

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

RICARDO MACEDO VIEGA

**USO DO SIMULADOR DE TRÁFEGO LWT PARA ANÁLISE DE SOLOS PARA
VIAS NÃO PAVIMENTADAS**

**Alegrete
2023**

RICARDO MACEDO VIEGA

**USO DO SIMULADOR DE TRÁFEGO LWT PARA ANÁLISE DE SOLOS PARA
VIAS NÃO PAVIMENTADAS**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Engenharia Civil
da Universidade Federal do Pampa, como
requisito parcial para obtenção do Título de
Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Dr. Jaelson Budny

**Alegrete
2023**

RICARDO MACEDO VIEGA

USO DO SIMULADOR DE TRÁFEGO LWT PARA ANÁLISE DE SOLOS PARA VIAS NÃO PAVIMENTADAS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Civil.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: 26 de janeiro de 2023.

Banca examinadora:

Prof. Dr. JAELSON BUDNY - UNIPAMPA - Orientador

Prof. Dr. WILBER FELICIANO CHAMBI TAPAHUASCO - UNIPAMPA

Eng. Me. FABIANO GARCIA OLIVEIRA - Membro externo



Assinado eletronicamente por **JAELSON BUDNY, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 03/02/2023, às 22:56, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **FABIANO GARCIA OLIVEIRA, Usuário Externo**, em 04/02/2023, às 12:01, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **WILBER FELICIANO CHAMBI TAPAHUASCO, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 05/02/2023, às 10:38, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador 1047522 e o código CRC 2F054C33.

Dedico este trabalho aos meus pais, Edilsom (*in memoriam*) e Mirta, e irmãos, Camila e Leonardo, que foram meus exemplos e me apoiaram durante toda caminhada.

AGRADECIMENTO

Aos meus pais, Edilsom Moraes Viegas (*in memoriam*) e Mirta Liziane Macedo Viegas, pelo exemplo de vida e força, por todo amor, incentivo e orientação. Também, aos meus irmãos, Camila e Leonardo, por todo apoio, carinho e incentivo.

Ao Prof. Dr. Jaelson Budny pela orientação, disponibilidade e incentivo durante o desenvolvimento de todas as atividades propostas para este trabalho.

À Universidade Federal do Pampa e aos responsáveis pelos laboratórios, pela disponibilização dos instrumentos necessários para a execução das atividades.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul - FAPERGS, pela concessão de bolsa de estudo do autor.

E por fim, a todos amigos e familiares aqui não citados, que de alguma forma contribuíram para minha formação.

RESUMO

As vias não pavimentadas representam a grande parte da malha rodoviária do Brasil e tem grande importância no escoamento de produtos agrícolas e no acesso da zona rural para urbana, por isso é fundamental que estejam em boas condições de segurança e trafegabilidade. Assim, como o pensamento de pavimentação é inviável pela extensão de vias existentes, a alternativa é buscar uma forma de prever como o solo irá se comportar ao longo da vida útil da via. Portanto, este trabalho apresenta a avaliação de uma metodologia aspirante para utilização do equipamento LWT (*Loaded Wheel Tester*) na análise da previsão de comportamento de solos usados como revestimento de vias não pavimentadas. Os solos estudados, os quais foram adequadamente preparados, são provenientes de três regiões próximas ao município de Alegrete-RS. O equipamento é normatizado para se utilizar na avaliação do efeito da compactação e as características de deformação de camadas de misturas de microrrevestimento asfálticos. Assim, buscou-se avaliar o desempenho do simulador LWT, juntamente com adaptações necessárias para testar corpos de prova, proporcionando assim um modo de estudar comparativamente o desempenho de solos, simulando uma condição de tráfego em campo. O estudo concluiu que o equipamento aplica uma carga acima do ideal para o estudo de solos, porém realizando adequações é possível utilizar o equipamento para a análise do comportamento de solos.

Palavras-Chave: equipamento LWT, solos, afundamento.

ABSTRACT

Unpaved roads represent a large part of the road network in Brazil and are of great importance in the flow of agricultural products and access from rural to urban areas, so it is essential that they are in good safety and traffic conditions. Thus, as the thought of paving is unfeasible due to the extension of existing roads, the alternative is to look for a way to predict how the soil will behave over the useful life of the road. Therefore, this work presents the evaluation of an aspiring methodology for the use of the LWT (Loaded Wheel Tester) equipment in the analysis of the predicted behavior of soils used as coating of unpaved roads. The soils studied, which were properly prepared, come from three regions close to the municipality of Alegrete-RS. The equipment is standardized to be used in the evaluation of the effect of compaction and the characteristics of deformation of layers of asphalt microcoating mixtures. Thus, we sought to evaluate the performance of the LWT simulator, along with the necessary adaptations to test specimens, thus providing a way to comparatively study the performance of soils, simulating a traffic condition in the field. The study concluded that the equipment applies a load above the ideal for the study of soils, but by making adjustments it is possible to use the equipment for the analysis of soil behavior.

Keywords: LWT equipment, soils, sinking.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Corrugações	18
Figura 2 - Buracos.....	18
Figura 3 - Afundamento de trilha de roda.....	18
Figura 4 - Simulador do IPR/DNER.....	22
Figura 5 - Simulador de tráfego UFRGS-DAER/RS	23
Figura 6 - Simulador de Tráfego Móvel HVS.....	24
Figura 7 - Simulador de tráfego LCPC	27
Figura 8 - Placa após ensaio com simulador LCPC	27
Figura 9 - Simulador de tráfego APA para ensaios de deformação permanente	28
Figura 10 - Simulador de tráfego APA para ensaios de trincamento por fadiga.....	28
Figura 11 - Equipamento LWT do IME	30
Figura 12 - Corpos de prova para ensaio LWT	31
Figura 13 - Etapas do programa experimental	32
Figura 14 – Equipamento LWT.....	33
Figura 15 – Molde e acessórios confeccionados.....	33
Figura 16 - Localizações de extração do solos utilizados	34
Figura 17 – Características do ensaio Mini-Proctor.....	38
Figura 18 - Curva de compactação do solo A	38
Figura 19 - Curva de compactação do solo B	39
Figura 20 - Curva de compactação do solo C	39
Figura 21 - Curvas de compactação do solos estudados.....	40
Figura 22 – Materiais e ferramentas utilizados na homogeneização da amostra.....	41
Figura 23 – Processo de preparo da amostra	42
Figura 24 – Materiais e ferramentas utilizados na compactação da amostra.....	42
Figura 25 – Compactação manual do corpo de prova.....	43
Figura 26 – Compactação do corpo de prova com a prensa.....	44
Figura 27 – Materiais e ferramentas utilizados na ruptura da amostra.....	44
Figura 28 – Processo de preparação para o ensaio LWT	46
Figura 29 – Roda com adição da borracha	48
Figura 30 – Retirada da caixa acoplada ao equipamento.	49
Figura 31 – Representação dos pontos de análise do afundamento	50
Figura 32 - Gráfico Afundamento x Ciclos do solo A.....	50

Figura 33 – Solo A após a passagem de 10 ciclos.....	51
Figura 34 – Solo A após a passagem de 20 ciclos.....	51
Figura 35 - Gráfico Afundamento x Ciclos do solo B.....	52
Figura 36 – Ensaio com Solo B. A. Afundamento inicial; B. Aos 10 ciclos	52
Figura 37 - Gráfico Afundamento x Ciclos do solo C.....	53
Figura 38 – Ensaio com solo C. A. 20 ciclos. B. 30 ciclos	53

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Condição do ensaio de deformação permanente dos simuladores de tráfego LCPC e APA	29
Tabela 2 - Características do solo A	35
Tabela 3 - Características do solo B	36
Tabela 4 - Características do solo C	37
Tabela 5 - Modelo de tabela de ensaio	47
Tabela 6 - Resultados do Ensaio LWT com solo A	60
Tabela 7 - Resultados do Ensaio LWT com solo B	60
Tabela 8 - Resultados do Ensaio LWT com solo C	61

LISTA DE ABREVIATURAS

p. – página

kg – quilogramas

mm – milímetros

LISTA DE SIGLAS

APA	Asphalt Pavement Analyzer
DAER/RS	Departamento Autônomo de Estradas e Rodagem do Estado do Rio Grande do Sul
DNER	Departamento Nacional de Estradas e Rodagem
HVS	Heavy Vehicle Simulator
IPR	Instituto de Pesquisas Rodoviárias
LCPC	Laboratoire Central des Ponts et Chaussées
LWT	Loaded Wheel Tester
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul

SUMÁRIO

AGRADECIMENTO	5
RESUMO	6
1 INTRODUÇÃO	15
1.1 Objetivos Gerais	16
1.2 Objetivos Específicos	16
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1 Rodovias não pavimentadas	17
2.2 Simuladores de Tráfego	20
2.2.1 Simuladores de tráfego em verdadeira grandeza	20
2.2.1.1 Simulador de tráfego IPR/DNER	21
2.2.1.2 Simulador de tráfego UFRGS-DAER	22
2.2.1.3 Simulador de tráfego móvel - HVS	24
2.2.2 Simuladores de tráfego em laboratório	25
2.2.2.1 Simulador de tráfego LCPC	26
2.2.2.2 Asphalt Pavement Analyzer - APA	27
2.2.2.3 Loaded Wheel Tester – LWT	29
3 MATERIAIS E MÉTODOS	32
3.1 Materiais Utilizados	32
3.1.1 Equipamento LWT e acessórios	32
3.1.2 Solos	34

3.1.2.1 Solo A	34
3.1.2.2 Solo B	35
3.1.2.3 Solo C	36
3.2 Métodos Utilizados	37
3.2.1 Ensaio Mini-Proctor	37
3.2.2 Ensaio LWT	40
3.2.2.1 Preparo da amostra	41
3.2.2.2 Compactação	42
3.2.2.3 Ruptura	44
4 RESULTADOS	48
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	54
5.1 Sugestões para trabalhos futuros	55
REFERÊNCIAS	56
ANEXO A – Resultados dos ensaios LWT nos solos estudados	60

1 INTRODUÇÃO

Segundo o Anuário da Confederação Nacional do Transporte (2018), a malha rodoviária do Brasil tem cerca de 213.453 km (12,41%) de estradas pavimentadas, 157.309 km (9,14%) de estradas planejadas para receber pavimentação e aproximadamente 1.349.938 km (78,45%) de estradas não pavimentadas.

A partir desses números é possível concluir de forma clara a enorme importância da rede rodoviária de estradas não pavimentadas para a economia nacional, estaduais e municipais (SANTOS *et al.*, 2019).

As estradas não pavimentadas são de suma importância no escoamento de produtos e safras, além de proporcionar a milhões de moradores do campo acesso a trabalho, escolas, atendimentos de saúde, oportunidades de vender e comprar mercadorias, entre outras atividades que necessitam de algum deslocamento (ODA, 1995).

Diante da importância social e econômica para o país e seus cidadãos, choca o fato dessa malha rodoviária geralmente acabar tendo seu tratamento deixado em segundo plano, com carência de serviços mais sistemáticos e qualificados de melhoria e manutenção, o que resulta no aumento de problemas e, conseqüentemente, a degradação do leito estradal (SANTOS *et al.*, 2019).

Rodrigues (2015), observa que as rodovias não pavimentadas são mais suscetíveis a sofrerem danos devido a fatores externos, tais como o tráfego rodoviário e as atividades de manutenção inadequadas. Além disso, o autor destaca que poderão ocorrer danos estruturais, caso a estrada apresente problemas relativos ao tipo de solo, ao sistema de drenagem e à sua geometria.

De acordo com Santos *et al.* (2019), devido à grande extensão dessa malha rodoviária, é inviável pensar na pavimentação como solução para esse tipo de rodovia, isto porque os custos seriam elevadíssimos. Portanto, é de suma importância uma forma de prever e melhorar o comportamento de solos utilizados em rodovias não pavimentadas.

Em busca desse melhoramento das propriedades dos materiais presentes nas rodovias, a estabilização de solos é um processo que ocorre a partir de intervenções mecânicas ou aplicação de certos aditivos aos solos, viabilizando o atendimento de critérios técnicos e econômicos (GONDIM, 2008).

Segundo Fritzen (2005), os ensaios de laboratório normalmente utilizados para estudar o comportamento dos solos são a alternativa mais viável e econômica do que a maioria dos dimensionamentos, porém, implicam na adoção de Fatores Laboratório-Campo bastante elevados.

