

4 Simulação numérica

Este estudo apresenta a modelagem de um ensaio de compressão sobre lastro ferroviário utilizando o método dos elementos discretos utilizando o programa EDEM 2.6. Utilizaram-se propriedades típicas de lastro ferroviário tais como peso específico, granulometria, índice de vazios e espessura das camadas. O ensaio virtual compreende a aplicação de uma carga vertical monotônica mediante uma peça de dimensões similares a um dormente sobre partículas que simulam o lastro colocado numa caixa de dimensões 600 x 800 x 800 mm. São observadas as tensões e velocidades desenvolvidas nas partículas, características difíceis de serem observadas nos ensaios convencionais reais.

4.1 O Método dos Elementos Discretos

O Método dos Elementos Discretos (MED) é uma técnica numérica utilizada para resolver problemas que podem ser representados através de objetos discretos ou partículas. Tais elementos discretos interagem entre si por meio de forças de contato normais e tangenciais. As forças de contato são determinadas pela Lei Força-Deslocamento e se somam à força gravitacional na solução das equações de movimento.

O movimento de uma partícula é determinado pela força resultante e o momento angular que age sobre ela. As forças de contato e o efeito da gravidade resultam no movimento de translação e rotação da partícula.

A segunda lei do movimento de Newton é aplicada e a posição de todas as partículas pode ser calculada para o próximo passo de tempo. Quando isto é repetido, tem-se a capacidade de simular como as partículas estão fluindo no sistema (Quist, 2012).

O modelo usado para esta simulação foi o modelo de contato Hertz-Mindlin. Neste modelo, o componente da força normal é baseado na teoria de contato Hertziano e o modelo de força tangencial é baseado no trabalho de

Mindlin-Deresiewicz. Este modelo de contato foi escolhido devido a sua precisão e eficiência nos cálculos de força (DEM Solutions, 2011).

A Figura 4.1 ilustra o contato entre duas partículas A e B usando um modelo mola-amortecedor, o qual representa o comportamento elástico e não-elástico da partícula. A força total entre as partículas pode ser dividida em forças normal e tangencial. A energia fornecida para o sistema de partículas é dissipada pelo atrito e o amortecimento local. Componentes mola e amortecedor são disponíveis para ambas as forças, o atrito é disponível somente para a componente tangencial e o coeficiente de restituição é relacionado à componente de força normal.

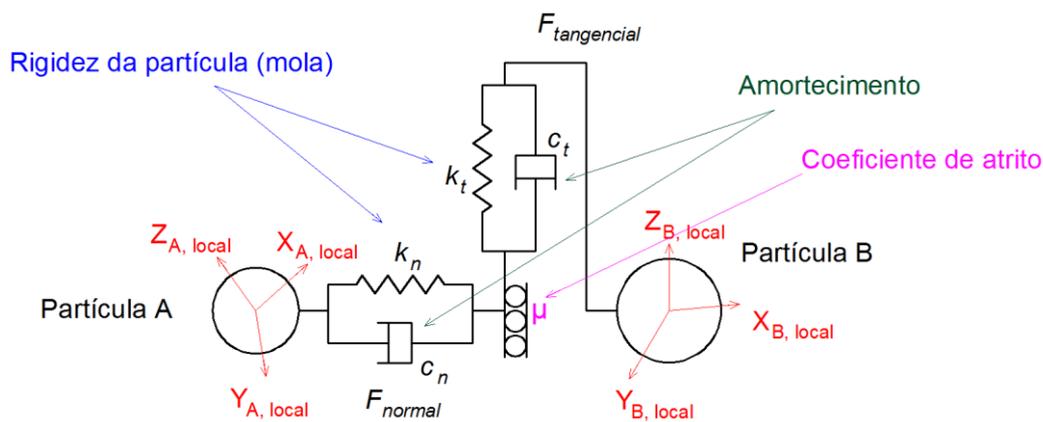


Figura 4.1. Diagrama do modelo de contato Hertz-Mindlin (adaptado de Roufail, 2011).

