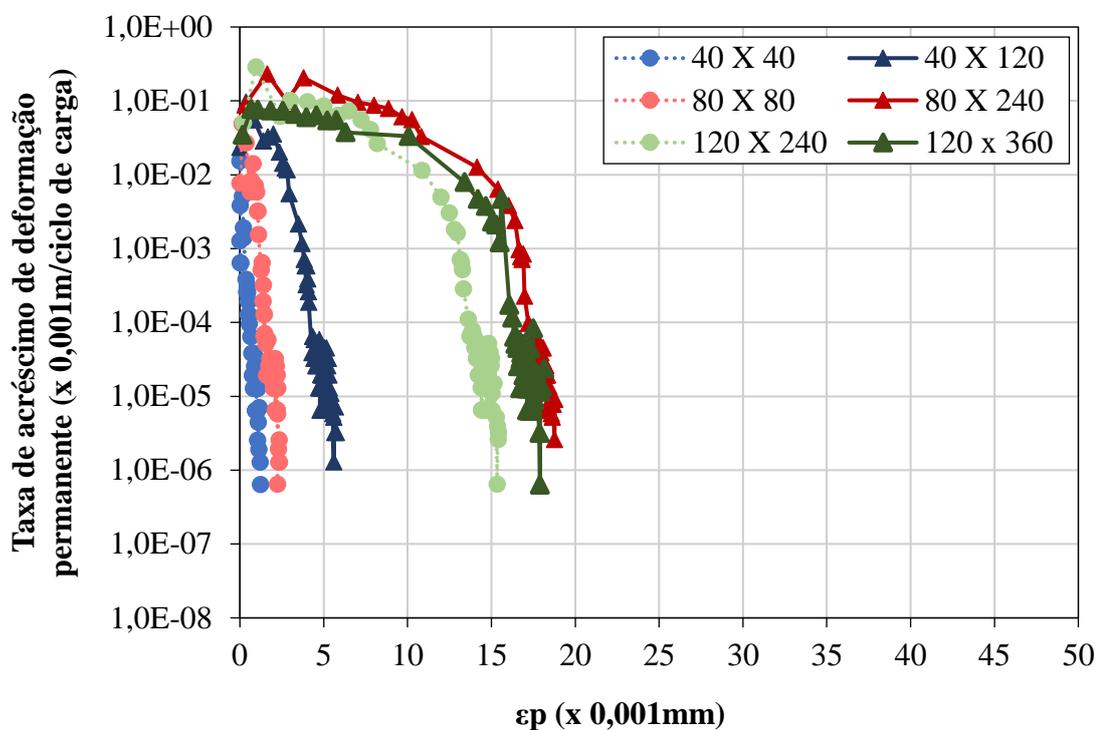
Ocorrência do *Shakedown* para amostras com variação de umidade na compactação



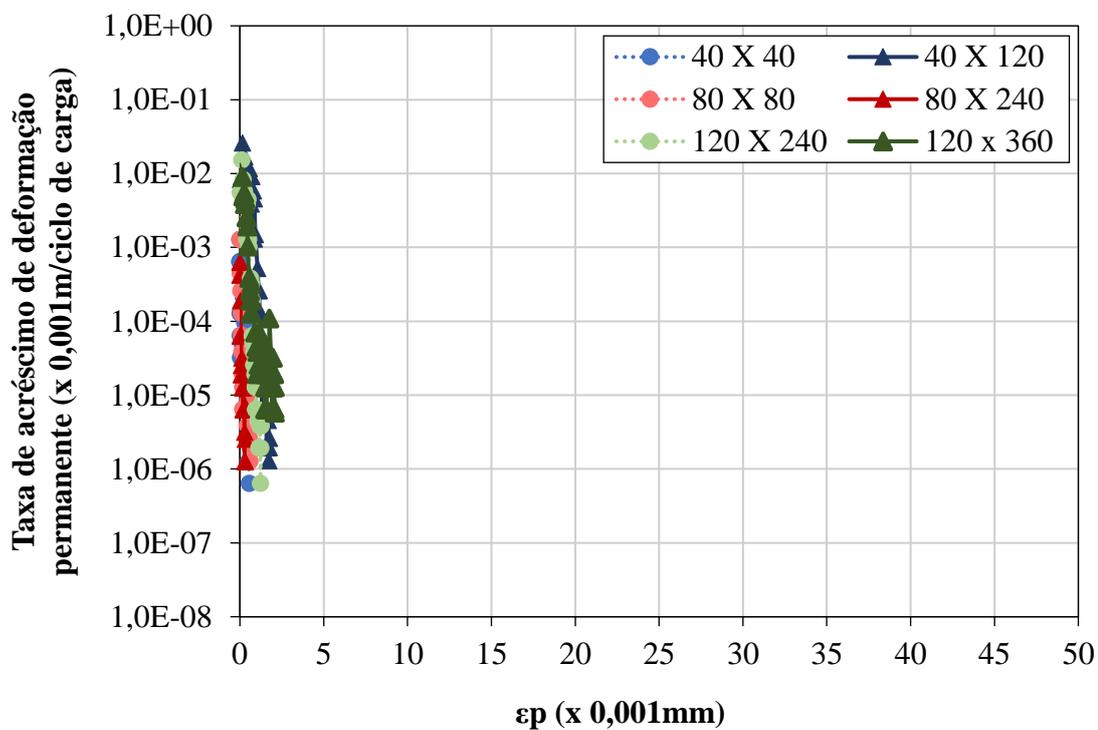
Análise gráfica da taxa de acréscimo da DP para o solo AS-EI+1%



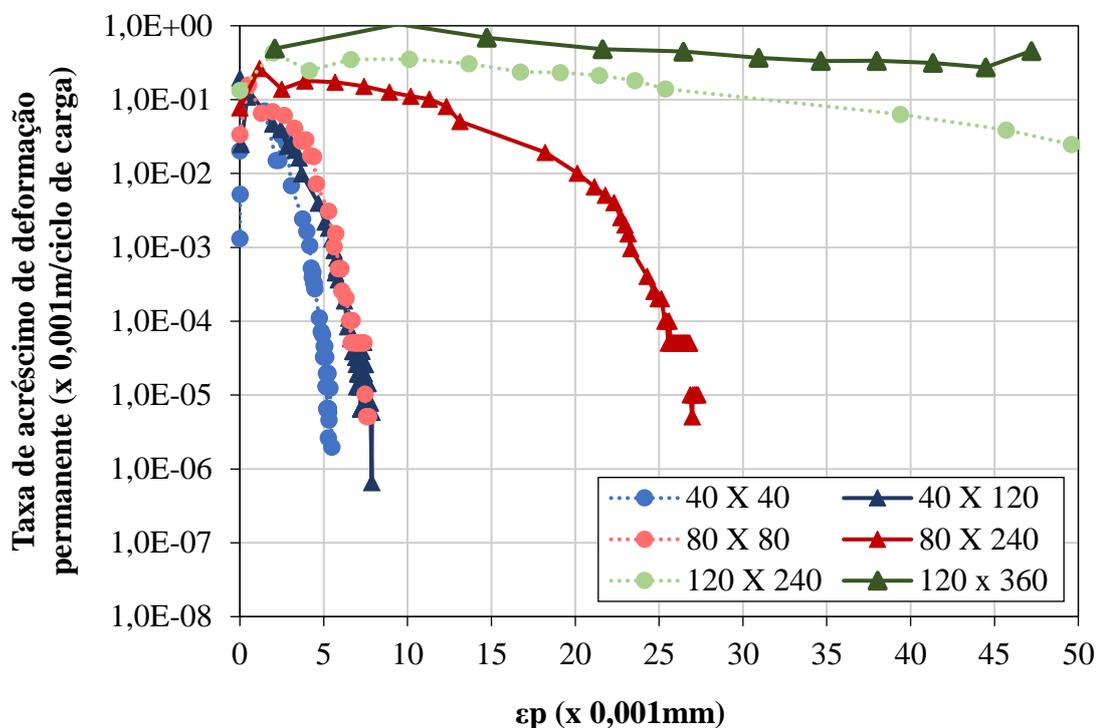
Análise gráfica da taxa de acréscimo da DP para o solo AS-EI-2%



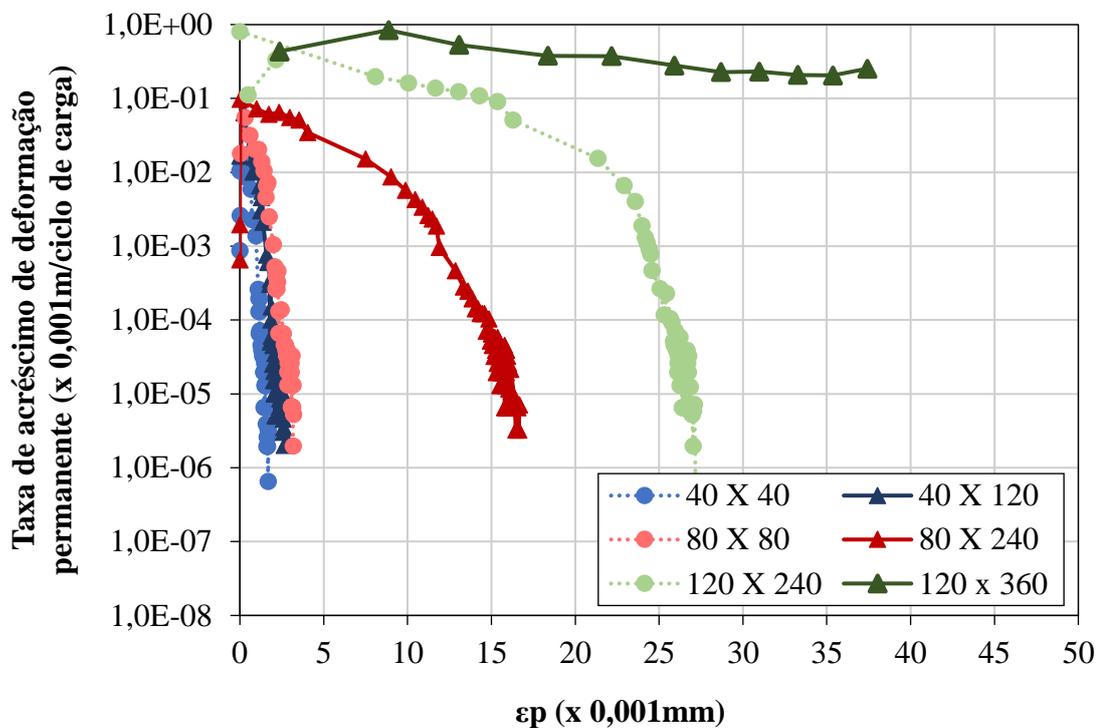
Análise gráfica da taxa de crescimento da DP para o solo SRA-EI+1%



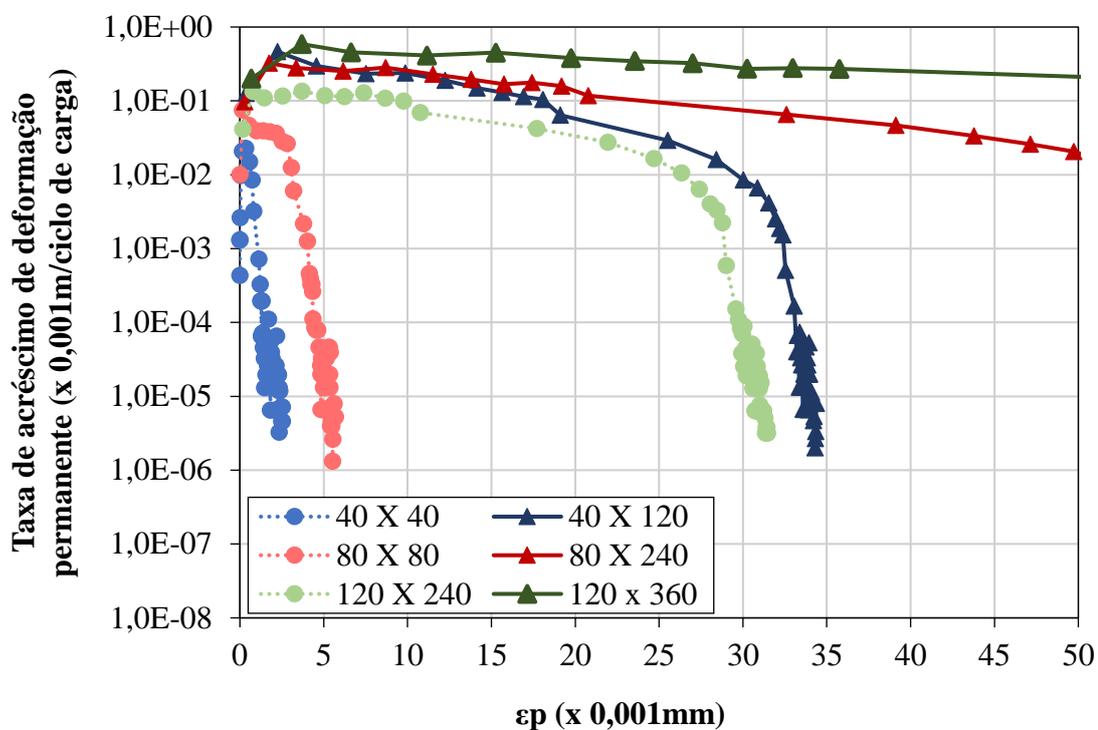
Análise gráfica da taxa de crescimento da DP para o solo SRA-EI-2%



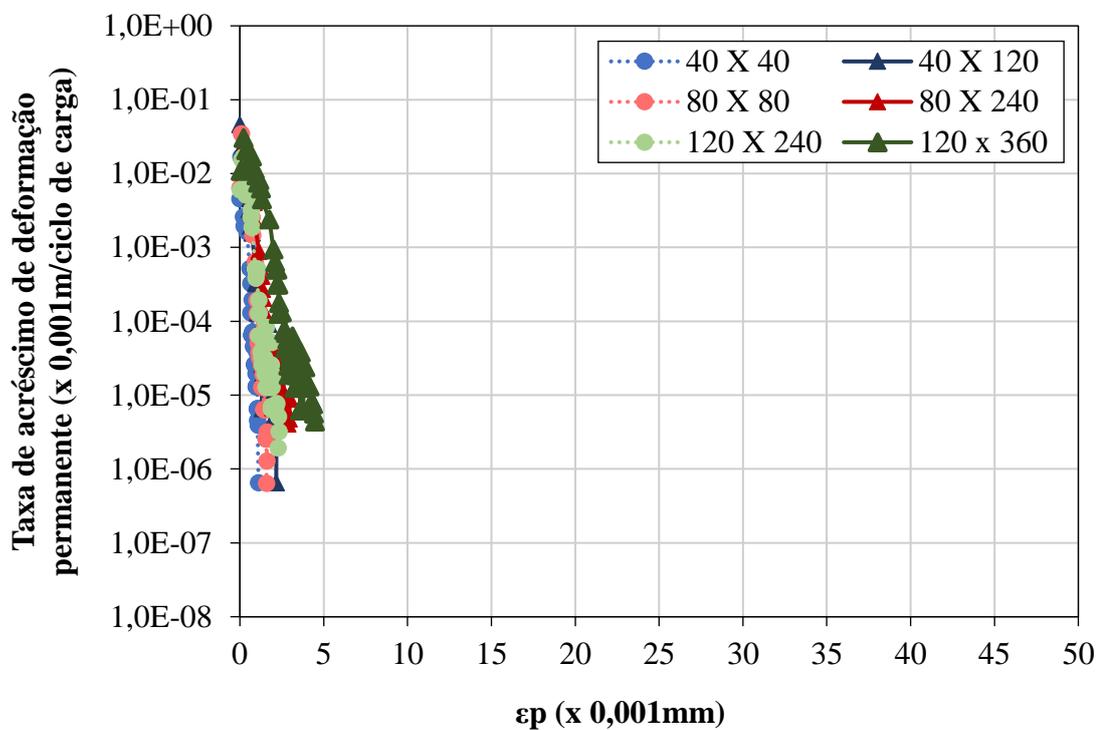
Análise gráfica da taxa de acréscimo da DP para o solo AS-EN+1%



Análise gráfica da taxa de acréscimo da DP para o solo AS-EN-2%



Análise gráfica da taxa de crescimento da DP para o solo SRA-EN+1%



Análise gráfica da taxa de crescimento da DP para o solo SRA-EN-2%

## APÊNDICE H

Resultados obtidos nas análises de desempenho utilizando o *Software* MeDiNa

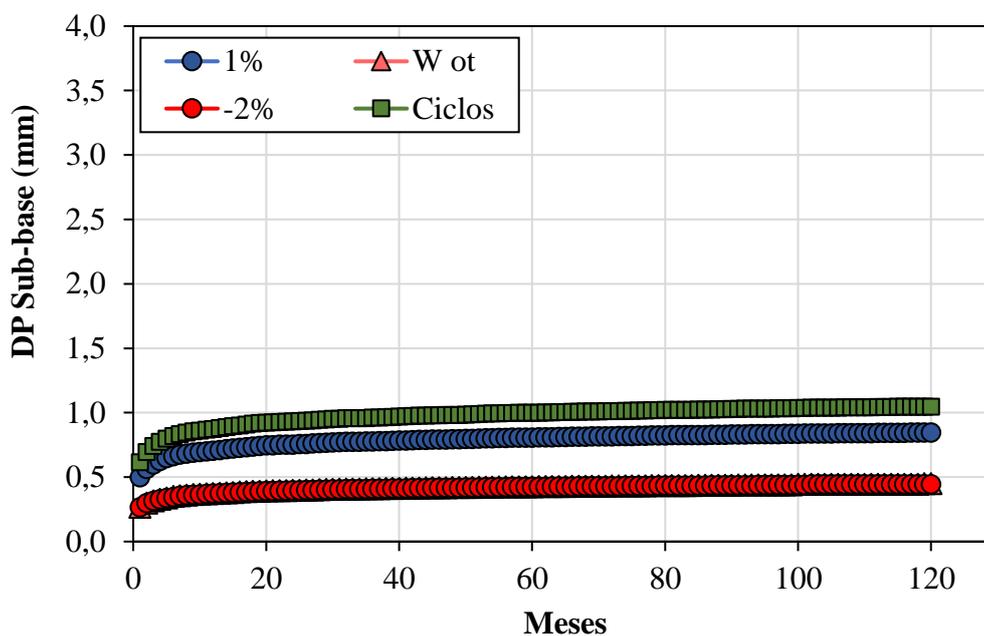
Mês	N equiv	Solo AS			Solo SRA		
		ATR Wot (mm)	ATR Wot +1% (mm)	ATR Wot -2%(mm)	ATR Wot (mm)	ATR Wot +1% (mm)	ATR Wot -2%(mm)
1	8,33E+03	0,4	4,51	1,01	0,65	4,22	1,23
2	1,67E+04	0,43	4,88	1,09	0,71	4,56	1,34
3	2,50E+04	0,45	5,11	1,14	0,76	4,76	1,41
4	3,33E+04	0,46	5,28	1,18	0,79	4,92	1,46
5	4,17E+04	0,47	5,41	1,21	0,82	5,04	1,5
6	5,00E+04	0,48	5,53	1,24	0,84	5,14	1,53
7	5,83E+04	0,49	5,62	1,26	0,86	5,23	1,56
8	6,67E+04	0,49	5,71	1,28	0,88	5,3	1,58
9	7,50E+04	0,5	5,78	1,29	0,89	5,37	1,61
10	8,33E+04	0,51	5,85	1,31	0,91	5,44	1,63
11	9,17E+04	0,51	5,92	1,32	0,92	5,49	1,65
12	1,00E+05	0,52	5,98	1,33	0,93	5,54	1,66
13	1,08E+05	0,52	6,03	1,35	0,94	5,59	1,68
14	1,17E+05	0,53	6,08	1,36	0,95	5,64	1,69
15	1,25E+05	0,53	6,13	1,37	0,96	5,68	1,71
16	1,33E+05	0,53	6,17	1,38	0,97	5,72	1,72
17	1,42E+05	0,54	6,22	1,39	0,98	5,76	1,73
18	1,50E+05	0,54	6,26	1,4	0,99	5,8	1,75
19	1,58E+05	0,54	6,29	1,4	1	5,83	1,76
20	1,67E+05	0,55	6,33	1,41	1	5,86	1,77
21	1,75E+05	0,55	6,37	1,42	1,01	5,9	1,78
22	1,83E+05	0,55	6,4	1,43	1,02	5,93	1,79
23	1,92E+05	0,55	6,43	1,44	1,02	5,96	1,8
24	2,00E+05	0,56	6,46	1,44	1,03	5,98	1,81
25	2,08E+05	0,56	6,49	1,45	1,04	6,01	1,82
26	2,17E+05	0,56	6,52	1,46	1,04	6,04	1,83
27	2,25E+05	0,56	6,55	1,46	1,05	6,06	1,83
28	2,33E+05	0,57	6,58	1,47	1,05	6,08	1,84
29	2,42E+05	0,57	6,6	1,47	1,06	6,11	1,85
30	2,50E+05	0,57	6,63	1,48	1,07	6,13	1,86
31	2,58E+05	0,57	6,65	1,48	1,07	6,15	1,87
32	2,67E+05	0,57	6,68	1,49	1,08	6,17	1,87
33	2,75E+05	0,58	6,7	1,49	1,08	6,2	1,88
34	2,83E+05	0,58	6,72	1,5	1,09	6,22	1,89
35	2,92E+05	0,58	6,74	1,5	1,09	6,24	1,89
36	3,00E+05	0,58	6,77	1,51	1,1	6,26	1,9
37	3,08E+05	0,58	6,79	1,51	1,1	6,27	1,91
38	3,17E+05	0,58	6,81	1,52	1,1	6,29	1,91
39	3,25E+05	0,59	6,83	1,52	1,11	6,31	1,92

40	3,33E+05	0,59	6,85	1,53	1,11	6,33	1,93
41	3,42E+05	0,59	6,87	1,53	1,12	6,35	1,93
42	3,50E+05	0,59	6,88	1,54	1,12	6,36	1,94
43	3,58E+05	0,59	6,9	1,54	1,12	6,38	1,94
44	3,67E+05	0,59	6,92	1,54	1,13	6,39	1,95
45	3,75E+05	0,6	6,94	1,55	1,13	6,41	1,95
46	3,83E+05	0,6	6,96	1,55	1,14	6,43	1,96
47	3,92E+05	0,6	6,97	1,56	1,14	6,44	1,96
48	4,00E+05	0,6	6,99	1,56	1,14	6,46	1,97
49	4,08E+05	0,6	7,01	1,56	1,15	6,47	1,97
50	4,17E+05	0,6	7,02	1,57	1,15	6,48	1,98
51	4,25E+05	0,6	7,04	1,57	1,15	6,5	1,98
52	4,33E+05	0,6	7,05	1,57	1,16	6,51	1,99
53	4,42E+05	0,61	7,07	1,58	1,16	6,53	1,99
54	4,50E+05	0,61	7,08	1,58	1,16	6,54	2
55	4,58E+05	0,61	7,1	1,58	1,17	6,55	2
56	4,67E+05	0,61	7,11	1,59	1,17	6,57	2,01
57	4,75E+05	0,61	7,13	1,59	1,17	6,58	2,01
58	4,83E+05	0,61	7,14	1,59	1,18	6,59	2,02
59	4,92E+05	0,61	7,15	1,6	1,18	6,6	2,02
60	5,00E+05	0,61	7,17	1,6	1,18	6,62	2,02
61	5,08E+05	0,61	7,18	1,6	1,19	6,63	2,03
62	5,17E+05	0,62	7,2	1,6	1,19	6,64	2,03
63	5,25E+05	0,62	7,21	1,61	1,19	6,65	2,04
64	5,33E+05	0,62	7,22	1,61	1,19	6,66	2,04
65	5,42E+05	0,62	7,23	1,61	1,2	6,67	2,04
66	5,50E+05	0,62	7,25	1,62	1,2	6,69	2,05
67	5,58E+05	0,62	7,26	1,62	1,2	6,7	2,05
68	5,67E+05	0,62	7,27	1,62	1,2	6,71	2,06
69	5,75E+05	0,62	7,28	1,62	1,21	6,72	2,06
70	5,83E+05	0,62	7,29	1,63	1,21	6,73	2,06
71	5,92E+05	0,63	7,31	1,63	1,21	6,74	2,07
72	6,00E+05	0,63	7,32	1,63	1,22	6,75	2,07
73	6,08E+05	0,63	7,33	1,63	1,22	6,76	2,07
74	6,17E+05	0,63	7,34	1,64	1,22	6,77	2,08
75	6,25E+05	0,63	7,35	1,64	1,22	6,78	2,08
76	6,33E+05	0,63	7,36	1,64	1,23	6,79	2,08
77	6,42E+05	0,63	7,37	1,64	1,23	6,8	2,09
78	6,50E+05	0,63	7,38	1,65	1,23	6,81	2,09
79	6,58E+05	0,63	7,4	1,65	1,23	6,82	2,09
80	6,67E+05	0,63	7,41	1,65	1,23	6,83	2,1
81	6,75E+05	0,63	7,42	1,65	1,24	6,84	2,1

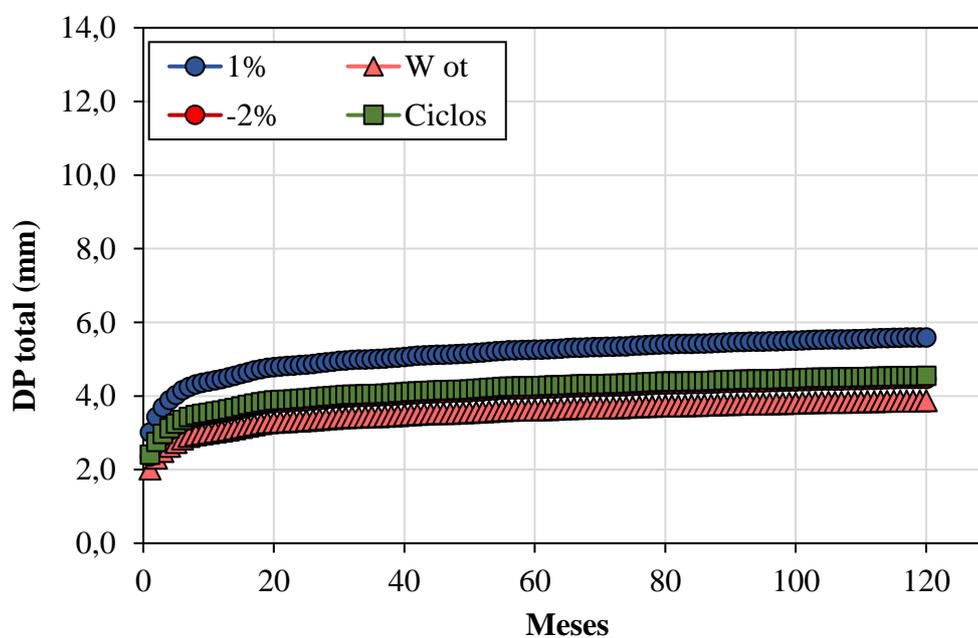
82	6,83E+05	0,63	7,43	1,66	1,24	6,85	2,1
83	6,92E+05	0,64	7,44	1,66	1,24	6,86	2,11
84	7,00E+05	0,64	7,45	1,66	1,24	6,86	2,11
85	7,08E+05	0,64	7,46	1,66	1,25	6,87	2,11
86	7,17E+05	0,64	7,47	1,66	1,25	6,88	2,12
87	7,25E+05	0,64	7,48	1,67	1,25	6,89	2,12
88	7,33E+05	0,64	7,49	1,67	1,25	6,9	2,12
89	7,42E+05	0,64	7,5	1,67	1,25	6,91	2,12
90	7,50E+05	0,64	7,5	1,67	1,26	6,92	2,13
91	7,58E+05	0,64	7,51	1,68	1,26	6,93	2,13
92	7,67E+05	0,64	7,52	1,68	1,26	6,93	2,13
93	7,75E+05	0,64	7,53	1,68	1,26	6,94	2,14
94	7,83E+05	0,64	7,54	1,68	1,27	6,95	2,14
95	7,92E+05	0,64	7,55	1,68	1,27	6,96	2,14
96	8,00E+05	0,65	7,56	1,69	1,27	6,97	2,14
97	8,08E+05	0,65	7,57	1,69	1,27	6,97	2,15
98	8,17E+05	0,65	7,58	1,69	1,27	6,98	2,15
99	8,25E+05	0,65	7,59	1,69	1,28	6,99	2,15
100	8,33E+05	0,65	7,59	1,69	1,28	7	2,16
101	8,42E+05	0,65	7,6	1,7	1,28	7,01	2,16
102	8,50E+05	0,65	7,61	1,7	1,28	7,01	2,16
103	8,58E+05	0,65	7,62	1,7	1,28	7,02	2,16
104	8,67E+05	0,65	7,63	1,7	1,28	7,03	2,17
105	8,75E+05	0,65	7,64	1,7	1,29	7,04	2,17
106	8,83E+05	0,65	7,65	1,7	1,29	7,04	2,17
107	8,92E+05	0,65	7,65	1,71	1,29	7,05	2,17
108	9,00E+05	0,65	7,66	1,71	1,29	7,06	2,18
109	9,08E+05	0,65	7,67	1,71	1,29	7,06	2,18
110	9,17E+05	0,66	7,68	1,71	1,3	7,07	2,18
111	9,25E+05	0,66	7,69	1,71	1,3	7,08	2,18
112	9,33E+05	0,66	7,69	1,72	1,3	7,09	2,19
113	9,42E+05	0,66	7,7	1,72	1,3	7,09	2,19
114	9,50E+05	0,66	7,71	1,72	1,3	7,1	2,19
115	9,58E+05	0,66	7,72	1,72	1,3	7,11	2,19
116	9,67E+05	0,66	7,72	1,72	1,31	7,11	2,2
117	9,75E+05	0,66	7,73	1,72	1,31	7,12	2,2
118	9,83E+05	0,66	7,74	1,73	1,31	7,13	2,2
119	9,92E+05	0,66	7,75	1,73	1,31	7,13	2,2
120	1,00E+06	0,66	7,75	1,73	1,31	7,14	2,2

