



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO Universidade Federal de Ouro Preto Escola de Minas Departamento de Engenharia Civil



Gabriel Fernando da Silva Pena

Seleção de partículas escaneadas e faixas granulométricas de lastro ferroviário em simulações computacionais via Método dos Elementos Discretos

Ouro Preto 2024

## SELEÇÃO DE PARTÍCULAS ESCANEADAS E FAIXAS GRANULOMÉTRICAS DE LASTRO FERROVIÁRIO EM SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS VIA MÉTODO DOS ELEMENTOS DISCRETOS

Monografia submetida à apreciação da banca examinadora de graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Ouro Preto, como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientadores:

 $\mathsf{Prof}^a.\ \mathsf{Dr}^a.\ \mathsf{Andréa}\ \mathsf{Regina}\ \mathsf{Dias}\ \mathsf{da}\ \mathsf{Silva}$  -

UFOP

Me. Erivaldo Santos Jales - UFOP



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO REITORIA ESCOLA DE MINAS DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL



#### FOLHA DE APROVAÇÃO

Gabriel Fernando da Silva Pena

Seleção de partículas escaneadas e faixas granulométricas de lastro ferroviário em simulações computacionais via Método dos Elementos Discretos

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia Civil.

Aprovada em 19 de fevereiro de 2024.

Membros da banca

 Profa. Dra. Andréa Regina Dias da Silva - Orientadora (Universidade Federal de Ouro Preto) Me. Erivaldo Santos Jales - Orientador (Instituto Tecnológico da Vale - ITV)
Prof. Dr. Ricardo Azoubel da Mota Silveira - (Universidade Federal de Ouro Preto)
Prof. Dr. Paulo Anderson Santana Rocha - (Universidade Federal de Ouro Preto)
Dr. Eleir Mundim Bortoleto - (Instituto Tecnológico da Vale - ITV)

Andréa Regina Dias da Silva, orientadora do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 19/02/2024.



Documento assinado eletronicamente por **Andrea Regina Dias da Silva**, **PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 19/02/2024, às 19:43, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do <u>Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015</u>.



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site <u>http://sei.ufop.br/sei/controlador\_externo.php?</u> <u>acao=documento\_conferir&id\_orgao\_acesso\_externo=0</u>, informando o código verificador **0668059** e o código CRC **FF7CB373**.

Referência: Caso responda este documento, indicar expressamente o Processo nº 23109.001649/2024-11

R. Diogo de Vasconcelos, 122, - Bairro Pilar Ouro Preto/MG, CEP 35402-163 Telefone: 3135591546 - www.ufop.br

#### AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por ter me permitido chegar até aqui, sustentado unicamente pela graça imerecida que me alcançou e pela forte mão que me manteve de pé durante toda esta etapa.

Aos meus pais Maria Inês e Fernando, por todo apoio e incentivo durante toda busca dos meus sonhos e objetivos, sou eternamente grato por tudo que sempre fizeram por mim. Sem dúvida alguma, jamais poderia ter chegado até aqui sem a base que me proporcionaram e acreditando junto comigo que tudo isso seria possível.

A minha irmã Paula, pelo incessante conforto que me ofereceu durante toda esta etapa. Por toda experiência que tivemos juntos em Ouro Preto, que não só nos aproximou, quanto nos amadureceu e fez com que crescêssemos juntos e sempre apoiando um ao outro.

Aos meus orientadores Andréa e Erivaldo por toda paciência, comprometimento, dedicação e confiança que sempre me passaram. A orientação de vocês me trouxe um imenso aprendizado e uma admiração ainda maior pelo exemplo que sempre me passaram.

A todos os meus amigos de Ouro Preto, Sete Lagoas, Belo Horizonte e Bahia que sempre estiveram presentes independente das distâncias, agradeço por me ajudarem a enfrentar cada etapa com tranquilidade, superando as adversidades.

Aos professores, em especial aos queridos Walliston, Ana Letícia, Daniela Antunes, Felipe Loch, Marina Medeiros, Ricardo Azoubel, Marcílio Freitas, Paulo Rocha e Arlene, por todo conhecimento e sabedoria que dedicaram em passar, por serem sempre solícitos e presentes.

Ao PET Civil por todo aprendizado, crescimento e coletividade proporcionados, sem dúvidas as experiências compartilhadas foram essenciais na moldagem de uma formação mais sensível e humanitária.

A ABIT Projetos & Engenharia e toda a equipe por todo aprendizado, pela primeira oportunidade de visualizar a grandiosidade do mundo da engenharia civil, em especial ao Ivan Alves da Trindade Júnior, Engenheiro Civil pela UFOP, por ter compartilhado comigo sua paixão pelo universo da engenharia de estruturas.

A TPF Engenharia pela oportunidade de conhecer um lado da incrível engenharia e por

todo conhecimento que proporcionaram e aprendizado que sempre se apresentaram dispostos a compartilhar com muito carinho.

Ao Instituto Tecnológico Vale - Mineração, em especial ao Eleir pela motivação de realização da pesquisa, por todo aprendizado e por todo apoio disponibilizado.

A UFOP, a Fundação Gorceix e a gloriosa Escola de Minas que tornaram possível a realização deste grande sonho.

A todos os integrantes da equipe UFOP-UENP do Projeto Rondon, que me proporcionaram momentos tão únicos e especiais, os quais me fazem falta todos os dias. A imensa transformação que tive durante o tempo que estivemos juntos é resultado da contribuição de um pedacinho cada um de vocês que ficou em mim.

Por fim, agradeço imensamente as Repúblicas Sem Norte e Fruto Proibido pelo acolhimento, pelas grandes amizades que me proporcionaram, pelos diversos momentos de alegria que tive o prazer de compartilhar e pelos momentos difíceis em que pude encontrar pessoas que estenderam as mãos. Durante todo o tempo que passei em Ouro Preto algumas vezes estive voando sem norte, outras, abusando da sorte, mas sempre vivendo bem na companhia de vocês!

"O poder da educação, em geral, é pouco eficaz. Exceto nas felizes ocasiões em que ele é quase supérfluo." (Richard Feynman)

#### RESUMO

O Método dos Elementos Discretos (MED) tem sido amplamente utilizado para simulações computacionais de trechos ferroviários, permitindo analisar interações entre componentes como lastros e dormentes. Isso permite otimizar seu design e operação, aprimorando segurança e desempenho. Nesse sentido, este trabalho foi desenvolvido para avaliar a influência da granulometria do lastro na variação do deslocamento vertical de um trecho de via permanente. Buscou-se através de resultados de modelos com diferentes composições granulométricas e geometrias de britas, propor um modelo com menor custo computacional sem grandes variações de resultados. A metodologia utilizada contou com simulações pelo Método dos Elementos Discretos com a utilização geometrias tridimensionais de amostras de lastro usado na Estrada de Ferro Vitória a Minas (EFVM). De posse desta análise, concluiu-se que modelos com maior variedade granulométrica e número de partículas com geometrias diversas apresentam menor variação nos resultados. Todavia, observou-se que um modelo simplificado, com seis faixas granulométricas e uma única geometria de brita, mostrou menor variação em comparação com um modelo mais complexo. Tal resultado gera ganhos computacionais, otimizando análises futuras sem grandes variações nos resultados. O estudo também verifica a efetividade do Método dos Elementos Discretos (MED) na elaboração de modelos de via permanente, considerando diversas variáveis.