Este modelo calcula as forças normais usando algumas propriedades do material tais como o coeficiente de restituição, o módulo de Young, o coeficiente de Poisson, tamanho e massa, as quais podem ser expressas nas equações 4.1 a 4.7 (DEM Solutions, 2011).

$$F^n = \frac{4}{3} E^* \sqrt{R^* \delta_n^{\frac{3}{2}}} \quad (4.1)$$

$$\frac{1}{E^*} = \frac{(1-\nu_i^2)}{E_i} + \frac{(1-\nu_j^2)}{E_j} \quad (4.2)$$

$$\frac{1}{R^*} = \frac{1}{R_i} + \frac{1}{R_j} \quad (4.3)$$

$$F_n^d = -2 \sqrt{\frac{5}{3}} \beta \sqrt{S_n \times m^* \times v_n^{rel}} \quad (4.4)$$

$$\frac{1}{m^*} = \left(\frac{1}{m_i} + \frac{1}{m_j} \right)^{-1} \quad (4.5)$$

$$\beta = \frac{\ln e}{\sqrt{\ln^2 e + \pi^2}} \quad (4.6)$$

$$S_n = 2E^* \sqrt{R^* \delta_n} \quad (4.7)$$

Onde,

E_i, ν_i, R_i, m_i e E_j, ν_j, R_j, m_j são o módulo de Young, coeficiente de Poisson, raio e massa das partículas em contato.

F_n = Força normal

E^* = Modulo de Young equivalente

R^* = Raio equivalente

m^* = Massa equivalente

F_n^d = Força de amortecimento normal

v_n^{rel} = Velocidade normal relativa

S_n = Rigidez normal

e = Coeficiente de restituição

Também, com o intuito de calcular as forças tangenciais, este modelo usa o módulo cisalhante, velocidades tangenciais, coeficiente de atrito estático e rigidez tangencial como mostrados desde a equação 4.8 até a equação 4.10.

$$F_t = -S_t \delta_t \quad (4.8)$$

$$S_t = 8G^* \sqrt{R^* \delta_n} \quad (4.9)$$

$$F_t^d = -2 \sqrt{\frac{5}{6}} \beta \sqrt{S_t \times m^* \times v_n^{rel}} \quad (4.10)$$

Onde,

F_t = Força cisalhante

G^* = Módulo de cisalhamento equivalente

F_t^d = Força de amortecimento cisalhante

v_t^{rel} = Velocidade cisalhante relativa

S_t = Rigidez ao cisalhamento

No caso de atrito de rolamento e cálculo do torque, as velocidades angulares no contato são calculadas usando a equação 11,

$$\tau_i = -\mu_r F_n R_i \omega_i \quad (4.11)$$

Onde,

τ_i = Torque nas superfícies de contato

μ_r = Coeficiente de atrito ao rolamento

R_i = Distância do ponto de contato ao centro de massa

ω_i = Vetor de velocidade angular da partícula no ponto de contato

4.2

Modelagem do ensaio

4.2.1

Modelo numérico

O domínio do modelo é o espaço no qual tem lugar a simulação, o tamanho deste tem um efeito no tempo de simulação: quanto maior o domínio, maior tempo necessário para a simulação ocorrer, além disso, as partículas que saem fora deste espaço deixam de ser consideradas nos cálculos.

Esta simulação foi destinada para recriar como as forças entre partículas evoluem quando um material granular é submetido ao ensaio de compressão triaxial prismoidal. O primeiro passo foi a criação de uma câmara retangular de largura de 600 mm, comprimento de 800 mm e altura de 800 mm. O modelo é mostrado na Figura 4.2.

Pretendeu-se criar um modelo triaxial verdadeiro no qual as tensões principais (σ_1 , σ_2 e σ_3) possam ser determinadas. Cada parede vertical da câmara é restrita na direção horizontal, as camadas de lastro e sublastro são livres para deformar verticalmente sob carregamento. Parâmetros típicos foram usados para simular os ensaios triaxiais (Tabela 4.1).

