



Alan Borges da Silva

**Simulação do Comportamento Mecânico de
Lastro Ferroviário pelo Método dos Elementos
Discretos**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da PUC-Rio.

Orientadora: Prof^a. Raquel Quadros Velloso
Co-Orientadora: Prof^a. Michéle Dal Toé Casagrande



Alan Borges da Silva

**Simulação do Comportamento Mecânico de
Lastro Ferroviário pelo Método dos Elementos
Discretos**

Dissertação apresentada como requisito parcial para
obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Civil da PUC-Rio. Aprovada
pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Prof^a. Raquel Quadros Velloso

Orientadora

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental - PUC-Rio

Prof^a. Michéle Dal Toé Casagrande

Co-Orientadora

Universidade de Brasília

Prof. Eurípedes do Amaral Vargas Jr.

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental - PUC-Rio

Prof^a. Andrea Ferreira Borges

Universidade Federal do Rio de Janeiro

Prof. Márcio da Silveira Carvalho

Coordenador Setorial do

Centro Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 01 de Outubro de 2018

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e da orientadora.

Alan Borges da Silva

Graduou-se em Engenharia Civil pela Univali (Universidade do Vale do Itajaí) em Itajaí, Santa Catarina em janeiro de 2013. Ingressou no mestrado na Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro em agosto de 2015, desenvolvendo dissertação na linha de pesquisa de Geomecânica Computacional aplicada a ferrovias.

Ficha Catalográfica

Silva, Alan Borges da

Simulação do comportamento mecânico de lastro ferroviário pelo método dos elementos discretos / Alan Borges da Silva; orientadora: Raquel Quadros Velloso; co-orientadora: Michéle Dal Toé Casagrande. – 2018.

67 f.: il.(color.); 30 cm

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, 2018.

Inclui bibliografia

1. Engenharia Civil - Teses. 2. Lastro ferroviário. 3. Granulometria. 4. Ensaio triaxial. 5. Método dos elementos discretos. I. Velloso, Raquel Quadros. II. Casagrande, Michéle Dal Toé. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. IV. Título.

CDD: 624

Aos meus pais, Anibal e Helena.

Agradecimentos

São inúmeras as pessoas que me apoiaram ao longo desta caminhada, e mesmo que não existam palavras suficientes para agradecer a todos que cruzaram comigo por esta trajetória, gostaria de deixar alguns agradecimentos especiais.

Primeiramente, gostaria de agradecer aos meus pais Anibal e Helena, pois sem eles nada disso seria possível, obrigado por todo amor, carinho, apoio e dedicação desde sempre, vocês são meus alicerces. Ao meu irmão Alex, pois além de irmão é um grande amigo e incentivador, obrigado por essa amizade e parceria, hoje e sempre.

À minha namorada Amanda, pelo amor, carinho e apoio, que me incentivam sempre a buscar o melhor.

À minha orientadora professora Raquel, por ter aceito o desafio de me orientar no meio do caminho e pela paciência e dedicação para me ensinar e ajudar a desenvolver este trabalho.

À minha co-orientadora professora Michéle, pelo seu apoio e auxílio durante toda trajetória desde o início do mestrado, obrigado pela paciência e dedicação.

A todos os professores da Engenharia Civil - Geotecnia da PUC-Rio por compartilhar seus conhecimentos e experiências, que servirão de lição e base para meu desenvolvimento contínuo.

À PUC-Rio, pelos auxílios concedidos, sem os quais este trabalho não poderia ter sido realizado.

Ao Malko por me incentivar a me inscrever no mestrado e pelo apoio durante esse percurso. Ao Rosuel, pelo incentivo no mestrado, amizade e parceria pro que der e vier. E aos dois pelo companheirismo e irmandade desde a época da faculdade.

Aos grandes amigos do curso de engenharia civil da UNIVALI, Carolina, Cláudio, Felipe e Yuri, pela amizade duradoura e sincera desde a época da faculdade até além dos casamentos futuros.

Ao Rodrigo Rodrigues, pela incrível capacidade que desenvolvemos de estudar e aprender juntos. As horas de estudos se tornavam mais leves e a amizade e companheirismo foram fundamentais para seguirmos em frente e triunfamos.

À Turma do Café, pelos almoços, convívio e discussões na mesa do café, onde muitas vezes este era o momento mais aguardado do dia para descontrair. Em especial aos amigos Felipe, Hélió, Letícia, Rafael e Renan, pelos jogos de tabuleiro e RPGs, que a amizade perdure e as pérolas sejam eternizadas, Plus Ultra!

Aos Filhos da PUC, assim autointitulados, Ana Luiza, Andrea, Arthur, Bruno, Carolina, Erica, Jainor, Judith, Larissa, Luana, Mariana, Paul, Raquel e Raul, pela oportunidade que me foi dada de conhecer e compartilhar com vocês momentos inesquecíveis, desde os churrascos e os sambas na Lapa até as altas horas estudando na favelinha.

Às amigas do Espírito Santo, Fernanda, Thais e Thaiana, pelo COBRAMSEG e pelo TT Burger, onde nossa amizade nasceu e desde então só cresce, obrigado pela parceria e apoio.

Ao Juan, Natalia Louzada e Mariana, pela época do laboratório e por toda ajuda e paciência para me ensinar sobre ensaios triaxiais.

Ao Alexandr e Luis Huevon por me ajudarem a entender um pouco melhor sobre computação, método dos elementos discretos e WoodEM.

Ao Gino Vizcarra, pela disponibilidade e auxílio com bibliografias sempre que solicitado. Seu apoio foi fundamental para o desenvolvimento do trabalho.

Ao César e a Silvine pelo convívio no JASC durante todo tempo que passei no Rio de Janeiro.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

Resumo

Silva, Alan Borges da; Velloso, Raquel Quadros; Casagrande, Michéle Dal Toé. **Simulação do comportamento mecânico de lastro ferroviário pelo método dos elementos discretos**. Rio de Janeiro, 2018. 67 p. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Considerando o investimento do governo federal na expansão da malha ferroviária com o programa de aceleração do crescimento (PAC2) e com o programa de investimento em logística (PIL), vem sendo desenvolvidas no país inúmeras pesquisas envolvendo ferrovias, inclusive na área de materiais, como o lastro ferroviário, objeto de estudo deste projeto. Paralelamente, pesquisas com foco em modelagem computacional vem sendo desenvolvidas a fim de otimizar a avaliação do comportamento dos materiais. O projeto tem como objetivo desenvolver modelos computacionais para avaliar a capacidade do método dos elementos discretos em reproduzir o comportamento mecânico de lastro ferroviário submetido a carregamentos cíclicos, com base em um ensaio triaxial cíclico. O ensaio analisou o comportamento mecânico de duas distribuições granulométricas de lastro ferroviário, sendo a primeira sugerida por Indraratna et al. (2004), referente a alterações para melhorias da normativa australiana, enquanto a segunda, utiliza a normativa brasileira. O modelo computacional foi desenvolvido no software WooDEM (2012). Foram realizadas análises mecânicas do comportamento do lastro ferroviário considerando as coordenadas das partículas em relação ao tempo e a profundidade, a fim de determinar o deslocamento gerado pelo carregamento cíclico.

Palavras-chave

Lastro Ferroviário; Método dos Elementos Discretos; Ensaio Triaxial Prismoidal Cíclico; WooDEM.

Abstract

Silva, Alan Borges da; Velloso, Raquel Quadros (Advisor); Casagrande, Michéle Dal Toé (Co-Advisor). **Simulation of the mechanical behavior of rail ballast by discrete element method.** Rio de Janeiro, 2018. 67 p. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Considering the federal government's investment in the expansion of the railway network with the growth acceleration program (PAC2) and with the investment in logistics program (PIL), numerous surveys involving railways have been developed in the country, including in the area of materials, such as the rail ballast, object of study of this project. In parallel, research focused on computational modeling has been developed in order to optimize the evaluation of the behavior of materials. This dissertation aims to develop computational models to evaluate the ability of the discrete element method to reproduce the mechanical behavior of cyclically loaded rail ballast, based on a cyclic triaxial test. The study analyzed the mechanical behavior of two rail ballast granulometric distributions, the first being suggested by Indraratna et al. (2004), regarding changes to improve Australian regulations, while the second, uses the Brazilian legislation. The computational model was developed in WoodDEM software (2012). Mechanical analysis of the rail ballast behavior was performed considering the coordinates of the particles in relation to time and depth in order to determine the displacement generated by the cyclic loading.

Keywords

Rail Ballast; Discrete Element Method; Triaxial Prism Cyclic Test; WoodDEM.

Sumário

1. Introdução.....	16
1.1. Relevância e justificativa da pesquisa.....	16
1.2. Objetivos	17
1.3. Organização da dissertação.....	18
2. Revisão bibliográfica.....	19
2.1. Comportamento mecânico de lastro rodoviário.....	19
2.2. Ensaio triaxial cíclico.....	20
2.2.1. Equipamento prismoidal triaxial cíclico	22
2.2.2. Procedimento do ensaio	24
2.3. Características dos agregados.....	25
2.3.1. Granulometria.....	25
2.3.2. Índice de vazios.....	29
2.3.3. Características da partícula	30
2.4. Modelagem numérica de lastro rodoviário	31
2.4.1. Ciclo de cálculo.....	32
3. Simulação numérica	34
3.1. O Método dos elementos discretos.....	34
3.2. Simulação do ensaio prismoidal triaxial cíclico	37
3.2.1. Modelo numérico	37
3.2.2. Descrição de partículas	38
3.2.3. Geração de partículas	40
3.2.4. Geração de dormente.....	42
3.2.5. Carregamento.....	43
3.3. Resultados	44
4. Considerações finais.....	61
4.1. Conclusões	61
4.2. Sugestões para pesquisas futuras	62
5. Referências bibliográficas.....	63

Lista de Figuras

Figura 1.1 - Expansão da malha ferroviária brasileira (PAC 2). Ministério dos Transportes (2016)	16
Figura 1.2 - Expansão da malha ferroviária brasileira (PIL). Ministério dos Transportes (2016)	17
Figura 2.1 – Deformação de materiais granulares para aplicação de um ciclo de carga (LEKARP et al, 2000)	20
Figura 2.2 - Lastro de ombro livre para deslocamentos horizontais e verticais. (HEYDARI et al., 2015)	22
Figura 2.3 - Ilustração esquemática na seção X-X da câmara triaxial cíclica (dimensões em mm). (VIZCARRA, 2015)	22
Figura 2.4 - Equipamento triaxial prismoidal cíclico da Universidade de Wollongong na Austrália (VIZCARRA, 2015)	23
Figura 2.5 – Variação da graduação (THOM e BROWN, 1988)	26
Figura 2.6 – (a) Densidade, (b) ângulo de atrito, (c) módulo de cisalhamento e (d) permeabilidade. (THOM e BROWN, 1988)	26
Figura 2.7 – Efeitos da graduação nas deformações verticais do lastro sob carregamento cíclico (RAYMOND e DIYALJEE, 1979).	27
Figura 2.8 – Relação entre as fases do solo (LAMBE e WHITMAN, 1969).	29
Figura 2.9 - Sequência esquemática do diagrama de cálculo de uma simulação MED (O’SULLIVAN, 2011)	33
Figura 3.1- Série de 2 molas que representam rigidez normal de contato entre 2 esferas.	35
Figura 3.2 - Ilustração esquemática do ensaio triaxial.	38
Figura 3.3 - Granulometria dos dois lastros utilizados por Vizcarra (2015).	40
Figura 3.4 – Exemplo de distribuição de tamanho de partícula	41
Figura 3.5 – Processo de compactação da camada de sublastro no software WooDEM.	41

Figura 3.6 – Processo de compactação da camada de sublastro no software WooDEM.	42
Figura 3.7 - Modelo computacional do ensaio triaxial prismoidal desenvolvido no software WooDEM.	44
Figura 3.8 - Ilustração esquemática da vista frontal da caixa, indicando a posição das superfícies utilizadas para análise da deformação das partículas do lastro ferroviário.	46
Figura 3.9 Granulometria A - Superfície de deslocamento à 0,18 m de altura, frequência de carregamento de 15 Hz.	46
Figura 3.10 Granulometria B - Superfície de deslocamento à 0,18 m de altura, frequência de carregamento de 15 Hz.	47
Figura 3.11 Comparação da linha média dos deslocamentos verticais na direção do eixo do dormente à 0,18 m de altura, frequência de carregamento de 15 Hz.	47
Figura 3.12 Granulometria A - Superfície de deslocamento à 0,40 m de altura, frequência de carregamento de 15 Hz.	48
Figura 3.13 Granulometria B - Superfície de deslocamento à 0,40 m de altura, frequência de carregamento de 15 Hz.	48
Figura 3.14 Comparação da linha média dos deslocamentos verticais na direção do eixo do dormente à 0,40 m de altura, frequência de carregamento de 15 Hz.	49
Figura 3.15 Granulometria A - Superfície de deslocamento à 0,18 m de altura, frequência de carregamento de 25 Hz.	49
Figura 3.16 Granulometria B - Superfície de deslocamento à 0,18 m de altura, frequência de carregamento de 25 Hz.	50
Figura 3.17 Comparação da linha média dos deslocamentos verticais na direção do eixo do dormente à 0,18 m de altura, frequência de carregamento de 25 Hz.	50
Figura 3.18 Granulometria A - Superfície de deslocamento à 0,40 m de altura, frequência de carregamento de 25 Hz.	51
Figura 3.19 Granulometria B - Superfície de deslocamento à 0,40 m de altura, frequência de carregamento de 25 Hz.	51

Figura 3.20 Comparação da linha média dos deslocamentos verticais na direção do eixo do dormente à 0,40 m de altura, frequência de carregamento de 25 Hz.	52
Figura 3.21 Comparação da linha média dos deslocamentos verticais na direção do eixo do dormente à 0,18 m de altura, frequência de carregamento de 15 e 25 Hz e ângulo de atrito de 46°.	53
Figura 3.22 Comparação da linha média dos deslocamentos verticais na direção do eixo do dormente à 0,40 m de altura, frequência de carregamento de 15 e 25 Hz e ângulo de atrito de 46°.	54
Figura 3.23 Granulometria A - Superfície de deslocamento à 0,18 m de altura, frequência de carregamento de 15 Hz e ângulo de atrito de 35°.	54
Figura 3.24 Granulometria B - Superfície de deslocamento à 0,18 m de altura, frequência de carregamento de 15 Hz e ângulo de atrito de 35°.	55
Figura 3.25 Comparação da linha média dos deslocamentos verticais na direção do eixo do dormente à 0,18 m de altura, frequência de carregamento de 15 Hz e ângulo de atrito de 35°.	55
Figura 3.26 Granulometria A - Superfície de deslocamento à 0,40 m de altura, frequência de carregamento de 15 Hz e ângulo de atrito de 35°.	56
Figura 3.27 Granulometria B - Superfície de deslocamento à 0,40 m de altura, frequência de carregamento de 15 Hz e ângulo de atrito de 35°.	56
Figura 3.28 Comparação da linha média dos deslocamentos verticais na direção do eixo do dormente à 0,40 m de altura, frequência de carregamento de 15 Hz e ângulo de atrito de 35°.	57
Figura 3.29 Comparação da linha média dos deslocamentos verticais na direção do eixo do dormente à 0,18 m de altura, frequência de carregamento de 15 Hz e ângulo de atrito de 35° e 46°.	58
Figura 3.30 Comparação da linha média dos deslocamentos verticais na direção do eixo do dormente à 0,40 m de altura, frequência de carregamento de 15 Hz e ângulo de atrito de 35° e 46°.	58

Lista de tabelas

Tabela 2.1 - Locais onde foram realizados ensaios triaxiais de grande escala em estudos de lastro (MERHEB et al. 2014)	21
Tabela 2.2 - Componentes do equipamento prismoidal triaxial cíclico	23
Tabela 2.3 – Classificação do Fouling Index (SELIG e WATERS, 1994)	28
Tabela 3.1 – Granulometria A do lastro (VIZCARRA, 2015)	39
Tabela 3.2 – Granulometria B do lastro (VIZCARRA, 2015)	39
Tabela 3.3 – Número de partículas para cada simulação	42
Tabela 3.4 - Variáveis das simulações realizadas.	45

Lista de abreviaturas

PAC 2	Programa de aceleração do crescimento
PIL	Programa de investimento em logística
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
NBR	Norma Brasileira
FI	Fouling Index
PVC	Percentage void contamination
MED	Método dos elementos discretos

Lista de símbolos

σ_1	Tensão principal maior
$\sigma_{2,3}$	Tensão principal confinante
M	Massa do lastro
G	Densidade relativa das impurezas
D_r	Densidade relativa
e	Índice de vazios
I	Conector
A	Área de contato
E	Módulo de elasticidade ou módulo de Young
k_n	Rigidez normal
k_t	Rigidez tangencial
\emptyset	Ângulo de atrito
u_n	Deslocamento normal ou sobreposição de partículas;
F_n	Força normal;
ΔF_t	Variação da força tangencial;
\dot{u}	Velocidade relativa tangencial;
Δt	Intervalo de tempo;
F_t^T	Força tangencial total
F_t^0	Força tangencial inicial

Introdução

1.1.