**Palavras-chaves**: Simulação Computacional, Método dos Elementos Discretos, Otimização, Lastro.

#### ABSTRACT

The Discrete Element Method (DEM) has been widely used for computer simulations of railway sections, allowing the analysis of interactions between components such as ballast and sleepers. This enables the optimization of their design and operation, enhancing safety and performance. In this regard, this study was conducted to assess the influence of ballast granulometry on the variation of vertical displacement in a section of permanent way. Through results from models with different granulometric compositions and gravel geometries, an attempt was made to propose a model with lower computational cost without significant variations in results. The methodology employed involved simulations using the Discrete Element Method with three-dimensional geometries of ballast samples used in the Estrada de Ferro Vitória a Minas (EFVM). Based on this analysis, it was concluded that models with greater granulometric variety and a higher number of particles with diverse geometries exhibit less variation in results. However, it was observed that a simplified model, with six granulometric bands and a single gravel geometry, showed less variation compared to a more complex model. This result leads to computational gains, optimizing analyses without significant variations in results. The study also assesses the effectiveness of the Discrete Element Method (DEM) in developing permanent way models, considering various variables.

Keywords: Computational Simulation, Discrete Element Method, Optimization, Ballast.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Via permanente ferroviária. Adaptado de Profillidis (2014)	15
Figura 2.2 – Desenho esquemático do trilho de Vignole. Adaptado de Rosa e Ribeiro (2016)	16
Figura 2.3 – Cenários de Agrupamento de Partículas Bian, Huang e Tutumluer (2016) .	19
Figura 2.4 – Ciclo de cálculo do MED. Adaptado de Ayquipa (2008)	20
Figura 2.5 – Modelo de contato Hertz-Mindlin. Adaptado de Hærvig (2017)	21
Figura 2.6 – (a) Geometria real da partícula.(b) Partícula discreta sobreposta à geometria	
da partícula. (c) Agrupamento de partículas sobrepostas à geometria da	
partícula. Adaptado de Jensen, Edil e Bosscher (2001)	22
Figura 3.1 – Fluxograma das etapas desenvolvidas na metodologia	23
Figura 3.2 – Curva granulométrica da amostra retirada da EFVM	24
Figura 3.3 – Modelos do Grupo A	27
Figura 3.4 – Modelos do Grupo B	27
Figura 3.5 – Modelos do Grupo C	28
Figura 3.6 – Modelos do Grupo E	28
Figura 3.7 – Geometria em CAD da via permanente	29
Figura 3.8 – Geometria em CAD do dormente de concreto simplificado	29
Figura 3.9 – (a) Partícula com número de suavização 5 (b) Partícula com número de	
suavização $1$	30
Figura 3.10–Geometria inicial de preenchimento total da fábrica estática	32
Figura 3.11–Geometria final após queda das partículas	32
Figura 3.12–Geometria da via permanente preenchida com partículas de lastro - Modelo 1C	33
Figura 3.13–Seção transversal da via férrea preenchida com partículas de lastro - Modelo	
1C	33
Figura 3.14–Distribuição de carregamentos para dormentes em função do espaçamento	
entre eixos. Adaptado de AREMA (2020)	34
Figura 4.1 – Seção transversal típica da via permanente	35
Figura 4.2 – Cota do dormente em função do tempo para o grupo A - seis faixas granu-	
lométricas.	36

Figura 4.3 – Cota do dormente em função do tempo para o grupo B - três faixas	
granulométricas.	37
Figura 4.4 – Cota do dormente em função do tempo para o grupo C - uma faixa a	
granulométrica	37
Figura 4.5 – Cota do dormente em função do tempo para o grupo E - esferas	38
Figura 4.6 – Número de contatos em função do tempo para o grupo A	39
Figura 4.7 – Número de contatos em função do tempo para o grupo B	39
Figura 4.8 – Número de contatos em função do tempo para o grupo C	40
Figura 4.9 – Número de contatos em função do tempo para o grupo E	40
Figura 4.10–Número de contatos e deslocamentos em função do tempo dos modelos.	41

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Comparação de vantagens e desvantagens entre dormentes	17
Tabela 2.2 – Granulometria ideal do lastro	18
Tabela 3.1 – Granulometria da amostra de lastro da EFVM	24
Tabela 3.2 – Características das britas da EFVM	26
Tabela 3.3 – Parâmetros utilizados nas simulações MED	31
Tabela 4.1 – Deslocamentos totais dos modelos	36
Tabela 4.2 – Valores de deslocamentos entre os grupos A e B	42
Tabela 4.3 – Valores de deslocamentos entre os grupos A e C	42
Tabela 4.4 – Variação relativa entre o modelo 6A e os modelos dos grupos A, B e C $$ .	43

#### LISTA DE SIGLAS

- AREMA American Railway Engineering and Maintenance-of-Way Association
- CAD Computer Aided Design
- *EFVM* Estrada de Ferro Vitória Minas
- MEF Método de Elementos Finitos
- MED-Método de Elementos Discretos
- $C_u$  Coeficiente de Não-Uniformidade
- $D_{10}$  Diâmetro correspondente a 10% de material retido
- $D_{60}-$  Diâmetro correspondente a 60% de material retido
- $f_{ck}-\ {\sf Resist}$ ência característica à compressão do concreto

# SUMÁRIO

Lis	sta de	figuras		vii
Lis	sta de	tabelas		ix
Lis	sta de	siglas		х
1	INTI	RODUÇ	ÃO	13
	1.1	Objetiv	/0	14
	1.2	Objetiv	vos Específicos	14
2	REF	ERENC	IAL TEÓRICO	15
	2.1	Via Pe	rmanente	15
		2.1.1	Trilhos	15
		2.1.2	Dormentes	16
		2.1.3	Lastro	17
	2.2	Influên	cia da Granulometria no Comportamento do Lastro	18
	2.3	Métod	o dos Elementos Discretos	19
3	MET		OGIA	23
	3.1	Caract	erização Física do Lastro	23
		3.1.1	Peneiramento	23
		3.1.2	Escaneamento	25
	3.2	Definiç	ão e Elaboração dos Modelos	27
		3.2.1	Desenho das Geometrias	28
		3.2.2	Geração das Partículas	29
		3.2.3	Elaboração da Seção da Via Permanente	30
		3.2.4	Definição e Aplicação do Carregamento	33
4	RES	ULTAD	OS E DISCUSSÕES	35
	4.1	Resulta	ados das Análises de Deslocamento	35
	4.2	Resulta	ados das Análises de Número de Contatos	38
	4.3	Análise	e Comparativa dos Resultados	41

5	CONCLUSÃO	44
RE	FERÊNCIAS	45

### 1 INTRODUÇÃO

O lastro ferroviário é um dos principais componentes da via permanente. Sua função inclui absorver carregamentos provenientes dos dormentes, transmiti-los para a camada de fundação subjacente e proporcionar capacidade de drenagem devido ao significativo teor de vazios. Além disso, o lastro ferroviário também promove certa elasticidade na via, auxiliando na distribuição mais uniforme de tensões (SELIG e WATERS, 1994). Portanto, a escolha do material a ser usado como lastro na via férrea é de extrema importância para garantir as propriedades mecânicas adequadas e a qualidade do desempenho durante a rolagem. De acordo com Spada (2003), existem algumas dificuldades na análise do comportamento do lastro na via permanente. Essas complicações incluem incertezas em relação à resposta do carregamento aplicado e às condições de apoio com o subleito, bem como mudanças nas características do lastro devido ao desgaste e à abrasão, como por exemplo a quebra de partículas e contaminação, que podem acelerar o processo de obstrução dos vazios existentes entre as partículas e prejudicando a capacidade drenante do material.