## APÊNDICE I

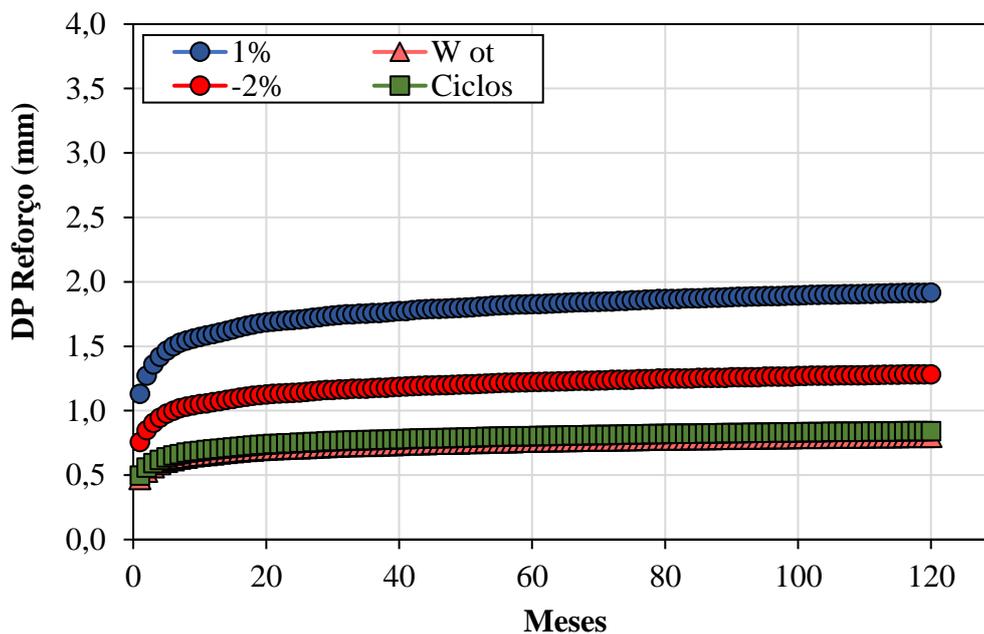
Resultados gráficos obtidos nas análises de desempenho utilizando o *Software AASHTOWare*



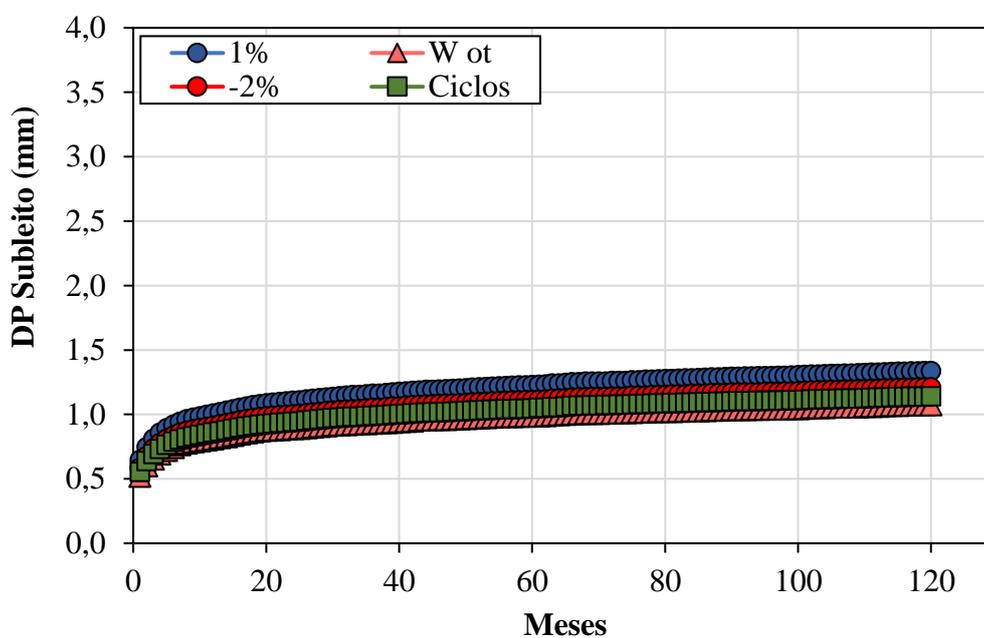
Afundamentos plásticos obtidos utilizando o solo AS na camada de sub-base, considerando uma carga de 8,2tf e VDM de 275 (*Software AASHTOWare*)



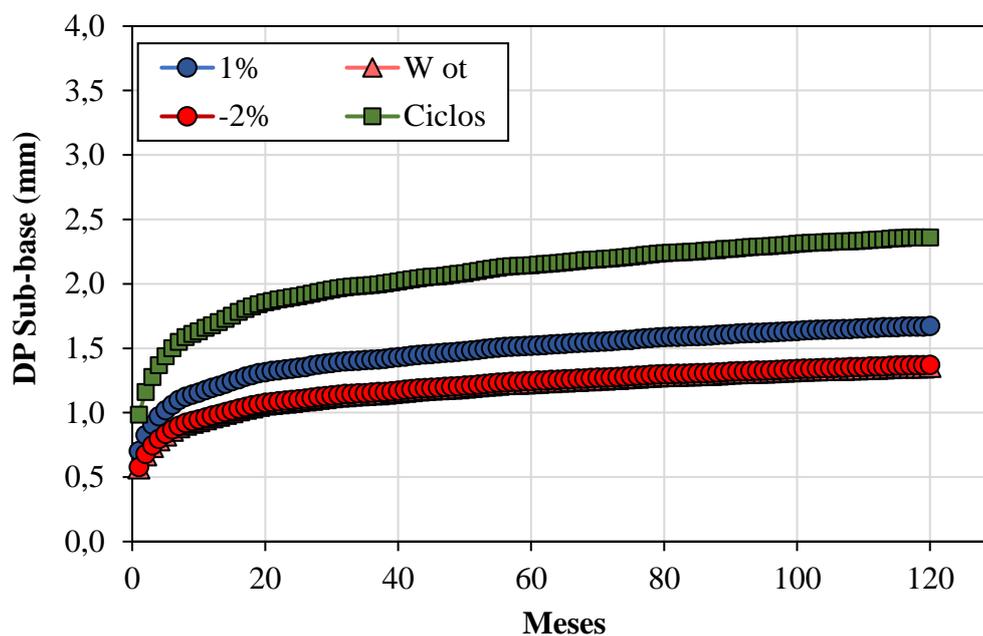
Afundamentos plásticos totais do pavimento obtidos utilizando o solo AS, considerando uma carga de 8,2tf e VDM de 275 (*Software AASHTOWare*)



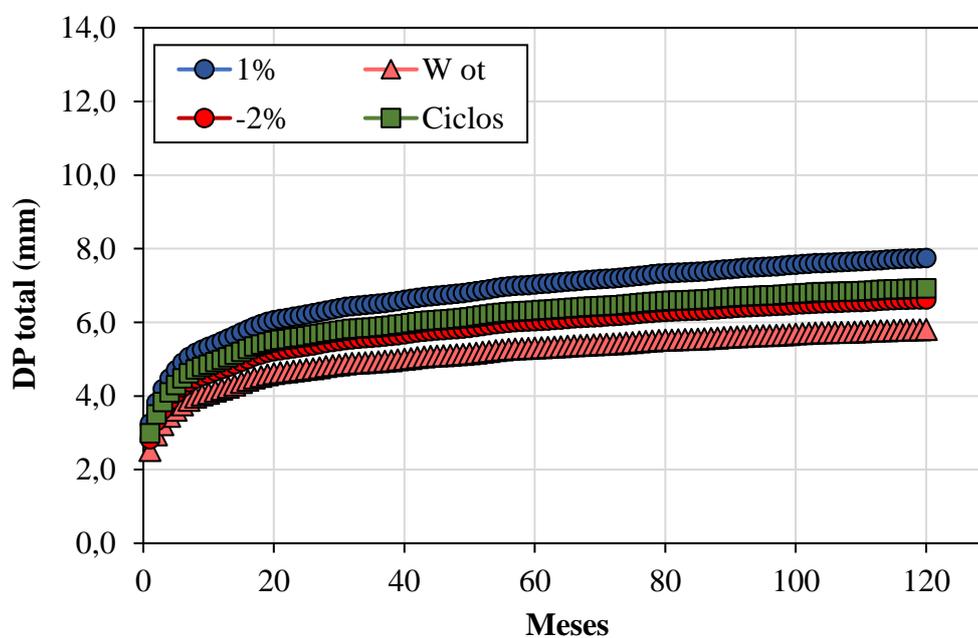
Afundamentos plásticos obtidos utilizando o solo AS na camada de reforço do subleito, considerando uma carga de 8,2tf e VDM de 275 (*Software AASHTOWare*)



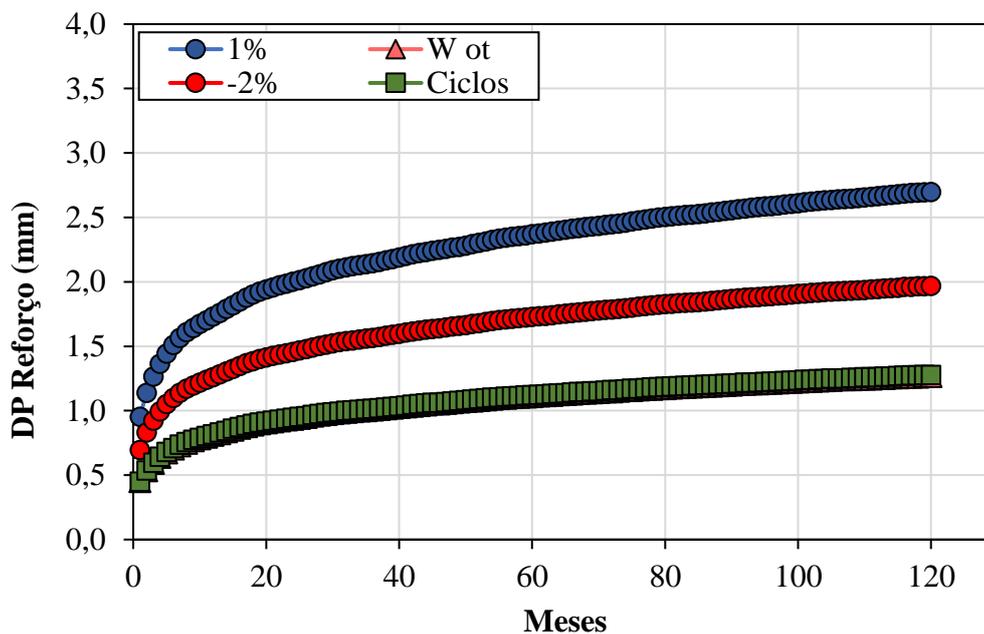
Afundamentos plásticos obtidos utilizando o solo AS na camada de subleito, considerando uma carga de 8,2tf e VDM de 275 (*Software AASHTOWare*)



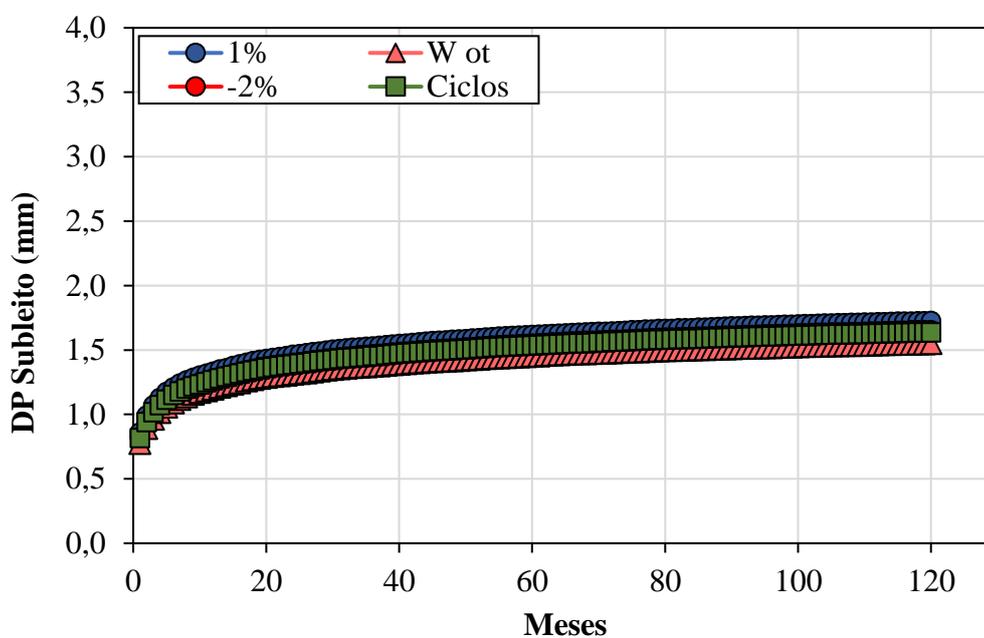
Afundamentos plásticos obtidos utilizando o solo SRA na camada de sub-base, considerando uma carga de 8,2tf e VDM de 275 (*Software AASHTOWare*)



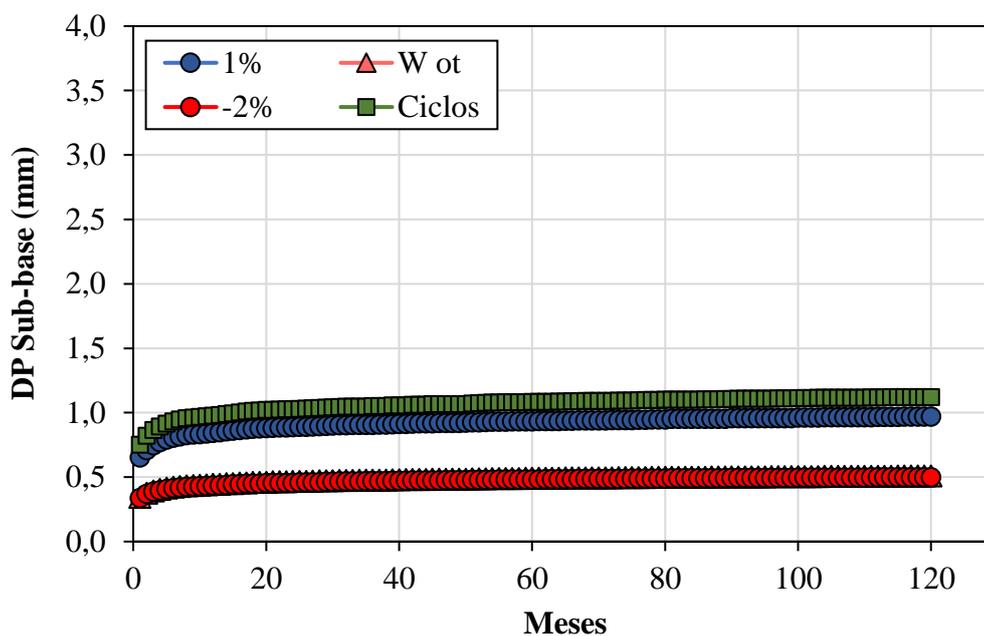
Afundamentos plásticos totais do pavimento obtidos utilizando o solo SRA, considerando uma carga de 8,2tf e VDM de 275 (*Software AASHTOWare*)



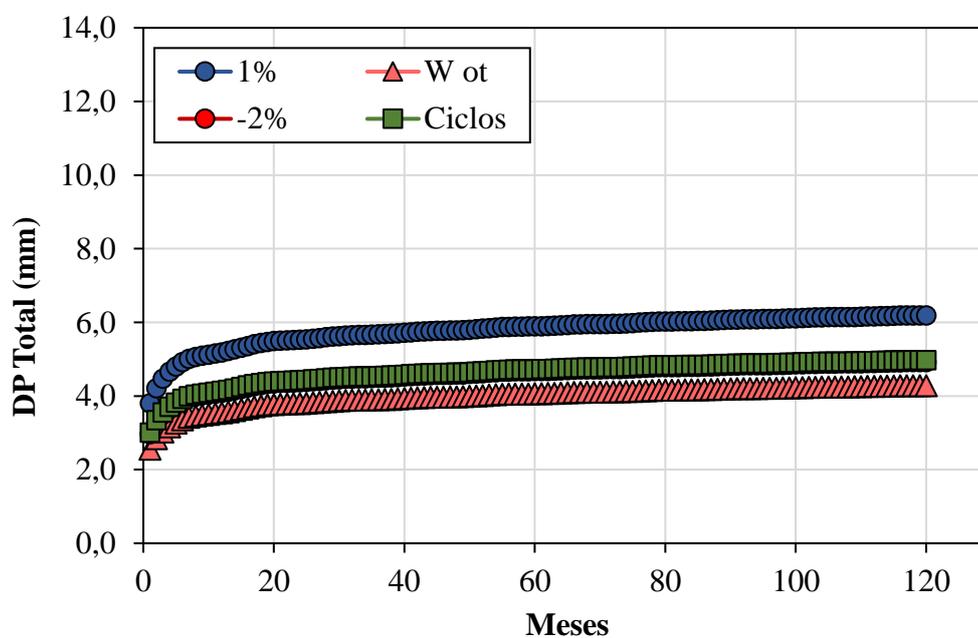
Afundamentos plásticos obtidos utilizando o solo SRA na camada de reforço do subleito, considerando uma carga de 8,2tf e VDM de 275 (*Software AASHTOWare*)



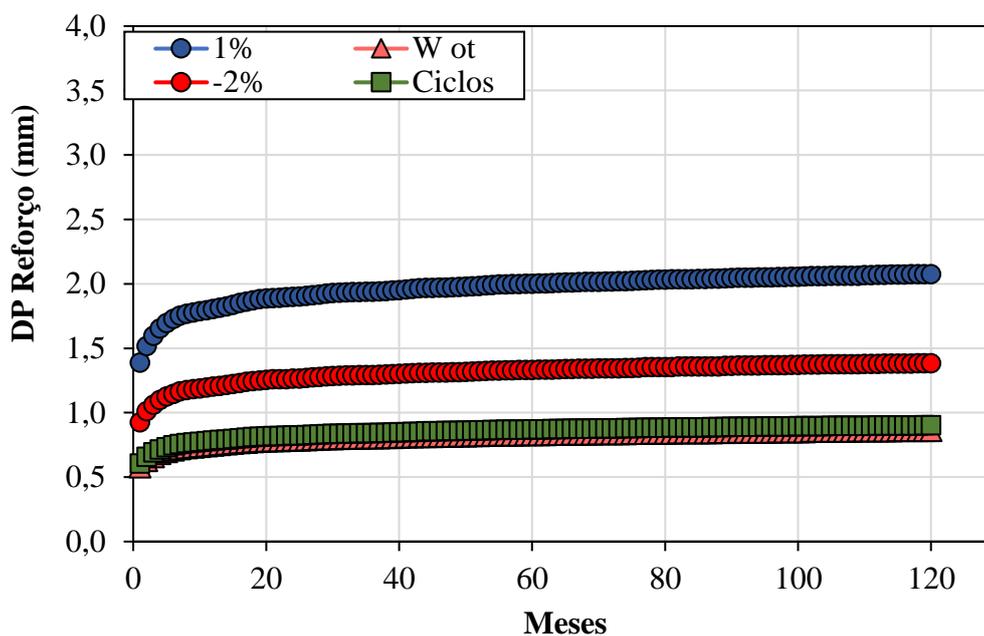
Afundamentos plásticos obtidos utilizando o solo SRA na camada de subleito, considerando uma carga de 8,2tf e VDM de 275 (*Software AASHTOWare*)



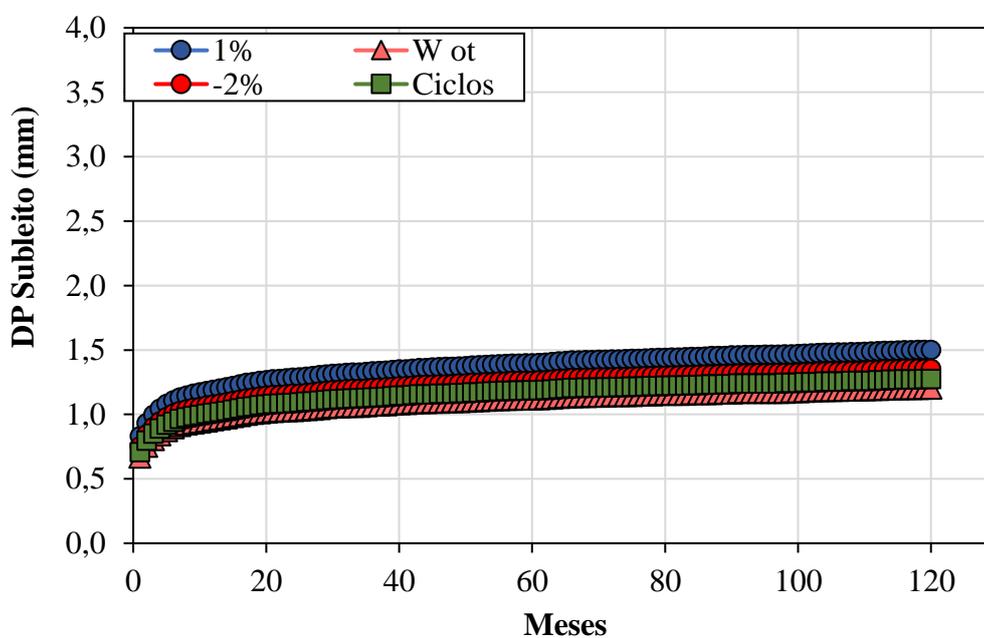
Afundamentos plásticos obtidos utilizando o solo AS na camada de sub-base, considerando uma carga de 8,2tf e VDM de 1000 (*Software AASHTOWare*)



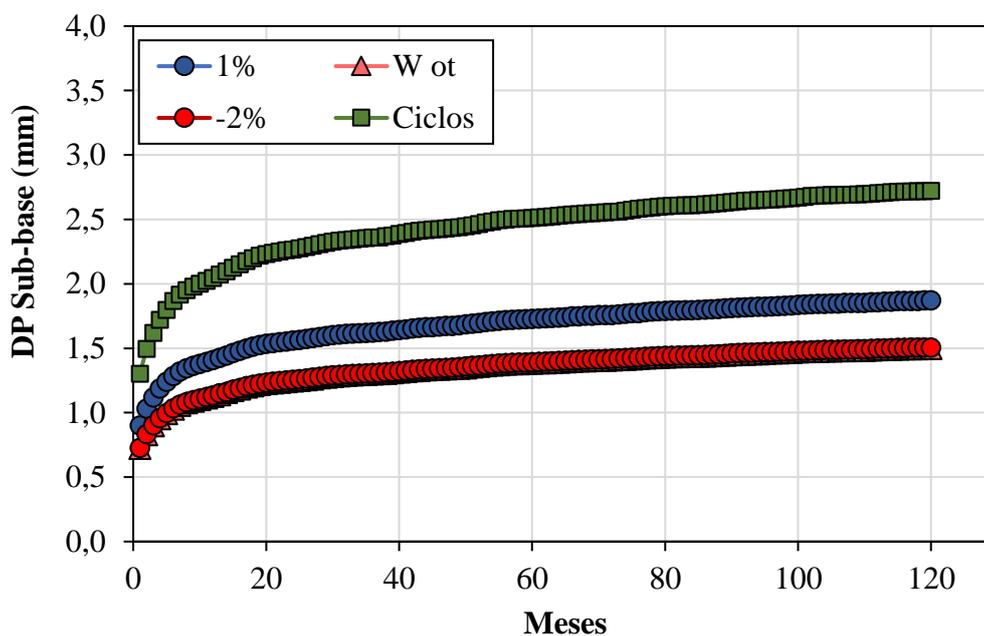
Afundamentos plásticos totais do pavimento obtidos utilizando o solo AS, considerando uma carga de 8,2tf e VDM de 1000 (*Software AASHTOWare*)



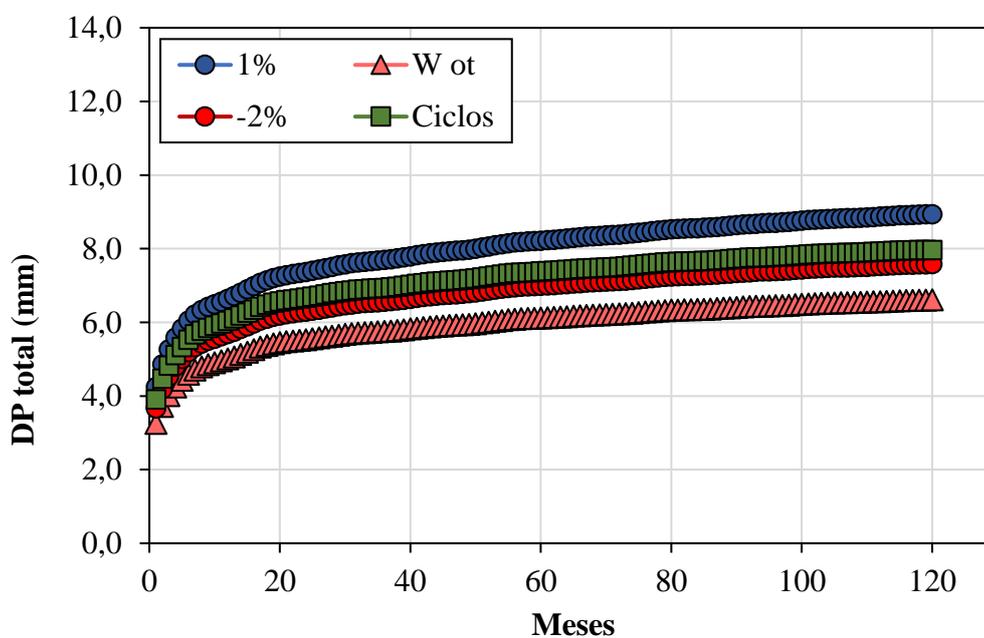
Afundamentos plásticos obtidos utilizando o solo AS na camada de reforço do subleito, considerando uma carga de 8,2tf e VDM de 1000 (*Software AASHTOWare*)



