ANDRÉ MATOSO RESENDE

Aplicação de blocos de EPS em estruturas de pavimento rodoviário: aterro experimental em verdadeira grandeza e modelagem numérica 3D

SÃO PAULO – SP
2022 (Edição Original)
2022 (Versão Corrigida)

ANDRÉ MATOSO RESENDE

Aplicação de blocos de EPS em estruturas de pavimento rodoviário: aterro experimental em verdadeira grandeza e modelagem numérica 3D

Versão Corrigida

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Ciências.

Área de Concentração Engenharia Geotécnica

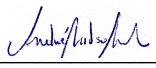
Orientador: Prof. Dr. José Orlando Avesani Neto

SÃO PAULO – SP
2022 (Edição Original)
2022 (Versão Corrigida)

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, 22 de dezembro de 2022

Assinatura do autor: 

Assinatura do orientador: _____

Catalogação-na-publicação

Matoso Resende, André

Aplicação de Blocos de EPS em Estrutura de Pavimento Rodoviário: Aterro Experimental em Escala Real e Modelagem Numérica 3D / A. Matoso Resende -- versão corr. -- São Paulo, 2022.

107 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Estruturas e Geotécnica.

1.Geossintéticos 2.Tensão e Deformação 3.Método dos Elementos Finitos 4.Pavimentação 5.Solos Moles I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Estruturas e Geotécnica II.t.

RESUMO

RESENDE, A. M. **Aplicação de blocos de EPS em estrutura de pavimentos: aterro experimental e modelagem numérica 3D**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Geotécnica – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2022.

A presente dissertação aborda uma modelagem numérica de tensão e deformação, em 3D, por meio do método dos elementos finitos (MEF), de uma estrutura de pavimento rodoviário constituída de blocos de EPS (poliestireno expandido) assentada sobre uma fundação de solos moles. A experiência e observações de diversos autores no dimensionamento destas estruturas apontam para a necessidade de entendimento do comportamento dos blocos de EPS em verdadeira grandeza, dada as divergências constatadas quando as estruturas são dimensionadas com os parâmetros obtidos a partir de amostras reduzidas dos blocos de EPS. A obtenção de parâmetros representativos de comportamento deste material, a partir de amostras de grandes dimensões, se fez viável neste trabalho por meio da construção, instrumentação e execução de ensaios em um aterro experimental em verdadeira grandeza, associado a modelagem numérica que permitiu a calibração destes parâmetros. Neste contexto, foi elaborado neste trabalho as análises numéricas baseando-se nos ensaios desenvolvidos neste aterro experimental. Os testes de carga (TC) e ensaio de viga Benkelman (VB) foram executados em diversos pontos. O objetivo, por meio do MEF, foi de: avaliar e comparar (1) a utilização dos parâmetros dos blocos de EPS de amostras reduzidas e de amostras grandes dimensões, (2) distribuição das tensões por profundidades e (3) deslocamentos na superfície do pavimento para (4) a validação do parâmetro dos blocos de EPS a ser utilizado no dimensionamento de pavimentos. Complementarmente, (5) foram realizadas as análises com as variações de cargas do veículo, para melhor compreensão da sua influência no dimensionamento do pavimento e otimização de projetos. Os resultados demonstraram que os parâmetros de amostras reduzidas não correspondem ao comportamento observado no aterro experimental construído e modelado numericamente. Os parâmetros mecânicos dos blocos de EPS de amostras de grandes dimensões mostraram ter uma maior rigidez, apresentando valores de tensões mais próximos às tensões observadas em campo obtidas durante a execução dos testes de carga. Ainda, houve a convergência entre os resultados obtidos na modelagem numérica, por meio do MEF, com os resultados obtidos em campo para ambos o teste de carga e ensaio de viga Benkelman. Adicionalmente, observou-se que a modelagem considerando a utilização de, somente, um único eixo do veículo é suficiente para descrever o comportamento das tensões para o dimensionamento do pavimento, sendo verificado que o uso de apenas o semi-eixo gerou valores não concordantes com o aterro experimental.

Palavras Chave: geossintéticos, tensão e deformação, método dos elementos finitos, pavimentação, solos moles, teste de carga, ensaio de viga Benkelman.

ABSTRACT

RESENDE, A. M. **Application of EPS blocks in pavement structure: experimental embankment and 3D numerical modeling**. Dissertation (Geotechnical Engineering - Masters of Science – Polytechnical School, University of São Paulo, São Paulo, 2022.

This dissertation addresses a 3D stress and strain numerical modeling, using the finite element method (FEM), of a road pavement structure consisting of EPS blocks (expanded polystyrene) built over a soft soil foundation. The experience and observations of several authors in the design of these structures points to the need of understanding the EPS blocks behavior, in its large magnitude, given the differences found when those structures are designed with the EPS blocks parameters obtained from reduced samples. Obtaining representative parameters from large EPS blocks samples was made feasible in this work through the construction, instrumentation, and execution of tests in an experimental embankment, associated with numerical modeling that allowed the calibration of these parameters. In this context, numerical analyzes were carried out, based on the tests performed in this experimental embankment. Load tests and Benkelman beam tests were performed at several points. The objective, through finite element analysis, was to: evaluate and compare: (1) the use of EPS blocks parameters from reduced and large samples, (2) stress distributions at different depths and (3) displacements on the pavement surface (4) to validate the EPS block parameters to be used in pavement design. In addition, (5) analyses were carried out varying the vehicle loads, for a better understanding of their influence on pavement design and for optimizing projects. The results showed that reduced samples EPS blocks parameters do not correspond to the behavior observed in the experimental embankment constructed and numerically modeled. The large samples EPS blocks parameters transcribed a greater stiffness, presenting stress values closer to the stresses observed in the field, obtained in the load tests. Still, there was convergence between the results obtained in the numerical modeling, through the FEM, with the results obtained in the field for both the load test and the Benkelman beam test. Additionally, it was observed that the modeling considering the use of only a single axis of the vehicle is sufficient to describe the stress behavior for the design of the pavement, being verified that the use of only the semi-axle generated values that do not agree with the experimental embankment.

Keywords: geosynthetics, stress and strain, finite element method, paving, soft soils, load testing, Benkelman beam test.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Grânulos de PS e Grânulos Expandidos. 21
Figura 2 – Bloco Finalizado. 22
Figura 3 – Deslocamentos Trecho A. 24
Figura 4 – Deformações Trecho B. 25
Figura 5 – Comparação dos Deslocamentos – Técnicas Construtivas. 26
Figura 6 – Deformação x Tempo. 27
Figura 7 – Seção Típica – Aterro Ferroviário com uso de blocos de EPS. 28
Figura 8 – Deslocamento Vertical – Modelagem Numérica x Instrumentação. 32
Figura 9 – Tensões Verticais – Modelagem Numérica x Instrumentação. 33
Figura 10 – Ensaios CBR em blocos de EPS. 36
Figura 11 – Valores de CBR para Blocos de EPS. 37
Figura 12 – Ensaio de Compressão de amostras cúbicas de 50 mm e 600 mm de aresta dos blocos de EPS. 39
Figura 13 – Módulo de Elasticidade x Densidade – Amostras de Reduzidas (Laboratório) e de Grandes Dimensões (Campo). 39
Figura 14 – Locação do Trecho Experimental. 41
Figura 15 – Etapas de Construção – Aterro Experimental. 42
Figura 16 – Pavimento Finalizado. 44
Figura 17 – Veículo Posicionado durante o Teste de Carga (TC). 46
Figura 18 – Disposição das CTTs – Perfil Longitudinal. 46
Figura 19 – Disposição das CTTs – Seção Transversal. 47
Figura 20 – Ensaios Executados no Aterro Experimental. 48
Figura 21 – Disposição dos Pontos da VB. 48
Figura 22 – Modelo 3D – Aterro Experimental. 50
Figura 23 – Malha da Modelo 3D. 51
Figura 24 – Seção Típica – Modelo 3D. 53
Figura 25 – Caso Esquemático – Variações e modelagem do Teste de Carga. 54
Figura 26 – Caso Esquemático – Variações e modelagem para Parâmetros de Dimensionamento de Pavimentos. 56
Figura 27 – Variação da obtenção dos Parâmetros de Dimensionamento de Pavimentos de acordo com a posicionamento A e B - unidades em mm. 56

Figura 28 – TC – Veículo Completo (VC). 59
Figura 29 – TC – Eixo (E). 60
Figura 30 – TC – Semi Eixo (SE). 60
Figura 31 – Resultados – Teste de Carga – Cenário I – Parâmetros de Amostras de Grandes Dimensões (PAGD). 61
Figura 32 – Resultados – Teste de Carga – Cenário II – Parâmetros de Amostras de Grandes Dimensões (PAGD). 62
Figura 33 – Resultados – Teste de Carga – Cenário I – Parâmetros de Amostras Reduzidas (PAR). 63
Figura 34 - Resultados – Teste de Carga – Cenário II – Parâmetros de Amostras Reduzidas (PAR). 63
Figura 35 – Ensaio VB – Veículo Completo (VC). 68
Figura 36 – Ensaio VB – Eixo (E). 68
Figura 37 – Ensaio VB – Semi Eixo (SE). 68
Figura 38 – Análise Numérica (LET) – Cenários de Análise – (em mm). 71
Figura 39 – Deflexão média na superfície do pavimento – MEF x LET. 77
Figura 40 – Deformação horizontal média no CBUQ – MEF x LET. 78
Figura 41 – Deformação horizontal média no BGTC – MEF x LET. 79
Figura 42 – Tensão de compressão vertical média nos blocos de EPS – MEF x LET. 80
Figura 43 – Tensão de compressão horizontal média nos blocos de EPS – MEF x LET. 81
Figura 44 – Deformação Vertical média nos Blocos de EPS – MEF x LET. 82
Figura 45 – Deformação Vertical média no Subleito – MEF x LET. 83
Figura 46 – Modelagem 3D – Malha – Teste de Carga – VC – Cenário I. 93
Figura 47 – Seção 1 (S1) – Deslocamentos no Teste de Carga – VC – Cenário I. 94
Figura 48 – Seção 1* (S1*) – Deslocamento no Teste de Carga – VC – Cenário I. 94
Figura 49 – Modelagem 3D – Malha – Teste de Carga – VC – Cenário II. 94
Figura 50 – Seção 1 (S1) – Deslocamento no Teste de Carga – VC – Cenário II. 95
Figura 51 – Seção 1* (S1*) – Deslocamento no Teste de Carga – VC – Cenário II. 95

Figura 52 – Modelagem 3D – Malha – Teste de Carga – E – Cenário I. 95
Figura 53 – Seção 1 (S1) – Deslocamento no Teste de Carga – VC – Cenário II. 96
Figura 54 – Modelagem 3D – Malha – Teste de Carga – E – Cenário II. 96
Figura 55 – Seção 1 (S1) – Deslocamento no Teste de Carga – VC – Cenário II. 96
Figura 56 – Modelagem 3D – Malha – Teste de Carga – SE – Cenário I. 97
Figura 57 – Seção 1 (S1) – Deslocamento no Teste de Carga – VC – Cenário I. 97
Figura 58 – Modelagem 3D – Malha – Teste de Carga – SE – Cenário II. 97
Figura 59 – Seção 1 (S1) – Deslocamento no Teste de Carga – VC – Cenário II. 98
Figura 60 – Modelagem 3D – Malha – Ensaio de Viga Benkelman – VC. 98
Figura 61 – Seção 1 (S1) – Deslocamento no Ensaio de Viga Benkelman – VC. 98
Figura 62 – Modelagem 3D – Malha – Ensaio de Viga Benkelman – E. 99
Figura 63 - Seção 1 (S1) – Deslocamento no Ensaio de Viga Benkelman – E. 99
Figura 64 – Modelagem 3D – Malha – Ensaio de Viga Benkelman – SE..... 99
Figura 65 – Seção 1 (S1) – Deslocamento – Ensaio de Viga Benkelman – SE. 100
Figura 66 – Planta das Investigações. 101
Figura 67 – Boletim de Sondagens – Investigação de Fundação. 102
Figura 68 – Boletim de Sondagens – Investigação de Fundação. 103
Figura 69 – Curva de Distribuição Granulométrica – Fundação do Aterro Experimental. 104
Figura 70 – Ensaio SPT – Região de Construção do Aterro Experimental. ... 104
Figura 71 - Região disponibilizada para o ensaio..... 105
Figura 72 – Célula de tensão empregada. 105
Figura 73 – Posição das células na seção longitudinal da estrutura. 105
Figura 74 – Posição das células na seção transversal da estrutura – dimensões em mm. 106
Figura 75 – Leitura durante o TC. 106
Figura 76 – Leitura durante o ensaio VB. 107

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros Geotécnicos – Subleito. 45
Tabela 2 – Propriedades do bloco de EPS. 45
Tabela 3 – Parâmetros Geomecânicos – Modelagem Numérica. 52
Tabela 4 – Leitura das Tensões no Aterro Experimental. 57
Tabela 5 – Resultados – Teste de Carga – Parâmetros de Amostras de Grandes Dimensões (PAGD). 61
Tabela 6 – Resultados – Teste de Carga – Parâmetros de Amostras Reduzidas (PAR). 62
Tabela 7 – Resultados dos Ensaios de viga Benkelman. 66
Tabela 8 – Resultados Modelagem Numérica 3D – Ensaio VB. 69
Tabela 9 – Resultados da Modelagem Numérica. 71
Tabela 10 – Resultados – Parâmetros de Dimensionamento de Pavimentos – Seção A – Parâmetros de Amostras de Grandes Dimensões (PAGD). 73
Tabela 11 – Resultados – Parâmetros de Dimensionamento de Pavimentos – Seção B – Parâmetros de Amostras de Grandes Dimensões (PAGD). 74
Tabela 12 – Resultados – Valores Médios – Parâmetros de Dimensionamento de Pavimentos – Parâmetros de Amostras de Grandes Dimensões (PAGD). . 75
Tabela 13 – Resultados – Parâmetros de Dimensionamento de Pavimentos – Seção A – Parâmetros de Amostras Reduzidas (PAR). 91
Tabela 14 – Resultados – Parâmetros de Dimensionamento de Pavimentos – Seção B – Parâmetros de Amostras Reduzidas (PAR). 92
Tabela 15 – Resultados – Valores Médios – Parâmetros de Dimensionamento de Pavimentos – Parâmetros de Amostras Reduzidas (PAR)..... 93

LISTA DE SIGLAS

AASHTO	*American Association of State Highway and Transportation Officials*
ASD	*Allowable Stress Design*
ASTM	*American Society for Testing and Materials*
BGTC	Brita Graduada Tratada com Cimento
CBR	*Califórnia Bearing Ratio*
CBUQ	Concreto Betuminoso Usinado a Quente
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
E	Eixo Único
ELS	Estado Limite de Serviço.
ELU	Estado Limite Último
EP USP	Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
EPS	E*xpanded Polystyrene*
FWD	*Falling Weight Deflectometer*
LET	*Layered Elastic Theory*
MEF	Método dos Elementos Finitos
PCCP	Portland Cement Concrete Paviment
PEAD	Polietileno de Alta Densidade
PEBD	Polietileno de Baixa Densidade
PET	Polietileno Tereftalato
PAGD	Parâmetros de Amostras Grande Dimensões
PMQ	Pré Mistura a Quente
PAR	Parâmetros de Amostras Reduzidas
PC	Pavimento de Concreto
PCMG	Pavimento Composto por Material Granular
PS	Poliestireno
PVC	Policloreto de Vinila
SE	Semi-Eixo
SPT	*Standard Penetration Test*

TC	Teste de Carga
CTT	Célula de Tensão Total
UDOT	*Utah Department of Transportation*
VB	Viga Benkelman
VC	Veículo Completo
XPS	Extruded Polystyrene

SUMÁRIO

RESUMO **3**

ABSTRACT **4**

LISTA DE FIGURAS **5**

LISTA DE SIGLAS **9**

1 INTRODUÇÃO **13**

1.1 JUSTIFICATIVA 14

1.2 OBJETIVOS 16

2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS **18**

2.1 INTRODUÇÃO 18

2.2 SOLOS MOLES E TÉCNICAS DE CONSTRUÇÃO 18

2.3 ATERROS LEVES E BLOCOS DE EPS 19

2.4 BLOCOS DE POLIESTIRENO EXPANDIDO (eps) 20

2.5 APLICAÇÃO DE BLOCOS DE EPS EM PAVIMENTOS 22

2.5.1 Aterros de Infraestrutura de Transportes 23

2.5.2 Performance dos Blocos de EPS frente aos ensaios laboratoriais 29

2.6 MODELAGEM NUMÉRICA 29

2.7 ENGENHARIA DE PAVIMENTOS, DIMENSIONAMENTO E BLOCOS DE EPS 34

2.7.1 Considerações de Projeto e Dimensionamento 34

2.7.2 Considerações dos Parâmetros para Dimensionamento das Estruturas de Pavimentos 35

2.7.3 Relação dos parâmetros e efeito devido ao tamanho das amostras 38

3 ATERRO EXPERIMENTAL **41**

3.1 SOBRE O TRECHO EXPERIMENTAL 41

3.2 INVESTIGAÇÕES E PARÂMETROS GEOTÉCNICOS 44
3.3 TESTE DE CARGA E INSTRUMENTAÇÃO 45
3.4 ENSAIO DE VIGA BENKELMAN 47
3.5 MATERIAIS E MÉTODOS..... 49
4 MODELAGEM GEOMECÂNICA DA ESTRUTURA 50
4.1 GEOMETRIA E MALHA DO MODELO 3D..... 50
4.2 CONDIÇÕES DE CONTORNO..... 51
4.3 PARÂMETROS GEOMECÂNICOS..... 52
4.4 CENÁRIOS DE MODELAGEM 53
4.4.1 Teste de Carga (TC) 53
4.4.2 Ensaio de Viga Benkelman (VB) 54
4.4.3 Parâmetros de Dimensionamento de Pavimentos 55
5 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS..... 57
5.1 TESTE DE CARGA 57
5.1.1 Análise dos resultados do ensaio..... 57
5.1.2 Modelagem Numérica 59
5.2 ENSAIO DE VIGA BENKELAMN (VB) 66
5.2.1 Análise de resultado do ensaio 66
5.2.2 Modelagem Numérica 67
5.3. PARÂMETROS DE DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS 70
5.3.1 Análise dos Parâmetros de Dimensionamento – Modelagem Layered Elastic Theory (LET)..... 70
5.2.2 Modelagem Numérica 72
6 CONCLUSÕES 85
Referências Bibliográficas 87
Apêndice 91
Anexos 101

1 INTRODUÇÃO

A infraestrutura de transportes é determinante para o desenvolvimento econômico e social do país. No Brasil, segundo Menelau (2012), o modal rodoviário corresponde a aproximadamente 60% da matriz de transportes, sendo essencial no escoamento de produtos, serviços e pessoas. O autor ainda enfatiza a importância de uma infraestrutura satisfatória e de qualidade, o que exige um planejamento que atenda às necessidades da sociedade.

De acordo com Santos (2018), para projetos de infraestrutura de transporte rodoviário, uma gama de informações é necessária, sendo imprescindível o conhecimento das características do solo. Dentre os desafios destes projetos, no quesito geotécnico, deve-se atentar para a presença de solos moles e de baixa resistência. Os estudos de Santos (2018), ainda, indicam que a incidência estimada ou áreas propícias para a presença de solos moles e compressíveis no país gira em torno de 35% do território.

A construção de um empreendimento rodoviário ou qualquer outro cuja fundação seja constituída por solos moles, é um desafio para a Engenharia Geotécnica. Este desafio resulta da baixa capacidade de suporte e alta deformabilidade apresentada por este tipo de solo, o que geralmente requer uma solução complexa.

A engenharia já apresenta algumas soluções e vem estudando alternativas para este problema. Segundo Almeida e Marques (2014), a depender do empreendimento e das características do solo, as possíveis tratabilidades e melhoria de fundação estão condicionadas aos seguintes aspectos: aplicação de sobrecargas e tempo de construção, instalação de drenos, elementos de fundação profunda e uso de materiais leves.

O presente estudo aborda a aplicação de uma das técnicas da engenharia para a construção de aterros rodoviários sobre solos moles. A temática refere-se à utilização da técnica de aterros leves, método em que, na construção do aterro, são utilizados elementos de baixo peso específico, onde usualmente são aplicados os materiais conhecidos como blocos de EPS, também denominados geoexpandido (*geofoam,* termo em inglês).

Os blocos de EPS em aterros rodoviários vem sendo utilizado desde a década de 1970, período em que, segundo Nasem (2004), as primeiras obras ocorreram. Não obstante, estes blocos também vêm sendo utilizados em outras áreas da engenharia, como em encontros de pontes, proteção de tubulações enterradas, estabilização de taludes, dentre outros.

Embora, o desenvolvimento de projetos com o uso de blocos de EPS já tenha se consolidado internacionalmente, de acordo com Avesani Neto (2008), a aplicação dos blocos de EPS, nacionalmente, ainda é limitada. A falta de estudos, caracterização e normas estão entre os fatores que justificam a escassez de sua aplicação.

Neste sentido, esta dissertação apresenta um estudo do comportamento dos blocos de EPS de um aterro rodoviário experimental. A partir das informações provenientes dos resultados dos ensaios de campo realizados no aterro experimental construído, foi possível entender o comportamento dos blocos de EPS ante as solicitações externas. Adicionalmente, este comportamento foi verificado por meio de modelagem numérica em 3D, buscando compreender as diferenças de seu desempenho e variações apontadas a partir das análises, limitados por suas condições de contorno, modelos constitutivos e variação de comportamento dos blocos de EPS.

Assim, os resultados obtidos poderão contribuir para um melhor entendimento de projetos similares a este, com o uso de blocos de EPS, permitindo a aferição, refinamento dos parâmetros de projeto e melhor dimensionamento da estrutura para conferir ao projeto uma melhor relação custo-benefício.

1.1 JUSTIFICATIVA

A definição e conhecimento das características e parâmetros mecânicos dos materiais para o desenvolvimento de projetos de engenharia, é de suma importância. Pois, desta forma, é possível garantir uma obra segura e economicamente viável.

Dentre as diversas soluções de engenharia para construções sobre solos moles, a utilização de aterros leves com a proposta do uso de blocos de EPS

apresenta-se vantajosa. Segundo Nasem (2004), dentre suas principais vantagens, seu baixo peso específico e alta resistência se destacam. Adicionalmente a possibilidade de construção em prazos curtos e em condições climáticas adversas, como também apontado por Farnsworth (2008). Ainda, suas propriedades podem ser direcionadas ou fabricadas de acordo as especificidades do projeto. Diferentemente do que ocorre nas técnicas de melhoria de solos, como mencionado por Almeida e Marques (2014), em que a imprecisão das condições geotécnicas podem dificultar o desenvolvimento do projeto e construção da estrutura.

Embora, as propriedades do EPS possam ser fabricadas ou direcionadas de acordo com as demandas de projeto, existe a necessidade de entendimento do seu comportamento em verdadeira grandeza. Negussey (2007) afirma que ensaios de laboratório, comumente realizados em amostras reduzidas, podem minorar os valores ou parâmetros de projeto, por exemplo. Ainda, em seus estudos, Negussey (2007) cita que para blocos de EPS com massa específica de 15 kg/m^3, os valores de módulo de elasticidade estimados em campo podem chegar a duas vezes o valor obtido a partir de amostras reduzidas, de laboratório.

Técnicamente, estaria havendo divergência entre parâmetros de comportamento, seja deformação ou deslocamento, por exemplo, de uma estrutura projetada para a mesma estrutura construída. Isto é, a partir das divergências expostas nos ensaios supracitados, desenvolvidos por Negussey (2007), as estruturas poderiam estar superdimensionadas.

Mesmo com a disponibilidade de estudos em amostras de blocos de EPS reduzidas, apresentados por diversos autores, como nos estudos de Nasem (2004), Negussey (2007) e de Huang e Negussey (2011), por exemplo, há a carência de estudos de aterros em verdadeira grandeza que permitam a compreensão do real comportamento dos blocos de EPS de grandes dimensões. Estes experimentos são de grande valia para a comunidade técnica, pois estes dados poderão basear futuros projetos similares, sugerindo a utilização de blocos de EPS viáveis da perspectiva técnica e econômica.

Portanto, a aferição e verificação dos reais parâmetros e comportamento dos blocos de EPS em verdadeira grandeza, como em aterros rodoviários experimentais, permitiriam a indicação de um material mais adequado para o

dimensionamento das estruturas. Esta aferição pode ser realizada por meio de dados de aterros construídos com auxílio da modelagem numérica, assim como apresentado por outros autores na literatura internacional, como Newman (2010), Esmaeli et al. (2017), Farnsworth (2008), Negussey et. al. (2001), entre outros. Tais aferições corroboraram com os estudos de Negussey (2007), onde contatou-se a minoração dos parâmetros mecânicos do material.

Este trabalho, por sua vez, poderá contribuir no entendimento do comportamento deste material em verdadeira grandeza, acrescentando no acervo da literatura nacional. Já que este assunto tem sido pouco estudado no contexto brasileiro, mesmo diante da sua potencialidade de aplicação em território nacional.

Então, a partir dos resultados dos Testes de Carga e ensaio de Viga Benkelman realizados no aterro experimental objeto de estudo desta dissertação, associados a modelagem numérica desenvolvida, será possível avaliar os parâmetros reais da estrutura e buscar a validação dos parâmetros que melhor representam o seu comportamento.

1.2 OBJETIVOS

Esta dissertação tem por objetivo principal avaliar a utilização dos parâmetros dos blocos de EPS no dimensionamento de pavimentos, de acordo com as variações que estes parâmetros apresentam a partir da sua definição, seja por amostras reduzidas ou por amostras de grandes dimensões.

A hipótese a ser testada é de que os parâmetros mecânicos obtidos a partir de amostras de blocos de EPS reduzidas não são adequadas para o dimensionamento das estruturas de pavimentos. Visto que, como mencionado por Negussey (2007), são observadas divergências entre o comportamento esperado em projeto, do comportamento destas estruturas quando já construídas.

A avaliação se sucederá na elaboração de modelagens numéricas, por meio do Método dos Elementos Finitos (MEF), dos Testes de Carga (TC) e Ensaios de Viga Benkelman (VB) executados em uma estrutura de pavimento rodoviário.

Complementarmente, entre os objetivos específicos da dissertação, buscou-se realizar a comparação da utilização destes parâmetros na avaliação do comportamento da estrutura. Serão obtidos, então, os parâmetros de tensão e deformação em diferentes regiões na estrutura construída, além do parâmetro de deslocamento na superfície do pavimento. Estes parâmetros ainda foram obtidos segundo as variações da aplicação das cargas no modelo numérico, com intuito de compreender melhor a relação entre os parâmetros dos blocos de EPS com o dimensionamento da estrutura.

2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1 INTRODUÇÃO

Este capítulo tem por objetivo apresentar os principais aspectos do uso de blocos de EPS em pavimentos rodoviários sobre solos moles, buscando mostrar as suas vantagens de aplicação na Engenharia Geotécnica. São abordados as técnicas de construção sobre solos moles, o processo de fabricação dos blocos de EPS, os ensaios de laboratório aplicáveis, suas propriedades até suas características, comportamento e casos de sucesso.

Ainda, sob este enfoque, são tratados os aspectos relacionados ao comportamento deste material frente às modelagens com o uso do método dos elementos finitos. Além das discussões relacionadas aos modelos constitutivos que descrevem seu desempenho, frente as solicitações externas.

2.2 SOLOS MOLES E TÉCNICAS DE CONSTRUÇÃO

Os solos moles são, geralmente, de origem sedimentar, sendo constituídos de materiais argilosos ou areias argilosas, apresentando características de alta compressibilidade e de baixa resistência, segundo Massad (2003). Complementarmente, Pinto (2006) classifica os solos moles como materiais majoritariamente argilosos em que o índice de resistência à penetração pelo ensaio SPT apresenta-se inferior a 5 golpes.

Os depósitos de solos moles, geralmente, são encontrados em ambientes fluviais, costeiros e de baías. Massad (2003) ainda relata que os meios, processos e locais de deposição, isto é, as condições ambientais e fatores que interferem na sedimentação, determinam a heterogeneidade do material, o que influi diretamente nas variações das suas propriedades geotécnicas, tanto horizontalmente quanto verticalmente.

Para as construções sobre este tipo de solo, as soluções geotécnicas clássicas incluem o melhoramento das propriedades do solo ou emprego de elementos de fundação profunda. Estas soluções estão, geralmente, associadas à troca do material mole por materiais competentes, reforço por meio de

materiais sintéticos, utilização de bermas de estabilização, uso de elementos drenantes, construção de aterros de sobrecargas, dentre outros.

De acordo com Nasem (2004), as estratégias de construção em solos moles podem ser categorizadas em dois métodos mais abrangentes. Um método, faz-se o uso de aterro convencional para melhoria das condições de fundação, podendo estar associado à técnica de reforço ou drenagem, por exemplo. Já o outro método, está associado à técnica conhecida como aterros leves. Este método pressupõe o alívio das sobrecargas na fundação de pouca competência, por meio da utilização de materiais de baixo peso específico. E, esta técnica, será abordada exclusivamente no Item 2.3, por estar intrinsecamente relacionada ao tema de estudo.

2.3 ATERROS LEVES E BLOCOS DE EPS

De acordo com o Fhwa (1998), o uso de materiais convencionais para construção de aterros sobre solos moles pode resultar em recalques e deformações significativos, podendo levá-los à ruptura, devido aos problemas associados à baixa capacidade de carga da fundação.