Relevância e justificativa da pesquisa

O Brasil é um país com grandes dimensões a serem exploradas pelo transporte ferroviário, com isso, o governo ao longo do tempo está realizando investimento nesse setor, com a expansão da malha ferroviária, através do programa de aceleração do crescimento (PAC 2), Figura 1.1, e com o programa de investimento em logística (PIL), Figura 1.2. Para melhor aplicação do investimento, mais estudos são requisitados na área de ferrovias.

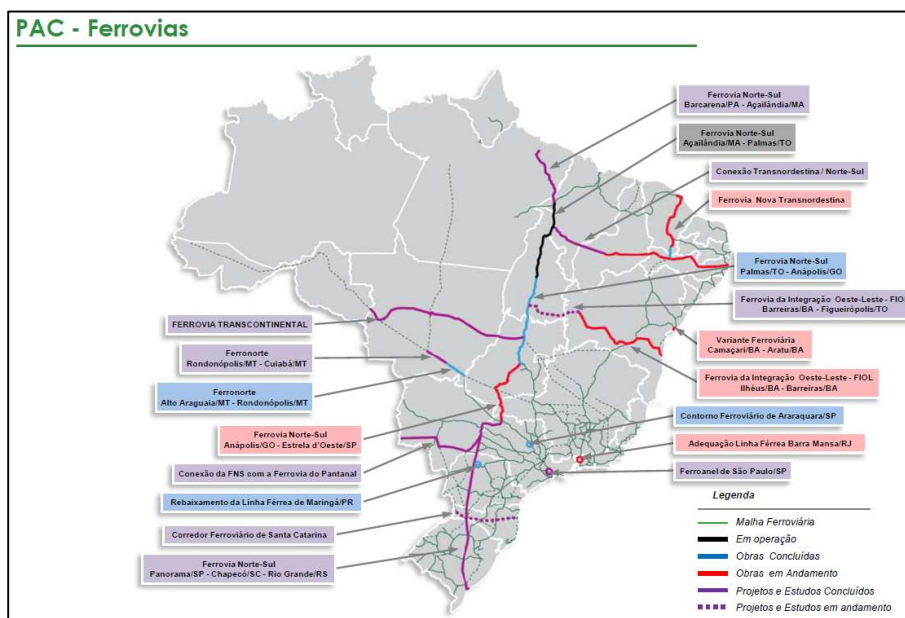


Figura 1.1 - Expansão da malha ferroviária brasileira (PAC 2). Ministério dos Transportes (2016)

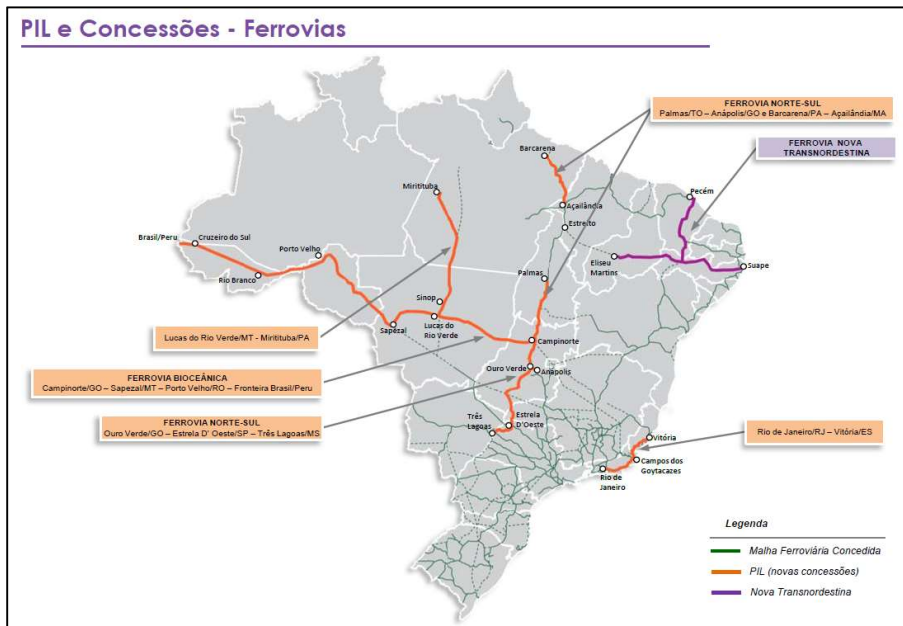


Figura 1.2 - Expansão da malha ferroviária brasileira (PIL). Ministério dos Transportes (2016)

Estudos com linha de pesquisa na área ferroviária e em paralelo com a área de modelagem computacional são desenvolvidos com o intuito de aprimorar e otimizar as técnicas e comportamentos dos materiais utilizados para concepção das ferrovias.

Esta pesquisa visa a utilização da modelagem computacional para desenvolver simulações computacionais do comportamento mecânico do lastro ferroviário através de um ensaio triaxial cíclico, com embasamento em algumas características do ensaio físico desenvolvido por Vizcarra (2015).

1.2.

Objetivos

O objetivo geral desta pesquisa é desenvolver um modelo computacional para avaliar o comportamento mecânico do lastro ferroviário em um ensaio triaxial cíclico. Este objetivo será alcançado através da realização de simulações computacionais desenvolvidas pelo método dos elementos discretos.

A partir do objetivo geral, os seguintes objetivos específicos foram estabelecidos:

- Desenvolver um modelo computacional de um ensaio triaxial cíclico, com base no ensaio prismoidal triaxial cíclico de Vizcarra (2015), utilizando o método dos elementos discretos, através do programa WooDEM;
- Avaliar o comportamento mecânico do lastro utilizando o modelo computacional desenvolvido;
- Estudar a deformação do lastro considerando granulometrias, frequências de carregamento e ângulos de atrito diferentes.

1.3.

Organização da dissertação

Este trabalho está dividido em cinco capítulos, de acordo com as etapas de pesquisa realizadas, iniciando-se com este capítulo introdutório (capítulo 1) que apresenta a relevância e justificativa da pesquisa, objetivos e organização da dissertação.

Em sequência o capítulo 2, apresenta a revisão da literatura existente, compreendendo os tópicos referentes ao comportamento mecânico do lastro ferroviário, o ensaio triaxial cíclico, as características dos agregados e modelagem numérica de lastro ferroviário.

No capítulo 3 é descrita a simulação numérica realizada pelo método dos elementos discretos, apresentam-se as características do modelo, das partículas, do carregamento, assim como são analisados e discutidos os resultados obtidos.

Por fim, no capítulo 4, são apresentadas as considerações finais baseadas nas discussões dos resultados obtidos, e também as sugestões para trabalhos futuros.

2.

Revisão bibliográfica

Para realizar a modelagem do efeito da granulometria no comportamento mecânico do lastro ferroviário é necessário compreender alguns fatores sobre o comportamento mecânico do lastro ferroviário, assim como o ensaio triaxial cíclico utilizado como base nesta modelagem. Também é necessário um conhecimento aprofundado sobre as características dos agregados e da partícula, em específico o lastro ferroviário, e por fim reunir informações pertinentes referentes a modelagem numérica de lastro ferroviário.

2.1.

Comportamento mecânico de lastro rodoviário

O comportamento mecânico de lastro ferroviário vem sendo amplamente estudado (Marachi et al., 1972; Raymond e Diyaljee 1979; Janardhanam e Desai 1983; Indraratna et al., 1998; Suiker et al., 2005; Mohammadzadeh, 2010; Vizcarra, 2015).

A deformação de materiais granulares, sob carga cíclica, pode ser caracterizada por uma deformação elástica (recuperável) e uma deformação plástica (permanente) (LEKARP *et al*, 2000), conforme Figura 2.1.

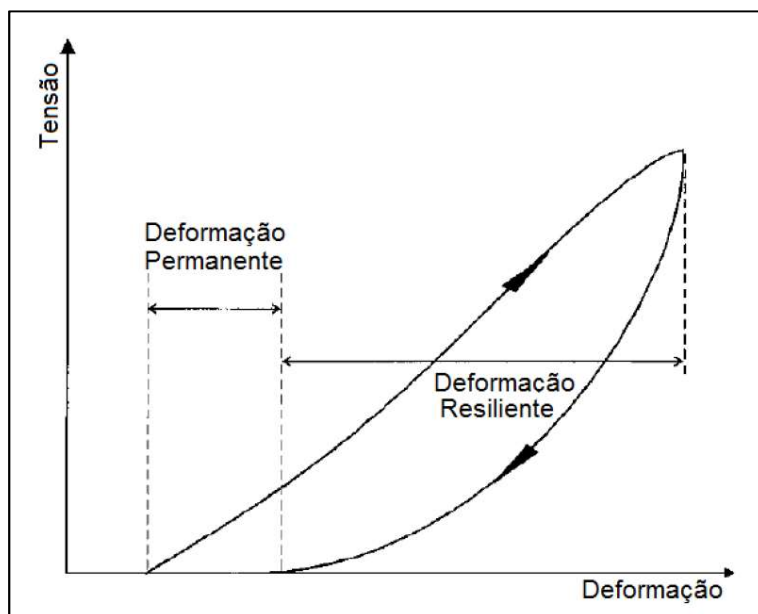


Figura 2.1 – Deformação de materiais granulares para aplicação de um ciclo de carga (LEKARP et al, 2000)

Selig e Waters (1994) afirmam que nenhuma característica isolada controla o comportamento do lastro, em vez disso, o comportamento é o efeito das características combinadas. Lekarp *et al* (2000) apresentam diversos fatores que implicam na resposta resiliente, sendo eles: (a) efeito de tensões, (b) densidade, (c) graduação, finos e tamanho máximo, (d) presença de umidade, (e) histórico de tensões e número de ciclos de carga, (f) tipo de agregado e forma da partícula e (g) duração do carregamento, frequência e sequência de carregamento.

Para a resposta mecânica do lastro Vizcarra (2015) apresenta quatro fatores, sendo eles: (a) características de materiais constituintes, (b) propriedades do conjunto, (c) características do carregamento, (d) degradação da partícula.

2.2.

Ensaio triaxial cíclico

Nos casos de rodovias e vias férreas, os carregamentos gerados pelos meios de transporte são considerados cíclicos, para tanto, é necessário que os ensaios triaxiais realizados nos materiais utilizados nestas vias possuam um carregamento correspondente. No caso de lastro ferroviário, diversos pesquisadores realizaram ensaios triaxiais cilíndricos

em grande escala a fim de aferir o comportamento do lastro, conforme Tabela 2.1. Estes ensaios triaxiais cilíndricos são considerados axissimétricos pois as tensões de confinamento são equivalentes ($\sigma_2 = \sigma_3$), porém nem sempre representam as condições reais de campo como constatados por Janardhanam e Desai (1983); Jeffs e Marich (1987).

Tabela 2.1 - Locais onde foram realizados ensaios triaxiais de grande escala em estudos de lastro (MERHEB et al. 2014)

Pesquisadores	Ano	Diâmetro do corpo de prova (mm)	Altura do corpo de prova (mm)	Diâmetro máximo das partículas (mm)	Local
Raymond e Dyaljee	1979	230	460	38	Canadá
Alva-Hurtado <i>et al.</i>	1981	305	610	30	EUA
Suiker <i>et al.</i>	2005	254	645	38	EUA
Sekine <i>et al.</i>	2005	300	600	63,5	Japão
Lackenby <i>et al.</i>	2007	300	600	53	Austrália
Anderson e Fair	2008	236	455	50	Inglaterra
Sevi <i>et al.</i>	2009	419	864	63,5	EUA
Aursudkij <i>et al.</i>	2009	300	450	50	Inglaterra
Nalsund	2010	300	600	63	Noruega
Ebrahimi <i>et al.</i>	2010	305	610	60	EUA
Merheb <i>et al.</i>	2014	400	800	60	Brasil

Em situações reais, como a dos lastros ferroviários, os carregamentos triaxiais são considerados verdadeiros ($\sigma_2 \neq \sigma_3$), sendo assim os modelos convencionais de ensaios triaxiais acabam não representando na íntegra as tensões confinantes, podendo apresentar diferença nos resultados. Também vale ressaltar que nos ensaios convencionais o carregamento axial é aplicado no topo do corpo de prova inteiro, enquanto que, nas ferrovias, o carregamento é aplicado no dormente o qual transmite a carga para o lastro, enquanto o lastro de ombro se encontra livre para

deslocamento tanto vertical quanto horizontal, conforme Figura 2.2. (VIZCARRA, 2015)

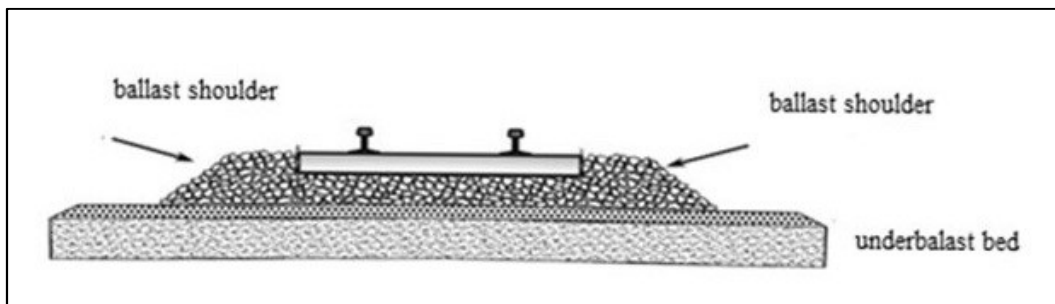


Figura 2.2 - Lastro de ombro livre para deslocamentos horizontais e verticais. (HEYDARI *et al.*, 2015)

2.2.1.

Equipamento prismoidal triaxial cíclico

Vizcarra (2015) desenvolveu um equipamento prismoidal triaxial cíclico com o intuito de aplicar três tensões ortogonais independentes, para representar as condições mais próximas das reais de uma via férrea. A Tabela 2.2 descreve os componentes do equipamento desenvolvido, ilustrado nas Figura 2.3-4. Toda instrumentação é conectada a um registrador de dados suportado por um computador central e a aquisição de dados de carregamento e deslocamento verticais é feita através do computador que controla o atuador vertical.