Considerando os diversos problemas que podem vir a existir em estradas não pavimentadas e buscando uma metodologia alternativa à ensaios convencionais para reproduzir as condições de campo em laboratório, como o método empírico do DNER, a partir do ensaio CBR, e o método mecanístico com o programa experimental FEPAVE, chegou-se ao simulador de tráfego *Loaded Wheel Tester* - LWT.

1.1 Objetivos Gerais

Avaliar o uso do simulador de tráfego LWT na análise da previsão de comportamento de solos usados como revestimento de vias não pavimentadas.

1.2 Objetivos Específicos

- Definir uma metodologia de ensaio do LWT para a análise de solos;
- Determinar:
 - O método de compactação;
 - A carga de ensaio;
 - O método para medir o afundamento da trilha de roda

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Rodovias não pavimentadas

As rodovias não pavimentadas, também chamadas de estradas vicinais ou estradas rurais, são vias sem revestimento ou com revestimento primário. As rodovias sem revestimento são caracterizadas pela utilização de apenas materiais locais conformados na constituição do pavimento. Na construção de rodovias com revestimento primário, além de conformados, os materiais locais são submetidos a processos, como compactação e tratamentos físicos ou químicos, com o objetivo de aumentar sua estabilidade e capacidade de receber ou transmitir esforços (OLIVEIRA, 2005).

Segundo Santos *et al.* (2019), as rodovias não pavimentadas devem ter duas características técnicas essenciais para garantir condições de tráfego satisfatórias, são elas: boa capacidade de suporte; e boas condições de rolamento e aderência.

A capacidade suporte está associada a capacidade da rodovia de não se deformar quando solicitada pelo tráfego. A falta desta característica pode resultar em ondulações transversais e a formação de rodeiros. A baixa capacidade de suporte normalmente deve-se a deficiências técnicas localizadas no subleito ou na camada de reforço, ou em ambos. (SANTOS *et al.* 2019)

As condições de rolamento são influenciadas pelas irregularidades da pista, resultando em um menor conforto e segurança do tráfego, e a aderência está associada às boas ou más condições de atrito. Normalmente os problemas nas condições de rolamento e aderência está na camada de revestimento, com esburacamento generalizado, materiais granulares soltos, entre outros (SANTOS *et al.*, 2019).

De acordo com Santos *et al.* (2019), os problemas mais comuns das rodovias não pavimentadas têm como causas principais: a falta de capacidade de suporte do subleito; o mau desempenho da superfície de rolamento; e a deficiência do sistema de drenagem.

Eaton *et al.* (1989) a partir do seu método de avaliação das estradas não pavimentadas identificou diversos tipos de defeitos que podem vir a ocorrer nesse tipo

de estrada, dentre eles estão: corrugações (Figura 1); buracos (Figura 2); e afundamento de trilha de roda (Figura 3).

Figura 1 - Corrugações



Fonte: Cruz (2005)

Figura 2 - Buracos



Fonte: Cruz (2005)

Figura 3 - Afundamento de trilha de roda



Fonte: Cruz (2005)

Corrugações consistem em uma série de sulcos regularmente espaçados ou ondulações que ocorrem em intervalos bastante regulares, perpendiculares à direção do tráfego. Os sulcos geralmente são causados pela ação do tráfego e agregados soltos (EATON *et al.*, 1989).

De acordo com Santos *et al.* (2019), os buracos surgem devido a contínua passagem de veículos sobre um local onde há empocamento de água provocando, assim, a expulsão de partículas sólidas do leito. Já Eaton *et al.* (1989) descrevem buracos como pequenas depressões em forma de bacia na superfície da estrada, produzidos quando o tráfego desgasta pequena parte da superfície da estrada, sendo seu crescimento acelerado pela umidade dentro do buraco.

O afundamento de trilhas de rodas é uma depressão superficial do caminho da roda. Esse afundamento é causado por uma deformação permanente em qualquer uma das camadas da estrada ou do subleito. Tal deformação é resultado de cargas repetidas de tráfego, especialmente quando a capacidade de suporte da rodovia é baixa e em períodos de chuva (EATON *et al.*, 1989).

Além destes problemas citados há também a erosão que, segundo Santos *et al.* (2019), é aquele que possui o maior poder destrutivo e se não houver controle e correção, resultará em completa interrupção de tráfego.

A erosão é um processo que pode ser desencadeado por diversas origens eólica, hídrica, glacial e organogênica. Nas estradas não pavimentadas, a erosão causada por agentes hídricos é um fator importante a ser considerado. Isto porque ela interfere na estrutura do pavimento, pois quando a umidade do solo excede sua capacidade de absorver água, ficando saturado, dará início ao processo de escoamento superficial onde ocorre o transporte de partículas e sedimentos (PITTELKOW, 2013). De acordo com o Manual de Conservação Rodoviária do DNIT (2005), esta erosão causada pelas águas pluviais é acelerada, principalmente, pela insuficiência ou falta de drenagem, má compactação, pouco suporte do material empregado e pelo tipo de solo.

Visto os principais defeitos que ocorrem em rodovias não pavimentadas, o Manual de Conservação Rodoviária do DNIT (2005) orienta que existem duas formas de realizar uma prevenção contra esses defeitos: A adoção de greides elevados, melhorando a drenagem da rodovia; e também, a utilização de solos granulares com porções finas, possibilitando, assim, a coesão.

De acordo com Oliveira (2005), a qualidade do sistema de drenagem tem grande influência na existência de defeitos em rodovias não pavimentadas. O autor aponta, ainda, que é recomendado adotar uma declividade transversal conveniente, que facilite o escoamento da água para as valetas de drenagem.

Santos *et al.* (2019), destacam que para se obter um sistema de drenagem eficiente deve-se executar o abaulamento transversal com declividade na ordem de 3% para que ocorra o escoamento para os dispositivos de drenagem e, com isso, evitando acúmulo de água sobre a pista de rolamento.

No que se refere ao melhoramento da capacidade de suporte das rodovias não pavimentadas, Santos *et al.* (2019) indica a compactação e a utilização de materiais granulares, como areias, cascalhos, entre outros. Entretanto, deve-se utilizar uma quantidade suficiente de material fino, silte e argila de modo que o material não seja desagregado pela roda.

2.2 Simuladores de Tráfego

De acordo com Victorino (2008), os simuladores de tráfego são equipamentos capazes de realizar um ensaio acelerado que reproduz, em um tempo reduzido, a degradação que o pavimento irá sofrer durante sua vida útil. Segundo Gonçalves (2002) para se alcançar essa aceleração na degradação do pavimento, no momento do ensaio, são aplicados níveis de cargas superiores ao que será realmente submetida a estrutura durante sua vida de serviço.

Gonçalves (2002) relata que a realização de ensaios acelerados surge da necessidade de procedimentos adequados para o dimensionamento de pavimentos novos ou em projeto de restauração de pavimentos.

De acordo com Bernucci *et al.* (2010) os simuladores podem ser divididos: em verdadeira grandeza e em laboratório.

2.2.1 Simuladores de tráfego em verdadeira grandeza

Os ensaios acelerados em escala real já foram assunto de diversas pesquisas, e os resultados destas permitiram avanços significativos na prática da engenharia de pavimentos. Com isso, os ensaios acelerados estão sendo cada vez mais utilizados

como ferramentas de apoio ao processo de tomada de decisão, no que se refere à utilização de novos materiais e de procedimentos que possibilitem um melhor custo-benefício, seja para construção de novos pavimentos ou em projetos de restauração rodoviária (GONÇALVES, 2002).

De acordo com Victorino (2008), os simuladores de tráfego em escala real são normalmente realizados em pequenas seções-teste quando comparadas às dimensões das rodovias, mas como os materiais são utilizados nas mesmas proporções pode-se considerar este o procedimento mais fiel à realidade na elaboração de projetos de pavimentos.

No Brasil os principais simuladores em verdadeira grandeza são: o carrossel do IPR/DNER e o simulador linear da UFRGS-DAER/RS (SILVA, 2001). Além destes, há também o simulador de tráfego móvel - HVS.

2.2.1.1 Simulador de tráfego IPR/DNER

De acordo com Silva (2001), o simulador tipo carrossel do IPR/DNER é um instrumento de pesquisa que permite por comparação testar, para as condições específicas do local, novos materiais, estruturas inovadoras de pavimentos e sensores para instrumentação de pavimentos. Porém, há como limitação o fato de não poder variar a carga aplicada.

O simulador é uma estrutura metálica, com 33 metros de diâmetro, composta de três subestruturas treliçadas, conforme ilustra a Figura 4. Cada conjunto de rodas duplas tem uma carga de aproximadamente 57kN, portanto a estrutura pesa 171kN. O trem de prova pode alcançar uma velocidade máxima de 80km/h, com uma velocidade média de operação de 40km/h, possibilitando a aplicação ao pavimento, pelos três conjuntos de rodas, aproximadamente 1.500 carregamentos por hora. Para se alcançar cobertura total da área transversal útil do pavimento um mecanismo excêntrico permite o deslocamento lateral do trem de prova (SILVA, 2001).

Figura 4 - Simulador do IPR/DNER



Fonte: Silva (2001)

2.2.1.2 Simulador de tráfego UFRGS-DAER

Com a finalidade de desenvolver pesquisas e buscar melhores alternativas para a pavimentação de rodovias, a Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS e o Departamento Autônomo de Estradas de Rodagem – DAER/RS celebraram, no início da década de 90, um Protocolo de Colaboração Técnico-Científica. A partir deste Convênio, foi construído um Simulador de Tráfego e uma Área de Pesquisas, localizados no Campus do Vale da UFRGS, em Porto Alegre, com dez pistas experimentais (ALBANO, 1998).

De acordo com Silva (2001), o simulador foi construído com 15 metros de comprimento, 2,5 metros de largura e 4,3 metros de altura, além disso, também conta com 8 metros de curso de atuação da carga sobre o pavimento e 3 metros para aceleração e desaceleração. Possui a capacidade de variar a carga aplicada sobre o pavimento de 0 a 65kN e sua velocidade regulável de até 20km/h. A aplicação da carga é linear, unidirecional e não tracionada com um sistema de rodado simples ou duplo, articulado e regulável. O simulador linear de tráfego UFRGS-DAER/RS, ilustrado na Figura 5, é capaz de realizar ciclos de cargas num espaço de tempo de 16 a 18 segundos, possibilitando a aplicação de 225 ou 200 ciclos de carga por hora de operação.

Figura 5 - Simulador de tráfego UFRGS-DAER/RS



Fonte: Gonçalves (2002)

A primeira pesquisa realizada no simulador teve como alvo a viabilidade de uso do basalto alterado ou decomposto na pavimentação de rodovias secundárias, com foco na previsão de desempenho quanto às solicitações mecânicas e no desenvolvimento de um método de dimensionamento baseado nas especificidades do material e do tráfego (NÚÑEZ, 1997).

Albano (1998), investigou com o auxílio do simulador linear de tráfego os efeitos dos fatores carga por eixo, pressão de inflação e tipo de pneu na resposta elástica de um pavimento delgado.

Viera (2002), através das solicitações de maneira acelerada do simulador UFRGS-DAER/RS, acompanhou a evolução de degradação do pavimento com o intuito de se fazer uma comparação entre o desempenho de recapeamentos executados diretamente sobre uma camada trincada e com o uso de camada intermediária, geotxteis impregnados com asfaltos. Analisou, também, o comportamento, do ponto de vista estrutural e funcional, de um pavimento com um revestimento de concreto asfáltico através de medições deflectométricas, deformações permanente e degradações superficiais.

Gonçalves (2002), avaliou o desempenho de estruturas de pavimentos, constituídos por misturas de concretos asfálticos convencional e modificados por polímero. Para isso, foram executadas seis seções de teste com diferentes espessuras de revestimentos asfálticos e instrumentadas com extensômetros e células de pressão total para estudar a resposta estrutural dos pavimentos quando submetidos à aplicação do trem de cargas do simulador linear de tráfego UFRGS-DAER/RS.

2.2.1.3 Simulador de tráfego móvel - HVS

De acordo com Victorino (2008), o simulador de tráfego móvel - HVS é o mais diferente dos demais, isto porque sua estrutura está montada sobre rodas, possibilitando seu deslocamento por meios próprios até o local que se deseja realizar estudos e testes, aplicando o carregamento em pistas reais.

No Brasil, a empresa Cifali desenvolveu e construiu o primeiro simulador de tráfego móvel da América Latina (Figura 6), com a colaboração da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, a partir da experiência desta com o Simulador de Tráfego UFRGS/DAER (FRITZEN, 2005).