O peso específico dos solos convencionais utilizados para construção de aterros encontra-se próximo a 20 kN/m³. Em contrapartida, o peso específico dos materiais geralmente utilizados em aterros leves, de acordo com Almeida e Marques (2014), pode variar entre 0,15 kN/m³ a 10 kN/m³. A técnica de aterros leves tem o principal objetivo reduzir as tensões provenientes dos elementos da estrutura sobre a fundação de baixa capacidade de suporte, por meio do uso de materiais de baixo peso específico. Consequentemente, há uma redução dos recalques primários, resultando em uma melhoria das condições de estabilidade da estrutura.

Ainda de acordo com Fhwa (1998) a classificação dos materiais utilizados em aterros leves pode ser colocada em duas categorias distintas. Esta classificação está baseada nas similaridades das propriedades que eles possuem, em relação aos materiais convencionais. Na primeira categoria os materiais são comparados aos solos granulares. Na segunda categoria, são comparados aos solos com resistência à compressão e comportamento similar

aos solos coesivos sob solicitações não drenadas. Dentre os materiais para aterros leves, cuja categoria de comportamento é similar aos solos granulares, destaca-se o uso de fibras de madeira, escórias de alto forno, cinzas volantes, argilas expandidas e pneus triturados. A segunda categoria, está associada ao uso dos materiais como os geoexpandidos e concreto celular/leve.

A Fhwa (1998) e Sakomoto (2018), apresentam alguns dos benefícios do uso da técnica de aterros leves em rodovias. São eles, o baixo peso específico, redução das imposições de tensões verticais e horizontais, baixo coeficiente de Poisson, características drenantes, possibilidade de construção em condições adversas, além de ser ideal para prazos curtos de obras. Entretanto, existem algumas limitações, dentre as quais, são mencionadas a sua disponibilidade nas proximidades da obra, proteção do material contra possíveis deteriorações, além de dificuldades de armazenagem e métodos de construção.

Segundo Nasem (2004), apesar do grande número de materiais disponíveis para construção de aterros leves, os blocos de EPS se destacam. O material se sobressai por apresentar o menor do peso específico, por sua baixa compressibilidade e alta resistência, além do fato de ser manufaturado, pois a sua fabricação resulta em um material de propriedades previsíveis e consistentes.

2.4 BLOCOS DE POLIESTIRENO EXPANDIDO (EPS)

De acordo com Montenegro e Serfaty (2002), o Poliestireno (PS) é uma resina termoplástica, pertencente ao mesmo grupo dos materiais de PVC (cloreto de polivinila), PET (polietileno tereftalato), PEBD e PEAD (polietileno de baixa e alta densidade). O PS é proveniente da polimerização do monômero Estireno, apresenta-se na forma de grânulos podendo ter variações dos materiais. Ele pode se apresentar como poliestireno homopolímero, também conhecido como cristal, poliestireno de alto impacto e poliestireno com estrutura alveolar.

Dentre as variações possíveis do PS, aquele com estrutura alveolar, é representado pelo Poliestireno Expandido (EPS) e Poliestireno Extrudado (XPS). Dentre seu processo, a presença de células de ar proporciona sua baixa

densidade. Tessari (2006) e Avesani Neto (2008) descrevem o processo de fabricação do EPS, que ocorre em três etapas.

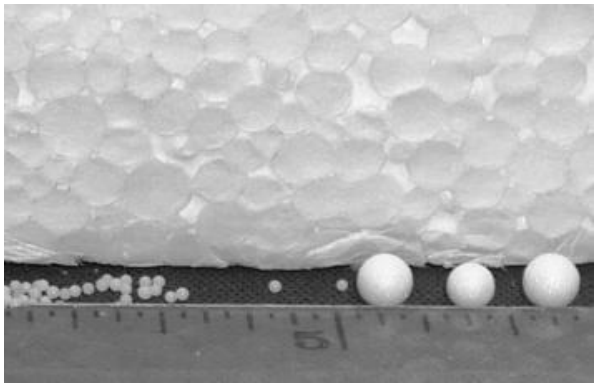
1ª Etapa – Pré Expansão do PS: É realizado o aquecimento por contato com o vapor de água, associado ao agente expansor, geralmente o pentano. Tem por objetivo deixar o poliestireno mais maleável, de modo que sua expansão é gerada com evaporação do pentano.

2ª Etapa – Armazenamento do Granulado Inflado: Nesta etapa os grânulos inflados são armazenados para arrefecimento, de forma a garantir sua expansão completa.

3ª Etapa – Moldagem: Por fim, o material é colocado nos moldes para um novo processo de aquecimento por vapor de água. Desta maneira, os grânulos são mesclados, resultando em um material rígido com o formato desejado.

As figuras a seguir apresentam as etapas do processo de fabricação do EPS.

Figura 1 – Grânulos de PS e Grânulos Expandidos.



Fonte: Negussey (2007).

Figura 2 – Bloco Finalizado.

Fonte: Csri (2017).

De acordo com Negussey (2007), os anos de experiência de campo e pesquisas mostraram que o peso específico dos blocos de EPS é um bom indicativo para parâmetros de projetos. Estudos realizados por Avesani Neto (2008), Beju e Mandal (2017) e Malai (2017) relacionam o peso específico dos blocos de EPS às suas propriedades mecânicas e hidráulicas, por meio da execução de ensaios de laboratório.

Estes autores supracitados indicam que o aumento do peso específico melhora as propriedades do material. Quanto à resistência mecânica, as relações mostram que a resistência à compressão, à flexão, ao cisalhamento e módulo de elasticidade aumentam com o acréscimo do peso específico do material. Ainda, quanto às propriedades hidráulicas, ocorre a diminuição do coeficiente de permeabilidade e capacidade de absorção de água, com o acréscimo do peso específico dos blocos de EPS.

2.5 APLICAÇÃO DE BLOCOS DE EPS EM PAVIMENTOS

De acordo com Nasem (2004), o uso de blocos de EPS em aterros leves teve seu primeiro registro na Noruega, em 1972, em um projeto rodoviário. Complementarmente, Negussey (2007) relata que estes blocos de EPS foram utilizados na aproximação com a *Floam Bridge*, em Oslo. O intuito do uso dos blocos de EPS foi o de reduzir os recalques e as manutenções do greide da estrada assentada sobre solos moles. Associado aos blocos de EPS, aplicou-se *spray* de poliuretano para sua preservação e o uso de um pavimento de 0,50 m de espessura, constatado como suficiente para abrandar estes recalques.

Negussey (2007) ainda relata que o projeto norueguês inspirou vários outros projetos em todo o mundo. Neste sentido, o desenvolvimento de pesquisas e estudos experimentais da performance dos blocos de EPS em rodovias tem confirmado a boa experiência norueguesa. Este tópico tem o propósito de apresentar, por meio de obras instrumentadas e ensaios de laboratório, o desempenho apresentado pelo uso dos blocos de EPS em aterros rodoviários.

2.5.1 Aterros de Infraestrutura de Transportes

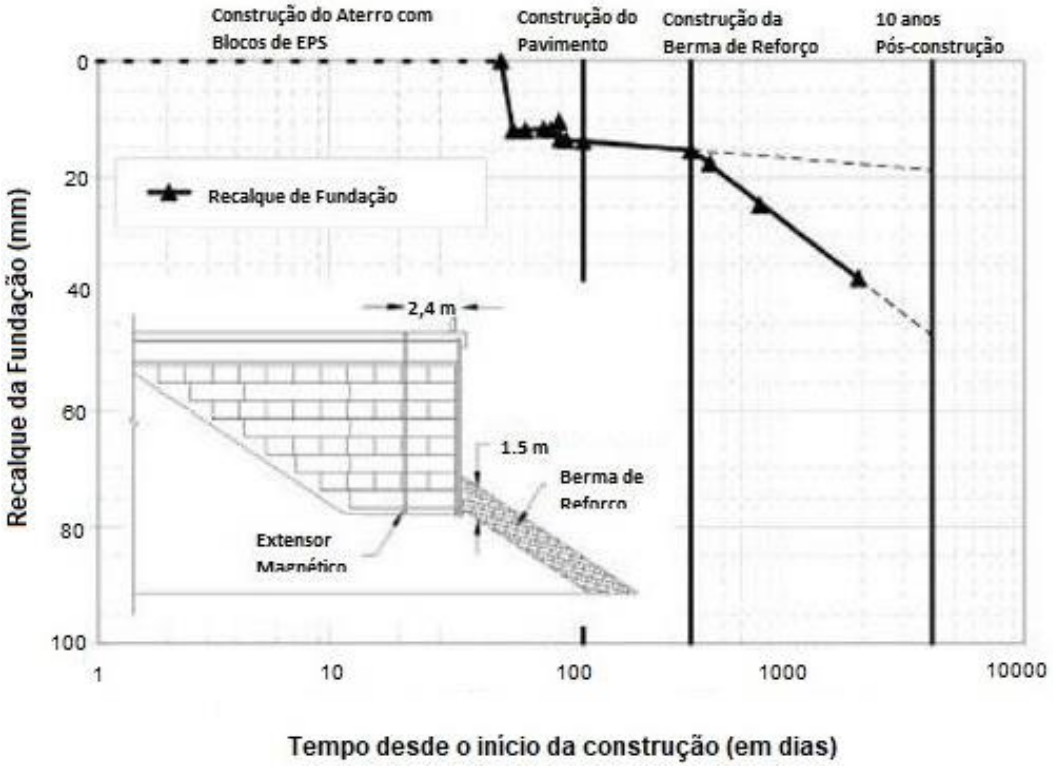
Farnsworth *et al.*(2008), apresentaram um estudo comparativo, referente a três métodos de construção da rodovia I-15, na cidade de Salt Lake, nos Estados Unidos, avaliando os aspectos de tempo de construção, custos e performance da estrutura. A metodologia aplicada aos trechos da rodovia foram o de melhoria do solo por colunas de concreto leve, aplicação de blocos de EPS e melhoria do solo pelo uso de drenos verticais pré-fabricados.

Sob a perspectiva de avaliação do desempenho da estrutura, dentre os instrumentos utilizados para monitoramento estão os extensores magnéticos e os inclinômetros horizontais. Os instrumentos foram instalados na área de fundação e aterro, na região das colunas de reforço e nos blocos de EPS. Os critérios estabelecidos no projeto, indicado pela equipe UDOT (*Utah Department of Transportation*), incluía o valor de recalque máximo de 76 mm, considerando os 10 anos posteriores a construção. Para os trechos de aterros construído por blocos de EPS, foi definido uma deformação máxima de 1% (75 mm), referente ao período de 10 anos pós-construção, e 2% (150 mm), para o período de 50 anos pós-construção. O projeto ainda limitava a valores de deformações diferentes, a depender das construções do entorno e da vizinhança do trecho em análise.

Dos dois trechos da rodovia constituídos por blocos de EPS, ambos apresentaram deformações inferiores aos critérios estabelecidos, tanto para fim de construção quanto para os 10 anos e 50 anos pós-construção. Para o trecho A, o recalque observado foi de aproximadamente 15 mm, 40 mm e 75 mm, para

as condições de final de construção, de 10 anos e de 50 anos pós construção, respectivamente. A Figura 3 apresenta os deslocamentos deste trecho.

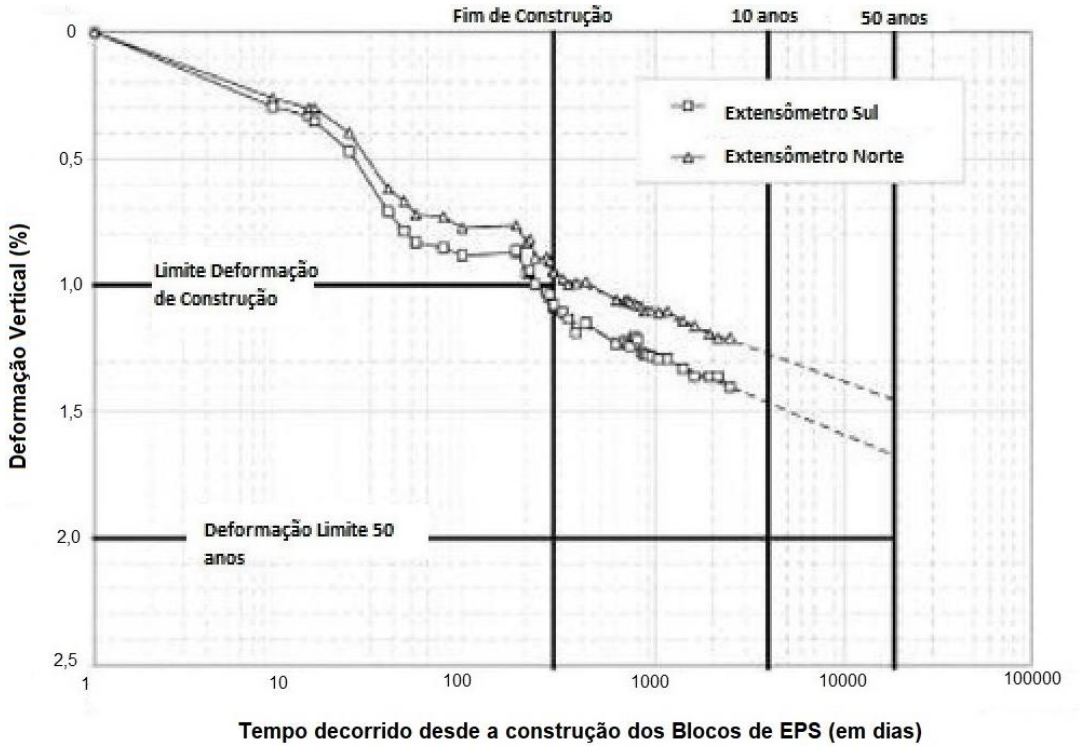
Figura 3 – Deslocamentos Trecho A.



Fonte: Farnsworth *et al.* (2008).

Quanto ao trecho B, observou-se recalques superiores quando comparado ao trecho A, no entanto, também dentro dos critérios de projeto. A deformação máxima esperada, para este trecho, é de aproximadamente 1,5%. A Figura 4 apresenta as suas deformações obtidas e estimadas.

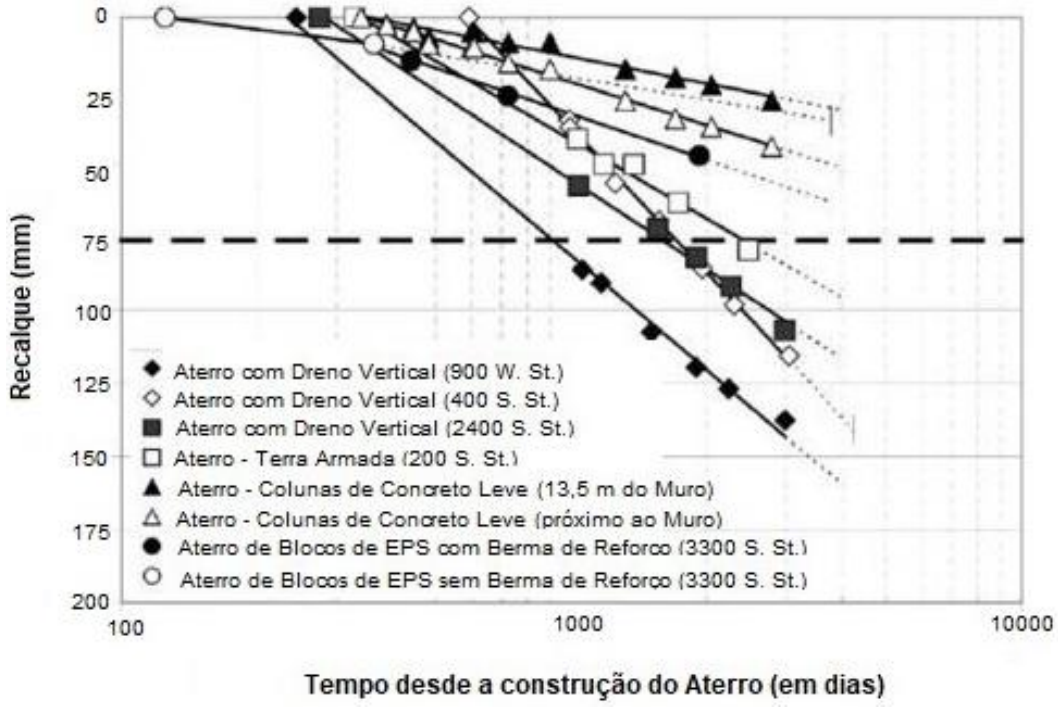
Figura 4 – Deformações Trecho B.



Fonte: Farnsworth *et al*. (2008).

A Figura 5 apresenta um resumo comparativo das estimativas de recalque de 10 anos pós-construção com as diferentes soluções geotécnicas adotadas nos diferentes trechos da rodovia. Dentre estas soluções, a mesma figura aborda os cenários de construção do aterro com drenos verticais pré-fabricados, aterro associado a estrutura de contenção por terra armada, melhoria do solo por colunas de concreto leve e aterro com blocos de EPS. Nota-se que os melhores desempenhos da rodovia construída foram com os métodos de melhoria do solo por colunas de concreto e com a aplicação dos blocos de EPS.

Figura 5 – Comparação dos Deslocamentos – Técnicas Construtivas.



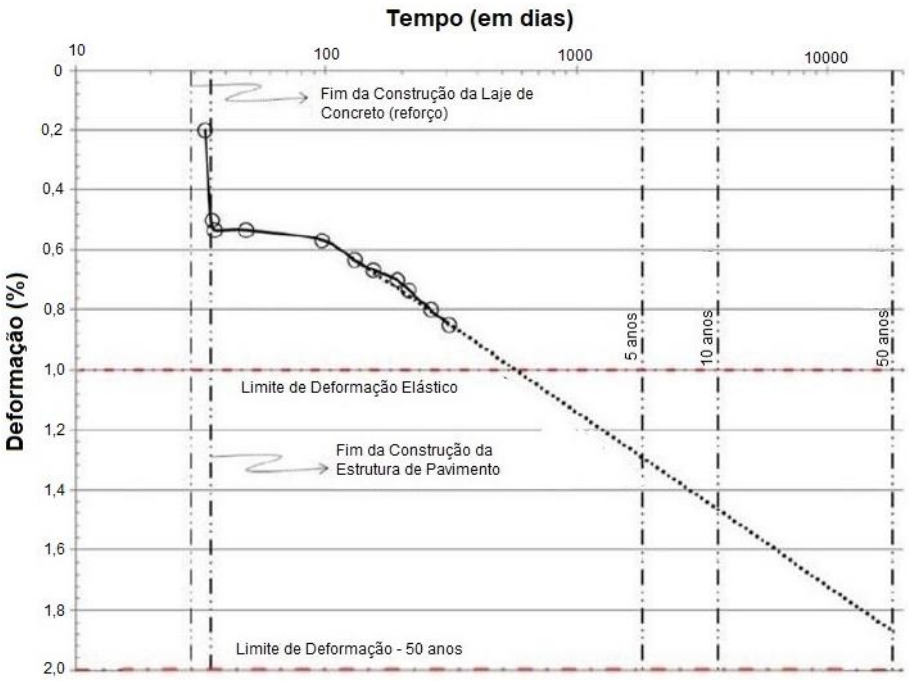
Fonte: Farnsworth *et al*. (2008).

De acordo com os autores, a técnica de aterros leves com uso de blocos de EPS apresentou um dos melhores em desempenho geral, considerando os valores de recalques apresentados durante e pós construção. Sob a perspectiva de tempo de obra, a utilização de blocos de EPS se apresentou como a alternativa mais rápida, totalizando em 3 meses de construção. Em contrapartida, as outras técnicas levaram mais de um ano para finalização. Quanto aos custos associados, os blocos de EPS se apresentaram como a segunda opção mais econômica do projeto, tendo custos 20% superior à técnica de aterros convencionais.

Ozer e Akinay (2018), em seus estudos, descrevem a primeira experiência turca com o uso de blocos de EPS em uma rodovia construída na cidade de Istambul, no ano de 2017. O projeto buscava atingir valores de recalques próximo a zero, de maneira a evitar problemas estruturais em tubulações de água existentes em trechos desta rodovia. O estudo buscou avaliar a sua performance, por meio de instrumentação de campo composta por extensômetros instalados em diferentes elevações da estrutura. O monitoramento foi realizado por um período de dez meses, desde a sua construção.

Os cinco extensômetros contemplaram as regiões de fundação, camada drenante, entre blocos de EPS e na interface com a laje de concreto. Os autores observaram uma deformação de 0,6% até o fim da construção. Esta deformação foi registrada pelos extensômetros situados nas regiões do bloco de EPS e camada de areia, situada na base da estrutura. Este valor inclui o fechamento dos vazios entre blocos de EPS, suas deformações e assentamento de base. Posteriormente, até o décimo mês, as deformações atingiram aproximadamente 0,8%. As estimativas para 50 anos pós construção, obtidas por meio da regressão linear entre as leituras já realizadas, apontaram para uma deformação ligeiramente superior a 1,8%. Segundo os autores, estes valores de deformação resultantes são inferiores aos obtidos em obras similares, apresentando resultados satisfatórios de performance. Além disto, estes valores encontram-se dentro dos critérios estabelecidos pela UDOT (*Utah Department of Transportation*), adotados no projeto da rodovia I-15, projeto referência que considera deformações de até 2% pós 50 anos de construção. A Figura 6 apresenta as deformações obtidas e estimadas, para rodovia de estudo, bem como os limites de deformações de projeto, apresentando-se performance dentro do projetado.

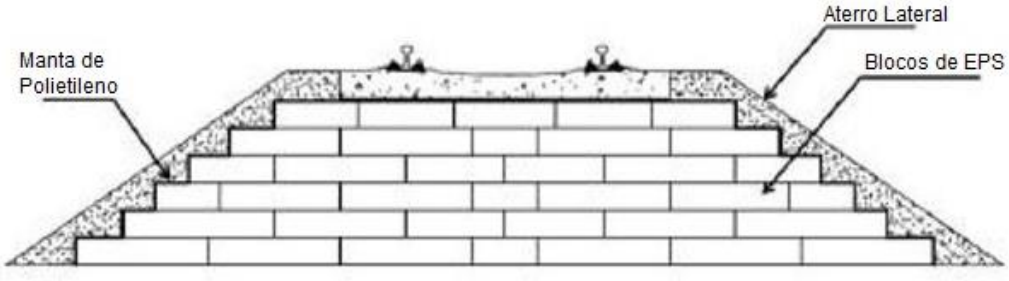
Figura 6 – Deformação x Tempo.



Fonte: Ozer e Akinay (2018).

Esmaeli *et al.* (2017), por sua vez, apresentam os resultados de um projeto onde os blocos de EPS foram aplicados para a construção de um aterro ferroviário. O projeto considerou a aplicação de blocos de EPS com variadas densidades, baseando-se na metodologia de cálculo propostos por Nasem (2004), e levando em consideração as sugestões de tensões para cada densidade dos blocos de EPS recomendadas pela ASTM C578. A Figura 7 apresenta um esquema da seção típica deste aterro.

Figura 7 – Seção Típica – Aterro Ferroviário com uso de blocos de EPS.



Fonte: Esmaeli *et al.* (2017).

Os autores desenvolveram uma série de modelagens numéricas, considerando um modelo constitutivo *strain hardening* para as previsões quanto à deformação dos blocos de EPS. Em seguida, estudou-se a variação dos fatores de segurança do aterro, quanto ao deslizamento, utilizando o método de equilíbrio limite, considerando a variação das alturas do aterro e das condições de solicitação estática e dinâmica. Os autores demonstraram que o aterro projetado apresentou condições satisfatórias de fator de segurança, não somente para o cenário mais crítico, de maior altura, e considerando a solicitação sísmica, mas também para os demais cenários.

Além de avaliar a estabilidade da estrutura, os autores buscaram entender como as solicitações dinâmicas advindas do carregamento do trem a diferentes velocidades refletiriam na deformação da estrutura. Dentre seus resultados.Também, concluíram como estas deformações se comportam com as variações de altura do aterro, das cargas e velocidades do trem e variações de parâmetros de resistência da fundação. No entanto, os autores não deixam claro se estas deformações encontradas são adequadas para este projeto.

2.5.2 Performance dos Blocos de EPS frente aos ensaios laboratoriais

Sinnathamby *et al.* (2018), com o objetivo de avaliar a performance dos blocos de EPS, realizaram a coleta de amostras de blocos já implantados nas rodovias de Muurla e Jupperi, na Finlândia. Para observar seu desempenho e reciclabilidade, após 14 e 16 anos da construção das rodovias supracitadas, respectivamente, os autores coletaram amostras e executaram uma série de ensaios de laboratório e campo, avaliando as características e propriedades do material.

Os autores constataram que as amostras coletadas na rodovia de Muurla apresentaram valores similares aos parâmetros requeridos de projeto, para as propriedades mecânicas do material. Ainda, atingiram valores baixos para teores de umidade, mesmo nas amostras que tiveram em contato com as variações do lençol freático na região de coleta.

Quanto a rodovia Jupperi, ensaios executados nos blocos coletados após 16 anos de construção, como observado na rodovia de Muurla, em geral, o material ainda atendeu aos requisitos mínimos de projeto. Os ensaios apresentaram características baixas para absorção de água e valores de densidade e resistência a compressão satisfatórios.

Com a observação do bom desempenho, durante anos, destas rodovias analisadas, por meio das inspeções visuais e dos ensaios executados, o estudo constatou que estes blocos de EPS poderiam ser reutilizados, uma vez que os ensaios indicaram atendimento mínimo dos parâmetros de projeto. No entanto, os blocos de EPS que apresentaram deformações ou alterações de formato foram julgados como não úteis para uma posterior utilização na construção de aterros.

2.6 MODELAGEM NUMÉRICA

Este tópico visa abordar os assuntos relacionados ao comportamento dos blocos de EPS, a partir do uso de modelagem numérica. Serão abordados os assuntos referentes as possibilidades do uso de métodos numéricos e modelos constitutivos para descrição do seu comportamento.

Complementarmente, serão confrontadas as previsões de performance de modelagens numéricas realizadas em obras já instrumentadas, de maneira a verificar a confiabilidade destes modelos.

2.6.1 Métodos Numéricos e Modelos Constitutivos

Hazarika (2006) afirma que os estudos de tensão-deformação para o EPS podem ser categorizados em estudos de pequenas e grandes deformações. O autor relata que os estudos envolvendo grandes deformações, elementos em verdadeira grandeza, têm sido pouco estudados.

Os parâmetros mecânicos obtidos em amostras de laboratório, de tamanho reduzido, como afirma Negussey (2007), são minorados, o que desenvolveria projetos mais robustos ou mais a favor da segurança. Enquanto os estudos a partir de amostras de grandes dimensões, com a adoção de parâmetros reais, poderiam otimizar o projeto promovendo um melhor custo-benefício.

Os modelos constitutivos desenvolvidos para as pequenas deformações, segundo Hazarika (2006), envolvem métodos empíricos com o uso de modelos matemáticos de ajustes e aproximação. Estes métodos desprezam propriedades que, em grandes proporções, são importantes, tais como anisotropia e homogeneidade. Dentre as limitações exemplificadas pelo autor, é citado a importância da anisotropia na direção da fabricação dos blocos de EPS, variável não considerada em amostras de tamanho reduzido. Alguns dos modelos constitutivos desenvolvidos para pequenas deformações propõem uma relação de comportamento hiperbólico. Já Puppala (2019), por exemplo, demonstra que este modelo consegue descrever de maneira razoável o comportamento do material em verdadeira grandeza.

Para os modelos constitutivos considerando as grandes deformações, Hazarika (2006) afirma que o comportamento dos blocos de EPS podem ainda considerar o fenômeno do *creep*, onde o adensamento secundário é observado no modelo. Para este, o autor afirma que os modelos que melhor descrevem o material são os não-lineares visco-plástico ou visco-elástico. Modelos como de Findley (1976) consideram o *creep* e apresentam comportamento

hiperbólico/senoidal. O autor ainda relata que na aplicação de carregamentos rápidos, onde o *creep* pode ser desconsiderado, os modelos plásticos descrevem bem o comportamento dos blocos de EPS.

O item a seguir apresenta a aplicação da modelagem numérica e a comparação entre os recalques obtidos no modelo com as leituras dos instrumentos do aterro.

2.6.2 Modelagem Numérica com Blocos de EPS

Newman *et al.* (2010), a partir da construção de um aterro rodoviário com blocos de EPS, realizaram uma série de modelagens numéricas cujo objetivo foi o de prever o comportamento da estrutura. Estes resultados foram comparados com as leituras realizadas pelos extensômetros e células de carga, instalados em diversos pontos da estrutura. Os autores adotaram, para descrição do comportamento do material, um modelo bi-linear nas análises numéricas.