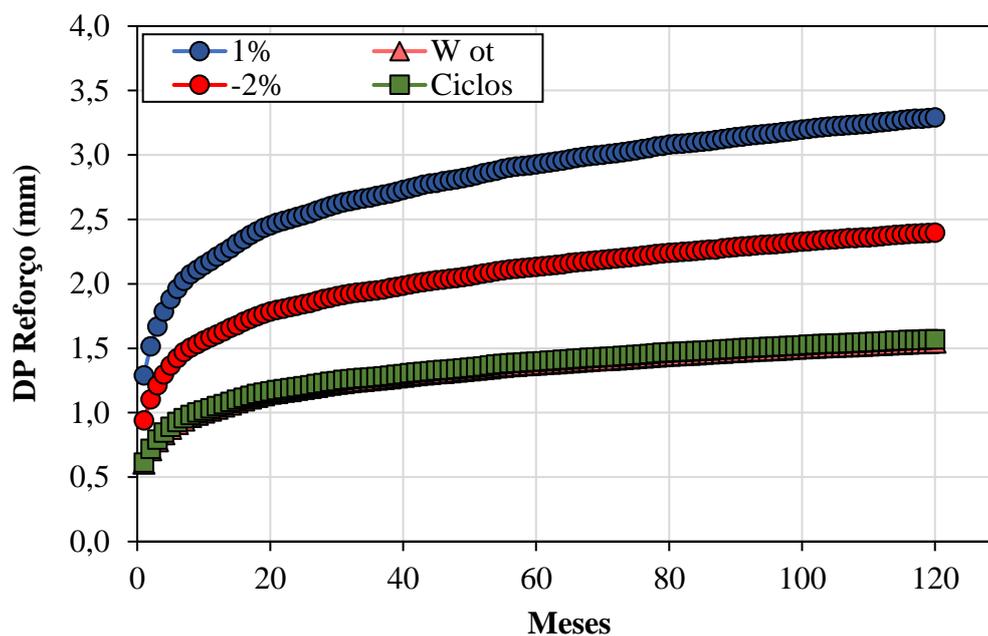
Afundamentos plásticos obtidos utilizando o solo AS na camada de subleito, considerando uma carga de 8,2tf e VDM de 1000 (*Software AASHTOWare*)



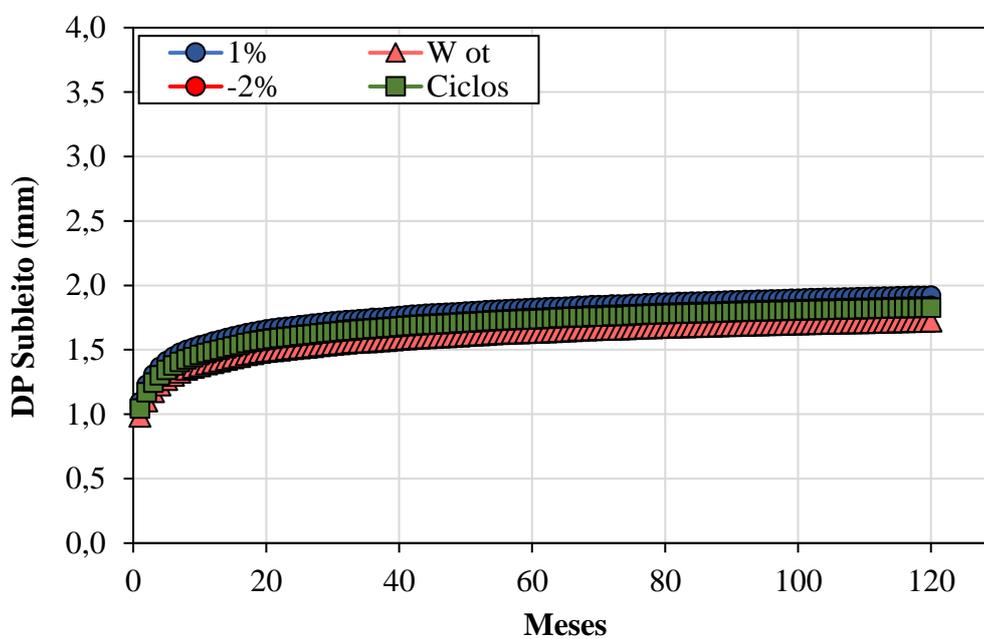
Afundamentos plásticos obtidos utilizando o solo SRA na camada de sub-base, considerando uma carga de 8,2tf e VDM de 1000 (*Software AASHTOWare*)



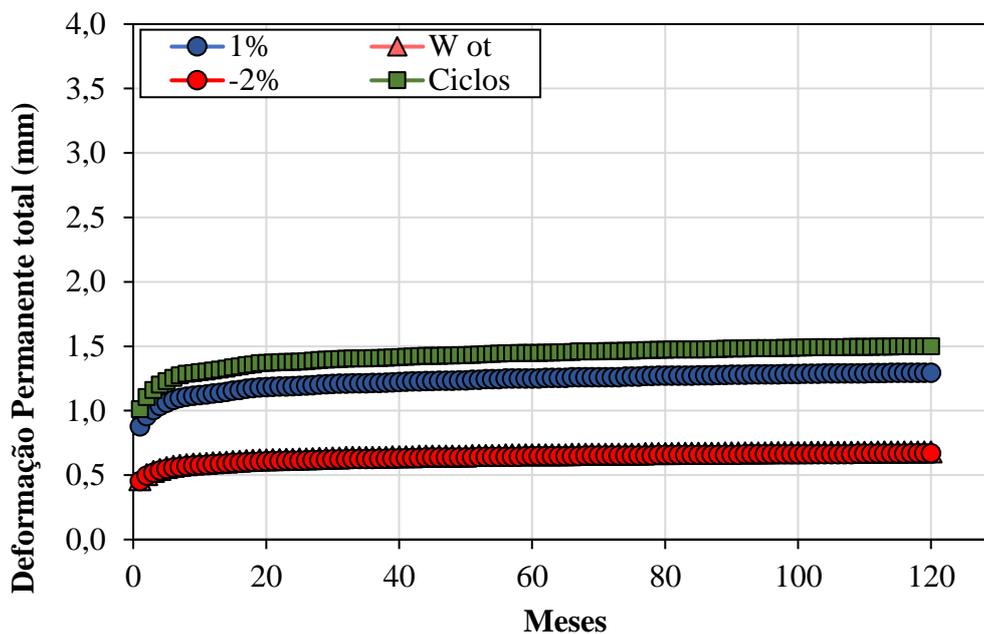
Afundamentos plásticos totais do pavimento obtidos utilizando o solo SRA, considerando uma carga de 8,2tf e VDM de 1000 (*Software AASHTOWare*)



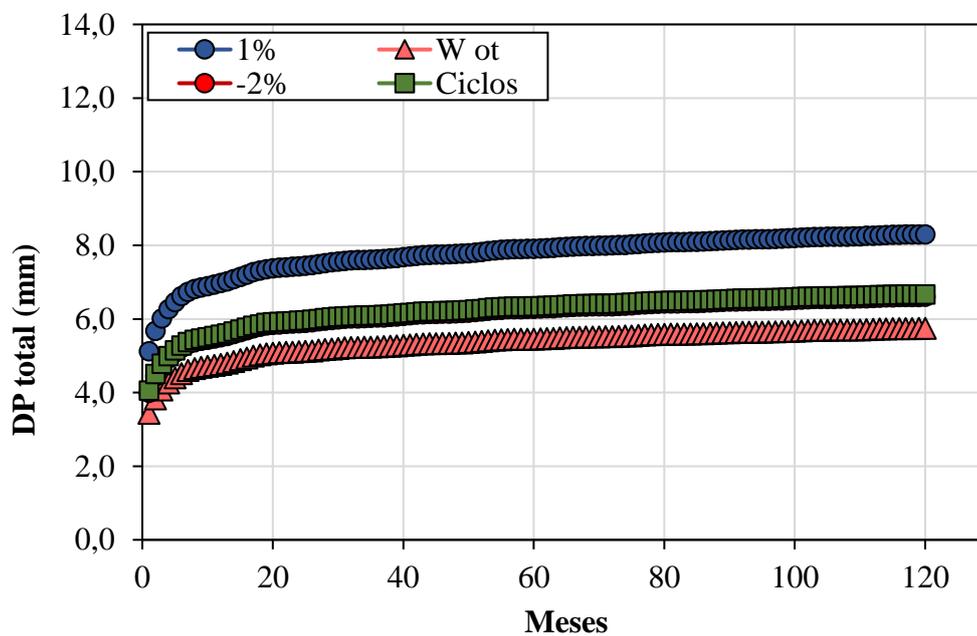
Afundamentos plásticos obtidos utilizando o solo SRA na camada de reforço do subleito, considerando uma carga de 8,2tf e VDM de 1000 (*Software AASHTOWare*)



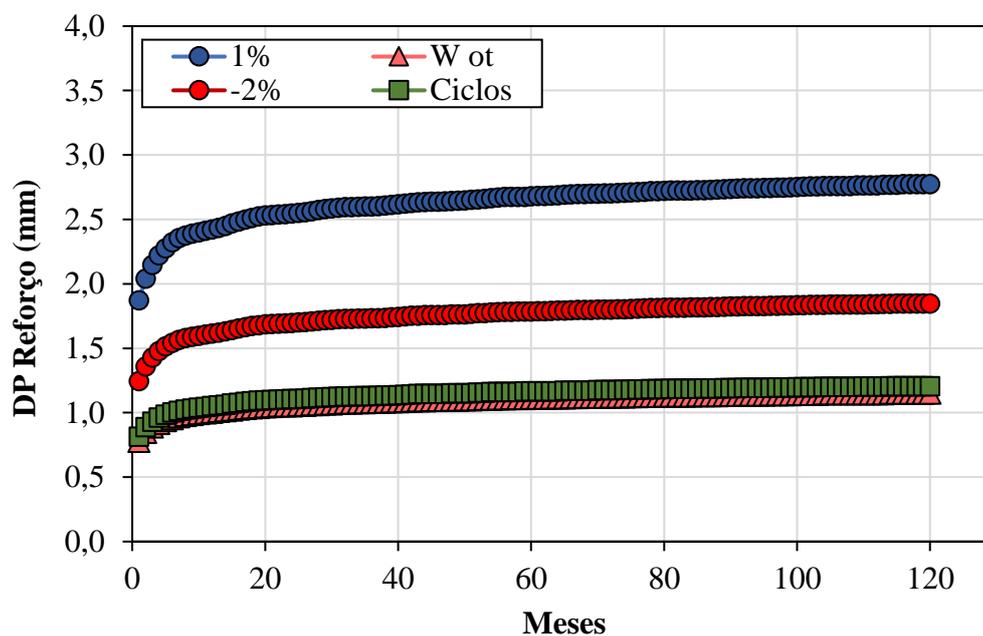
Afundamentos plásticos obtidos utilizando o solo SRA na camada de subleito, considerando uma carga de 8,2tf e VDM de 1000 (*Software AASHTOWare*)



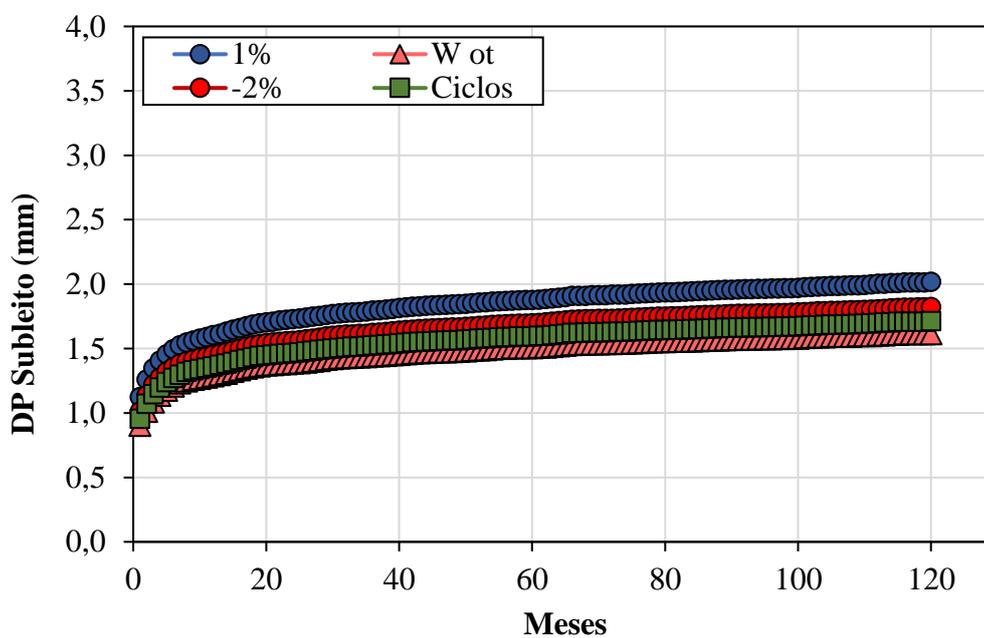
Afundamentos plásticos obtidos utilizando o solo AS na camada de sub-base, considerando uma carga de 11tf e VDM de 1000 (*Software AASHTOWare*)



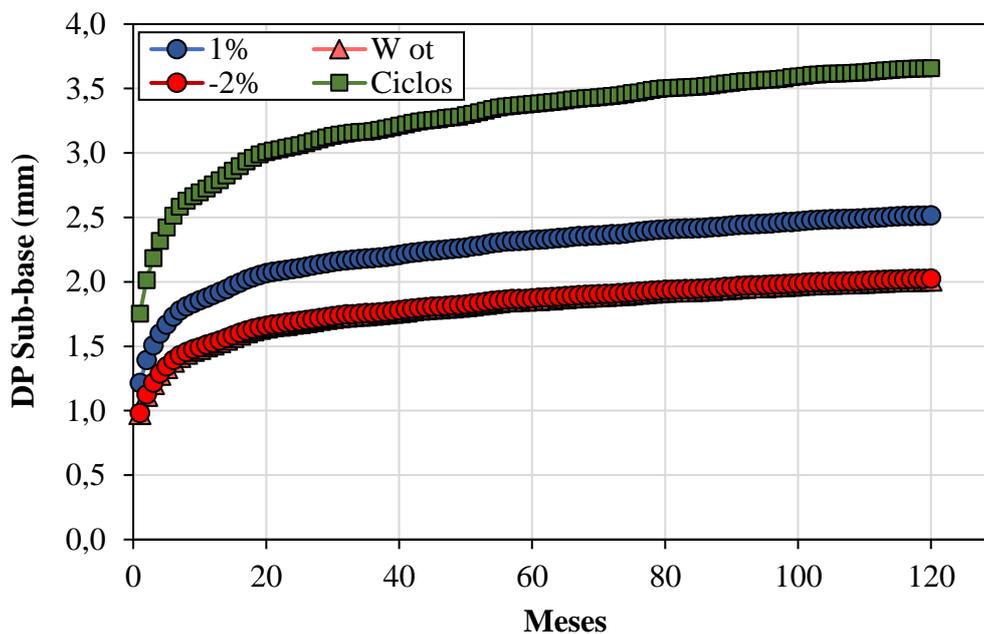
Afundamentos plásticos totais do pavimento obtidos utilizando o solo AS, considerando uma carga de 11tf e VDM de 1000 (*Software AASHTOWare*)



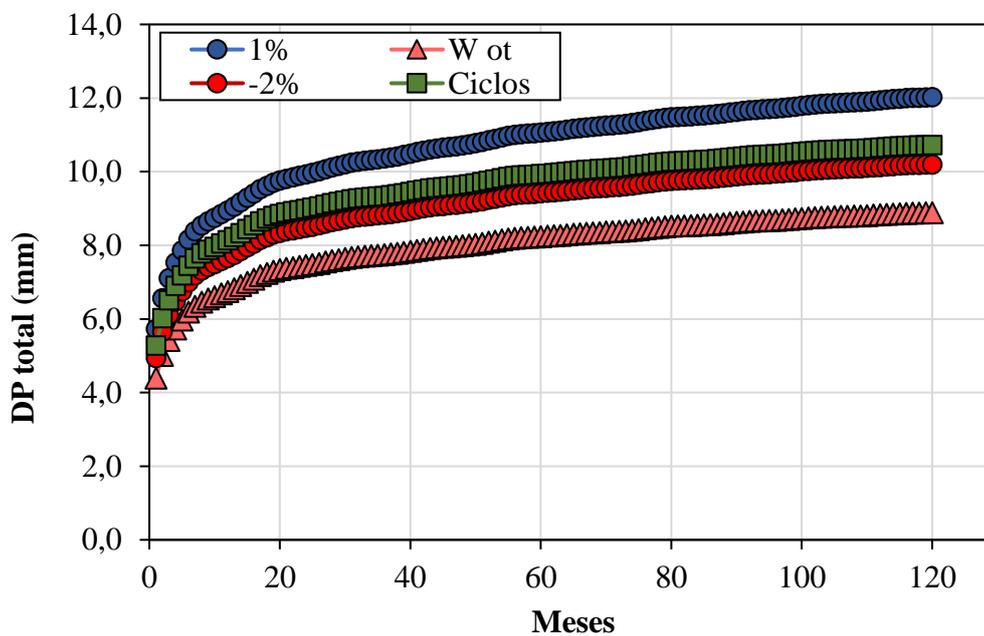
Afundamentos plásticos obtidos utilizando o solo AS na camada de reforço do subleito, considerando uma carga de 11tf e VDM de 1000 (*Software AASHTOWare*)



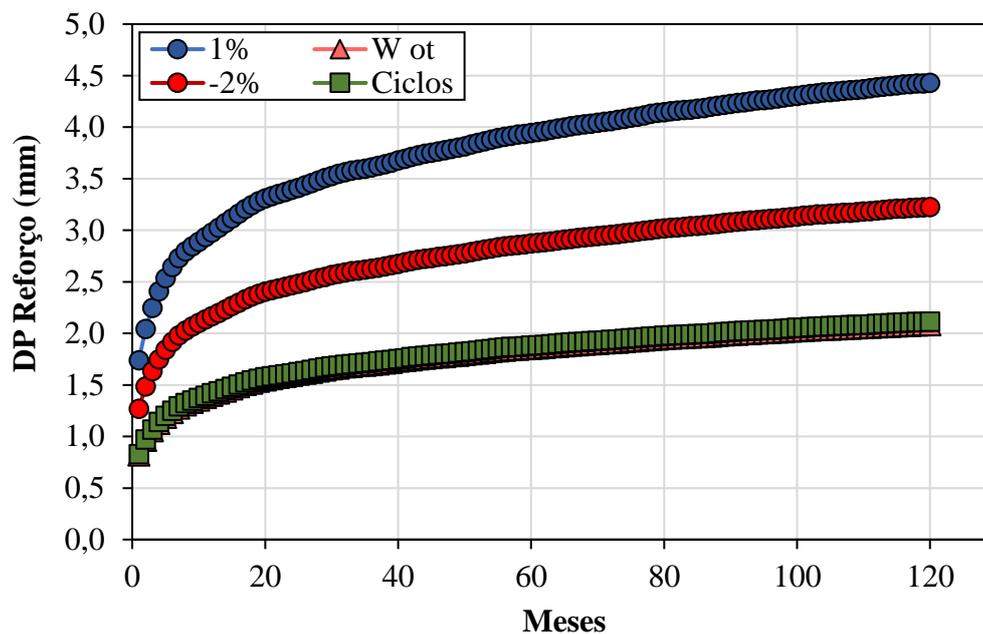
Afundamentos plásticos obtidos utilizando o solo AS na camada de subleito, considerando uma carga de 11tf e VDM de 1000 (*Software AASHTOWare*)



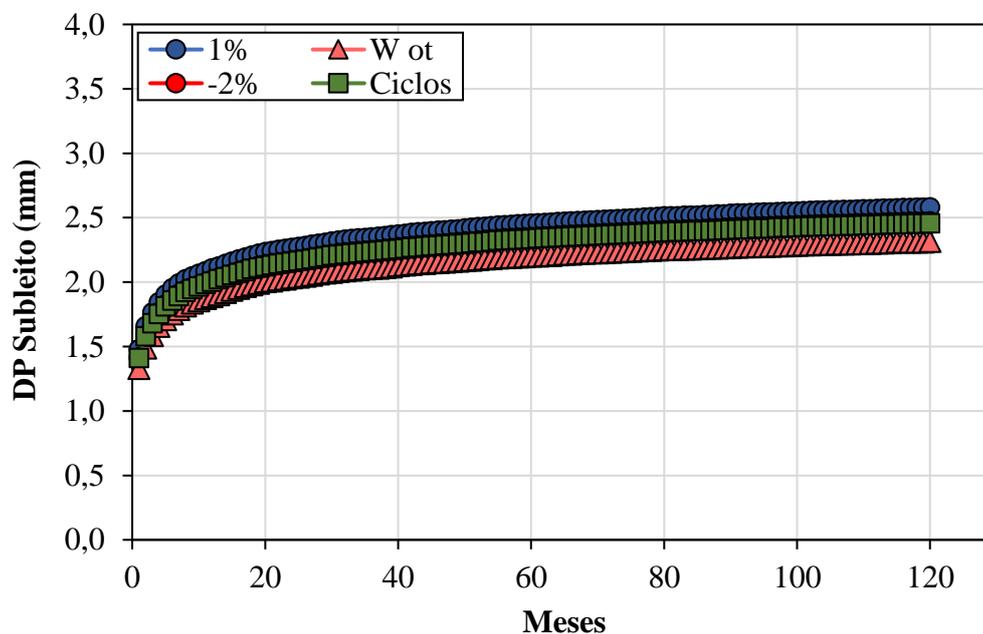
Afundamentos plásticos obtidos utilizando o solo SRA na camada de sub-base, considerando uma carga de 11tf e VDM de 1000 (*Software AASHTOWare*)



Afundamentos plásticos totais do pavimento obtidos utilizando o solo SRA, considerando uma carga de 11tf e VDM de 1000 (*Software AASHTOWare*)



Afundamentos plásticos obtidos utilizando o solo SRA na camada de reforço do subleito, considerando uma carga de 11tf e VDM de 1000 (*Software AASHTOWare*)



Afundamentos plásticos obtidos utilizando o solo SRA na camada de subleito, considerando uma carga de 11tf e VDM de 1000 (*Software AASHTOWare*)

## **APÊNCICE J**

Resultados obtidos nas análises de desempenho utilizando o *Software AASHTOWare*

ATRs obtidos com o solo AS considerando uma carga de 8,2tf e VDM de 275

Mês	Wót +1%					Wót					Wót -2%					Ciclos de umed. e sec. na SB				
	B (mm)	SB (mm)	Ref. (mm)	Sub. (mm)	Total (mm)	B (mm)	SB (mm)	Ref. (mm)	Sub. (mm)	Total (mm)	B (mm)	SB (mm)	Ref. (mm)	Sub. (mm)	Total (mm)	B (mm)	SB (mm)	Ref. (mm)	Sub. (mm)	Total (mm)
1	0,73	0,50	1,13	0,65	3,02	0,76	0,27	0,47	0,52	2,02	0,74	0,27	0,76	0,59	2,36	0,74	0,62	0,50	0,55	2,41
2	0,85	0,56	1,27	0,75	3,43	0,88	0,30	0,53	0,60	2,31	0,87	0,30	0,85	0,68	2,70	0,86	0,70	0,56	0,64	2,76
3	0,93	0,60	1,36	0,81	3,70	0,96	0,32	0,56	0,66	2,50	0,95	0,32	0,91	0,74	2,91	0,94	0,74	0,59	0,69	2,97
4	0,99	0,63	1,42	0,86	3,89	1,03	0,33	0,59	0,69	2,64	1,01	0,33	0,95	0,78	3,07	1,00	0,78	0,62	0,73	3,13
5	1,03	0,65	1,47	0,89	4,04	1,07	0,34	0,61	0,72	2,74	1,06	0,34	0,98	0,81	3,19	1,05	0,80	0,64	0,77	3,25
6	1,07	0,66	1,50	0,92	4,16	1,12	0,35	0,62	0,74	2,83	1,10	0,35	1,00	0,84	3,29	1,09	0,82	0,66	0,79	3,36
7	1,11	0,68	1,53	0,95	4,25	1,15	0,36	0,63	0,77	2,90	1,13	0,36	1,02	0,86	3,36	1,12	0,84	0,67	0,81	3,43
8	1,12	0,68	1,55	0,96	4,32	1,17	0,36	0,64	0,78	2,95	1,15	0,36	1,03	0,87	3,42	1,14	0,85	0,68	0,82	3,49
9	1,13	0,69	1,56	0,98	4,36	1,18	0,37	0,65	0,79	2,97	1,16	0,36	1,04	0,89	3,45	1,15	0,86	0,68	0,83	3,52
10	1,14	0,70	1,57	0,99	4,39	1,18	0,37	0,65	0,80	3,00	1,16	0,37	1,05	0,90	3,48	1,16	0,86	0,69	0,84	3,55
11	1,15	0,70	1,59	1,00	4,43	1,19	0,37	0,66	0,80	3,03	1,17	0,37	1,06	0,90	3,51	1,17	0,87	0,70	0,85	3,58
12	1,16	0,71	1,60	1,01	4,47	1,20	0,37	0,67	0,81	3,05	1,18	0,37	1,07	0,91	3,54	1,17	0,87	0,70	0,86	3,61
13	1,17	0,71	1,61	1,02	4,51	1,21	0,38	0,67	0,82	3,08	1,20	0,38	1,07	0,93	3,57	1,19	0,88	0,71	0,87	3,64
14	1,19	0,72	1,62	1,03	4,55	1,23	0,38	0,68	0,83	3,11	1,21	0,38	1,09	0,94	3,61	1,20	0,89	0,71	0,88	3,68
15	1,20	0,72	1,63	1,04	4,60	1,25	0,38	0,68	0,84	3,15	1,23	0,38	1,09	0,95	3,65	1,22	0,90	0,72	0,89	3,72
16	1,22	0,73	1,65	1,05	4,65	1,27	0,39	0,69	0,85	3,19	1,25	0,38	1,10	0,96	3,69	1,24	0,90	0,72	0,90	3,76
17	1,24	0,73	1,66	1,06	4,70	1,29	0,39	0,69	0,86	3,22	1,27	0,39	1,11	0,97	3,73	1,26	0,91	0,73	0,91	3,80
18	1,25	0,74	1,67	1,07	4,74	1,30	0,39	0,69	0,86	3,25	1,28	0,39	1,12	0,97	3,76	1,27	0,92	0,73	0,91	3,83
19	1,26	0,74	1,68	1,08	4,77	1,31	0,39	0,70	0,87	3,27	1,29	0,39	1,12	0,98	3,79	1,28	0,92	0,74	0,92	3,86
20	1,27	0,75	1,69	1,09	4,79	1,32	0,39	0,70	0,88	3,29	1,30	0,39	1,13	0,99	3,81	1,29	0,93	0,74	0,93	3,88
21	1,27	0,75	1,69	1,09	4,81	1,32	0,40	0,70	0,88	3,30	1,30	0,39	1,13	0,99	3,82	1,29	0,93	0,74	0,93	3,89