Por outro lado, a modelagem computacional da via permanente apresenta certa dificuldade em simular o comportamento real do lastro por se tratar de um material granular. Portanto, algumas metodologias de análise como o Método dos Elementos Finitos (MEF) não expressam o comportamento granular do lastro, uma vez que apresenta o material como uma camada contínua (GUO; ZHAO e MARKINE, 2020). A representação contínua do lastro acaba dificultando a definição dos pontos de contato entre o dormente e o lastro ferroviário, sendo necessária a definição manual dos pontos de apoio e contato.

Segundo Profillidis (2014), a transmissão de esforços na via permanente pelo MEF é feita através de superfícies de contato que geralmente são consideradas contínuas e perfeitas, o que diverge do comportamento real da via, vista a natureza discreta do lastro.

De acordo com Lu (2008), o Método dos Elementos Discretos (MED) tem desempenhado um papel importante na investigação do comportamento mecânico de materiais granulares. Os processos de deslocamentos, rotações e contatos entre partículas e superfícies são detectados automaticamente durante o processo de cálculo em modelos mais refinados e difundidos comercialmente, o que confere ao método um grande potencial de avaliação do comportamento mecânico do lastro e sua interação com os demais elementos da via permanente.

#### 1.1 Objetivo

O objetivo do presente trabalho é avaliar a influência da granulometria do lastro ferroviário na variação do deslocamento vertical de um trecho de via permanente com a utilização de simulações computacionais via Método dos Elementos Discretos, com base em uma amostra retirada da EFVM e parâmetros obtidos da literatura.

### 1.2 Objetivos Específicos

- 1. Avaliar o comportamento da via permanente com diferentes faixas granulométricas;
- Investigar uma composição de faixas granulométricas e partículas de lastro que tenha menor variação em relação a um modelo com maior número de faixas e geometrias de britas;
- 3. Estudar as características geométricas do lastro que influenciam o deslocamento vertical do trecho em questão.

#### 2 REFERENCIAL TEÓRICO

#### 2.1 Via Permanente

Segundo Profillidis (2014), via permanente é um termo utilizado no contexto ferroviário para descrever a infraestrutura física da linha ferroviária, sendo compreendida por trilhos, dormentes, lastro e outras estruturas que garantem a estabilidade e segurança para a operação de transporte (AREMA, 2020). Essa via é projetada para suportar os carregamentos dinâmicos e estáticos das composições ferroviárias, mantendo o equilíbrio, reduzindo o desgaste dos componentes e proporcionando uma superfície adequada para a circulação dos comboios. A Figura 2.1 apresenta o esquema da seção transversal de uma via permanente.



Figura 2.1 – Via permanente ferroviária. Adaptado de Profillidis (2014)

Os principais componentes constituintes das vias permanentes e suas respectivas funções e características são apresentados a seguir.

#### 2.1.1 Trilhos

De acordo com Rosa e Ribeiro (2016), os trilhos representam a parte superior da estrutura ferroviária, formando a via por onde os veículos se movem. Além de direcionar as rodas dos vagões, os trilhos desempenham o papel de condutor para correntes elétricas, especialmente em ferrovias que utilizam sistemas de sinalização eletrificada. Grande parte dos trilhos adotados atualmente são de perfil Vignole. O perfil Vignole é dividido em três seções sendo elas: boleto, alma e patim, conforme apresentado na Figura 2.2.

A NBR7590 (2012) define o boleto como a parte do trilho destinada ao apoio e ao deslocamento da roda ferroviária, e alma, como a parte do trilho compreendida entre o boleto



Figura 2.2 – Desenho esquemático do trilho de Vignole. Adaptado de Rosa e Ribeiro (2016)

e o patim. O boleto é definido como a base do trilho constituída pela massa mais longa do duplo T, através do qual o trilho é apoiado e fixado.

A alma é o componente central que estabelece a conexão entre o boleto e o patim do trilho. Sua seção, em termos de altura, deve ser cuidadosamente ajustada para permitir a passagem suave das rodas do material rodante, garantindo que não seja demasiadamente elevada, o que comprometeria a estabilidade e o equilíbrio adequado do trilho na estrutura ferroviária, possibilitando uma possível flambagem local da alma (QUEIROZ e SILVA, 2010).

O patim é caracterizado como a parte mais larga do trilho, fixada diretamente nos dormentes. Sua largura deve ser suficiente para garantir a condição de apoio considerada e poder transmitir os esforços sofridos pelo trilho para o dormente e dar estabilidade ao trilho (ROSA e RIBEIRO, 2016).

#### 2.1.2 Dormentes

Segundo Rosa e Ribeiro (2016), o dormente ferroviário é responsável por transferir as forças provenientes dos trilhos para o lastro. Esse componente precisa atender a diversas características específicas para seu uso adequado, dentre elas destacam-se:

- necessidade de uma seção que garanta rigidez, o que permite a continuidade da bitola ao longo da via;
- resistência aos esforços longitudinais aplicados;
- capacidade de facilitar o nivelamento do lastro em sua base;
- prevenção contra movimentos laterais e longitudinais da via e,

• e uma durabilidade significativa.

Os principais materiais utilizados na confecção de dormentes podem variar entre regiões, disponibilidade econômica, industrial e necessidades da via. A Tabela 2.1 apresenta os materiais, suas vantagens e desvantagens.

Tabela 2.1 – Comparação de vantagens e desvantagens entre dormentes

Material	Vantagens	Desvantagens
Madeira	Flexibilidade e melhor distribuição de carregamentos	Baixa vida útil e alto custo
Concreto	Manutenção da bitola da via e maior vida útil	Transporte e resistência transversal
Aço	Fabricação, instalação e manutenção	Sensibilidade à ataques químicos
Polímero	Menor peso e facilidade de transporte	Elevado custo de fabricação

Adaptado de (PROFILLIDIS, 2014)

#### 2.1.3 Lastro

Rosa e Ribeiro (2016) definem o lastro como uma camada granular localizada entre os dormentes e o sublastro, sendo capaz de distribuir os carregamentos provenientes dos dormentes e promover a drenagem da via. Esse processo visa alcançar um equilíbrio para garantir que o sublastro e a plataforma tenham capacidade suficiente para suportar toda a estrutura.

Ainda, segundo os autores supracitados, o tipo de lastro mais comum no Brasil é o material britado. Em épocas passadas, tanto a terra quanto o cascalho foram empregados como elementos de lastro, porém, essa prática não é mais adotada nos dias atuais. A Estrada de Ferro Vitória a Minas (EFVM) costumava utilizar consideravelmente a escória de aciaria em muitos trechos, mas, atualmente, está retornando ao uso de brita como lastro para suas ferrovias (ROSA e RIBEIRO, 2016).

Além disso, Profillidis (2014) também aponta outras funções importantes do lastro dentro da via permanente, sendo elas:

- melhorar a distribuição de tensões para a fundação;
- diminuir a vibração transmitida pela passagem do trem;
- diminuir os deslocamentos transversais e longitudinais e;

• facilitar a drenagem de águas pluviais.

Um dos fatores de grande importância para o ideal desempenho do lastro ferroviário é sua granulometria. Caso as partículas de lastro sejam muito pequenas, há a possibilidade de colmatação, ou seja, diminuição da drenabilidade do lastro com um aumento na rigidez. Por outro lado, as britas também não podem ser de grandes dimensões, pois o nivelamento da via seria suscetível a mudanças e de baixa durabilidade (ROSA e RIBEIRO, 2016).