Figura 6 - Simulador de Tráfego Móvel HVS



Fonte: Victorino (2008)

A aplicação de cargas do tráfego pelo HVS desenvolvido pela Cifali, pode ser feita em um único sentido, podendo alcançar até 350 ciclos por hora, ou nos dois sentidos, atingindo até 700 ciclos por hora. A carga aplicada pode chegar a até 8600 Kgf (semi-eixo) com velocidade máxima de deslocamento de 7 km/h e comprimento da solicitação de 5,0 metros com deslocamento lateral programável de até 1 metro (FRITZEN, 2005).

No sistema de deslocamento em um único sentido o contato do pneu com o pavimento ocorre somente em um único sentido, sendo o retorno com o rodado suspenso, este sistema é recomendado para ensaios de fadiga. No sistema em dois sentidos há contato do pneu com o pavimento tanto na ida quanto na volta, sendo esse sistema recomendado para estudos de afundamento de trilha de roda (FRITZEN, 2005).

Em agosto de 2003, o DAER-RS em parceria com as empresas Simular, Brasília Guaíba Obras Públicas e Greca Asfaltos, realizaram um estudo na RS-122 com dois segmentos experimentais de 300 metros de extensão cada, sendo um com revestimento de concreto asfáltico convencional e outro modificado com borracha. O objetivo dos testes foi comparar, através da simulação acelerada do HVS, o comportamento destes dois diferentes tipos de ligantes, apontando a melhor e mais econômica solução para esta aplicação específica (VICTORINO, 2008).

A segunda pesquisa com Simulador de Tráfego Linear Móvel no Brasil foi realizada na rodovia Anhanguera (SP-330), no município de Cravinhos-SP. Foram construídas quatro seções-teste de igual comprimento com o objetivo de determinar o desempenho e a durabilidade das novas tecnologias e materiais de pavimentação, a partir da utilização de tratamento superficial simples ou duplo confeccionado com emulsões asfálticas modificadas por polímeros e microrrevestimento asfáltico a frio confeccionado com emulsões modificadas por polímeros (VALE, 2008).

2.2.2 Simuladores de tráfego em laboratório

Os ensaios acelerados em laboratório, no que se refere ao estudo do fenômeno da deformação permanente, têm a capacidade de simular de forma bastante aproximada as solicitações sofridas pelo revestimento durante sua vida útil. E, com isso, auxiliar no critério de seleção de dosagem de misturas sob este aspecto (FRITZEN, 2005).

Segundo Bernucci *et al.* (2010), os principais modelos de laboratório encontrados no Brasil são: um francês, desenvolvido pelo LCPC (*Laboratoire Central des Ponts et Chaussées*); e um norte-americano, chamado *Asphalt Pavement Analyzer* (APA).

Além destes, há também o equipamento denominado *loaded wheel tester* (LWT), que por ser o objeto de estudo deste trabalho será discutido com maiores detalhes no tópico 2.2.2.3.

2.2.2.1 Simulador de tráfego LCPC

Fritzen (2005) descreve a execução do ensaio com o simulador do LCPC, localizado na Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, e ressalta a importância de sua utilização tanto no projeto e na dosagem de misturas asfálticas como na compreensão do desempenho dos revestimentos asfálticos.

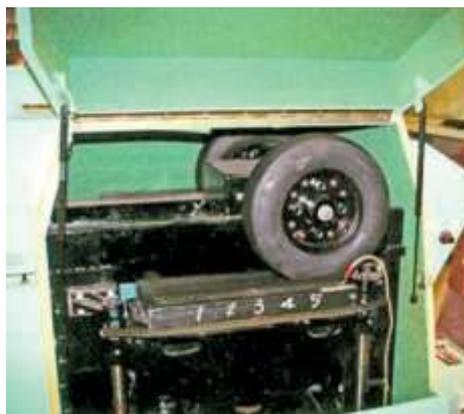
Para a realização do ensaio com este simulador, primeiramente, utiliza-se de um equipamento denominado mesa compactadora, que tem a função de compactar a mistura asfáltica através de amassamento por roda de pneu com cargas e pressão de inflação reguláveis. A partir disso, produz-se uma placa compactada de mistura asfáltica nas dimensões padrão de 500mm de comprimento e 180mm de largura com a espessura sendo de 50 ou 100mm (BERNUCCI *et al.*, 2010).

Segundo Fritzen (2005), para se obter um corpo-de-prova em laboratório com espessura de 50mm, necessita-se de 15kg de mistura asfáltica.

Bernucci *et al.* (2010) ressalta que o simulador é composto de um eixo com dois pneumáticos, como pode ser visto na Figura 7, e, por isso, a realização do ensaio é feita simultaneamente em duas placas, colocadas uma em cada lado do equipamento. A temperatura do ensaio é de 60°C. O equipamento aplica um carregamento longitudinal de ida e vinda, com ciclos de 1Hz. Durante a realização do ensaio mede-se o afundamento de trilha de roda que, de acordo com o autor citado, usualmente são feitos ao completar os ciclos de 1.000, 3.000, 10.000, 20.000 e 30.000, um exemplo desse afundamento pode ser visto na Figura 8.

Fritzen (2005), aponta que, para misturas de concreto asfáltico adequadas a camada de revestimento, o critério a ser utilizado, baseado nas especificações francesas, é de uma porcentagem máxima de 10% de afundamento de trilha de roda na amostra ensaiada para 30.000 ciclos.

Figura 7 - Simulador de tráfego LCPC



Fonte: Bernucci *et al* (2010)

Figura 8 - Placa após ensaio com simulador LCPC



Fonte: Bernucci *et al*. (2010)

2.2.2.2 Asphalt Pavement Analyzer - APA

Segundo Fritzen (2005), o simulador APA tem a capacidade de avaliar a deformação permanente, o trincamento por fadiga e, ainda, a suscetibilidade à umidade de misturas asfálticas moldadas à quente e a frio.

A avaliação completa de deformação permanente utilizando o APA pode ser realizada em um tempo de 2 horas e 15 minutos para um total de 8.000 ciclos. Sendo feita em amostras retangulares ou cilíndricas a partir da aplicação de cargas sob rodas de alumínio côncavas, que se movimentam ao longo de uma mangueira de borracha com 19 mm de diâmetro pressurizada e esticada longitudinalmente sobre a amostra, obtendo assim uma pressão de contato, que simula uma pressão de pneus superior a 827 kPa (Figura 9). As medidas de profundidade da trilha de roda são feitas de forma automática sob a passagem da roda (FRITZEN, 2005).

No ensaio de resistência à fadiga do pavimento asfáltico a partir do simulador APA a mangueira de borracha utilizada no teste de deformação permanente é substituída por rodas de aço que operam diretamente nas amostras (Figura 10).

Figura 9 - Simulador de tráfego APA para ensaios de deformação permanente



Fonte: Fritzen (2005)

Figura 10 - Simulador de tráfego APA para ensaios de trincamento por fadiga



Fonte: Fritzen (2005)

Tabela 1 - Condição do ensaio de deformação permanente dos simuladores de tráfego LCPC e APA

Condições de ensaio	Simulador	
	LCPC	APA
Modo de compactação	Amassamento	Amassamento
Dimensões do corpo de prova (cm) (L: largura; C: comprimento; E: espessura; D: diâmetro)	L x C x E	L x C x E
	8 x 50 x 5 ou 10	12,5 x 30 x 7,5
		D x E 15 x 7,5
Volume de vazios (%)	3 - 12	4 – 7
Número de ciclos (2 passadas)	5.000 a 30.000	8.000
Carga de ensaio (N)	5000 ± 50	445
Condição da placa	Imerso em água	Seca ou imerso em água
Tipo de roda	Pneu	Mangueira inflada
Temperatura de ensaio (°C)	60	35 – 60
Limite admissível	5% de deformação	7,6mm

Fonte: Adaptado de Borges (2014)

2.2.2.3 Loaded Wheel Tester – LWT

O ensaio no equipamento LWT, originalmente, foi desenvolvido para utilização na metodologia dos ensaios de microrrevestimento asfáltico, a partir da NBR 14841, visando determinar o excesso de asfalto e adesão de areia correspondente para minimizar essa exsudação de material betuminoso em revestimentos desse tipo (VELOSO, 2019).

O LWT tem como princípio de funcionamento simular, em laboratório, o tráfego de veículos sobre o pavimento, para isso aplicam-se cargas em uma roda de borracha que se movimenta de forma cíclica sobre o corpo de prova (VELOSO, 2019).

Brazetti *et al.* (2013) destaca a simplicidade e o baixo custo do teste com o LWT quando comparado a outros simuladores de tráfego, assim como, sua praticidade no manuseio, pois trata-se de um equipamento portátil que pode ser transportado por duas pessoas e não apresenta dificuldades na sua operação. Além disso, o sistema do LWT é formado por ciclos controlados, garantindo, assim, um ensaio uniforme e preciso.

O simulador é composto de um motor elétrico rotativo que garante a movimentação do braço apoiado sobre a roda contendo a carga aplicada sobre o corpo de prova. O número de ciclos do braço rotativo é registrado por um contador eletrônico de passadas, sendo que cada ciclo representa duas passadas da roda de teste (BRAZETTI *et al.*, 2013).

Durante o ensaio a roda percorre a extensão do corpo de prova provocando uma deformação permanente em formato de trilha de roda sobre o material. A carga de ensaio pode ser aumentada, até o limite do equipamento, assim como a quantidade de ciclos de carregamento (VELOSO, 2019).

No Brasil alguns estudos já foram realizados com a utilização do LWT, como por exemplo, no Instituto Militar de Engenharia – IME, onde Brazetti *et al.* (2013) e Veloso (2019) utilizaram o equipamento presente em suas instalações (Figura 11).

Figura 11 - Equipamento LWT do IME



Fonte: Veloso (2019)

Segundo Veloso (2019) o equipamento do IME pode ser utilizado para ensaios de deformação em corpos-de-prova de solos, tratado com aditivos, solos com tratamento betuminoso ou, ainda, solos in natura.

Veloso (2019) realizou a medição do afundamento da trilha de roda gerada a partir da variação de ciclos para cada carregamento padrão até o limite de

acomodamento das deformações, ou ruptura do corpo de prova. Ele estimou que o aumento médio com taxa de 50 ciclos (100 passadas) para a carga, seria o ideal para se analisar a formação da trilha da roda, pois já era possível observar uma mudança sinuosa longitudinal no afundamento da trilha de roda.

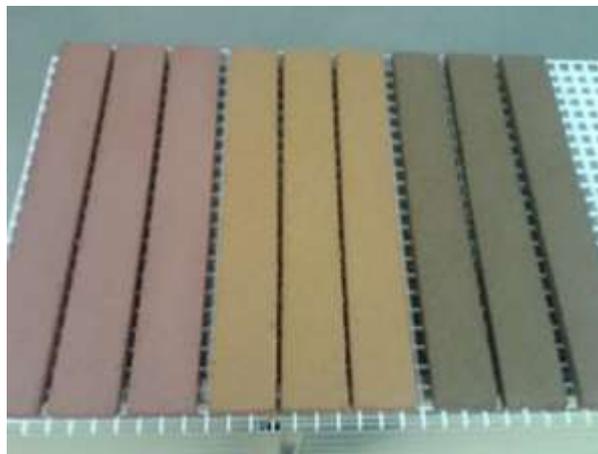
Para a realização do ensaio de afundamento de trilha de roda com o equipamento portátil LWT, Veloso (2019), após moldar os corpos-de-prova marcou os eixos e pontos de análise na superfície dos mesmos, com isso, prendeu-os à pista do simulador e previamente ao início do ensaio realizou, com o auxílio de um extensômetro com curso mínimo de 30 mm e precisão de 0,01 mm, uma leitura de referência nos pontos anteriormente destacados. Com isso, regulou o contador eletrônico para o número de passagens desejadas e ajustou as cargas de testes no parafuso de fixação. Após o fim do ensaio, realizou uma leitura final, nos pontos destacados, e a diferença entre as leituras resultará no afundamento da trilha de roda.

Brazetti *et al.* (2013) utilizou o equipamento com o objetivo de estudar o efeito de aditivos no desempenho das propriedades de um solo compactado e sujeita à ação de cargas cíclicas geradas pelo simulador LWT.

Malko *et al.* (2016) analisou, com o auxílio do simulador portátil LWT, o comportamento de três tipos de solos com três aditivos, patenteados e comercializados sob a forma líquida, em três dosagens, resultando em 30 misturas diferentes. Para isso ensaiou corpos-de-prova, no tamanho padrão de 380mm x 50mm x 10mm (Figura 12), até a ruptura, aumentando a carga a cada 1000 passadas.