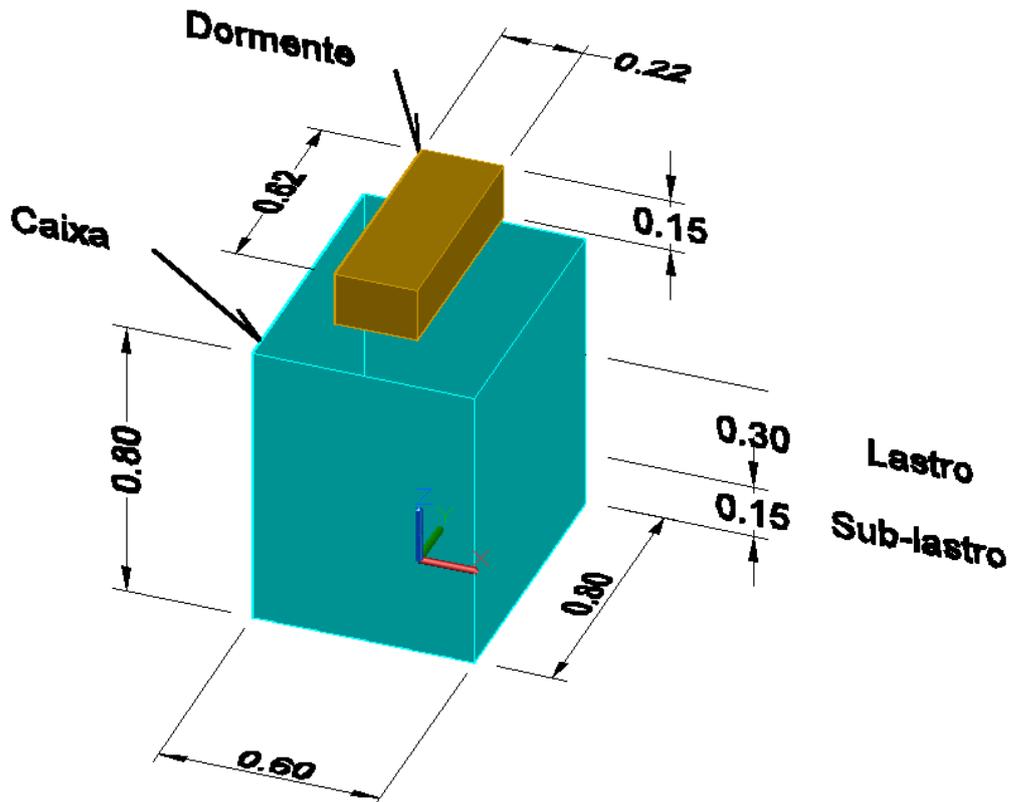


Figura 4.2. Ilustração da câmara triaxial virtual.

Tabela 4.1. Parâmetros da simulação numérica adotados para esta pesquisa.

Parâmetro	Valor			Unidade
	Lastro e sub-lastro	Aço	Dormente de madeira	
Densidade do solo	2.700	7.800	700	Kgf/m ³
Modulo de cisalhamento	2	70	1	GPa
Coefficiente de Poisson	0,35	0,3	0,3	
	Rocha-rocha	Rocha-aço	Rocha-madeira	
Coefficiente de atrito estático	0,5	0,7	0,4	
Coefficiente de restituição	0,2	0,25	0,38	
Coefficiente de atrito ao rolamento	0,001	0,001	0,001	

4.2.2 Descrição de Partículas

O lastro e sublastro foram representados por um conjunto de esferas com diferentes diâmetros. Modelaram-se cinco amostras com diferentes granulometrias, como se explica a seguir:

- Granulometria A: recomendada por Indraratna et al. (2004)
- Granulometria B: segundo a norma brasileira NBR 5564 (ABNT, 2012) (Tabela 4.2, Figura 4.3).
- Granulometria C: Partículas de diâmetro 30 mm (Tabela 4.4).
- Granulometria D: Partículas de diâmetro 40 mm (Tabela 4.5).
- Granulometria E: Partículas de diâmetro 45 mm (Tabela 4.6).