A Tabela 2.2 apresenta a granulometria ideal de um lastro ferroviário que manteria sua capacidade drenante sem comprometer o nivelamento da via.

Abertura d	da malha	% Que passa	% Retida
pol	mm	-	
2 1/2"	63,5	100	0
2"	50,8	90 - 100	0 - 10
1 1/2"	38	35 - 70	30 - 65
1"	25,4	0 - 15	85 - 100
3/4"	19	0 - 10	90 - 100
1/2"	12,7	0 - 5	95 - 100

Tabela 2.2 – Granulometria ideal do lastro

(ROSA e RIBEIRO, 2016)

#### 2.2 Influência da Granulometria no Comportamento do Lastro

De acordo com Rosa (2019), a estabilidade do lastro está diretamente ligada à granulometria de seu material. Uma composição de lastro ferroviário deve ser capaz de garantir estabilidade para a via permanente e também permitir uma drenagem adequada, conforme discutido na seção anterior.

Bian, Huang e Tutumluer (2016) avaliaram o assentamento de uma camada de lastro utilizando o método de imagem digital combinada com o Método dos Elementos Discretos. Segundo os autores, a composição granulométrica do lastro influencia diretamente em seu índice de vazios. Ainda, eles afirmam que composições com elevados índices de vazios tendem a produzir maiores deformações permanentes quando utilizadas. A Figura 2.3 apresenta os 4 cenários avaliados pelos autores.



Figura 2.3 – Cenários de Agrupamento de Partículas Bian, Huang e Tutumluer (2016)

Os cenários apresentados pelos autores na Figura 2.3 avançam com a inserção de partículas de menor tamanho dentro do limite proposto, em que:

- Cenário 1: com maior uniformidade de granulometria;
- Cenário 2: com introdução de partículas finas e diminuição do índice de vazios;
- Cenário 3: com maior número de partículas finas e diminuição dos contatos com partículas maiores;
- Cenário 4: com maior densidade, onde as partículas finas preenchem maior parte dos vazios.

Segundo Huang (2010), conjuntos de agregados com granulometria mais uniforme apresentam maior índice de vazios, resultando em uma melhor capacidade de drenagem. No entanto, partículas uniformes com dimensões específicas podem expandir-se sob carregamentos, gerando uma estrutura instável com empacotamento inadequado de partículas e espaços no lastro.

#### 2.3 Método dos Elementos Discretos

Modelos computacionais que descrevem o fluxo de partículas granulares tem sido cada vez mais necessários para a compreensão do seu comportamento mecânico, uma vez que se atinge certa dificuldade em representar as condições as quais o material está submetido em campo (LARSSON, 2019).

Cundall e Strack (1979) apresentaram o Método dos Elementos Discretos (MED) como uma forma de representação da natureza discreta de alguns materiais e permitindo uma modelagem

mais precisa tanto de propriedades microscópicas quanto macroscópicas quando comparado com o MEF. No Método dos Elementos Discretos, os cálculos realizados alternam entre duas etapas diferentes. A primeira é uma lei de força-deslocamento, utilizada para obter as forças geradas pelo contato entre partículas por meio dos deslocamentos e deformações. O contato proposto pelos autores é descrito pelo comportamento linear elástico, adotando um modelo de molas para determinação das forças. A segunda abordagem é baseada na 2<sup>a</sup> lei de Newton para obter aceleração das partículas a partir das forças que atuam sobre ela. A partir das duas leis descritas, o processo de cálculo se torna cíclico e iterativo. De forma resumida, o ciclo de cálculo utilizado pelo MED é apresentado na Figura 2.4.



Figura 2.4 - Ciclo de cálculo do MED. Adaptado de Ayquipa (2008).

Segundo Jing e Stephansson (2007), o MED tem apresentado um dos mais ágeis avanços na área de mecânica computacional, tendo diversas aplicações alinhadas às área de mineração, transportes, farmacêuticas e agrícolas. Análises via MED também permitem trabalhar com outras análises, o que viabiliza unir com análises de transferência de calor, mecânica das rochas, mecânica dos solos, processamento de materiais e mecânica dos fluidos. O método aborda três diferentes pontos importantes para uma boa modelagem de sistemas discretos: o primeiro é a identificação de partículas dentro de um sistema dinâmico e passível de conter não linearidades físicas e geométricas, sendo tratadas como discos ou esferas; o segundo é a formulação e resolução das equações de movimentos de cada partícula; e o terceiro, e mais complexo, a determinação de contatos e interações entre partículas.

De acordo com O'Sullivan (2011), as interações de contatos existentes entre partículas de elementos discretos são simuladas por molas que são adicionadas ou removidas em função da aproximação ou afastamento entre elementos, o que constantemente afeta a rigidez geral do sistema em observação. Além disso, o autor afirma a existência de não-linearidades geométricas

a partir do momento em que há deslizamentos em contatos, o que altera a geometria das partículas empacotadas.

Segundo Yan, Regueiro e Sture (2010), um dos modelos de contato mais utilizados em simulações computacionais via MED é o de Hertz-Mindlin. O método de Hertz-Mindlin apresentou um modelo de contato elástico com formulações não-lineares aplicado para materiais não-coesivos, introduzindo forças tangenciais e painel de amortecedores para o sistema de contato, conforme mostra o esquema da Figura 2.5.



Figura 2.5 – Modelo de contato Hertz-Mindlin. Adaptado de Hærvig (2017)

Ghaboussi e Barbosa (1990) apresentaram uma formulação tridimensional para análise de materiais granulares pelo MED, considerando sólidos com seis faces, e diversas formas diferentes de interações e contatos entre si. Uma das análises realizadas, foi a de escoamento em perfis, que apesar de também serem realizadas em simulações bidimensionais, apresentam aspectos importantes que não podem ser avaliados em duas dimensões.

De acordo com Santos, Santana e Francisquetti (2016), o comportamento da partícula em uma simulação utilizando o MED é amplamente afetado pelas dimensões e forma do material, o que requer uma representação mais próxima da geometria real da partícula para obtenção de resultados satisfatórios e coerentes com seu comportamento esperado.

Em 2001, Jensen, Edil e Bosscher (2001) apresentaram uma análise do comportamento das partículas em função de micropropriedades como formato e dureza superficial. Nesses estudos, formas mais complexas são aproximadas por um agrupamento de elementos. A Figura 2.6 (a) mostra um formato qualquer de uma partícula, enquanto a Figura 2.6 (b) exemplifica como apenas um elemento discreto não tem uma boa representação da geometria real da partícula.

Já a Figura 2.6 (c) apresenta um agrupamento de elementos discretos que se aproximam da forma real do objeto.



 Figura 2.6 – (a) Geometria real da partícula.(b) Partícula discreta sobreposta à geometria da partícula.
(c) Agrupamento de partículas sobrepostas à geometria da partícula. Adaptado de Jensen, Edil e Bosscher (2001)

Tentativas mais modernas de realizar modelagens computacionais para análises de vias férreas utilizam e apontam o MED como um modelo eficaz para resultados correspondentes aos resultados experimentais no que diz respeito ao lastro ferroviário (JENSEN; EDIL e BOSSCHER, 2001).