22	1,28	0,75	1,70	1,10	4,82	1,32	0,40	0,71	0,88	3,31	1,30	0,40	1,14	1,00	3,83	1,29	0,93	0,74	0,94	3,90
23	1,28	0,75	1,70	1,10	4,83	1,33	0,40	0,71	0,89	3,32	1,31	0,40	1,14	1,00	3,84	1,30	0,93	0,75	0,94	3,91
24	1,28	0,75	1,70	1,11	4,84	1,33	0,40	0,71	0,89	3,33	1,31	0,40	1,14	1,00	3,85	1,30	0,94	0,75	0,95	3,92
25	1,28	0,76	1,71	1,11	4,86	1,33	0,40	0,71	0,89	3,34	1,31	0,40	1,14	1,01	3,86	1,30	0,94	0,75	0,95	3,93
26	1,29	0,76	1,72	1,12	4,88	1,34	0,40	0,71	0,90	3,35	1,32	0,40	1,15	1,01	3,87	1,31	0,94	0,75	0,95	3,95
27	1,29	0,76	1,72	1,12	4,90	1,34	0,40	0,72	0,90	3,36	1,32	0,40	1,15	1,02	3,89	1,31	0,94	0,76	0,96	3,97
28	1,30	0,77	1,73	1,13	4,92	1,35	0,40	0,72	0,91	3,38	1,33	0,40	1,16	1,02	3,91	1,32	0,95	0,76	0,96	3,99
29	1,30	0,77	1,74	1,13	4,94	1,35	0,41	0,72	0,91	3,39	1,33	0,40	1,16	1,03	3,92	1,32	0,95	0,76	0,97	4,00
30	1,31	0,77	1,74	1,14	4,96	1,36	0,41	0,72	0,92	3,41	1,34	0,41	1,16	1,03	3,94	1,33	0,95	0,77	0,97	4,02
31	1,31	0,77	1,75	1,14	4,97	1,36	0,41	0,73	0,92	3,42	1,34	0,41	1,17	1,04	3,95	1,33	0,96	0,77	0,98	4,03
32	1,32	0,78	1,75	1,15	4,98	1,37	0,41	0,73	0,92	3,42	1,34	0,41	1,17	1,04	3,96	1,33	0,96	0,77	0,98	4,04
33	1,32	0,78	1,75	1,15	4,99	1,37	0,41	0,73	0,93	3,43	1,35	0,41	1,17	1,04	3,97	1,34	0,96	0,77	0,98	4,04
34	1,32	0,78	1,75	1,15	5,00	1,37	0,41	0,73	0,93	3,43	1,35	0,41	1,17	1,04	3,97	1,34	0,96	0,77	0,98	4,05
35	1,32	0,78	1,76	1,16	5,00	1,37	0,41	0,73	0,93	3,44	1,35	0,41	1,17	1,05	3,98	1,34	0,96	0,77	0,99	4,05
36	1,32	0,78	1,76	1,16	5,01	1,37	0,41	0,73	0,93	3,44	1,35	0,41	1,18	1,05	3,99	1,34	0,96	0,77	0,99	4,06
37	1,32	0,78	1,76	1,16	5,02	1,37	0,41	0,73	0,94	3,45	1,35	0,41	1,18	1,05	3,99	1,34	0,96	0,78	0,99	4,07
38	1,32	0,78	1,76	1,17	5,03	1,37	0,41	0,74	0,94	3,46	1,35	0,41	1,18	1,06	4,00	1,34	0,97	0,78	1,00	4,08
39	1,33	0,78	1,77	1,17	5,05	1,38	0,41	0,74	0,94	3,47	1,36	0,41	1,18	1,06	4,01	1,35	0,97	0,78	1,00	4,09
40	1,33	0,79	1,77	1,18	5,06	1,38	0,41	0,74	0,95	3,48	1,36	0,41	1,19	1,06	4,03	1,35	0,97	0,78	1,00	4,10
41	1,34	0,79	1,78	1,18	5,08	1,39	0,42	0,74	0,95	3,49	1,37	0,41	1,19	1,07	4,04	1,36	0,97	0,78	1,01	4,12
42	1,34	0,79	1,78	1,18	5,10	1,39	0,42	0,74	0,95	3,51	1,37	0,42	1,19	1,07	4,05	1,36	0,98	0,78	1,01	4,13
43	1,35	0,79	1,79	1,19	5,11	1,40	0,42	0,74	0,96	3,51	1,38	0,42	1,19	1,07	4,06	1,37	0,98	0,79	1,01	4,14
44	1,35	0,79	1,79	1,19	5,12	1,40	0,42	0,74	0,96	3,52	1,38	0,42	1,20	1,08	4,07	1,37	0,98	0,79	1,02	4,15
45	1,35	0,79	1,79	1,19	5,12	1,40	0,42	0,75	0,96	3,53	1,38	0,42	1,20	1,08	4,07	1,37	0,98	0,79	1,02	4,15
46	1,35	0,79	1,79	1,19	5,13	1,40	0,42	0,75	0,96	3,53	1,38	0,42	1,20	1,08	4,08	1,37	0,98	0,79	1,02	4,16
47	1,35	0,79	1,79	1,20	5,14	1,41	0,42	0,75	0,96	3,53	1,38	0,42	1,20	1,09	4,08	1,37	0,98	0,79	1,02	4,16
48	1,35	0,80	1,80	1,20	5,14	1,41	0,42	0,75	0,96	3,54	1,38	0,42	1,20	1,09	4,09	1,37	0,98	0,79	1,02	4,17

49	1,35	0,80	1,80	1,20	5,15	1,41	0,42	0,75	0,97	3,54	1,38	0,42	1,20	1,09	4,10	1,37	0,98	0,79	1,03	4,17
50	1,36	0,80	1,80	1,20	5,16	1,41	0,42	0,75	0,97	3,55	1,39	0,42	1,21	1,09	4,11	1,38	0,99	0,79	1,03	4,18
51	1,36	0,80	1,80	1,21	5,17	1,42	0,42	0,75	0,97	3,56	1,39	0,42	1,21	1,10	4,12	1,38	0,99	0,79	1,03	4,20
52	1,37	0,80	1,81	1,21	5,19	1,43	0,42	0,75	0,97	3,57	1,40	0,42	1,21	1,10	4,13	1,39	0,99	0,80	1,03	4,21
53	1,38	0,80	1,81	1,21	5,20	1,43	0,42	0,76	0,98	3,58	1,41	0,42	1,21	1,10	4,14	1,40	0,99	0,80	1,04	4,22
54	1,38	0,80	1,82	1,22	5,22	1,44	0,42	0,76	0,98	3,60	1,42	0,42	1,21	1,10	4,16	1,41	1,00	0,80	1,04	4,23
55	1,39	0,81	1,82	1,22	5,23	1,44	0,43	0,76	0,98	3,61	1,42	0,42	1,22	1,11	4,17	1,41	1,00	0,80	1,04	4,25
56	1,39	0,81	1,82	1,22	5,24	1,45	0,43	0,76	0,98	3,61	1,42	0,42	1,22	1,11	4,18	1,41	1,00	0,80	1,04	4,26
57	1,39	0,81	1,82	1,22	5,25	1,45	0,43	0,76	0,98	3,62	1,43	0,43	1,22	1,11	4,18	1,42	1,00	0,80	1,04	4,26
58	1,39	0,81	1,83	1,23	5,25	1,45	0,43	0,76	0,99	3,62	1,43	0,43	1,22	1,11	4,18	1,42	1,00	0,80	1,05	4,26
59	1,39	0,81	1,83	1,23	5,26	1,45	0,43	0,76	0,99	3,63	1,43	0,43	1,22	1,11	4,19	1,42	1,00	0,80	1,05	4,27
60	1,39	0,81	1,83	1,23	5,26	1,45	0,43	0,76	0,99	3,63	1,43	0,43	1,22	1,11	4,19	1,42	1,00	0,80	1,05	4,27
61	1,40	0,81	1,83	1,23	5,27	1,45	0,43	0,77	0,99	3,63	1,43	0,43	1,22	1,12	4,19	1,42	1,00	0,81	1,05	4,27
62	1,40	0,81	1,83	1,23	5,27	1,45	0,43	0,77	0,99	3,64	1,43	0,43	1,23	1,12	4,20	1,42	1,00	0,81	1,05	4,28
63	1,40	0,81	1,83	1,24	5,28	1,45	0,43	0,77	1,00	3,64	1,43	0,43	1,23	1,12	4,21	1,42	1,00	0,81	1,06	4,29
64	1,40	0,81	1,84	1,24	5,29	1,46	0,43	0,77	1,00	3,65	1,43	0,43	1,23	1,13	4,22	1,42	1,01	0,81	1,06	4,30
65	1,41	0,81	1,84	1,25	5,30	1,46	0,43	0,77	1,00	3,66	1,44	0,43	1,23	1,13	4,22	1,43	1,01	0,81	1,06	4,30
66	1,41	0,82	1,84	1,25	5,31	1,46	0,43	0,77	1,00	3,67	1,44	0,43	1,23	1,13	4,23	1,43	1,01	0,81	1,07	4,31
67	1,41	0,82	1,84	1,25	5,32	1,46	0,43	0,77	1,01	3,67	1,44	0,43	1,23	1,14	4,24	1,43	1,01	0,81	1,07	4,32
68	1,41	0,82	1,84	1,26	5,33	1,47	0,43	0,77	1,01	3,67	1,44	0,43	1,23	1,14	4,24	1,43	1,01	0,81	1,07	4,32
69	1,41	0,82	1,85	1,26	5,33	1,47	0,43	0,77	1,01	3,68	1,44	0,43	1,23	1,14	4,25	1,43	1,01	0,81	1,07	4,33
70	1,41	0,82	1,85	1,26	5,33	1,47	0,43	0,77	1,01	3,68	1,44	0,43	1,24	1,14	4,25	1,43	1,01	0,81	1,07	4,33
71	1,41	0,82	1,85	1,26	5,34	1,47	0,43	0,77	1,01	3,68	1,45	0,43	1,24	1,14	4,25	1,43	1,01	0,81	1,07	4,33
72	1,41	0,82	1,85	1,26	5,34	1,47	0,43	0,77	1,01	3,69	1,45	0,43	1,24	1,14	4,26	1,44	1,01	0,81	1,07	4,34
73	1,42	0,82	1,85	1,26	5,35	1,47	0,43	0,77	1,01	3,69	1,45	0,43	1,24	1,14	4,26	1,44	1,01	0,82	1,08	4,34
74	1,42	0,82	1,85	1,26	5,35	1,47	0,43	0,78	1,01	3,70	1,45	0,43	1,24	1,14	4,27	1,44	1,02	0,82	1,08	4,35
75	1,42	0,82	1,86	1,27	5,36	1,48	0,43	0,78	1,02	3,70	1,45	0,43	1,24	1,15	4,28	1,44	1,02	0,82	1,08	4,35

76	1,43	0,82	1,86	1,27	5,38	1,48	0,43	0,78	1,02	3,71	1,46	0,43	1,25	1,15	4,28	1,45	1,02	0,82	1,08	4,36
77	1,43	0,82	1,86	1,27	5,39	1,49	0,43	0,78	1,02	3,72	1,46	0,43	1,25	1,15	4,29	1,45	1,02	0,82	1,08	4,37
78	1,44	0,83	1,86	1,27	5,40	1,49	0,44	0,78	1,02	3,72	1,47	0,43	1,25	1,15	4,30	1,46	1,02	0,82	1,09	4,38
79	1,44	0,83	1,87	1,27	5,40	1,49	0,44	0,78	1,02	3,73	1,47	0,44	1,25	1,15	4,31	1,46	1,02	0,82	1,09	4,39
80	1,44	0,83	1,87	1,28	5,41	1,50	0,44	0,78	1,02	3,74	1,47	0,44	1,25	1,15	4,31	1,46	1,02	0,82	1,09	4,39
81	1,44	0,83	1,87	1,28	5,41	1,50	0,44	0,78	1,02	3,74	1,47	0,44	1,25	1,16	4,32	1,46	1,02	0,82	1,09	4,39
82	1,44	0,83	1,87	1,28	5,42	1,50	0,44	0,78	1,03	3,74	1,47	0,44	1,25	1,16	4,32	1,46	1,02	0,82	1,09	4,40
83	1,44	0,83	1,87	1,28	5,42	1,50	0,44	0,78	1,03	3,74	1,47	0,44	1,25	1,16	4,32	1,46	1,02	0,82	1,09	4,40
84	1,44	0,83	1,87	1,28	5,42	1,50	0,44	0,78	1,03	3,74	1,47	0,44	1,25	1,16	4,32	1,46	1,02	0,82	1,09	4,40
85	1,44	0,83	1,87	1,28	5,43	1,50	0,44	0,78	1,03	3,75	1,47	0,44	1,26	1,16	4,33	1,46	1,03	0,82	1,10	4,41
86	1,44	0,83	1,88	1,29	5,43	1,50	0,44	0,78	1,03	3,75	1,48	0,44	1,26	1,16	4,33	1,46	1,03	0,83	1,10	4,41
87	1,45	0,83	1,88	1,29	5,44	1,50	0,44	0,78	1,03	3,76	1,48	0,44	1,26	1,17	4,34	1,47	1,03	0,83	1,10	4,42
88	1,45	0,83	1,88	1,29	5,45	1,50	0,44	0,79	1,03	3,76	1,48	0,44	1,26	1,17	4,34	1,47	1,03	0,83	1,10	4,42
89	1,45	0,83	1,88	1,29	5,45	1,51	0,44	0,79	1,04	3,77	1,48	0,44	1,26	1,17	4,35	1,47	1,03	0,83	1,10	4,43
90	1,46	0,83	1,88	1,29	5,46	1,51	0,44	0,79	1,04	3,77	1,49	0,44	1,26	1,17	4,36	1,48	1,03	0,83	1,10	4,44
91	1,46	0,83	1,89	1,29	5,47	1,51	0,44	0,79	1,04	3,78	1,49	0,44	1,26	1,17	4,36	1,48	1,03	0,83	1,11	4,44
92	1,46	0,83	1,89	1,30	5,47	1,52	0,44	0,79	1,04	3,78	1,49	0,44	1,26	1,17	4,37	1,48	1,03	0,83	1,11	4,45
93	1,46	0,84	1,89	1,30	5,48	1,52	0,44	0,79	1,04	3,79	1,49	0,44	1,26	1,17	4,37	1,48	1,03	0,83	1,11	4,45
94	1,46	0,84	1,89	1,30	5,48	1,52	0,44	0,79	1,04	3,79	1,49	0,44	1,26	1,17	4,37	1,48	1,03	0,83	1,11	4,45
95	1,46	0,84	1,89	1,30	5,48	1,52	0,44	0,79	1,04	3,79	1,49	0,44	1,27	1,18	4,37	1,48	1,03	0,83	1,11	4,46
96	1,46	0,84	1,89	1,30	5,49	1,52	0,44	0,79	1,04	3,79	1,50	0,44	1,27	1,18	4,38	1,48	1,03	0,83	1,11	4,46
97	1,46	0,84	1,89	1,30	5,49	1,52	0,44	0,79	1,04	3,80	1,50	0,44	1,27	1,18	4,38	1,49	1,04	0,83	1,11	4,46
98	1,47	0,84	1,89	1,30	5,50	1,52	0,44	0,79	1,04	3,80	1,50	0,44	1,27	1,18	4,38	1,49	1,04	0,83	1,11	4,47
99	1,47	0,84	1,90	1,30	5,50	1,52	0,44	0,79	1,05	3,81	1,50	0,44	1,27	1,18	4,39	1,49	1,04	0,83	1,11	4,47
100	1,47	0,84	1,90	1,31	5,51	1,53	0,45	0,79	1,05	3,81	1,50	0,44	1,27	1,18	4,40	1,49	1,04	0,83	1,11	4,48
101	1,47	0,84	1,90	1,31	5,52	1,53	0,45	0,79	1,05	3,82	1,51	0,44	1,27	1,18	4,40	1,50	1,04	0,84	1,12	4,49
102	1,48	0,84	1,90	1,31	5,53	1,53	0,45	0,79	1,05	3,82	1,51	0,45	1,27	1,19	4,41	1,50	1,04	0,84	1,12	4,49

103	1,48	0,84	1,90	1,31	5,53	1,54	0,45	0,79	1,05	3,83	1,51	0,45	1,27	1,19	4,42	1,50	1,04	0,84	1,12	4,50
104	1,48	0,84	1,90	1,31	5,54	1,54	0,45	0,79	1,05	3,83	1,51	0,45	1,27	1,19	4,42	1,50	1,04	0,84	1,12	4,50
105	1,48	0,84	1,90	1,32	5,54	1,54	0,45	0,80	1,06	3,83	1,51	0,45	1,27	1,19	4,42	1,50	1,04	0,84	1,12	4,50
106	1,48	0,84	1,90	1,32	5,54	1,54	0,45	0,80	1,06	3,83	1,51	0,45	1,28	1,19	4,42	1,50	1,04	0,84	1,12	4,50
107	1,48	0,84	1,91	1,32	5,54	1,54	0,45	0,80	1,06	3,84	1,51	0,45	1,28	1,19	4,43	1,50	1,04	0,84	1,13	4,51
108	1,48	0,84	1,91	1,32	5,55	1,54	0,45	0,80	1,06	3,84	1,51	0,45	1,28	1,19	4,43	1,50	1,04	0,84	1,13	4,51
109	1,48	0,84	1,91	1,32	5,55	1,54	0,45	0,80	1,06	3,84	1,51	0,45	1,28	1,20	4,43	1,50	1,04	0,84	1,13	4,51
110	1,48	0,84	1,91	1,32	5,55	1,54	0,45	0,80	1,06	3,84	1,51	0,45	1,28	1,20	4,43	1,50	1,04	0,84	1,13	4,51
111	1,48	0,84	1,91	1,33	5,56	1,54	0,45	0,80	1,06	3,85	1,52	0,45	1,28	1,20	4,44	1,51	1,04	0,84	1,13	4,52
112	1,49	0,85	1,91	1,33	5,57	1,54	0,45	0,80	1,06	3,85	1,52	0,45	1,28	1,20	4,44	1,51	1,05	0,84	1,13	4,52
113	1,49	0,85	1,91	1,33	5,57	1,54	0,45	0,80	1,07	3,86	1,52	0,45	1,28	1,20	4,45	1,51	1,05	0,84	1,13	4,53
114	1,49	0,85	1,91	1,33	5,58	1,55	0,45	0,80	1,07	3,86	1,52	0,45	1,28	1,20	4,46	1,51	1,05	0,84	1,14	4,53
115	1,49	0,85	1,91	1,33	5,58	1,55	0,45	0,80	1,07	3,87	1,52	0,45	1,28	1,21	4,46	1,51	1,05	0,84	1,14	4,54
116	1,49	0,85	1,92	1,33	5,59	1,55	0,45	0,80	1,07	3,87	1,52	0,45	1,28	1,21	4,46	1,51	1,05	0,84	1,14	4,54
117	1,49	0,85	1,92	1,34	5,59	1,55	0,45	0,80	1,07	3,87	1,53	0,45	1,28	1,21	4,46	1,51	1,05	0,84	1,14	4,54
118	1,49	0,85	1,92	1,34	5,59	1,55	0,45	0,80	1,07	3,87	1,53	0,45	1,28	1,21	4,47	1,51	1,05	0,84	1,14	4,55
119	1,49	0,85	1,92	1,34	5,59	1,55	0,45	0,80	1,07	3,87	1,53	0,45	1,28	1,21	4,47	1,51	1,05	0,84	1,14	4,55
120	1,49	0,85	1,92	1,34	5,60	1,55	0,45	0,80	1,07	3,87	1,53	0,45	1,28	1,21	4,47	1,51	1,05	0,84	1,14	4,55

ATRs obtidos com o solo SRA considerando uma carga de 8,2tf e VDM de 275

Mês	Wót +1%					Wót					Wót -2%					Ciclos de umed. e sec. na SB				
	B (mm)	SB (mm)	Ref. (mm)	Sub. (mm)	Total (mm)	B (mm)	SB (mm)	Ref. (mm)	Sub. (mm)	Total (mm)	B (mm)	SB (mm)	Ref. (mm)	Sub. (mm)	Total (mm)	B (mm)	SB (mm)	Ref. (mm)	Sub. (mm)	Total (mm)
1	0,74	0,70	0,96	0,86	3,26	0,73	0,57	0,45	0,78	2,52	0,73	0,58	0,70	0,83	2,83	0,74	0,99	0,45	0,82	2,99
2	0,87	0,83	1,14	0,99	3,83	0,85	0,67	0,54	0,89	2,95	0,85	0,68	0,83	0,95	3,32	0,86	1,16	0,54	0,94	3,50
3	0,95	0,91	1,27	1,07	4,20	0,94	0,74	0,59	0,96	3,23	0,94	0,75	0,93	1,03	3,64	0,95	1,28	0,60	1,02	3,84
4	1,02	0,97	1,36	1,13	4,49	1,01	0,79	0,64	1,02	3,45	1,01	0,80	1,00	1,09	3,88	1,01	1,37	0,64	1,07	4,10
5	1,07	1,02	1,45	1,18	4,71	1,06	0,83	0,67	1,06	3,62	1,06	0,84	1,05	1,13	4,07	1,07	1,44	0,68	1,12	4,30
6	1,12	1,06	1,51	1,21	4,91	1,11	0,86	0,70	1,09	3,77	1,11	0,87	1,10	1,16	4,24	1,12	1,50	0,71	1,15	4,48
7	1,16	1,10	1,57	1,24	5,07	1,15	0,89	0,73	1,12	3,88	1,15	0,90	1,14	1,19	4,38	1,15	1,55	0,74	1,18	4,62
8	1,18	1,13	1,61	1,27	5,18	1,17	0,91	0,75	1,14	3,97	1,17	0,92	1,17	1,21	4,48	1,18	1,59	0,76	1,20	4,72
9	1,19	1,14	1,64	1,29	5,26	1,18	0,93	0,77	1,16	4,03	1,18	0,94	1,20	1,23	4,55	1,19	1,61	0,78	1,22	4,80
10	1,20	1,16	1,67	1,30	5,34	1,19	0,94	0,78	1,17	4,08	1,19	0,95	1,22	1,25	4,61	1,20	1,63	0,79	1,23	4,86
11	1,21	1,18	1,70	1,32	5,41	1,20	0,96	0,80	1,18	4,14	1,20	0,96	1,24	1,27	4,67	1,21	1,66	0,81	1,25	4,93
12	1,23	1,19	1,73	1,33	5,49	1,21	0,97	0,81	1,20	4,19	1,21	0,98	1,26	1,28	4,73	1,22	1,68	0,82	1,27	4,99
13	1,25	1,21	1,76	1,35	5,56	1,23	0,98	0,82	1,21	4,24	1,23	0,99	1,28	1,29	4,80	1,24	1,70	0,83	1,28	5,06
14	1,27	1,23	1,79	1,36	5,64	1,25	1,00	0,84	1,22	4,30	1,25	1,01	1,31	1,31	4,87	1,26	1,73	0,85	1,29	5,13
15	1,29	1,25	1,82	1,38	5,73	1,27	1,01	0,85	1,24	4,37	1,27	1,02	1,33	1,32	4,94	1,28	1,76	0,86	1,31	5,20
16	1,31	1,26	1,85	1,39	5,81	1,29	1,02	0,86	1,25	4,43	1,30	1,03	1,35	1,33	5,01	1,30	1,78	0,87	1,32	5,28
17	1,33	1,28	1,88	1,40	5,89	1,32	1,04	0,88	1,26	4,49	1,32	1,05	1,37	1,35	5,08	1,33	1,81	0,89	1,33	5,35
18	1,34	1,29	1,90	1,42	5,95	1,33	1,05	0,89	1,27	4,54	1,33	1,06	1,38	1,36	5,13	1,34	1,83	0,90	1,34	5,41
19	1,36	1,31	1,93	1,43	6,02	1,35	1,06	0,90	1,28	4,58	1,34	1,07	1,40	1,37	5,18	1,35	1,84	0,91	1,35	5,46
20	1,37	1,32	1,94	1,43	6,06	1,35	1,07	0,91	1,29	4,61	1,35	1,08	1,42	1,37	5,22	1,36	1,86	0,92	1,36	5,50
21	1,37	1,33	1,96	1,44	6,10	1,36	1,07	0,91	1,30	4,64	1,36	1,08	1,43	1,38	5,25	1,37	1,87	0,93	1,37	5,53

22	1,37	1,33	1,97	1,45	6,12	1,36	1,08	0,92	1,30	4,66	1,36	1,09	1,44	1,39	5,28	1,37	1,88	0,93	1,37	5,55
23	1,38	1,34	1,99	1,46	6,16	1,36	1,08	0,93	1,31	4,68	1,36	1,10	1,45	1,39	5,30	1,37	1,89	0,94	1,38	5,58
24	1,38	1,34	2,00	1,46	6,19	1,36	1,09	0,94	1,31	4,70	1,36	1,10	1,46	1,40	5,32	1,37	1,90	0,95	1,39	5,60
25	1,38	1,35	2,01	1,47	6,22	1,37	1,10	0,94	1,32	4,72	1,37	1,11	1,47	1,41	5,35	1,38	1,91	0,95	1,39	5,63
26	1,39	1,36	2,03	1,48	6,25	1,37	1,10	0,95	1,32	4,75	1,37	1,11	1,48	1,42	5,38	1,38	1,92	0,96	1,40	5,66
27	1,39	1,37	2,05	1,48	6,29	1,38	1,11	0,96	1,33	4,77	1,38	1,12	1,49	1,42	5,41	1,39	1,93	0,97	1,41	5,69
28	1,40	1,37	2,06	1,49	6,33	1,39	1,11	0,97	1,34	4,80	1,39	1,13	1,50	1,43	5,44	1,40	1,94	0,98	1,42	5,72
29	1,41	1,38	2,08	1,50	6,36	1,39	1,12	0,97	1,34	4,83	1,39	1,13	1,51	1,44	5,47	1,40	1,95	0,98	1,42	5,75
30	1,41	1,39	2,09	1,50	6,39	1,40	1,13	0,98	1,35	4,85	1,40	1,14	1,52	1,44	5,50	1,41	1,96	0,99	1,43	5,78
31	1,42	1,39	2,10	1,51	6,42	1,40	1,13	0,98	1,35	4,87	1,40	1,14	1,53	1,45	5,52	1,41	1,97	0,99	1,43	5,80
32	1,42	1,40	2,11	1,51	6,44	1,41	1,13	0,99	1,36	4,89	1,41	1,15	1,54	1,45	5,54	1,42	1,97	1,00	1,44	5,82
33	1,42	1,40	2,12	1,52	6,46	1,41	1,14	0,99	1,36	4,90	1,41	1,15	1,55	1,46	5,56	1,42	1,98	1,00	1,44	5,84
34	1,42	1,41	2,13	1,52	6,48	1,41	1,14	1,00	1,37	4,91	1,41	1,15	1,55	1,46	5,57	1,42	1,98	1,01	1,45	5,85
35	1,42	1,41	2,14	1,53	6,50	1,41	1,14	1,00	1,37	4,92	1,41	1,15	1,56	1,46	5,59	1,42	1,99	1,01	1,45	5,87
36	1,43	1,41	2,15	1,53	6,51	1,41	1,15	1,01	1,37	4,93	1,41	1,16	1,57	1,47	5,60	1,42	1,99	1,02	1,45	5,88
37	1,43	1,42	2,16	1,53	6,53	1,41	1,15	1,01	1,38	4,95	1,41	1,16	1,57	1,47	5,62	1,42	2,00	1,02	1,46	5,90
38	1,43	1,42	2,17	1,54	6,56	1,42	1,15	1,02	1,38	4,96	1,42	1,16	1,58	1,48	5,64	1,43	2,00	1,03	1,46	5,92
39	1,44	1,43	2,18	1,54	6,58	1,42	1,16	1,02	1,39	4,98	1,42	1,17	1,59	1,48	5,66	1,43	2,01	1,03	1,47	5,94
40	1,44	1,43	2,19	1,55	6,61	1,43	1,16	1,03	1,39	5,00	1,43	1,17	1,60	1,49	5,68	1,44	2,02	1,04	1,47	5,96
41	1,45	1,44	2,20	1,55	6,64	1,43	1,17	1,03	1,39	5,02	1,43	1,18	1,61	1,49	5,71	1,44	2,03	1,04	1,48	5,99
42	1,45	1,45	2,22	1,56	6,67	1,44	1,17	1,04	1,40	5,04	1,44	1,18	1,62	1,49	5,73	1,45	2,04	1,05	1,48	6,01
43	1,46	1,45	2,23	1,56	6,69	1,44	1,18	1,04	1,40	5,06	1,44	1,19	1,62	1,50	5,75	1,45	2,05	1,05	1,48	6,03
44	1,46	1,46	2,23	1,57	6,71	1,45	1,18	1,05	1,41	5,08	1,45	1,19	1,63	1,50	5,77	1,46	2,05	1,06	1,49	6,05
45	1,46	1,46	2,24	1,57	6,73	1,45	1,18	1,05	1,41	5,09	1,45	1,19	1,64	1,51	5,78	1,46	2,06	1,06	1,49	6,06
46	1,46	1,46	2,25	1,57	6,75	1,45	1,19	1,05	1,41	5,10	1,45	1,20	1,64	1,51	5,79	1,46	2,06	1,06	1,49	6,08
47	1,47	1,47	2,26	1,58	6,76	1,45	1,19	1,06	1,42	5,11	1,45	1,20	1,65	1,51	5,81	1,46	2,07	1,07	1,50	6,09
48	1,47	1,47	2,27	1,58	6,78	1,45	1,19	1,06	1,42	5,12	1,45	1,20	1,65	1,51	5,82	1,46	2,07	1,07	1,50	6,10