Tabela 4.2. Granulometria A

Diâmetro mm	Volume cm ³	Massa g	Gradação % Massa	Número de partículas
				Lastro
63	130,92	353,50	5,00	33
53	77,95	210,47	18,06	198
45	47,71	128,82	11,29	202
40	33,51	90,48	12,46	317
35	22,45	60,61	13,64	518
30	14,14	38,17	12,55	757
25	8,18	22,09	10,00	1043
20	4,19	11,31	12,34	2515
15	1,77	4,77	4,66	2248
13	1,15	3,11	0	0
Total				7.831
				Sublastro
15	1,77	4,77		22.635

Tabela 4.3. Granulometria B

Diâmetro mm	Volume cm ³	Massa g	Gradação % Massa	Número de partículas
				Lastro
63	130,92	353,50	5,00	33
53	77,95	210,47	23,23	254
45	47,71	128,82	14,52	260
40	33,51	90,48	17,49	445
35	22,45	60,61	20,45	777
30	14,14	38,17	15,32	925
25	8,18	22,09	3,33	348
20	4,19	11,31	0,67	136
15	1,77	4,77	0	0
13	1,15	3,11	0	0
Total				3.178
				Sublastro
15	1,77	4,77		22.635

Tabela 4.4. Granulometria C

Diâmetro mm	Volume cm ³	Massa g	Gradação % Massa	Número de partículas
30 Total	14,14	38,17	100	Lastro 6.036 6.036
15	1,77	4,77		Sublastro 22.635

Tabela 4.5. Granulometria D

Diâmetro mm	Volume cm ³	Massa g	Gradação % Massa	Número de partículas
40 Total	33,51	90,48	100	Lastro 2.546
15	1,77	4,77		Sublastro 22.635

Tabela 4.6. Granulometria E

Diâmetro mm	Volume cm ³	Massa g	Gradação % Massa	Número de partículas
45 Total	47,71	128,82	100	Lastro 1.788
15	1,77	4,77		Sublastro 22.635

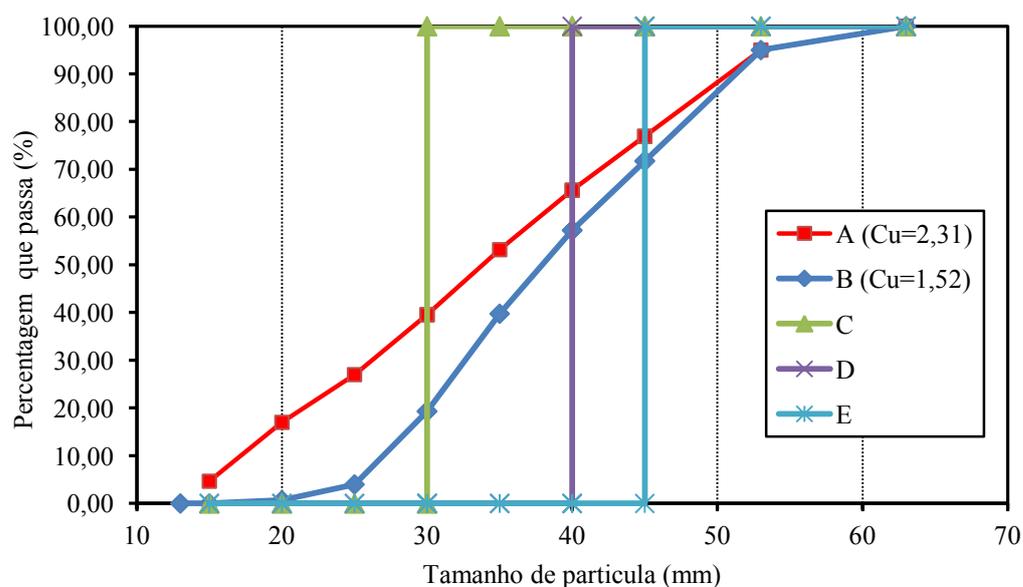


Figura 4.3. Granulometria e coeficiente de uniformidade dos lastros modelados numericamente.