Lim e McDowell (2005) apontam que a modelagem via MED do lastro é capaz de reproduzir fenômenos como fraturamento e intertravamento de partículas. Segundo os autores, a análise dessas características permite a verificação da influência das tensões induzidas pelo tráfego ferroviário no comportamento da via.

Segundo Huang (2010), a abordagem MED é eficaz para detectar disparidades nas especificações de granulometria e propriedades do lastro, tanto em termos de drenagem quanto de suporte estrutural, oferecendo informações, como deslocamentos, contatos e índice de vazios para otimizar as camadas de lastro a fim de aprimorar o desempenho da via férrea.

#### 3 METODOLOGIA

Para o desenvolvimento deste trabalho fez-se uma divisão em duas etapas, sendo a primeira a caracterização física do material do lastro retirado da EFVM. Em seguida, definiram-se quinze modelos computacionais para analisar a influência da granulometria no deslocamento vertical de um segmento de uma via permanente sujeita a carregamentos típicos ferroviários. Assim, foi empregado o software comercial EDEM<sup>®</sup> 2022.2 para modelagem do lastro ferroviário e sua interação com o dormente de concreto, tal como para a obtenção dos deslocamentos verticais da via. As etapas da metodologia deste trabalho seguem a ordem das atividades apresentadas na Figura 3.1.



Figura 3.1 - Fluxograma das etapas desenvolvidas na metodologia

#### 3.1 Caracterização Física do Lastro

#### 3.1.1 Peneiramento

Na primeira etapa do trabalho, realizou-se a caracterização física de uma amostra com aproximadamente 33 kg de lastro retirada de um trecho da EFVM. Os ensaios realizados na

amostra são estabelecidos pela NBR5564 (2021), sendo feitos os ensaios de granulometria por peneiramento e forma. A Tabela 3.1 e a Figura 3.2 apresentam a distribuição granulométrica da amostra e a curva granulométrica, respectivamente.

Abertura da malha		% Retida	% Acumulada
pol	mm		
2 1/2"	63,5	10,78	10,78
2"	50,8	24,50	35,28
1 1/2"	38	39,67	74,69
1"	25,4	23,6	98,55
3/4"	19	1,19	99,74
1/2"	12,7	0.26	100

Tabela 3.1 – Granulometria da amostra de lastro da EFVM



Figura 3.2 - Curva granulométrica da amostra retirada da EFVM

Para a curva granulométrica apresentada na Figura 3.2, obtiveram-se os valores de diâmetros correspondentes a 10% e 60% ( $D_{10}$  e  $D_{60}$ ) do material passante igual a 30mm e 48mm, respectivamente. Em seguida foi calculado o coeficiente de não-uniformidade ( $C_u$ ) conforme a Equação 3.1, apresentando um valor de 1, 6.

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \tag{3.1}$$

Após a realização do peneiramento retiraram-se, de forma aleatória, seis britas de cada uma das faixas granulométricas do ensaio que serão escaneadas e utilizadas para composição da simulação da via permanente, sendo posteriormente pesadas individualmente.

#### 3.1.2 Escaneamento

Para o escaneamento das britas, utilizou-se o equipamento Handyscan 700 - Creaform com uma resolução de 0,1mm. O escâner Handyscan 700 realiza o escaneamento por meio de uma luz estruturada para capturar a geometria de um objeto projetando padrões de luz sobre a superfície e registrando como esses padrões são deformados, o que permite calcular a forma e as dimensões do objeto. Dessa maneira, obteve-se o volume das partículas para determinação de suas densidades com as massas determinadas no tópico anterior.

Segundo a NBR5564 (2021), a classificação quanto à forma das partículas deve ser feita realizando a medição de suas dimensões nos eixos principais. Assim, as britas podem ser classificadas como cúbicas, lamelar, alongada e alongada lamelar. As características das britas utilizadas são apresentadas na Tabela 3.2.

Peneira (mm)	Brita	Peso (g)	Volume (cm <sup>3</sup> )	Densidade (g/cm³)	Forma
	1	684	187,18	3,65	Cúbica
	2	545	158,04	3,44	Cúbica
62 5	3	599	161,88	3,70	Cúbica
03,5	4	591	153,58	3,84	Cúbica
	5	578	147,93	3,90	Cúbica
	6	516	181,84	2,83	Cúbica
	1	471	123,59	3,81	Cúbica
	2	370	127,93	2,89	Cúbica
50.9	3	444	122,90	3,61	Cúbica
50,8	4	392	105,59	3,71	Cúbica
	5	397	119,77	3,31	Cúbica
	6	403	110,84	3,63	Cúbica
	1	219	67,82	3,22	Cúbica
	2	222	62,48	3,55	Cúbica
20	3	176	65,09	2,70	Cúbica
30	4	245	67,27	3,64	Cúbica
	5	220	57,59	3,81	Cúbica
	6	225	60,06	3,74	Cúbica
	1	91	23,32	3,90	Cúbica
	2	145	39,52	3,66	Cúbica
25.4	3	72	24,54	2,93	Cúbica
23,4	4	67	24,82	2,69	Cúbica
	5	99	29,00	3,41	Cúbica
	6	116	30,53	3,79	Cúbica
	1	35	8,79	3,97	Cúbica
	2	46	12,22	3,76	Cúbica
10	3	32	9,38	3,40	Cúbica
19	4	25	9,31	2,68	Cúbica
	5	27	7,31	3,69	Cúbica
	6	19	7,23	2,62	Cúbica
	1	7	2,48	2,81	Cúbica
	2	8	2,97	2,68	Cúbica
10 5	3	8	2,86	2,79	Cúbica
12,5	4	8	2,79	2,86	Cúbica
	5	8	2,83	2,82	Cúbica
	6	15	3,89	3,84	Cúbica

Tabela 3.2 – Características das britas da EFVM

#### 3.2 Definição e Elaboração dos Modelos

A segunda etapa consiste na definição dos modelos para os quais serão realizadas as simulações de um trecho de via permanente. Portanto, optou-se por selecionar o número de faixas granulométricas e na quantidade de pedras utilizada entre os modelos, gerando um total de 15 modelos que serão analisados. As Figuras 3.3 a 3.6 mostram os quatro grupos formados pelos modelos, sendo três grupos de geometrias escaneadas e um grupo composto por geometrias esféricas, separados pela quantidade de faixas granulométricas presentes em cada condição. Dentro de cada grupo de geometrias escaneadas, variou-se o número de britas que foram utilizadas na construção da simulação.











Figura 3.5 – Modelos do Grupo C



#### 3.2.1 Desenho das Geometrias

Nas Figuras 3.7 e 3.8 mostram-se, respectivamente, as geometrias que foram utilizadas na elaboração do trecho da via permanente e do dormente de concreto que será apoiado sobre a camada de lastro. As geometrias foram desenvolvidas em CAD, com utilização do software Autodesk Inventor<sup>®</sup>, e foram exportadas em superfícies em formato STL. O formato STL é amplamente utilizado para representar modelos tridimensionais em computação gráfica e fabricação aditiva, sendo comumente empregado para comunicação entre softwares CAD.

A geometria da via permanente foi desenhada conforme Machado et al. (2009), considerando as dimensões mostradas na Figura 3.7. Para realização das análises foi adotado um trecho de um metro de comprimento longitudinal com um espaço delimitado para que o dormente seja posicionado no centro.

Para a elaboração da geometria do dormente, faz-se uma simplificação considerando-o um paralelepípedo reto e uniforme com dimensões apresentadas na Figura 3.8. Tal simplificação

preserva a área em contato com o lastro que está associada ao deslocamento vertical da via, que se encontra na parte inferior do dormente.