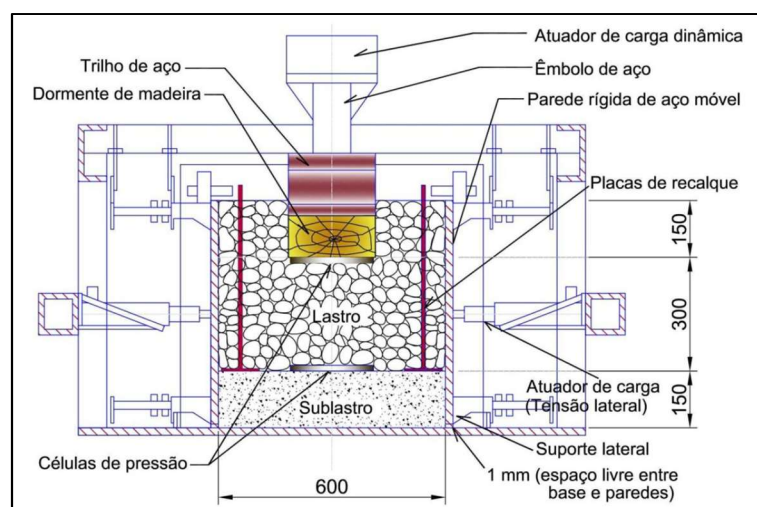


Figura 2.3 - Ilustração esquemática na seção X-X da câmara triaxial cíclica (dimensões em mm). (VIZCARRA, 2015)

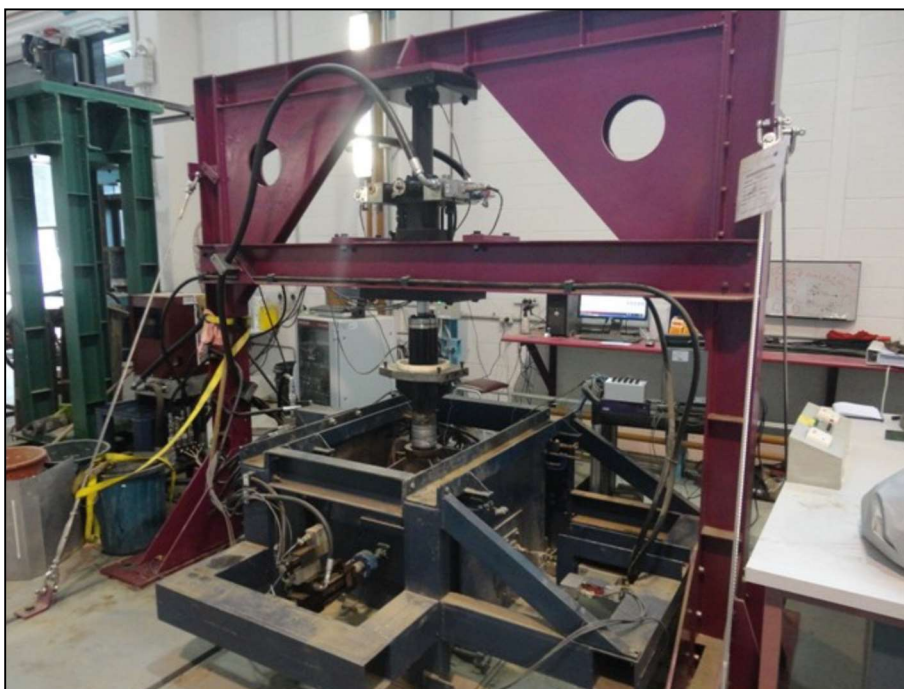


Figura 2.4 - Equipamento triaxial prismoidal cíclico da Universidade de Wollongong na Austrália (VIZCARRA, 2015)

Tabela 2.2 - Componentes do equipamento prismoidal triaxial cíclico

Equipamento	Função
Célula prismoidal triaxial	Acomodar corpos de prova de até 600 x 800 x 600 mm. Nas quinas existem oito conexões móveis, duas em cada, a fim de permitir o deslocamento das paredes de maneira simultânea e servir de apoio lateral para minimizar o basculamento das paredes.
Unidade de carregamento axial	Transmitir a tensão principal maior (σ_1) para o dormente de madeira o qual repassa ao corpo de prova.
Sistema de controle de pressão confinante	Aplicar tensões de confinamento nas direções leste-oeste (σ_2) e norte-sul (σ_3) através do sistema pneumático que é controlado por computador
Dispositivos de monitoramento - Potenciômetros eletrônicos	Medir o deslocamento vertical do dormente e deslocamentos laterais das paredes verticais.

Dispositivos de monitoramento - Célula de pressão	As células são instaladas nas interfaces das camadas, a fim de monitorar as tensões na camada do lastro.
Dispositivos de monitoramento - Placas de recalque	As placas são instaladas nas interfaces das camadas, a fim de monitorar os recalques na camada do lastro.

2.2.2.

Procedimento do ensaio

O ensaio prismoidal triaxial cíclico visa a reprodução de uma pequena seção de ferrovia e os procedimentos do ensaio realizado por Vizcarra (2015) são descritos a seguir:

- a) Definir a granulometria;
- b) Separar o lastro e sublastro, considerando o peso específico e o volume do material;
- c) Misturar e inserir o sublastro em camadas previamente determinadas, e compactar a camada após sua inserção;
- d) Adicionar uma lona plástica na interface sublastro/lastro e posicionar os dispositivos de monitoramento (célula de carga e placas de recalque);
- e) Misturar e inserir o lastro em camadas previamente determinadas, e compactar a camada após sua inserção;
- f) Posicionar o dormente e o segmento de trilho acima do lastro compactado;
- g) Preencher com lastro de ombro o espaço entre as paredes e o dormente.
- h) Aplicar carregamento confinante:
 - i. Perpendicular ao dormente, aplicar uma tensão de confinamento pequena ($\sigma_2 = 10 \text{ kPa}$)
 - ii. Paralelo ao dormente, restringir o deslocamento da parede ($\epsilon_3 = 0$)
- i) Aplicar um carregamento axial a uma taxa constante (1 mm/s);

- j) Realizar um ensaio de tensão controlada com uma tensão cíclica sinusoidal para determinar a amplitude $\Delta\sigma'_{1cyc} = \sigma'_{1max,cyc} - \sigma'_{1min,cyc}$;
 - i. Utilizando o manual da American Railway Engineering Association (AREA), é possível calcular a tensão máxima cíclica ($\sigma'_{1max,cyc}$) (Li e Selig, 1998)

No ensaio de Vizcarra (2015) foram utilizados 200.000 ciclos, e o ensaio foi interrompido em vários números pré-estabelecidos para realizar medições dos dispositivos de monitoramento. Através deste ensaio foi possível analisar o efeito da granulometria, a partir da deformação permanente do corpo de prova e do controle de quebra.

2.3.

Características dos agregados

As propriedades do material são regidas por diversos fatores incluindo tamanho de partícula, forma de partículas, rugosidade da superfície, resistência da rocha-mãe, quebra de partículas, granulometria, densidade, grau de saturação, pressão de confinamento, histórico de carga e número de ciclos de carga (Indraratna e Salim, 2005). Alguns destes fatores afetam diretamente o comportamento mecânico do lastro ferroviário e são apresentados abaixo:

2.3.1.

Granulometria

A granulometria é um assunto amplamente estudado por vários pesquisadores. Thom e Brown (1988) realizaram diversos ensaios triaxiais com dolomita britada considerando um tamanho máximo das partículas similar e variando a granulometria de bem graduada até uniforme. Cada curva granulométrica foi definida por um parâmetro 'n', Figura 2.5, onde quanto maior este valor, mais uniforme é o tamanho das partículas. Seus

resultados apresentam que a densidade e o ângulo de atrito decrescem com o aumento de 'n', enquanto que o módulo cisalhante e a permeabilidade crescem com o aumento do valor de 'n' (Figura 2.6 a-d).

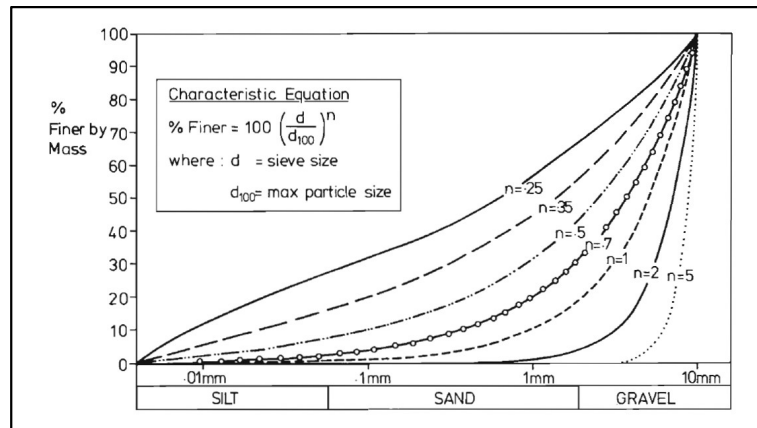


Figura 2.5 – Variação da graduação (THOM e BROWN, 1988)

De acordo com Thom e Brown (1988), peso específico seco ótimo é atingido quando $n = 0,3$, para os três tipos de compactação (Sem compactação, baixa compactação e alta compactação). Nas amostras não compactadas o ângulo de atrito não sofre grandes alterações. Também foi descoberto na pesquisa que quando a granulometria é uniforme a amostra apresenta uma maior rigidez comparada aos agregados bem graduados, Figura 2.5.

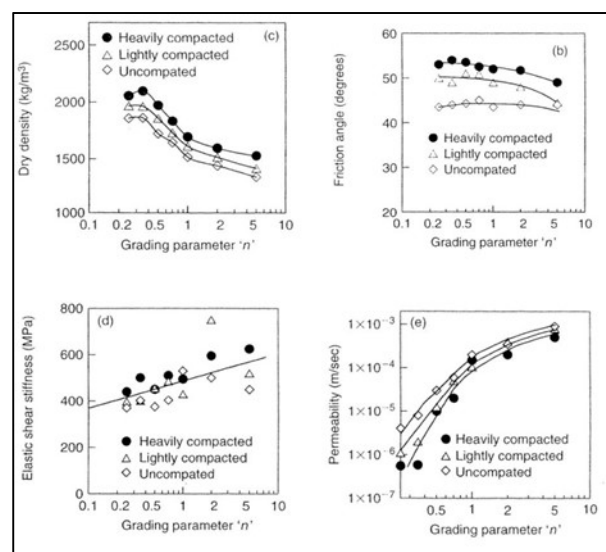


Figura 2.6 – (a) Densidade, (b) ângulo de atrito, (c) módulo de cisalhamento e (d) permeabilidade. (THOM e BROWN, 1988)

Para Raymond e Diyaljee (1979) o recalque é menor quando o lastro é bem graduado, ao contrário dos lastros com graduação uniforme, conforme Figura 2.7.

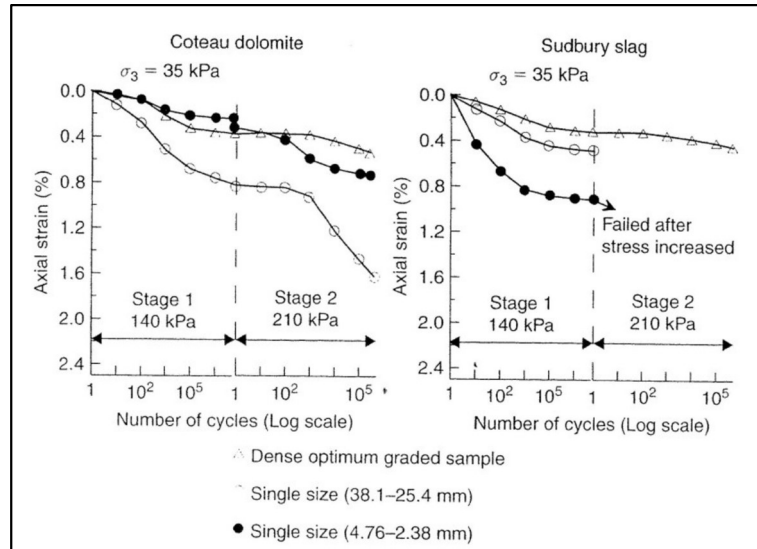


Figura 2.7 – Efeitos da graduação nas deformações verticais do lastro sob carregamento cíclico (RAYMOND e DIYALJEE, 1979).

Mohammadzadeh (2010) afirma que quanto melhores graduados forem os agregados, maior será a resistência à fricção, em função do melhor travamento entre grãos. Ao contrário de agregados com graduação uniforme, que apresentam menor resistência à fricção. O impacto da graduação no ângulo de atrito interno varia de 2 a 3 graus. Enquanto que agregados com partículas mais angulares possuem maior resistência ao cisalhamento.

Vizcarra (2015) argumenta que a drenagem é um ponto importante para elaboração da granulometria. Pois os agregados graúdos permitem uma boa drenagem, mas têm baixa resistência, enquanto que os agregados miúdos aumentam a resistência e apresentam menores recalques, em contrapartida possuem menor capacidade de drenagem.

Tutumliuer *et al.* (2009) afirmam que é comum assumir que a melhor curva granulométrica é aquela cuja graduação apresenta a maior densidade, consequentemente apresenta um maior número de contatos de partícula, aumentando a estabilidade estrutural. Entretanto para o lastro ferroviário, quanto maior a densidade, menor será a drenagem. No entanto,

a gradação de densidade máxima ainda fornece um ponto de referência para começar.

A colmatção dos vazios do lastro ferroviário implica diretamente em seu comportamento, Selig e Waters (1994) quantificaram o grau de colmatção de lastro ferroviário através do *Fouling Index* (FI). A classificação é apresentada na Tabela 2.3, que qualifica o quão limpo se encontra o lastro.

$$FI = P4 - P200$$

Onde P4 é a percentagem, em peso, passante na peneira #4, e P200 é a percentagem, em peso, passante na peneira #200.

Tabela 2.3 – Classificação do Fouling Index (SELIG e WATERS, 1994)

$F_I < 1$	Lastro limpo
$1 < F_I < 10$	Lastro moderadamente limpo
$10 < F_I < 20$	Lastro moderadamente colmatado
$20 < F_I < 40$	Lastro colmatado
$F_I < 40$	Lastro altamente colmatado

Feldman e Nissen (2002) apresentaram o parâmetro *percentage void contamination* (PVC) que tem como objetivo determinar a porcentagem de contaminação de vazios de uma amostra de lastro retirada da profundidade total do perfil de lastro. A porcentagem de vazios contaminados indica a falta de capacidades de drenagem e perda de resiliência do lastro. Essa relação pode ser usada para formular estratégias de limpeza de lastro. Onde V_1 representa o volume de vazios e V_2 o volume de contaminação de vazios.

$$PVC = \frac{V_2}{V_1} \times 100\%$$

Indraratna *et al* (2011) compararam os métodos anteriores e propuseram o *relative ballast fouling ratio* (R_{b-f}) que é a proporção entre o

volume sólido de partículas nos vazios do lastro (material passante uma peneira de 9,5 mm) e partículas de lastro (material retido na peneira de 9,5 mm).

$$R_{b-f} = \frac{M_f \left(\frac{G_{b-f}}{G_{s-f}} \right)}{M_b} \times 100\%$$

Onde M_f é a massa de impurezas no vazio do lastro e M_b massa do lastro. Enquanto que G_{s-f} e G_{b-f} são a densidade relativa das impurezas e densidade relativa do lastro, respectivamente.

2.3.2.

Índice de vazios

Lambe e Whitman (1969), definem o índice de vazios sendo a proporção do volume de vazios em relação ao volume de sólidos, podendo estes vazios serem preenchidos tanto por líquido quanto por gás, conforme ilustrado na Figura 2.8.

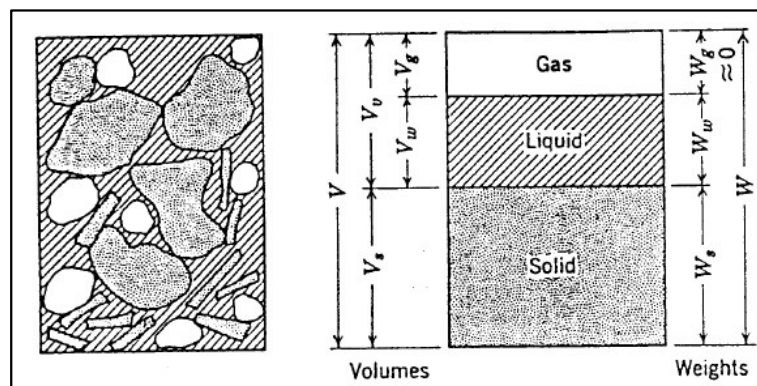


Figura 2.8 – Relação entre as fases do solo (LAMBE e WHITMAN, 1969).

O volume de vazios é tão importante quanto o volume de sólidos no comportamento mecânico (Terzaghi, 1943; Indraratna *et al.*, 1997). Diversos estudos apresentam que um solo com índice de vazios baixo, no

início do carregamento, apresenta uma maior resistência ao cisalhamento e, conseqüentemente, menor recalque.

Para Lade *et al* (1998) as propriedades e o comportamento mecânico dos materiais granulares são relacionados à densidade relativa (D_r), que indica a posição relativa do índice de vazios (e), entre os índices de vazios máximo (e_{\max}) e mínimo (e_{\min}), para uma dada areia:

$$D_r = \frac{e_{\max} - e}{e_{\max} - e_{\min}} \cdot 100$$

Na mecânica dos solos dos estados críticos, o índice de vazios também influencia no comportamento mecânico, juntamente com a tensão média efetiva (p'), e a tensão desviadora (q) (Roscoe *et al.*, 1963).

Gaskin *et al.* (1978) e Indraratna (2000) concluíram que um aumento na densidade do lastro, gera um incremento na resistência e estabilidade, e Selig e Waters (1994) mostram que baixas densidades resultam em deformações plásticas altas.

O momento crítico do lastro ferroviário é logo após a construção ou a manutenção por socaria, onde o material se encontra em estado fofo, ou seja, com altos índices de vazios (Indraratna *et al*, 1998)

Indraratna e Salim (2005) afirmam que a compactação adicional ou a inserção de agregados de granulometria descontínua geram melhorias e aumento na densidade da camada de lastro. Porém, deve ser levado em consideração a energia de compactação, pois um valor alto desta energia pode resultar na quebra de partículas, e conseqüentemente, estes finos prejudicam nas características de drenagem do lastro.