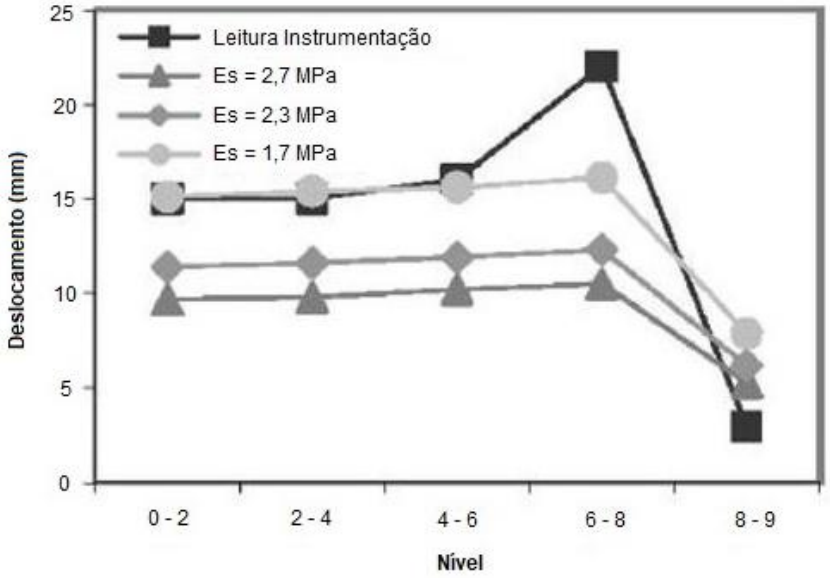
Foi considerado que o comportamento dos blocos seria marcado em dois momentos. Em um primeiro momento, à medida que as tensões fossem impostas na estrutura, o material se comportaria de uma maneira, até que os vazios entre os blocos de EPS fossem fechados. Este seria, então, o primeiro trecho da reta bi linear. Após este momento, a estrutura se comportaria como um bloco único. Negussey *et al.* (2001) também afirmam que há a necessidade de considerar este momento prévio ao fechamento dos vazios entre blocos de EPS na modelagem, mas que este comportamento seria não exatamente linear.

No modelo para previsão de recalques, são utilizados dois módulos de elasticidade, referentes a estes dois momentos, onde os valores referentes ao comportamento do primeiro momento podem ser variados. Enquanto o outro módulo de elasticidade é alterado pelo tipo do bloco de EPS utilizado, como levado em consideração por Negussey *et al.* (2001). Destaca-se que para este primeiro momento do modelo, devido à dificuldade de se estabelecer este valor, Newman *et al.* (2010) consideraram uma variação de valores sugerida e experimentada por Negussey *et al.* (2001) em projetos similares, com módulo de elasticidade (Es) entre 1,7 MPa e 2,7 MPa.

A modelagem numérica foi realizada utilizando o método de diferenças finitas, por meio do software FLAC. O autor considerou a disposição dos instrumentos em diversas posições na estrutura, designadas na Figura 8 e na Figura 9 como “nível”. A seção típica do aterro é composta, na porção mais inferior da estrutura, por uma camada de areia como base (Nível 0), seguida por camadas de blocos de EPS (Nível 0 ao Nível 9), laje de distribuição de cargas (LDC), base do pavimento composta por material granular (PCMG) seguido do pavimento de concreto (PC).

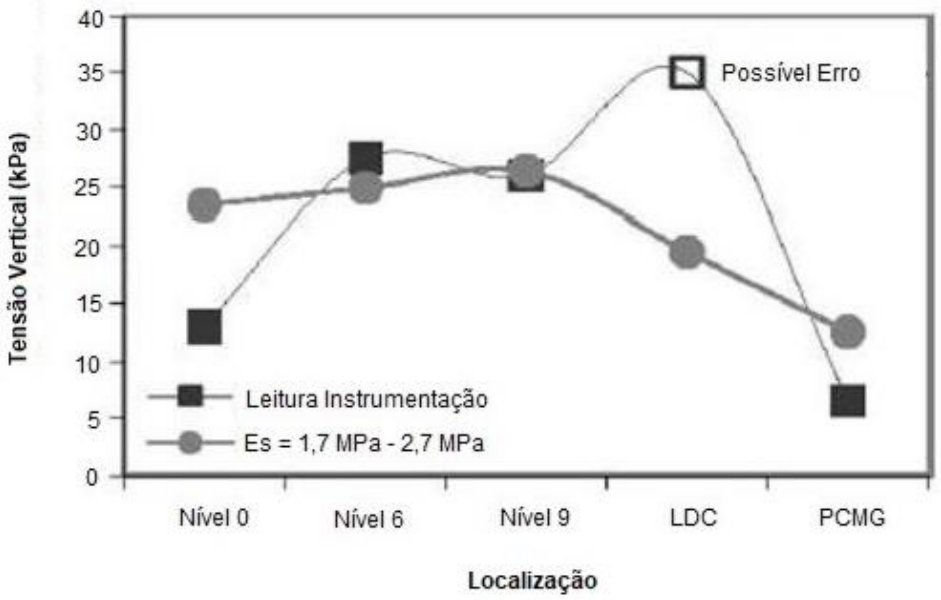
Os resultados obtidos nas análises numéricas e as leituras provenientes da instrumentação de campo são apresentadas na Figura 8 e Figura 9. Destaca-se que estes resultados foram obtidos, logo após a finalização das obras e considera somente o peso próprio da estrutura.

Figura 8 – Deslocamento Vertical – Modelagem Numérica x Instrumentação.



Fonte: Newman *et al.* (2010).

Figura 9 – Tensões Verticais – Modelagem Numérica x Instrumentação.



Fonte: Newman *et al.* (2010).

Como ilustrado pela Figura 8, a adoção do valor de 1,7 MPa, para o módulo de elasticidade inicial do bloco de EPS, descreve melhor o primeiro trecho do modelo bi-linear, e ainda, observa-se que há uma melhor aproximação dos recalques quando comparados àqueles obtidos pela instrumentação. Newman (2010) *et al.* afirmam que o comportamento linear obtido na região dos blocos de EPS (Nível 0-6) reflete um comportamento elástico linear do material. A região referente ao level 8-9 apresenta uma diferença entre resultados obtidos, sendo atribuída à diminuição da espessura dos blocos de EPS na região.

A Figura 9 mostra o comportamento das tensões na estrutura. Observa-se uma linearidade dos valores obtidos na região dos blocos de EPS, com tensões próximas a 25 kPa. Ainda, a tensão de 13 kPa é obtida na camada de base da estrutura, composta por uma camada granular. No entanto, observa-se que na laje de concreto, as tensões obtidas no modelo numérico e pela instrumentação são díspares. Os autores constataram que a célula de pressão nesta camada apontou resultados anômalos, em vários momentos, e concluíram que o instrumento era defeituoso e deveria ser desconsiderado. Adicionalmente, para a região denominada Nível 0, referente a camada de areia, as tensões obtidas no modelo foram superestimadas. Segundo os autores, pode não ter havido o contato uniforme na superfície entre a base de areia e os blocos de

EPS, possivelmente devido à curvatura da superfície dos blocos, o que justificaria a discrepância dos valores.

2.7 ENGENHARIA DE PAVIMENTOS, DIMENSIONAMENTO E BLOCOS DE EPS

De acordo com Nasem (2004), os métodos tradicionais de dimensionamento de pavimentos consideram o uso do EPS como uma camada de subleito da estrutura. Diante disto, este tópico tem por objetivo principal abordar os assuntos relacionados ao dimensionamento das estruturas de pavimento. São apresentadas algumas considerações de projeto e questões relevantes para o seu desenvolvimento. Ainda, questões relacionadas a ensaios, definição de parâmetros e tamanho das amostras são abordados da perspectiva da Engenharia de Pavimentos.

2.7.1 Considerações de Projeto e Dimensionamento

Para o dimensionamento de um aterro sobre solos moles deve-se atentar para as condições de ruptura durante a sua construção, além das suas condições de deformações pós construção.

Nesta perspectiva, o mesmo autor cita que a prática comumente aplicada no dimensionamento da estrutura é a verificação quanto aos Estados Limites de Serviço (ELS) e último (ELU). No aspecto rodoviário, o primeiro estaria relacionado aos desconfortos do usuário na rodovia, como surgimento de uma deformação excessiva, gerando patologias na estrutura como pavimento irregular ou trincas, mas que poderiam ser reparadas com alguma manutenção. Já o segundo, refere-se ao colapso da estrutura, seja por instabilidade ou falha por capacidade de carga da fundação, por exemplo. Estas verificações são realizadas por meio do cálculo de fator de segurança, que faz a relação entre as forças resistentes e as atuantes na estrutura.

Nasem (2004) ainda discorre sobre o método tradicional para dimensionamento de estruturas com blocos de EPS, denominada Tensão Admissível de Projeto (Allowable Stress Design – ASD), onde um fator de

segurança é incorporado e aplicado ao Estado de Limite Último. Huang e Negussey (2011) afirmam que neste método, os blocos são dimensionados de forma que a máxima tensão imposta seja inferior à plastificação do material.

O autor ainda apresenta uma sequência de verificações a serem realizadas no projeto da estrutura, e que envolvem, dentre elas, as seguintes etapas: investigações preliminares, seleção do EPS, definição da geometria e de deformação aceitáveis, definição do fator de segurança para possíveis falhas relacionadas a capacidade de carga, estabilidade do talude, tombamento, ação das forças de elevação hidrostática, ações do vento e forças sísmicas, além da definição do tipo de pavimento.

Huang e Negussey (2011) afirmam que, dentre os métodos de dimensionamento de pavimentos mais atuais onde são aplicados os blocos de EPS, são adotados métodos empíricos ou até mesmo o uso do conceito de Tensão Admissível. Segundo Bhuinyan *et al.* (2019), para o dimensionamento, utilizando métodos empírico ou mecanicista-empírico são necessárias as definições de alguns parâmetros como o de módulo de resiliência e o índice de suporte Califórnia (CBR), por exemplo. No Tópico 2.7.2, são apresentadas algumas considerações na definição destes parâmetros.

2.7.2 Considerações dos Parâmetros para Dimensionamento das Estruturas de Pavimentos

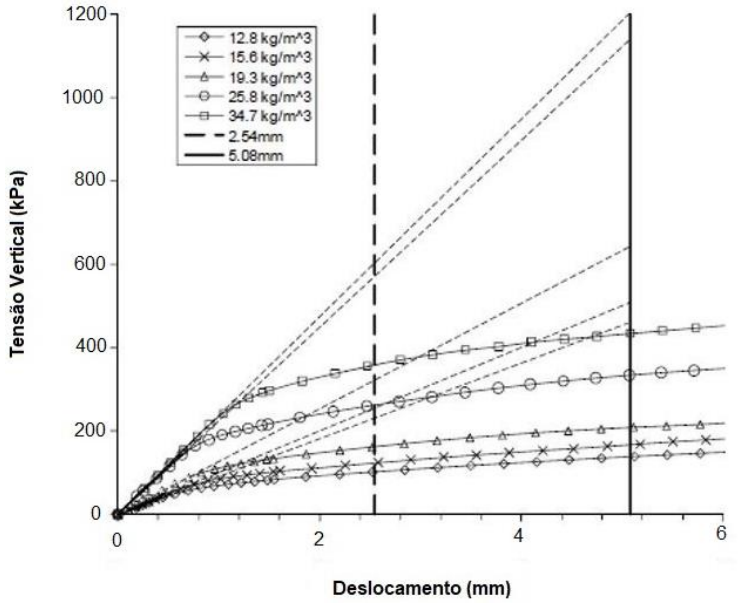
O método padrão dos ensaios para definição do CBR, segundo Huang e Negussey (2011), não são aplicáveis aos blocos de EPS, uma vez que as tensões previstas nos ensaios superam as tensões admissíveis destes blocos localmente na região do pistão. Ainda, alguns dos procedimentos de ensaio não são aplicáveis aos blocos de EPS, como são nos ensaios convencionais com solos. Adicionalmente, como constatado por Beju e Mandal (2018) e Nasem (2004), a maioria dos resultados obtidos para os ensaios de CBR e Módulo de Resiliência são inferiores aos requeridos em várias metodologias de dimensionamento de pavimentos.

Huang e Negussey (2011) relatam que durante os ensaios, para as medidas de CBR para solos, nas profundidades de 2,5 mm e 5,0 mm, a curva de

deslocamento e tensão deveria se manter no trecho linear de comportamento, onde tal índice de suporte é obtido. No entanto, é observada a falha por punção nestas profundidades, superando o trecho elástico, e alcançando, então, o comportamento plástico do material, como pode ser observado na Figura 10.

Com uma metodologia adaptada para obtenção do CBR, denominada CBR Modificado, estes autores extrapolaram linearmente as leituras para as profundidades do teste, associando com sua tensão correspondente, obtendo valores de CBR superiores. Com as adaptações propostas nesta metodologia, o CBR estimado se ajusta aos critérios e valores mínimos estipulado por métodos de dimensionamento. Em alguns casos, os autores obtiveram o dobro dos valores encontrados quando comparados ao método tradicional de obtenção deste parâmetro. A Figura 10 apresenta os resultados dos ensaios de CBR em blocos de EPS de variadas massas específicas e suas extrapolações lineares.

Figura 10 – Ensaios CBR em blocos de EPS.

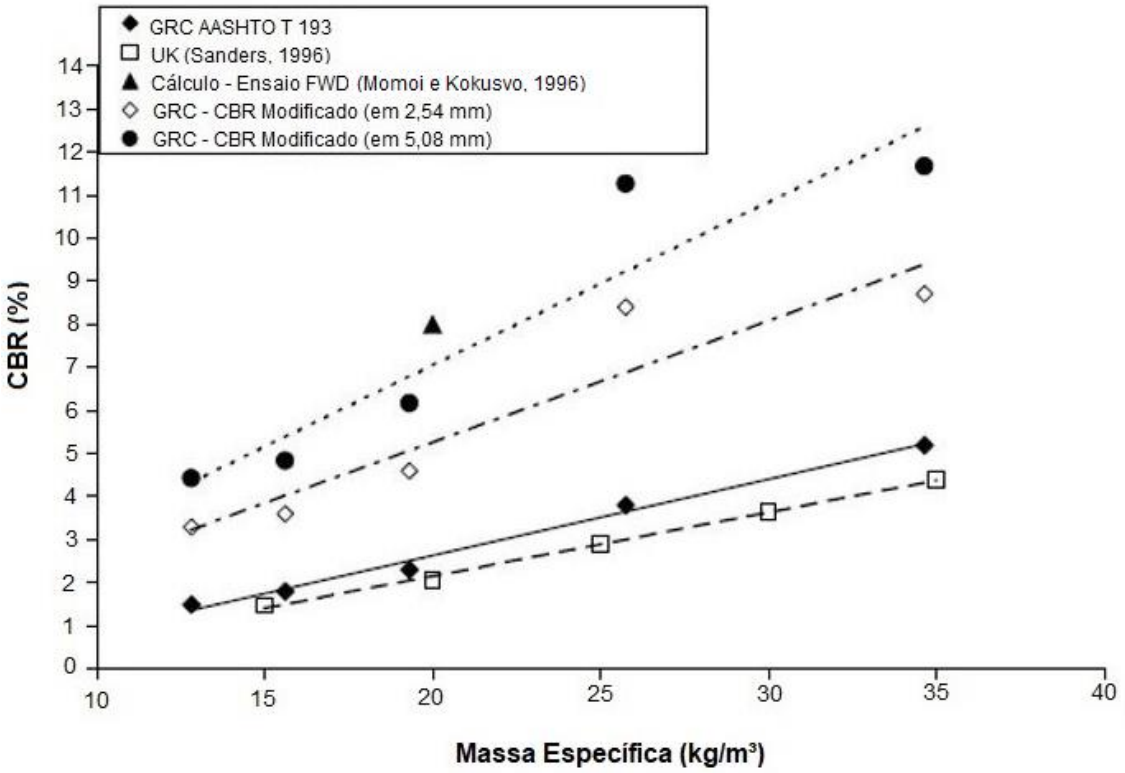


Fonte: Huang e Negussey (2011).

A interpretação dos valores considerando o CBR Modificado dos ensaios da Figura 10 são apresentadas na Figura 11. Adicionalmente, ainda na Figura 11, com o propósito de validar a metodologia, Sanders (1996) e Momoi e Kokusyo (1996) realizaram retro análises para obtenção do CBR, a partir do teste de *Falling Weight Deflectometer* (FWD). Como mostrado na Figura 11, nota-se que os cálculos para CBR modificado e os resultados da retro análise realizada

convergiram para valores mais próximos, sugerindo que a interpretação considerando a metodologia modificada possui resultados satisfatórios.

Figura 11 – Valores de CBR para Blocos de EPS.



Fonte: Huang e Negussey (2011).

O autor ainda recomenda que quando o pavimento for dimensionado por métodos empíricos, com o uso do CBR modificado, que sejam seguidos os limites de tensões suportados pelo EPS.

Quanto ao parâmetro de dimensionamento denominado módulo de resiliência, os resultados de uma série de ensaios triaxiais cíclicos apresentados por Duskov (1997), indicaram valores inferiores ao requerido para o dimensionamento de pavimentos, baseando-se nos métodos empíricos. No entanto, Huang e Negussey (2011) afirmam que inúmeras rodovias foram construídas com blocos de EPS e apresentam boa performance. Adicionalmente, por meio das retro análises a partir de testes FWD, de acordo com Momoi e Kokusyo (1996), os valores obtidos para o módulo de resiliência apresentaram-se superiores aos resultados comumente encontrados.

De acordo com as estimativas de Huang e Negussey (2007), realizadas por meio de análises numéricas e considerando a laje de concreto, encontraram-

se módulos de resiliência similares aos solos de classificação A-4, de acordo com as orientações da AASHTO, ou equivalente a um material competente, o que sugeriria a performance aceitável dos blocos de EPS associados às lajes de concreto.

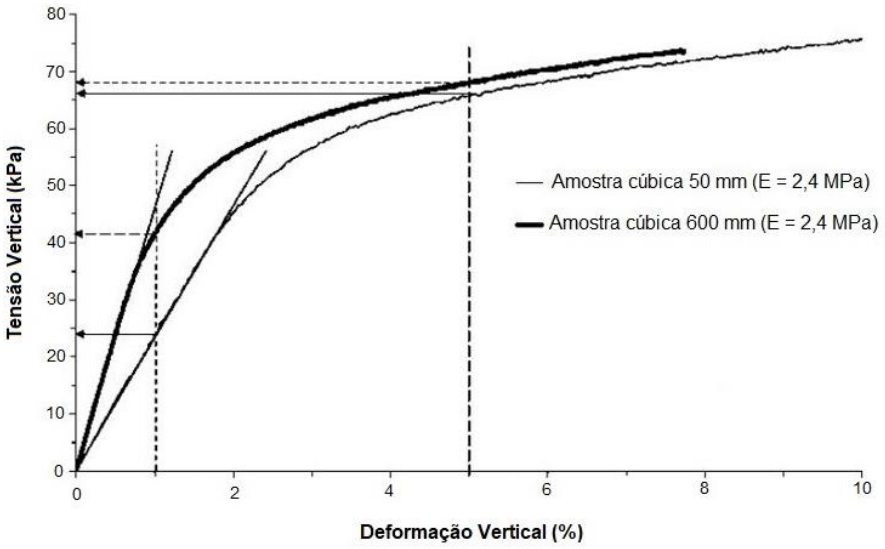
2.7.3 Relação dos parâmetros e efeito devido ao tamanho das amostras

De acordo com Hazarika (2006), os estudos de comportamento do EPS podem ser classificados em pequenas e grandes deformações, a depender das dimensões do objeto em estudo. Complementarmente, o autor afirma que por meio dos ensaios de laboratório, como de resistência à compressão, tanto a forma quanto as dimensões influenciam no comportamento da tensão e deformação do material.

Elragi *et al.* (2001) afirmam que as propriedades e valores de projeto são baseados em ensaios de laboratório de tamanho reduzido, geralmente, por meio de ensaios em amostras cúbicas padronizadas de 50 mm de aresta. No entanto, estes autores ainda constatam que as performances observadas sugerem que os parâmetros obtidos nas amostras reduzidas, de laboratório, têm superestimado as deformações em campo.

Negussey (2007) cita estudos que sugerem maior módulo de elasticidade, do que geralmente é adotado com o uso de amostras reduzidas. A Figura 12 apresenta a comparação entre os módulos de elasticidade obtidos em amostras cúbicas de 50 mm, reduzida, e de 600 mm, de grandes dimensões. Estas amostras possuem massa específica de 15 kg/m³ e foram testadas a uma taxa de deformação de 10% por minuto. Nota-se um aumento de 75% no valor do parâmetro, variando de 2,4 para 4,2 MPa. Estes valores de módulo de elasticidade estão relacionados às deformações de 1%. Destaca-se que a curva tensão x deformação, para a maior amostra, baseia-se em leituras obtidas na região central da amostra, distante de possíveis efeitos de borda da placa de carregamento.

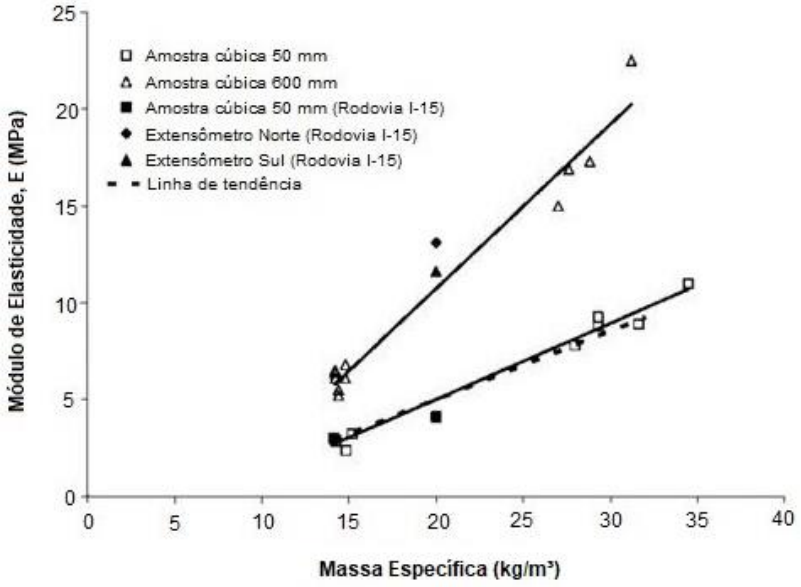
Figura 12 – Ensaio de Compressão de amostras cúbicas de 50 mm e 600 mm de aresta dos blocos de EPS.



Fonte: Negussey (2007).

Na Figura 13, são apresentados os resultados de módulo de elasticidade de amostras de laboratório e amostras de grandes dimensões, provenientes de trechos rodovia I-15, construída na cidade de Salt Lake, nos Estados Unidos. Destaca-se uma maior concordância de resultados entre as amostras cúbicas de 600 mm para os blocos de EPS utilizados na construção da rodovia.

Figura 13 – Módulo de Elasticidade x Densidade – Amostras de Reduzidas (Laboratório) e de Grandes Dimensões (Campo).



Fonte: Elragi *et al.* (2000).

Os resultados provenientes das amostras de laboratório apresentam-se reduzidos, e tal diferença de valores é justificado devido ao efeito de borda. Negussey (2007) afirma que não há como impor condições de uniformidade simultânea de tensão e deformação na interface entre dois materiais de rigidez díspares. Isto é, quando nos ensaios de laboratório, a placa de carregamento impõe uma distribuição uniforme de deformação sobre a área da amostra, ocorre uma não uniformidade de tensões, devido à diferença de rigidez da placa e do EPS, gerando maiores tensões nas bordas das amostras. Desta forma, a ruptura ou a plastificação ocorre gerando valores inferiores de módulo de elasticidade, bem como valores de deformação exagerados.

3 ATERRO EXPERIMENTAL

O propósito deste tópico é de apresentar os itens relevantes do projeto objeto de estudo. O trecho experimental apresentado nesta dissertação baseia-se nos trabalhos desenvolvidos por Avesani Neto (2018) e Avesani Neto e Rodrigues (2021). A seguir, serão detalhados os aspectos de projeto, as características e propriedades dos blocos de EPS e subleito, a instrumentação e os ensaios realizados no aterro experimental. Por fim, serão apresentados os materiais e métodos.

3.1 SOBRE O TRECHO EXPERIMENTAL

Um aterro rodoviário experimental composto por blocos de EPS foi executado na cidade de Ribeirão Pires, no Estado de São Paulo. A Figura 14 apresenta a localização do trecho experimental.

Figura 14 – Locação do Trecho Experimental.

Fonte: Avesani Neto (2018).

O aterro experimental realizado possui as seguintes dimensões: 31,4 m de comprimento, 10,8 m de largura e 1,8 m de altura. O aterro foi construído após uma limpeza superficial do solo, seguida por um cobrimento da área com o uso de material drenante de espessura 200 mm e recoberto por geotêxtil.

Os blocos de EPS utilizados possuíam a massa específica de 22 kg/m³, com dimensões de 4 m x 1 m x 0,4 m e 2 m x 1 m x 0,4 m. Estes blocos foram dispostos em camadas intercaladas, associados a utilização de conectores de metal, para auxílio no travamento dos blocos. Foi aplicada a manta polietileno, para impermeabilizar os blocos de EPS contra possíveis reações químicas quando em contato com os derivados de petróleo.

Desta forma, após esta sucessão de etapas, o pavimento flexível foi construído. Na Figura 15 são apresentados os registros fotográficos das etapas construtivas do aterro rodoviário.

Figura 15 – Etapas de Construção – Aterro Experimental.

a) Limpeza, regularização e compactação do terreno natural.

b) Execução do colchão drenante na base.

c) Assentamento da 1ª fiada de Blocos de EPS.

d) Instalação das placas metálicas de ligação e assentamento das fiadas subsequentes.

e) Instalação e conformação da manta impermeabilizante.

f) Execução do pavimento.

g) Execução do aterro de solo para confinamento lateral.

h) Execução do aterro de solo para confinamento lateral.

Referência: Avesani Neto (2018).

Para um dimensionamento preliminar do pavimento, utilizou-se a metodologia da Prefeitura de São Paulo (IP-05, 2004). Para este dimensionamento, os blocos foram considerados como subleito da estrutura sendo adotado um valor de CBR de 6% para este material. Ressalta-se que este valor foi obtido por meio da metodologia desenvolvida por Huang e Negussey (2011), descritas no tópico 2.7.2. Para o número equivalente de operações de eixo padrão adotou-se 2 x 10^6, referente a um tráfego meio pesado e uma camada de 100 mm de mistura de asfalto a quente de granulometria aberta (CBUQ) sobre uma camada de 30 cm de brita graduada tratada com cimento (BGTC). Para confinamento dos blocos de EPS foi construído um aterro com taludes de 1V:2H, de maneira a proteger os blocos de EPS contra possíveis ataques ou intempéries. A Figura 16 apresenta o pavimento acabado.

Figura 16 – Pavimento Finalizado.

Fonte: Avesani Neto e Rodrigues (2021).

3.2 INVESTIGAÇÕES E PARÂMETROS GEOTÉCNICOS

De acordo com as investigações geológico-geotécnicas realizadas, a região conta com a existência de solos moles. A região é caracterizada por camadas de silte arenoso e argila siltosas com presença de matéria orgânica de consistência mole.

Uma campanha de investigação geológico-geotécnica de ensaios de laboratório e campo foi realizada. Os ensaios abrangem sondagem à percussão e ensaios de caracterização do material, realizado pelo Laboratório de Mecânica dos Solos da EP-USP. A partir da campanha de ensaios de laboratório e campo realizados, definiu-se as principais características do solo de fundação. Os resultados destes ensaios são apresentados, em resumo, na Tabela 1.

Tabela 1 – Parâmetros Geotécnicos – Subleito.

Parâmetros	Resultados
Peso Específico Natural	15,3 kN/m³
Peso Específico dos Sóldos (kN/m³)	27,6 kN/m³
Teor de Umidade Natural (%)	42 %
Granulometria Completa	50% silte, 40% argila e 10% areia
Limites de Atterberg	LL 55%, LP 32% e IP 23%
Classificação do Solo	USCS - Silte de alta compressibilidade (MH) HRB – Solo A-7-1
SPT	2 a 5 golpes

Fonte: Avesani Neto e Rodrigues (2021).

As propriedades dos blocos de EPS foram estabelecidas pela especificação técnica disponibilizada pela fabricante. Estes valores são apresentados na Tabela 2. No Anexo são apresentados a curva de distribuição granulométrica identificada no furo SP 1, referente ao local onde a estrutura foi construída, cujo resultado descreve um material silte arenoso. Além de apresentar figuras da região de fundação da estrutura, execução do ensaio e boletim de sondagem.

Tabela 2 – Propriedades do bloco de EPS.

Parâmetros	Resultados
Massa Específica (kg/m³)	$23,3 \pm 0,6$
Resistência à compressão - 1% (kPa)	$50,5 \pm 1,8$
Resistência à compressão - 5% (kPa)	$118,3 \pm 0,27$
Resistência à flexão (kPa)	$305,9 \pm 19,8$
Índice de Oxigênio	$24\% \pm 0,15\%$

Fonte: Avesani Neto e Rodrigues (2021).

3.3 TESTE DE CARGA E INSTRUMENTAÇÃO

Foram realizados Teste de Carga (TC) para verificação do comportamento das tensões nas diversas profundidades da estrutura. Para aplicação das cargas, utilizou-se um caminhão de seis eixos, com as distribuições de cargas por meio de um eixo simples de 58,8 kN, um eixo duplo

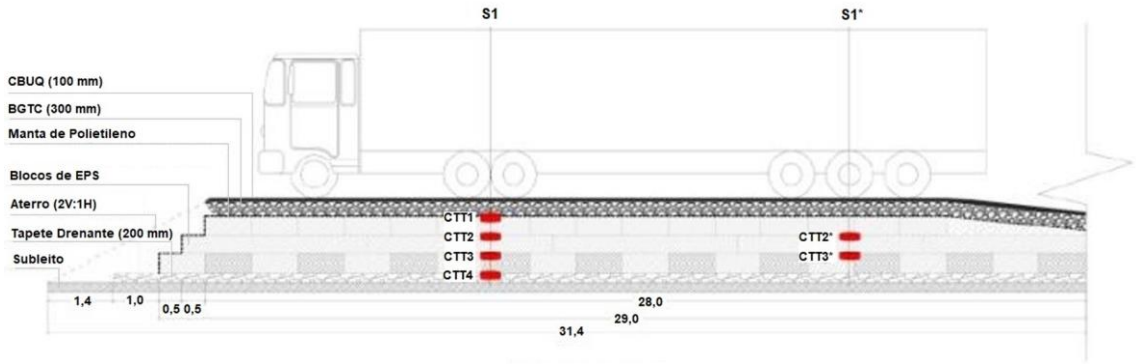
de 176,7 kN e um eixo triplo de 255 kN, totalizando uma carga de 490,5 kN. A Figura 17 apresenta o veículo utilizado para o TC.