Figura 3.7 – Geometria em CAD da via permanente



Figura 3.8 - Geometria em CAD do dormente de concreto simplificado

#### 3.2.2 Geração das Partículas

Após a definição das geometrias do dormente e da via permanente, foi realizada a importação das geometrias escaneadas das partículas do lastro para o EDEM<sup>®</sup> e criados os modelos multiesferas para a modelagem. Inicialmente, foi adotado como cinco o valor de suavização, que determina a aproximação da partícula multiesfera com a partícula real, e, quanto maior esse valor, maior o número de esferas geradas em cada partícula. O número de esferas para cada brita ficou entre 22 e 36, variando de acordo com a complexidade da geometria da partícula escaneada. A Figura 3.9 apresenta uma mesma partícula com diferentes números de suavização.

Convém destacar que, nessa etapa a escolha do número de suavização e a quantidade de esferas por partículas foram definidos de modo a criar uma geometria que se aproximasse da

realidade, porém, sem resultar em um alto custo computacional para as análises dos modelos com os maiores números de britas e faixas.



Figura 3.9 – (a) Partícula com número de suavização 5 (b) Partícula com número de suavização 1

#### 3.2.3 Elaboração da Seção da Via Permanente

Em seguida, foram determinadas as propriedades mecânicas dos materiais, como coeficiente de Poisson, densidade e módulo de elasticidade do lastro e do dormente de concreto para modelagem da via. Os coeficientes de interação dinâmica entre as partículas, tais como, atrito estático, dinâmico e de restituição são definidos para as interações brita-brita e brita-dormente. Os parâmetros utilizados da interação brita-brita foram obtidos do trabalho de (VIZCARRA; NIMBALKAR e CASAGRANDE, 2016), que aborda o comportamento das deformações verticais de uma via sob duas granulometrias diferentes. Já para os coeficientes de interação brita-dormente foram utilizados os valores padrão do *software*. A Tabela 3.3 apresenta o resumo das propriedades mecânicas e de interação entre os materiais que foram utilizados nas simulações.

As propriedades mecânicas do dormente de concreto foram utilizadas segundo a NBR NBR6118 (2023) e atendendo aos requisitos mínimos exigidos pela NBR NBR11709 (2015). Para um dormente de resistência à compressão característica aos 28 dias ( $f_{ck}$ ) de 50 MPa, módulo de elasticidade definido conforme o item 8.2.8 da NBR NBR6118 (2023) considerando agregado de gnaisse ( $\alpha_E = 1, 0$ ).

Parâmetro	Partículas de Lastro	Dormente de Concreto
Densidade	2770 kg/m³	2500 kg/m³
Módulo de Elasticidade	5400 MPa	36628 MPa
Coeficiente de Poisson	0,35	0,2
Interface	Brita-Brita	Brita-Dormente
Coeficiente de Atrito Estático	0,5	0,5
Coeficiente de Restituição	0,2	0,5
Coeficiente de Atrito de Rolamento	0,001	0,001

Tabela 3.3 – Parâmetros utilizados nas simulações MED

Adaptado de (VIZCARRA; NIMBALKAR e CASAGRANDE, 2016)

Após a definição dos parâmetros dos materiais, foi necessário realizar o preenchimento da geometria da via com as partículas de lastro. Para isso, três opções de preenchimento foram avaliadas de acordo com as ferramentas disponibilizadas pelo *software*, sendo elas: empacotamento de volume (*volume packing*), fábrica estática e fábrica dinâmica.

Inicialmente adotou-se a utilização do empacotamento de volume para o preenchimento da geometria. Tal método consiste em preencher efetivamente qualquer volume fechado até a fração sólida desejada. Porém, notou-se que o método gerava um grande número de partículas em sobreposição, produzindo inconsistências físicas dentro do modelo, como a explosão de partículas, tornando inviável a utilização desse método.

Posteriormente, para o preenchimento da via utilizou-se o recurso da fábrica estática, que consiste na criação de partículas sem realizar integração no tempo de simulação. Utilizou-se a função de preenchimento de seção do tipo de fábrica estática, que cria partículas para preencher a seção geométrica escolhida. Após a criação das partículas, foi necessário adotar um tempo de simulação para a queda das partículas, deixando um novo espaço vazio para repetição do processo de criação de partículas. As Figuras 3.10 e 3.11 mostram a geometria preenchida inicialmente com a fábrica e após a queda das partículas. O método atendeu às necessidades de preenchimento da via, porém, em vista do tempo de queda necessário e intervenção do usuário para criação e exclusão da fábrica, optou-se por validar o preenchimento via fábrica dinâmica.



Figura 3.10 - Geometria inicial de preenchimento total da fábrica estática



Figura 3.11 - Geometria final após queda das partículas

Em seguida, foi avaliado o método da fábrica dinâmica, que diferentemente da fábrica estática, efetua a geração de partículas enquanto realiza a integração no tempo. Definiu-se uma taxa de geração de partículas que fosse compatível com o tempo de queda, de forma com que não se tornasse necessária a determinação de uma pausa na simulação. Por fim, verificou-se que o método atendeu às necessidades com o mínimo de intervenções do usuário, sendo então, adotado como método definitivo de preenchimento para todos os modelos.

Após a definição do método de preenchimento, foi adotada uma taxa de criação de massa de 90000kg/s, na qual observou-se que o tempo necessário para ocupação total da geometria foi de 0, 3s. Em seguida, foi adotado um tempo de 0, 2s para o adensamento das partículas do lastro. Tais valores foram adotados após observações de estabilidade das partículas no sistema. Uma vez definidos, foram utilizados para geração de todos os modelos analisados neste trabalho.

As Figuras 3.12 e 3.13 apresentam a geometria da via após a definição do preenchimento com o método de fábrica dinâmica para o Modelo 1C.



Figura 3.12 - Geometria da via permanente preenchida com partículas de lastro - Modelo 1C



Figura 3.13 – Seção transversal da via férrea preenchida com partículas de lastro - Modelo 1C

#### 3.2.4 Definição e Aplicação do Carregamento

Para a definição do carregamento aplicado sobre os dormentes, considerou-se um vagão com carregamento de 130tf com dois truques de oito rodas, totalizando um valor de 16,25tf por roda. Também foi considerado o peso próprio do dormente de concreto. Em seguida, consultou-se a distribuição de carregamentos estimadas em (AREMA, 2020) mostrada na Figura 3.14, para dormentes de concreto com espaçamento de 500mm entre eixos dos dormentes.

É relevante observar que o processo de aplicação de forças realizada no ambiente do EDEM realiza uma distribuição uniforme do carregamento para o dormente, considerando-o como um corpo rígido, e não apenas na região de contato com o patim como ocorre na realidade.



Figura 3.14 – Distribuição de carregamentos para dormentes em função do espaçamento entre eixos. Adaptado de AREMA (2020)

Observando a linha vermelha tracejada no gráfico da Figura 3.14, obtém-se um valor de 44% de carregamento para cada dormente, resultando em um valor de 7, 1tf por roda. Portanto, para aplicação do carregamento, considerou-se uma passagem de duas rodas, aplicando sobre o dormente uma força resultante de 14, 2tf.

Aplicou-se o carregamento no tempo de 0,5s e mantendo-o até o final da simulação, com uma velocidade constante de 0,2m/s. A velocidade de aplicação do carregamento levou em conta o tempo total de cada simulação. Assim, o carregamento não produziria picos de deformações que poderiam interferir na interpretação dos resultados.