2.3.3.

Características da partícula

Para Selig e Waters (1994), a capacidade do lastro de cumprir suas funções é controlada pelas características das partículas juntamente com o estado físico do material (estrutura e índice de vazios). O comportamento

mecânico do material é um resultado da combinação destas características. Vizcarra (2015) apresenta algumas características que afetam diretamente o comportamento mecânico de lastros, sendo elas: (a) tamanho da partícula, (b) angularidade da partícula, (c) forma da partícula, (d) textura da partícula, (e) resistência da rocha mãe, e (f) resistência ao esmagamento da partícula.

Nos resultados das pesquisas de Marachi *et al.* (1972) e Indraratna *et al.* (1998) foi possível verificar que o ângulo de atrito diminui com o aumento do tamanho da partícula, porém, constataram que, para tensões confinantes acima de 400 kPa o efeito do tamanho da partícula é praticamente desprezível. Para Selig (1984) a faixa ideal de lastro é entre 10-50 mm, com poucas partículas fora desta faixa, pois as partículas maiores fazem a estabilização da via, enquanto que as partículas menores reduzem as forças de contato, resultando na diminuição de quebra dos grãos.

Partículas angulosas tendem a aumentar o travamento entre os grãos, e conseqüentemente, aumentam a resistência ao cisalhamento, conforme apresentado nas pesquisas de Indraratna *et al.* (1998), Janardhanam *et al.* (1983) e Leps (1970). Vallergera *et al.* (1957) observam um aumento no ângulo de atrito, considerando o mesmo índice de vazios, para agregados angulosos, em relação aos agregados arredondados.

2.4.

Modelagem numérica de lastro rodoviário

Uma das abordagens para a modelagem numérica é o método dos elementos discretos (MED), que permite a resolução de problemas com comportamento descontínuo, como os materiais granulares. Este método permite analisar o movimento e as interações resultantes dos contatos entre as partículas, e por conta disto é uma ferramenta muito promissora para modelagem de lastro ferroviário. Outro ponto importante é que o método possibilita a análise da interação do lastro com o carregamento dinâmico (Tutumluer *et al.*, 2006).

Cholet *et al* (2002) realizaram abordagens experimentais e numéricas para estudar uma faixa de lastro, em especial os mecanismos de degradação a médio-longo prazo da camada de lastro. A simulação numérica (2D) foi um trabalho preliminar necessário para determinar se o MED pode ser aplicado para prever a evolução de um meio granular em um grande número de ciclos de carregamento.

Lim e McDowell (2005), Lu e McDowell (2007), Hossain *et al.* (2007) e Thakur *et al.* (2010) realizaram simulações de quebra de grão de lastro ferroviário, utilizando de aglomerados de partículas (*clumps*) para compor o grão anguloso do lastro, e compararam os resultados das simulações com resultados de ensaios reais, verificando a influência da utilização da quebra do grão nas modelagens, tanto em 2D quanto em 3D.

Indraratna *et al.* (2010) e Mahmoud *et al.* (2016) desenvolveram estudos experimentais e numéricos para avaliar o comportamento do lastro ferroviário sob carga cíclica, onde as partículas do lastro foram desenvolvidas em forma de *clumps*, a fim de representar tanto o formato real das partículas como avaliar a degradação do lastro. Os resultados das modelagens apresentaram concordância com os experimentos realizados, além disso, os estudos possibilitaram a avaliação do comportamento micromecânico, através da força de contato, do lastro.

2.4.1. Ciclo de cálculo

O'Sullivan (2011) apresenta uma sequência esquemática do diagrama de cálculo de uma simulação MED, apresentado na Figura 2.9, onde, o usuário especifica a geometria do sistema a ser analisado, incluindo as coordenadas das partículas e as condições de contorno, bem como os parâmetros do modelo de contato. Em seguida, a simulação progride como uma análise transitória ou dinâmica, normalmente para um número específico de incrementos de tempo.

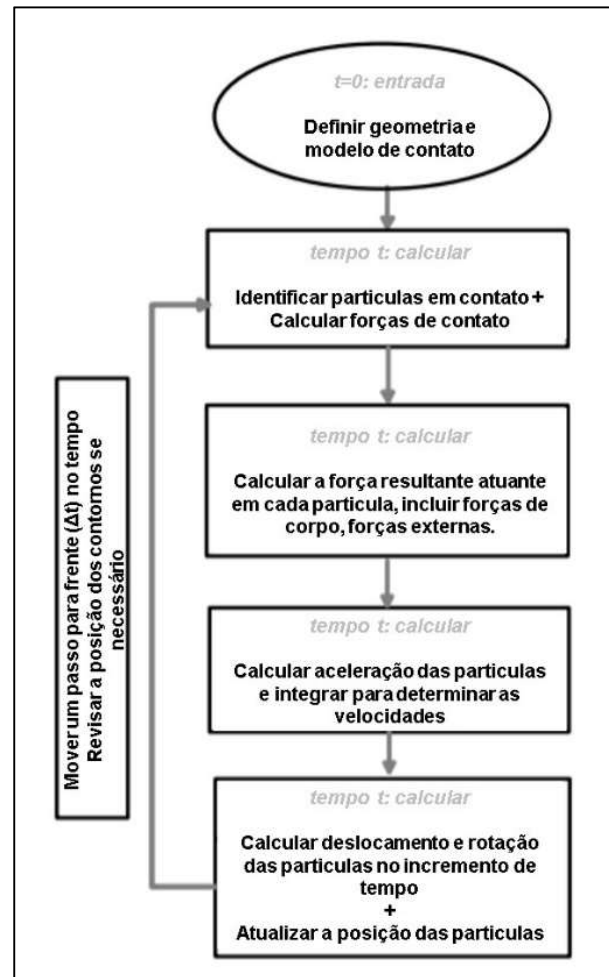


Figura 2.9 - Sequência esquemática do diagrama de cálculo de uma simulação MED (O'SULLIVAN, 2011)

3.

Simulação numérica

3.1.

O Método dos elementos discretos

O método foi apresentado pela primeira vez por Cundall (1971) com o intuito de analisar problemas de mecânica das rochas. Posteriormente, Cundall e Strack (1979) aplicaram a metodologia para materiais granulares.

Iturrioz (1995) define o método de elementos discretos como uma aplicação para simulação de materiais contínuos, bem como de estruturas descontínuas, levando em consideração que, antes da fratura, aparecem forças de tração, compressão e cisalhamento entre as partículas adjacentes.

O método de elementos discretos (MED) é usado para simular o comportamento de materiais granulares em aplicações industriais, especialmente onde a dinâmica e o fluxo de um material particulado são de interesse. Os elementos rígidos discretos (esferas em 3D e discos em 2D) são usados para modelar este tipo de material e a lei de contato entre os elementos é o que define o comportamento mecânico do material.

Para Majidi et al (2016) um modelo de MED tridimensional é composto por uma combinação de esferas discretas e paredes. No início, a posição de todos os elementos e paredes é conhecida de modo que os contatos ativos sejam facilmente determinados. Então, de acordo com o comportamento mecânico deles, é aplicada uma lei força-deslocamento apropriada para cada contato, e as forças de contato são calculadas. A segunda lei do movimento de Newton é então usada para atualizar a posição e a velocidade de cada elemento.

Para a simulação em questão foi utilizado o modelo de contato linear, desenvolvido por Cundall e Strack (1979), que consiste na utilização da força normal sendo a função linear do deslocamento normal, que é gerado pela pequena sobreposição das partículas, enquanto que a força de cisalhamento aumenta de forma linear com o deslocamento relativo no contato, sendo limitada pela força de atrito.

A rigidez normal é relacionada ao módulo de Young dos materiais envolvidos, para isso, o programa considera uma conexão entre as partículas de comprimento l e uma seção circular de raio igual ao da menor partícula no contato, conforme Figura 3.1 e as Equações 3.1-3. A rigidez tangencial é definida por uma fração da rigidez normal, conforme Equação 3.4. Enquanto que o ângulo de atrito é definido pela Equação 3.5.

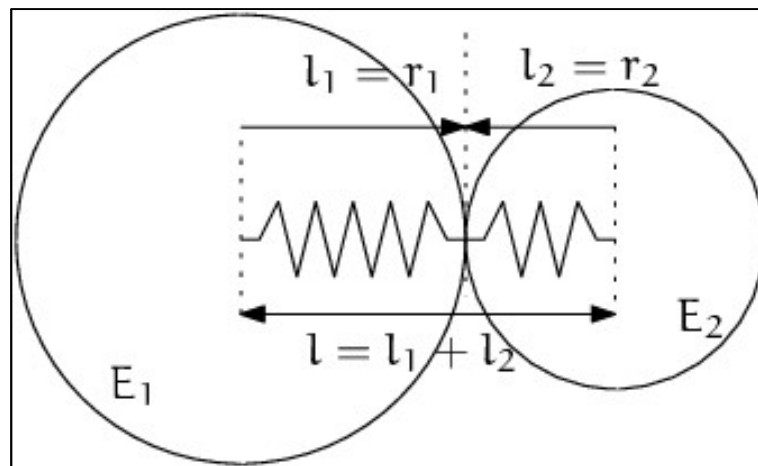


Figura 3.1- Série de 2 molas que representam rigidez normal de contato entre 2 esferas.

$$l = l_1 + l_2 \quad (3.1)$$

$$A = \pi \cdot \min(l_1, l_2)^2 \quad (3.2)$$

$$k_n = \left(\frac{l_1}{E_1 \cdot A} + \frac{l_2}{E_2 \cdot A} \right)^{-1} \quad (3.3)$$

$$k_t = \left(\frac{k_t}{k_n} \right) \cdot k_n \quad (3.4)$$

$$\tan \phi = \min[(\tan \phi)_1, (\tan \phi)_2] \quad (3.5)$$

Onde,

l = comprimento total da conexão entre as partículas;

l_1 = raio da partícula 1;

l_2 = raio da partícula 2;

A = área de contato;

E = módulo de elasticidade da partícula;

k_n = rigidez normal

k_t = rigidez tangencial

ϕ = ângulo de atrito

Para o caso de contato entre partícula esférica e parede, o comprimento e o raio da conexão são iguais ao raio da partícula no contato.

A força normal é definida pela sobreposição das partículas (u_n), e o contato é desfeito quando $u_n < 0$, conforme apresentado na Equação 3.6. A força tangencial é calculada em função da velocidade relativa tangencial, que tem seu valor limitado pelo critério de Coulomb, conforme equações 3.7-9.

$$F_n = u_n \cdot k_n \quad (3.6)$$

$$\Delta F_t = (\dot{u}^\theta)_t \cdot \Delta t \cdot k_t \quad (3.7)$$

$$F_t^T = F_t^o + \Delta F_t \quad (3.8)$$

$$F_t^+ = \begin{cases} F_t^o + \Delta F_t & \text{se } |F_t^o + \Delta F_t| < F_n \cdot \tan \phi \\ F_n \cdot \tan \phi \cdot \frac{F_t^o + \Delta F_t}{|F_t^o + \Delta F_t|} & \text{se } |F_t^o + \Delta F_t| \geq F_n \cdot \tan \phi \end{cases} \quad (3.9)$$

Onde,

u_n = deslocamento normal ou sobreposição de partículas;

F_n = força normal;

ΔF_t = variação da força tangencial;

\dot{u} = velocidade relativa tangencial;

Δt = variação do tempo;

F_t^T = força tangencial total

F_t^o = força tangencial inicial

3.2.

Simulação do ensaio prismoidal triaxial cíclico

3.2.1.

Modelo numérico

Com base em alguns aspectos do modelo físico desenvolvido por Vizcarra (2015), e utilizando o método dos elementos discretos, através do programa WooDEM, foi possível desenvolver um modelo computacional de um ensaio triaxial cíclico, para avaliar os deslocamentos gerados em um material granular considerando granulometria, frequência de carregamento e ângulo de atrito diferentes. Devido ao estágio inicial do modelo computacional, não foram considerados alguns aspectos como: Paredes flexíveis, tensões confinantes diferentes, angulosidade das partículas, quebra de grãos.

O programa WooDEM é uma estrutura extensível e portátil, principalmente para materiais granulares mecânicos. Os códigos de cálculo são escritos em c++ paralelizados com o OpenMP, totalmente acessíveis e modificáveis a partir da linguagem Python.

O programa é licenciado sob a GPL 2 (*General Public License, Version 2*), voltado para personalizações de cenários não triviais e desafiadores, como peneiramento, segregação, correias transportadoras, membranas e similares, e é adequado para uso acadêmico e industrial.

Para o desenvolvimento do modelo computacional foram levados em consideração os seguintes parâmetros encontrados no modelo físico de Vizcarra (2015):

- Dimensões da câmara triaxial prismoidal;
- Carregamento cíclico;
- Espessura das camadas de sublastro e lastro;
- Granulometria do lastro ferroviário;
- Parâmetros dos materiais.

Foi desenvolvida uma caixa retangular com as dimensões de 60 x 80 x 60 cm (largura, comprimento e altura) para representar a câmara triaxial prismoidal, com as paredes laterais da caixa fixas na direção horizontal, permitindo assim, que o lastro e o sublastro deformem somente na direção vertical sob o carregamento cíclico imposto, conforme ilustrado na Figura 3.2.

Foram utilizadas frequências de carregamento para simular o carregamento cíclico aplicado no dormente. A altura das camadas de sublastro e lastro são de 15 e 30 cm, respectivamente, e os parâmetros dos materiais utilizados são:

- Sublastro e lastro:
 - Módulo de Young: $2,45 \times 10^8$ Pa,
 - Relação entre a rigidez tangencial e normal: 0,20;
 - Tangente do ângulo de atrito interno: 1,035.

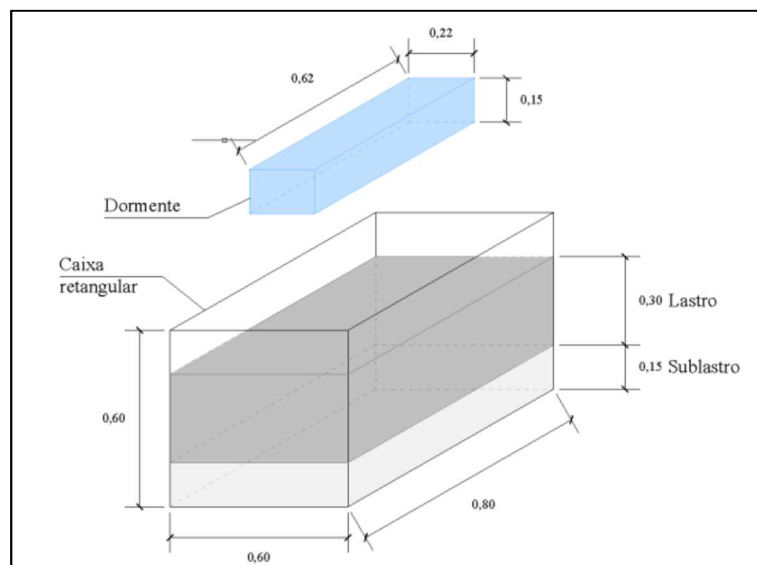


Figura 3.2 - Ilustração esquemática do ensaio triaxial.

3.2.2.

Descrição de partículas

O sublastro foi representado por partículas com diâmetro de 15 mm. Enquanto que para as partículas do lastro, conforme Figura 3.3, os diâmetros utilizados variam em duas distribuições granulométricas, sendo

a primeira uma recomendação de Indraratna *et al.* (2004) para normativa australiana, enquanto que a segunda é definida através da normativa brasileira, conforme Tabelas 3.1-2. Estas granulometrias também foram utilizadas por Vizcarra (2015).