Ao fim do estudo Malko *et al.* (2016) concluiu que a metodologia desenvolvida com o LWT para avaliação em solos é plenamente utilizável e recomendada.

Figura 12 - Corpos de prova para ensaio LWT



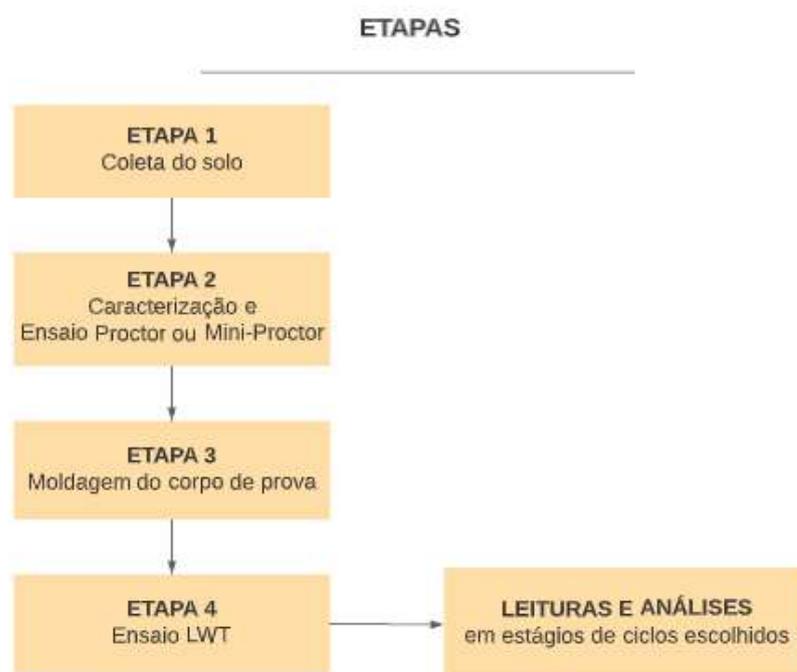
Fonte: Malko *et al.* (2016)

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo serão apresentados os materiais utilizados para o desenvolvimento do estudo com suas principais características relevantes. Posteriormente serão apresentados o processo de preparação da amostra e o ensaio que será realizado com o simulador de tráfego *Loaded Wheel Tester* – LWT.

O programa experimental de ensaios teve por objetivo principal investigar e identificar os procedimentos de ensaio com o simulador LWT, mais adequados para relacionar com o desempenho em campo. Para tal, foi desenvolvido um programa experimental dividido em etapas, como ilustra a Figura 13.

Figura 13 - Etapas do programa experimental



Fonte: Elaboração própria

3.1 Materiais Utilizados

3.1.1 Equipamento LWT e acessórios

O equipamento utilizado é basicamente o mesmo da norma NBR 14841, aplicada ao microrrevestimento, apresentado pela Figura 14. Porém neste estudo foram feitas modificações no ensaio original descrito pela norma, buscando uma melhor avaliação das características de deformação da camada de solo quando simulada a ação do tráfego.

Figura 14 – Equipamento LWT



Fonte: Elaboração própria

Foi confeccionado um molde buscando uma criação de uma camada de solo que pudesse ser comparada à superfície base do pavimento. Sendo assim, o molde foi confeccionado de chapas metálicas de 12,7 mm de espessura compondo uma caixa fechada na base com dimensões internas de 50,0 mm de altura, 52,0 mm de largura e 380,0 mm de comprimento, representando um volume de 988,00cm³.

Também foi confeccionado um espaçador de madeira, para auxiliar no processo de compactação estática, tendo um comportamento parecido com um êmbolo de compactação, comprimindo a amostra de solo no interior do molde e, com isso, resultando no corpo de prova para o ensaio.

O molde e os acessórios confeccionados estão ilustrados na Figura 15

Figura 15 – Molde e acessórios confeccionados

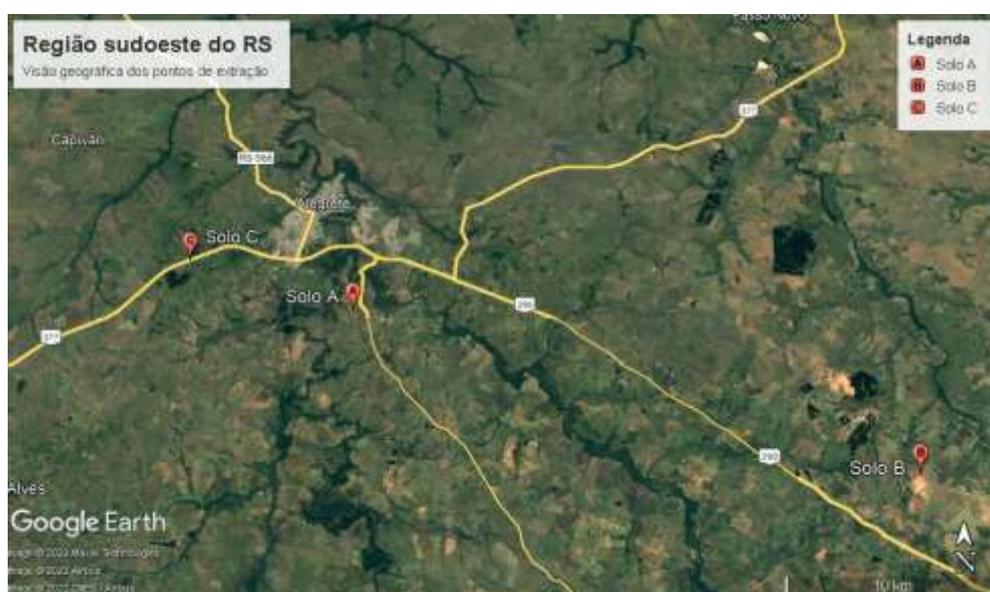


Fonte: Elaboração própria

3.1.2 Solos

Com o objetivo de testar o comportamento de solos de diferentes características, levando-se em consideração o aspecto tátil-visual, foram utilizados três solos provenientes de regiões distintas do município de Alegrete – RS, apresentadas na Figura 16. O solo A com uma característica medianamente arenosa, o solo B tendo característica predominantemente arenosa e o solo C com característica predominantemente argilosa.

Figura 16 - Localizações de extração do solos utilizados



Fonte: Google Earth

3.1.2.1 Solo A

A primeira amostra de solo é proveniente da jazida Alegretense, localizada no Subdistrito Catimbau na cidade de Alegrete – RS, com coordenadas 29°50'13.74" S e 55°46'27.46" W.

O solo é de origem residual, com coloração avermelhada e textura arenosa. Os ensaios de caracterização já foram realizados por Fernandes (2014) e estão resumidos na Tabela 2.

Tabela 2 - Características do solo A

Limite de Liquidez	30%
Limite de Plasticidade	22%
Índice de Plasticidade	8%
Distribuição Granulométrica	Argila: 42,37% Silte: 10,62% Areia Fina: 22,68% Areia Média: 23,75% Areia Grossa: 0,58%
Classificação pelo Sistema Unificado	CL (argila pouco plástica arenosa)
Classificação pelo Sistema Rodoviário	A-4

Fonte: Fernandes (2014)

3.1.2.2 Solo B

A segunda amostra de solo foi retirada do Subdistrito Durasnal na cidade de Alegrete-RS nas coordenadas 29°54'40.1" S e 55°29'05.8" W. Como pode ser visto na Figura 16, o ponto de extração está localizado nas proximidades de uma areal, por consequência disso, o solo B tem característica predominantemente arenosa.

Os resultados dos ensaios de caracterização estão resumidos na . A granulometria foi realizada de acordo com a NBR 7181 (2016). A massa específica dos grãos foi determinada de acordo com a NBR 6458 (2016).

Para a determinação dos limites de liquidez (LL) e plasticidade (LP), foram seguidos os procedimentos das normas NBR 6459 (2016) e NBR 7180 (2016). O solo não apresentou plasticidade, não sendo possível realizar os ensaios.

O solo foi classificado com ML (silte de baixa compressibilidade) e A-2-4 (areia siltosa ou argilosa) pelas classificações SUCS e TRB, respectivamente.

Tabela 3. A granulometria foi realizada de acordo com a NBR 7181 (2016). A massa específica dos grãos foi determinada de acordo com a NBR 6458 (2016).

Para a determinação dos limites de liquidez (LL) e plasticidade (LP), foram seguidos os procedimentos das normas NBR 6459 (2016) e NBR 7180 (2016). O solo não apresentou plasticidade, não sendo possível realizar os ensaios.

O solo foi classificado com ML (silte de baixa compressibilidade) e A-2-4 (areia siltosa ou argilosa) pelas classificações SUCS e TRB, respectivamente.

Tabela 3 - Características do solo B

Limite de Liquidez	Não plástico
Limite de Plasticidade	Não plástico
Índice de Plasticidade	Não plástico
Distribuição Granulométrica	Argila: 9,10% Silte: 6,40% Areia Fina: 81,70% Areia Média: 2,80% Areia Grossa: 0,00%
Classificação pelo Sistema Unificado	ML (silte de baixa compressibilidade)
Classificação pelo Sistema Rodoviário	A-2-4 (areia siltosa ou argilosa)

Fonte: Elaboração própria

3.1.2.3 Solo C

A terceira amostra de solo foi retirada próxima ao aeroporto da cidade de Alegrete/RS, estabelecida na BR-290, sentido Alegrete/RS – Uruguaiana/RS, nas coordenadas 29°48'44,19" S e 55°51'47.53" W. O solo é uma argila de tonalidade avermelhada, sem matéria orgânica visível. É importante destacar que este solo já foi utilizado pela Prefeitura de Alegrete na execução da base da pista de decolagem e

pouso do aeroporto, próximo ao local. Os ensaios de caracterização já foram realizados por Schneider Neto (2013) e estão resumidos na Tabela 4.

Tabela 4 - Características do solo C

Limite de Liquidez	34%
Limite de Plasticidade	20%
Índice de Plasticidade	14%
Distribuição Granulométrica	Argila: 42,70% Silte: 17,60% Areia Fina: 19,50% Areia Média: 6,20% Areia Grossa: 14%
Classificação pelo Sistema Unificado	CL (argila pouco plástica arenosa)
Classificação pelo Sistema Rodoviário	A-6 (solo tipicamente argiloso, plástico)

Fonte: Schneider Neto (2013)

3.2 Métodos Utilizados

Com o intuito de melhor verificar a utilização do simulador de tráfego LWT, o procedimento de ensaio foi dividido nas seguintes etapas:

Etapa 1: Ensaio Mini-Proctor;

Etapa 2: Ensaio LWT:

Etapa 2.1: Preparo da amostra;

Etapa 2.2: Compactação;

Etapa 2.3: Ruptura.

3.2.1 Ensaio Mini-Proctor

Visto que a caracterização dos solos utilizados foi realizada em estudos anteriores, a preparação dos solos para o ensaio LWT envolveu, principalmente, a determinação da umidade ótima, para a energia modificada de compactação, ou energia de 30 golpes (E_{30}), a partir do ensaio denominado Mini-Proctor, que inicialmente foi proposto pelo Engenheiro Carlos de Souza Pinto, em 1965, e, posteriormente, utilizado por Nogami e Villibor.

Villibor e Alves (2019) trazem na Figura 17 as características do equipamento utilizado e as energias de compactação comumente utilizadas para o ensaio Mini-Proctor, dentre elas a E_{30} utilizada neste estudo. A razão pela qual foi utilizada a energia de compactação modificada, ou de 30 golpes (E_{30}), se dá pela busca de um solo mais compacto e, por consequência, mais resistente aos ciclos do simulador LWT.