Figura 17 – Veículo Posicionado durante o Teste de Carga (TC).

Fonte: Avesani Neto (2018).

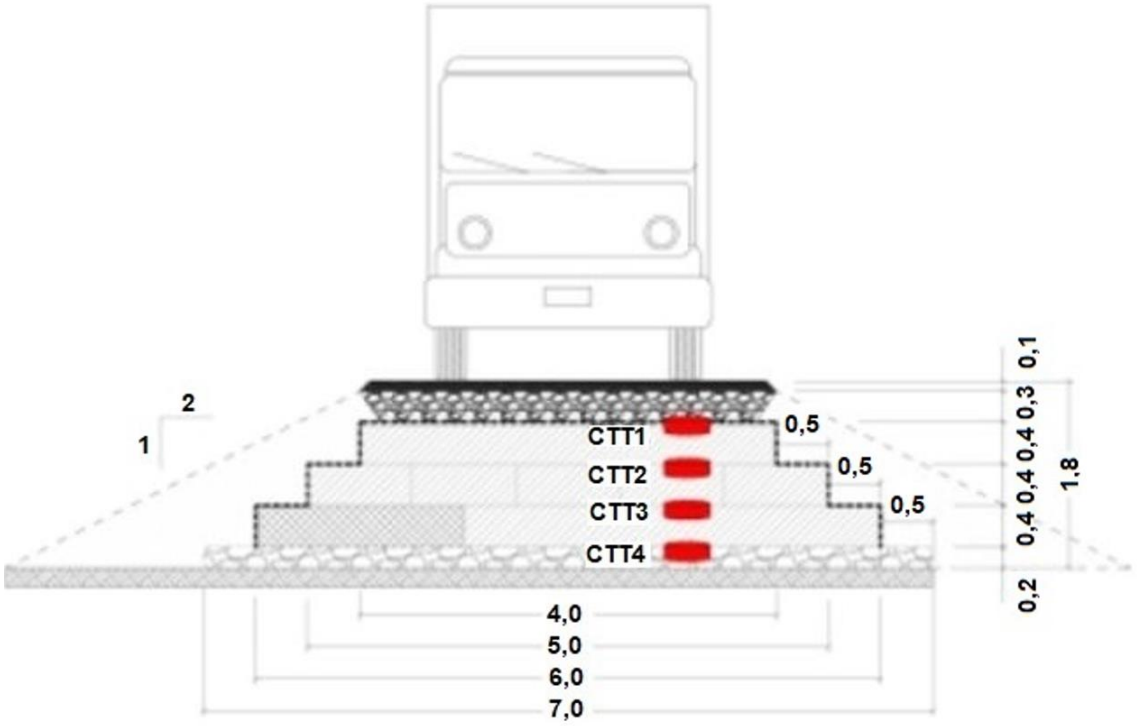
Para obtenção das leituras de tensões, o aterro experimental foi instrumentado com as células de tensão total (CTTs). As CTTs foram instaladas em duas seções (S1 e S1*) e na interface de diferentes camadas, sendo então: entre a camada de BGTC e blocos de EPS, entre blocos de EPS e entre o tapete drenante e blocos EPS. A Figura 18 e Figura 19 apresentam a localização das CTTs instaladas nas seções S1 e S1* em diferentes profundidades.

Figura 18 – Disposição das CTTs – Perfil Longitudinal.



Fonte: Avesani Neto e Rodrigues (2021).

Figura 19 – Disposição das CTTs – Seção Transversal.



Fonte:Avesani Neto e Rodrigues (2021).

O TC foi realizado a partir de variações no posicionamento do veículo. Primeiramente, realizaram-se as leituras considerando somente o peso próprio da estrutura, sem o posicionamento do veículo, para calibração das células de tensão total (CTTs). Em seguida, o veículo foi posicionado de duas maneiras, denominadas neste trabalho como cenário I e cenário II.

No cenário I, o veículo foi centralizado com o eixo duplo sobre as CTTs da seção 1, consequentemente, o eixo triplo foi posicionado na seção S1*. Já no cenário II, posicionou-se o veículo centralizando o eixo triplo sobre as CTTs da seção 1, enquanto o eixo duplo foi posicionado na seção S1*. A temperatura durante o teste permaneceu no intervalo de 30°C a 35°C. Após posicionamento do veículo, as leituras das tensões foram realizadas.

3.4 ENSAIO DE VIGA BENKELMAN

De acordo com Vellasco (2018), a Viga Benkelman (VB) tem por objetivo principal a medição da deflexão do pavimento mediante a aplicação de tensões.

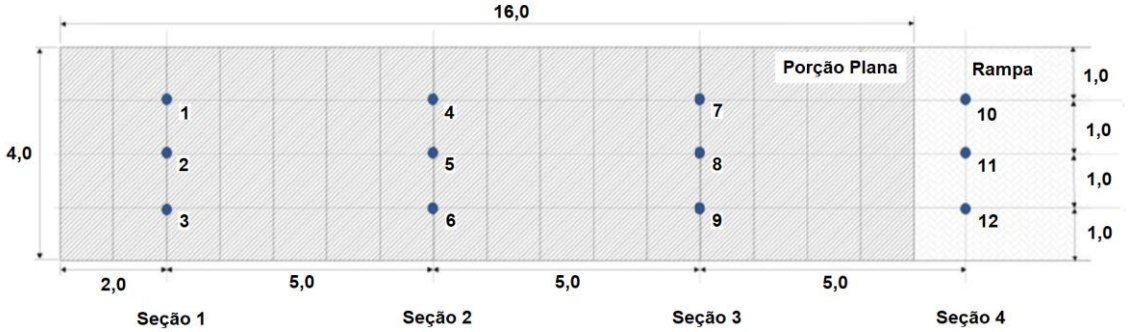
Embora existam outros parâmetros importantes para avaliação da condição estrutural de um pavimento, a determinação da deflexão permite determinar a rigidez e módulo de elasticidade do material. A medida da deflexão é realizada a partir da medição da deflexão imposta pelas tensões provocadas pelo passar dos pneus duplos de um veículo em movimento.

Para o projeto em estudo, utilizou-se um veículo com uma carga de eixo de 82 kN e pressão dos pneus de 560 kPa. O teste foi realizado em doze locais distribuídos ao longo de três eixos, no centro e distantes de um metro do limite do aterro, em quatro seções ao longo do aterro (região plana e rampa). A temperatura registrada na realização do teste variou entre 27°C e 35°C. A Figura 20 apresenta o veículo utilizado e a Figura 21 apresenta o local de ensaio.

Figura 20 – Ensaios Executados no Aterro Experimental.

Fonte: Avesani Neto (2018).

Figura 21 – Disposição dos Pontos da VB.



Fonte: Avesani Neto e Rodrigues (2021).

3.5 MATERIAIS E MÉTODOS

Os resultados dos ensaios executados no aterro experimental, para ambos o ensaio de viga Benkleman (VB) e Teste de Carga (TC), foram avaliados, reproduzidos e verificados por meio da modelagem numérica 3D, com o uso do Método dos Elementos Finitos (MEF), constituindo os vários cenários de análise desenvolvidos. Dentre suas variações, considerou-se a utilização dos parâmetros de amostras reduzidas e de grandes dimensões para os blocos de EPS. Uma vez que, como mencionado por Negussey (2007), Hazarika (2006), entre outros autores, os blocos de EPS apresentam parâmetros mecânicos minorados, quando obtidos por meio de ensaios de laboratório, usualmente empregados em amostras reduzidas. A utilização dos parâmetros, definidos a partir de amostras de grande dimensões, nos resultados da modelagem numérica confirmaria o alinhamento entre as tensões e deformações produzidas e constatadas no aterro experimental construído.

Para simulação do VB e TC nas modelagens 3D, considerou-se a utilização da imposição das cargas provenientes do veículo completo (VC), do eixo único (E) e do semi-eixo (SE) nas análises. Além da modelagem dos ensaios performados no aterro experimental, foram realizadas análises para obtenção dos parâmetros usualmente requeridos para o dimensionamento de um pavimento. Também, contando com as variações contemplando o uso do VC, E e SE.

Os valores dos parâmetros de comportamento dos materiais foram obtidos por meio de investigações de laboratório e campo para a fundação. Já para os blocos de EPS, estes valores foram obtidos em referências bibliográficas e em especificações técnicas do fabricante.

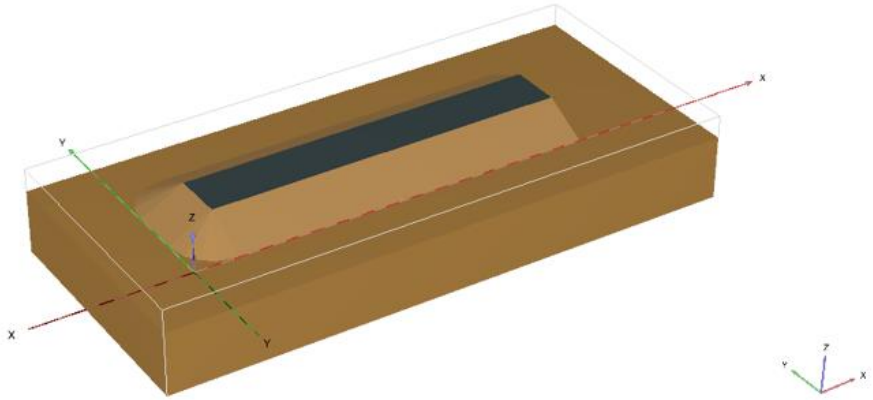
Os pontos principais explorados nesta pesquisa envolvem, portanto, a utilização do (MEF) para simulação dos ensaios performados no aterro experimental para comparação de parâmetros de comportamento da estrutura, tais como tensões, deslocamentos e deformações.

4 MODELAGEM GEOMECÂNICA DA ESTRUTURA

4.1 GEOMETRIA E MALHA DO MODELO 3D

O modelo 3D foi desenvolvido de acordo com as dimensões da estrutura construída, conforme mencionado no item 3.1, sendo 31,4 m de comprimento (eixo x), 10,8 m de largura (eixo y) e 1,8 m de altura (eixo z). A Figura 22 apresenta o modelo desenvolvido.

Figura 22 – Modelo 3D – Aterro Experimental.



Fonte: Próprio Autor.

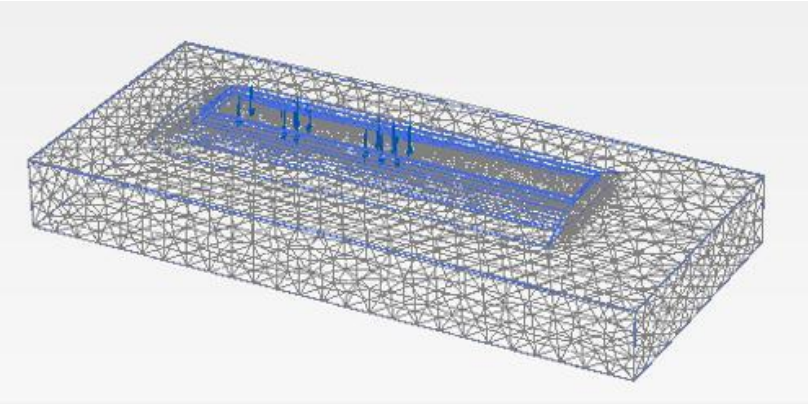
A geração da malha nas análises de tensão e deformação, no método de elementos finitos, é um passo importante, pois, os elementos devem ser pequenos o suficiente para serem precisos na captação das mudanças de tensões ou deformações em pontos específicos no modelo. Mas, ao mesmo tempo, deve-se atentar a quantidade de nós criados, pois, durante a análise, podem gerar um tempo expressivo para cálculo dos resultados.

As análises de simulação dos TC e VB utilizaram o Plaxis CE V20 desenvolvido pela Bentley, na versão 3D. Na criação da malha, adotou-se os elementos tetraédricos com 10 nós.

O software ainda apresenta a condição de variação na distribuição dos elementos na geometria do modelo entre *very coarse* e *very fine*, sendo estas condições de variação associadas ao refinamento da malha. Para estas análises, considerou-se a distribuições dos elementos como *fine*, devido à necessidade de precisão para as diversas leituras nas diferentes profundidades

do modelo. De maneira ilustrativa, a Figura 23 apresenta a malha do modelo desenvolvido. No Apêndice, ainda são apresentadas as malhas das diversas análise elaboradas.

Figura 23 – Malha da Modelo 3D.



Fonte: Próprio Autor.

4.2 CONDIÇÕES DE CONTORNO

As análises de tensão e deformação estão associadas à imposição de dois tipos de condições de contorno, são elas condicionadas à força ou ao deslocamento impostos. Isto é, para realização do modelo de cálculo, devem ser aplicados os limites ou contornos onde serão considerados deslocamentos ou forças nulas, de forma que o sistema encontre o equilíbrio estático.

Desta forma, as condições de contorno aplicadas no modelo em estudo são de permissão do deslocamento livre, nas três direções da face superior do modelo. Em contrapartida, na face inferior, base do modelo, consideraram-se fixos os deslocamentos em todas as direções. Ainda, nas outras quatro faces de fechamento do modelo, nas seções verticais, foram considerados os deslocamentos perpendiculares restritos.

Já as condições de contorno quanto à percolação de água, permitiu-se a dissipação da poropressão nas faces laterais do modelo, nas regiões de seção vertical. E para face inferior, base do modelo, o fluxo de água foi restringido.

4.3 PARÂMETROS GEOMECÂNICOS

O modelo 3D é constituído de sete materiais, sendo composto pela fundação, tapete drenante, blocos de EPS, aterro lateral, brita graduada tratada com cimento (BGTC) e o concreto betuminoso usinado a quente (CBUQ). Os parâmetros mecânicos destes materiais foram obtidos por meio de ensaios de laboratório e referências biliográficas.

Os parâmetros de peso específico do tapete drenante (brita) e CBUQ e os parâmetros de referência do material aterro lateral, foram obtidos em Pinto (2006), Das (2013) e Bowles (1986). Para os parâmetros de pequena escala adotados para os blocos de EPS, utilizaram-se os valores citados nos estudos de Nasem (2004). Já para os parâmetros de grande escala, para os blocos de EPS, foram obtidos a partir da calibragem apresentada por Avesani Neto e Rodrigues (2021). Considerou-se nas análises, o modelo Elástico Linear para descrição do comportamento dos materiais. A Tabela 3 apresenta os parâmetros mecânicos dos materiais adotados. A Figura 24 apresenta os materiais na seção do modelo 3D.

Tabela 3 – Parâmetros Geomecânicos – Modelagem Numérica.

Camada	**Parâmetros Geotécnicos**		
	Peso Específico (kN/m³)	**Módulo de Elasticidade (MPa)**	**Coeficiente de Poisson**
Fundação[1]	15,3	25	0,45
Tapete Drenante (brita)[3]	18,0	200	0,35
Blocos de EPS (PAGD*)[1]	0,23	14	0,25
Blocos de EPS (PAE*)[2]	0,23	4	0,10
Aterro Lateral[3]	18,0	50	0,30
BGTC[1]	24,0	6000	0,20
CBUQ[1]	24,0	1500	0,40

[1] Avesani Neto e Rodrigues (2021).

[2] Nasem (2004).

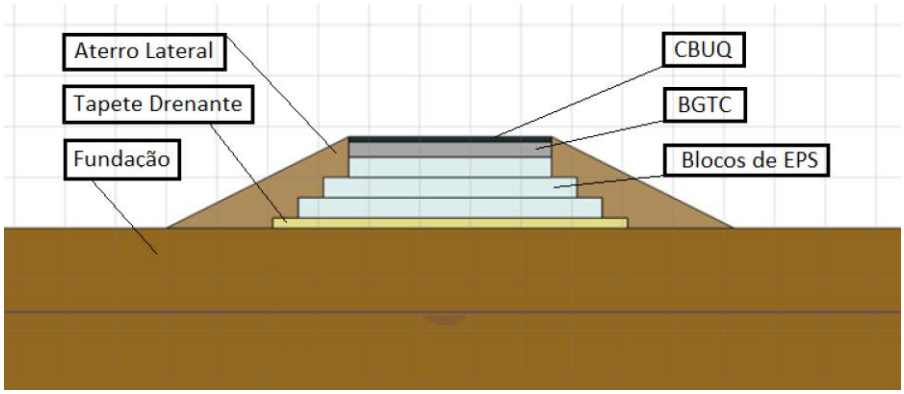
[3] Pinto (2006), Das (2013) e Bowles (1986).

**PAGD – Parâmetros Amostras de Grandes Dimensões.*

***PAE – Parâmetros de Amostras Reduzidas.*

Fonte: Próprio Autor.

Figura 24 – Seção Típica – Modelo 3D.



Fonte: Próprio Autor.

4.4 CENÁRIOS DE MODELAGEM

A modelagem numérica foi desenvolvida para três propósitos. O primeiro, para simulação das tensões obtidas durante o Teste de Carga (TC). O segundo, para a simulação dos resultados referente ao ensaio de Viga Benkelman (VB). Já o terceiro, a simulação teve por objetivo obter parâmetros gerais para dimensionamento de pavimentos.

As variações nestas análises numéricas compreenderam, basicamente, em variações nos parâmetros mecânicos dos blocos de EPS e variações das cargas aplicadas à estrutura. Além da variação da obtenção do parâmetros de dimensionamento, a depender do posicionamento da roda do veículo.

4.4.1 Teste de Carga (TC)

Para a simulação do TC foram desenvolvidos dois cenários de posicionamento de um veículo reboque de seis eixos, para distribuição do carregamento na estrutura. É importante destacar que a imposição das cargas do veículo foi realizada de acordo com as variações de cada um dos cenários, onde foram aplicadas as cargas do veículo completo (VC), do eixo único (E) e do semi-eixo (SE). Além das variações dos parâmetros dos blocos de EPS, para cada um dos cenários.

Conforme mencionado no tópico 3.3, o cenário I considerou a passagem do veículo com as cargas do eixo duplo na seção S1 e eixo triplo na seção S1*.

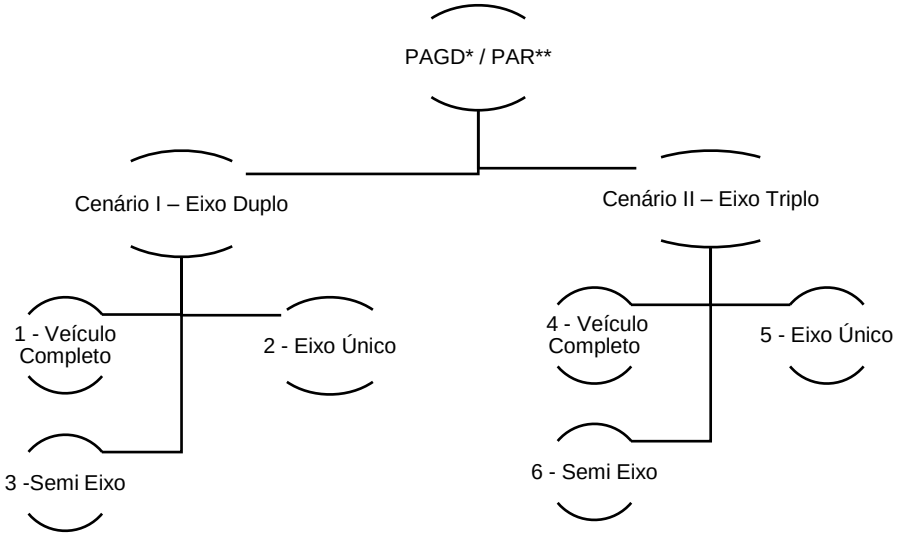
O veículo foi, então, posicionado sobre as células de pressão total onde foi aplicado a carga equivalente a 176,5 kN (valor eixo duplo) na seção principal (seção S1) e, consequentemente, do eixo triplo com carga equivalente a 255 kN na seção secundária (S1*). Foi estabelecido a carga de 22,1 kN por roda do eixo duplo, enquanto para o eixo triplo foi de 21,3 kN por roda.

Em seguida, no cenário II, foi considerado a aplicação das cargas do eixo triplo sobre a seção S1, e, consequentemente, as cargas do eixo duplo na seção S1*.

A

Figura 25Figura 25 apresenta o esquema das análises realizadas. Foram realizadas um total de 12 análises para as simulações do TC. Para cada variação do parâmetro dos blocos de EPS (PGE e PPE), foram realizadas o total de 6 análises, enumeradas como mostrado na Figura 25.

Figura 25 – Caso Esquemático – Variações e modelagem do Teste de Carga.



**PAGD – Parâmetros Amostras de Grandes Dimensões.*

***PAE – Parâmetros de Amostras Reduzidas.*

Fonte: Próprio Autor.

4.4.2 Ensaio de Viga Benkelman (VB)

Para a modelagem do ensaio VB, considerou-se a aplicação do carregamento de eixo de 82 kN, de acordo com as orientações de performance do ensaio pela norma de referência do Departamento Nacional de Estrada e

Rodagem (DNER-ME024). No modelo, consideraram-se as cargas de 20,5 kN por roda.

A modelagem contemplou as variações dos parâmetros dos bloco de EPS, considerando a utilização das cargas do VC, E e SE nas análises, fazendo-se as simulações como apontadas no Item 3.5 desta dissertação.

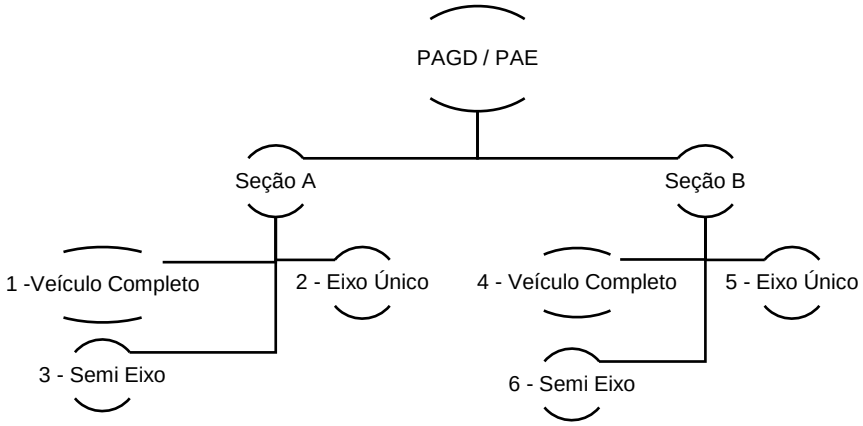
4.4.3 Parâmetros de Dimensionamento de Pavimentos

Foram desenvolvidas as análises numéricas para obtenção dos principais parâmetros para dimensionamento de pavimentos. Estes parâmetros são o de deslocamento na superfície da estrutura, deformações de tração inferior da camada asfáltica e deformação de compressão vertical no topo do subleito. Ainda, foram obtidos as tensões e deformações na região dos blocos de EPS.

No modelo foi considerado a utilização das cargas provenientes do veículo tipo utilizado no ensaio de VB, conforme apontado pela norma de referência do Departamento Nacional de Estrada e Rodagem (DNER-ME024), com carregamento de eixo de 82 kN.

O modelo esquemático para as variações das análises para a obtenção dos parâmetros para dimensionamento de pavimentos é apresentado na Figura 26. Dentre as variáveis das análises desenvolvidas, obteve-se estes parâmetros de dimensionamento contando com a posição da roda do veículo. Isto é, a obtenção destes parâmetros foi realizada ora no centro geométrico entre rodas, posicionamento A, ora sobre o eixo da roda interna, posicionamento B, conforme apontado pela Figura 27. Foram realizadas um total de 12 análises de tensão-deformação, para obtenções de parâmetros para dimensionamento de pavimentos.

Figura 26 – Caso Esquemático – Variações e modelagem para Parâmetros de Dimensionamento de Pavimentos.

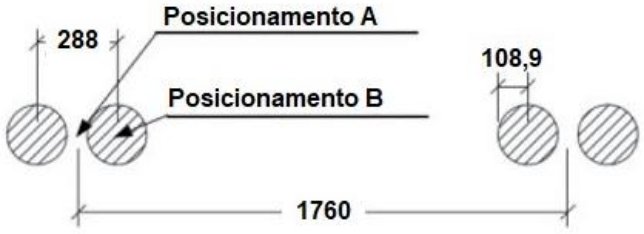


**PAGD – Parâmetros Amostras de Grandes Dimensões.*

***PAE – Parâmetros de Amostras Reduzidas.*

Fonte: Próprio Autor.

Figura 27 – Variação da obtenção dos Parâmetros de Dimensionamento de Pavimentos de acordo com a posicionamento A e B - unidades em mm.



Fonte: Avesani Neto e Rodrigues (2021).

5 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

5.1 TESTE DE CARGA

5.1.1 Análise dos resultados do ensaio

Os resultados provenientes das leituras das células de tensão total (CTTs), instaladas nas seções de análise S1 e S1*, para cada cenário, são apresentados na Tabela 4. Destaca-se que para obtenção destas leituras, foram realizadas as correções baseadas nas temperaturas tomadas durante o ensaio e a curva de calibração de cada célula de tensão para as condições de tensão inicial.

Tabela 4 – Leitura das Tensões no Aterro Experimental.

Célula de Tensão Total (CTT)	**Localização**	**Elev. (m)**	**Tensões (em kPa)**			
			Eixo Duplo		Eixo Triplo	
			Seção S1	Seção S1*	Seção S1	Seção S1*
1	Entre BGTC e Bloco de EPS	1,4	12,7	-	12,5	-
2	Entre Blocos de EPS (superior)	1,0	7,7	7,7	8,8	21,0*
3	Entre Blocos de EPS (inferior)	0,6	9,8	8,3	10,1	16,3*
4	Entre Bloco de EPS e Tapete drenante (brita).	0,2	17,8*	-	21,4*	-

** Nota: Comportamento / tensões superiores ao esperado.*

Fonte: Avesani Neto e Rodrigues (2021).

A Tabela 4 apresenta as tensões registradas pelas CTTs, instaladas em quatro regiões na estrutura. A seção S1 representa a seção de análise principal,

contendo, então, a instalação dos quatro instrumentos nas regiões de três materiais que compõem a estrutura, como indicado na tabela supracitada. Já a seção S1* apresenta a localização das células de tensão a 7,5 m de distância da seção S1, sendo estes instrumentos posicionados para avaliar influência e comportamento de possíveis tensões de borda dos blocos. O esquema de instalação dos instrumentos, CTTs, é apresentado na Figura 18.

Mediante aos dados registrados por estes instrumentos, destaca-se que não há aumento significativo das tensões em profundidade, mesmo com a aplicação de cargas elevadas como a do eixo triplo nas seções de análise. Uma parte significativa destas tensões são absorvidas pelas camadas iniciais de CBUQ e BGTC.

Para a condição de passagem do eixo duplo, as leituras constatadas apontaram maiores tensões no instrumento superior. Em profundidade, esta tensão foi sendo absorvida nos blocos de EPS, reduzindo em aproximadamente 40% o valor inicialmente registrado na CTT 1, nas leituras dos instrumentos de maiores profundidades. Complementarmente, nota-se que para as cargas em questão, a seção S1* apresentou valores de tensões similares ao registrado na seção S1, em profundidades próximas. Ainda, destaca-se que o valor registrado pela CTT 4, instalados entre o bloco de EPS e tapete drenante (brita), apresentou-se elevado, levantando suspeitas de falhas na sua execução e instalação.

O cenário II, com a aplicação das cargas do eixo triplo, apresenta maiores valores de tensão, conforme esperado, devido a maior área de influência e valor de carregamento aplicado. A distribuição das tensões na seção S1 apresenta-se ligeiramente superior, próximos a 1 kPa, aos valores registrados no cenário I, considerando o eixo duplo, mesmo com a aplicação de cargas consideravelmente superiores. No entanto, mais uma vez, percebe-se valores destoados da CTT 4 em relação à tendência de tensões dos outros instrumentos. Apontando, mais uma vez, possíveis problemas de instalação deste instrumento.

Adicionalmente, são observadas tensões superiores nas seções S1*, quando comparado os cenários I e II (eixo duplo e triplo, respectivamente). Estes valores representam quase três vezes o valor da tensão obtida na seção S1*, para a CTT 2, e aproximadamente o dobro de tensão para a CTT 3. Uma das

suspeitas é de que este valor superior possa estar relacionado ao fenômeno de borda, onde há a concentração de tensões nos limites/bordas dos blocos de EPS, como descrito por Negussey (2007).

Mesmo com valores mais elevados, como observado por Avesani Neto e Rodrigues (2021), estas tensões ainda são consideravelmente inferiores ao valor de resistência à compressão do EPS, ainda dentro do trecho elástico da curva tensão-deformação, correspondente a 1% de deformação.