49	1,47	1,47	2,27	1,58	6,80	1,45	1,19	1,07	1,42	5,14	1,46	1,21	1,66	1,52	5,84	1,46	2,08	1,08	1,50	6,12
50	1,48	1,48	2,28	1,59	6,82	1,46	1,20	1,07	1,43	5,15	1,46	1,21	1,67	1,52	5,86	1,47	2,08	1,08	1,51	6,14
51	1,48	1,48	2,29	1,59	6,85	1,47	1,20	1,07	1,43	5,17	1,47	1,21	1,67	1,52	5,88	1,48	2,09	1,09	1,51	6,17
52	1,49	1,49	2,30	1,59	6,88	1,47	1,21	1,08	1,43	5,19	1,48	1,22	1,68	1,53	5,91	1,48	2,10	1,09	1,51	6,19
53	1,50	1,50	2,31	1,60	6,91	1,48	1,21	1,09	1,44	5,22	1,48	1,22	1,69	1,53	5,93	1,49	2,11	1,10	1,52	6,22
54	1,51	1,50	2,33	1,60	6,93	1,49	1,22	1,09	1,44	5,24	1,49	1,23	1,70	1,54	5,95	1,50	2,12	1,10	1,52	6,24
55	1,51	1,51	2,34	1,61	6,96	1,50	1,22	1,10	1,44	5,26	1,50	1,23	1,70	1,54	5,97	1,51	2,13	1,11	1,52	6,26
56	1,52	1,51	2,34	1,61	6,98	1,50	1,23	1,10	1,44	5,27	1,50	1,24	1,71	1,54	5,99	1,51	2,13	1,11	1,53	6,28
57	1,52	1,51	2,35	1,61	7,00	1,50	1,23	1,10	1,45	5,28	1,51	1,24	1,72	1,54	6,01	1,51	2,14	1,11	1,53	6,29
58	1,52	1,52	2,36	1,61	7,01	1,51	1,23	1,11	1,45	5,29	1,51	1,24	1,72	1,55	6,02	1,52	2,14	1,12	1,53	6,30
59	1,52	1,52	2,36	1,62	7,02	1,51	1,23	1,11	1,45	5,30	1,51	1,25	1,73	1,55	6,02	1,52	2,14	1,12	1,53	6,31
60	1,52	1,52	2,37	1,62	7,03	1,51	1,23	1,11	1,45	5,30	1,51	1,25	1,73	1,55	6,03	1,52	2,15	1,12	1,54	6,32
61	1,52	1,52	2,38	1,62	7,05	1,51	1,24	1,12	1,46	5,31	1,51	1,25	1,74	1,55	6,05	1,52	2,15	1,13	1,54	6,34
62	1,53	1,53	2,38	1,62	7,06	1,51	1,24	1,12	1,46	5,32	1,51	1,25	1,74	1,56	6,06	1,52	2,16	1,13	1,54	6,35
63	1,53	1,53	2,39	1,63	7,07	1,51	1,24	1,12	1,46	5,33	1,51	1,26	1,74	1,56	6,07	1,52	2,16	1,13	1,54	6,36
64	1,53	1,53	2,40	1,63	7,09	1,51	1,25	1,13	1,46	5,34	1,52	1,26	1,75	1,56	6,08	1,52	2,16	1,14	1,55	6,37
65	1,53	1,54	2,41	1,63	7,11	1,52	1,25	1,13	1,47	5,36	1,52	1,26	1,76	1,57	6,10	1,53	2,17	1,14	1,55	6,38
66	1,54	1,54	2,41	1,63	7,12	1,52	1,25	1,13	1,47	5,37	1,52	1,26	1,76	1,57	6,11	1,53	2,17	1,14	1,55	6,40
67	1,54	1,54	2,42	1,64	7,14	1,52	1,25	1,14	1,47	5,38	1,52	1,27	1,77	1,57	6,12	1,53	2,18	1,15	1,55	6,41
68	1,54	1,55	2,43	1,64	7,15	1,52	1,26	1,14	1,47	5,39	1,53	1,27	1,77	1,57	6,13	1,53	2,18	1,15	1,55	6,42
69	1,54	1,55	2,43	1,64	7,16	1,53	1,26	1,14	1,47	5,40	1,53	1,27	1,77	1,57	6,14	1,54	2,19	1,15	1,56	6,43
70	1,54	1,55	2,44	1,64	7,18	1,53	1,26	1,14	1,48	5,41	1,53	1,27	1,78	1,58	6,15	1,54	2,19	1,15	1,56	6,44
71	1,54	1,55	2,44	1,64	7,19	1,53	1,26	1,15	1,48	5,41	1,53	1,27	1,78	1,58	6,16	1,54	2,20	1,16	1,56	6,45
72	1,55	1,56	2,45	1,65	7,20	1,53	1,27	1,15	1,48	5,42	1,53	1,28	1,79	1,58	6,17	1,54	2,20	1,16	1,57	6,46
73	1,55	1,56	2,45	1,65	7,21	1,53	1,27	1,15	1,48	5,43	1,53	1,28	1,79	1,58	6,18	1,54	2,20	1,16	1,57	6,47
74	1,55	1,57	2,46	1,65	7,23	1,54	1,27	1,16	1,48	5,44	1,54	1,28	1,80	1,58	6,20	1,55	2,21	1,17	1,57	6,49
75	1,56	1,57	2,47	1,65	7,25	1,54	1,27	1,16	1,49	5,46	1,54	1,29	1,80	1,59	6,21	1,55	2,21	1,17	1,57	6,50

76	1,56	1,57	2,48	1,66	7,27	1,55	1,28	1,16	1,49	5,47	1,55	1,29	1,81	1,59	6,23	1,56	2,22	1,17	1,57	6,52
77	1,57	1,58	2,48	1,66	7,29	1,55	1,28	1,17	1,49	5,49	1,55	1,29	1,81	1,59	6,25	1,56	2,23	1,18	1,58	6,54
78	1,58	1,58	2,49	1,66	7,31	1,56	1,28	1,17	1,49	5,50	1,56	1,30	1,82	1,59	6,26	1,57	2,23	1,18	1,58	6,56
79	1,58	1,59	2,50	1,66	7,32	1,56	1,29	1,17	1,49	5,51	1,56	1,30	1,82	1,60	6,28	1,57	2,24	1,18	1,58	6,57
80	1,58	1,59	2,50	1,66	7,34	1,57	1,29	1,17	1,50	5,52	1,57	1,30	1,83	1,60	6,29	1,58	2,24	1,19	1,58	6,58
81	1,58	1,59	2,51	1,67	7,35	1,57	1,29	1,18	1,50	5,53	1,57	1,30	1,83	1,60	6,30	1,58	2,24	1,19	1,58	6,59
82	1,58	1,59	2,52	1,67	7,36	1,57	1,29	1,18	1,50	5,53	1,57	1,30	1,84	1,60	6,30	1,58	2,25	1,19	1,59	6,60
83	1,58	1,59	2,52	1,67	7,36	1,57	1,29	1,18	1,50	5,54	1,57	1,30	1,84	1,60	6,31	1,58	2,25	1,19	1,59	6,60
84	1,58	1,60	2,52	1,67	7,37	1,57	1,29	1,18	1,50	5,55	1,57	1,31	1,84	1,60	6,32	1,58	2,25	1,20	1,59	6,61
85	1,59	1,60	2,53	1,67	7,38	1,57	1,30	1,19	1,50	5,55	1,57	1,31	1,84	1,61	6,33	1,58	2,25	1,20	1,59	6,62
86	1,59	1,60	2,53	1,67	7,39	1,57	1,30	1,19	1,50	5,56	1,57	1,31	1,85	1,61	6,33	1,58	2,26	1,20	1,59	6,62
87	1,59	1,60	2,54	1,68	7,40	1,57	1,30	1,19	1,51	5,57	1,57	1,31	1,85	1,61	6,35	1,58	2,26	1,20	1,59	6,64
88	1,59	1,61	2,55	1,68	7,42	1,58	1,30	1,19	1,51	5,58	1,58	1,31	1,86	1,61	6,36	1,59	2,26	1,21	1,60	6,65
89	1,60	1,61	2,55	1,68	7,44	1,58	1,31	1,20	1,51	5,59	1,58	1,32	1,86	1,61	6,37	1,59	2,27	1,21	1,60	6,67
90	1,60	1,61	2,56	1,68	7,45	1,58	1,31	1,20	1,51	5,60	1,59	1,32	1,87	1,61	6,39	1,59	2,27	1,21	1,60	6,68
91	1,60	1,62	2,57	1,68	7,47	1,59	1,31	1,20	1,51	5,61	1,59	1,32	1,87	1,62	6,40	1,60	2,28	1,21	1,60	6,69
92	1,61	1,62	2,57	1,69	7,48	1,59	1,31	1,21	1,51	5,62	1,59	1,32	1,88	1,62	6,41	1,60	2,28	1,22	1,60	6,70
93	1,61	1,62	2,58	1,69	7,49	1,59	1,31	1,21	1,52	5,63	1,59	1,33	1,88	1,62	6,42	1,60	2,29	1,22	1,60	6,71
94	1,61	1,62	2,58	1,69	7,50	1,59	1,32	1,21	1,52	5,64	1,59	1,33	1,88	1,62	6,42	1,60	2,29	1,22	1,61	6,72
95	1,61	1,62	2,59	1,69	7,51	1,59	1,32	1,21	1,52	5,64	1,59	1,33	1,89	1,62	6,43	1,60	2,29	1,22	1,61	6,73
96	1,61	1,63	2,59	1,69	7,52	1,60	1,32	1,21	1,52	5,65	1,60	1,33	1,89	1,62	6,44	1,61	2,29	1,23	1,61	6,73
97	1,61	1,63	2,59	1,69	7,53	1,60	1,32	1,22	1,52	5,65	1,60	1,33	1,90	1,63	6,45	1,61	2,30	1,23	1,61	6,74
98	1,62	1,63	2,60	1,70	7,54	1,60	1,32	1,22	1,52	5,66	1,60	1,34	1,90	1,63	6,46	1,61	2,30	1,23	1,61	6,75
99	1,62	1,63	2,61	1,70	7,56	1,60	1,33	1,22	1,52	5,67	1,60	1,34	1,90	1,63	6,47	1,61	2,31	1,23	1,61	6,76
100	1,62	1,64	2,61	1,70	7,57	1,61	1,33	1,22	1,53	5,69	1,61	1,34	1,91	1,63	6,49	1,62	2,31	1,24	1,61	6,78
101	1,63	1,64	2,62	1,70	7,58	1,61	1,33	1,23	1,53	5,70	1,61	1,34	1,91	1,63	6,50	1,62	2,32	1,24	1,62	6,79
102	1,63	1,64	2,62	1,70	7,60	1,61	1,33	1,23	1,53	5,71	1,61	1,34	1,92	1,63	6,51	1,62	2,32	1,24	1,62	6,80

103	1,63	1,65	2,63	1,70	7,61	1,62	1,33	1,23	1,53	5,71	1,62	1,35	1,92	1,64	6,52	1,63	2,32	1,25	1,62	6,81
104	1,63	1,65	2,63	1,71	7,62	1,62	1,34	1,23	1,53	5,72	1,62	1,35	1,92	1,64	6,52	1,63	2,32	1,25	1,62	6,82
105	1,63	1,65	2,64	1,71	7,63	1,62	1,34	1,24	1,53	5,73	1,62	1,35	1,93	1,64	6,53	1,63	2,33	1,25	1,62	6,83
106	1,63	1,65	2,64	1,71	7,63	1,62	1,34	1,24	1,53	5,73	1,62	1,35	1,93	1,64	6,53	1,63	2,33	1,25	1,62	6,83
107	1,63	1,65	2,64	1,71	7,64	1,62	1,34	1,24	1,54	5,73	1,62	1,35	1,93	1,64	6,54	1,63	2,33	1,25	1,62	6,84
108	1,64	1,65	2,65	1,71	7,65	1,62	1,34	1,24	1,54	5,74	1,62	1,35	1,93	1,64	6,54	1,63	2,33	1,26	1,62	6,84
109	1,64	1,65	2,65	1,71	7,65	1,62	1,34	1,25	1,54	5,74	1,62	1,35	1,94	1,64	6,55	1,63	2,33	1,26	1,63	6,85
110	1,64	1,66	2,66	1,72	7,66	1,62	1,34	1,25	1,54	5,75	1,62	1,36	1,94	1,64	6,56	1,63	2,34	1,26	1,63	6,85
111	1,64	1,66	2,66	1,72	7,67	1,62	1,35	1,25	1,54	5,76	1,62	1,36	1,94	1,65	6,57	1,63	2,34	1,26	1,63	6,86
112	1,64	1,66	2,67	1,72	7,68	1,63	1,35	1,25	1,54	5,76	1,63	1,36	1,95	1,65	6,58	1,64	2,34	1,26	1,63	6,87
113	1,64	1,66	2,67	1,72	7,69	1,63	1,35	1,25	1,54	5,77	1,63	1,36	1,95	1,65	6,59	1,64	2,35	1,27	1,63	6,88
114	1,65	1,67	2,68	1,72	7,71	1,63	1,35	1,26	1,54	5,78	1,63	1,36	1,95	1,65	6,60	1,64	2,35	1,27	1,63	6,89
115	1,65	1,67	2,68	1,72	7,72	1,63	1,35	1,26	1,55	5,79	1,63	1,37	1,96	1,65	6,60	1,64	2,36	1,27	1,63	6,90
116	1,65	1,67	2,69	1,72	7,73	1,63	1,35	1,26	1,55	5,79	1,63	1,37	1,96	1,65	6,61	1,64	2,36	1,27	1,64	6,91
117	1,65	1,67	2,69	1,72	7,73	1,63	1,36	1,26	1,55	5,80	1,63	1,37	1,96	1,65	6,62	1,64	2,36	1,28	1,64	6,91
118	1,65	1,67	2,69	1,73	7,74	1,63	1,36	1,26	1,55	5,80	1,63	1,37	1,97	1,65	6,62	1,64	2,36	1,28	1,64	6,92
119	1,65	1,67	2,70	1,73	7,74	1,63	1,36	1,27	1,55	5,80	1,63	1,37	1,97	1,66	6,62	1,64	2,36	1,28	1,64	6,92
120	1,65	1,67	2,70	1,73	7,75	1,63	1,36	1,27	1,55	5,81	1,63	1,37	1,97	1,66	6,63	1,64	2,36	1,28	1,64	6,92

ATRs obtidos com o solo AS considerando uma carga de 8,2tf e VDM de 1000

Mês	Wót +1%					Wót					Wót -2%					Ciclos de umed. e sec. na SB				
	B (mm)	SB (mm)	Ref. (mm)	Sub. (mm)	Total (mm)	B (mm)	SB (mm)	Ref. (mm)	Sub. (mm)	Total (mm)	B (mm)	SB (mm)	Ref. (mm)	Sub. (mm)	Total (mm)	B (mm)	SB (mm)	Ref. (mm)	Sub. (mm)	Total (mm)
1	0,93	0,65	1,39	0,83	3,81	0,96	0,35	0,58	0,67	2,56	0,95	0,34	0,93	0,75	2,97	0,95	0,75	0,61	0,71	3,01
2	1,05	0,71	1,52	0,94	4,21	1,09	0,38	0,63	0,75	2,85	1,07	0,37	1,01	0,85	3,30	1,06	0,82	0,66	0,80	3,34
3	1,13	0,75	1,60	1,00	4,47	1,17	0,39	0,66	0,81	3,03	1,15	0,39	1,06	0,90	3,51	1,14	0,87	0,69	0,85	3,55
4	1,19	0,77	1,65	1,05	4,66	1,23	0,41	0,68	0,84	3,17	1,21	0,40	1,10	0,95	3,66	1,21	0,89	0,72	0,89	3,71
5	1,23	0,79	1,70	1,08	4,80	1,28	0,42	0,70	0,87	3,27	1,26	0,41	1,13	0,98	3,78	1,25	0,92	0,73	0,92	3,83
6	1,28	0,81	1,73	1,11	4,92	1,33	0,42	0,71	0,90	3,36	1,31	0,42	1,15	1,01	3,88	1,30	0,94	0,75	0,95	3,92
7	1,31	0,82	1,75	1,13	5,01	1,36	0,43	0,72	0,91	3,42	1,34	0,42	1,17	1,03	3,95	1,33	0,95	0,76	0,97	4,00
8	1,32	0,83	1,77	1,15	5,07	1,37	0,43	0,73	0,93	3,46	1,35	0,43	1,18	1,04	4,00	1,34	0,96	0,77	0,98	4,04
9	1,33	0,83	1,78	1,16	5,10	1,38	0,44	0,73	0,94	3,49	1,36	0,43	1,18	1,05	4,02	1,35	0,96	0,77	0,99	4,07
10	1,33	0,84	1,79	1,17	5,13	1,38	0,44	0,74	0,94	3,50	1,36	0,43	1,19	1,06	4,04	1,35	0,97	0,78	1,00	4,09
11	1,34	0,84	1,80	1,18	5,16	1,39	0,44	0,74	0,95	3,53	1,37	0,43	1,20	1,07	4,07	1,36	0,97	0,78	1,01	4,12
12	1,35	0,85	1,81	1,19	5,19	1,40	0,45	0,75	0,96	3,55	1,38	0,44	1,20	1,08	4,09	1,37	0,98	0,79	1,01	4,14
13	1,36	0,85	1,82	1,20	5,23	1,41	0,45	0,75	0,97	3,57	1,39	0,44	1,21	1,09	4,12	1,38	0,98	0,79	1,02	4,17
14	1,37	0,86	1,83	1,21	5,27	1,43	0,45	0,76	0,97	3,60	1,41	0,44	1,22	1,10	4,16	1,39	0,99	0,79	1,03	4,21
15	1,39	0,86	1,84	1,22	5,31	1,45	0,45	0,76	0,98	3,64	1,42	0,45	1,22	1,11	4,20	1,42	1,00	0,80	1,04	4,25
16	1,41	0,87	1,85	1,23	5,36	1,47	0,46	0,77	0,99	3,68	1,44	0,45	1,23	1,12	4,24	1,43	1,00	0,80	1,05	4,29
17	1,43	0,87	1,86	1,25	5,41	1,49	0,46	0,77	1,00	3,71	1,46	0,45	1,24	1,13	4,28	1,45	1,01	0,81	1,06	4,33
18	1,44	0,88	1,87	1,25	5,44	1,50	0,46	0,78	1,01	3,74	1,47	0,45	1,25	1,13	4,31	1,46	1,02	0,81	1,06	4,36
19	1,45	0,88	1,88	1,26	5,47	1,51	0,46	0,78	1,01	3,76	1,49	0,45	1,25	1,14	4,33	1,48	1,02	0,82	1,07	4,38
20	1,46	0,88	1,89	1,27	5,49	1,51	0,46	0,78	1,02	3,77	1,49	0,46	1,26	1,15	4,35	1,48	1,02	0,82	1,08	4,40
21	1,46	0,88	1,89	1,27	5,50	1,52	0,47	0,78	1,02	3,78	1,49	0,46	1,26	1,15	4,36	1,48	1,02	0,82	1,08	4,41

22	1,46	0,89	1,89	1,28	5,51	1,52	0,47	0,78	1,03	3,79	1,49	0,46	1,26	1,15	4,36	1,48	1,03	0,82	1,09	4,42
23	1,46	0,89	1,90	1,28	5,53	1,52	0,47	0,79	1,03	3,80	1,49	0,46	1,26	1,16	4,37	1,48	1,03	0,82	1,09	4,42
24	1,46	0,89	1,90	1,29	5,54	1,52	0,47	0,79	1,03	3,80	1,50	0,46	1,27	1,16	4,38	1,49	1,03	0,83	1,09	4,43
25	1,47	0,89	1,90	1,29	5,55	1,52	0,47	0,79	1,03	3,81	1,50	0,46	1,27	1,16	4,39	1,49	1,03	0,83	1,10	4,44
26	1,47	0,89	1,91	1,29	5,56	1,52	0,47	0,79	1,04	3,82	1,50	0,46	1,27	1,17	4,40	1,49	1,03	0,83	1,10	4,45
27	1,47	0,89	1,91	1,30	5,58	1,53	0,47	0,79	1,04	3,84	1,51	0,46	1,28	1,17	4,42	1,50	1,04	0,83	1,10	4,47
28	1,48	0,90	1,92	1,31	5,60	1,54	0,47	0,80	1,05	3,85	1,51	0,46	1,28	1,18	4,43	1,50	1,04	0,83	1,11	4,48
29	1,48	0,90	1,93	1,31	5,62	1,54	0,47	0,80	1,05	3,86	1,52	0,47	1,28	1,18	4,45	1,51	1,04	0,84	1,11	4,50
30	1,49	0,90	1,93	1,32	5,63	1,54	0,47	0,80	1,06	3,87	1,52	0,47	1,29	1,19	4,46	1,51	1,04	0,84	1,12	4,51
31	1,49	0,90	1,93	1,32	5,64	1,55	0,48	0,80	1,06	3,88	1,52	0,47	1,29	1,19	4,47	1,51	1,05	0,84	1,12	4,52
32	1,49	0,90	1,94	1,32	5,65	1,55	0,48	0,80	1,06	3,89	1,53	0,47	1,29	1,20	4,48	1,52	1,05	0,84	1,12	4,53
33	1,49	0,91	1,94	1,33	5,66	1,55	0,48	0,80	1,06	3,89	1,53	0,47	1,29	1,20	4,48	1,52	1,05	0,84	1,13	4,53
34	1,49	0,91	1,94	1,33	5,66	1,55	0,48	0,80	1,06	3,89	1,53	0,47	1,29	1,20	4,49	1,52	1,05	0,84	1,13	4,54
35	1,49	0,91	1,94	1,33	5,67	1,55	0,48	0,81	1,07	3,90	1,53	0,47	1,29	1,20	4,49	1,52	1,05	0,84	1,13	4,54
36	1,49	0,91	1,94	1,34	5,68	1,55	0,48	0,81	1,07	3,90	1,53	0,47	1,29	1,21	4,50	1,52	1,05	0,84	1,13	4,55
37	1,49	0,91	1,94	1,34	5,69	1,55	0,48	0,81	1,07	3,91	1,53	0,47	1,30	1,21	4,50	1,52	1,05	0,85	1,14	4,55
38	1,50	0,91	1,95	1,34	5,70	1,55	0,48	0,81	1,07	3,91	1,53	0,47	1,30	1,21	4,51	1,52	1,05	0,85	1,14	4,56
39	1,50	0,91	1,95	1,34	5,71	1,56	0,48	0,81	1,08	3,92	1,53	0,47	1,30	1,21	4,52	1,52	1,06	0,85	1,14	4,57
40	1,50	0,91	1,95	1,35	5,72	1,56	0,48	0,81	1,08	3,93	1,54	0,47	1,30	1,22	4,53	1,53	1,06	0,85	1,15	4,58
41	1,51	0,91	1,96	1,35	5,74	1,57	0,48	0,81	1,09	3,95	1,54	0,47	1,31	1,22	4,54	1,53	1,06	0,85	1,15	4,59
42	1,51	0,92	1,96	1,36	5,75	1,57	0,48	0,81	1,09	3,96	1,55	0,48	1,31	1,22	4,55	1,54	1,06	0,85	1,15	4,61
43	1,52	0,92	1,97	1,36	5,76	1,58	0,48	0,82	1,09	3,97	1,55	0,48	1,31	1,23	4,56	1,54	1,06	0,85	1,16	4,61
44	1,52	0,92	1,97	1,36	5,77	1,58	0,48	0,82	1,09	3,97	1,55	0,48	1,31	1,23	4,57	1,54	1,06	0,86	1,16	4,62
45	1,52	0,92	1,97	1,36	5,77	1,58	0,49	0,82	1,10	3,97	1,55	0,48	1,31	1,23	4,58	1,54	1,07	0,86	1,16	4,63
46	1,52	0,92	1,97	1,37	5,78	1,58	0,49	0,82	1,10	3,98	1,55	0,48	1,31	1,23	4,58	1,54	1,07	0,86	1,16	4,63
47	1,52	0,92	1,97	1,37	5,78	1,58	0,49	0,82	1,10	3,98	1,55	0,48	1,31	1,23	4,58	1,54	1,07	0,86	1,16	4,63
48	1,52	0,92	1,97	1,37	5,79	1,58	0,49	0,82	1,10	3,98	1,56	0,48	1,32	1,24	4,59	1,55	1,07	0,86	1,16	4,64

49	1,52	0,92	1,98	1,37	5,79	1,58	0,49	0,82	1,10	3,99	1,56	0,48	1,32	1,24	4,59	1,55	1,07	0,86	1,17	4,64
50	1,53	0,93	1,98	1,37	5,80	1,59	0,49	0,82	1,10	4,00	1,56	0,48	1,32	1,24	4,60	1,55	1,07	0,86	1,17	4,65
51	1,53	0,93	1,98	1,38	5,82	1,59	0,49	0,82	1,11	4,01	1,57	0,48	1,32	1,25	4,61	1,56	1,07	0,86	1,17	4,66
52	1,54	0,93	1,98	1,38	5,83	1,60	0,49	0,82	1,11	4,02	1,57	0,48	1,32	1,25	4,62	1,56	1,07	0,86	1,17	4,67
53	1,54	0,93	1,99	1,38	5,85	1,61	0,49	0,83	1,11	4,03	1,58	0,48	1,33	1,25	4,64	1,57	1,08	0,86	1,18	4,69
54	1,55	0,93	1,99	1,39	5,86	1,61	0,49	0,83	1,11	4,04	1,59	0,48	1,33	1,25	4,65	1,58	1,08	0,87	1,18	4,70
55	1,56	0,93	2,00	1,39	5,88	1,62	0,49	0,83	1,12	4,05	1,59	0,48	1,33	1,26	4,66	1,58	1,08	0,87	1,18	4,71
56	1,56	0,93	2,00	1,39	5,88	1,62	0,49	0,83	1,12	4,06	1,60	0,48	1,33	1,26	4,67	1,59	1,08	0,87	1,18	4,72
57	1,56	0,94	2,00	1,39	5,89	1,62	0,49	0,83	1,12	4,06	1,60	0,48	1,33	1,26	4,67	1,59	1,08	0,87	1,18	4,72
58	1,56	0,94	2,00	1,39	5,89	1,62	0,49	0,83	1,12	4,06	1,60	0,48	1,33	1,26	4,67	1,59	1,08	0,87	1,19	4,72
59	1,56	0,94	2,00	1,40	5,89	1,62	0,49	0,83	1,12	4,06	1,60	0,48	1,33	1,26	4,67	1,59	1,08	0,87	1,19	4,72
60	1,56	0,94	2,00	1,40	5,90	1,62	0,49	0,83	1,12	4,06	1,60	0,48	1,33	1,26	4,68	1,59	1,09	0,87	1,19	4,73
61	1,56	0,94	2,00	1,40	5,90	1,62	0,49	0,83	1,12	4,07	1,60	0,48	1,34	1,27	4,68	1,59	1,09	0,87	1,19	4,73
62	1,57	0,94	2,00	1,40	5,91	1,63	0,49	0,83	1,13	4,07	1,60	0,49	1,34	1,27	4,69	1,59	1,09	0,87	1,19	4,74
63	1,57	0,94	2,01	1,41	5,92	1,63	0,49	0,83	1,13	4,08	1,60	0,49	1,34	1,27	4,69	1,59	1,09	0,87	1,19	4,74
64	1,57	0,94	2,01	1,41	5,92	1,63	0,49	0,83	1,13	4,09	1,60	0,49	1,34	1,28	4,70	1,59	1,09	0,87	1,20	4,75
65	1,57	0,94	2,01	1,42	5,93	1,63	0,50	0,83	1,14	4,09	1,61	0,49	1,34	1,28	4,71	1,60	1,09	0,87	1,20	4,76
66	1,57	0,94	2,01	1,42	5,94	1,63	0,50	0,84	1,14	4,10	1,61	0,49	1,34	1,28	4,72	1,60	1,09	0,88	1,21	4,77
67	1,57	0,94	2,01	1,42	5,95	1,63	0,50	0,84	1,14	4,11	1,61	0,49	1,34	1,28	4,72	1,60	1,09	0,88	1,21	4,77
68	1,58	0,94	2,02	1,42	5,95	1,64	0,50	0,84	1,14	4,11	1,61	0,49	1,34	1,29	4,72	1,60	1,09	0,88	1,21	4,78
69	1,58	0,94	2,02	1,42	5,96	1,64	0,50	0,84	1,14	4,11	1,61	0,49	1,34	1,29	4,73	1,60	1,09	0,88	1,21	4,78
70	1,58	0,94	2,02	1,43	5,96	1,64	0,50	0,84	1,14	4,11	1,61	0,49	1,35	1,29	4,73	1,60	1,09	0,88	1,21	4,78
71	1,58	0,94	2,02	1,43	5,96	1,64	0,50	0,84	1,14	4,11	1,61	0,49	1,35	1,29	4,73	1,60	1,09	0,88	1,21	4,78
72	1,58	0,95	2,02	1,43	5,96	1,64	0,50	0,84	1,15	4,12	1,61	0,49	1,35	1,29	4,74	1,60	1,09	0,88	1,21	4,78
73	1,58	0,95	2,02	1,43	5,97	1,64	0,50	0,84	1,15	4,12	1,61	0,49	1,35	1,29	4,74	1,60	1,10	0,88	1,21	4,79
74	1,58	0,95	2,02	1,43	5,98	1,64	0,50	0,84	1,15	4,13	1,62	0,49	1,35	1,29	4,75	1,61	1,10	0,88	1,21	4,79
75	1,58	0,95	2,02	1,43	5,98	1,65	0,50	0,84	1,15	4,13	1,62	0,49	1,35	1,29	4,75	1,61	1,10	0,88	1,22	4,80