Figura 17 – Características do ensaio Mini-Proctor

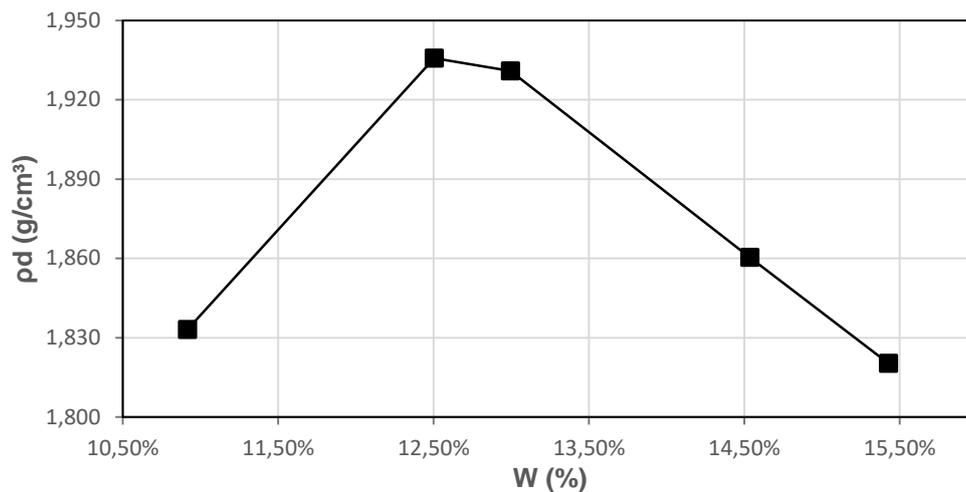
Características		Energias		
		Normal (EN)	Intermediária (EI)	30 golpes (E_{30})
Massa do Soquete (M)	(g)	2270	4540	2270
Altura de Queda (H)	(mm)	305	305	305
Número de Golpes por Camada (n)		10	12	30
Diâmetro do Molde Cilíndrico (D_{cp})	(mm)	50	50	50
Altura Média do CP (A_{cp})	(mm)	50	50	50
Volume do CP (V_{cp})	(cm^3)	98,17	98,17	98,17
Energia de Compactação (E_c)	($kgf.cm/cm^3$)	7,05	16,93	21,23

Fonte: Villibor e Alves (2019)

Previamente ao ensaio, secou-se o material ao ar para destorroá-lo e, em seguida, adicionou-se uma determinada quantidade de água ao material e homogeneizou-se. Então, foi colocada uma porção da amostra dentro do molde cilíndrico e aplicou-se os 30 golpes com o soquete, sendo 15 em cada lado da amostra. A porção do solo compactado deve ter aproximadamente 50 mm de altura, como especificada por Villibor e Alves (2019). Pesou-se o molde com o solo, obtendo-se o peso total do corpo de prova, com isso, juntamente com o volume, calculou-se a massa específica úmida. Em seguida, colocou-se a amostra em uma estufa por 24 horas para se obter a umidade. Com estes dois índices físicos, calcula-se a massa específica seca.

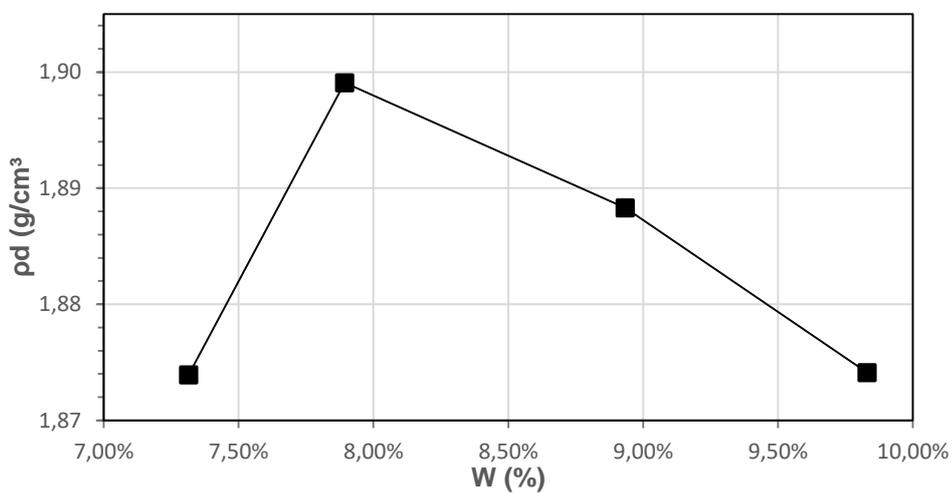
Repetiu-se o procedimento para os três solos estudados com diferentes quantidades de água, obtendo-se novos valores de umidade (W) e massa específica seca (ρ_d), até que se encontre a densidade seca máxima. Com todos os pontos obtidos, plotou-se os gráficos de massa específica seca versus umidade, e com eles, desenhou-se as curvas de compactação, como ilustram a Figura 18, Figura 19, Figura 20 e Figura 21.

Figura 18 - Curva de compactação do solo A



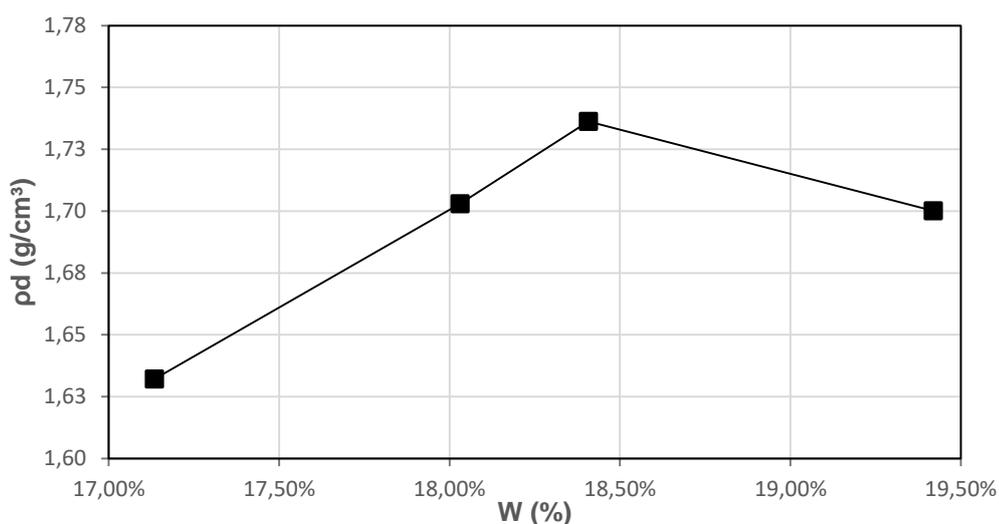
Fonte: Elaboração própria

Figura 19 - Curva de compactação do solo B



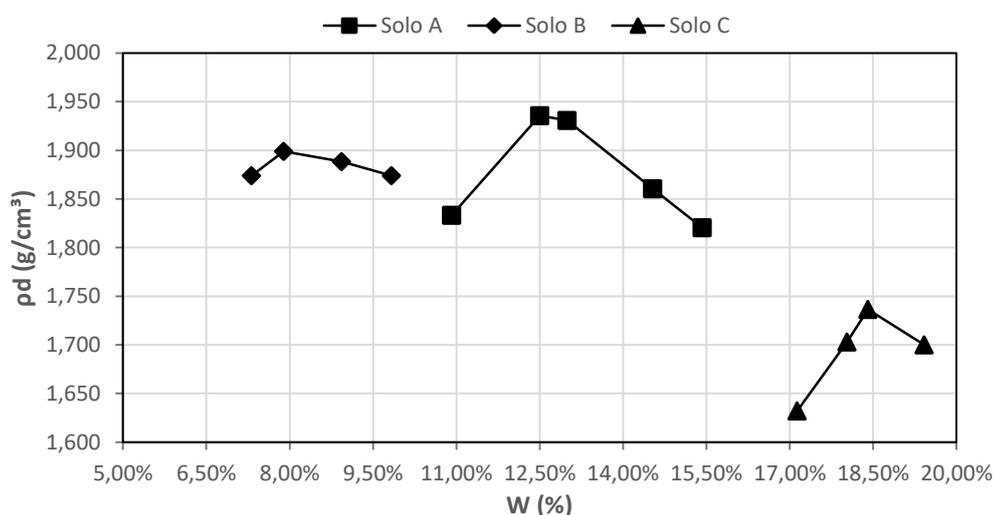
Fonte: Elaboração própria

Figura 20 - Curva de compactação do solo C



Fonte: Elaboração própria

Figura 21 - Curvas de compactação dos solos estudados



Fonte: Elaboração própria

3.2.2 Ensaio LWT

A metodologia empregada neste trabalho para utilização do simulador de tráfego LWT é uma adaptação da NBR 14841, usualmente empregada para o estudo de microrrevestimento, e da metodologia desenvolvida por Duque Neto (2004).

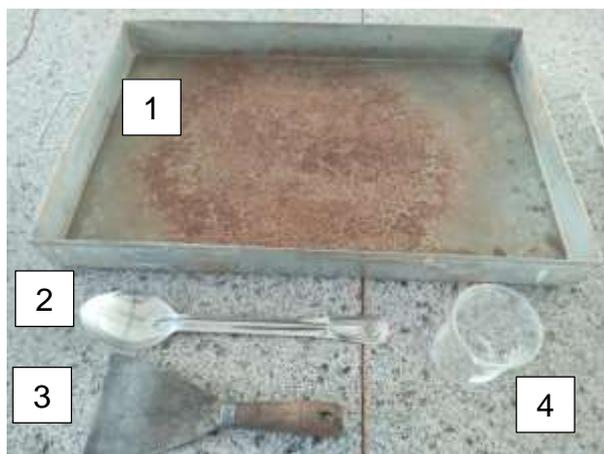
O ensaio consiste basicamente em submeter-se uma amostra de solo à ação do movimento de uma roda de borracha sob uma carga e de número de ciclos fixados.

3.2.2.1 Preparo da amostra

Todos os corpos de prova foram executados na umidade ótima dos solos para energia modificada de compactação, respectivamente obedecendo aos pesos específicos encontrados nos ensaios do Mini-Proctor. Para a preparação da amostra na umidade ótima, foram utilizados os materiais e ferramentas apresentados na Figura 22.

1. Bandeja de alumínio;
2. Colher;
3. Espátula;
4. Becker.

Figura 22 – Materiais e ferramentas utilizados na homogeneização da amostra



Fonte: Elaboração própria

Após a coleta dos solos em campo, o solo foi destorroado e passado na peneira 2mm. Em seguida, a partir dos valores de $W_{ótimo}$ e $\rho_{d\text{máx}}$ encontrados com o ensaio Mini-Proctor e utilizando-se da colher e da bandeja de alumínio, separou-se a quantidade de solo necessária para moldagem de um corpo de prova, adicionando a água necessária com o becker (Figura 23a) e homogeneizando na umidade ótima com o auxílio da colher e espátula (Figura 23b).

Figura 23 – Processo de preparo da amostra



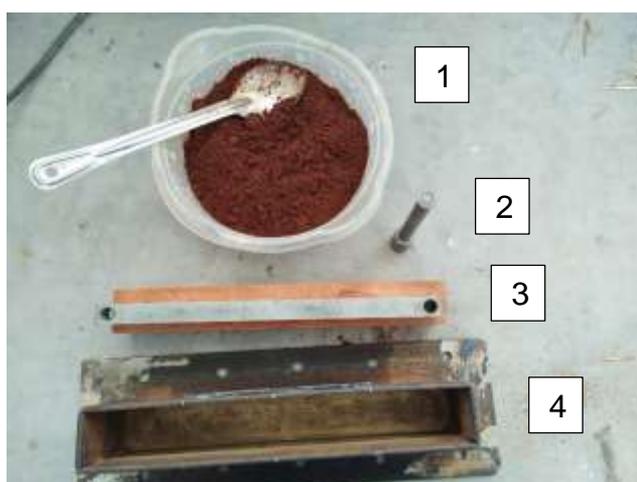
Fonte: Elaboração própria

3.2.2.2 Compactação

Após separar os solos e prepará-los na umidade ótima, realizou-se a compactação dentro do molde, para isso foram utilizados os materiais e ferramentas apresentados na Figura 24.