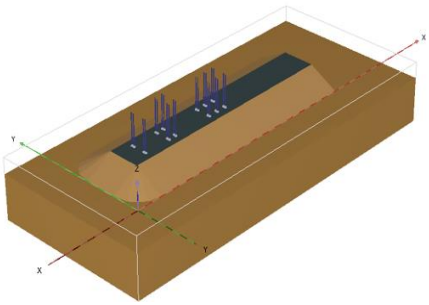
É possível afirmar, também, que a utilização dos materiais sobrepostos aos blocos de EPS, sendo estes o BGTC e o CBUQ, por apresentarem um módulo de elasticidade superior ao dos blocos de EPS, contribuíram significativamente para dissipar as tensões das cargas aplicadas na estrutura. Ainda, pode-se observar uma variação de grandezas similar ao se comparar as tensões registradas nos dois cenários de análise, nos eixos duplo e triplo, para a região dos blocos de EPS.

5.1.2 Modelagem Numérica

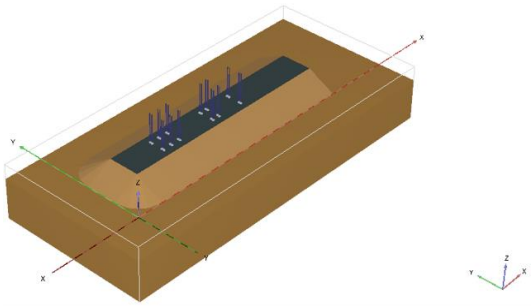
A seguir, são apresentados as discussões e os resultados dos cenários da modelagem numérica 3D, considerando as variações desenvolvidas e citadas no tópico 4.4. Na Figura 28, Figura 29 e Figura 30 são apresentadas as variações de cenários das análises considerando a imposição das cargas de veículo completo (VC), eixo único (E) e semi-eixo (SE), respectivamente.

Figura 28 – TC – Veículo Completo (VC).

a) Cenário I



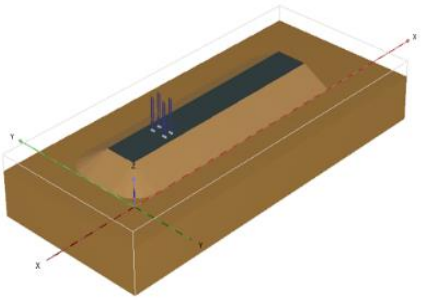
b) Cenário II



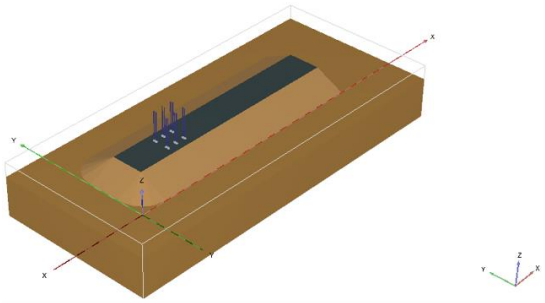
Fonte: Próprio autor.

Figura 29 – TC – Eixo (E).

a) Cenário I



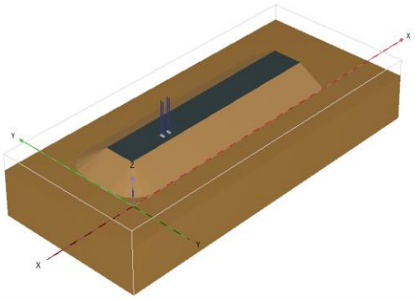
b) Cenário II



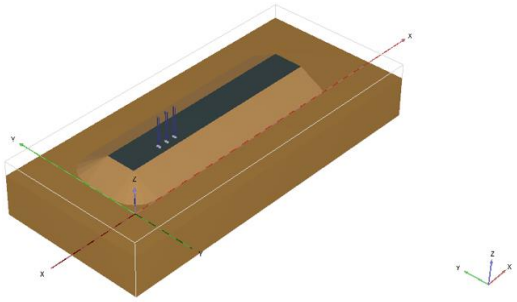
Fonte: Próprio autor.

Figura 30 – TC – Semi Eixo (SE).

a) Cenário I



b) Cenário II



Fonte: Próprio autor.

Considerando o uso dos parâmetros de amostras de grandes dimensões e de amostras reduzidas (PAGD e PAR) para os blocos de EPS e os diferentes cenários de análise, a Tabela 5, a Figura 31 e Figura 32 apresentam os resultados das análises com o PAGD. Já a Tabela 6, a Figura 33 e Figura 34 apresentam os resultados com as análises considerando o PAE.

Tabela 5 – Resultados – Teste de Carga – Parâmetros de Amostras de Grandes Dimensões (PAGD).

Cenário I: Eixo Duplo – Tensões (kPa)					
Seção	**El. (m)**	**VC – 3D**	**E – 3D**	**SE- 3D**	**Aterro Experimental*** **
S1	1,4	12,1	11,9	4,5	12,7
	1,0	9,1	8,9	2,8	7,7
	0,6	8,7	8,4	2,6	9,8
	0,2	7,3	7,1	2,0	17,8**
S1*	1,0	11,4	0,2	0,3	7,7
	0,6	10,5	0,0	0,0	8,3
Cenário II: Eixo Triplo – Tensões (kPa)					
Seção	**El. (m)**	**VC – 3D**	**E – 3D**	**SE- 3D**	**Aterro Experimental*** **
S1	1,4	13,6	12,9	5,4	12,5
	1,0	11,6	11,0	3,6	8,8
	0,6	10,7	10,3	3,4	10,1
	0,2	9,8	8,6	2,6	21,3**
S1*	1,0	9,7	0,1	0,1	21,0**
	0,6	8,6	0,1	0,0	16,3**

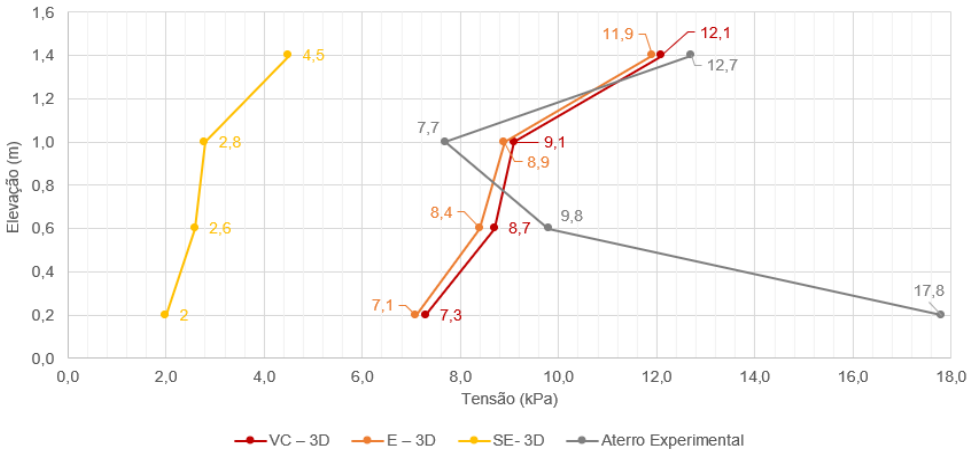
** Nota: Veículo Completo (VC), Eixo único (E), Semi-eixo (SE).*

*** Nota: Comportamento / tensões superiores ao esperado.*

**** Nota: valores na coluna "aterro experimental" conforme obtido nas CTTs.*

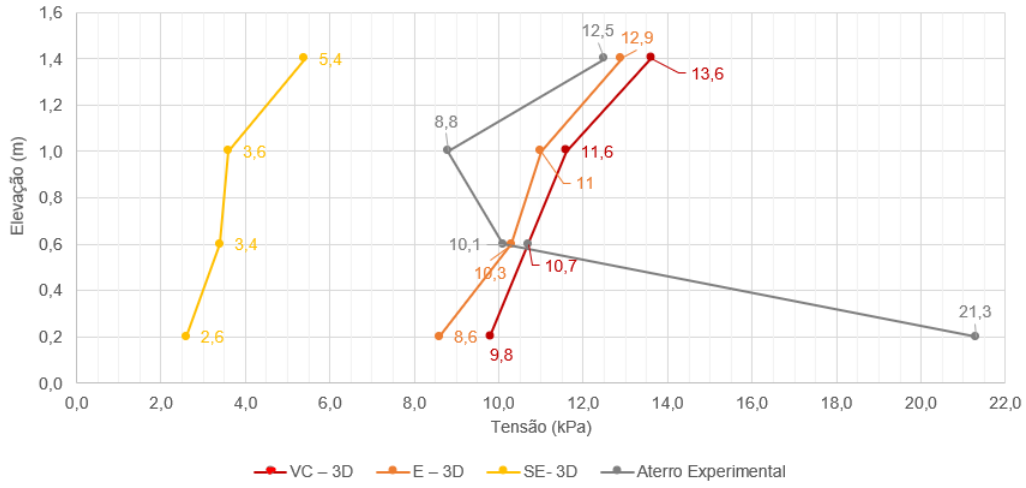
Fonte: Próprio autor.

Figura 31 – Resultados – Teste de Carga – Cenário I – Parâmetros de Amostras de Grandes Dimensões (PAGD).



Fonte: Próprio autor.

Figura 32 – Resultados – Teste de Carga – Cenário II – Parâmetros de Amostras de Grandes Dimensões (PAGD).



Fonte: Próprio autor.

Tabela 6 – Resultados – Teste de Carga – Parâmetros de Amostras Reduzidas (PAR).

Cenário I: Eixo Duplo – Tensões (kPa)					
Seção	**El. (m)**	**VC – 3D**	**E – 3D**	**SE- 3D**	**Aterro Experimental*** **
S1	1,4	6,3	6,2	1,9	12,7
	1,0	6,5	6,1	2,0	7,7
	0,6	5,8	5,6	1,9	9,8
	0,2	5,4	4,9	1,6	17,8**
S1*	1,0	6,9	0,2	0,2	7,7
	0,6	6,5	0,0	0,0	8,3
Cenário II: Eixo Triplo – Tensões (kPa)					
Seção	**El. (m)**	**VC – 3D**	**E – 3D**	**SE- 3D**	**Aterro Experimental*** **
S1	1,4	7,4	7,5	2.7	12,5
	1,0	7,3	7,3	2.8	8,8
	0,6	7,2	6,9	2,6	10,1
	0,2	6,3	6,5	2,2	21,3**
S1*	1,0	5,3	0,2	0,2	21,0**
	0,6	4,9	0,1	0,0	16,3**

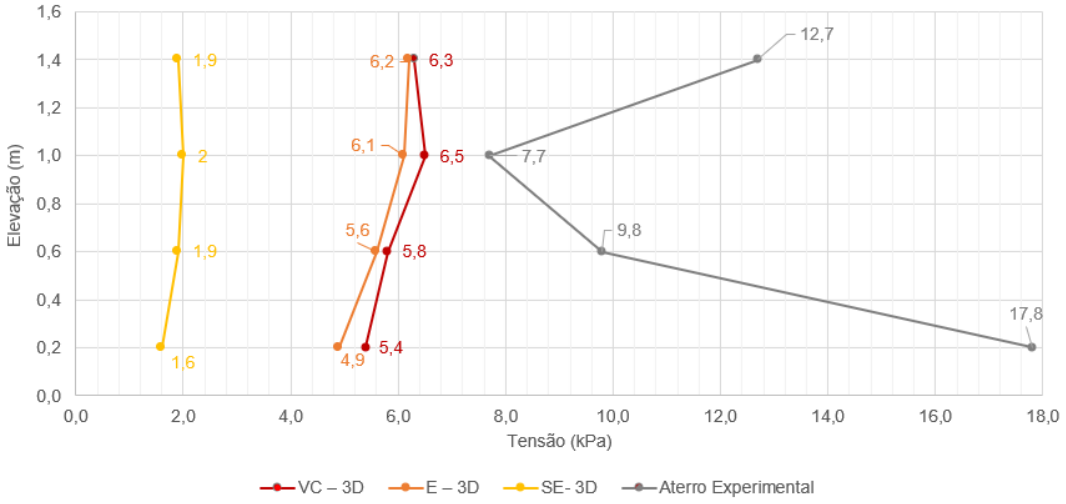
** Nota: Veículo Completo (VC), Eixo único (E), Semi-eixo (SE).*

*** Nota: Comportamento / tensões superiores ao esperado.*

**** Nota: valores na coluna "aterro experimental" conforme obtido nas CTTs.*

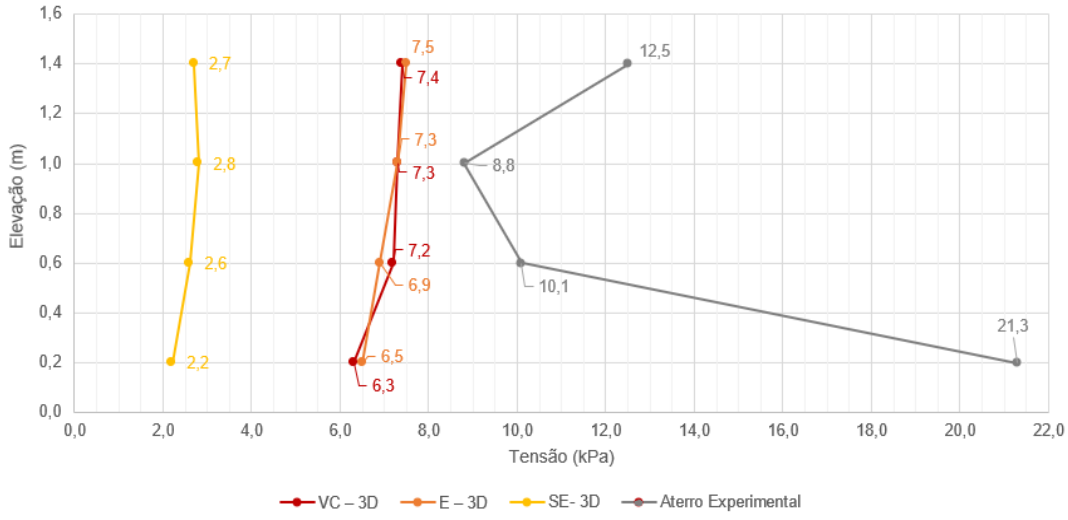
Fonte: Próprio autor.

Figura 33 – Resultados – Teste de Carga – Cenário I – Parâmetros de Amostras Reduzidas (PAR).



Fonte: Próprio autor.

Figura 34 - Resultados – Teste de Carga – Cenário II – Parâmetros de Amostras Reduzidas (PAR).



Fonte: Próprio autor.

Observou-se que, para todas as análises desenvolvidas, o MEF foi capaz de prever a redução das tensões com a profundidade. Ocorrendo tanto para as análises com o uso do PAGD, quanto para o uso do PAR, bem como para as variações de carga do veículo. No entanto, percebe-se que os resultados considerando a dissipação das tensões em profundidade são mais significativas quando utilizado o PAGD, devido a maior rigidez adotada para os blocos de EPS.

Para as análises considerando o PAGD, com o uso do VC, a variação das tensões aplicadas no aterro foi muito similar ao observado para a modelagem com o uso do E. Considerando a seção S1, para o cenário I (eixo duplo – S1) com o uso do VC, esta redução da tensão pela profundidade foi de aproximadamente 40%, já para o cenário II (eixo triplo – S1), a redução foi de 28%. Considerando o uso do E para os cenários I e II foi de aproximadamente 40% e 33%, respectivamente. Adicionalmente, desconsiderando o valor registrado na profundidade de 0,2 m, esta redução para os instrumentos do aterro experimental foi de aproximadamente 40% e 30% para os cenários I e II, respectivamente.

Para as análises com o PAR, nota-se que a dissipação das tensões pela profundidade se mantém. Para o cenário I, com o uso do VC e E, as reduções das tensões são de aproximadamente 15% e 20% respectivamente. Já para o cenário II, considerando as condições supracitadas, VC e E, as reduções são de 13%. Esta redução de tensões é inferior para o PAR, quando comparadas as análises com PAGD, uma vez que a rigidez adotada dos blocos de EPS é inferior.

É observado que, a variação entre os resultados do uso de VC e E é significativamente baixa, e encontra-se na ordem decimal. Esta diferença é justificada pela baixa influência das cargas do eixo adjacente, devido ao distanciamento entre eles, não sendo, portanto, significativa para gerar acréscimo de tensões na região abaixo das rodas em análise.

Para desenvolvimento de projetos, constata-se que é dispensável a elaboração das análises considerando o uso do VC. Como alternativa, a modelagem considerando o E satisfaz as condições para projetos. Uma vez que, efetivamente, a demanda de recursos para desenvolvimento destas análises, com o uso do VC, é superior.

No que se refere às variações de cargas, constata-se que a utilização do SE para as simulações de obtenção das tensões não são representativas e estão distante das leituras registradas pelos instrumentos e pelas modelagens dos outros cenários realizados. Assim, essa condição de carregamento não é indicada para avaliações de propagação de tensões em uma estrutura de pavimento, com o prejuízo de subestimar as tensões aplicadas nas camadas inferiores.

Quanto aos valores de tensão obtidos nos cenários I e II para seção S1*, considerando o VC, são explicadas pela posição do eixo triplo e duplo nesta seção. Isto é, observam-se valores superiores na seção S1* para o cenário I, onde o eixo triplo encontra-se posicionado e valores inferiores no cenário II, uma vez que o eixo duplo, de menor carga, encontra-se posicionado. Tal condição não é observada nas análises onde foi considerado o E e SE, uma vez que estes valores se encontram próximos a zero.

As leituras obtidas na seção S1* do aterro experimental, no cenário II, apresentou valores elevados de tensões, na ordem de 21 kPa e de 16 kPa, considerados fora do esperado. Mesmo nas simulações, onde a maior carga estaria posicionada nestes instrumentos, observaram-se tensões próximas a 11 kPa, no cenário I seção S1*. Tensões estas cerca de 50% do observado no aterro experimental, gerando dúvidas sobre possibilidade de erros nas leituras.

Complementarmente, as tensões obtidas no aterro experimental no cenário I, encontram-se próximas às tensões obtidas nas simulações numéricas, como observado no cenário I e II com o VC na seção S1*. Levando-se a questionar, mais uma vez, a autenticidade das leituras obtidas no cenário II, seção S1*. Ou ainda, como hipótese alternativa, o fenômeno de borda poderia estar associado a este valor elevado de tensão, onde poderia ser observado concentrações de tensões nas porções limites dos blocos posicionados na construção desta seção. Não sendo possível afirmar ou confirmar tais valores de tensões elevados.

Nota-se a permanência dos baixos valores das tensões obtidas, em ambas as análises numéricas com PAGD e PAR, bem como nos instrumentos do aterro experimental durante o ensaio. Com isto, pode-se afirmar que as tensões obtidas se encontram abaixo das tensões observadas para 1% de deformação dos blocos de EPS estudados por Negussey (2007). E ainda, a comparação entre as tensões considerando os parâmetros de pequena escala podem chegar à metade das experimentadas em campo, assim como observado pelo mesmo autor supracitado.

A partir das análises considerando as variações entre os parâmetros para os blocos de EPS, observa-se que os resultados referentes ao uso dos PAGD convergem para as tensões registradas nos instrumentos do aterro

experimental e condizem com as condições reais de comportamento dos blocos de EPS em campo. Portanto, as análises e interpretações aqui realizadas indicam que não parecer haver coerência na utilização do PAR para dimensionamento das estruturas com o uso de blocos de EPS, sendo recomendada a obtenção de PAGD.

5.2 ENSAIO DE VIGA BENKELAMN (VB)

5.2.1 Análise de resultado do ensaio

O ensaio de Viga Benkelman (VB) foi desenvolvido de acordo com as especificações da norma de referência do Departamento Nacional de Estrada e Rodagem (DNER-ME024), considerando o carregamento de eixo de 82 kN. A

Tabela 7 apresentam os resultados obtidos na região da porção plana da estrutura, seguido valor médio de deslocamento.

Tabela 7 – Resultados dos Ensaios de viga Benkelman.

Seção	Ponto de Análise	Deflexão (mm)
1	1	0,67
	2	0,50
	3	1,07
2	4	1,01
	5	0,83
	6	0,99
3	7	0,95
	8	0,95
	9	1,11
Deflexão média (mm)	0,90	

Fonte: Avesani Neto e Rodrigues (2021).

Com o objetivo de validação dos premissas de dimensionamento da estrutura experimental, Avesani Neto e Rodrigues (2021) apresentam uma retroanálise a partir da deflexão média dos resultados dos ensaios. Obteve-se, então, como parâmetro comparativo, o número de repetições de eixo, a partir da

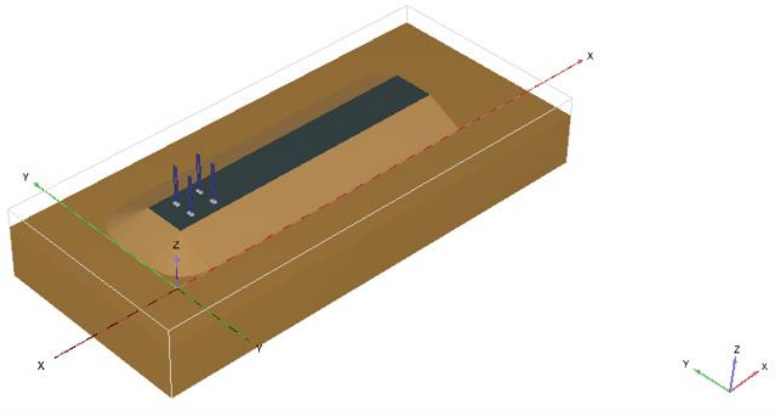
formulação apresentada nos critérios de dimensionamento do município de São Paulo – IP-05 (2004).

Nesta retroanálise, os autores supracitados afirmam que o resultado se apresentou próximo ao valor do número de repetições de eixo inicialmente adotado no projeto para dimensionamento da estrutura. Apontou-se, também, que a diferença no valor de repetições de eixo encontrado foi de apenas 5%, em escala logarítmica. Concluiu-se que, devido à proximidade do valor encontrado na retroanálise, os valores de CBR adotados de acordo com o método proposto por Huang e Negussey (2011), apresentados no tópico 2.7.2, são satisfatórios e capazes reproduzir o comportamento dos blocos de EPS em verdadeira grandeza. Adicionalmente, mesmo com as dificuldades de se executar os ensaios, o coeficiente de variação apresentado foi de 22%. De acordo com LAY (1990), o coeficiente de variação de deflexão obtidos em rodovias, entre os intervalos de 20% e 30%, podem ser consideradas como satisfatório.

5.2.2 Modelagem Numérica

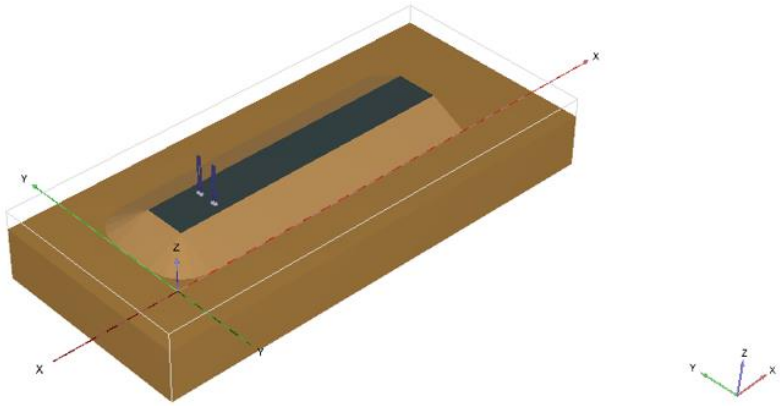
As modelagens numéricas que contemplam as simulações do ensaio VB foram desenvolvidas de acordo com as variações dos parâmetros de amostras de grandes dimensões e parâmetros de amostras reduzidas, de laboratório, para os blocos de EPS. Além das variações com a aplicação das cargas, sendo, o VC, E e SE. As simulações do trabalho de referência também utilizou a aplicação das cargas de acordo com o preconizado pela norma brasileira (DNER-ME 024, 1994), porém, considerando somente o E. A Figura 35, Figura 36 e Figura 37 apresentadam os modelos desenvolvidos.

Figura 35 – Ensaio VB – Veículo Completo (VC).



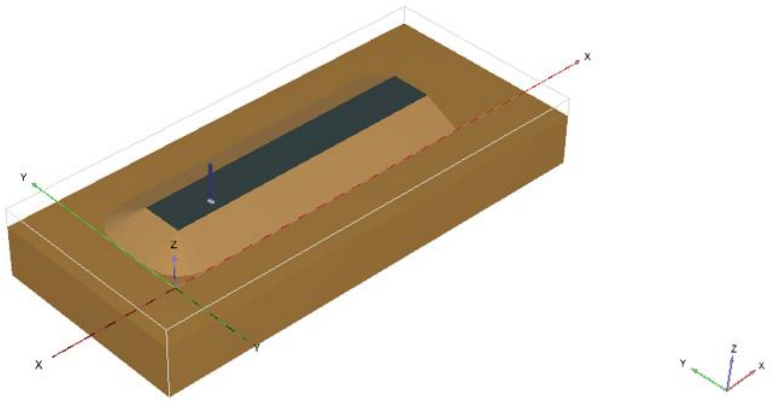
Fonte: Próprio autor.

Figura 36 – Ensaio VB – Eixo (E).



Fonte: Próprio autor.

Figura 37 – Ensaio VB – Semi Eixo (SE).



Fonte: Próprio autor.

Os resultados das análises numéricas, apresentadas na Tabela 8, tiveram como objetivo simular as condições do ensaio VB, buscando os valores de deslocamento apresentados na superfície do pavimento. Os valores médios obtido pelo artigo de referência, de Avesani Neto e Rodrigues (2021), também são apresentados.

Tabela 8 – Resultados Modelagem Numérica 3D – Ensaio VB.

-	**MEF (PAGD)**			**MEF (PAR)**			**Avesani Neto e Rodrigues (2021)**	
	VC	**E**	**SE**	**VC**	**E**	**SE**	**E - LET**	**VC - Ensaio VB**
Deslocamento médio (mm)	0,93	0,69	0,47	1,57	1,22	0,72	0,94	0,90

Nota: PAGD – Parâmetros de Amostras de Grandes Dimensões / PAE – Parâmetros de Amostras Reduzidas.

Fonte: Próprio Autor.

Observou-se que os resultados considerando a utilização dos parâmetros de amostras reduzidas (PAR) apresentaram valores de deslocamento superiores, quando comparados aos resultados da modelagem considerando parâmetros de amostras de grandes dimensões (PAGD), para ambos o MEF e LET. Tal fato, deve-se ao menor módulo de elasticidade adotado. Estes deslocamentos apresentaram-se superiores, também, ao deslocamento médio obtido nos ensaios VB performados no aterro experimental.

Por sua vez, os resultados obtidos pelo MEF, com o uso do PAGD, representaram de forma adequada o comportamento da estrutura, quanto aos deslocamentos na superfície do pavimento. Observou-se a convergência dos deslocamentos entre a análise de VC e ensaio VB performado, apresentando diferença mínima.

Ainda, as outras análises desenvolvidas no MEF consideraram as variações na aplicação das cargas. Os deslocamentos obtidos foram proporcionais às cargas aplicadas, quanto maior a carga, maior o deslocamento na superfície do pavimento, conforme esperado.

A análise LET apresentou deslocamento de 0,94 mm. No entanto, nesta análise, considerou-se a aplicação da carga proveniente do E. Enquanto o MEF,

para esta mesma análise, apresentou deslocamento de 0,69 mm. Sabe-se que, quando comparados o MEF e o LET, o MEF é uma ferramenta matemática mais complexa e possui premissas diferentes, podendo justificar a pequena divergência nos valores encontrados. No caso, o MEF apresenta valores adotados nas regiões limites, com os valores de deslocamentos nulos como definições de borda. Além das interpolações, qualidade e geometria da malha serem diferentes do adotado no outro método. O LET, por sua vez, tem por premissa o uso de um espaço semi-infinito, não considerando condição de contorno na porção inferior da estrutura, como é apresentado pelo MEF, o que pode influir diretamente nos resultados de deslocamento na superfície da estrutura. Tais premissas podem ser determinantes nos resultados finais de deslocamentos.

Neste trabalho, o MEF apresentou-se aplicável, pela convergência dos resultados com aqueles obtidos nos ensaios VB, quando aplicado as condições de cargas observadas no ensaio simulado, considerando, portanto, o VC. No entanto, o LET também obteve valores adequados, considerando a aplicação somente das cargas do E, mesmo o ensaio realizado tendo sido feito com carga de VC.

5.3. PARÂMETROS DE DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS

5.3.1 Análise dos Parâmetros de Dimensionamento – Modelagem Layered Elastic Theory (LET)

Avesani Neto e Rodrigues (2021) desenvolveram análises numéricas para obter os principais parâmetros para dimensionamento de pavimentos, considerado no método mecanicista-empírico. Estes parâmetros estão relacionados a deflexão na superfície da estrutura, deformação de tração inferior da camada asfáltica e deformação de compressão vertical no topo do subleito, obtidos nas análises numéricas desenvolvidas pelo LET.

Para cálculo destes valores, foram realizados dois cenários de análises. No primeiro cenário, referente ao posicionamento A, os parâmetros seriam selecionados na região entre rodas. Já no segundo, referente ao posicionamento

B, os resultados seriam obtidos abaixo da localização da roda interna do eixo, como apresentado pela Figura 38. Os resultados das análises são apresentados na Tabela 9.

Figura 38 – Análise Numérica (LET) – Cenários de Análise – (em mm).

Fonte: Avesani Neto e Rodrigues (2021).

Tabela 9 – Resultados da Modelagem Numérica.