### 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

#### 4.1 Resultados das Análises de Deslocamento

É importante ressaltar que os deslocamentos obtidos neste trabalho não representam os deslocamentos reais ou previstos para a via permanente, sendo deslocamentos díspares e inverossímeis. Os resultados obtidos compõem uma análise relativa entre os dados com o intuito de verificar a sensibilidade e a variação dos resultados com as características alteradas.

Para cada uma das análises dos deslocamentos obtidos observou-se o comportamento no centro geométrico do dormente, inserido a uma altura de 310mm da referência considerada como a base da via permanente, conforme mostra a Figura 4.1. A adoção da análise através do centro geométrico se justifica pelo fato do modelo considerar o dormente como um corpo rígido, conforme descrito na Seção 3.2.4, o que implica a ausência de flexão. Os deslocamentos foram analisados comparando a cota do dormente no início de cada simulação e ao final, após a estabilização dos resultados.



Figura 4.1 – Seção transversal típica da via permanente

A Tabela 4.1 apresenta o resumo dos deslocamentos calculados para todos os modelos analisados.

Modelo	Deslocamento (mm)
6A	13,6
3A	12,2
2A	7,4
1A	13,4
6B	22,0
3B	22,7
2B	18,3
1B	25,6
6C	19,6
2C	22,0
3C	19,6
1C	21,8
EA	15,3
EB	16,3
EC	40,1

Tabela 4.1 – Deslocamentos totais dos modelos

Os gráficos das Figuras 4.2 a 4.5, demonstram a variação da cota do dormente após o carregamento aplicado em função do tempo para cada um dos grupos apresentados.



Figura 4.2 – Cota do dormente em função do tempo para o grupo A - seis faixas granulométricas.



Figura 4.3 – Cota do dormente em função do tempo para o grupo B - três faixas granulométricas.



Figura 4.4 – Cota do dormente em função do tempo para o grupo C - uma faixa a granulométrica.



Figura 4.5 – Cota do dormente em função do tempo para o grupo E - esferas.

#### 4.2 Resultados das Análises de Número de Contatos

Após a análise dos deslocamentos, também foi obtido o número de contatos de cada um dos modelos em função do tempo de simulação. Essa informação foi analisada com intuito de validar as análises (BOLER; QIAN e TUTUMLUER, 2014; SUN, 2017; HUANG, 2010). O número de contatos obtido foi medido no fundo do dormente com a finalidade de avaliar os pontos de transferência de esforços que influenciam diretamente na resistência vertical da via. As Figuras 4.4 a 4.8 apresentam os gráficos do número de contatos em função do tempo para cada um dos grupos apresentados.



Figura 4.6 – Número de contatos em função do tempo para o grupo A.



Figura 4.7 – Número de contatos em função do tempo para o grupo B.



Figura 4.8 – Número de contatos em função do tempo para o grupo C.



Figura 4.9 – Número de contatos em função do tempo para o grupo E.

Em seguida, avaliou-se o comportamento da relação entre o número de contatos e o deslocamento avaliado para cada um dos modelos analisados. A Figura 4.9 apresenta o gráfico da correlação mencionada.



Figura 4.10 - Número de contatos e deslocamentos em função do tempo dos modelos.

Ao analisar o gráfico da Figura 4.9 é possível observar como o deslocamento total da via tende a aumentar com a diminuição do número de contatos. Ainda, é possível observar que a redução de partículas e faixas granulométricas tendem a diminuir o número de contatos nos modelos.

#### 4.3 Análise Comparativa dos Resultados

Para a primeira etapa da análise comparativa entre os valores de deslocamento, buscou-se avaliar a variação do deslocamento ao alterar o número de faixas utilizadas no modelo. Nas Tabelas 4.2 e 4.3 apresentam-se as variações entre os grupos A e B, bem como entre os grupos A e C, respectivamente.

É importante destacar que os modelos do grupo E, realizados com partículas esféricas foram inseridos para verificação da influência da geometria das partículas, portanto, não foram considerados para fins de análise comparativa.

Nº Pedras	Deslocamento grupo A	Deslocamento grupo B	Variação (%)		
6 Pedras	13,6 mm	22,0 mm	61,4%		
3 Pedras	12,2 mm	22,7 mm	85,4%		
2 Pedras	7,4 mm	18,3 mm	145,0%		
1 Pedra	13,4 mm	25,6 mm	90,6%		
Esferas	15,3 mm	16,3 mm	6,2%		
(Elaborado pelo autor, 2024)					

Tabela 4.2 – Valores de deslocamentos entre os grupos A e B

Ao analisar os dados da Tabela 4.2, notou-se que os modelos com seis pedras dos grupos A e B apresentaram uma menor variação em comparação com os demais modelos da tabela, com um valor de 61,4%. Esse resultado sugere que a presença de seis pedras nesses grupos contribuiu para uma estabilidade relativa nos valores de deslocamentos.

Em seguida, ao examinar os valores da Tabela 4.2 observou-se que a variação percentual dos deslocamentos aumentou conforme o número de pedras diminuiu. Ainda, é possível avaliar que o modelo com apenas duas pedras apresentou uma variação significativa de 145% indicando uma sensibilidade maior às condições de análise.

N <sup>o</sup> Pedras	Deslocamento grupo A	Deslocamento grupo C	Variação (%)	
6 Pedras	13,6 mm	19,6 mm	44,0%	
3 Pedras	12,2 mm	19,6 mm	59,8%	
2 Pedras	7,4 mm	22,0 mm	194,7%	
1 Pedra	13,5 mm	21,8 mm	62,2%	
Esfera	15,3 mm	40,1 mm	160,7%	
(Elaborado pelo autor, 2024)				

Tabela 4.3 – Valores de deslocamentos entre os grupos A e C

Os dados da Tabela 4.3 também indicam uma menor variação nos modelos com seis pedras dos grupos A e C, registrando uma variação de 44%.

Além disso, ao observar os deslocamentos dos modelos com duas pedras, nota-se uma variação de 194,7%, indicando uma sensibilidade considerável às características do grupo C. Tal variação pode-se justificar devido a valor do deslocamento obtido no modelo com 2 pedras no grupo A apresentar uma grande alteração em relação ao modelo com 3 pedras do grupo A.

Em seguida, realizou-se uma análise de variação relativa dos deslocamentos dos grupos A, B e C em função do modelo 6A, que apresentou a menor variação para os demais, conforme as Tabelas 4.2 e 4.3. As variações relativas das análises em função do modelo 6A são apresentadas na Tabela 4.4

Nº Pedras	Grupo A	Grupo B	Grupo C
6 Pedras	-	61%	44%
3 Pedras	10%	67%	44%
2 Pedras	45%	<mark>34%</mark>	61%
1 Pedra	1%	88%	60%
Esfera	13%	20%	194%

Tabela 4.4 – Variação relativa entre o modelo 6A e os modelos dos grupos A, B e C

Os valores apresentados na Tabela 4.4 destacam a variação relativa dos deslocamentos em relação ao modelo 6A. Observou-se que, para o grupo B a variação é mais expressiva, sugerindo uma resposta mais sensível às condições adotadas na simulação. Por outro lado, o grupo C apresenta variações menores se comparadas com o grupo B, indicando uma resposta de menor sensibilidade.