Tabela 3.1 – Granulometria A do lastro (VIZCARRA, 2015)

Peneira (mm)	% Passante (por massa)		
	Limite inferior	Limite superior	Graduação A
63,00	100	-	100
53,00	85	100	95
37,50	50	70	60
26,50	20	35	30
19,00	10	20	15
13,20	2	10	0
9,50	0	5	0
4,75	0	2	0
0,075	0	0	0

Tabela 3.2 – Granulometria B do lastro (VIZCARRA, 2015)

Peneira (mm)	% Passante (por massa)		
	Limite inferior	Limite superior	Graduação B
63,00	100	-	100
53,00	90	100	95
37,50	35	70	50
26,50	0	15	5
19,00	0	10	0
13,20	0	5	0
9,50	0	0	0
4,75	0	0	0
0,075	0	0	0

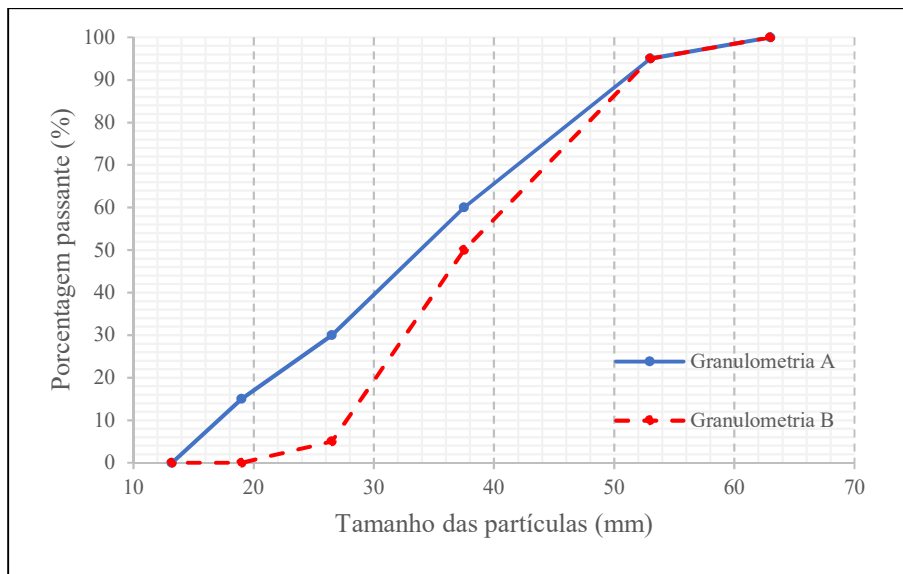


Figura 3.3 - Granulometria dos dois lastros utilizados por Vizcarra (2015).

3.2.3.

Geração de partículas

O método utilizado para geração de partículas foi a distribuição de tamanho de partícula (*Particle size distribution – PSD*) que consiste em uma função linear por partes. Os valores de x devem estar aumentando e os valores de y devem ser não decrescentes. O valor y usado para o último ponto é sempre considerado como 100% e todos os outros valores y são redimensionados de acordo com a distribuição granulométrica determinada previamente. A Figura 3.4 apresenta um exemplo de distribuição de tamanho de partícula utilizado no programa WooDEM.

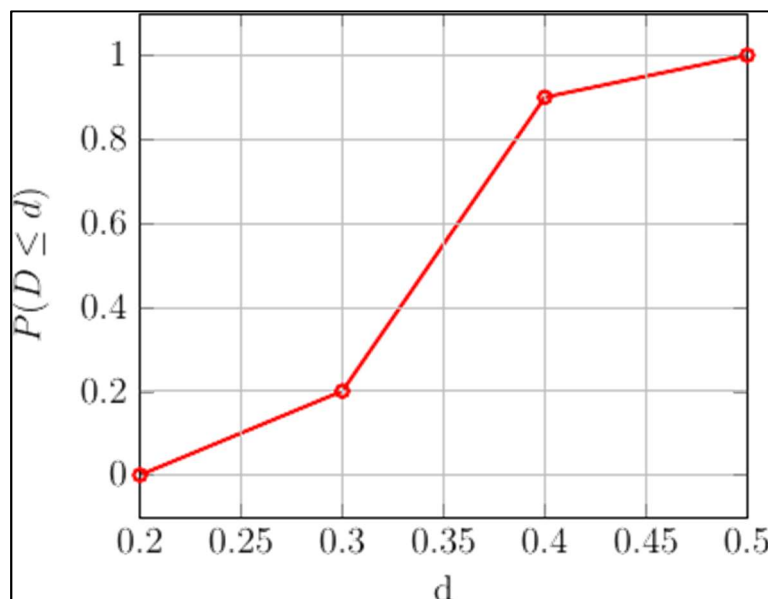


Figura 3.4 – Exemplo de distribuição de tamanho de partícula

Dentro da caixa triaxial de 600 x 800 x 600 mm, o sublastro foi gerado com altura de 200 mm a partir do fundo da câmara, e após este processo, as partículas se depositaram por gravidade com aceleração de $9,80 \text{ m/s}^2$. Em seguida, uma parede comprimiu as partículas depositadas até atingir a espessura de 150 mm, representando o processo de compactação, conforme Figura 3.5. O lastro foi gerado de forma similar, adicionando as partículas até a altura de 500 mm, a partir do topo do sublastro e, após depositadas por gravidade, foram compactadas até atingir uma espessura de 300 mm, conforme Figura 3.6. A Tabela 3.3 apresenta o número de partículas gerado por simulação.

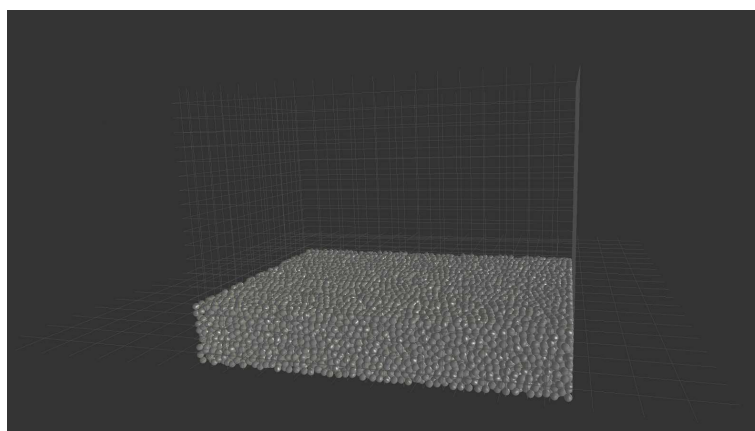


Figura 3.5 – Processo de compactação da camada de sublastro no software WooDEM.

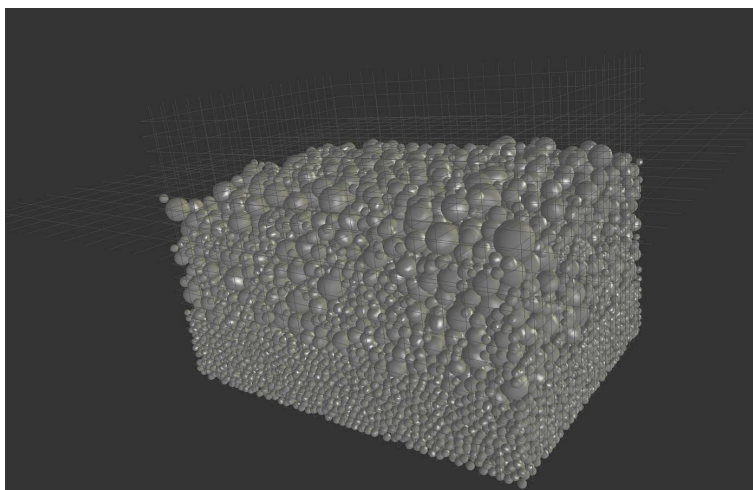


Figura 3.6 – Processo de compactação da camada de sublastro no software WoodDEM.

Tabela 3.3 – Número de partículas para cada simulação

Simulação	Graduação	Nº de partículas
01	A	30.219
02	B	23.118
03	A	28.708
04	B	23.579
05	A	29.271
06	B	23.055

3.2.4.

Geração de dormente

O dormente foi representado por um domínio prismático elástico linear, discretizado em elementos finitos. Utilizou-se do programa Netgen Mesh Generator, um gerador de malha tetraédrico 3D automático, para criar a malha do dormente, levando em consideração a compatibilidade deste programa com o WoodDEM, pois para a interação entre os elementos discretos e os elementos finitos são necessários elementos de interfaces, que são as faces dos elementos finitos no contorno da malha. Assim, a

malha do dormente foi importada e foram inseridos os parâmetros do dormente:

- Dimensões: 0,62 x 0,22 x 0,15 m;
- Módulo de Young: $2,60 \times 10^9$ Pa;
- Densidade: 700 kg/m³.

O dormente foi gerado a uma pequena altura acima da partícula mais alta do modelo e foi acomodado, por gravidade, no topo das partículas do lastro.

3.2.5.

Carregamento

Vizcarra (2015) aplicou um carregamento de 200.000 ciclos em seu modelo físico, levando em consideração a inaplicabilidade deste tempo de processamento computacional por elementos discretos, o tempo real simulado pelo modelo foi de aproximadamente 25 segundos, correspondente a 25 ciclos de carregamento, o que necessitou de aproximadamente 48 horas de simulação. Na Figura 3.7 se apresenta o modelo do ensaio triaxial projetado no software WooDEM.

Após a acomodação das partículas e do dormente, foi aplicada uma oscilação harmônica no dormente, representando o carregamento cíclico semelhante ao utilizando no modelo físico. As frequências utilizadas foram de 15 e 25 Hz, com uma amplitude de 0,02 m para ambas as granulometrias.

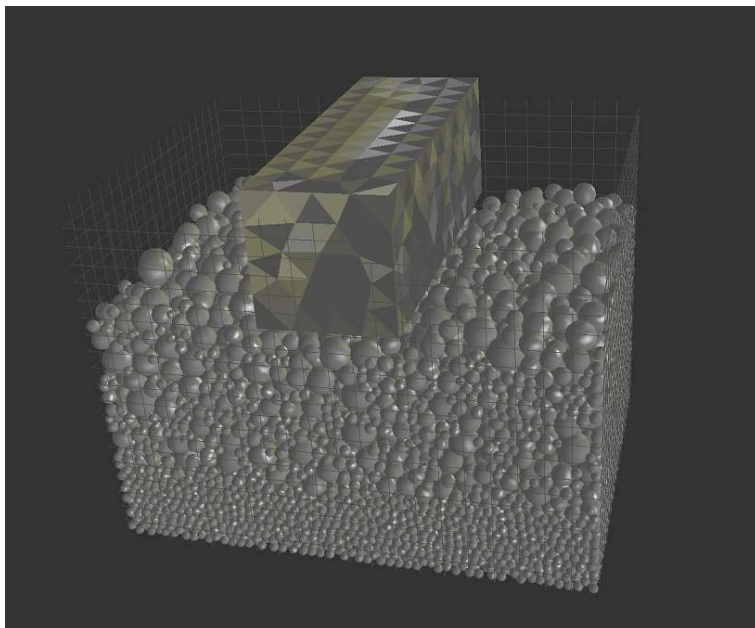


Figura 3.7 - Modelo computacional do ensaio triaxial prismoidal desenvolvido no software WooDEM.

3.3.

Resultados

Foram realizadas quatro simulações, considerando duas granulometrias diferentes, e dois carregamentos, aplicados por uma oscilação harmônica no dormente, com as frequências de 15 e 25 Hz, com um ângulo de atrito de aproximadamente 46° , semelhante ao utilizado por Vizcarra (2015). A fim de verificar a influencia do ângulo de atrito no software WooDEM, foram realizadas mais duas simulações considerando um ângulo de atrito de 35° , que é um valor intermediário encontrado nas literaturas referenciadas ao longo desta dissertação. Ao total foram realizadas seis simulações, conforme Tabela 3.4.

Tabela 3.4 - Variáveis das simulações realizadas.

Simulação	Graduação	Frequência de carregamento	Ângulo de atrito	Ângulo de atrito
01	A	15 (Hz)	46°	46°
02	B	15 (Hz)	46°	46°
03	A	25 (Hz)	46°	46°
04	B	25 (Hz)	46°	46°
05	A	15 (Hz)	35°	35°
06	B	15 (Hz)	35°	35°

Após o início da oscilação harmônica, as partículas foram reacomodadas em função do carregamento aplicado. Durante o processo de carregamento, foi registrada a posição de cada partícula, o que possibilitou analisar o deslocamento das partículas, em função do carregamento aplicado.

A partir do registro da posição das partículas, foram definidas duas seções horizontais para se estudar o campo de deslocamento vertical, sendo a primeira a 0,18 m de altura, a partir da base da caixa, correspondente à parte inferior do lastro, e a segunda a 0,40 m de altura, a partir da base da caixa, referente à parte superior do lastro, logo abaixo do dormente, conforme Figura 3.8. Também foi analisada a linha média dos deslocamentos verticais na direção do eixo do dormente em ambas alturas pré-definidas.

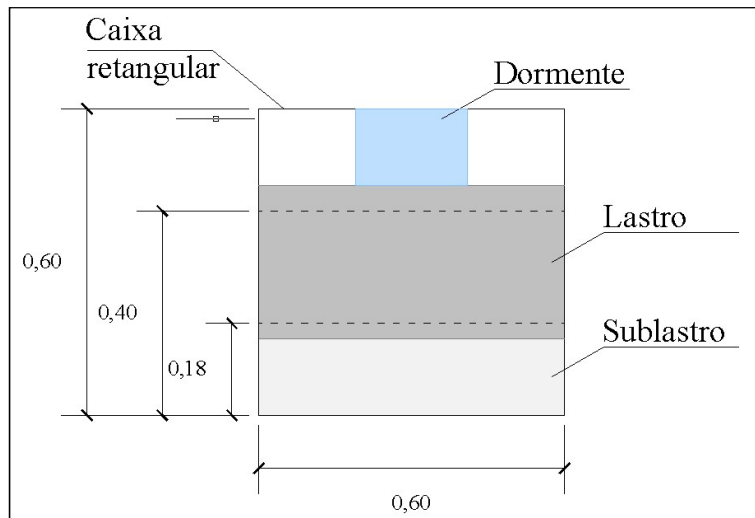


Figura 3.8 - Ilustração esquemática da vista frontal da caixa, indicando a posição das superfícies utilizadas para análise da deformação das partículas do lastro ferroviário.

As Figuras 3.9-14 apresentam os resultados das simulações 01 e 02, onde foram consideradas as duas granulometrias (A e B), com frequência de carregamento de 15 Hz e ângulo de atrito de 46° . Foram desenvolvidas superfícies de deslocamento para 0,18 e 0,40 m, além de uma comparação da linha média dos deslocamentos verticais na direção do eixo do dormente.

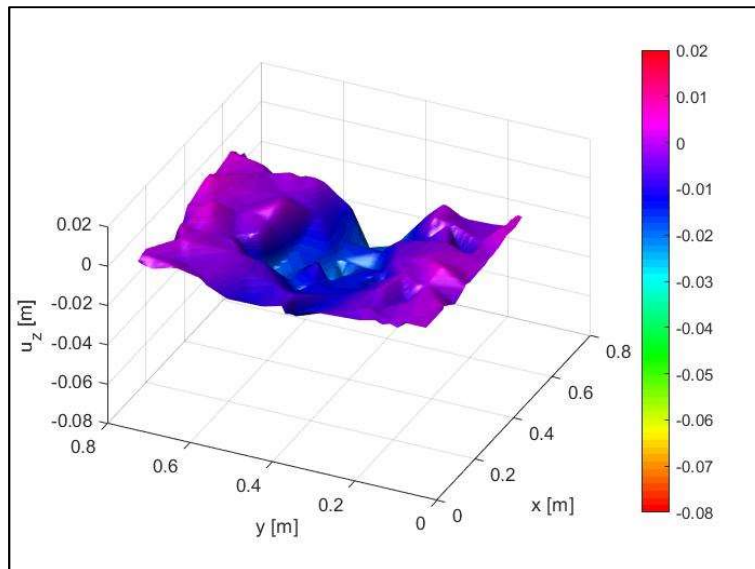


Figura 3.9 Granulometria A - Superfície de deslocamento a 0,18 m de altura, frequência de carregamento de 15 Hz.

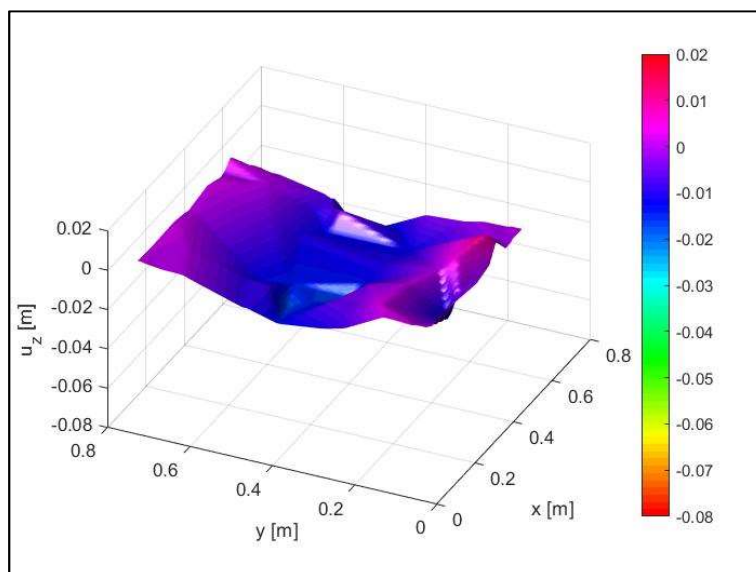


Figura 3.10 Granulometria B - Superfície de deslocamento a 0,18 m de altura, frequência de carregamento de 15 Hz.