1. Solo na umidade ótima;
2. Soquete de argamassa;
3. Espaçadores de madeira e alumínio para compactação;
4. Molde com base e colar

Figura 24 – Materiais e ferramentas utilizados na compactação da amostra

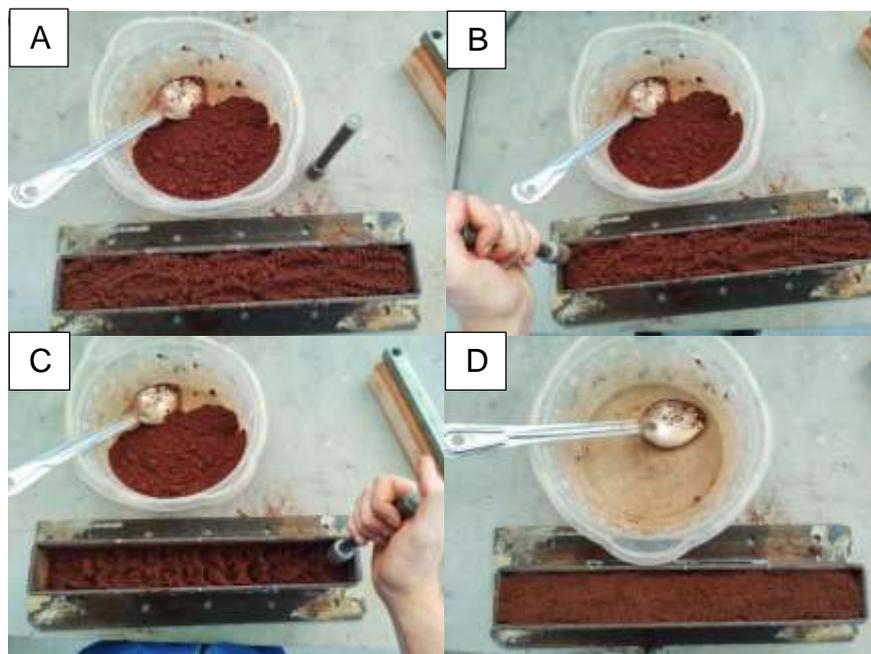


Fonte: Elaboração própria

Com o solo homogeneizado na umidade ótima e pesado no volume do molde, montou-se o molde com colar e base. Adicionou-se dois terços do solo pesado, chegando ao topo do colar (Figura 25A). Então, utiliza-se o soquete de argamassa (Figura 25B), aplicando 30 golpes distribuídos de maneira uniforme, simulando a

condição do rolo pé-de-carneiro em campo (Figura 24C). Finaliza-se a compactação manual, com o espalhamento da última camada, deixando-se a superfície lisa (Figura 23D).

Figura 25 – Compactação manual do corpo de prova

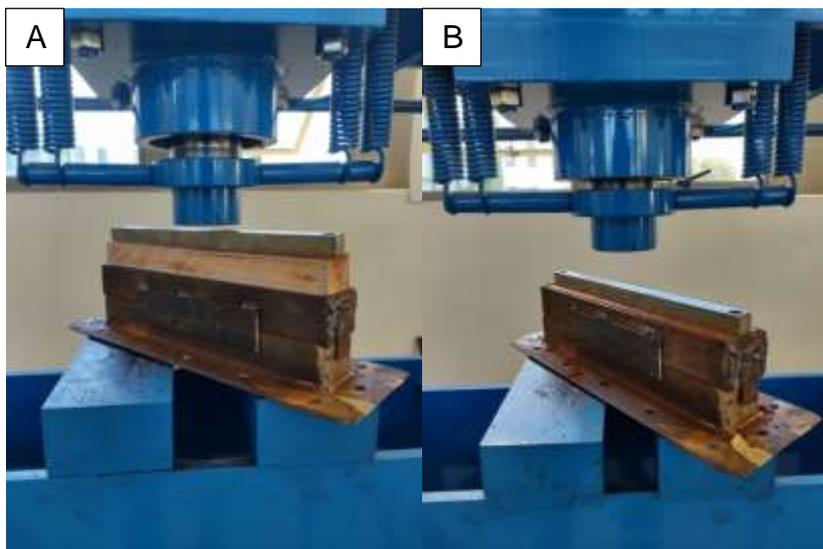


Fonte: Elaboração própria

Após a compactação manual, levou-se o molde com solo para uma prensa hidráulica, disponibilizada pelo LEMAC - Laboratório de Estruturas e Materiais de Construção da Universidade Federal do Pampa, Campus Alegrete.

Na prensa de compactação, colocou-se os dois espaçadores sobre o molde com o solo a ser compactado (Figura 26A). Repara-se que fica um espaço entre o espaçador de madeira e a caixa. Ao se aplicar a carga de compactação, esse espaço irá diminuir, e quando o mesmo sumir a compactação está completa (Figura 26B).

Figura 26 – Compactação do corpo de prova com a prensa



Fonte: Elaboração própria

3.2.2.3 Ruptura

Por fim, a última etapa consiste na ruptura do corpo de prova. Nesta etapa serão utilizados os seguintes equipamentos e ferramentas:

1. Solo compactado no molde;
2. Chave L Hexagonal (Allen);
3. Parafusos para fixação;
4. Régua e Paquímetro para medição do afundamento.
5. Simulador de tráfego *Loaded Wheel Tester*

Figura 27 – Materiais e ferramentas utilizados na ruptura da amostra



Fonte: Elaboração própria

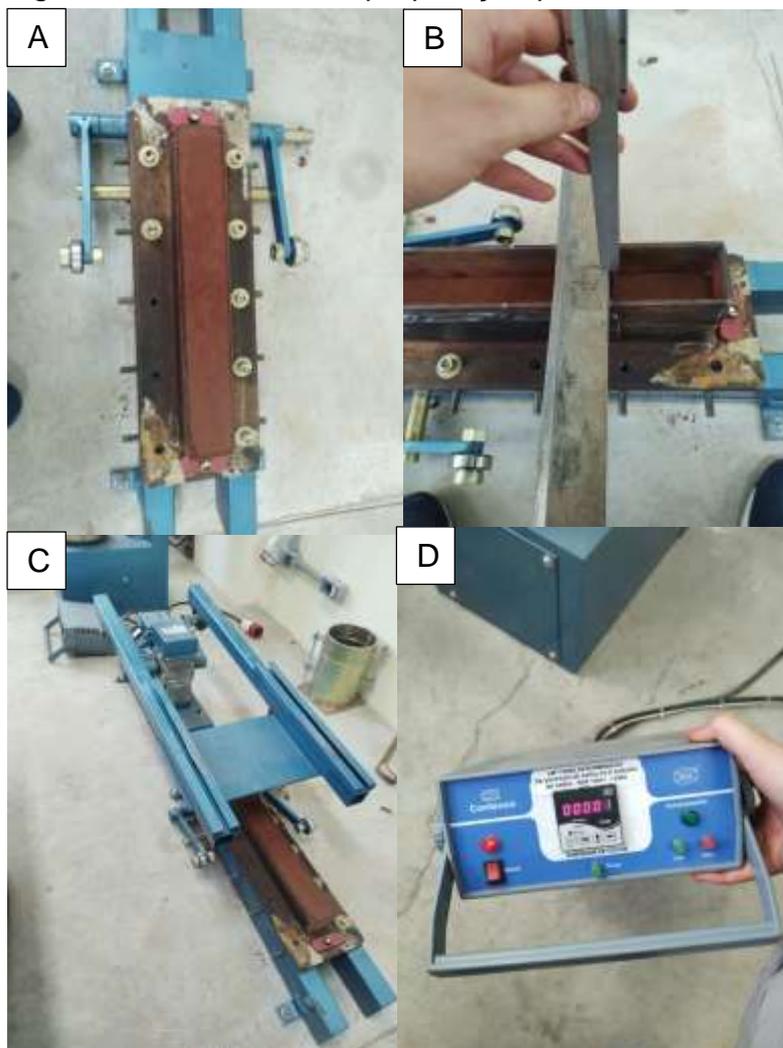
Para a execução do ensaio, ergue-se o braço de alavanca permitindo acesso à pista de teste. O corpo de prova é colocado na pista de teste e, em seguida, prende-se com os parafusos para garantir que o molde fique no lugar (Figura 28A).

Com o auxílio da régua e paquímetro, apoiados no colar do molde, fez-se a leitura zero do afundamento em três pontos localizados no início, meio e fim da pista de teste (Figura 28B). Apoia-se o braço de alavanca encostando a roda-teste no corpo de prova para iniciar o ensaio (Figura 28C). Conecta-se o simulador na tomada e o contador é configurado para o número de ciclos desejado (Figura 28D).

Ligou-se o aparelho e desligou-se ao completar os estágios de 1, 2, 5, 10, 20 e 30 ciclos, verificando o afundamento com o auxílio do paquímetro de profundidade, em três pontos ao longo da pista de teste, e observando possíveis defeitos ocorridos durante a passagem dos ciclos. As observações visuais caracterizam-se pela verificação da existência e severidade de defeitos como surgimento de corrugações e arrancamento de placas e perda de material.

A determinação dos afundamentos em cada estágio se dá pela diferença da leitura final e inicial. Ao fim do ensaio, traça-se um gráfico afundamento x ciclos para melhor verificação do desempenho.

Figura 28 – Processo de preparação para o ensaio LWT



Fonte: Elaboração própria

Como esta é uma proposta de metodologia aspirante à utilização do equipamento LWT, em solos para vias não pavimentadas, e com o objetivo de auxiliar estudos posteriores, a Tabela 5 apresenta um modelo de tabela criada para registrar as informações durante a realização do ensaio.

Tabela 5 - Modelo de tabela de ensaio

Operador:			Identificação do solo:									
Data:			Umidade ótima:									
Carga:			Quantidade de solo no molde:									
Ciclos	Afundamento (mm)			Observações visuais								
				Corrugações			Desplacamento			Perda de solo		
	Ponto A	Ponto B	Ponto C	Baixa	Média	Alta	Baixa	Média	Alta	Baixa	Média	Alta

Fonte: Elaboração própria

4 RESULTADOS

Ao se iniciar esta pesquisa, algumas dificuldades de adaptação do equipamento e do ensaio de desgaste de microrrevestimento asfáltico para o solo foram:

- A forma de compactação do solo a ser utilizada;
- A dureza da borracha utilizada no contato entre a amostra e o equipamento;
- A carga aplicada pelo equipamento;
- O número de ciclos aplicado no LWT e quando seriam medidos os afundamentos;
- A forma de medição do afundamento da trilha de roda;

Os primeiros ensaios com o simulador LWT realizados nesta pesquisa foram desastrosos devido à baixa compactação dos solos no molde, a rigidez da roda padrão do equipamento e a carga aplicada pelo equipamento. O primeiro problema foi resolvido ao se realizar o ensaio Mini-Proctor com a energia modificada de compactação. Para resolver o segundo problema, foi necessário a adição de uma borracha de câmara de pneu na roda do equipamento para diminuir sua rigidez e se aproximar das condições de um pneu, como ilustra a Figura 29.

Figura 29 – Roda com adição da borracha



Fonte: Elaboração própria

No terceiro problema averiguou-se que a pressão de contato a que o solo estava sendo submetido pela roda do equipamento era de, aproximadamente, 36,43 kgf/cm² sendo que a pressão de contato do Eixo Padrão Rodoviário, utilizado para dimensionamento de pavimentos, é estimada em 5,6 kgf/cm², ou seja, a pressão de

contato estava 6,5 vezes maior que o Eixo Padrão Rodoviário. Com o intuito de diminuir essa pressão de contato, retirou-se a caixa acoplada ao equipamento, reduzindo a carga aplicada, porém, mesmo com essa subtração a pressão de contato roda-solo ainda permaneceu em 13,56 kgf/cm², 2,5 vezes maior que o Eixo Padrão Rodoviário. A Figura 30 ilustra a retirada da caixa acoplada.

Figura 30 – Retirada da caixa acoplada ao equipamento.



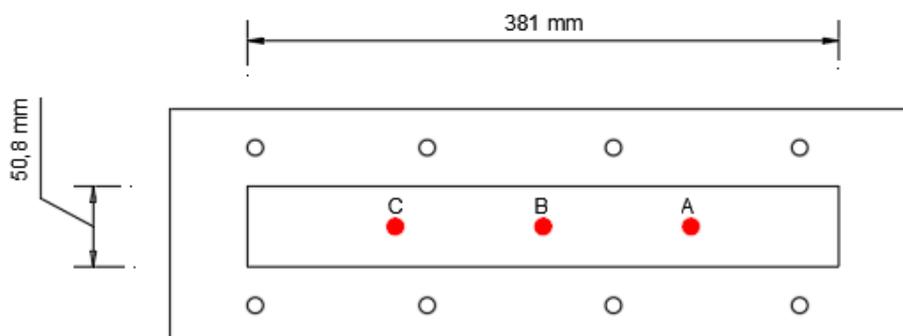
Fonte: Elaboração própria

Como não havia nenhuma outra forma de diminuir a carga aplicada pelo equipamento na roda de teste, outra solução seria aumentar a área de contato roda-solo. Entretanto, para isso ser feito seria necessário a troca da roda de teste por uma de maior área, o que resultaria em um aumento das dimensões do molde, que já havia sido confeccionado para as dimensões da roda de teste padrão. Portanto, devido à falta de tempo hábil para se realizar as mudanças necessárias, os ensaios foram realizados com uma pressão de contato superior ao Eixo Padrão Rodoviário.