Elev. (mm)	**Camada**	**Parâmetro**	**Seção A**	**Seção B**
1800	CBUQ	Deflexão, D0 (mm)	0,92	0,96
1700	CBUQ	Deformação Horizontal de Tração	-	-
1400	BGTC	Deformação Horizontal de Tração	$7,6 \times 10^{-5}$	$7,5 \times 10^{-5}$
1400	Blocos de EPS	Tensão de Compressão Vertical (kPa)	5,2	5,3
1400	Blocos de EPS	Tensão de Compressão Horizontal (kPa)	2,8	2,8
1400	Blocos de EPS	Deformação Vertical de Compressão	2,8 x 10-4	$2,8 \times 10^{-4}$
0	Subleito	Deformação Vertical de Compressão	2,7 x 10-5	$2,7 \times 10^{-5}$

Fonte: Avesani Neto e Rodrigues (2021).

A partir dos resultados obtidos por Avesani Neto e Rodrigues (2021), nota-se uma tendência de que a seção B seja mais propensa a apresentar um cenário mais crítico para dimensionamento do pavimento, do que aquele considerando na seção A, entre rodas. Os parâmetros para deflexão e deformação vertical no subleito na seção B apresentaram-se ligeiramente superior aos resultados da seção A, embora tal diferença não seja expressiva.

É importante que os valores de deformação horizontal de tração nas fibras inferiores do revestimento asfáltico e bases cimentadas sejam reduzidos de forma a evitar fadiga destas camadas. Complementarmente, no dimensionamento, os valores de deformação vertical no topo do subleito devem ser ajustados de acordo com os critérios de projeto, uma vez que, caso tal valor seja elevado, este poderia ser precursor de deformações longitudinais no pavimento, como a presença do mecanismo de degradação denominada trilha de roda.

Para a seção A, o valor de deformação horizontal de tração na base da camada de BGTC apresentou-se superior ao valor obtido na seção B. No contexto de dimensionamento, os valores de deformações horizontais provenientes das solicitações de tráfego devem ser inferiores das deformações definidas em projeto. Caso contrário, de acordo com Barca e Nogueira (2015), a fissuração se iniciaria na parte inferior da camada de asfalto, promovendo rachaduras na superfície, podendo evoluir para estado de fissuras mais graves.

O tópico 5.5.2 apresentará as análises MEF contando com as variações dos parâmetros dos blocos de EPS para obtenção destas relações e indicativos de padrões dos cenários para futuros dimensionamentos.

5.2.2 Modelagem Numérica

Com base nas simulações desenvolvidas por Avesani Neto e Rodrigues (2021), este trabalho propõe a modelagem numérica buscando a variação dos parâmetros dos blocos de EPS. Os parâmetros de comportamento de deflexão na superfície da estrutura, deformação horizontal de tração na base da camada asfáltica e deformação de compressão vertical no topo do subleito foram obtidas no modelo, para os dois cenários “posicionamento A” e “posicionamento B”, como apontado na Figura 38. Adicionalmente, os parâmetros de comportamento dos blocos de EPS, como tensão vertical e deformações vertical e horizontal, também foram obtidos. Nestas análises foram contempladas as variações considerando a utilização do veículo completo (VC), eixo (E) e semi-eixo (SE). Os resultados dos diferentes cenários, considerando os parâmetros de amostras de grandes dimensões, obtidos segundo o posicionamento A, são apresentados

na Tabela 10. Enquanto os resultados, segundo o posicionamento B, são apresentados na Tabela 11. Já os valores médios, são apresentados na Tabela 12. Os resultados considerandos parâmetros de amostras reduzidas, de laboratório, são apresentados no apêndice.

Tabela 10 – Resultados – Parâmetros de Dimensionamento de Pavimentos – Seção A – Parâmetros de Amostras de Grandes Dimensões (PAGD).

Seção	**Elev. (mm)**	**Camada**	**Parâmetro**	**Cenários**			
				1 – VC – 3D	**2 – E – 3D**	**3 – SE – 3D**	**4 – E – (LET)**
A	1800	CBUQ	A: Deflexão, D0 (mm)	0,93	0,69	0,47	0,94
	1700	CBUQ	B: Deformação Horizontal	1,8E-05	1,7E-05	2,1E-05	-
	1400	BGTC	C: Deformação Horizontal	3,7E-05	3,3E-05	3,7E-05	7,6E-5
	1400	Blocos de EPS	D: Tensão de Compressão Vertical (kPa)	7,1	5,8	4,4	5,2
	1400	Blocos de EPS	E: Tensão de Compressão Horizontal (kPa)	1,4	1,0	0,5	2,8
	1400	Blocos de EPS	F: Deformação Vertical	4,6E-03	3,8E-04	3,0E-04	2,8E-04
	0	Subleito	G: Deformação Vertical	1,2E-04	8,1E-04	5,5E-04	2,7E-05

Nota: Os resultados considerando uso do PAR, encontram-se no Apêndice.

Fonte: Próprio Autor.

Tabela 11 – Resultados – Parâmetros de Dimensionamento de Pavimentos – Seção B – Parâmetros de Amostras de Grandes Dimensões (PAGD).

Seção	Elev. (mm)	Camada	Parâmetro	Cenários			
				1 – VC – 3D	2 – E – 3D	3 – SE – 3D	4 – E – (LET)
B	1800	CBUQ	A: Deflexão, D0 (mm)	0,99	0,73	0,50	0,94
	1700	CBUQ	B: Deformação Horizontal	8,1E-06	6,8E-06	1,0E-05	-
	1400	BGTC	C: Deformação Horizontal	3,2E-05	3,0E-05	3,0E-05	7,6E-5
	1400	Blocos de EPS	D: Tensão de Compressão Vertical (kPa)	7,2	5,9	4,5	5,2
	1400	Blocos de EPS	E: Tensão de Compressão Horizontal (kPa)	1,5	1,1	0,7	2,8
	1400	Blocos de EPS	F: Deformação Vertical	4,7E-04	3,9E-04	3,0E-04	2,8E-04
	0	Subleito	G: Deformação Vertical	1,2E-04	8,5E-05	5,3E-05	2,7E-05

Nota: Os resultados considerando uso do PAR, encontram-se no Apêndice.

Fonte: Próprio Autor.

Tabela 12 – Resultados – Valores Médios – Parâmetros de Dimensionamento de Pavimentos – Parâmetros de Amostras de Grandes Dimensões (PAGD).

Seção	Elev. (mm)	Camada	Parâmetro	Cenários			
				1 – VC – 3D	2 – E – 3D	3 – SE – 3D	4 – E – (LET)
Média Dos Resultados	1800	CBUQ	A: Deflexão, D0 (mm)	0,96	0,71	0,48	0,94
	1700	CBUQ	B: Deformação Horizontal	1,3E-05	1,2E-05	1,6E-05	-
	1400	BGTC	C: Deformação Horizontal	3,5E-05	3,2E-05	3,3E-05	7,6E-5
	1400	Blocos de EPS	D: Tensão de Compressão Vertical (kPa)	7,2	5,8	4,5	5,2
	1400	Blocos de EPS	E: Tensão de Compressão Horizontal (kPa)	1,5	1,1	0,6	2,8
	1400	Blocos de EPS	F: Deformação Vertical	4,6E-04	3,8E-04	3,0E-04	2,8E-04
	0	Subleito	G: Deformação Vertical	1,2E-04	8,3E-05	5,3E-05	2,7E-05

Nota: Os resultados considerando uso do PAR, encontram-se no Apêndice.

Fonte: Próprio Autor.

Na camada superior da estrutura, composta pelo CBUQ, obtiveram-se os parâmetros de deflexão na superfície e deformação horizontal. Tais parâmetros podem ser associados ao conforto e qualidade de trafegabilidade dos usuários na via e diretamente associada à importância da prevenção de padrões de fissuramentos no pavimento, como telas de galinheiro e panelas.

Primeiramente, a partir da busca do parâmetro de deflexão da superfície do CBUQ nos cenários de modelagem propostos, é possível observar que os valores máximos são obtidos quando considerados os parâmetros das amostras reduzidas (PAR), como é possível observar na Figura 39. As deflexões observadas nestas análises chegam a ser duas vezes superiores aos valores obtidos nas modelagens, considerando os parâmetros de amostras de grandes dimensões (PAGD). Isto é justificado pela menor rigidez adotado, refletindo em maiores deformações para as mesmas cargas aplicadas.

Adicionalmente, é possível observar a variação das deflexões. Nos cenários 1, 2 e 3, as deflexões são proporcionais a variação da aplicação das cargas, seja com o uso do veículo completo (VC), eixo (E) ou semi-eixo (SE).

Ainda, é possível perceber que na maior parte das análises, os valores de deflexões, quando obtidos com o posicionamento do veículo como demonstrado na Figura 38, no posicionamento B, são ligeiramente superiores das análises que consideram o posicionamento A. No entanto, tal diferença não é relevante para fins de dimensionamento da estrutura, a partir dos números obtidos neste trabalho.

Vellasco (2018) observou, em suas análises comparativas para valores de deflexões na superfíce do pavimento, que é significativa a variação deste parâmetro, quando da comparação entre as modelagens numéricas que consideram cargas de E para SE. O autor aponta variações de deflexões entre 20% à 35% para estruturas compostas por camadas asfálticas (pré-mistura a quente - PMQ e CBUQ) e/ou cimentadas (BGTC), a partir das variações de cargas de eixo supracitadas. Este trabalho, por sua vez, realizou as análises variando as cargas dos eixos, considerando além do E e o SE, também o VC Corroborando com as conclusões de Vellasco (2018), foi possível observar, que há variações de deflexão significativas, proporcionalmente, com as variações destas cargas.

Por conseguinte, considerando o PAGD, o aumento na deflexão quando comparado o uso do SE ao E, para ambas as seções A e B, é de aproximadamente 40%. Ainda, neste mesmo sentido, as deflexões considerando o carregamento do SE para o VC, apresentou deflexões duas vezes superiores. Já as deflexões com VC são superiores em torno de 40%, quando comparadas as deflexões observadas com o E.

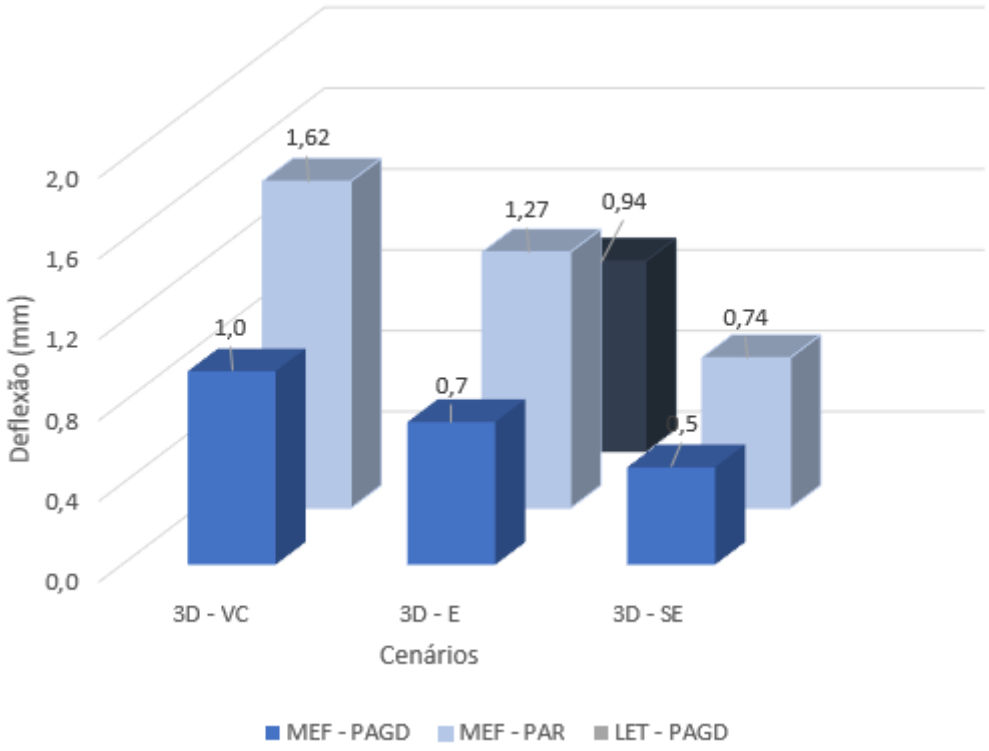
Complementarmente, para as análises com os parâmetros de amostras de laboratório, observou-se aumento de aproximadamente 70% no deslocamento, quando comparados os resultados entre o SE e E. Quanto as análises considerando os resultados entre SE e VC, o aumento encontrou-se de aproximadamente 2,2 vezes. Já entre E e VC foi de aproximadamente 28%.

Ainda, foi possível observar a proximidade entre os resultados de deflexão para o cenário 1, VC no MEF, e cenário 4, E no LET. O cenário I ainda

convergiu para os valores observados no ensaio de viga Benkelman, validando a modelagem pelo MEF desenvolvida.

A Figura 39 apresenta os resultados das modelagens para o parâmetro de deflexão.

Figura 39 – Deflexão média na superfície do pavimento – MEF x LET.



Fonte: Próprio Autor.

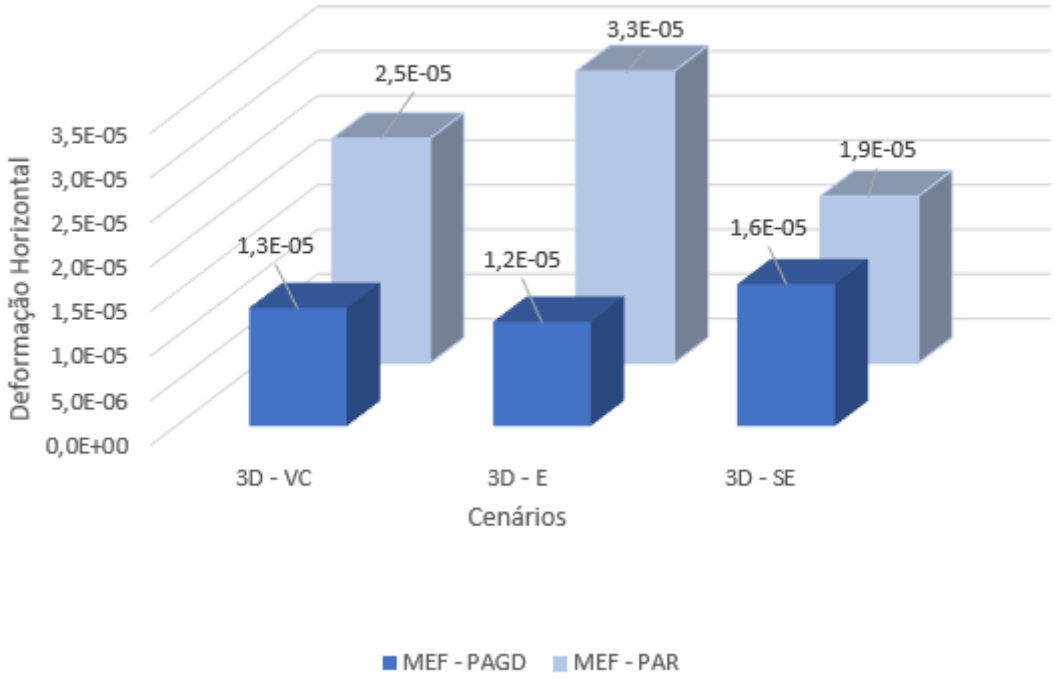
Ainda na camada de CBUQ, o parâmetro de deformação horizontal de tração, também associado a mecanismos de degradação como fissuramentos, foi obtido nos modelos numéricos. O padrão de maiores deformações para as análises com os parâmetros de amostras reduzidas (PAR) se manteve. Neste caso, não houve um padrão observado para as variações das cargas de eixos, como notadas para o parâmetro de deslocamento na superfície, onde observou-se proporcionalidade entre as cargas aplicadas e deslocamento. No entanto, para os cenários 1, 2 e 3, a obtenção do parâmetro segundo o posicionamento A apresentou valores superiores de deformação horizontal no CBUQ.

As análises considerando os parâmetros de amostras reduzidas (PAR) apontaram para deformações de até 35% maiores, quando comparadas com os parâmetros de amostras de grandes dimensões (PAGD). No entanto, é importante destacar que estas deformações obtidas se encontram na mesma

ordem de grandeza, de 10^{-5}. No entanto, o padrão de valores superiores para a seção A se manteve.

A Figura 40 apresenta os resultados dos valores de deformação horizontal obtidas para o CBUQ, para os cenários de análise.

Figura 40 – Deformação horizontal média no CBUQ – MEF x LET.



Fonte: Próprio Autor.

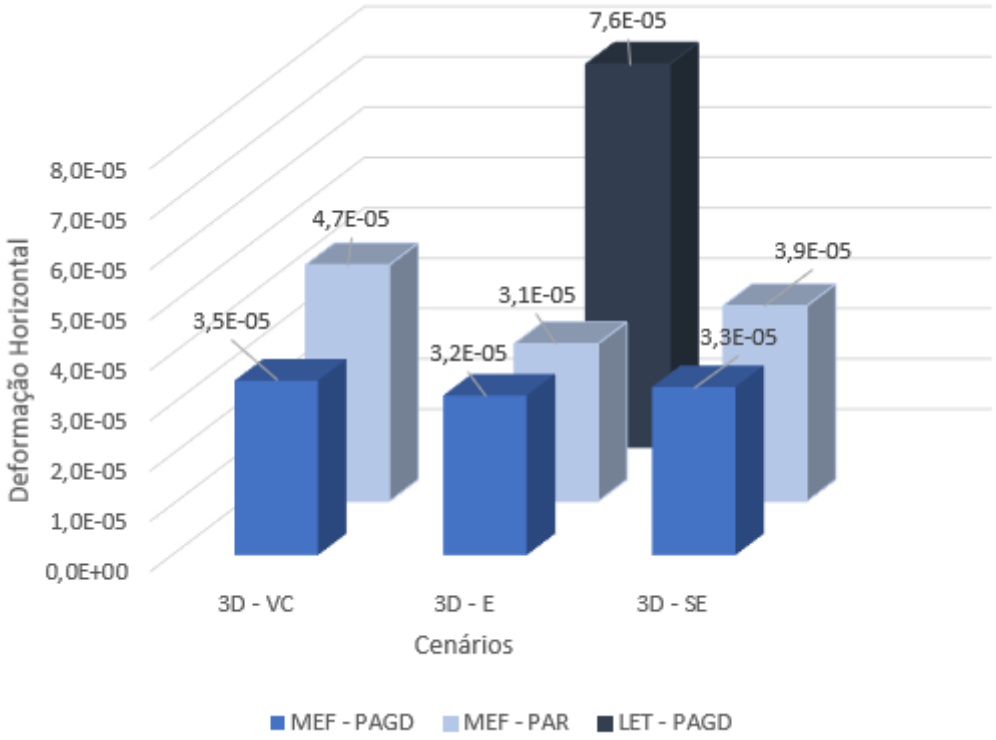
Em seguida, na camada subsequente da estrutura, composta por BGTC, com o objetivo de obtenção do parâmetro de deformação horizontal, buscou-se entender seu comportamento frente as solicitações na elevação próxima a 1400 mm na estrutura, limiar entre as camadas de BGTC e de blocos de EPS. Os resultados e tendências deste parâmetro são apresentados na Figura 41.

As deformações obtidas, quando utilizados o PAR, são superiores, conforme esperado. O mesmo ocorre quando comparados os cenários entre as cargas. Maior deformação no cenário onde é utilizado as cargas do VC. Curiosamente, mesmo apresentando, teoricamente, segundo maior valor de carga entre as variações, resultou em uma menor deformação horizontal no BGTC, quando comparada aos demais.

Quanto a obtenção do parâmetro, segundo o posicionamento A ou posicionamento B, observou-se que os valores obtidos de acordo com o posicionamento A são ligeiramente superiores ao posicionamento B.

Os resultados do MEF, quando comparados aos resultados obtidos nas análises com o LET, percebe-se valores inferiores, no entanto estas deformações encontram-se na mesma ordem de grandeza, de 10^{-5}.

Figura 41 – Deformação horizontal média no BGTC – MEF x LET.



Fonte: Próprio Autor.

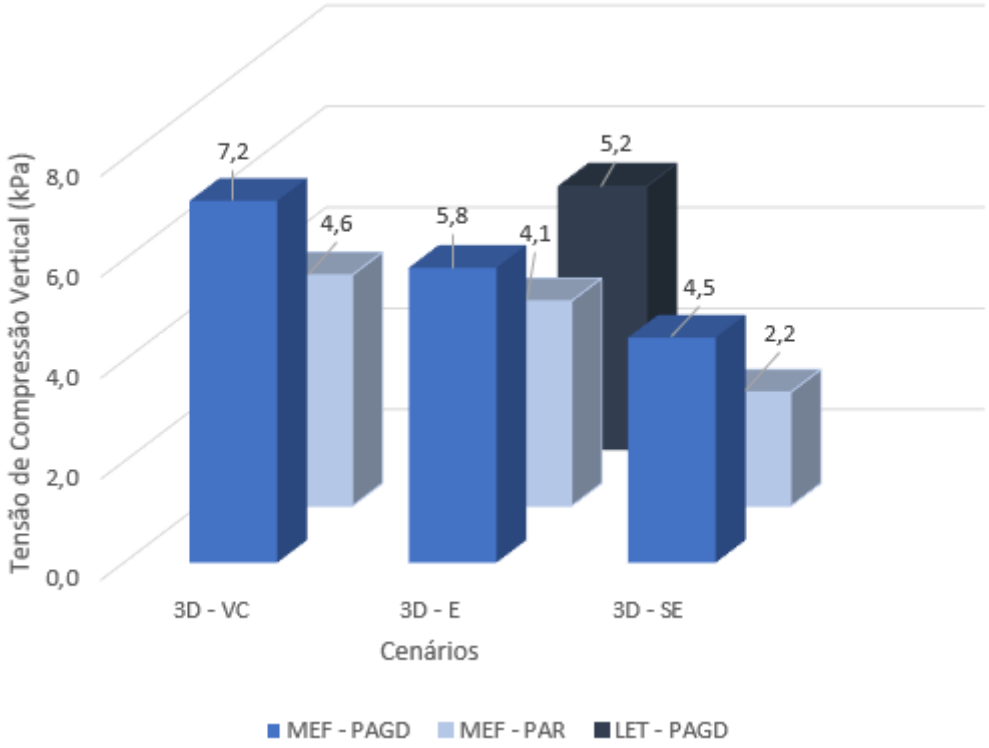
Já para a camada dos blocos de EPS, com elevação estimada de 1400 mm, buscou-se a obtenção do parâmetro de tensão de compressão vertical. As tensões encontradas, com o uso do PAGD, foram superiores aos valores obtidos a partir do uso do PAR. Outra vez, dentro da tendência de comportamento esperado, os valores de tensões obtidas nas análises foram superiores e proporcionais as variações das cargas aplicadas nos diferentes cenários, como apontado na Figura 42.

As tensões obtidas no MEF, se alinharam bem aos resultados obtidos na modelagem com o LET. A tensão média obtida no LET, de 5,2 kPa, se aproximou bem dos valores obtidos no MEF, de 5,8 kPa.

Os valores obtidos, quando os parâmetros são de acordo com o posicionamento B, são ligeiramente superiores aos valores apresentados quando o veículo é posicionado como no posicionamento A (Figura 38). No entanto, estes valores não são significativos para um contexto de dimensionamento de projeto.

Notadamente, considerando o PAGD, é importante destacar que os valores de tensão de compressão vertical obtidos na modelagem numérica, entre 3 kPa a 7 kPa, apresentaram-se significativamente inferiores aos valores de tensão máxima experimentada pelos blocos de EPS de grandes dimensões ensaiados e apresentados por Negussey (2007). Segundo o autor supracitado, para um material com peso específico de 0,15 kN/m³, inferior ao adotado neste trabalho, a tensão de 40 kPa seria equivalente a 1% de deformação, ainda dentro do trecho elástico do material. Por consequência, devido a estas tensões baixas, pode-se confirmar a aplicabilidade dos blocos de EPS na estrutura.

Figura 42 – Tensão de compressão vertical média nos blocos de EPS – MEF x LET.



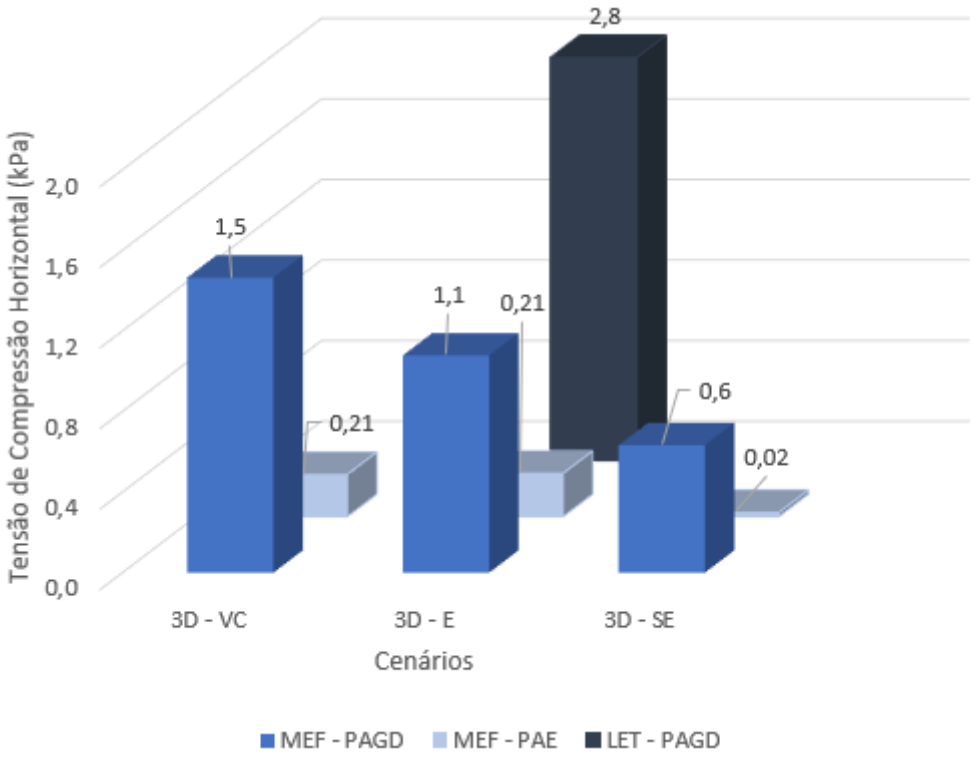
Fonte: Próprio Autor.

Complementarmente, buscou-se obter o parâmetro de tensão de compressão horizontal, na mesma profundidade na camada de blocos de EPS.

Os resultados obtidos, diferente dos observados para as tensões verticais apresentados na Figura 43, apontaram para maiores tensões de compressão horizontais quanto maior a carga aplicada nas análises.

Nas modelagens com o uso dos PAGD, observou-se valores de tensões baixos, com variações entre 1,5 kPa e 0,6 kPa. Enquanto que as tesões obtidas, quando utilizados os PAR, encontraram-se pouco superiores a 0 kPa. No entanto, os valores obtidos pelo LET foram superiores, quase duas vezes o valor obtido pelo cenário 1, com o uso do VC. Enquando que, as variações das tensões de compressão horizontal, a depender do posicionamento A ou posicionamento B, foi mínimo.

Figura 43 – Tensão de compressão horizontal média nos blocos de EPS – MEF x LET.



Fonte: Próprio Autor.

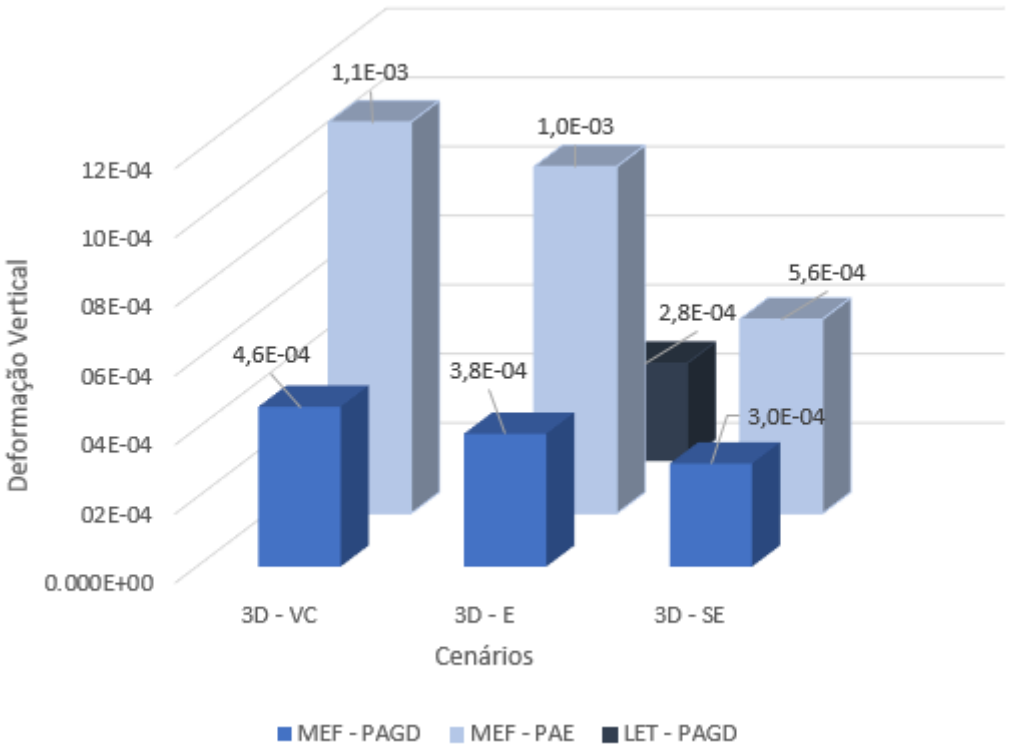
Ainda na camada dos blocos de EPS, buscou-se o parâmetro de deformação vertical, na elevação próxima a 1400 mm. As maiores deformações se mantiveram nas análises que consideraram o uso dos PAR, notadamente, proporcionais à aplicação de maiores cargas. Isto é, o cenário 1, composto pelo uso do VC apresentou deformação vertical médio próximo a 4,6 x 10^{-4}. Esta deformação encontra-se inferior à deformação limite para comportamento

elástico do material, referente a 1%. Logo, é possível inferir que o material estaria trabalhando de forma elástica para as cargas aplicadas, evitando as deformações permanentes na estrutura.