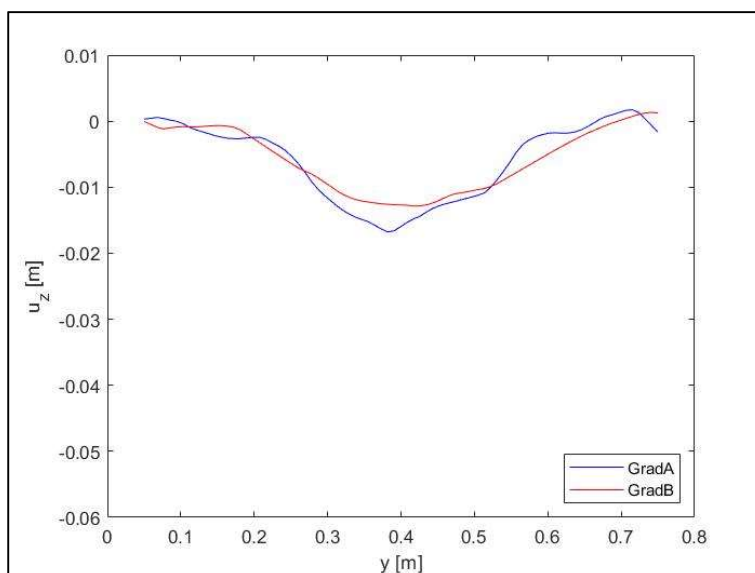


Figura 3.11 Comparação da linha média dos deslocamentos verticais na direção do eixo do dormente a 0,18 m de altura, frequência de carregamento de 15 Hz.

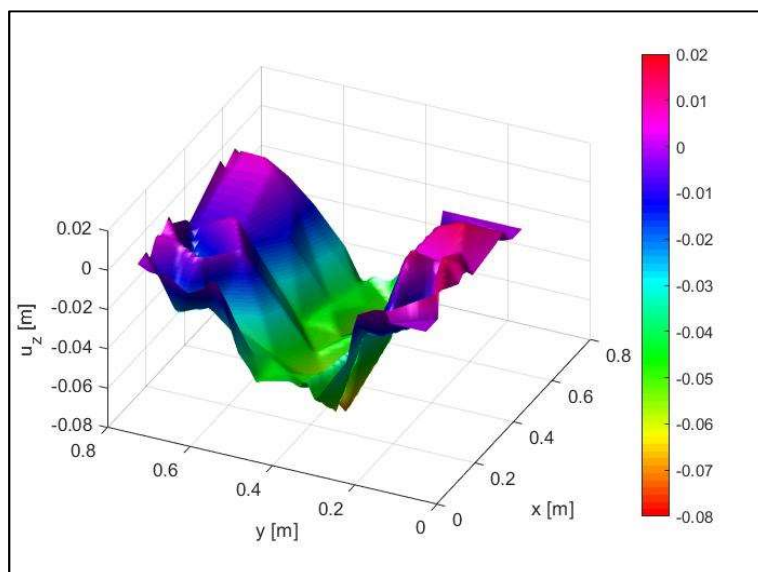


Figura 3.12 Granulometria A - Superfície de deslocamento a 0,40 m de altura, frequência de carregamento de 15 Hz.

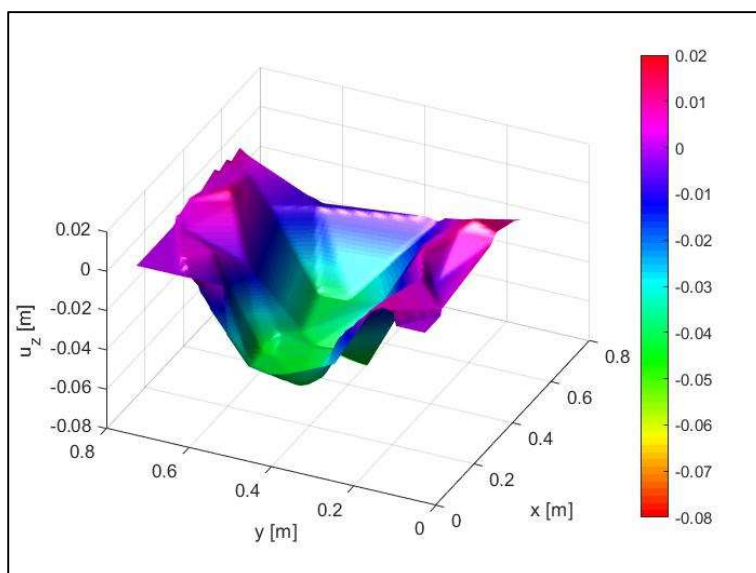


Figura 3.13 Granulometria B - Superfície de deslocamento a 0,40 m de altura, frequência de carregamento de 15 Hz.

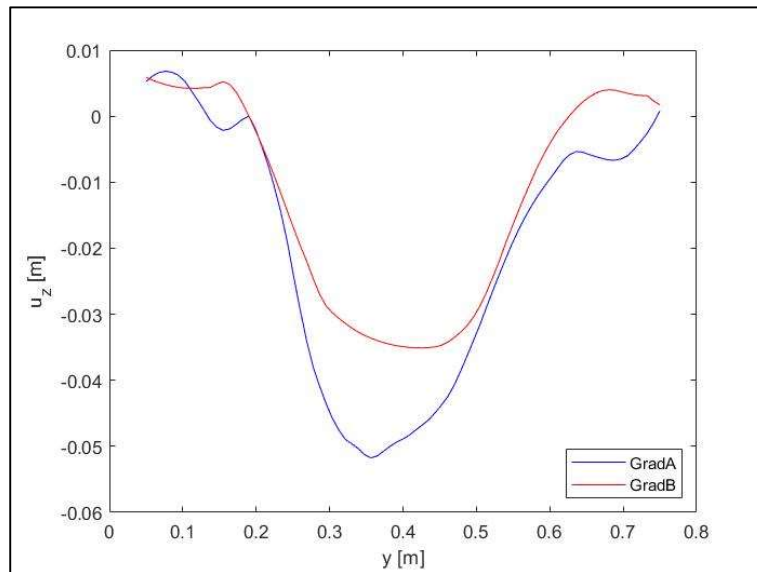


Figura 3.14 Comparação da linha média dos deslocamentos verticais na direção do eixo do dormente a 0,40 m de altura, frequência de carregamento de 15 Hz.

As Figuras 3.15-20 apresentam os resultados das simulações 03 e 04, onde foram consideradas as duas granulometrias (A e B), com frequência de carregamento de 25 Hz e ângulo de atrito de 46° . Foram desenvolvidas superfícies de deslocamento para 0,18 e 0,40 m, além de uma comparação da linha média dos deslocamentos verticais na direção do eixo do dormente.

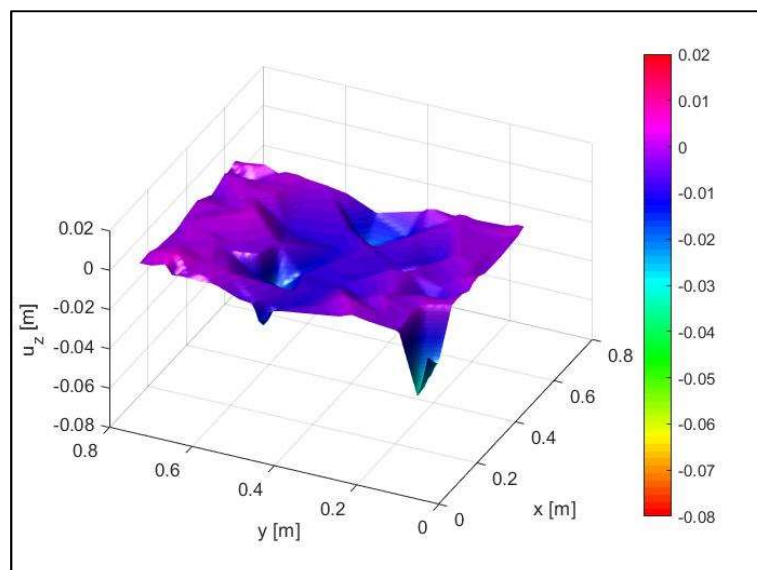


Figura 3.15 Granulometria A - Superfície de deslocamento a 0,18 m de altura, frequência de carregamento de 25 Hz.

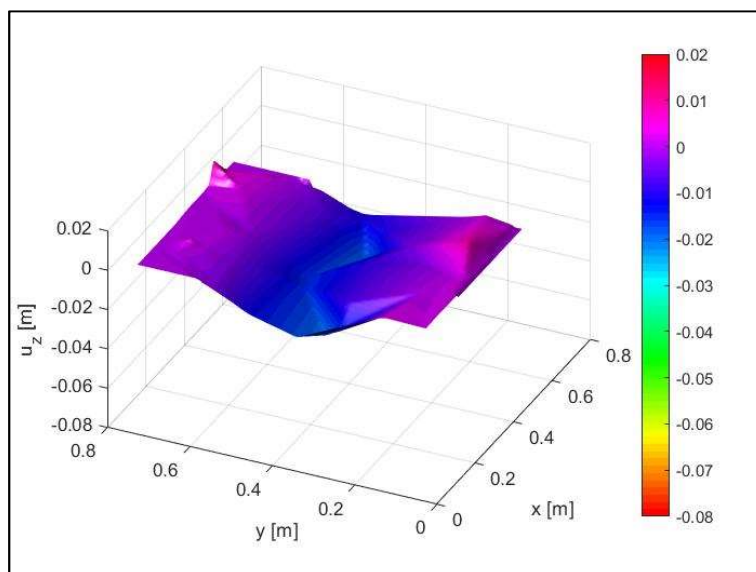


Figura 3.16 Granulometria B - Superfície de deslocamento a 0,18 m de altura, frequência de carregamento de 25 Hz.

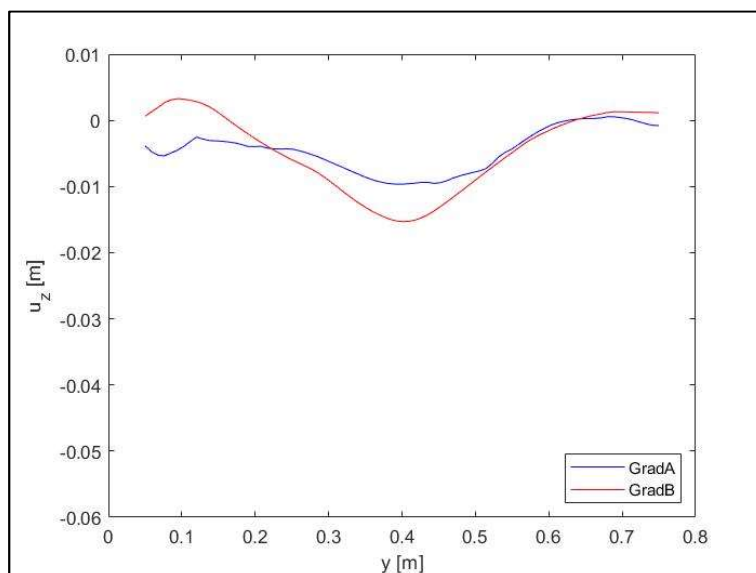


Figura 3.17 Comparação da linha média dos deslocamentos verticais na direção do eixo do dormente a 0,18 m de altura, frequência de carregamento de 25 Hz.

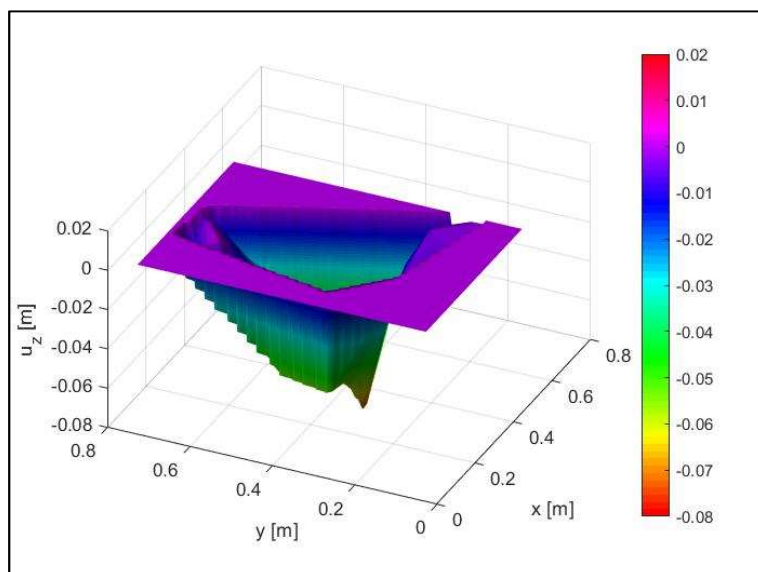


Figura 3.18 Granulometria A - Superfície de deslocamento a 0,40 m de altura, frequência de carregamento de 25 Hz.

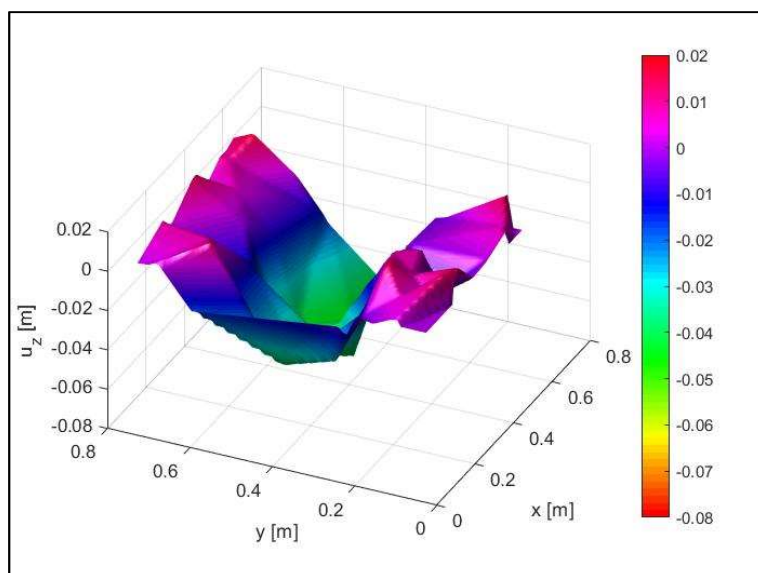


Figura 3.19 Granulometria B - Superfície de deslocamento a 0,40 m de altura, frequência de carregamento de 25 Hz.

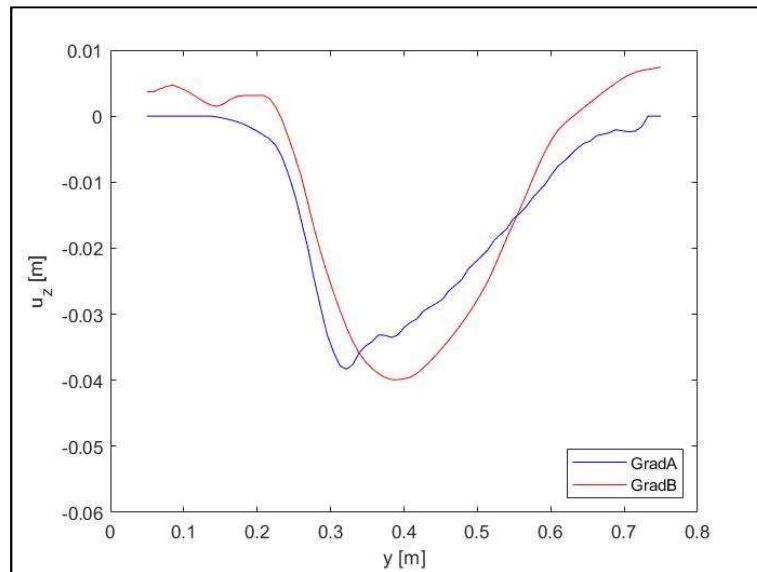


Figura 3.20 Comparação da linha média dos deslocamentos verticais na direção do eixo do dormente a 0,40 m de altura, frequência de carregamento de 25 Hz.