Devido à alta pressão de contato a que o solo estava sendo submetida, o número de ciclos realizados por ensaio teve que se adequar para não danificar o equipamento. Para as medições de afundamento, procurou-se realizá-las em estágios que fosse possível acompanhar a progressão do afundamento ao longo dos ciclos.

Após a realização de ensaios-teste, percebeu-se a necessidade de realizar a medição do afundamento da trilha de roda em três locais ao longo da pista de teste. Com isso, a pista de teste foi dividida em três pontos: A – Início da pista; B – Metade da pista; e C – Final da pista. Representados graficamente na Figura 31.

Figura 31 – Representação dos pontos de análise do afundamento



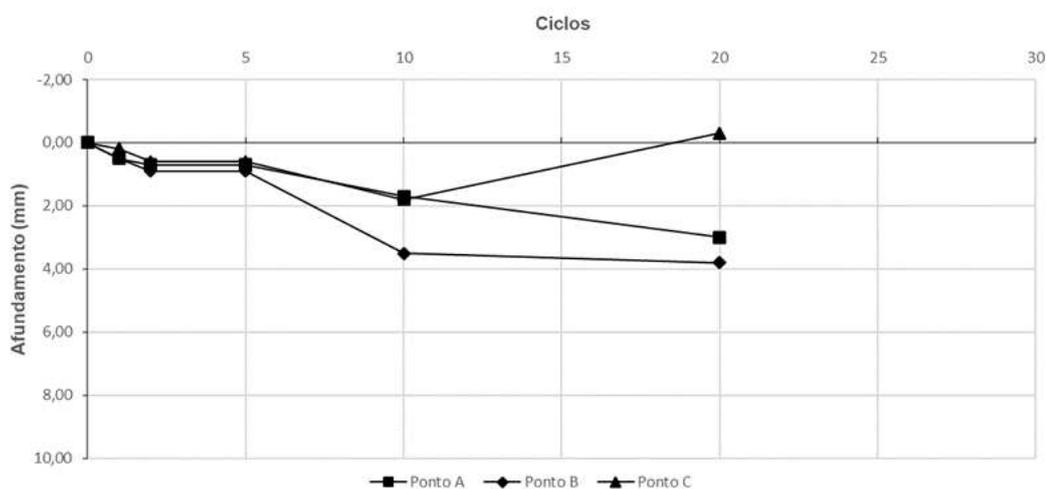
Fonte: Elaboração própria

Os ensaios com o simulador LWT foram realizados uma vez em cada um dos 3 solos estudados.

O solo A comportou-se satisfatoriamente até o ciclo 10, porém quando se aproximou dos 20 ciclos apresentou corrugações grandes e deslocamento excessivo do solo. Os resultados do afundamento ao longo dos ciclos estão dispostos no Anexo A na Tabela 6 e o gráfico de afundamento x ciclos na

Figura 32.

Figura 32 - Gráfico Afundamento x Ciclos do solo A



Fonte: Elaboração própria

Verifica-se que, pela diferença das leituras entre os pontos, no ciclo 10 apareceram corrugações devido a contínua passagem da roda. Nota-se também, que o ponto B está situado no ponto baixo de uma corrugação com ilustra a Figura 33.

Figura 33 – Solo A após a passagem de 10 ciclos



Fonte: Elaboração própria

Ao chegar nos 20 ciclos optou-se por encerrar o ensaio devido a profundidade das corrugações e ao deslocamento do solo como ilustra a Figura 34.

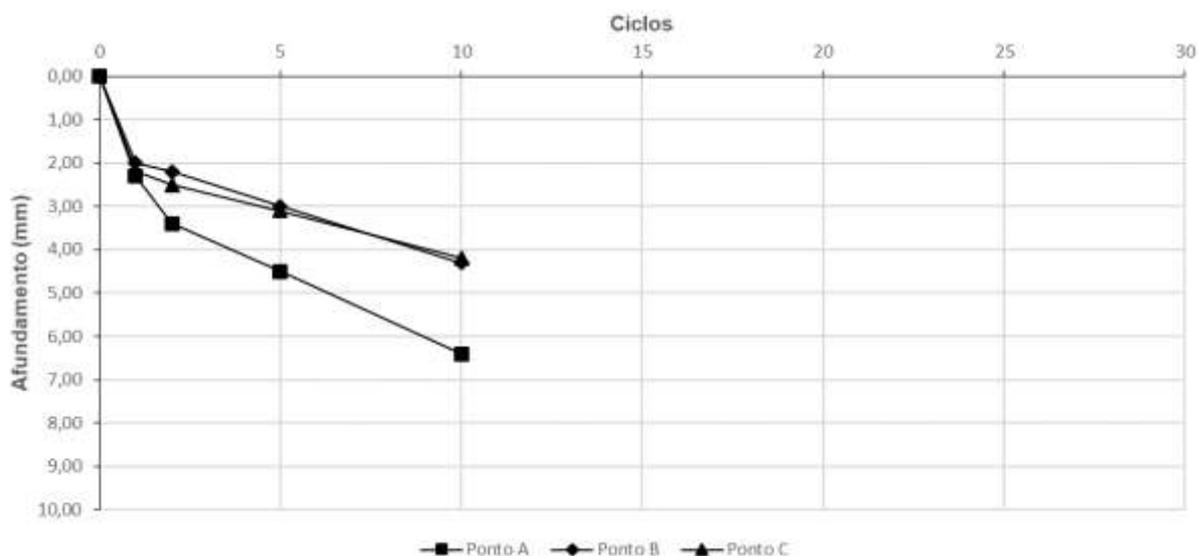
Figura 34 – Solo A após a passagem de 20 ciclos



Fonte: Elaboração própria

O solo B não se comportou bem aos ciclos realizados pelo simulador LWT, apresentou precocemente um alto afundamento e perda de material. Os resultados estão apresentados no Anexo A na Tabela 7 e o gráfico do afundamento x ciclos na Figura 35.

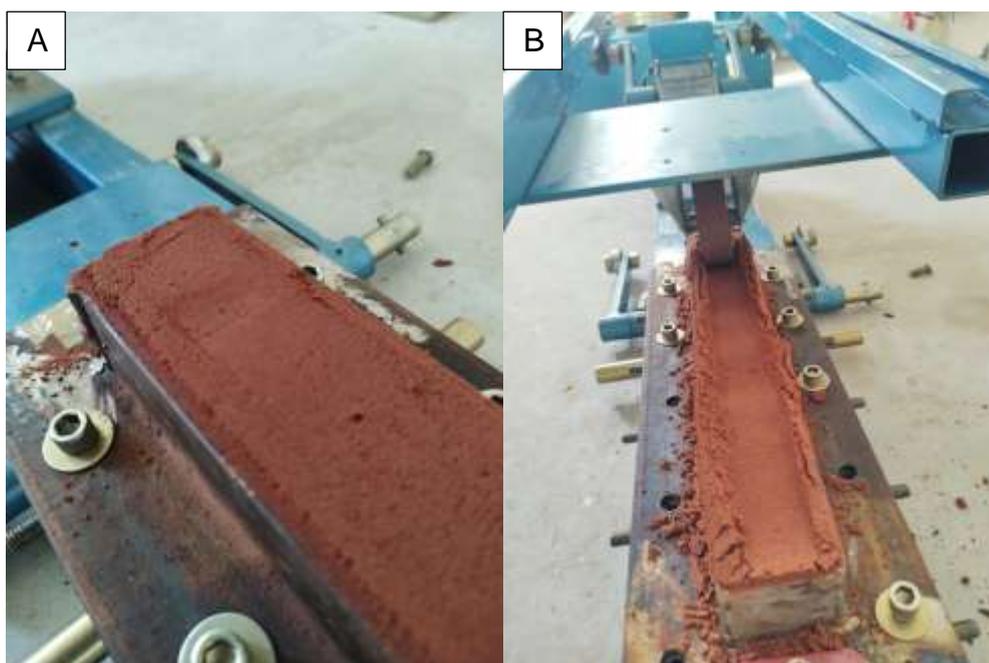
Figura 35 - Gráfico Afundamento x Ciclos do solo B



Fonte: Elaboração própria

Nota-se que devido à alta carga aplicada pelo equipamento, o solo B apresentou afundamento superior a 2,0mm logo no primeiro ciclo. A diferença do ponto A para os outros pode ser resultado do afundamento inicial que o corpo de prova apresentou já no posicionamento da roda sobre a pista de teste como ilustra a Figura 36A. Optou-se por não dar seguimento no ensaio devido a profundidade do afundamento e à perda de material ocorrida precocemente nos 10 ciclos (Figura 36B).

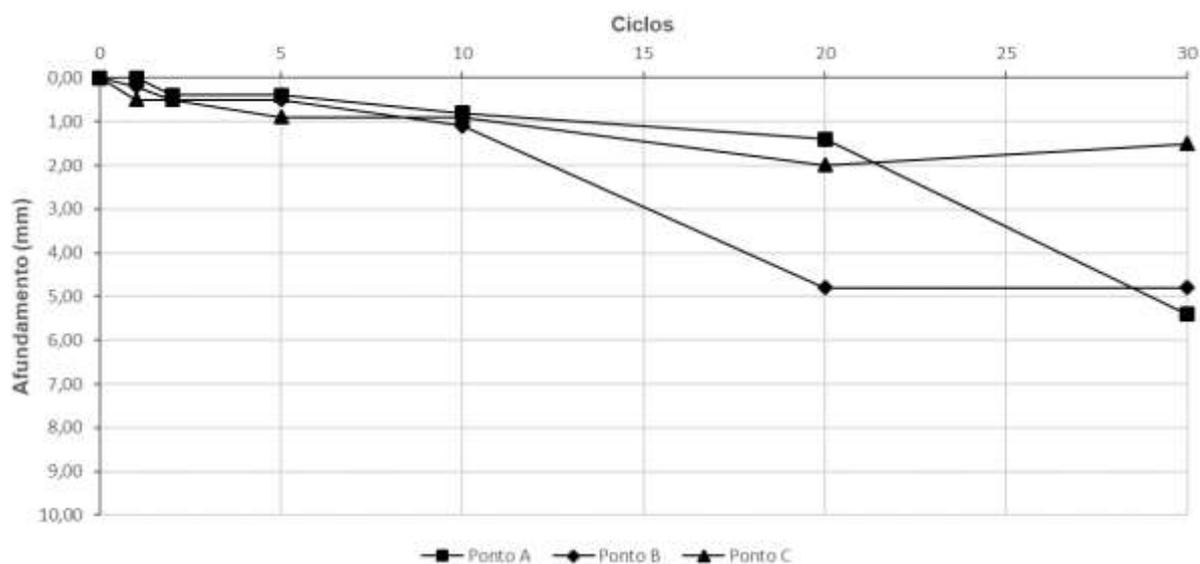
Figura 36 – Ensaio com Solo B. A. Afundamento inicial; B. Aos 10 ciclos



Fonte: Elaboração própria

O solo C apresentou resultados muito satisfatórios, conseguindo alcançar o ciclo 30 com afundamentos inferiores a 6mm. Os resultados estão apresentados no Anexo A na Tabela 8 e o gráfico de afundamento x ciclos na Figura 37.