Quando comparadas as deformações obtidas, quanto as variações dos parâmetros dos blocos de EPS, os valores para o uso de PAR resultaram em deformações de superiores a duas vezes quando do uso dos PAGD. Considerando o pior cenário de cargas, com uso do VC.

Adicionalmente, notam-se que as deformações verticais nos cenários que consideram o posicionamento A e B são similares. Os resultados obtidos para deformação vertical nos blocos de EPS são apresentados na Figura 44.

Figura 44 – Deformação Vertical média nos Blocos de EPS – MEF x LET.



Fonte: Próprio Autor.

Por último, com o intuito de obter as deformações no subleito da estrutura, ponto de atenção para delimitação e prevenção das trilhas de rodas, analisou-se a região de elevação 0 mm. Os resultados são apresentados na Figura 45.

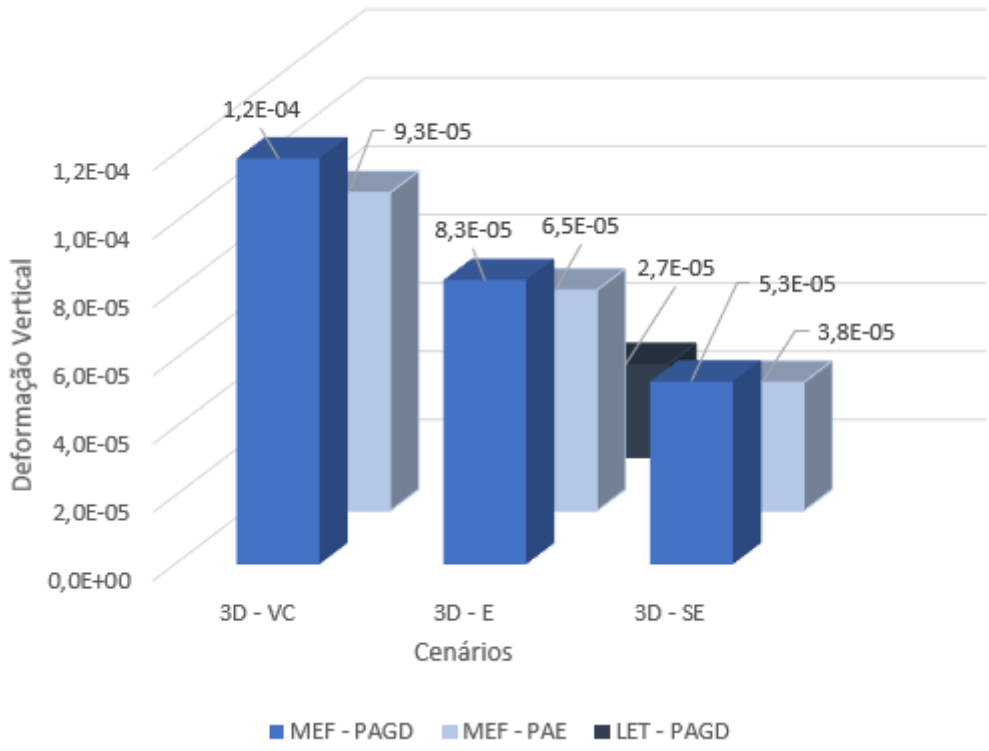
Os resultados de deformação vertical das análises, de ambas as variações de parâmetros para os blocos de EPS, se mantiveram na ordem de

10^{-5}. Com excessão do cenário 1, onde a deformação vertical média foi de 1,2 x 10^{-4}, para os PAGD, considerando a aplicação das cargas do VC. Ainda, as deformações observadas convergiram para valores próximos ao obtido pelo LET.

Nota-se variações mínimas na obtenção do parâmetro de deformação vertical do subleito, quando obtidos de acordo com as variações da seção A e B.

No entanto, a depender das cargas aplicadas, o valor de deformação vertical pode chegar a ser superior em mais de duas vezes, quando comparados os valores entre SE e VC. Quanto as diferenças, considerando os parâmetros dos blocos de EPS, nota-se variações mínimas entre mesmos cenários.

Figura 45 – Deformação Vertical média no Subleito – MEF x LET.



Fonte: Próprio Autor.

Observou-se, com as análises para obtenção de parâmetros para o dimensionamento da estrutura, que o MEF considerando o uso dos PAGD apresentou valores coerentes, e em grande parte na mesma ordem de grandeza, dos resultados obtidos nas análises com o uso do LET, desenvolvidas por Avesani Neto e Rodrigues (2021). Alguns desvios observados, por exemplo, na deflexão na superfície do pavimento, são produtos das diferentes premissas de

métodos de análise entre o LET e o MEF. Complementarmente, a utilização dos PAR, como observado na simulação para o teste de carga e ensaio de viga Benkelman, mais uma vez, não se apresentou adequada e condizente com o observado em campo.

6 CONCLUSÕES

A partir da construção do aterro experimental, ensaios e testes executados, associados às modelagens numéricas realizadas, foram obtidas as conclusões a seguir:

A modelagem numérica com o Método dos Elementos Finitos (MEF), considerando os parâmetros de amostras de grande dimensões (PAGD), apresentou resultados de tensões próximos ao registrado no aterro experimental, confirmando a magnitude destes valores e corroborando as conclusões obtidas por Negussey (2007) e Hazarika (2006), no que tange o efeito e tamanho das amostras e suas relações com os parâmetros mecânicos e de comportamento do material. Por sua vez, a utilização dos parâmetros de amostras reduzidas (PAR) para dimensionamento das estruturas em blocos de EPS não são recomendados. Visto que os seus resultados não foram coerentes com obtido pelo comportamento observado na estrutura construída.

Observando os valores obtidos nas modelagens numéricas, considerando os PAGD, tem-se que as tensões verticais na região dos blocos de EPS são significativamente inferiores as tensões observadas por Negussey (2007) em seus ensaios, permanecendo ainda dentro do trecho de comportamento elástico. Corroborando, então, com a possibilidade do uso dos blocos de EPS como material constitutivo na técnica de aterros leves e a sua aplicabilidade em infraestrutura.

Nota-se que a variação das tensões em profundidades obtidos na comparação dos resultados entre veículo completo (VC) e eixo único (E) é significativamente baixa. A elaboração das análises considerando o VC pode ser substituída pelo uso do E, com o objetivo de reduzir os recursos e tempo, tanto profissional quanto de processamento para desenvolvimento das análises.

Os testes de carga (TC) associado às modelagens numéricas monstraram que as tensões elevadas aplicadas na estrutura são absorvidas consideravelmente pelas primeiras camadas, CBUQ e BGTC, devido à rigidez destes materiais. E, então, as tensões que alcançam a porção superior das camadas de blocos de EPS correspondem a aproximadamente 10% das tensões

inicialmente observadas nestas camadas, no pior cenário considerado, sendo este o cenário II de análise do TC.

Os resultados das simulações dos ensaios de Viga Benkelman (VB) indicaram coerência, a partir do uso dos PAGD, quando são comparados aos resultados do ensaio executado em campo. Ambas as situações consideraram a imposição dos carregamentos provenientes do VC, apresentando diferença em deslocamento desprezível. Os resultados do Layered Elastic Theory (LET), desenvolvidos por Avesani e Rodrigues (2021) apresentaram valores ligeiramente superior ao obtidos pelo MEF e nos ensaios de campo, mesmo considerando a imposição do carregamento do E. Se mostrando, também, satisfatório.

Considerando as variações de cenários entre VC, E e SE, foi possível constatar que há uma diferença considerável, proporcionalmente, da sua variação para obtenção da deflexão de superfície. Corroborando, então, com as conclusões de Vellasco (2018). A variação de deflexão observada, entre os cenários de VC e SE foi de 2 vezes, enquanto que entre os cenários de VC e E foi de 40%.

Ainda, nota-se que para os parâmetros de deflexão em superfície, deformação horizontal no CBUQ e nos blocos de EPS, e para a tensão de compressão vertical, os resultados para o uso dos PAR são superiores em quase 2 vezes, quando comparados com os valores calculados a partir do uso dos PAGD.

Nas análises para obtenção dos parâmetros de dimensionamento de pavimentos, apresentados no tópico 5.3 deste trabalho, quando comparados de acordo com o posicionamento, seja conforme o posicionamento A ou o posicionamento B, observa-se proximidade nos valores obtidos. No entanto, considerando os PAGD e os PAR, nota-se uma tendência de valores ligeiramente superiores considerando os resultados da seção B, conforme observado no LET.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, M. S. S. e MARQUES, M. E. S. (2014). **Aterros Sobre Solos Moles: Projeto de Desempenho**. 2nd ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2014. ISBN: 978-85-7975-157-8

AVESANI NETO, J. O. **Caracterização do comportamento geotécnico do EPS através de ensaios mecânicos e hidráulicos.** Dissertação de mestrado - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.

AVESANI NETO, J. O. e D. RODRIGUES. **Instrumented Load Tests and Layered Theory Analysis of a Large-scale EPS Block Embankment.** Transportation Geotechnics, v.26, 2021. https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2020.100442.

AVESANI NETO, J.O. **Aterro Experimental de Blocos de EPS na Planta do Grupo Isorecort em Ribeirão Pires/SP** – Concepção, Interpretação dos Resultados e Análise de um Aterro Experimental Executado com Blocos de EPS. Relatório Técnico Avesani Consultoria Geotécnica. 2018.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM C578-22. **Standard Specification for Rigid, Cellular Polystyrene Thermal Insulation.** 10.1520/C0578-22. 2022.

BARCA, M. A; NOGUEIRA, S. P. **Análise de Ténicas de Conservação de Pavimentos Rodoviários.** Trabalho de Conclusão de Curso – Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2015.

BEJU, Y. Z.; MANDAL, J. N. **Expanded Polystyrene (EPS) Geofoam:** Preliminary Characteristic Evaluation. Transportation Geotechnics and Geoecology. v. 189, p. 239-246, 2017, Saint Petersburg, Rússia. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.05.038.

BHUINYAN, S. S.; DAHATONDE, S.; JAGTAP, A.; BAGHELE, S.; BHANGE, S. **Design of EPS Geofoam as a Pavement Block.** International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET). e-ISSN: 2395-0056. p-ISSN:2395-0072. v. 6. 2019.

BOWLES, J. Foundation analysis and design. 4th ed. Peoria: McGraw-Hill Education. 1230 p. 1989. ISBN: 0-07-912247-7.

CSRI. Central Building Research Institute. **Manual for Expanded Polystyrene (EPS) Core Panel System and its Field Application**. Roorkee, 2017.

DAS, BRAJA M. **Fundamentos de Engenharia Geotécnica**. São Paulo: Cengage Learning. 610 p. 2013. ISBN: 978-85-221-1112-1.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. DNER 024, 1994. Pavimento – determinação das defflexões pela viga Benkelman. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem.

DUSKOV, M. **EPS as a Light-Weight Sub-base Material in Pavement Structures**. Tese de Doutorado - Delft University of Technology, Delft, Holanda, 1997.

ESMAELI, M; KHALILIAN, V; KHATIBI F. **A Numerical Study on Geofoam Application in the Settlement Reduction of Railway Embankments.** International Journal of Railway Research. v.4, n. 1. ISSN 2423-3838. 2017.

ELRAGI, AHMED; NEGUSSEY, DAWIT e KYANKA, GEORGE. **Sample Size Effects on the Behavior of EPS Geofoam.** Soft Ground Technology. GSP 112. ASCE. 2001. https://doi.org/10.1061/40552(301)22.

FARNSWORTH, C. B.; BARLLET, S.F; NEGUSSEY, D. e STUEDLEIN, A. M. **Rapid Construction and Settlement Behavior of Embankment Systems on Soft Foundation Soils.** Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. v 134. ASCE. 2008. ISSN 1090-0241. https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2008)134:3(289).

Federal Highway Administration (FHWA). **Ground Improvement Technical Summaries: Demonstration Project 116**. v. 1. 1998.

FINDLEY, W.N.; LAI, J.S.; ONARAN, K. **Creep and Relaxation of Non Linear Viscoelastic Materials**. Dover Publication, New York, USA, 1976. ISBN: 9780444601926.

HAZARIKA, H. **Stress-Strain of EPS Geofoam for Large Strain Applications** Geotextiles and Geomembranes, v 24, p. 79-90, 2006. ISSN 0266-1144. https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2005.11.003.

HUANG, X; NEGUSSEY, D. "**Resilient Modulus for EPS Geofoam**." Proc.Geo-Denver 2007 International Conference (ASCE Geotechnical Special Publication n. 169), Denver, Colorado, (2007).

HUANG, X; NEGUSSEY, D. **EPS Geofoam Design Parameters for Pavement Structures**. Geo-Frontiers 2011 : Advances in Geotechnical Engineering . GSP 211. ISSN 0895-0563. 2011.

IP-05. Dimensionamento de Pavimentos Flexíveis – Tráfego Meio Pesado, Pesado, Muito Pesado e Faixa Exclusiva de Ônibus. Prefeitura da Cidade de São Paulo. 2004.

Lay, M.G. **Handbook of Road Technology**, Volume 1: Planning and Pavements, 2nd. ed. Gordon and Breach Publishers. 1990.

MASSAD, F. **Obras de Terra: Cursos Básicos de Geotecnia.** São Paulo: Editora Oficina de Textos. 2003. 226 p. ISBN: 978-85-86238-97-0.

MALAI, A. YOUWAI, S. e JATURABANDIT, N. **Stress-Strain Mechanism of Expanded Polystyrene Foam under Cyclic Loading Conditions within and Beyound Yield States.** International Conference on Transportation Infrastructure and Materials (ICTM). Qingdao, China. 2017.

MENELAU, B. G. de S. **Infraestrutura do transporte brasileiro: Impactos sobre o setor produtivo, com ênfase nos modais rodoviário e ferroviário.** Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2012.

MOMOI, T.; KOKUSYO. T. **"Evaluation of Bearing Properties of EPS Subgrade.**" Proc. Intl. symposium on EPS construction method. 1996.

MONTENEGRO, R. S. P.; SERFATY, M. E. **"Aspectos Gerais do Poliestireno".** Banco Nacional de Desenvolvimento Setorial. Rio de Janeiro. 2002.

NEGUSSEY, D. **Design Parameters for EPS Geofoam. Soils and Foundations.** Japanese Geotechnical Society. v 47. n. 1. p. 161-170. 2007. https://doi.org/10.3208/sandf.47.161

NEGUSSEY, D., Stuedlin, A. W., Bartlett, S. F., and Farnsworth, C. **Performance of geofoam embankment at 100 South, I-15 reconstruction project,** Salt Lake City, Utah. Proc., EPS Geofoam, 3rd Int. Conf., Salt Lake City, Utah. 2001.

NEWMAN, M. P., Bartlett, S. F. e Lawton, E. C. (2010). **Numerical Modeling of Goefoam Embankments**. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, v. 136, no. 2, p. 290-298. 2010. ISSN 1090-0241/2010/2-290–298.

OLIVEIRA, Fernando da S. **Análise Numérica de Experimento para Avaliação dos Efeitos de Sobrecargas Assimétricas em Estacas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

OZER, A. T.; AKINAY, E. **First Geofoam Roadway Embankment Application in Turkey**. 5th International Conference of Geofoam Blocks in Construction Applications. p. 71-80. 2018. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-78981-1_5

PUPPALA, A. J., RUTTANAPORAMAKUL P. e CHANDRA, S. S. **Design and construction of lightweight EPS geofoam embedded geomaterial embankment system for control of settlements**, Geotextiles and Geomembranes, v 47, 2019, p 295-305, ISSN 0266-1144.

SANTOS, L. A. dos. **Modelagem geográfica para caracterização e predição de solos moles direcionada para projetos de infraestrutura.** Dissertação de mestrado, Instituto de Geociências (IGC)/UFMG, Belo Horizonte, 2018.

SANDERS, R.L.; SEEDHOUSE, R.L. **The Use of Polystyrene for Embankment Construction**. Transport and Road Research Laboratory Contractor Report 356, HMSO, United Kingdom. 1994. ISSN: 0968-4107.

SAKOMOTO, YUMI M. **Solução Geotécnica com Utilização de EPS em Aterros sobre Solo Mole: Estudo de Caso na Complementação do Aterro de Encontro à Ponte sobre o Rio Luís Alves – duplicação BR-470**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2018.

SINNATHAMBY G., KORKIALA-TANTTU M., GUSTAVSSON, H. **Post-Use Examination of EPS Block Characteristics: Finnish Case Histories**. 5th International Conference of Geofoam Blocks in Construction Applications. p 99-109. 2018. ISBN: 978-3-319-78981-1.

SOUZA PINTO, CARLOS DE. **Curso Básico de Mecânica dos Solos.** São Paulo: Oficina de Textos, 2006. 363 p. ISBN: 978-85-86238-51-2.

National Academies of Sciences, Engineering and Medicine (NASEM, 2004). **Geofoam Applications in the Design and Construction of highway embankments.** Washington, DC: The National Academies Press; 2004. https://doi.org/10.17226/21944

TESSARI, Janaina (2006). **Utilização de Poliestireno Expandido e Potencial de Aproveitamento de seus Resíduos pela Construção Civil.** 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.

VELLASCO, B. Q. (2018). **Análise Crítica do Controle Construtivo de Pavimentos com a Viga Benkelman: aplicação ao caso da ampliação do Aeroporto Internacional Tom Jobim no Rio de Janeiro.** 2018. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica de Engenharia. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2018.

APÊNDICE

A seguir, são apresentados as tabelas, as figuras e dados elaborados no desenvolvimento deste trabalho.

Tabela 13 – Resultados – Parâmetros de Dimensionamento de Pavimentos – Seção A – Parâmetros de Amostras Reduzidas (PAR).

Seção	Prof. (mm)	Camada	Parâm etro	1 – VC – 3D	2 – E – 3D	3 – SE – 3D	4 – E – (LET)
A	1800	CBUQ	A: Deflexão, D0 (mm)	1,57	1,22	0,72	0,94
	1700	CBUQ	B: Deformação Horizontal	2,9E-05	4,4E-05	2,2E-05	-
	1400	BGTC	C: Deformação Horizontal	4,9E-05	2,1E-05	4,2E-05	7,6E-5
	1400	Blocos de EPS	D: Tensão de Compressão Vertical (kPa)	4,5	4,1	2,2	5,2
	1400	Blocos de EPS	E: Tensão de Compressão Horizontal (kPa)	0,2	0,2	0,02	2,8
	1400	Blocos de EPS	F: Deformação Vertical	1,1E-03	1,0E-03	5,5E-04	2,8E-04
	0	Subleito	G: Deformação Vertical	9,4E-05	6,0E-05	3,8E-05	2,7E-05

Fonte: Próprio autor.

Tabela 14 – Resultados – Parâmetros de Dimensionamento de Pavimentos – Seção B – Parâmetros de Amostras Reduzidas (PAR).

Seção	Elev. (mm)	Camada	Parâmetro	1 – VC – 3D	2 – E – 3D	3 – SE – 3D	4 – E – (LET)
B	1800	CBUQ	A: Deflexão, D0 (mm)	1,66	1,22	0,72	0,94
	1700	CBUQ	B: Deformação Horizontal	2,1E-05	2,2E-05	1,5E-05	-
	1400	BGTC	C: Deformação Horizontal	4,5E-05	4,2E-05	3,5E-05	7,6E-5
	1400	Blocos de EPS	D: Tensão de Compressão Vertical (kPa)	4,6	4,1	2,3	5,2
	1400	Blocos de EPS	E: Tensão de Compressão Horizontal (kPa)	0,2	0,2	0,0	2,8
	1400	Blocos de EPS	F: Deformação Vertical	1,1E-03	1,1E-03	5,8E-04	2,8E-04
	0	Subleito	G: Deformação Vertical	9,2E-05	6,9E-05	3,7E-05	2,7E-05

Fonte: Próprio autor.

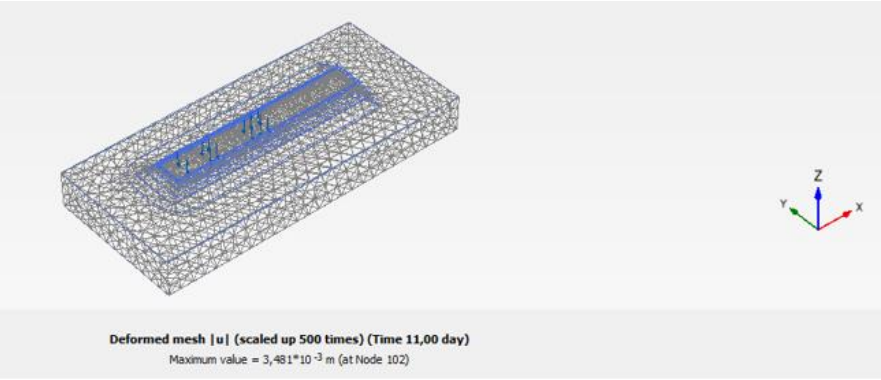
Tabela 15 – Resultados – Valores Médios – Parâmetros de Dimensionamento de Pavimentos – Parâmetros de Amostras Reduzidas (PAR).

Seção	Elev. (mm)	Camada	Parâmetro	1 – VC – 3D	2 – E – 3D	3 – SE – 3D	4 – E – (LET)
Média Dos Resultados	1800	CBUQ	A: Deflexão, D0 (mm)	1,62	1,27	0,74	0,94
	1700	CBUQ	B: Deformação Horizontal	2,5E-05	3,3E-05	1,9E-05	-
	1400	BGTC	C: Deformação Horizontal	4,7E-05	3,1E-05	3,9E-05	7,6E-5
	1400	Blocos de EPS	D: Tensão de Compressão Vertical (kPa)	4,6	4,1	2,2	5,2
	1400	Blocos de EPS	E: Tensão de Compressão Horizontal (kPa)	0,2	0,2	0,02	2,8
	1400	Blocos de EPS	F: Deformação Vertical	1,1E-03	1,0E-03	5,6E-04	2,8E-04
	0	Subleito	G: Deformação Vertical	9,3E-05	6,5E-05	3,8E-05	2,7E-05

Fonte: Próprio autor.

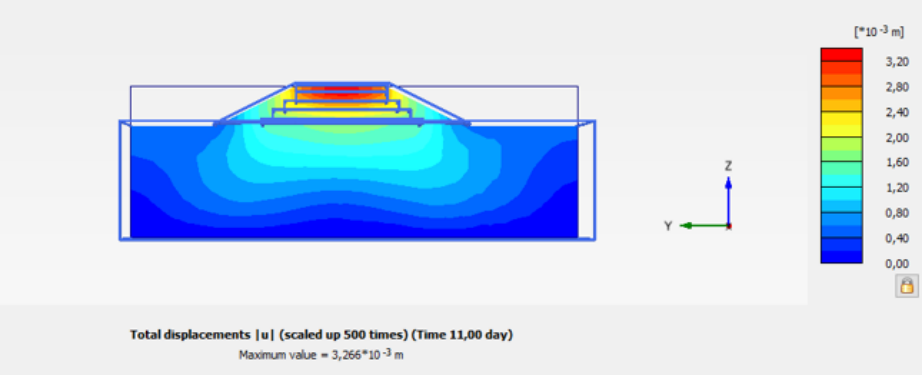
As figuras a seguir apresentam a modelagem considerando os valores de deslocamento total, incluindo os recalques provenientes da construção da estrutura e da imposição das cargas durante o Teste de Carga e Ensaio de Viga Benkelman.

Figura 46 – Modelagem 3D – Malha – Teste de Carga – VC – Cenário I.



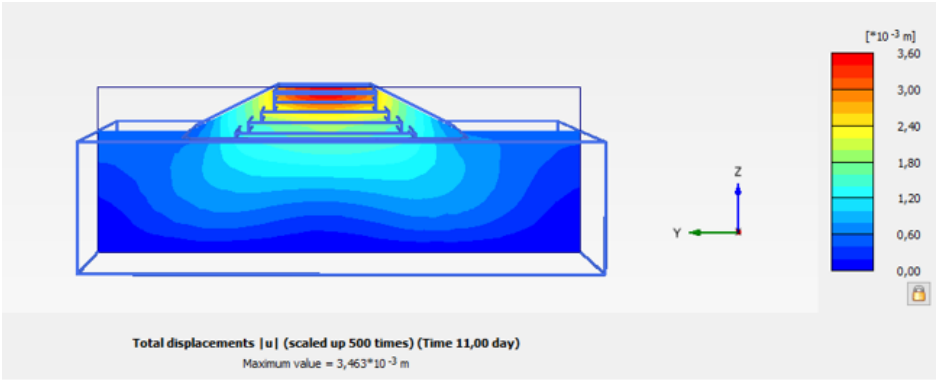
Fonte: Próprio autor.

Figura 47 – Seção 1 (S1) – Deslocamentos no Teste de Carga – VC – Cenário I.



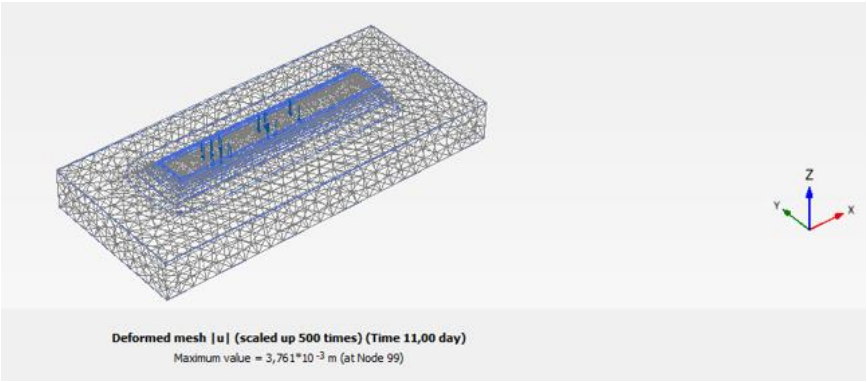
Fonte: Próprio autor.

Figura 48 – Seção 1* (S1*) – Deslocamento no Teste de Carga – VC – Cenário I.



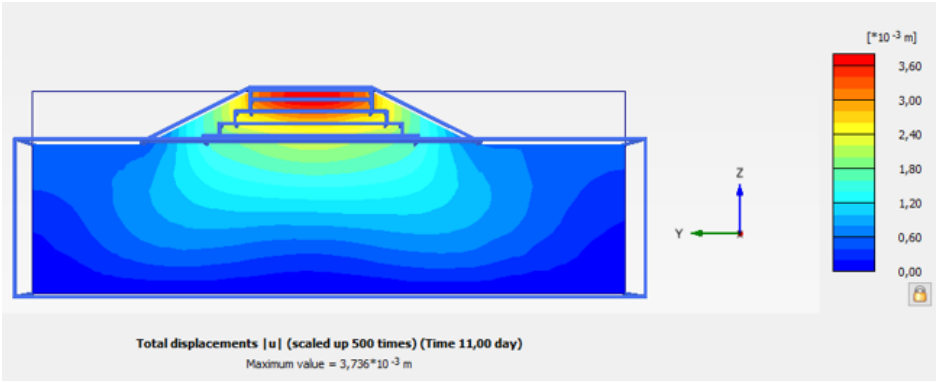
Fonte: Próprio autor.

Figura 49 – Modelagem 3D – Malha – Teste de Carga – VC – Cenário II.



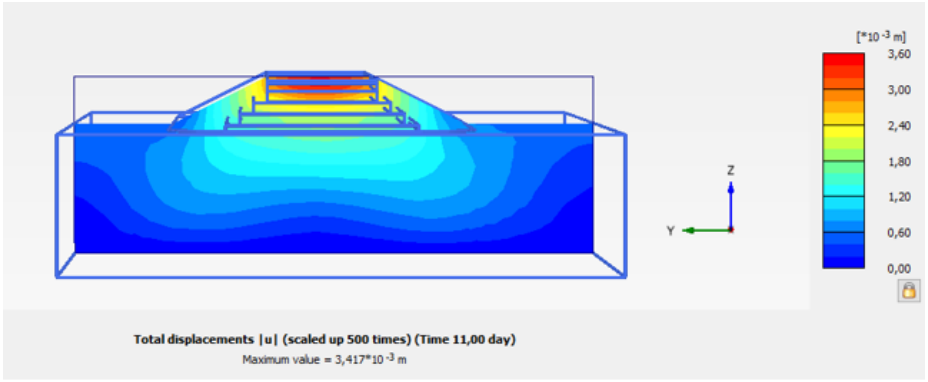
Fonte: Próprio autor.

Figura 50 – Seção 1 (S1) – Deslocamento no Teste de Carga – VC – Cenário II.