Foram comparadas as linhas médias dos deslocamentos verticais na direção do eixo do dormente a 0,18 e 0,40 m de altura das granulometrias A e B, considerando as frequências de carregamento de 15 e 25 Hz, e um ângulo de atrito de 46° , apresentados nas Figuras 3.21-22.

Para Selig (1984) as partículas maiores cumprem um papel de estabilização, enquanto que as partículas menores possuem função de redução das forças de contato, resultando na diminuição da quebra de grãos. Sem a quebra de grãos, na granulometria B, as partículas maiores não se dividem, impossibilitando o preenchimento dos vazios por conta desta quebra dos grãos, e se estabilizam mais rápido, gerando superfícies mais uniformes e com menos picos de deslocamento, apresentando resultados diferentes da literatura.

Para Tutumluer et al. e Mohammadzadeh (2010), quanto melhores graduados forem os agregados, maior será a resistência ao cisalhamento, consequentemente, menores serão os deslocamentos. As duas granulometrias apresentaram valores semelhantes de pico de deslocamento na superfície de deslocamento da parte inferior (0,18 m), entretanto, a granulometria B apresenta uma uniformidade em sua curva de deslocamento, indicando consistência com a literatura. Indraratna et al. (1998) indica que partículas angulosas auxiliam no travamento entre os

grãos, gerando maiores resistência. Nas simulações em questão, a ausência da angulosidade, pode ser o fator de semelhança entre as superfícies de deslocamento.

Indraratna et al. (2010) cita que o aumento da frequência de carregamento em modelos físicos causa maiores deslocamentos, além de afirmar que a quebra de partículas auxilia na avaliação e controle das forças de contatos entre as partículas. Na comparação realizada entre as quatro simulações, a ausência da angulosidade dos grãos e da quebra dos grãos podem ser os causadores de resultados inconsistentes com a literatura.

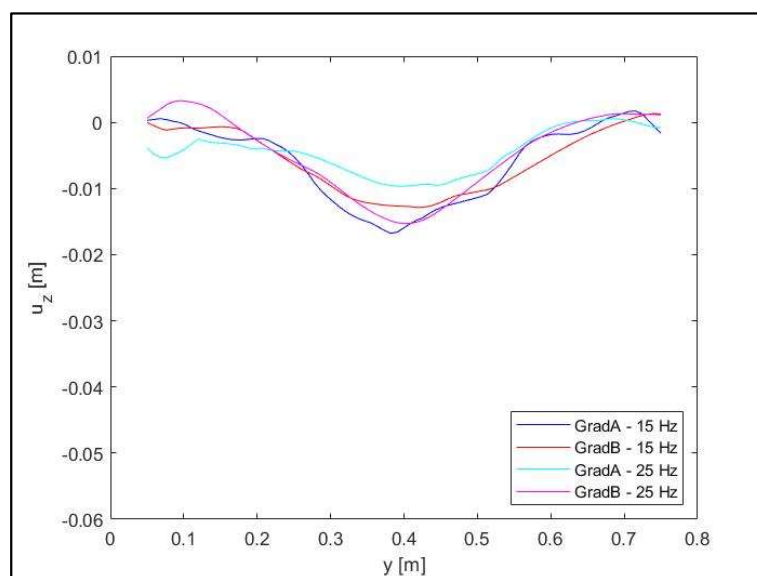


Figura 3.21 Comparação da linha média dos deslocamentos verticais na direção do eixo do dormente a 0,18 m de altura, frequência de carregamento de 15 e 25 Hz e ângulo de atrito de 46°.

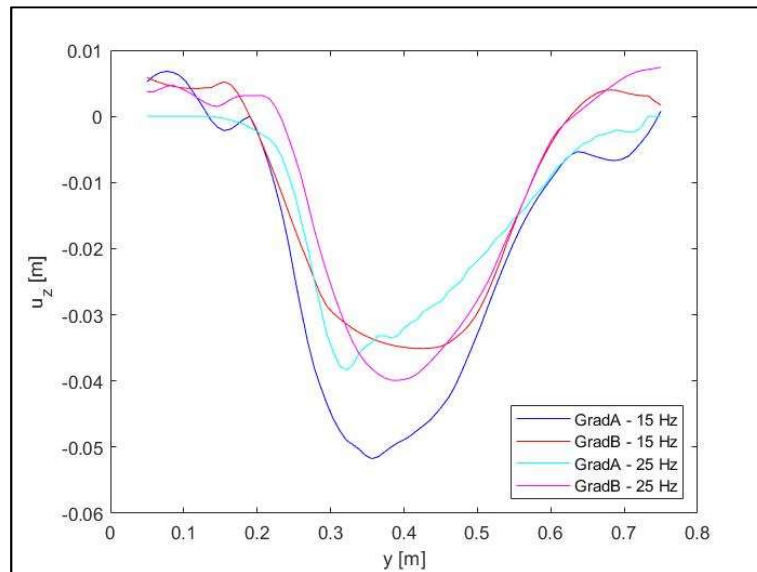


Figura 3.22 Comparação da linha média dos deslocamentos verticais na direção do eixo do dormente a 0,40 m de altura, frequência de carregamento de 15 e 25 Hz e ângulo de atrito de 46°.

As Figuras 3.23-28 apresentam os resultados das simulações 05 e 06, onde foram consideradas as duas granulometrias (A e B), com frequência de carregamento de 15 Hz e ângulo de atrito de 35°. Foram desenvolvidas superfícies de deslocamento para 0,18 e 0,40 m, além de uma comparação da linha média dos deslocamentos verticais na direção do eixo do dormente.

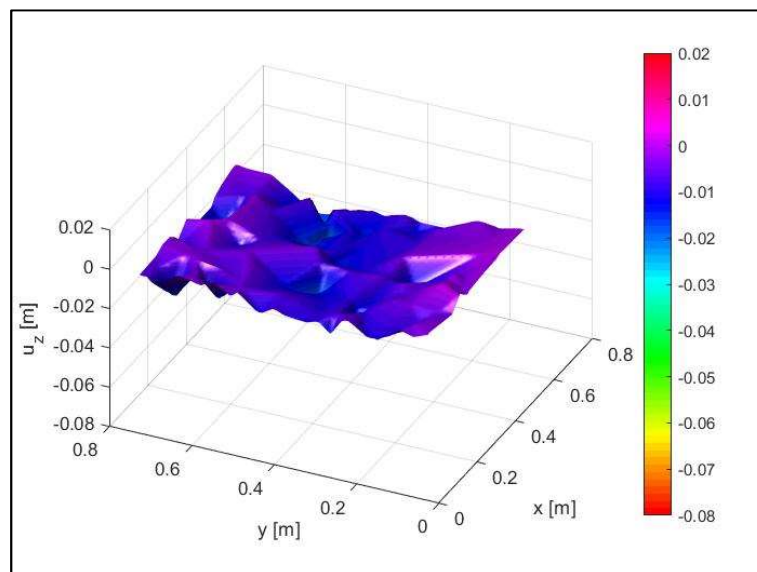


Figura 3.23 Granulometria A - Superfície de deslocamento a 0,18 m de altura, frequência de carregamento de 15 Hz e ângulo de atrito de 35°.

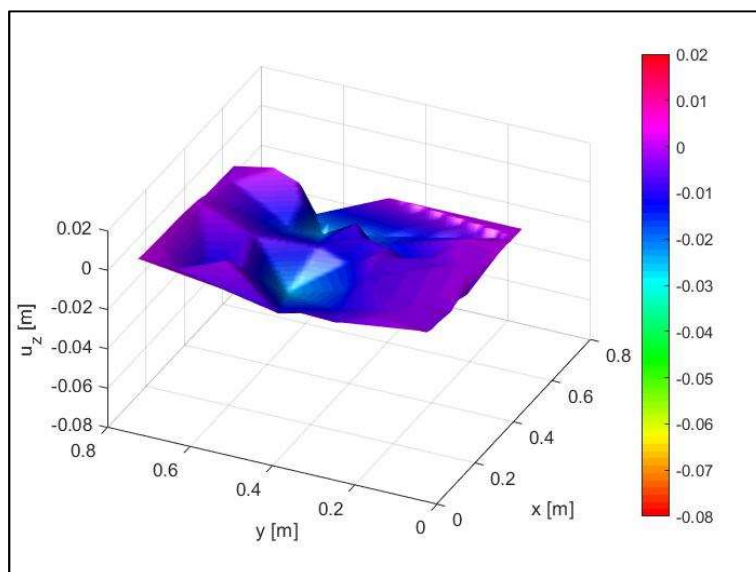


Figura 3.24 Granulometria B - Superfície de deslocamento a 0,18 m de altura, frequência de carregamento de 15 Hz e ângulo de atrito de 35°.

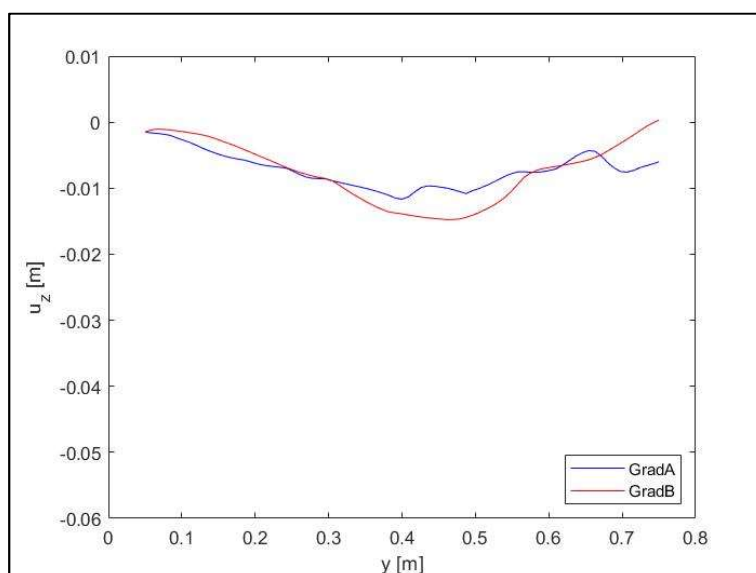


Figura 3.25 Comparação da linha média dos deslocamentos verticais na direção do eixo do dormente a 0,18 m de altura, frequência de carregamento de 15 Hz e ângulo de atrito de 35°.

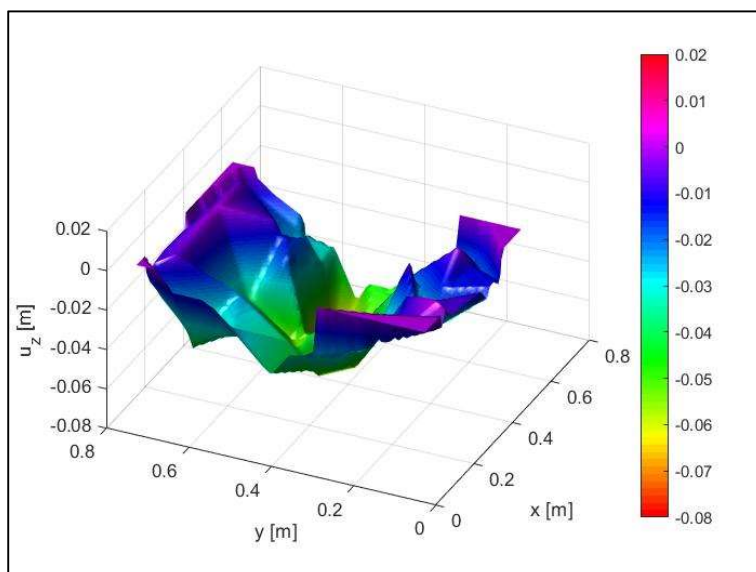


Figura 3.26 Granulometria A - Superfície de deslocamento a 0,40 m de altura, frequência de carregamento de 15 Hz e ângulo de atrito de 35°.

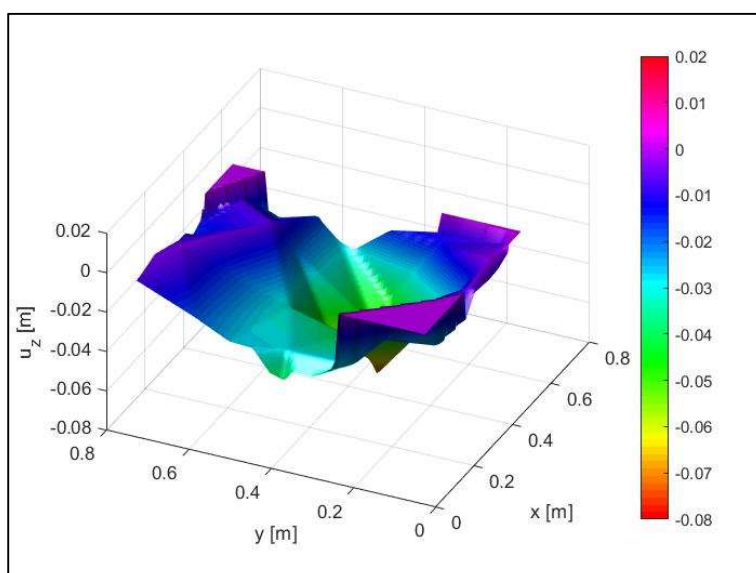


Figura 3.27 Granulometria B - Superfície de deslocamento a 0,40 m de altura, frequência de carregamento de 15 Hz e ângulo de atrito de 35°.

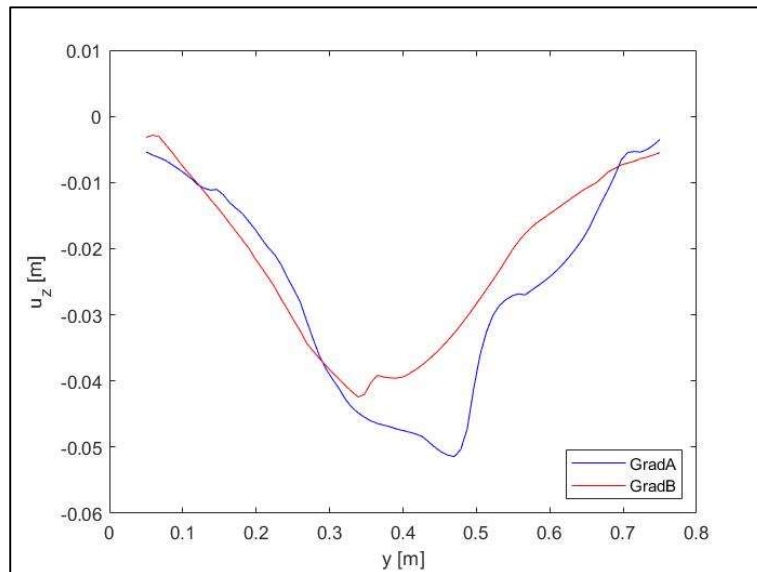


Figura 3.28 Comparação da linha média dos deslocamentos verticais na direção do eixo do dormente a 0,40 m de altura, frequência de carregamento de 15 Hz e ângulo de atrito de 35°.

Foram comparadas as linhas médias dos deslocamentos verticais na direção do eixo do dormente a 0,18 e 0,40 m de altura das granulometrias A e B, considerando a frequência de carregamento de 15, e ângulos de atrito de 35 e 46°, apresentados nas Figuras 3.29-30.

Enquanto que a 0,18 m de altura, os deslocamentos se apresentam na mesma magnitude, a 0,40 m os resultados indicam que o ângulo de atrito menor proporciona uma menor lacuna entre os picos de deslocamento das duas granulometrias. Percebe-se que a granulometria tem uma maior influencia nos deslocamentos do que o ângulo de atrito, levando em consideração que as superfícies de deslocamento apresentam comportamentos semelhantes. De acordo com Vallergera *et al.* (1957) a angulosidade das partículas afeta diretamente o ângulo de atrito, nos casos apresentados, a ausência deste fator para simulação gera resultados diferentes dos esperados pela literatura.