76	1,59	0,95	2,03	1,43	6,00	1,65	0,50	0,84	1,15	4,14	1,63	0,49	1,35	1,30	4,76	1,61	1,10	0,88	1,22	4,81
77	1,59	0,95	2,03	1,44	6,01	1,65	0,50	0,84	1,15	4,15	1,63	0,49	1,35	1,30	4,77	1,62	1,10	0,88	1,22	4,82
78	1,60	0,95	2,03	1,44	6,02	1,66	0,50	0,84	1,15	4,15	1,63	0,49	1,35	1,30	4,78	1,62	1,10	0,88	1,22	4,83
79	1,60	0,95	2,04	1,44	6,02	1,66	0,50	0,84	1,16	4,16	1,64	0,49	1,36	1,30	4,78	1,63	1,10	0,88	1,22	4,83
80	1,60	0,95	2,04	1,44	6,03	1,66	0,50	0,84	1,16	4,16	1,64	0,49	1,36	1,30	4,79	1,63	1,10	0,88	1,22	4,84
81	1,60	0,95	2,04	1,44	6,03	1,66	0,50	0,84	1,16	4,17	1,64	0,49	1,36	1,30	4,79	1,63	1,10	0,89	1,22	4,84
82	1,60	0,95	2,04	1,44	6,03	1,66	0,50	0,85	1,16	4,17	1,64	0,49	1,36	1,30	4,79	1,63	1,10	0,89	1,23	4,84
83	1,60	0,95	2,04	1,45	6,04	1,66	0,50	0,85	1,16	4,17	1,64	0,49	1,36	1,31	4,79	1,63	1,10	0,89	1,23	4,84
84	1,60	0,95	2,04	1,45	6,04	1,66	0,50	0,85	1,16	4,17	1,64	0,49	1,36	1,31	4,80	1,63	1,10	0,89	1,23	4,85
85	1,60	0,95	2,04	1,45	6,04	1,66	0,50	0,85	1,16	4,17	1,64	0,49	1,36	1,31	4,80	1,63	1,10	0,89	1,23	4,85
86	1,60	0,95	2,04	1,45	6,05	1,67	0,50	0,85	1,16	4,18	1,64	0,49	1,36	1,31	4,80	1,63	1,11	0,89	1,23	4,85
87	1,61	0,96	2,04	1,45	6,05	1,67	0,50	0,85	1,16	4,18	1,64	0,49	1,36	1,31	4,81	1,63	1,11	0,89	1,23	4,86
88	1,61	0,96	2,04	1,45	6,06	1,67	0,50	0,85	1,17	4,19	1,65	0,49	1,36	1,31	4,81	1,63	1,11	0,89	1,23	4,86
89	1,61	0,96	2,05	1,46	6,07	1,67	0,50	0,85	1,17	4,19	1,65	0,49	1,36	1,32	4,82	1,64	1,11	0,89	1,24	4,87
90	1,61	0,96	2,05	1,46	6,08	1,68	0,50	0,85	1,17	4,20	1,65	0,50	1,36	1,32	4,83	1,64	1,11	0,89	1,24	4,87
91	1,62	0,96	2,05	1,46	6,08	1,68	0,50	0,85	1,17	4,20	1,65	0,50	1,37	1,32	4,83	1,64	1,11	0,89	1,24	4,88
92	1,62	0,96	2,05	1,46	6,09	1,68	0,50	0,85	1,17	4,21	1,66	0,50	1,37	1,32	4,83	1,64	1,11	0,89	1,24	4,88
93	1,62	0,96	2,05	1,46	6,09	1,68	0,50	0,85	1,17	4,21	1,66	0,50	1,37	1,32	4,84	1,65	1,11	0,89	1,24	4,89
94	1,62	0,96	2,05	1,46	6,09	1,68	0,50	0,85	1,17	4,21	1,66	0,50	1,37	1,32	4,84	1,65	1,11	0,89	1,24	4,89
95	1,62	0,96	2,05	1,46	6,09	1,68	0,50	0,85	1,17	4,21	1,66	0,50	1,37	1,32	4,84	1,65	1,11	0,89	1,24	4,89
96	1,62	0,96	2,05	1,46	6,10	1,68	0,51	0,85	1,17	4,21	1,66	0,50	1,37	1,32	4,84	1,65	1,11	0,89	1,24	4,89
97	1,62	0,96	2,06	1,46	6,10	1,68	0,51	0,85	1,17	4,21	1,66	0,50	1,37	1,32	4,85	1,65	1,11	0,89	1,24	4,90
98	1,62	0,96	2,06	1,47	6,10	1,69	0,51	0,85	1,17	4,22	1,66	0,50	1,37	1,32	4,85	1,65	1,11	0,89	1,25	4,90
99	1,63	0,96	2,06	1,47	6,11	1,69	0,51	0,85	1,18	4,22	1,66	0,50	1,37	1,32	4,85	1,65	1,11	0,89	1,25	4,91
100	1,63	0,96	2,06	1,47	6,12	1,69	0,51	0,85	1,18	4,23	1,67	0,50	1,37	1,33	4,86	1,66	1,12	0,90	1,25	4,91
101	1,63	0,96	2,06	1,47	6,12	1,69	0,51	0,85	1,18	4,23	1,67	0,50	1,37	1,33	4,87	1,66	1,12	0,90	1,25	4,92
102	1,63	0,96	2,06	1,47	6,13	1,70	0,51	0,86	1,18	4,24	1,67	0,50	1,37	1,33	4,87	1,66	1,12	0,90	1,25	4,92

103	1,64	0,96	2,06	1,48	6,14	1,70	0,51	0,86	1,18	4,24	1,67	0,50	1,37	1,33	4,88	1,66	1,12	0,90	1,25	4,93
104	1,64	0,97	2,06	1,48	6,14	1,70	0,51	0,86	1,19	4,25	1,67	0,50	1,38	1,33	4,88	1,66	1,12	0,90	1,26	4,93
105	1,64	0,97	2,07	1,48	6,14	1,70	0,51	0,86	1,19	4,25	1,67	0,50	1,38	1,34	4,88	1,66	1,12	0,90	1,26	4,93
106	1,64	0,97	2,07	1,48	6,14	1,70	0,51	0,86	1,19	4,25	1,67	0,50	1,38	1,34	4,88	1,66	1,12	0,90	1,26	4,94
107	1,64	0,97	2,07	1,48	6,15	1,70	0,51	0,86	1,19	4,25	1,67	0,50	1,38	1,34	4,89	1,66	1,12	0,90	1,26	4,94
108	1,64	0,97	2,07	1,48	6,15	1,70	0,51	0,86	1,19	4,25	1,67	0,50	1,38	1,34	4,89	1,66	1,12	0,90	1,26	4,94
109	1,64	0,97	2,07	1,48	6,15	1,70	0,51	0,86	1,19	4,26	1,67	0,50	1,38	1,34	4,89	1,66	1,12	0,90	1,26	4,94
110	1,64	0,97	2,07	1,49	6,15	1,70	0,51	0,86	1,19	4,26	1,67	0,50	1,38	1,34	4,89	1,66	1,12	0,90	1,26	4,94
111	1,64	0,97	2,07	1,49	6,16	1,70	0,51	0,86	1,19	4,26	1,68	0,50	1,38	1,34	4,90	1,67	1,12	0,90	1,26	4,95
112	1,64	0,97	2,07	1,49	6,17	1,70	0,51	0,86	1,19	4,27	1,68	0,50	1,38	1,35	4,90	1,67	1,12	0,90	1,27	4,95
113	1,64	0,97	2,07	1,49	6,17	1,71	0,51	0,86	1,20	4,27	1,68	0,50	1,38	1,35	4,91	1,67	1,12	0,90	1,27	4,96
114	1,64	0,97	2,07	1,49	6,18	1,71	0,51	0,86	1,20	4,28	1,68	0,50	1,38	1,35	4,91	1,67	1,12	0,90	1,27	4,96
115	1,65	0,97	2,07	1,50	6,18	1,71	0,51	0,86	1,20	4,28	1,68	0,50	1,38	1,35	4,92	1,67	1,12	0,90	1,27	4,97
116	1,65	0,97	2,07	1,50	6,19	1,71	0,51	0,86	1,20	4,28	1,68	0,50	1,38	1,35	4,92	1,67	1,12	0,90	1,27	4,97
117	1,65	0,97	2,08	1,50	6,19	1,71	0,51	0,86	1,20	4,28	1,68	0,50	1,38	1,35	4,92	1,67	1,12	0,90	1,27	4,97
118	1,65	0,97	2,08	1,50	6,19	1,71	0,51	0,86	1,20	4,28	1,68	0,50	1,38	1,35	4,92	1,67	1,12	0,90	1,27	4,97
119	1,65	0,97	2,08	1,50	6,19	1,71	0,51	0,86	1,20	4,29	1,68	0,50	1,38	1,36	4,92	1,67	1,12	0,90	1,28	4,97
120	1,65	0,97	2,08	1,50	6,19	1,71	0,51	0,86	1,20	4,29	1,68	0,50	1,38	1,36	4,93	1,67	1,12	0,90	1,28	4,97

ATRs obtidos com o solo SRA considerando uma carga de 8,2tf e VDM de 1000

Mês	Wót +1%					Wót					Wót -2%					Ciclos de umed. e sec. na SB				
	B (mm)	SB (mm)	Ref. (mm)	Sub. (mm)	Total (mm)	B (mm)	SB (mm)	Ref. (mm)	Sub. (mm)	Total (mm)	B (mm)	SB (mm)	Ref. (mm)	Sub. (mm)	Total (mm)	B (mm)	SB (mm)	Ref. (mm)	Sub. (mm)	Total (mm)
1	0,96	0,90	1,29	1,10	4,25	0,94	0,72	0,61	0,99	3,26	0,94	0,73	0,94	1,05	3,67	0,95	1,30	0,62	1,05	3,91
2	1,09	1,03	1,52	1,23	4,87	1,07	0,83	0,71	1,11	3,72	1,07	0,84	1,11	1,18	4,19	1,08	1,50	0,72	1,17	4,47
3	1,17	1,12	1,67	1,31	5,27	1,16	0,90	0,78	1,18	4,02	1,16	0,90	1,21	1,26	4,53	1,17	1,62	0,79	1,25	4,83
4	1,25	1,19	1,79	1,37	5,59	1,23	0,95	0,84	1,23	4,25	1,23	0,96	1,30	1,31	4,80	1,25	1,72	0,85	1,30	5,12
5	1,30	1,24	1,88	1,42	5,84	1,29	0,99	0,88	1,27	4,43	1,29	1,00	1,37	1,36	5,01	1,30	1,80	0,89	1,34	5,33
6	1,36	1,29	1,96	1,45	6,05	1,35	1,03	0,92	1,30	4,59	1,34	1,04	1,43	1,39	5,19	1,35	1,87	0,93	1,38	5,53
7	1,39	1,32	2,02	1,48	6,22	1,38	1,06	0,95	1,33	4,71	1,38	1,06	1,47	1,42	5,33	1,39	1,92	0,96	1,41	5,68
8	1,42	1,35	2,08	1,50	6,34	1,41	1,08	0,97	1,35	4,80	1,40	1,08	1,51	1,44	5,43	1,41	1,95	0,98	1,43	5,78
9	1,43	1,36	2,11	1,52	6,42	1,42	1,09	0,99	1,36	4,86	1,41	1,10	1,53	1,46	5,50	1,42	1,98	1,00	1,45	5,85
10	1,43	1,38	2,15	1,54	6,49	1,42	1,10	1,01	1,38	4,91	1,42	1,11	1,56	1,47	5,56	1,43	2,00	1,02	1,46	5,91
11	1,45	1,39	2,18	1,55	6,57	1,43	1,12	1,02	1,39	4,96	1,43	1,12	1,59	1,49	5,62	1,44	2,02	1,04	1,48	5,98
12	1,46	1,41	2,21	1,57	6,65	1,44	1,13	1,04	1,40	5,01	1,44	1,14	1,61	1,50	5,69	1,45	2,05	1,05	1,49	6,04
13	1,47	1,43	2,25	1,58	6,72	1,46	1,14	1,05	1,42	5,07	1,46	1,15	1,63	1,51	5,75	1,47	2,07	1,07	1,50	6,11
14	1,49	1,45	2,28	1,59	6,81	1,48	1,16	1,07	1,43	5,13	1,48	1,16	1,66	1,52	5,82	1,49	2,10	1,09	1,51	6,19
15	1,52	1,46	2,31	1,61	6,90	1,50	1,17	1,09	1,44	5,20	1,50	1,18	1,68	1,54	5,90	1,51	2,13	1,10	1,53	6,27
16	1,54	1,48	2,35	1,62	6,99	1,53	1,18	1,10	1,45	5,26	1,53	1,19	1,71	1,55	5,97	1,54	2,15	1,12	1,54	6,35
17	1,57	1,50	2,38	1,63	7,08	1,55	1,20	1,12	1,46	5,33	1,55	1,21	1,73	1,56	6,05	1,56	2,18	1,13	1,55	6,43
18	1,58	1,51	2,41	1,64	7,14	1,57	1,21	1,13	1,47	5,38	1,57	1,22	1,75	1,57	6,10	1,58	2,20	1,15	1,56	6,48
19	1,59	1,53	2,44	1,65	7,21	1,58	1,22	1,14	1,48	5,42	1,58	1,23	1,77	1,58	6,16	1,59	2,22	1,16	1,57	6,54
20	1,60	1,54	2,46	1,66	7,25	1,59	1,23	1,15	1,49	5,45	1,59	1,23	1,79	1,59	6,20	1,60	2,23	1,17	1,58	6,58
21	1,61	1,54	2,47	1,67	7,29	1,59	1,23	1,16	1,49	5,48	1,59	1,24	1,80	1,60	6,22	1,60	2,24	1,18	1,59	6,61

22	1,61	1,55	2,49	1,67	7,32	1,59	1,24	1,17	1,50	5,50	1,59	1,25	1,81	1,60	6,25	1,60	2,25	1,18	1,59	6,63
23	1,61	1,55	2,50	1,68	7,35	1,60	1,24	1,17	1,51	5,52	1,59	1,25	1,82	1,61	6,27	1,61	2,26	1,19	1,60	6,66
24	1,61	1,56	2,52	1,68	7,37	1,60	1,25	1,18	1,51	5,54	1,60	1,26	1,83	1,61	6,30	1,61	2,27	1,20	1,60	6,68
25	1,61	1,57	2,54	1,69	7,40	1,60	1,25	1,19	1,52	5,56	1,60	1,26	1,84	1,62	6,32	1,61	2,28	1,21	1,61	6,70
26	1,62	1,57	2,55	1,70	7,44	1,61	1,26	1,20	1,52	5,58	1,60	1,27	1,85	1,63	6,35	1,61	2,29	1,21	1,62	6,73
27	1,62	1,58	2,57	1,70	7,48	1,61	1,26	1,20	1,53	5,61	1,61	1,27	1,87	1,63	6,38	1,62	2,30	1,22	1,62	6,76
28	1,63	1,59	2,59	1,71	7,51	1,62	1,27	1,21	1,53	5,63	1,62	1,28	1,88	1,64	6,41	1,63	2,31	1,23	1,63	6,80
29	1,63	1,60	2,60	1,72	7,55	1,62	1,28	1,22	1,54	5,66	1,62	1,29	1,89	1,64	6,44	1,63	2,32	1,24	1,63	6,82
30	1,64	1,60	2,62	1,72	7,58	1,63	1,28	1,23	1,54	5,68	1,62	1,29	1,91	1,65	6,47	1,64	2,33	1,25	1,64	6,85
31	1,64	1,61	2,63	1,73	7,61	1,63	1,29	1,23	1,55	5,70	1,63	1,29	1,92	1,65	6,49	1,64	2,34	1,26	1,64	6,87
32	1,64	1,61	2,64	1,73	7,63	1,63	1,29	1,24	1,55	5,72	1,63	1,30	1,93	1,66	6,51	1,64	2,34	1,26	1,65	6,89
33	1,65	1,62	2,65	1,74	7,65	1,63	1,29	1,25	1,56	5,73	1,63	1,30	1,93	1,66	6,53	1,64	2,35	1,27	1,65	6,91
34	1,65	1,62	2,66	1,74	7,67	1,63	1,30	1,25	1,56	5,74	1,63	1,30	1,94	1,67	6,54	1,64	2,35	1,27	1,66	6,92
35	1,65	1,62	2,67	1,74	7,68	1,63	1,30	1,26	1,56	5,75	1,63	1,31	1,95	1,67	6,55	1,64	2,36	1,27	1,66	6,93
36	1,65	1,62	2,68	1,75	7,70	1,63	1,30	1,26	1,57	5,76	1,63	1,31	1,95	1,67	6,56	1,64	2,36	1,28	1,66	6,94
37	1,65	1,63	2,69	1,75	7,72	1,63	1,30	1,27	1,57	5,77	1,63	1,31	1,96	1,68	6,58	1,64	2,36	1,28	1,67	6,96
38	1,65	1,63	2,70	1,76	7,74	1,64	1,31	1,27	1,57	5,79	1,64	1,32	1,97	1,68	6,60	1,65	2,37	1,29	1,67	6,98
39	1,65	1,64	2,72	1,76	7,77	1,64	1,31	1,28	1,58	5,80	1,64	1,32	1,98	1,68	6,62	1,65	2,38	1,30	1,67	7,00
40	1,66	1,64	2,73	1,76	7,80	1,65	1,32	1,28	1,58	5,82	1,64	1,32	1,99	1,69	6,65	1,66	2,39	1,30	1,68	7,02
41	1,67	1,65	2,74	1,77	7,83	1,65	1,32	1,29	1,59	5,85	1,65	1,33	2,00	1,69	6,67	1,66	2,40	1,31	1,68	7,05
42	1,67	1,66	2,76	1,77	7,85	1,66	1,33	1,30	1,59	5,87	1,65	1,33	2,01	1,70	6,69	1,67	2,41	1,31	1,69	7,07
43	1,67	1,66	2,77	1,78	7,88	1,66	1,33	1,30	1,59	5,88	1,66	1,34	2,01	1,70	6,71	1,67	2,41	1,32	1,69	7,09
44	1,68	1,66	2,78	1,78	7,90	1,66	1,33	1,31	1,60	5,90	1,66	1,34	2,02	1,70	6,73	1,67	2,42	1,32	1,69	7,11
45	1,68	1,67	2,79	1,78	7,92	1,66	1,34	1,31	1,60	5,91	1,66	1,34	2,03	1,71	6,74	1,67	2,42	1,33	1,70	7,12
46	1,68	1,67	2,80	1,79	7,93	1,67	1,34	1,31	1,60	5,92	1,66	1,35	2,04	1,71	6,75	1,68	2,43	1,33	1,70	7,14
47	1,68	1,67	2,80	1,79	7,95	1,67	1,34	1,32	1,60	5,93	1,66	1,35	2,04	1,71	6,77	1,68	2,43	1,34	1,70	7,15
48	1,68	1,68	2,81	1,79	7,96	1,67	1,34	1,32	1,61	5,94	1,67	1,35	2,05	1,72	6,78	1,68	2,44	1,34	1,70	7,16

49	1,68	1,68	2,82	1,79	7,98	1,67	1,35	1,33	1,61	5,95	1,67	1,35	2,06	1,72	6,80	1,68	2,44	1,35	1,71	7,18
50	1,69	1,69	2,83	1,80	8,01	1,67	1,35	1,33	1,61	5,97	1,67	1,36	2,06	1,72	6,82	1,69	2,45	1,35	1,71	7,20
51	1,70	1,69	2,85	1,80	8,03	1,68	1,35	1,34	1,62	5,99	1,68	1,36	2,07	1,73	6,84	1,69	2,46	1,36	1,72	7,22
52	1,71	1,70	2,86	1,80	8,07	1,69	1,36	1,34	1,62	6,01	1,69	1,37	2,08	1,73	6,87	1,70	2,47	1,36	1,72	7,25
53	1,72	1,70	2,87	1,81	8,10	1,70	1,36	1,35	1,62	6,03	1,70	1,37	2,09	1,73	6,89	1,71	2,48	1,37	1,72	7,28
54	1,73	1,71	2,88	1,81	8,13	1,71	1,37	1,35	1,63	6,06	1,71	1,38	2,10	1,74	6,92	1,72	2,48	1,37	1,73	7,30
55	1,73	1,72	2,89	1,81	8,15	1,72	1,37	1,36	1,63	6,08	1,72	1,38	2,11	1,74	6,94	1,73	2,49	1,38	1,73	7,33
56	1,74	1,72	2,90	1,82	8,17	1,72	1,38	1,36	1,63	6,09	1,72	1,38	2,11	1,74	6,96	1,73	2,50	1,38	1,73	7,35
57	1,74	1,72	2,91	1,82	8,19	1,73	1,38	1,37	1,63	6,10	1,72	1,39	2,12	1,74	6,97	1,74	2,50	1,39	1,73	7,36
58	1,74	1,73	2,92	1,82	8,20	1,73	1,38	1,37	1,63	6,11	1,72	1,39	2,12	1,75	6,98	1,74	2,51	1,39	1,74	7,37
59	1,74	1,73	2,92	1,82	8,21	1,73	1,38	1,37	1,64	6,11	1,72	1,39	2,13	1,75	6,99	1,74	2,51	1,39	1,74	7,37
60	1,74	1,73	2,93	1,83	8,22	1,73	1,38	1,38	1,64	6,12	1,73	1,39	2,13	1,75	7,00	1,74	2,51	1,40	1,74	7,38
61	1,74	1,73	2,94	1,83	8,24	1,73	1,39	1,38	1,64	6,13	1,73	1,39	2,14	1,75	7,01	1,74	2,52	1,40	1,74	7,39
62	1,74	1,74	2,94	1,83	8,25	1,73	1,39	1,38	1,64	6,14	1,73	1,40	2,14	1,75	7,02	1,74	2,52	1,41	1,74	7,40
63	1,74	1,74	2,95	1,83	8,26	1,73	1,39	1,39	1,64	6,15	1,73	1,40	2,15	1,76	7,03	1,74	2,53	1,41	1,75	7,41
64	1,75	1,74	2,96	1,83	8,28	1,73	1,39	1,39	1,65	6,16	1,73	1,40	2,15	1,76	7,04	1,74	2,53	1,41	1,75	7,43
65	1,75	1,74	2,97	1,84	8,30	1,73	1,39	1,39	1,65	6,17	1,73	1,41	2,16	1,76	7,06	1,74	2,54	1,42	1,75	7,44
66	1,75	1,75	2,98	1,84	8,31	1,74	1,40	1,40	1,65	6,18	1,74	1,41	2,17	1,76	7,07	1,75	2,54	1,42	1,75	7,46
67	1,75	1,75	2,99	1,84	8,33	1,74	1,40	1,40	1,65	6,19	1,74	1,41	2,17	1,77	7,08	1,75	2,54	1,42	1,75	7,47
68	1,75	1,75	2,99	1,84	8,34	1,74	1,40	1,41	1,65	6,20	1,74	1,41	2,18	1,77	7,09	1,75	2,55	1,43	1,76	7,48
69	1,76	1,76	3,00	1,85	8,35	1,74	1,41	1,41	1,66	6,21	1,74	1,42	2,18	1,77	7,10	1,75	2,55	1,43	1,76	7,49
70	1,76	1,76	3,00	1,85	8,36	1,74	1,41	1,41	1,66	6,22	1,74	1,42	2,19	1,77	7,11	1,75	2,55	1,43	1,76	7,50
71	1,76	1,76	3,01	1,85	8,37	1,74	1,41	1,42	1,66	6,22	1,74	1,42	2,19	1,77	7,12	1,75	2,56	1,44	1,76	7,50
72	1,76	1,76	3,02	1,85	8,39	1,74	1,41	1,42	1,66	6,23	1,74	1,42	2,20	1,77	7,13	1,75	2,56	1,44	1,76	7,51
73	1,76	1,77	3,02	1,85	8,40	1,75	1,41	1,42	1,66	6,24	1,74	1,42	2,20	1,78	7,14	1,76	2,56	1,44	1,77	7,53
74	1,76	1,77	3,03	1,85	8,42	1,75	1,42	1,43	1,66	6,25	1,75	1,43	2,21	1,78	7,16	1,76	2,57	1,45	1,77	7,54
75	1,77	1,77	3,04	1,86	8,44	1,76	1,42	1,43	1,67	6,27	1,75	1,43	2,21	1,78	7,17	1,77	2,58	1,45	1,77	7,56