Tais comportamentos podem ser explicados segundo Boler, Qian e Tutumluer (2014), cujo trabalho observou que a modificação do percentual nas peneiras de 63,5mm e 38,1mm tem grande influência no número de contatos entre as partículas. Os autores também concluíram que alterações feitas no percentual da peneira de 19mm não apresentam variações significativas, visto que as partículas dessa granulometria não são pequenas suficientes para preenchimentos dos vazios existentes.

Ainda, notou-se que existe uma tendência de aumento nas variações relativas ao reduzir o número de faixas granulométricas dos grupos B e C. Tal desempenho é considerado condizente com resultados apresentados na literatura, visto que, segundo Huang (2010) uma graduação mais uniforme de partículas tende a apresentar menor estabilidade e consequentemente maiores deformações permanentes.

Os resultados apresentados na Figura 4.9 possuem características semelhantes às conclusões expressas por Boler, Qian e Tutumluer (2014), onde foi possível observar nas análises realizadas uma tendência de diminuição dos deslocamentos em função do aumento de contatos com o fundo do dormente. Esse comportamento também explica o aumento do deslocamento dentro de um grupo ao reduzir o número de britas.

## 5 CONCLUSÃO

Com este trabalho pôde-se verificar que a utilização dos modelos que contemplaram uma maior composição granulométrica e número de partículas com geometrias variadas conferem uma menor variação entre os resultados. Isso pôde ser validado através da concordância das tabelas geradas no presente trabalho e a literatura de referência acerca da influência do aumento número de contatos em uma granulometria não uniforme.

Também foi possível concluir que a elaboração de um modelo com seis faixas granulométricas e uma única geometria de brita apresentou a menor variação em comparação com o modelo mais robusto, com seis faixas granulométricas e seis geometrias de britas. Tal resultado pode ter impactos de ganho em questão de custo computacional, corroborando para otimização de análises futuras sem grandes variações de resultados.

Ainda, foi possível verificar a efetividade da utilização do MED para elaboração dos modelos de via permanente, levando em conta diferentes geometrias de via, partículas, composições granulométricas, propriedades dos materiais e carregamentos aplicados.

## REFERÊNCIAS

AREMA. Manual of railway engineering and maintenance of way association: American railway engineering and maintenance-of-way association. *Lanham, EUA*, 2020. 2020.

AYQUIPA, C. J. Simulação 3D pelo Método dos Elementos Discretos de Refluxo de Material de Sustentação de Fraturas em Poços de Petróleo. 2008.

BIAN, X.; HUANG, H.; TUTUMLUER, E. "critical particle size" and ballast gradation studied by discrete element modeling. *Transportation Geotechnics*, 2016. 2016.

BOLER, H.; QIAN, Y.; TUTUMLUER, E. Influence of size and shape properties of railroad ballast on aggregate packing. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2014. 2014.

CUNDALL, P.; STRACK, O. A discrete numerical model for granular assemblies. *Geotechnique*, 1979. 1979.

GHABOUSSI, J.; BARBOSA, R. Three-dimensional discrete element method for granular materials. *International Journal for Numericala and Analytical Methods in Geomechanics*, 1990. 1990.

GUO, Y.; ZHAO, C.; MARKINE, V. Discrete element modelling of railway ballast performance considering particle shape and rolling resistance. *Rail Engineering Science*, 2020. 2020.

HUANG, H. Discrete element modeling of railroad ballast using image based aggregate morphology characterization. Tese (Doutorado) — University of Illinois, 2010.

HæRVIG, J. On the Adhesive Behaviour of Micron-sized Particles in Turbulent Flow - A Numerical Study Coupling the Discrete Element Method and Large Eddy Simulations. Tese (Doutorado) — Aalborg University, 2017.

JENSEN, R. P.; EDIL, T. B.; BOSSCHER, P. J. Effect of particle shape on interface behavior of dem-simulated granular materials. *The International Journal of Geomechanics*, 2001. 2001.

JING, L.; STEPHANSSON, O. Fudamentals of Discrete Element Methods for Rock Engineering - Theory and Applications. [S.I.]: ELSEVIER, 2007.

LARSSON, S. *Particle Methods for Modelling Granular Material Flow*. Tese (Doutorado) — Lulea University of Technology, 2019.

LIM, W. L.; MCDOWELL, G. R. Discrete element modelling of railway ballast. *Granular Matter*, 2005. 2005.

LU, M. *Discrete Elemente Modelling of Railway Ballast*. Tese (Doutorado) — The University of Nottingham, 2008.

MACHADO, A. et al. Manual Técnico da Via Permanente. Brasil, 2009.

NBR11709. *ABNT NBR11709: Dormentes de Concreto - Projeto, materiais e componenetes.* [S.I.]: Rio de Janeiro, Brasil, 2015.

NBR5564. *ABNT NBR5564: Via férrea - lastro ferroviário - requisitos e métodos de ensaio.* [S.I.]: Rio de Janeiro, Brasil, 2021.

NBR6118. *ABNT NBR6118: Projeto de estruturas de concreto*. [S.I.]: Rio de Janeiro, Brasil, 2023.

NBR7590. ABNT NBR7590: Trilhos vignole - Requisitos. [S.I.]: Rio de Janeiro, Brasil, 2012.

O'SULLIVAN, C. *Particulate Discrete Element Modeling: A Geomechanics Perspective*. [S.I.]: Spon Press, 2011.

PROFILLIDIS, V. *Railway Management and Engineering*. [S.I.]: Ashgate Publishing Limited, 2014.

QUEIROZ, G.; SILVA, S. P. A. Efeitos de cargas localizadas em trilhos de vigas de rolamento com alma senoidal. *Asociación Argentina de Mecánica Computacional*, 2010. 2010.

ROSA, A. F. EFEITO DA GRANULOMETRIA E DA LITOLOGIA NO COMPORTAMENTO DE LASTROS FERROVIÁRIOS EM LABORATÓRIO E POR ANÁLISE COMPUTACIONAL. 2019.

ROSA, R. de A.; RIBEIRO, R. C. H. *Estradas de Ferro: Projeto, Especificação e Construção*. [S.I.]: EDUFES, 2016.

SANTOS, K.; SANTANA, R. C.; FRANCISQUETTI, M. C. Método dos elementos discretos aplicado na simulação do empacotamento de grãos de soja. *XXI Congresso Brasileiro de Engenharia Química*, 2016. 2016.

SELIG, E. T.; WATERS, J. M. *Track Geotechnology and Substructure Management*. [S.I.]: Thomas Telford, 1994.

SPADA, J. L. G. Uma abordagem mecânica dos pavimentos aplicada ao entendimento do mecanismo de comportamento tensão-deformação da via férrea. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2003.

SUN, Y. EFFECT OF PARTICLE ANGULARITY AND SIZE DISTRIBUTION ON THE DEFORMATION AND DEGRADATION OF BALLAST UNDER CYCLIC LOADING. Tese (Doutorado) — UNIVERSITY OF WOLLONGONG, 2017.

VIZCARRA, G. C.; NIMBALKAR, S.; CASAGRANDE, M. Modeling behaviour of railway ballast in prismoidal apparatus using discrete element method. *Advances in Transportation Geotechnics 3. The 3rd International Conference on Transportation Geotechnics*, 2016. 2016.

YAN, B.; REGUEIRO, R. A.; STURE, S. Three-dimensional ellipsoidal discrete element modeling of granular materials and its coupling with finite element facets. *Engineering Computations: International Journal for ComputerAided Engineering and Software*, 2010. 2010.