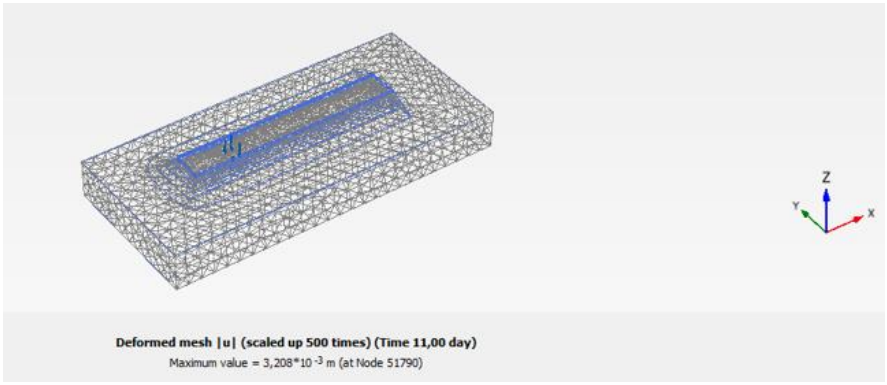
Fonte: Próprio autor.

Figura 51 – Seção 1* (S1*) – Deslocamento no Teste de Carga – VC – Cenário II.



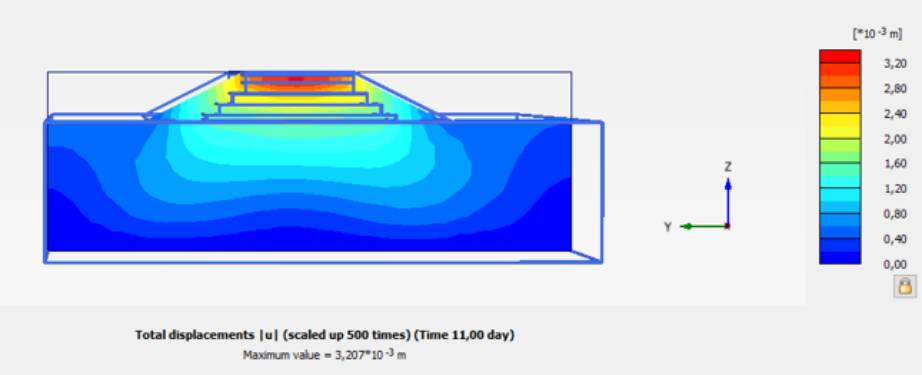
Fonte: Próprio autor.

Figura 52 – Modelagem 3D – Malha – Teste de Carga – E – Cenário I.



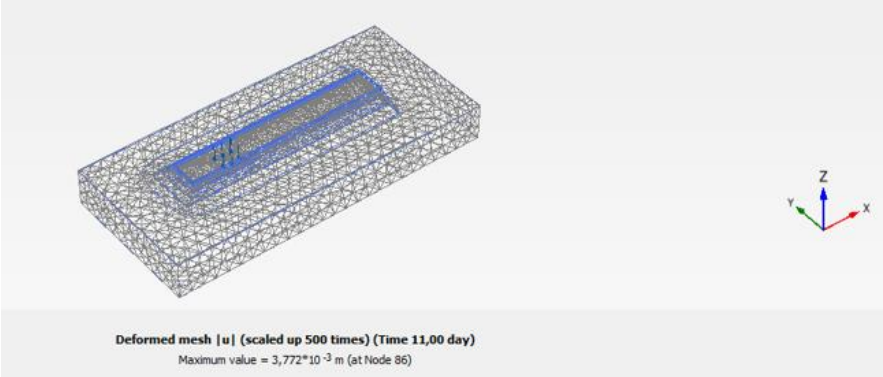
Fonte: Próprio autor.

Figura 53 – Seção 1 (S1) – Deslocamento no Teste de Carga – VC – Cenário II.



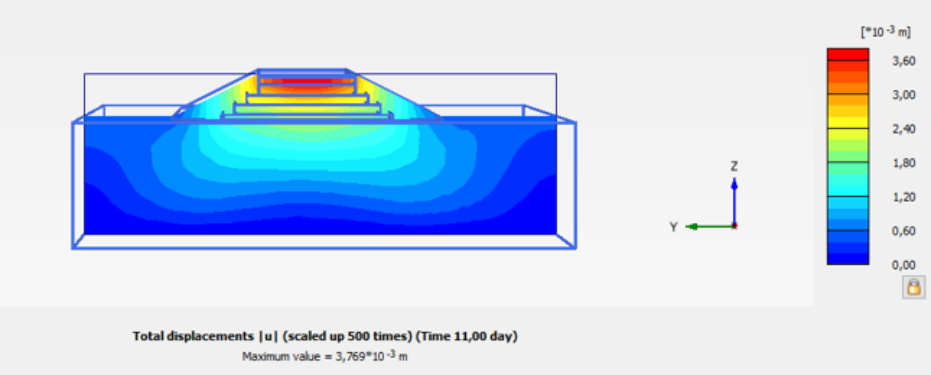
Fonte: Próprio autor.

Figura 54 – Modelagem 3D – Malha – Teste de Carga – E – Cenário II.



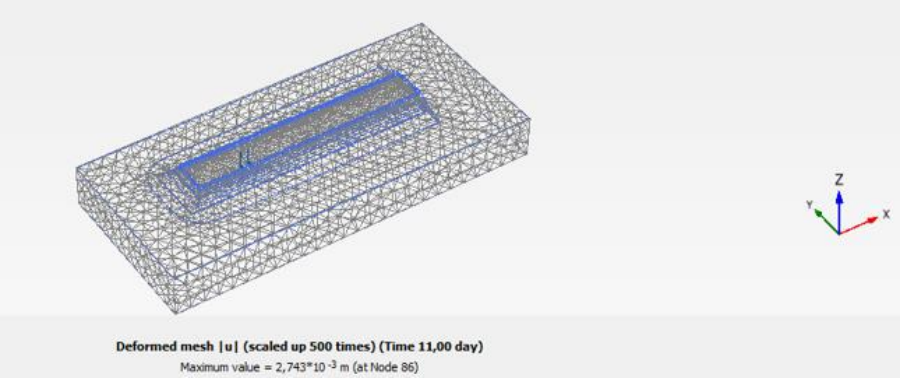
Fonte: Próprio autor.

Figura 55 – Seção 1 (S1) – Deslocamento no Teste de Carga – VC – Cenário II.



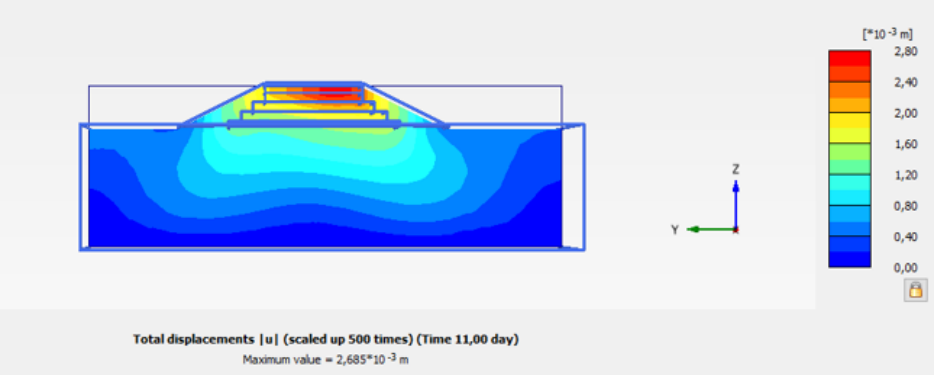
Fonte: Próprio autor.

Figura 56 – Modelagem 3D – Malha – Teste de Carga – SE – Cenário I.



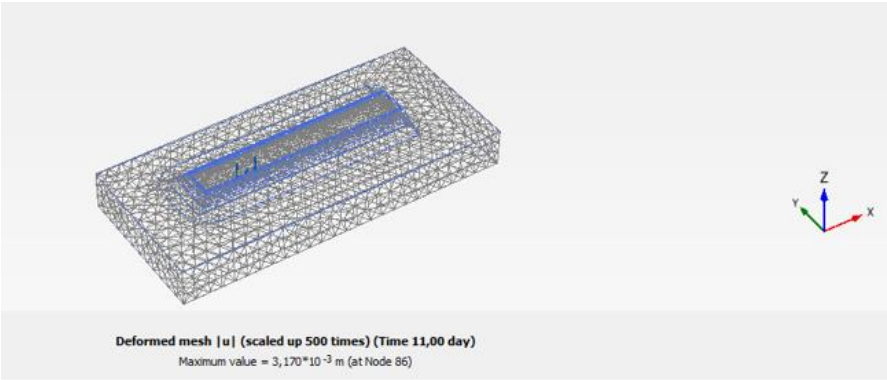
Fonte: Próprio autor.

Figura 57 – Seção 1 (S1) – Deslocamento no Teste de Carga – VC – Cenário I.



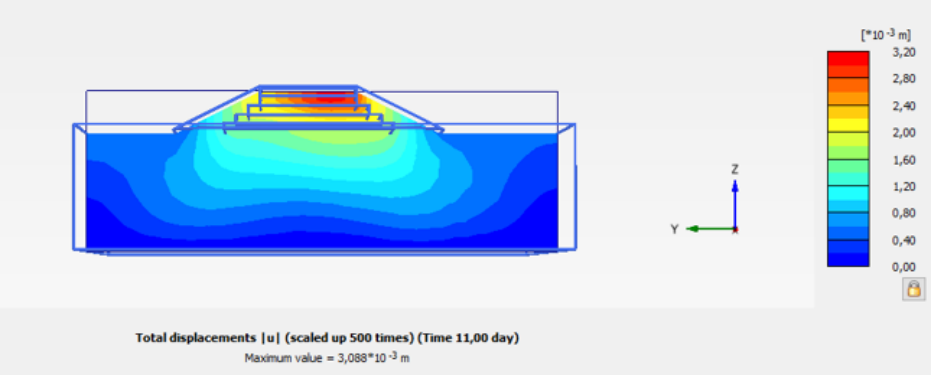
Fonte: Próprio autor.

Figura 58 – Modelagem 3D – Malha – Teste de Carga – SE – Cenário II.



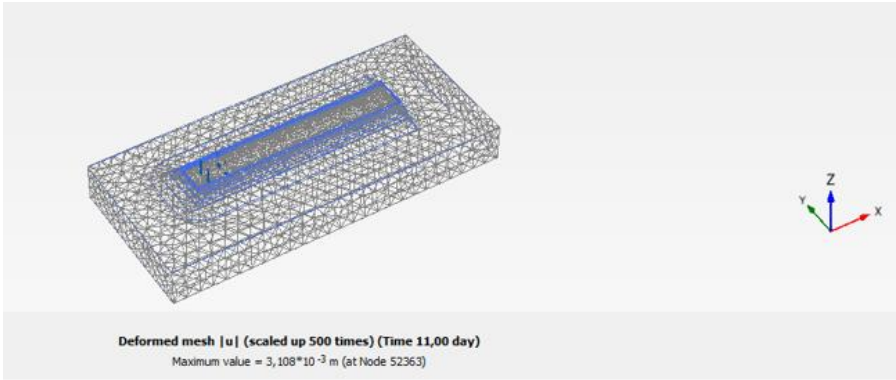
Fonte: Próprio autor.

Figura 59 – Seção 1 (S1) – Deslocamento no Teste de Carga – VC – Cenário II.



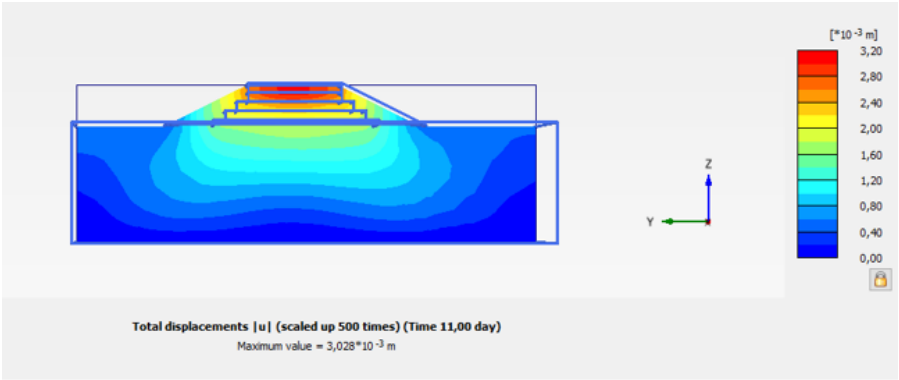
Fonte: Próprio autor.

Figura 60 – Modelagem 3D – Malha – Ensaio de Viga Benkelman – VC.



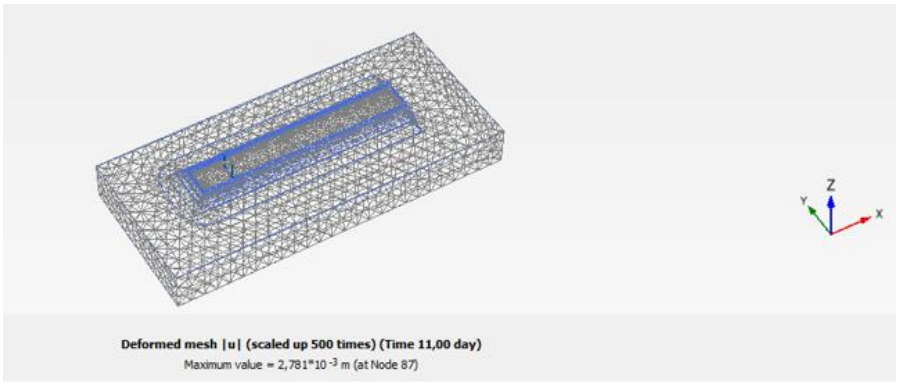
Fonte: Próprio autor.

Figura 61 – Seção 1 (S1) – Deslocamento no Ensaio de Viga Benkelman – VC.



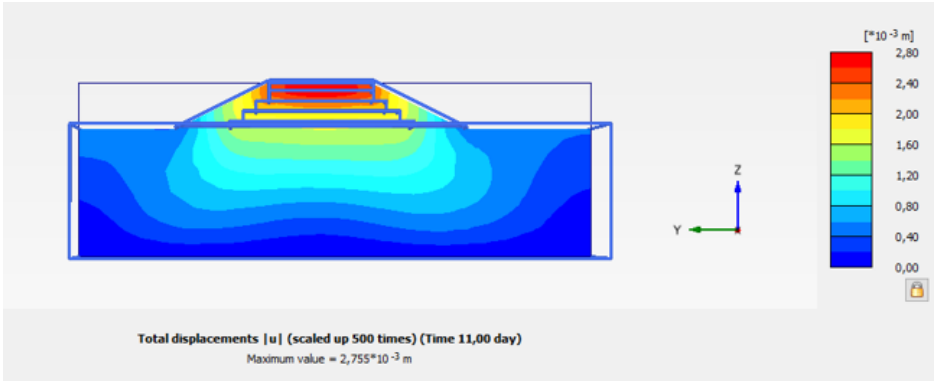
Fonte: Próprio autor.

Figura 62 – Modelagem 3D – Malha – Ensaio de Viga Benkelman – E.



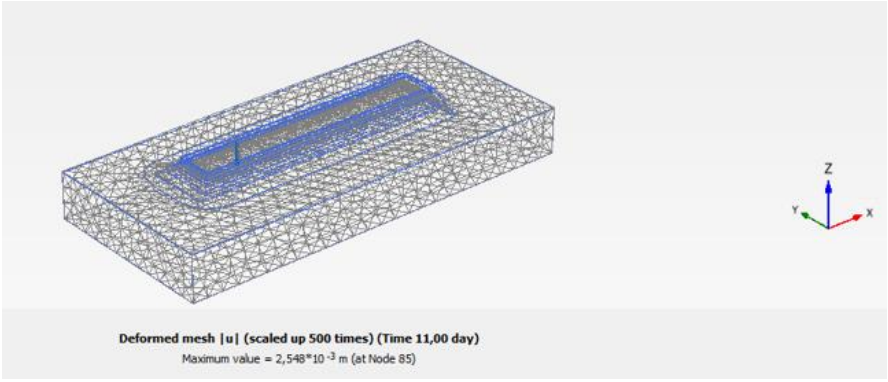
Fonte: Próprio autor.

Figura 63 - Seção 1 (S1) – Deslocamento no Ensaio de Viga Benkelman – E.



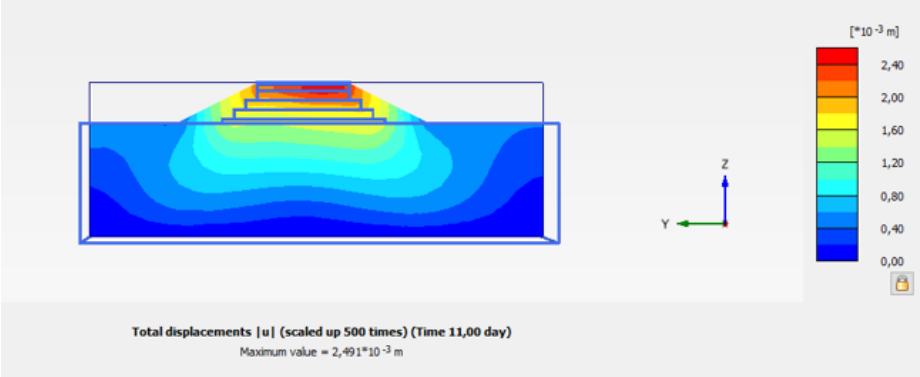
Fonte: Próprio autor.

Figura 64 – Modelagem 3D – Malha – Ensaio de Viga Benkelman – SE.



Fonte: Próprio autor.

Figura 65 – Seção 1 (S1) – Deslocamento – Ensaio de Viga Benkelman – SE.

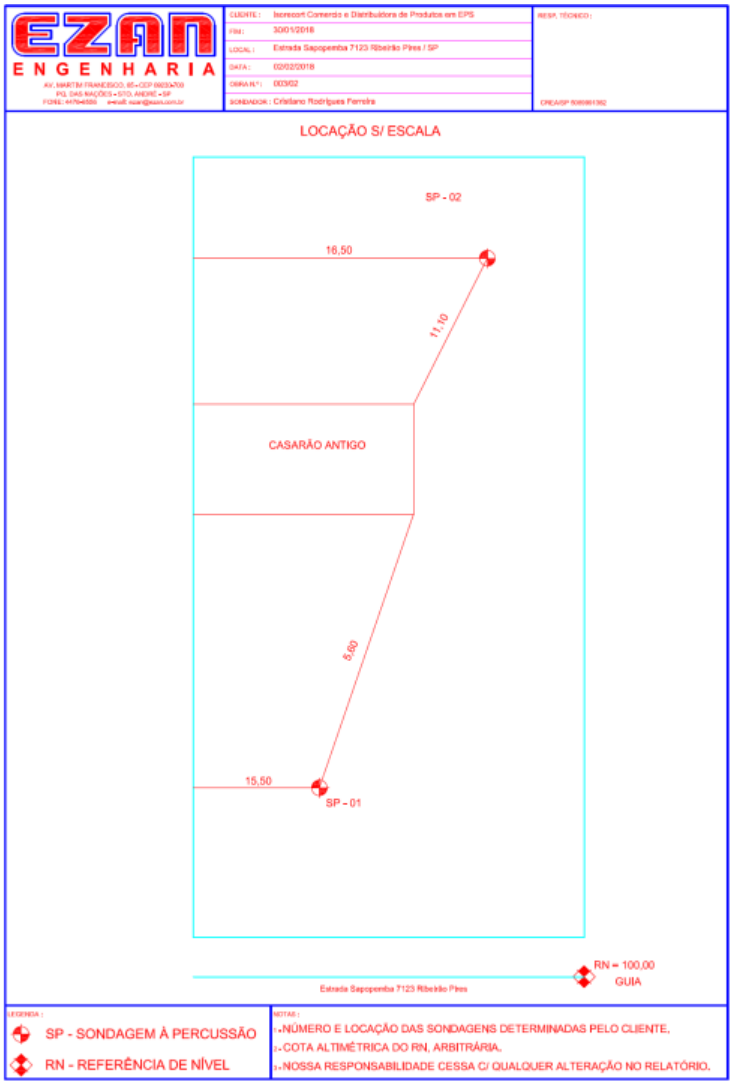


Fonte: Próprio autor.

ANEXOS

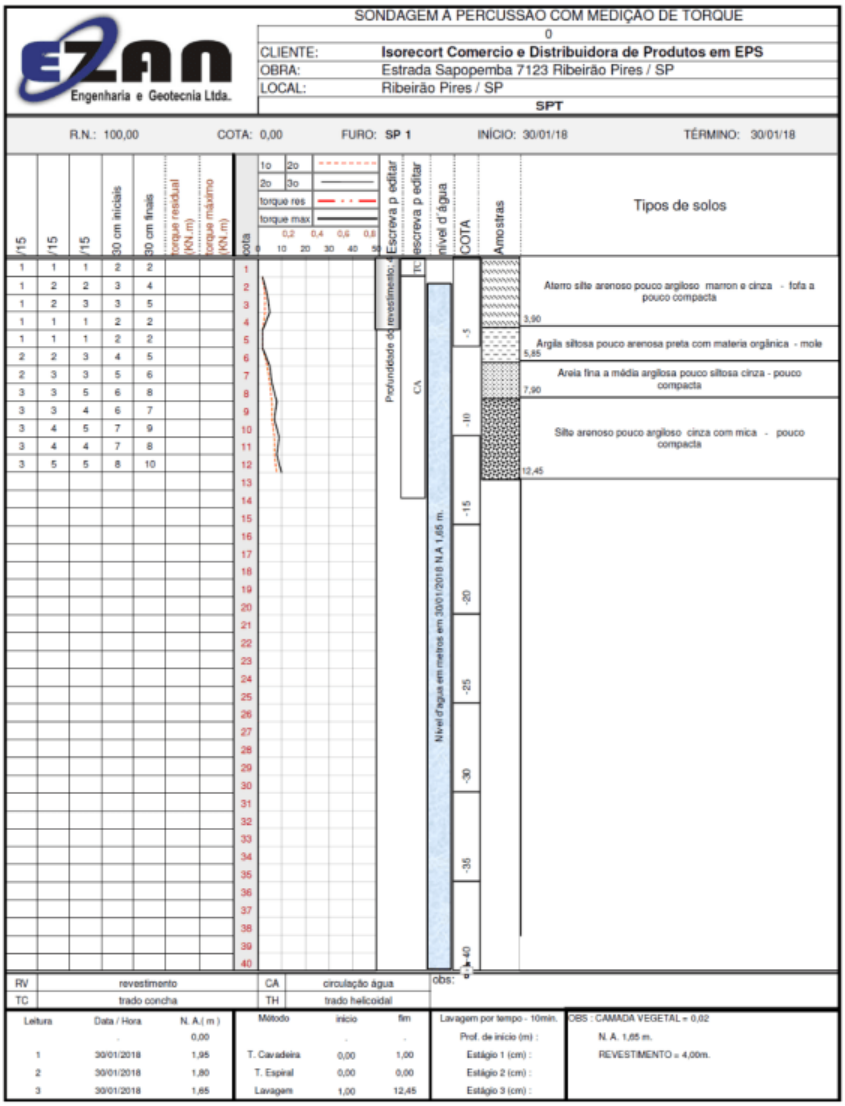
A seguir, são apresentados os dados e figuras das referências utilizadas como suporte para o desenvolvimento deste trabalho.

Figura 66 – Planta das Investigações.



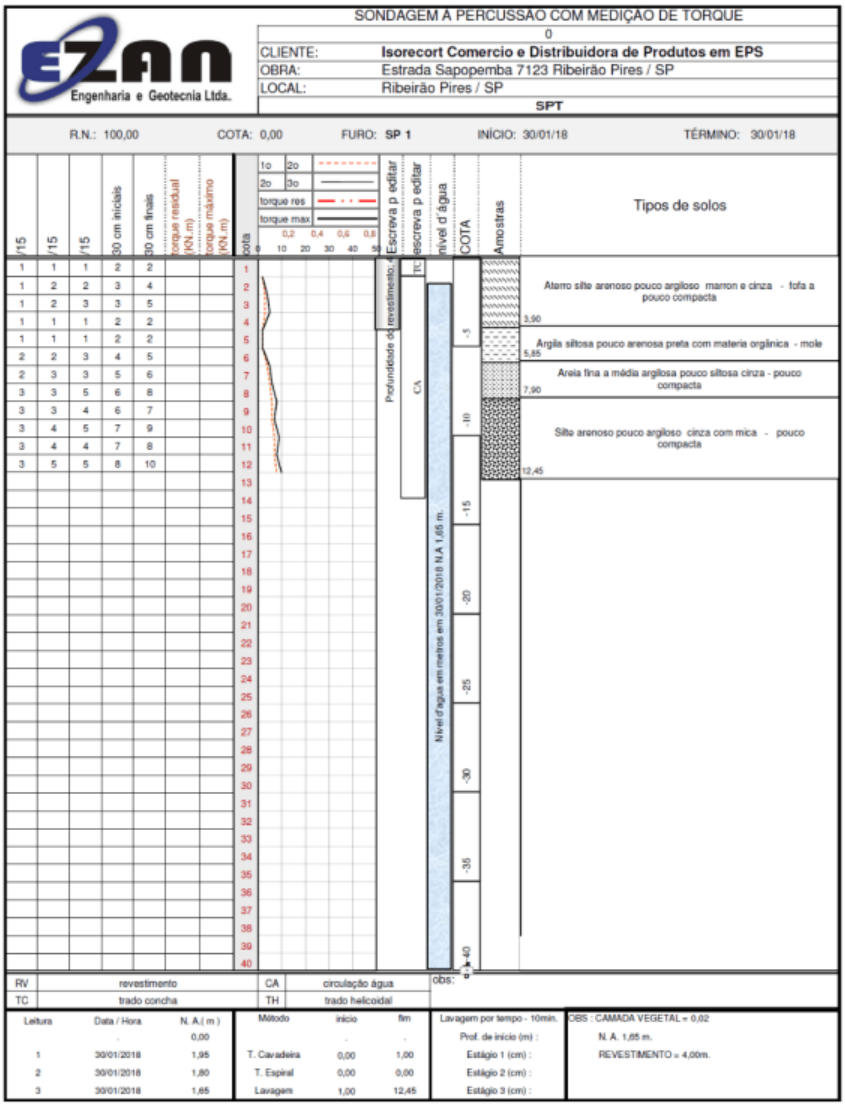
Fonte: Avesani Neto (2018).

Figura 67 – Boletim de Sondagens – Investigação de Fundação.



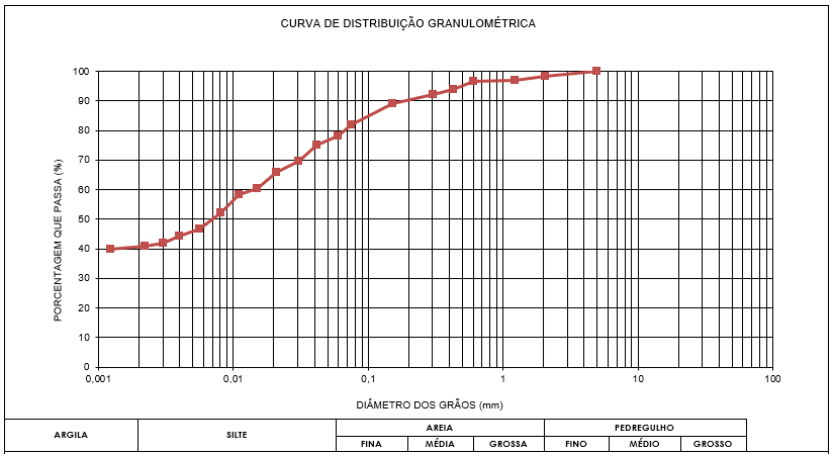
Fonte: Avesani Neto (2018).

Figura 68 – Boletim de Sondagens – Investigação de Fundação.



Fonte: Avesani Neto (2018).

Figura 69 – Curva de Distribuição Granulométrica – Fundação do Aterro Experimental.



Fonte: Avesani Neto e Rodrigues (2021).

Figura 70 – Ensaio SPT – Região de Construção do Aterro Experimental.

Fonte: Avesani Neto (2018).

Figura 71 - Região disponibilizada para o ensaio.

Fonte: Avesani Neto (2018).

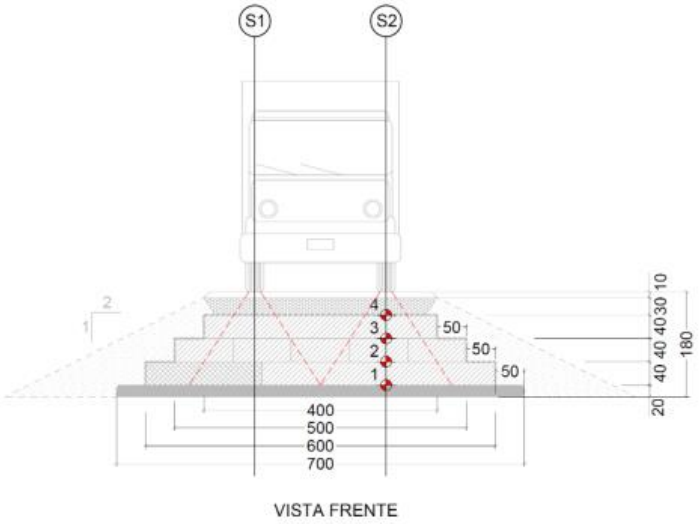
Figura 72 – Célula de tensão empregada.

Fonte: Avesani Neto (2018).

Figura 73 – Posição das células na seção longitudinal da estrutura.

Fonte: Avesani Neto (2018).

Figura 74 – Posição das células na seção transversal da estrutura – dimensões em mm.



Fonte: Avesani Neto (2018).

Figura 75 – Leitura durante o TC.

Fonte: Avesani Neto (2018).

Figura 76 – Leitura durante o ensaio VB.

Fonte: Avesani Neto (2018).