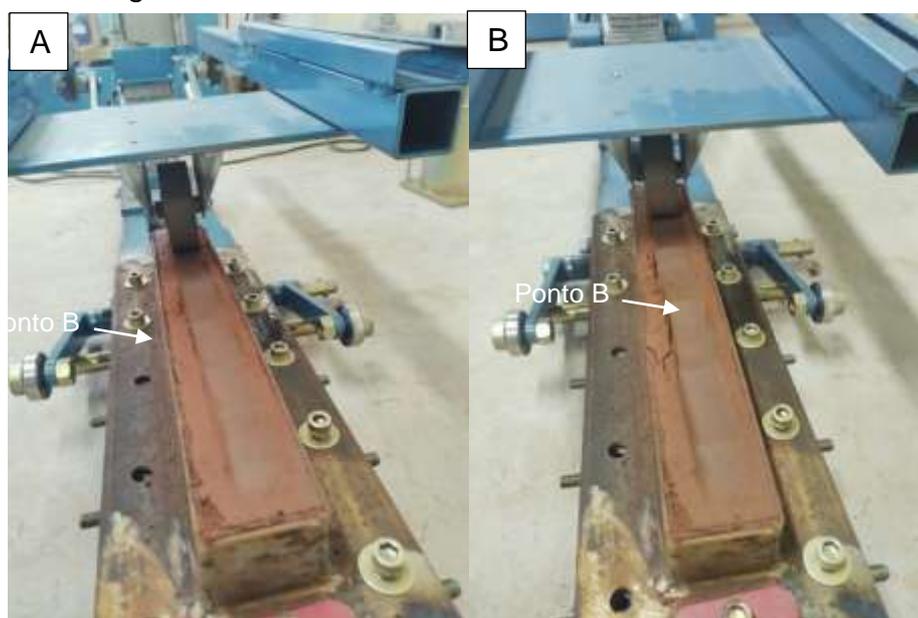
Figura 37 - Gráfico Afundamento x Ciclos do solo C



Fonte: Elaboração própria

Verifica-se que ao chegar ao ciclo 20 surgiu uma corrugação profunda no ponto B, assim como ocorreu no ponto A ao se aproximar dos 30 ciclos. Com isso, optou-se por encerrar o ensaio devido a diferença de altura entre o ponto alto da corrugação (Ponto C) e o ponto baixo (Pontos A e B). A Figura 38A e Figura 38B mostram o corpo de prova nos ciclos 20 e 30, respectivamente.

Figura 38 – Ensaio com solo C. A. 20 ciclos. B. 30 ciclos



Fonte: Elaboração própria

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho possuía como objetivo principal, conforme citado no capítulo 1, avaliar o uso do simulador de tráfego LWT na análise da previsão de comportamento de solos usados como revestimento de vias não pavimentadas. Além disso, os objetivos específicos estipulados foram definir uma metodologia de ensaio para o LWT para a análise de solos, verificar as dimensões ideais para o corpo de prova e determinar o método de compactação, a carga de ensaio e a quantidade ideal de ciclos para se realizar a análise em solos.

Desse modo, ao fim dos procedimentos experimentais e a partir da análise da metodologia aplicada, pode-se concluir que:

- a) No que tange o método de compactação, a prensa hidráulica, juntamente com os espaçadores, se mostrou uma ótima forma de realizar a compactação dentro do molde. A utilização da energia modificada na determinação da umidade ótima dos solos auxiliou na melhora da compactação.
- b) A carga que o equipamento LWT aplica sobre a roda de teste, originalmente instalada, é consideravelmente alta para a área de contato existente entre a roda e o solo. Resultando em uma pressão de contato superior ao Eixo Padrão Rodoviário.
- c) No que se refere às dimensões do corpo de prova, o comprimento é fixo em 381mm para abranger a pista de teste do equipamento. A altura de 50mm se mostrou eficiente, considerando os valores de afundamento alcançados. A largura do corpo de prova deve ser aumentada, juntamente com a roda de teste, buscando atender a pressão de contato do Eixo Padrão Rodoviário.
- d) Os solos estudados apresentaram resultados dentro do esperado para suas características, considerando a alta carga aplicada. O solo C destacou-se com a maior quantidade de ciclos suportados, algo previsível por ser um solo utilizado como base da pista de um aeroporto. O solo A se comportou bem, mesmo sendo um solo classificado como A-4, considerado de regular a ruim para utilização como subleito, pelo sistema de classificação rodoviária. O solo B por se tratar de um solo de características predominantemente arenosas se comportou da maneira esperada, suportando um baixo número de ciclos.

Por fim, considera-se que os ensaios com o simulador de tráfego LWT adaptados para utilização em solos, mostrou-se promissor para avaliar a durabilidade do solo à ação cíclica de carga. Vale ressaltar que algumas mudanças ainda são necessárias para se alcançar um ensaio que represente o comportamento do solo em campo.

5.1 Sugestões para trabalhos futuros

- a) Substituir a roda de teste original do equipamento por uma que aumente a área de contato com o corpo de prova, buscando assim uma pressão de contato roda-solo menor.
- b) Realizar a mistura do solo com aditivos a fim de estabilizá-lo e, com isso, aumentar a quantidade ciclos e carga suportada.
- c) Analisar a relação dos resultados do ensaio LWT com o comportamento do solo em campo, realizando um estudo de caso com solos que foram empregados em rodovias não pavimentada.

REFERÊNCIAS

ALBANO, J. F. **Efeitos da Variação da Carga por Eixo, Pressão de Inflação e Tipo de Pneu na Resposta Elástica de um Pavimento**. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 1998.

ANUÁRIO DO CONSELHO NACIONAL DO TRANSPORTE (2018). **Evolução da malha rodoviária total por ano segundo a situação física - 2001 - 2018**. Disponível em: <<https://anuariodotransporte.cnt.org.br/2021/Rodoviario/1-3-1-1-1-/Malha-rodoviária-total>>. Acesso em 29 de dezembro de 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6459: Solo-Determinação do limite de liquidez**. Rio de Janeiro, 2016.

_____. **NBR 7180: Solo - Determinação do limite de plasticidade**. Rio de Janeiro, 2016.

_____. **NBR 7181: Solo: Análise granulométrica**. Rio de Janeiro, 2016.

_____. **NBR 14841: Microrrevestimentos a frio – Determinação de excesso de asfalto e adesão de areia pela máquina LWT**. Rio de Janeiro, 2015, 5p.

BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. **Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros**. Rio de Janeiro: PETROBRÁS/ABEDA, 2010.

BRAZETTI, R.; CASAGRANDE, M. D. T.; SILVA, B. A. E. **Estudo Abordando uma Metodologia para Avaliar Aditivos Patenteados para Estabilização de Solos** In: 42ª RAPv Reunião Anual de Pavimentação, Gramado, RS. 2013.

CRUZ, A. V. da. **Estradas Vicinais: Abordagem Pedológica, Geotécnica, Geométrica e de Serventia de Dois Trechos Rodoviários não Pavimentados no Campus da UFV – MG.** Tese de Mestrado – Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais, 2005.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 228/94:** Solos - compactação em equipamento miniatura.

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (2005). **Manual de Conservação Rodoviária.** Publicação IPR – 710, DNER, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 564 p.

DUQUE NETO, F. S. **Proposição de Metodologia para Escolha de Solo e Dosagem de Antipó com Emulsão de Xisto.** Tese de Doutorado – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2004.

EATON, R. A.; GERARD, S.; DATTILO, R. S. **A Method for Rating Unsurfaced Roads.** *In:* University of Alaska Fairbanks (org.). The Northern Engineer. 1989. v. 21, p. 30 - 40.

FERNANDES, W.D. **Verificação da Resistência ao Cisalhamento e Estabilidade de Taludes de um Solo Natural e Melhorado com Cimento, Cal e Cinza de Casca de Arroz.** Alegrete, 2014. 117 f. Dissertação (Bacharelado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Pampa

FRITZEN, M. A. **Avaliação de Soluções de Reforço de Pavimento Asfáltico com Simulador de Tráfego na Rodovia Rio Teresópolis.** Dissertação de Mestrado – Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro, RJ, 2005.

GONÇALVES, F. J. P. **Estudo do Desenvolvimento de Pavimentos Flexíveis a Partir de Instrumentação e Ensaios Acelerados.** Tese de Doutorado – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2002.

GONDIM, L. M. **Estudo Experimental de Misturas Solo-Emulsão Aplicado às Rodovias Agropólo do baixo Jaguaribe/estado do Ceará.** Dissertação de Mestrado – Universidade Federal do Ceará, 2008.

MALCO, J. A. C.; ÖSTERREICHER-CUNHA, P.; CASAGRANDE, M. D. T. **Análise Microbiológica e Mecânica de Solos Melhorados com Enzimas Utilizando Equipamento LWT.** *In:* Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, XVIII., Belo Horizonte, MG, 2016.

NÚÑEZ, W. P. **Estabilização Físico-química de um Solo Residual de Arenito Botucatu, Visando seu Emprego na Pavimentação.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 1991.

NÚÑEZ, W. P. **Análise Experimental de Pavimentos Rodoviários Delgados com Basaltos Alterados.** Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 1997.

ODA, Sandra. **Caracterização de uma Rede Municipal de Estradas não-Pavimentadas.** Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. 1995

OLIVEIRA, M. J. G. **Hierarquização para orientar a manutenção de rodovias não pavimentadas.** Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, 2005.

PITTELKOW, G. C. **Erosão em Estrada de Terra no Campo de Instrução de Santa Maria (CISM).** Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2013.

RODRIGUES, N. C. M. **Reforço de Estradas não Pavimentadas.** Dissertação de Mestrado – Universidade de Coimbra, Coimbra, 2015.

SANTOS, A. R. dos.; PASTORE, E. L.; AUGUSTO JUNIOR, F.; CUNHA, M. A. **Estradas vicinais de terra: manual técnico para conservação e recuperação.** 3. ed. rev. -- São Paulo: ABGE - Associação Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental: IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, 2019

SCHNEIDER NETO, R. G. **Estabilização de Solos Finos Utilizando Cal Hidratada**. Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Civil. Universidade Federal do Pampa, Alegrete, RS, 2013.

SILVA, P. D. E. A. da. **Estudo do Reforço de Concreto de Cimento Portland (Whitetopping) na Pista Circular Experimental do Instituto de Pesquisas Rodoviárias**. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2001.

VALE, A. F. **Método de Uso de Simuladores de Tráfego Linear Móvel de Pista para a Determinação de Comportamento e Previsão de Desempenho de Pavimentos Asfálticos**. Tese de Doutorado – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 2008.

VELOSO, J. F. **Avaliação do Comportamento Mecânico de Solos do Sudoeste Paraense para Pavimentação Rodoviária**. Dissertação de Mestrado - Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, RJ, 2019.

VICTORINO, D. R. **Análise de Desempenho de um Pavimento Flexível da Rodovia BR-290/RS Solicitado por um Simulador de Tráfego Móvel**. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2008.

VIERA, C. S. **Desempenho de um pavimento solicitado por simulador de tráfego**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2002.

VILLIBOR, Douglas F.; ALVES, Driely M. L. **Pavimentação de Baixo Custo para Regiões Tropicais: Projeto e Construção – Novas Considerações**. Florianópolis: Tribo da Ilha, 2019.

ANEXO A – Resultados dos ensaios LWT nos solos estudados

Tabela 6 - Resultados do Ensaio LWT com solo A

Operador: Ricardo			Identificação do solo: Solo A									
Data: 19/12/2022			Umidade ótima: 13,00%									
Carga: 8,67 kg			Quantidade de solo no molde: 2155,82 g									
Ciclos	Afundamento (mm)			Observações visuais								
				Corrugações			Desplacamento			Perda de solo		
	Ponto A	Ponto B	Ponto C	Baixa	Média	Alta	Baixa	Média	Alta	Baixa	Média	Alta
0	0	0	0									
1	0,5	0,5	0,2									
2	0,7	0,9	0,6									
5	0,7	0,9	0,6									
10	1,7	3,5	1,8		x							
20	3	3,8	-0,3			x			x			
30	-	-	-									

Fonte: Elaboração própria

Tabela 7 - Resultados do Ensaio LWT com solo B

Operador: Ricardo			Identificação do solo: Solo B									
Data: 19/12/2022			Umidade ótima: 8,50%									
Carga: 8,67 kg			Quantidade de solo no molde: 2033,3 g									
Ciclos	Afundamento (mm)			Observações visuais								
				Corrugações			Desplacamento			Perda de solo		
	Ponto A	Ponto B	Ponto C	Baixa	Média	Alta	Baixa	Média	Alta	Baixa	Média	Alta
0	0	0	0									
1	2,3	2	2,2							x		
2	3,4	2,2	2,5								x	
5	4,5	3	3,1									x
10	6,4	4,3	4,2									x
20	-	-	-									
30	-	-	-									

Fonte: Elaboração própria

Tabela 8 - Resultados do Ensaio LWT com solo C

Operador: Ricardo			Identificação do solo: Solo C									
Data: 20/12/2022			Umidade ótima: 18,50%									
Carga: 8,67 kg			Quantidade de solo no molde: 2031,33 g									
Ciclos	Afundamento (mm)			Observações visuais								
				Corrugações			Desplacamento			Perda de solo		
	Ponto A	Ponto B	Ponto C	Baixa	Média	Alta	Baixa	Média	Alta	Baixa	Média	Alta
0	0	0	0									
1	0	0,2	0,5									
2	0,4	0,5	0,5									
5	0,4	0,5	0,9									
10	0,8	1,1	0,9	x								
20	1,4	4,8	2		x		x					
30	5,4	4,8	1,5			x			x			

Fonte: Elaboração própria