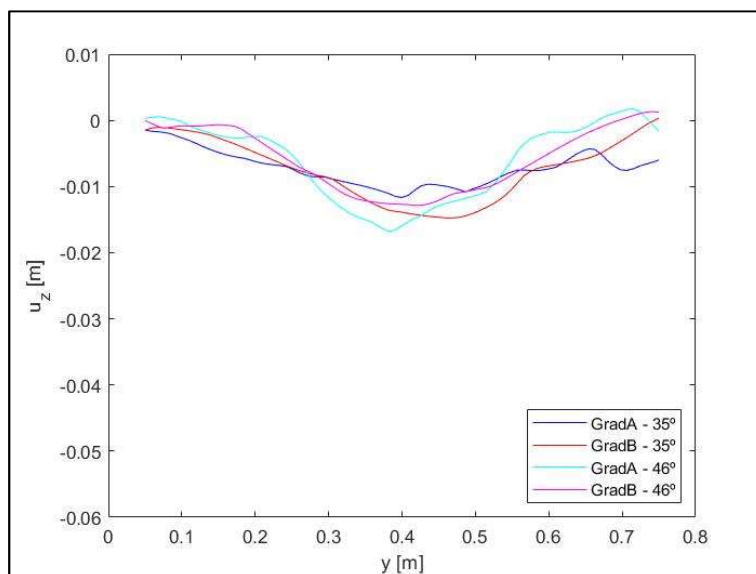


Figura 3.29 Comparação da linha média dos deslocamentos verticais na direção do eixo do dormente a 0,18 m de altura, frequência de carregamento de 15 Hz e ângulo de atrito de 35° e 46°.

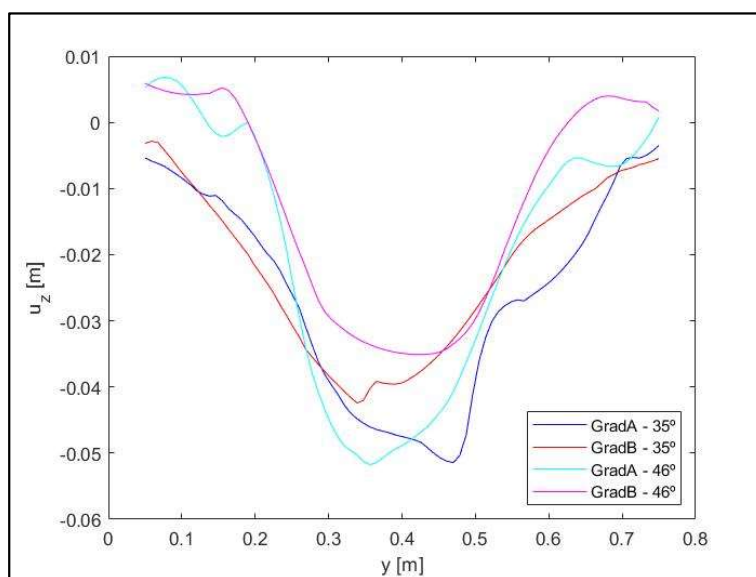


Figura 3.30 Comparação da linha média dos deslocamentos verticais na direção do eixo do dormente a 0,40 m de altura, frequência de carregamento de 15 Hz e ângulo de atrito de 35° e 46°.

De acordo com os resultados das superfícies de deslocamento, quanto mais próximas as partículas estão da região de aplicação do carregamento maiores são os deslocamentos, em relação as partículas nas regiões mais profundas do lastro.

Analisando as linhas médias dos deslocamentos verticais na direção do eixo do dormente, foi possível verificar que a granulometria A a 0,40 m

de altura, apresenta um maior deslocamento em relação a granulometria B, quando se diz respeito aos carregamentos com frequências de 15 Hz, enquanto que, os carregamentos utilizando frequências de 25 Hz, os deslocamentos apresentam semelhanças em seus resultados.

Os resultados referentes ao lastro na altura de 0,18 m, para a frequência de 15 Hz, utilizando o ângulo de atrito de 46° , a granulometria A apresente um maior deslocamento em relação a granulometria B. Para a frequência de 25 Hz e a frequência de 15 Hz, considerando o ângulo de atrito de 35° , a granulometria B apresenta maior deslocamento em relação a granulometria A. Entretanto, todos valores possuem magnitude e comportamento semelhante.

A granulometria A apresenta uma melhor graduação das partículas, que, ao serem submetidas ao carregamento, se reacomodam de modo a preencher um maior número de vazios. Enquanto que a granulometria B possui uma graduação uniforme, composta por partículas maiores.

Apesar dos resultados da simulação se apresentarem satisfatórios, ela não compreende alguns fatores apresentados no modelo físico, como a angulosidade das partículas de lastro, e que, quando sob efeito de carregamento, gera a quebra de grãos, modificando a estrutura geométrica das partículas, bem como a granulometria do sistema e, conseqüentemente, afetando o comportamento mecânico do lastro ferroviário.

Em um modelo que considere quebra de grãos, um fator importante a ser levado em conta é de que quanto maior for o tamanho da partícula, maior será a força de compressão exercida sobre ela, sendo necessário observar que haverá um maior número de contatos nas partículas maiores, resultando na quebra destes grãos maiores do sistema e no preenchimento dos vazios.

O software WooDEM se mostrou muito versátil, sendo possível trabalhar com diversos tipos de granulometrias, bem como modificar as propriedades dos materiais, além de possuir vários modelos de contatos, possibilitando assim análises mais complexas. Entretanto, uma barreira encontrada foi o fato do programa ser bastante complexo e possuir poucos

usuários, tornando o processo de desenvolvimento do modelo computacional mais moroso por conta da pouca troca de informações.

O modelo computacional necessita de calibração para se obter resultados mais próximos do modelo físico, entretanto, no modelo computacional desenvolvido, não foi possível realizar todas as calibrações necessárias em função da complexidade do modelo físico, que possui fatores relevantes como partículas angulosas, quebra de grãos e paredes flexíveis.

4.

Considerações finais

4.1.

Conclusões

Foi utilizado o método dos elementos discretos neste trabalho para avaliar sua capacidade de reproduzir o comportamento mecânico do lastro ferroviário submetido ao carregamento cíclico, através do ensaio triaxial prismoidal cíclico. Este método se demonstrou muito versátil e promissor no desenvolvimento de modelos computacionais deste segmento, pois foi possível implementar características do lastro ferroviário, bem como a interação entre partículas e entre as partículas e o dormente, permitindo assim, avaliar o comportamento mecânico do lastro durante a simulação.

Uma das dificuldades encontradas é o grande esforço computacional necessário para simular o ensaio. Conforme são feitas as calibrações no sistema e adicionadas novas propriedades, como geometria angulosa e quebra de grãos, o esforço requerido é maior. Este fator será superado ao longo do tempo, entretanto, é algo a ser levado em consideração para desenvolver projetos neste segmento.

O MED se demonstrou extremamente capaz de desenvolver modelos computacionais de lastro ferroviários, pois permite o acompanhamento do movimento das partículas durante toda a simulação, possibilitando assim analisar o deslocamento das partículas, bem como sua velocidade, forças, direções de deslocamento, entre outros fatores, importantes para realizar as avaliações do comportamento mecânico do material.

As granulometrias utilizadas apresentaram resultados coerentes com a literatura, pois a granulometria A, por possuir uma melhor distribuição granulométrica permite que as partículas menores se desloquem para os

vazios durante o carregamento cíclico, gerando maiores picos nas superfícies de deslocamento. Enquanto que, na granulometria B, por conta da uniformidade em sua distribuição granulométrica, apresenta menos picos de deslocamento na superfície, isso se dá em função das partículas possuírem tamanhos semelhantes, impedindo o preenchimento de todos os vazios.

O programa WooDEM se apresentou satisfatório para a simulação de lastro ferroviário. Ele permite determinar as características das partículas e sua granulometria, o modelo de contato empregado no modelo, e o carregamento cíclico, aplicado pela oscilação harmônica no dormente. Além disso, permite simular o dormente como um meio contínuo, e a interação entre elementos finitos e discretos. Estas funções permitiram desenvolver um modelo computacional sólido, porém, como qualquer modelo computacional, são necessários resultados de ensaios físicos para sua validação. No estudo presente, não foi possível realizar comparações com resultados de modelos físicos em função do ensaio físico utilizado como base apresentar fatores como paredes flexíveis, partículas angulosas e quebra de grãos.

4.2.

Sugestões para pesquisas futuras

Implementar a forma angulosa das partículas, possibilitando, assim, desenvolver um algoritmo que considere a quebra dos grãos. O programa WooDEM possui ferramentas para se criar os *Clumps* (aglomerado de partículas), é necessário então desenvolver um mecanismo que possa avaliar a quebra desses aglomerados de partículas e analisar a influencia da quebra dos grãos tanto no deslocamento das partículas, quanto no preenchimento dos vazios pelas partículas menores, resultantes da quebra dos grãos. Sendo assim possível realizar análises comparativas com os resultados obtidos por modelos físicos. Além disso, sugere-se a implementação do controle de tensões nas paredes e paredes flexíveis, a fim de possibilitar a simulação de diversas condições contorno.

5.

Referências bibliográficas

CHOLET, C.; COMBE, G.; SAUSSINE, G.; SAB, K.; BOHATHER, C.; GAUTHER, P. E. **Study of the mechanical behavior of the ballasted track using discrete element methods**. Railway engineering: 5th international conference and exhibition, 2002.

CUNDALL, P. A.; STRACK, O. D. L. **A discrete numerical model for granular assemblies**. Géotechnique, vol. 29, issue 1, p. 47-65, 1979.

FELDMAN, F.; NISSEN, D. **Alternative testing method for the measurement of ballast fouling: percentage void contamination**. Conference of railway engineering, p. 10-13, 2002.

GASKIN, P. N.; RAYMOND, G.; POWELL, A. G. **Response of railroad ballast to vertical vibration**. Transportation Engineering Journal, ASCE, Vol. 104, p. 75-87, 1978.

HEYDARI, M.; ALIZADEH, B.; YARAHMADI, R. B.; GHIASVAND, S. **Evaluate the efficiency of machines for mechanized rail line infrastructure**. Current World Environment Journal, Vol. 10 (Special Issue1), p. 1072-1082, 2015.

HOSSAIN, Z.; INDRARATNA, B.; DARVE, F.; THAKUR, P. **DEM analysis of angular ballast breakage under cyclic loading**. Geomechanics and Geoengineering an International Journal, 2(3), p. 175-182, 2007

INDRARATNA, B.; IONESCU, D.; CHRISTIE, H. D.; CHOWDHURY, R. N. **Compression and degradation of railway ballast under one-dimensional loading**. Australian Geomechanics, p. 48-61, 1997.

INDRARATNA, B.; IONESCU, D.; CHRISTIE, H. D. **Shear behaviour of railway ballast based on large-scale triaxial tests**. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, Vol. 124. No. 5, p. 439-449, 1998.

INDRARATNA, B.; IONESCU, D.; CHRISTIE, H. D. **State-of –the-Art Large Scale Testing of Ballast**. Conference on Railway Engineering (CORE 2000), Adelaide, p. 24.1-24.13, 2000.

INDRARATNA, B.; KHABBAZ, H.; SALIM, W.; LACKENBY, J.; CHRISTIE, D. **Ballast characteristics and the effects of geosynthetics on rail track deformation**. International Conference on Geosynthetics and Geoenvironmental Engineering, Mumbai, India, 2004, p. 3-12, 2004.

INDRARATNA, B.; SALIM, W. **Mechanics of Ballasted Rail Tracks**. Londres: Taylor & Francis, 2005.

INDRARATNA, B.; SU, L.; RUJIKIATKAMJORN, C. **A new parameter for classification and evaluation of railway ballast fouling**. Canadian Geotechnical Journal, 48: 322-326, 2011.

INDRARATNA, B.; THAKUR, P. K.; RUJIKIATKAMJORN, C.; Vinod, J. S. **Experimental and numerical study of railway ballast behavior under cyclic loading**. International Journal of Geomechanics, ASCE. 10(4), 136-144, 2010.

ITURRIOZ, I. **Aplicação do método dos elementos discretos ao estudo de estruturas laminares de concreto armado**. Teso de doutorado. Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1995.

JANARDHANAM, R.; DESAI, C. S. **Three-dimensional testing and modeling of ballast**. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 109, No. 6, pp. 783-796, 1983.

JEFFS, T.; MARICH, S. **Ballast characteristics in the laboratory**. Conference on Railway Engineering, p. 141-147, 1987.

LAMBE, T. W.; WHITMAN, R. V. **Soil Mechanics**. Nova York: John Wiley & Sons, 1969.

LADE, P. V.; LIGGIO, C. D.; YAMAMURO, J. A. **Effect of non-plastic fines of minimum and maximum void ratios of sand**. Geotechnical Testing Journal, ASTM, p. 336-347, 1998.

LEKARP, F.; ISACSSON, U.; DAWSON, A. **State of the art. I: Resilient response of unbounding aggregates**. Journal of Transportation Engineering, 126: 66-75, 2000.

LEPS, T.M. **Review of shearing strength of rockfill.** Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol. 96, No. SM4, p. 1159-1170, 1970.

LI, D.; SELIG, E. T. **Method for railroad track foundation design, I: Development.** Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, Vol. 124. No. 4, p. 316-322, 1998.

LIM, W. L.; MCDOWELL, G. R. **Discrete element modelling of railway ballast.** Granular Matter, Vol. 7, Issue 1, p. 19-29, 2005.

LU, M.; MCDOWELL, G. R. **The importance of modelling ballast particle shape in the discrete element method.** Granular Matter, 9: 69-80, 2007.

MAHMOUD, E.; PAPAGIANNAKIS, A. T.; RENTERIA, D. **Discrete Element Analysis of Railway Ballast under cyclic loading.** Advances in Transportation Geotechnics, Vol. 143, p. 1068-1076, 2016.

MAJIDI, B.; TAGHAVI, S. M.; FAFARD, M.; ZIEGLER, D. P.; ALAMDARI, H. **Discrete element method modeling of the rheological properties of coke/pitch mixtures.** Materials, vol. 9, issue 5, p. 334, 2016.

MARACHI, N. D.; CHAN, C. K.; SEED, H. B. **Evaluation of properties of rockfill materials.** Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol. 98, No. SM1, p. 95-114, 1972.

MINISTÉRIO DOS TRANSPORTES. **Transportes 2015.** Disponível em: <www.transportes.gov.br/images/2016/04/Transportes2015Versao_Web.pdf>. Acesso em: dez. 2017

MERHEB, A. H. M. **Análise mecânica do lastro ferroviário por meio de ensaios triaxiais cíclicos.** Dissertação de mestrado. Departamento de Engenharia de Transportes da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2014.

MOHAMMADZADEH, H. **Evaluation of grading effect on behavior of rockfill materials via large-scale experiments.** World Applied Sciences Journal, 11(3): 330-337, 2010.

RAYMOND, G. P.; DIYALJEE, V. A. **Railroad ballast sizing and grading.** Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol. 105. No. GT5, p. 676-681, 1979.

O'SULLIVAN, C. **Particulate discrete element modelling: A geomechanics perspective.** Londres: Spon press, 2011.

ROSCOE, K. H.; SCHOFIELD, A. N.; THURAIRAJAH, A. **Yielding of clays in states wetter than critical.** Géotechnique, Vol. 13, No. 3, p. 211-240, 1963.

SELIG, E. T. **Ballast for heavy duty track. Track Geotechnology.** Proceeding of a Conference organized by the Institution of Civil Engineers and held at University of Nottingham, p. 245–252, 1984.

SELIG, E. T.; WATERS, J. M. **Track Technology and Substructure Management.** Londres: Thomas Telford, 1994.

SUIKER, A. S. J.; SELIG, E. T.; FRENKEL, R. **Static and cyclic triaxial testing of ballast and subballast.** Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE. 131(6), 771-782, 2005.

TERZAGHI, K. **Theoretical Soil Mechanics.** Nova York, John Wiley & Sons, 1943.

THAKUR, P. K.; VINOD, J. S.; INDRARATNA, B. **Effect of particle breakage on cyclic densification of ballast: a DEM approach.** IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 10, 2010.

THOM, N. H.; BROWN, S. F. **The effect of grading and density on the mechanical properties of a crushed dolomitic limestone.** Proceedings of the 14th Australian Road Research Board Conference, Vol. 14, Part. 7. p. 94-100, 1988.

TUTUMLUER, E.; HUANG, H.; HASHASH, Y. M. A.; GHABOUSSI, J. **Aggregate shape effect on ballast tamping and railroad track lateral stability.** AREMA Conference, 2006

TUTUMLUER, E.; HUANG, H.; HASHASH, Y. M. A.; GHABOUSSI, J. **Gradations affecting ballast performance using discrete element modelling (DEM) approach.** AREMA Conference, 2009.

VALLERGA, B. A.; SEED, H. B.; MONISMITH, C. L.; COOPER, R. S. **Effect of shape, size and surface roughness of aggregate particles on the strength of granular materials.** ASTM STP 212, p. 63-76, 1957.

VIZCARRA, G. O. C. **Efeito da Granulometria no Comportamento Mecânico de Lastro Ferroviário**. Tese de doutorado. Departamento de Engenharia Civil da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2015.