76	1,78	1,78	3,05	1,86	8,46	1,76	1,42	1,43	1,67	6,28	1,76	1,43	2,22	1,78	7,19	1,77	2,58	1,45	1,77	7,58
77	1,78	1,78	3,06	1,86	8,48	1,77	1,43	1,44	1,67	6,30	1,77	1,44	2,23	1,78	7,21	1,78	2,59	1,46	1,77	7,60
78	1,79	1,79	3,07	1,86	8,50	1,77	1,43	1,44	1,67	6,31	1,77	1,44	2,23	1,79	7,22	1,78	2,59	1,46	1,78	7,61
79	1,79	1,79	3,07	1,87	8,52	1,78	1,43	1,45	1,67	6,33	1,77	1,44	2,24	1,79	7,24	1,79	2,60	1,47	1,78	7,63
80	1,79	1,79	3,08	1,87	8,53	1,78	1,43	1,45	1,68	6,34	1,78	1,44	2,24	1,79	7,25	1,79	2,60	1,47	1,78	7,64
81	1,79	1,79	3,09	1,87	8,54	1,78	1,44	1,45	1,68	6,34	1,78	1,44	2,25	1,79	7,26	1,79	2,61	1,47	1,78	7,65
82	1,79	1,79	3,09	1,87	8,55	1,78	1,44	1,45	1,68	6,35	1,78	1,45	2,25	1,79	7,26	1,79	2,61	1,47	1,78	7,65
83	1,79	1,80	3,09	1,87	8,56	1,78	1,44	1,46	1,68	6,35	1,78	1,45	2,25	1,79	7,27	1,79	2,61	1,48	1,78	7,66
84	1,79	1,80	3,10	1,88	8,56	1,78	1,44	1,46	1,68	6,36	1,78	1,45	2,26	1,80	7,28	1,79	2,61	1,48	1,78	7,66
85	1,80	1,80	3,10	1,88	8,57	1,78	1,44	1,46	1,68	6,36	1,78	1,45	2,26	1,80	7,28	1,79	2,61	1,48	1,79	7,67
86	1,80	1,80	3,11	1,88	8,58	1,78	1,44	1,46	1,68	6,37	1,78	1,45	2,27	1,80	7,29	1,79	2,62	1,48	1,79	7,68
87	1,80	1,80	3,12	1,88	8,60	1,78	1,44	1,47	1,68	6,38	1,78	1,45	2,27	1,80	7,30	1,79	2,62	1,49	1,79	7,69
88	1,80	1,81	3,12	1,88	8,61	1,79	1,45	1,47	1,69	6,39	1,79	1,46	2,28	1,80	7,32	1,80	2,63	1,49	1,79	7,70
89	1,81	1,81	3,13	1,88	8,63	1,79	1,45	1,47	1,69	6,40	1,79	1,46	2,28	1,80	7,33	1,80	2,63	1,49	1,79	7,72
90	1,81	1,81	3,14	1,89	8,65	1,80	1,45	1,48	1,69	6,41	1,79	1,46	2,29	1,80	7,34	1,81	2,64	1,50	1,79	7,73
91	1,81	1,82	3,15	1,89	8,66	1,80	1,45	1,48	1,69	6,42	1,80	1,46	2,29	1,81	7,36	1,81	2,64	1,50	1,80	7,75
92	1,82	1,82	3,15	1,89	8,67	1,80	1,46	1,48	1,69	6,43	1,80	1,47	2,29	1,81	7,37	1,81	2,65	1,50	1,80	7,76
93	1,82	1,82	3,16	1,89	8,68	1,80	1,46	1,49	1,69	6,44	1,80	1,47	2,30	1,81	7,38	1,81	2,65	1,51	1,80	7,77
94	1,82	1,82	3,16	1,89	8,69	1,80	1,46	1,49	1,69	6,44	1,80	1,47	2,30	1,81	7,38	1,81	2,65	1,51	1,80	7,77
95	1,82	1,82	3,17	1,89	8,70	1,81	1,46	1,49	1,70	6,45	1,80	1,47	2,31	1,81	7,39	1,82	2,65	1,51	1,80	7,78
96	1,82	1,83	3,17	1,89	8,71	1,81	1,46	1,49	1,70	6,46	1,80	1,47	2,31	1,81	7,40	1,82	2,66	1,51	1,80	7,79
97	1,82	1,83	3,18	1,89	8,72	1,81	1,46	1,49	1,70	6,46	1,81	1,47	2,31	1,81	7,41	1,82	2,66	1,52	1,80	7,80
98	1,82	1,83	3,18	1,90	8,74	1,81	1,47	1,50	1,70	6,47	1,81	1,48	2,32	1,82	7,42	1,82	2,66	1,52	1,80	7,81
99	1,83	1,83	3,19	1,90	8,75	1,81	1,47	1,50	1,70	6,48	1,81	1,48	2,32	1,82	7,43	1,82	2,67	1,52	1,81	7,82
100	1,83	1,84	3,20	1,90	8,77	1,82	1,47	1,50	1,70	6,50	1,82	1,48	2,33	1,82	7,44	1,83	2,67	1,52	1,81	7,83
101	1,84	1,84	3,20	1,90	8,78	1,82	1,47	1,51	1,70	6,51	1,82	1,48	2,33	1,82	7,46	1,83	2,68	1,53	1,81	7,85
102	1,84	1,84	3,21	1,90	8,79	1,82	1,48	1,51	1,70	6,51	1,82	1,48	2,34	1,82	7,47	1,83	2,68	1,53	1,81	7,86

103	1,84	1,85	3,22	1,90	8,80	1,83	1,48	1,51	1,71	6,52	1,82	1,49	2,34	1,82	7,47	1,84	2,69	1,53	1,81	7,87
104	1,84	1,85	3,22	1,91	8,81	1,83	1,48	1,51	1,71	6,53	1,83	1,49	2,34	1,82	7,48	1,84	2,69	1,54	1,81	7,87
105	1,84	1,85	3,23	1,91	8,82	1,83	1,48	1,52	1,71	6,53	1,83	1,49	2,35	1,82	7,49	1,84	2,69	1,54	1,81	7,88
106	1,84	1,85	3,23	1,91	8,83	1,83	1,48	1,52	1,71	6,54	1,83	1,49	2,35	1,83	7,49	1,84	2,69	1,54	1,81	7,88
107	1,84	1,85	3,23	1,91	8,83	1,83	1,48	1,52	1,71	6,54	1,83	1,49	2,36	1,83	7,50	1,84	2,69	1,54	1,82	7,89
108	1,84	1,85	3,24	1,91	8,84	1,83	1,48	1,52	1,71	6,54	1,83	1,49	2,36	1,83	7,50	1,84	2,69	1,54	1,82	7,89
109	1,84	1,85	3,24	1,91	8,84	1,83	1,48	1,52	1,71	6,55	1,83	1,49	2,36	1,83	7,51	1,84	2,70	1,55	1,82	7,90
110	1,84	1,85	3,24	1,91	8,85	1,83	1,48	1,53	1,71	6,55	1,83	1,49	2,36	1,83	7,51	1,84	2,70	1,55	1,82	7,90
111	1,85	1,86	3,25	1,91	8,87	1,83	1,49	1,53	1,72	6,56	1,83	1,50	2,37	1,83	7,52	1,84	2,70	1,55	1,82	7,92
112	1,85	1,86	3,26	1,91	8,88	1,83	1,49	1,53	1,72	6,57	1,83	1,50	2,37	1,83	7,53	1,84	2,71	1,55	1,82	7,92
113	1,85	1,86	3,26	1,92	8,89	1,84	1,49	1,53	1,72	6,58	1,83	1,50	2,38	1,83	7,54	1,85	2,71	1,56	1,82	7,93
114	1,85	1,86	3,27	1,92	8,90	1,84	1,49	1,54	1,72	6,58	1,84	1,50	2,38	1,83	7,55	1,85	2,71	1,56	1,82	7,94
115	1,85	1,87	3,27	1,92	8,91	1,84	1,49	1,54	1,72	6,59	1,84	1,50	2,38	1,84	7,56	1,85	2,72	1,56	1,82	7,95
116	1,86	1,87	3,28	1,92	8,92	1,84	1,50	1,54	1,72	6,60	1,84	1,50	2,39	1,84	7,57	1,85	2,72	1,57	1,83	7,96
117	1,86	1,87	3,28	1,92	8,93	1,84	1,50	1,54	1,72	6,60	1,84	1,51	2,39	1,84	7,57	1,85	2,72	1,57	1,83	7,96
118	1,86	1,87	3,28	1,92	8,93	1,84	1,50	1,54	1,72	6,60	1,84	1,51	2,39	1,84	7,58	1,85	2,72	1,57	1,83	7,97
119	1,86	1,87	3,29	1,92	8,94	1,84	1,50	1,55	1,72	6,61	1,84	1,51	2,40	1,84	7,58	1,85	2,72	1,57	1,83	7,97
120	1,86	1,87	3,29	1,92	8,94	1,84	1,50	1,55	1,73	6,61	1,84	1,51	2,40	1,84	7,58	1,85	2,72	1,57	1,83	7,97

ATRs obtidos com o solo AS considerando uma carga de 11tf e VDM de 1000

Mês	Wót +1%					Wót					Wót -2%					Ciclos de umed. e sec. na SB				
	B (mm)	SB (mm)	Ref. (mm)	Sub. (mm)	Total (mm)	B (mm)	SB (mm)	Ref. (mm)	Sub. (mm)	Total (mm)	B (mm)	SB (mm)	Ref. (mm)	Sub. (mm)	Total (mm)	B (mm)	SB (mm)	Ref. (mm)	Sub. (mm)	Total (mm)
1	1,26	0,88	1,87	1,12	5,12	1,30	0,47	0,78	0,90	3,44	1,28	0,46	1,25	1,01	4,00	1,27	1,01	0,82	0,96	4,06
2	1,41	0,96	2,04	1,26	5,67	1,46	0,51	0,85	1,01	3,83	1,44	0,50	1,36	1,14	4,44	1,43	1,11	0,89	1,07	4,50
3	1,52	1,01	2,15	1,35	6,02	1,57	0,53	0,89	1,09	4,07	1,55	0,52	1,43	1,22	4,72	1,54	1,16	0,93	1,15	4,78
4	1,60	1,04	2,22	1,41	6,27	1,66	0,55	0,92	1,14	4,26	1,64	0,54	1,48	1,28	4,93	1,63	1,20	0,96	1,20	4,99
5	1,66	1,06	2,28	1,46	6,46	1,73	0,56	0,94	1,18	4,40	1,70	0,55	1,52	1,32	5,08	1,69	1,23	0,99	1,24	5,15
6	1,72	1,09	2,32	1,50	6,62	1,79	0,57	0,96	1,21	4,52	1,76	0,56	1,54	1,36	5,22	1,75	1,26	1,00	1,27	5,28
7	1,76	1,10	2,36	1,52	6,74	1,83	0,58	0,97	1,23	4,60	1,80	0,57	1,57	1,38	5,31	1,79	1,28	1,02	1,30	5,38
8	1,78	1,11	2,38	1,55	6,81	1,85	0,58	0,98	1,25	4,66	1,82	0,57	1,58	1,40	5,37	1,81	1,29	1,03	1,32	5,44
9	1,79	1,12	2,39	1,56	6,86	1,85	0,59	0,99	1,26	4,69	1,83	0,58	1,59	1,42	5,41	1,81	1,29	1,03	1,33	5,47
10	1,79	1,12	2,40	1,58	6,89	1,86	0,59	0,99	1,27	4,71	1,83	0,58	1,60	1,43	5,44	1,82	1,30	1,04	1,34	5,50
11	1,80	1,13	2,41	1,59	6,93	1,87	0,59	1,00	1,28	4,74	1,84	0,58	1,61	1,44	5,47	1,83	1,31	1,05	1,35	5,54
12	1,81	1,14	2,42	1,60	6,97	1,88	0,60	1,00	1,29	4,77	1,85	0,59	1,62	1,45	5,50	1,84	1,31	1,05	1,36	5,57
13	1,83	1,14	2,44	1,62	7,02	1,90	0,60	1,01	1,30	4,80	1,87	0,59	1,62	1,46	5,54	1,85	1,32	1,06	1,37	5,61
14	1,85	1,15	2,45	1,63	7,08	1,92	0,60	1,02	1,31	4,85	1,89	0,59	1,63	1,47	5,59	1,88	1,33	1,06	1,38	5,65
15	1,87	1,16	2,47	1,65	7,14	1,94	0,61	1,02	1,32	4,89	1,92	0,60	1,64	1,49	5,64	1,90	1,34	1,07	1,40	5,71
16	1,90	1,16	2,48	1,66	7,20	1,97	0,61	1,03	1,33	4,94	1,94	0,60	1,65	1,50	5,70	1,93	1,35	1,08	1,41	5,76
17	1,92	1,17	2,50	1,67	7,27	2,00	0,62	1,03	1,35	4,99	1,97	0,60	1,67	1,51	5,75	1,95	1,36	1,09	1,42	5,81
18	1,94	1,18	2,51	1,69	7,31	2,01	0,62	1,04	1,36	5,02	1,98	0,61	1,67	1,52	5,79	1,97	1,36	1,09	1,43	5,85
19	1,95	1,18	2,53	1,70	7,35	2,03	0,62	1,04	1,36	5,06	2,00	0,61	1,68	1,53	5,82	1,98	1,37	1,10	1,44	5,89
20	1,96	1,18	2,53	1,70	7,38	2,04	0,62	1,05	1,37	5,07	2,00	0,61	1,69	1,54	5,84	1,99	1,37	1,10	1,45	5,91
21	1,96	1,19	2,54	1,71	7,39	2,04	0,62	1,05	1,37	5,08	2,01	0,61	1,69	1,55	5,85	1,99	1,37	1,10	1,45	5,92

22	1,96	1,19	2,54	1,72	7,40	2,04	0,62	1,05	1,38	5,09	2,01	0,61	1,69	1,55	5,86	1,99	1,38	1,10	1,46	5,93
23	1,96	1,19	2,54	1,72	7,42	2,04	0,63	1,05	1,38	5,10	2,01	0,62	1,69	1,56	5,87	1,99	1,38	1,11	1,46	5,94
24	1,97	1,19	2,55	1,73	7,43	2,04	0,63	1,05	1,39	5,11	2,01	0,62	1,70	1,56	5,88	2,00	1,38	1,11	1,47	5,95
25	1,97	1,19	2,55	1,73	7,45	2,05	0,63	1,06	1,39	5,12	2,01	0,62	1,70	1,57	5,90	2,00	1,38	1,11	1,47	5,96
26	1,97	1,20	2,56	1,74	7,47	2,05	0,63	1,06	1,39	5,13	2,02	0,62	1,70	1,57	5,91	2,00	1,38	1,11	1,48	5,98
27	1,98	1,20	2,57	1,75	7,49	2,06	0,63	1,06	1,40	5,15	2,02	0,62	1,71	1,58	5,93	2,01	1,39	1,12	1,48	6,00
28	1,99	1,20	2,57	1,75	7,52	2,07	0,63	1,06	1,41	5,17	2,03	0,62	1,72	1,59	5,95	2,02	1,39	1,12	1,49	6,02
29	1,99	1,21	2,58	1,76	7,54	2,07	0,63	1,07	1,42	5,18	2,04	0,62	1,72	1,59	5,97	2,02	1,40	1,12	1,50	6,04
30	2,00	1,21	2,59	1,77	7,56	2,08	0,64	1,07	1,42	5,20	2,05	0,63	1,72	1,60	5,99	2,03	1,40	1,12	1,50	6,06
31	2,00	1,21	2,59	1,77	7,58	2,08	0,64	1,07	1,43	5,21	2,05	0,63	1,73	1,60	6,00	2,04	1,40	1,13	1,51	6,07
32	2,00	1,21	2,60	1,78	7,59	2,08	0,64	1,07	1,43	5,22	2,05	0,63	1,73	1,61	6,01	2,04	1,41	1,13	1,51	6,08
33	2,00	1,21	2,60	1,78	7,60	2,08	0,64	1,07	1,43	5,23	2,05	0,63	1,73	1,61	6,02	2,04	1,41	1,13	1,51	6,08
34	2,00	1,21	2,60	1,78	7,60	2,08	0,64	1,08	1,43	5,23	2,05	0,63	1,73	1,61	6,02	2,04	1,41	1,13	1,52	6,09
35	2,00	1,21	2,60	1,79	7,61	2,08	0,64	1,08	1,44	5,24	2,05	0,63	1,73	1,62	6,03	2,04	1,41	1,13	1,52	6,09
36	2,01	1,22	2,60	1,80	7,62	2,08	0,64	1,08	1,44	5,24	2,05	0,63	1,74	1,62	6,04	2,04	1,41	1,13	1,52	6,10
37	2,01	1,22	2,60	1,80	7,63	2,09	0,64	1,08	1,44	5,25	2,05	0,63	1,74	1,62	6,04	2,04	1,41	1,13	1,53	6,11
38	2,01	1,22	2,61	1,80	7,64	2,09	0,64	1,08	1,45	5,26	2,06	0,63	1,74	1,63	6,05	2,04	1,41	1,14	1,53	6,12
39	2,01	1,22	2,61	1,81	7,66	2,09	0,64	1,09	1,45	5,27	2,06	0,63	1,74	1,63	6,07	2,05	1,42	1,14	1,53	6,13
40	2,02	1,22	2,62	1,81	7,68	2,10	0,64	1,09	1,45	5,28	2,07	0,63	1,75	1,64	6,08	2,05	1,42	1,14	1,54	6,15
41	2,03	1,23	2,62	1,82	7,69	2,11	0,65	1,09	1,46	5,30	2,07	0,64	1,75	1,64	6,10	2,06	1,42	1,14	1,54	6,17
42	2,03	1,23	2,63	1,82	7,71	2,11	0,65	1,09	1,46	5,31	2,08	0,64	1,75	1,65	6,11	2,07	1,42	1,14	1,55	6,18
43	2,04	1,23	2,63	1,83	7,73	2,12	0,65	1,09	1,47	5,32	2,08	0,64	1,76	1,65	6,12	2,07	1,43	1,15	1,55	6,19
44	2,04	1,23	2,64	1,83	7,74	2,12	0,65	1,09	1,47	5,33	2,09	0,64	1,76	1,65	6,13	2,07	1,43	1,15	1,55	6,20
45	2,04	1,23	2,64	1,83	7,74	2,12	0,65	1,10	1,47	5,33	2,09	0,64	1,76	1,66	6,14	2,07	1,43	1,15	1,56	6,21
46	2,04	1,23	2,64	1,84	7,75	2,12	0,65	1,10	1,47	5,34	2,09	0,64	1,76	1,66	6,14	2,08	1,43	1,15	1,56	6,21
47	2,04	1,23	2,64	1,84	7,76	2,12	0,65	1,10	1,47	5,34	2,09	0,64	1,76	1,66	6,15	2,08	1,43	1,15	1,56	6,21
48	2,04	1,23	2,64	1,84	7,76	2,12	0,65	1,10	1,48	5,34	2,09	0,64	1,76	1,66	6,15	2,08	1,43	1,15	1,57	6,22

49	2,05	1,24	2,65	1,84	7,77	2,12	0,65	1,10	1,48	5,35	2,09	0,64	1,76	1,66	6,16	2,08	1,43	1,15	1,57	6,23
50	2,05	1,24	2,65	1,85	7,79	2,13	0,65	1,10	1,48	5,36	2,10	0,64	1,77	1,67	6,17	2,08	1,43	1,15	1,57	6,24
51	2,06	1,24	2,65	1,85	7,80	2,14	0,65	1,10	1,49	5,38	2,10	0,64	1,77	1,67	6,19	2,09	1,44	1,15	1,57	6,25
52	2,07	1,24	2,66	1,86	7,82	2,15	0,65	1,10	1,49	5,39	2,11	0,64	1,77	1,68	6,20	2,10	1,44	1,16	1,58	6,27
53	2,08	1,25	2,66	1,86	7,84	2,15	0,66	1,11	1,49	5,41	2,12	0,64	1,78	1,68	6,22	2,11	1,44	1,16	1,58	6,29
54	2,08	1,25	2,67	1,86	7,86	2,16	0,66	1,11	1,50	5,42	2,13	0,64	1,78	1,68	6,24	2,12	1,44	1,16	1,58	6,30
55	2,09	1,25	2,67	1,87	7,88	2,17	0,66	1,11	1,50	5,43	2,14	0,65	1,78	1,69	6,25	2,12	1,45	1,16	1,59	6,32
56	2,10	1,25	2,68	1,87	7,89	2,18	0,66	1,11	1,50	5,44	2,14	0,65	1,78	1,69	6,26	2,13	1,45	1,16	1,59	6,33
57	2,10	1,25	2,68	1,87	7,89	2,18	0,66	1,11	1,50	5,45	2,14	0,65	1,78	1,69	6,27	2,13	1,45	1,16	1,59	6,33
58	2,10	1,25	2,68	1,88	7,90	2,18	0,66	1,11	1,50	5,45	2,14	0,65	1,79	1,69	6,27	2,13	1,45	1,16	1,59	6,34
59	2,10	1,25	2,68	1,88	7,90	2,18	0,66	1,11	1,50	5,45	2,14	0,65	1,79	1,69	6,27	2,13	1,45	1,17	1,59	6,34
60	2,10	1,25	2,68	1,88	7,91	2,18	0,66	1,11	1,51	5,45	2,15	0,65	1,79	1,70	6,27	2,13	1,45	1,17	1,60	6,34
61	2,10	1,25	2,68	1,88	7,91	2,18	0,66	1,11	1,51	5,46	2,15	0,65	1,79	1,70	6,28	2,13	1,45	1,17	1,60	6,35
62	2,10	1,26	2,68	1,89	7,92	2,18	0,66	1,11	1,51	5,46	2,15	0,65	1,79	1,70	6,29	2,13	1,45	1,17	1,60	6,35
63	2,10	1,26	2,69	1,89	7,93	2,18	0,66	1,12	1,52	5,47	2,15	0,65	1,79	1,71	6,29	2,14	1,45	1,17	1,61	6,36
64	2,10	1,26	2,69	1,90	7,94	2,18	0,66	1,12	1,52	5,48	2,15	0,65	1,79	1,71	6,30	2,14	1,46	1,17	1,61	6,37
65	2,11	1,26	2,69	1,90	7,96	2,19	0,66	1,12	1,52	5,49	2,15	0,65	1,79	1,72	6,31	2,14	1,46	1,17	1,62	6,38
66	2,11	1,26	2,70	1,91	7,97	2,19	0,66	1,12	1,53	5,50	2,16	0,65	1,80	1,72	6,33	2,14	1,46	1,17	1,62	6,39
67	2,11	1,26	2,70	1,91	7,98	2,20	0,66	1,12	1,53	5,50	2,16	0,65	1,80	1,73	6,33	2,15	1,46	1,17	1,62	6,40
68	2,11	1,26	2,70	1,91	7,98	2,20	0,66	1,12	1,53	5,51	2,16	0,65	1,80	1,73	6,34	2,15	1,46	1,17	1,62	6,40
69	2,11	1,26	2,70	1,91	7,99	2,20	0,66	1,12	1,53	5,51	2,16	0,65	1,80	1,73	6,34	2,15	1,46	1,17	1,63	6,41
70	2,11	1,26	2,70	1,91	7,99	2,20	0,66	1,12	1,53	5,51	2,16	0,65	1,80	1,73	6,34	2,15	1,46	1,18	1,63	6,41
71	2,11	1,26	2,70	1,92	7,99	2,20	0,66	1,12	1,54	5,52	2,16	0,65	1,80	1,73	6,35	2,15	1,46	1,18	1,63	6,41
72	2,12	1,26	2,70	1,92	8,00	2,20	0,67	1,12	1,54	5,52	2,16	0,65	1,80	1,73	6,35	2,15	1,46	1,18	1,63	6,42
73	2,12	1,26	2,71	1,92	8,00	2,20	0,67	1,12	1,54	5,53	2,16	0,65	1,80	1,73	6,35	2,15	1,46	1,18	1,63	6,42
74	2,12	1,27	2,71	1,92	8,01	2,20	0,67	1,12	1,54	5,53	2,17	0,65	1,80	1,74	6,36	2,15	1,47	1,18	1,63	6,43
75	2,13	1,27	2,71	1,92	8,02	2,21	0,67	1,13	1,54	5,54	2,17	0,66	1,81	1,74	6,37	2,16	1,47	1,18	1,63	6,44

76	2,13	1,27	2,71	1,93	8,04	2,22	0,67	1,13	1,54	5,55	2,18	0,66	1,81	1,74	6,38	2,17	1,47	1,18	1,64	6,45
77	2,14	1,27	2,72	1,93	8,05	2,22	0,67	1,13	1,55	5,56	2,19	0,66	1,81	1,74	6,39	2,17	1,47	1,18	1,64	6,46
78	2,14	1,27	2,72	1,93	8,06	2,23	0,67	1,13	1,55	5,57	2,19	0,66	1,81	1,75	6,40	2,18	1,47	1,18	1,64	6,47
79	2,15	1,27	2,72	1,93	8,07	2,23	0,67	1,13	1,55	5,58	2,20	0,66	1,81	1,75	6,41	2,18	1,47	1,18	1,64	6,48
80	2,15	1,27	2,72	1,94	8,08	2,23	0,67	1,13	1,55	5,58	2,20	0,66	1,82	1,75	6,42	2,18	1,47	1,18	1,64	6,49
81	2,15	1,27	2,73	1,94	8,08	2,23	0,67	1,13	1,55	5,59	2,20	0,66	1,82	1,75	6,42	2,18	1,48	1,19	1,65	6,49
82	2,15	1,27	2,73	1,94	8,09	2,23	0,67	1,13	1,55	5,59	2,20	0,66	1,82	1,75	6,42	2,18	1,48	1,19	1,65	6,49
83	2,15	1,27	2,73	1,94	8,09	2,23	0,67	1,13	1,56	5,59	2,20	0,66	1,82	1,75	6,43	2,18	1,48	1,19	1,65	6,49
84	2,15	1,27	2,73	1,94	8,09	2,23	0,67	1,13	1,56	5,59	2,20	0,66	1,82	1,76	6,43	2,18	1,48	1,19	1,65	6,50
85	2,15	1,28	2,73	1,95	8,10	2,23	0,67	1,13	1,56	5,60	2,20	0,66	1,82	1,76	6,43	2,18	1,48	1,19	1,65	6,50
86	2,15	1,28	2,73	1,95	8,10	2,24	0,67	1,13	1,56	5,60	2,20	0,66	1,82	1,76	6,44	2,19	1,48	1,19	1,65	6,51
87	2,15	1,28	2,73	1,95	8,11	2,24	0,67	1,13	1,57	5,61	2,21	0,66	1,82	1,76	6,44	2,19	1,48	1,19	1,66	6,51
88	2,16	1,28	2,73	1,95	8,12	2,24	0,67	1,13	1,57	5,61	2,21	0,66	1,82	1,76	6,45	2,19	1,48	1,19	1,66	6,52
89	2,16	1,28	2,74	1,96	8,13	2,25	0,67	1,14	1,57	5,62	2,21	0,66	1,82	1,77	6,46	2,20	1,48	1,19	1,66	6,53
90	2,17	1,28	2,74	1,96	8,14	2,25	0,67	1,14	1,57	5,63	2,22	0,66	1,83	1,77	6,47	2,20	1,48	1,19	1,66	6,54
91	2,17	1,28	2,74	1,96	8,15	2,25	0,67	1,14	1,57	5,63	2,22	0,66	1,83	1,77	6,48	2,21	1,48	1,19	1,66	6,54
92	2,17	1,28	2,74	1,96	8,16	2,26	0,67	1,14	1,57	5,64	2,22	0,66	1,83	1,77	6,48	2,21	1,48	1,19	1,66	6,55
93	2,17	1,28	2,74	1,96	8,16	2,26	0,67	1,14	1,57	5,64	2,22	0,66	1,83	1,77	6,49	2,21	1,49	1,19	1,67	6,55
94	2,17	1,28	2,74	1,96	8,16	2,26	0,67	1,14	1,58	5,64	2,22	0,66	1,83	1,77	6,49	2,21	1,49	1,19	1,67	6,55
95	2,17	1,28	2,75	1,96	8,16	2,26	0,67	1,14	1,58	5,64	2,22	0,66	1,83	1,77	6,49	2,21	1,49	1,19	1,67	6,56
96	2,17	1,28	2,75	1,97	8,17	2,26	0,68	1,14	1,58	5,65	2,23	0,66	1,83	1,77	6,49	2,21	1,49	1,19	1,67	6,56
97	2,18	1,28	2,75	1,97	8,17	2,26	0,68	1,14	1,58	5,65	2,23	0,66	1,83	1,78	6,50	2,21	1,49	1,20	1,67	6,56
98	2,18	1,29	2,75	1,97	8,18	2,26	0,68	1,14	1,58	5,65	2,23	0,66	1,83	1,78	6,50	2,21	1,49	1,20	1,67	6,57
99	2,18	1,29	2,75	1,97	8,19	2,27	0,68	1,14	1,58	5,66	2,23	0,66	1,83	1,78	6,51	2,22	1,49	1,20	1,67	6,57
100	2,19	1,29	2,75	1,97	8,20	2,27	0,68	1,14	1,58	5,67	2,24	0,67	1,84	1,78	6,52	2,22	1,49	1,20	1,67	6,58
101	2,19	1,29	2,76	1,98	8,21	2,27	0,68	1,14	1,59	5,68	2,24	0,67	1,84	1,78	6,53	2,23	1,49	1,20	1,68	6,59
102	2,19	1,29	2,76	1,98	8,21	2,28	0,68	1,14	1,59	5,69	2,24	0,67	1,84	1,79	6,53	2,23	1,49	1,20	1,68	6,60

103	2,20	1,29	2,76	1,98	8,22	2,28	0,68	1,14	1,59	5,69	2,25	0,67	1,84	1,79	6,54	2,23	1,49	1,20	1,68	6,60
104	2,20	1,29	2,76	1,98	8,23	2,28	0,68	1,15	1,59	5,69	2,25	0,67	1,84	1,79	6,54	2,23	1,49	1,20	1,68	6,61
105	2,20	1,29	2,76	1,99	8,23	2,28	0,68	1,15	1,59	5,70	2,25	0,67	1,84	1,79	6,55	2,23	1,49	1,20	1,69	6,61
106	2,20	1,29	2,76	1,99	8,23	2,28	0,68	1,15	1,59	5,70	2,25	0,67	1,84	1,79	6,55	2,23	1,49	1,20	1,69	6,61
107	2,20	1,29	2,76	1,99	8,24	2,28	0,68	1,15	1,60	5,70	2,25	0,67	1,84	1,80	6,55	2,23	1,49	1,20	1,69	6,61
108	2,20	1,29	2,76	1,99	8,24	2,28	0,68	1,15	1,60	5,70	2,25	0,67	1,84	1,80	6,55	2,23	1,50	1,20	1,69	6,62
109	2,20	1,29	2,76	1,99	8,24	2,28	0,68	1,15	1,60	5,70	2,25	0,67	1,84	1,80	6,55	2,23	1,50	1,20	1,69	6,62
110	2,20	1,29	2,76	1,99	8,25	2,28	0,68	1,15	1,60	5,71	2,25	0,67	1,84	1,80	6,56	2,23	1,50	1,20	1,69	6,62
111	2,20	1,29	2,77	2,00	8,26	2,28	0,68	1,15	1,60	5,71	2,25	0,67	1,84	1,80	6,56	2,24	1,50	1,20	1,70	6,63
112	2,20	1,29	2,77	2,00	8,26	2,29	0,68	1,15	1,60	5,72	2,25	0,67	1,84	1,81	6,57	2,24	1,50	1,20	1,70	6,64
113	2,20	1,29	2,77	2,00	8,27	2,29	0,68	1,15	1,61	5,72	2,25	0,67	1,85	1,81	6,58	2,24	1,50	1,20	1,70	6,64
114	2,21	1,30	2,77	2,01	8,28	2,29	0,68	1,15	1,61	5,73	2,26	0,67	1,85	1,81	6,58	2,24	1,50	1,21	1,70	6,65
115	2,21	1,30	2,77	2,01	8,28	2,29	0,68	1,15	1,61	5,74	2,26	0,67	1,85	1,81	6,59	2,24	1,50	1,21	1,71	6,66
116	2,21	1,30	2,77	2,01	8,29	2,29	0,68	1,15	1,61	5,74	2,26	0,67	1,85	1,82	6,59	2,24	1,50	1,21	1,71	6,66
117	2,21	1,30	2,77	2,01	8,29	2,29	0,68	1,15	1,61	5,74	2,26	0,67	1,85	1,82	6,59	2,25	1,50	1,21	1,71	6,66
118	2,21	1,30	2,77	2,01	8,29	2,29	0,68	1,15	1,62	5,74	2,26	0,67	1,85	1,82	6,60	2,25	1,50	1,21	1,71	6,66
119	2,21	1,30	2,77	2,01	8,29	2,29	0,68	1,15	1,62	5,74	2,26	0,67	1,85	1,82	6,60	2,25	1,50	1,21	1,71	6,66
120	2,21	1,30	2,77	2,02	8,30	2,29	0,68	1,15	1,62	5,74	2,26	0,67	1,85	1,82	6,60	2,25	1,50	1,21	1,71	6,67

ATRs obtidos com o solo SRA considerando uma carga de 11tf e VDM de 1000

Mês	Wót +1%					Wót					Wót -2%					Ciclos de umed. e sec. na SB				
	B (mm)	SB (mm)	Ref. (mm)	Sub. (mm)	Total (mm)	B (mm)	SB (mm)	Ref. (mm)	Sub. (mm)	Total (mm)	B (mm)	SB (mm)	Ref. (mm)	Sub. (mm)	Total (mm)	B (mm)	SB (mm)	Ref. (mm)	Sub. (mm)	Total (mm)
1	1,29	1,22	1,74	1,48	5,73	1,27	0,98	0,82	1,33	4,39	1,27	0,98	1,27	1,42	4,94	1,28	1,76	0,83	1,41	5,28
2	1,46	1,39	2,05	1,66	6,56	1,44	1,12	0,96	1,49	5,01	1,45	1,13	1,49	1,59	5,65	1,46	2,01	0,97	1,58	6,03
3	1,58	1,51	2,25	1,77	7,10	1,56	1,21	1,06	1,59	5,41	1,56	1,22	1,64	1,69	6,11	1,58	2,18	1,07	1,68	6,51
4	1,68	1,60	2,41	1,84	7,53	1,66	1,28	1,13	1,66	5,73	1,66	1,29	1,75	1,77	6,47	1,68	2,32	1,14	1,75	6,89
5	1,75	1,67	2,54	1,91	7,86	1,74	1,34	1,19	1,71	5,97	1,74	1,35	1,84	1,83	6,75	1,75	2,42	1,20	1,81	7,19
6	1,83	1,73	2,64	1,95	8,15	1,81	1,38	1,23	1,75	6,19	1,81	1,39	1,92	1,87	7,00	1,82	2,52	1,25	1,86	7,45
7	1,88	1,78	2,73	1,99	8,38	1,86	1,42	1,28	1,79	6,35	1,86	1,43	1,98	1,91	7,18	1,88	2,58	1,30	1,89	7,64
8	1,91	1,81	2,80	2,02	8,53	1,89	1,45	1,31	1,81	6,46	1,89	1,46	2,03	1,94	7,32	1,90	2,63	1,33	1,92	7,78
9	1,92	1,84	2,85	2,05	8,65	1,90	1,47	1,33	1,84	6,54	1,90	1,48	2,07	1,96	7,41	1,92	2,67	1,35	1,95	7,88
10	1,93	1,86	2,89	2,07	8,74	1,91	1,48	1,35	1,85	6,60	1,91	1,49	2,10	1,98	7,49	1,93	2,70	1,37	1,97	7,96
11	1,95	1,88	2,94	2,09	8,85	1,93	1,50	1,38	1,87	6,68	1,93	1,51	2,14	2,00	7,57	1,94	2,73	1,40	1,99	8,05
12	1,96	1,90	2,98	2,11	8,95	1,94	1,52	1,40	1,89	6,75	1,94	1,53	2,17	2,02	7,66	1,96	2,76	1,42	2,00	8,14
13	1,98	1,92	3,03	2,12	9,05	1,96	1,54	1,42	1,90	6,82	1,96	1,55	2,20	2,04	7,74	1,98	2,79	1,44	2,02	8,23
14	2,01	1,95	3,07	2,14	9,17	1,99	1,56	1,44	1,92	6,91	1,99	1,57	2,23	2,05	7,84	2,00	2,83	1,46	2,04	8,33
15	2,04	1,97	3,12	2,16	9,29	2,02	1,58	1,46	1,94	7,00	2,02	1,59	2,27	2,07	7,94	2,04	2,86	1,48	2,06	8,44
16	2,08	1,99	3,16	2,18	9,41	2,06	1,60	1,48	1,95	7,08	2,06	1,61	2,30	2,09	8,04	2,07	2,90	1,51	2,07	8,55
17	2,11	2,02	3,21	2,19	9,53	2,09	1,61	1,50	1,97	7,17	2,09	1,62	2,33	2,10	8,14	2,10	2,94	1,53	2,09	8,65
18	2,13	2,04	3,25	2,21	9,61	2,11	1,63	1,52	1,98	7,24	2,11	1,64	2,36	2,11	8,22	2,12	2,96	1,54	2,10	8,73
19	2,14	2,06	3,28	2,22	9,70	2,13	1,64	1,54	1,99	7,30	2,13	1,65	2,39	2,13	8,29	2,14	2,99	1,56	2,11	8,80
20	2,15	2,07	3,31	2,23	9,76	2,14	1,65	1,55	2,00	7,34	2,13	1,66	2,41	2,14	8,34	2,15	3,01	1,58	2,12	8,85
21	2,16	2,08	3,33	2,24	9,81	2,14	1,66	1,56	2,01	7,37	2,14	1,67	2,42	2,15	8,38	2,15	3,02	1,59	2,13	8,89

22	2,16	2,09	3,35	2,25	9,85	2,14	1,67	1,57	2,02	7,40	2,14	1,68	2,44	2,15	8,41	2,16	3,03	1,60	2,14	8,92
23	2,16	2,09	3,37	2,26	9,89	2,15	1,67	1,58	2,02	7,42	2,14	1,68	2,45	2,16	8,44	2,16	3,04	1,61	2,15	8,96
24	2,17	2,10	3,39	2,27	9,93	2,15	1,68	1,59	2,03	7,45	2,15	1,69	2,47	2,17	8,47	2,16	3,05	1,62	2,16	8,99
25	2,17	2,11	3,41	2,27	9,96	2,15	1,68	1,60	2,04	7,48	2,15	1,70	2,48	2,18	8,51	2,16	3,06	1,63	2,16	9,02
26	2,17	2,12	3,44	2,28	10,01	2,16	1,69	1,61	2,05	7,51	2,16	1,70	2,50	2,18	8,55	2,17	3,08	1,64	2,17	9,06
27	2,18	2,13	3,46	2,29	10,06	2,16	1,70	1,62	2,05	7,54	2,16	1,71	2,52	2,20	8,59	2,18	3,09	1,65	2,18	9,10
28	2,19	2,14	3,49	2,30	10,11	2,17	1,71	1,64	2,06	7,58	2,17	1,72	2,54	2,20	8,63	2,19	3,11	1,66	2,19	9,14
29	2,20	2,15	3,51	2,31	10,16	2,18	1,72	1,65	2,07	7,61	2,18	1,73	2,55	2,21	8,67	2,19	3,12	1,67	2,20	9,18
30	2,20	2,16	3,53	2,32	10,20	2,18	1,73	1,66	2,08	7,64	2,18	1,74	2,57	2,22	8,70	2,20	3,13	1,68	2,21	9,22
31	2,21	2,16	3,55	2,32	10,24	2,19	1,73	1,66	2,08	7,67	2,19	1,74	2,58	2,23	8,73	2,20	3,15	1,69	2,21	9,25
32	2,21	2,17	3,56	2,33	10,27	2,19	1,74	1,67	2,09	7,69	2,19	1,75	2,59	2,23	8,76	2,21	3,15	1,70	2,22	9,27
33	2,21	2,17	3,58	2,33	10,30	2,20	1,74	1,68	2,09	7,70	2,19	1,75	2,60	2,24	8,78	2,21	3,16	1,70	2,22	9,29
34	2,21	2,18	3,59	2,34	10,32	2,20	1,74	1,69	2,10	7,72	2,19	1,75	2,61	2,24	8,80	2,21	3,17	1,71	2,23	9,31
35	2,21	2,18	3,60	2,34	10,34	2,20	1,75	1,69	2,10	7,73	2,19	1,76	2,62	2,24	8,81	2,21	3,17	1,72	2,23	9,32
36	2,21	2,18	3,61	2,35	10,36	2,20	1,75	1,70	2,11	7,74	2,19	1,76	2,63	2,25	8,83	2,21	3,17	1,72	2,24	9,34
37	2,22	2,19	3,63	2,35	10,38	2,20	1,75	1,70	2,11	7,76	2,20	1,76	2,64	2,25	8,85	2,21	3,18	1,73	2,24	9,36
38	2,22	2,20	3,64	2,36	10,41	2,20	1,76	1,71	2,11	7,78	2,20	1,77	2,65	2,26	8,88	2,22	3,19	1,74	2,25	9,38
39	2,23	2,20	3,66	2,37	10,45	2,21	1,76	1,72	2,12	7,81	2,21	1,78	2,66	2,26	8,91	2,22	3,20	1,75	2,25	9,41
40	2,23	2,21	3,68	2,37	10,49	2,21	1,77	1,73	2,13	7,84	2,21	1,78	2,68	2,27	8,94	2,23	3,21	1,75	2,26	9,45
41	2,24	2,22	3,70	2,38	10,53	2,22	1,78	1,74	2,13	7,86	2,22	1,79	2,69	2,28	8,97	2,23	3,22	1,76	2,26	9,48
42	2,25	2,23	3,71	2,38	10,57	2,23	1,78	1,75	2,14	7,89	2,23	1,79	2,70	2,28	9,00	2,24	3,24	1,77	2,27	9,51
43	2,25	2,23	3,73	2,39	10,60	2,23	1,79	1,75	2,14	7,91	2,23	1,80	2,72	2,29	9,03	2,25	3,25	1,78	2,27	9,54
44	2,26	2,24	3,74	2,39	10,63	2,24	1,79	1,76	2,14	7,93	2,23	1,80	2,73	2,29	9,05	2,25	3,25	1,78	2,28	9,56
45	2,26	2,24	3,75	2,40	10,65	2,24	1,80	1,77	2,15	7,95	2,24	1,81	2,73	2,29	9,07	2,25	3,26	1,79	2,28	9,58
46	2,26	2,25	3,77	2,40	10,67	2,24	1,80	1,77	2,15	7,96	2,24	1,81	2,74	2,30	9,09	2,25	3,26	1,80	2,28	9,60
47	2,26	2,25	3,78	2,40	10,69	2,24	1,80	1,78	2,15	7,97	2,24	1,81	2,75	2,30	9,10	2,25	3,27	1,80	2,29	9,61
48	2,26	2,26	3,79	2,41	10,71	2,24	1,81	1,78	2,16	7,99	2,24	1,82	2,76	2,31	9,12	2,26	3,28	1,81	2,29	9,63

49	2,27	2,26	3,80	2,41	10,74	2,25	1,81	1,79	2,16	8,00	2,24	1,82	2,77	2,31	9,14	2,26	3,28	1,81	2,30	9,65
50	2,27	2,27	3,82	2,42	10,77	2,25	1,82	1,80	2,17	8,03	2,25	1,83	2,78	2,31	9,17	2,27	3,29	1,82	2,30	9,68
51	2,28	2,28	3,83	2,42	10,81	2,26	1,82	1,80	2,17	8,05	2,26	1,83	2,79	2,32	9,20	2,28	3,31	1,83	2,30	9,71
52	2,29	2,28	3,85	2,43	10,85	2,27	1,83	1,81	2,17	8,09	2,27	1,84	2,80	2,32	9,24	2,29	3,32	1,83	2,31	9,75
53	2,30	2,29	3,87	2,43	10,89	2,29	1,83	1,82	2,18	8,12	2,28	1,85	2,81	2,33	9,27	2,30	3,33	1,84	2,31	9,78
54	2,32	2,30	3,88	2,43	10,93	2,30	1,84	1,82	2,18	8,15	2,30	1,85	2,82	2,33	9,30	2,31	3,34	1,85	2,32	9,82
55	2,33	2,31	3,90	2,44	10,97	2,31	1,85	1,83	2,19	8,17	2,31	1,86	2,84	2,33	9,34	2,32	3,36	1,86	2,32	9,86
56	2,33	2,31	3,91	2,44	11,00	2,32	1,85	1,84	2,19	8,19	2,31	1,86	2,85	2,34	9,36	2,33	3,36	1,86	2,32	9,88
57	2,34	2,32	3,92	2,44	11,02	2,32	1,85	1,84	2,19	8,20	2,31	1,87	2,85	2,34	9,38	2,33	3,37	1,87	2,33	9,90
58	2,34	2,32	3,93	2,45	11,03	2,32	1,86	1,85	2,20	8,21	2,32	1,87	2,86	2,34	9,39	2,33	3,37	1,87	2,33	9,91
59	2,34	2,32	3,94	2,45	11,05	2,32	1,86	1,85	2,20	8,23	2,32	1,87	2,87	2,35	9,40	2,33	3,38	1,88	2,33	9,92
60	2,34	2,33	3,95	2,45	11,06	2,32	1,86	1,85	2,20	8,24	2,32	1,87	2,87	2,35	9,41	2,33	3,38	1,88	2,33	9,93
61	2,34	2,33	3,96	2,46	11,08	2,32	1,86	1,86	2,20	8,25	2,32	1,88	2,88	2,35	9,43	2,33	3,39	1,89	2,34	9,94
62	2,34	2,33	3,97	2,46	11,10	2,32	1,87	1,86	2,21	8,26	2,32	1,88	2,89	2,36	9,44	2,34	3,39	1,89	2,34	9,96
63	2,34	2,34	3,98	2,46	11,12	2,32	1,87	1,87	2,21	8,27	2,32	1,88	2,89	2,36	9,46	2,34	3,40	1,90	2,34	9,97
64	2,34	2,34	3,99	2,47	11,14	2,33	1,88	1,88	2,21	8,29	2,32	1,89	2,90	2,36	9,47	2,34	3,40	1,90	2,35	9,99
65	2,35	2,34	4,00	2,47	11,16	2,33	1,88	1,88	2,22	8,30	2,33	1,89	2,91	2,37	9,49	2,34	3,41	1,91	2,35	10,01
66	2,35	2,35	4,01	2,47	11,18	2,33	1,88	1,89	2,22	8,31	2,33	1,89	2,92	2,37	9,51	2,35	3,42	1,91	2,35	10,03
67	2,36	2,36	4,02	2,47	11,20	2,33	1,89	1,89	2,22	8,33	2,33	1,90	2,93	2,37	9,53	2,35	3,42	1,92	2,36	10,04
68	2,36	2,36	4,03	2,48	11,22	2,34	1,89	1,90	2,22	8,34	2,33	1,90	2,93	2,37	9,54	2,35	3,43	1,92	2,36	10,06
69	2,36	2,36	4,04	2,48	11,23	2,34	1,89	1,90	2,23	8,35	2,34	1,90	2,94	2,38	9,55	2,35	3,43	1,93	2,36	10,07
70	2,36	2,36	4,05	2,48	11,25	2,34	1,89	1,90	2,23	8,36	2,34	1,91	2,95	2,38	9,56	2,36	3,43	1,93	2,36	10,08
71	2,36	2,37	4,05	2,48	11,26	2,34	1,90	1,91	2,23	8,37	2,34	1,91	2,95	2,38	9,58	2,36	3,44	1,93	2,37	10,09
72	2,36	2,37	4,06	2,49	11,28	2,34	1,90	1,91	2,23	8,38	2,34	1,91	2,96	2,38	9,59	2,36	3,44	1,94	2,37	10,10
73	2,37	2,37	4,07	2,49	11,30	2,34	1,90	1,92	2,23	8,39	2,34	1,91	2,96	2,39	9,60	2,36	3,45	1,94	2,37	10,12
74	2,37	2,38	4,08	2,49	11,32	2,35	1,90	1,92	2,24	8,41	2,35	1,92	2,97	2,39	9,62	2,37	3,46	1,95	2,37	10,14
75	2,38	2,38	4,09	2,49	11,35	2,36	1,91	1,93	2,24	8,43	2,36	1,92	2,98	2,39	9,64	2,37	3,47	1,95	2,38	10,16

76	2,39	2,39	4,11	2,50	11,38	2,37	1,91	1,93	2,24	8,45	2,36	1,93	2,99	2,39	9,67	2,38	3,47	1,96	2,38	10,19
77	2,39	2,40	4,12	2,50	11,41	2,38	1,92	1,94	2,24	8,47	2,37	1,93	3,00	2,40	9,69	2,39	3,48	1,96	2,38	10,21
78	2,40	2,40	4,13	2,50	11,43	2,38	1,92	1,94	2,25	8,49	2,38	1,93	3,01	2,40	9,72	2,40	3,49	1,97	2,38	10,24
79	2,41	2,41	4,14	2,51	11,46	2,39	1,93	1,95	2,25	8,50	2,38	1,94	3,01	2,40	9,73	2,40	3,50	1,97	2,39	10,26
80	2,41	2,41	4,15	2,51	11,47	2,39	1,93	1,95	2,25	8,52	2,39	1,94	3,02	2,40	9,75	2,40	3,50	1,98	2,39	10,27
81	2,41	2,41	4,16	2,51	11,49	2,39	1,93	1,95	2,25	8,52	2,39	1,94	3,03	2,41	9,76	2,41	3,51	1,98	2,39	10,28
82	2,41	2,41	4,16	2,51	11,50	2,39	1,93	1,96	2,25	8,53	2,39	1,94	3,03	2,41	9,77	2,41	3,51	1,98	2,39	10,29
83	2,41	2,42	4,17	2,52	11,51	2,39	1,93	1,96	2,26	8,54	2,39	1,95	3,04	2,41	9,78	2,41	3,51	1,99	2,39	10,30
84	2,41	2,42	4,17	2,52	11,52	2,39	1,93	1,96	2,26	8,55	2,39	1,95	3,04	2,41	9,78	2,41	3,51	1,99	2,40	10,31
85	2,41	2,42	4,18	2,52	11,53	2,39	1,94	1,97	2,26	8,55	2,39	1,95	3,05	2,41	9,79	2,41	3,52	1,99	2,40	10,31
86	2,41	2,42	4,19	2,52	11,54	2,39	1,94	1,97	2,26	8,56	2,39	1,95	3,05	2,41	9,80	2,41	3,52	2,00	2,40	10,33
87	2,42	2,43	4,20	2,52	11,56	2,40	1,94	1,97	2,26	8,58	2,40	1,95	3,06	2,42	9,82	2,41	3,53	2,00	2,40	10,34
88	2,42	2,43	4,21	2,53	11,58	2,40	1,95	1,98	2,26	8,59	2,40	1,96	3,06	2,42	9,84	2,42	3,53	2,01	2,40	10,36
89	2,43	2,43	4,22	2,53	11,61	2,41	1,95	1,98	2,27	8,61	2,41	1,96	3,07	2,42	9,86	2,42	3,54	2,01	2,41	10,38
90	2,43	2,44	4,23	2,53	11,63	2,41	1,95	1,99	2,27	8,62	2,41	1,96	3,08	2,42	9,88	2,43	3,55	2,02	2,41	10,40
91	2,44	2,44	4,24	2,53	11,65	2,42	1,96	1,99	2,27	8,64	2,42	1,97	3,09	2,43	9,89	2,43	3,55	2,02	2,41	10,41
92	2,44	2,45	4,24	2,53	11,67	2,42	1,96	2,00	2,27	8,65	2,42	1,97	3,09	2,43	9,91	2,44	3,56	2,02	2,41	10,43
93	2,44	2,45	4,25	2,54	11,68	2,42	1,96	2,00	2,27	8,66	2,42	1,97	3,10	2,43	9,92	2,44	3,56	2,03	2,41	10,44
94	2,44	2,45	4,26	2,54	11,69	2,42	1,96	2,00	2,28	8,66	2,42	1,97	3,10	2,43	9,93	2,44	3,57	2,03	2,42	10,45
95	2,44	2,45	4,27	2,54	11,70	2,43	1,96	2,01	2,28	8,67	2,42	1,98	3,11	2,43	9,94	2,44	3,57	2,04	2,42	10,46
96	2,45	2,46	4,27	2,54	11,71	2,43	1,97	2,01	2,28	8,68	2,42	1,98	3,11	2,43	9,95	2,44	3,57	2,04	2,42	10,47
97	2,45	2,46	4,28	2,54	11,73	2,43	1,97	2,01	2,28	8,69	2,43	1,98	3,12	2,44	9,96	2,44	3,58	2,04	2,42	10,48
98	2,45	2,46	4,29	2,55	11,75	2,43	1,97	2,02	2,28	8,70	2,43	1,98	3,12	2,44	9,97	2,45	3,58	2,05	2,42	10,50
99	2,46	2,47	4,30	2,55	11,77	2,44	1,97	2,02	2,28	8,72	2,44	1,99	3,13	2,44	9,99	2,45	3,59	2,05	2,42	10,51
100	2,46	2,47	4,31	2,55	11,79	2,44	1,98	2,02	2,29	8,73	2,44	1,99	3,13	2,44	10,01	2,46	3,59	2,06	2,43	10,53
101	2,47	2,47	4,32	2,55	11,81	2,45	1,98	2,03	2,29	8,75	2,45	1,99	3,14	2,44	10,02	2,46	3,60	2,06	2,43	10,55
102	2,47	2,48	4,32	2,55	11,83	2,45	1,98	2,03	2,29	8,76	2,45	2,00	3,15	2,45	10,04	2,46	3,61	2,06	2,43	10,56

103	2,47	2,48	4,33	2,56	11,84	2,45	1,99	2,04	2,29	8,77	2,45	2,00	3,16	2,45	10,05	2,47	3,61	2,07	2,43	10,57
104	2,47	2,48	4,34	2,56	11,85	2,46	1,99	2,04	2,29	8,77	2,45	2,00	3,16	2,45	10,06	2,47	3,61	2,07	2,43	10,58
105	2,47	2,49	4,34	2,56	11,86	2,46	1,99	2,04	2,29	8,78	2,45	2,00	3,16	2,45	10,07	2,47	3,62	2,07	2,43	10,59
106	2,47	2,49	4,35	2,56	11,87	2,46	1,99	2,05	2,30	8,79	2,45	2,00	3,17	2,45	10,07	2,47	3,62	2,08	2,44	10,60
107	2,48	2,49	4,35	2,56	11,88	2,46	1,99	2,05	2,30	8,79	2,45	2,00	3,17	2,45	10,08	2,47	3,62	2,08	2,44	10,60
108	2,48	2,49	4,36	2,56	11,89	2,46	1,99	2,05	2,30	8,80	2,45	2,00	3,17	2,45	10,09	2,47	3,62	2,08	2,44	10,61
109	2,48	2,49	4,36	2,56	11,90	2,46	1,99	2,05	2,30	8,80	2,45	2,01	3,18	2,46	10,09	2,47	3,63	2,08	2,44	10,62
110	2,48	2,49	4,37	2,57	11,91	2,46	2,00	2,06	2,30	8,81	2,46	2,01	3,18	2,46	10,10	2,47	3,63	2,09	2,44	10,63
111	2,48	2,50	4,38	2,57	11,92	2,46	2,00	2,06	2,30	8,82	2,46	2,01	3,19	2,46	10,11	2,47	3,63	2,09	2,44	10,64
112	2,48	2,50	4,39	2,57	11,94	2,46	2,00	2,06	2,30	8,83	2,46	2,01	3,19	2,46	10,13	2,48	3,64	2,09	2,44	10,65
113	2,49	2,50	4,39	2,57	11,95	2,47	2,00	2,07	2,30	8,84	2,46	2,02	3,20	2,46	10,14	2,48	3,64	2,10	2,45	10,66
114	2,49	2,51	4,40	2,57	11,97	2,47	2,01	2,07	2,31	8,85	2,47	2,02	3,21	2,46	10,15	2,48	3,65	2,10	2,45	10,68
115	2,49	2,51	4,41	2,57	11,98	2,47	2,01	2,07	2,31	8,86	2,47	2,02	3,21	2,46	10,16	2,49	3,65	2,10	2,45	10,69
116	2,49	2,51	4,42	2,58	11,99	2,47	2,01	2,08	2,31	8,87	2,47	2,02	3,21	2,47	10,17	2,49	3,65	2,11	2,45	10,70
117	2,49	2,51	4,42	2,58	12,00	2,47	2,01	2,08	2,31	8,88	2,47	2,02	3,22	2,47	10,18	2,49	3,66	2,11	2,45	10,70
118	2,49	2,52	4,43	2,58	12,01	2,47	2,01	2,08	2,31	8,88	2,47	2,02	3,22	2,47	10,19	2,49	3,66	2,11	2,45	10,71
119	2,49	2,52	4,43	2,58	12,01	2,47	2,01	2,08	2,31	8,88	2,47	2,02	3,22	2,47	10,19	2,49	3,66	2,11	2,45	10,71
120	2,49	2,52	4,43	2,58	12,02	2,47	2,01	2,09	2,31	8,89	2,47	2,03	3,23	2,47	10,20	2,49	3,66	2,12	2,46	10,72