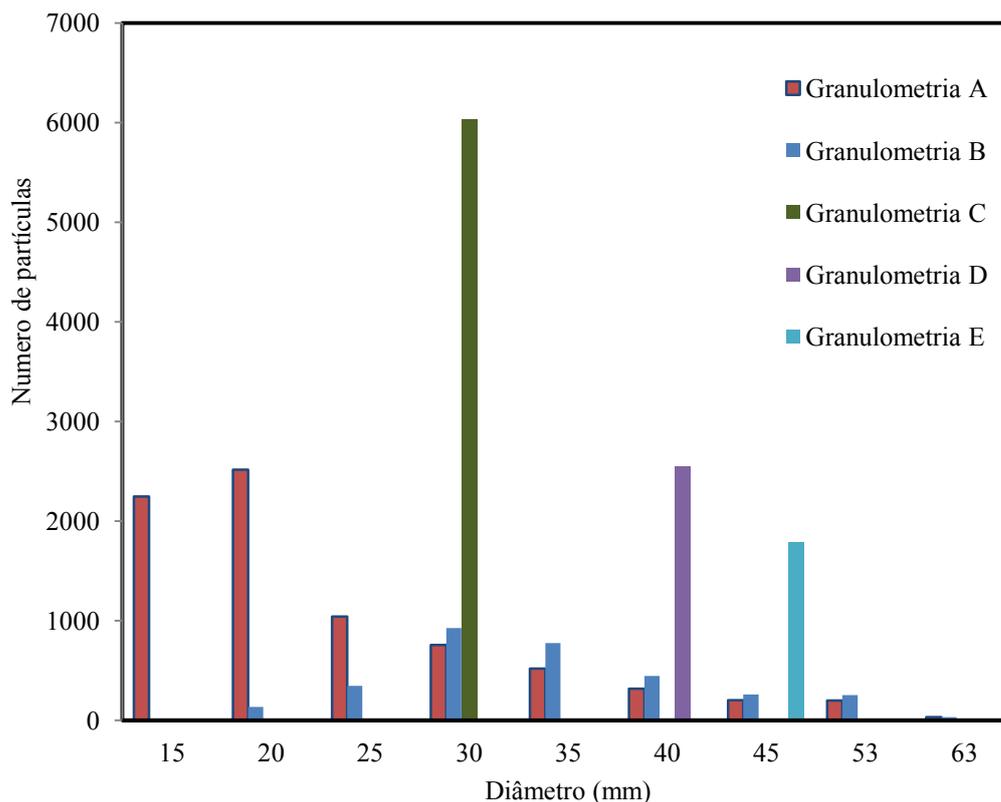


Figura 4.4. Número de partículas vs. diâmetro para cada granulometria dos lastros modelados numericamente.

4.2.3 Passo de tempo

Para processos dinâmicos, fatores importantes para considerar são: a propagação de ondas elásticas através das partículas, o tempo de transferência de carga desde uma partícula às partículas adjacentes em contato, e a necessidade de não transmitir energia através de um sistema que é mais rápido que a natureza (Li et al, 2005). Estudos teóricos desenvolvidos por Miller e Pursey (1955) demonstram que cerca de 67 % da energia irradiada pelo movimento oscilatório vertical de um disco à superfície de um maciço semi-indefinido (pequena dimensão face ao domínio) é transportada através de ondas de Rayleigh, enquanto apenas 26% e 7% da energia estão associados a ondas S e P, respectivamente. Esta constatação teórica mostra a clara preponderância das ondas de Rayleigh na resposta observada em pontos localizados à superfície do maciço.

Toda a energia pode ser assumida como transferida pelas ondas de Rayleigh desde que a diferença entre as velocidades de onda de Rayleigh e as ondas distorcionais (S) seja pequena e a energia transferida pela onda dilatante

(P) é desprezível (Li et al, 2005). O tempo médio de chegada das ondas de Rayleigh a qualquer contato é a mesma independente da localização do ponto de contato. O passo de tempo de Rayleigh, portanto, é o idealizado passo de tempo do MED, calculado baseado no tamanho médio da partícula (Li et al, 2005), de um conjunto particulado quase-estático no qual o número de coordenação (número total de contatos por partícula) para cada partícula permanece superior a 1. As equações em detalhe são fornecidas por Li et al. (2005) e DEM Solutions (2011).

Na prática, alguma parcela do valor máximo do passo de tempo de Rayleigh idealizado (equação 4.12) é usada. Para altos números de coordenação (quatro ou mais), um passo de tempo típico de 20% do passo de tempo de Rayleigh tem sido mostrado ser apropriado. No entanto, para números de coordenação baixos, 40% é mais adequado (DEM Solutions, 2011). O passo de tempo usado em testes virtuais desta pesquisa foi de 1×10^{-5} segundos, de acordo aos parâmetros de material.

$$Tr = \pi r \sqrt{(\rho/G)} / (0,163v + 0,8766) \quad (4.12)$$

Na Figura 4.5 é mostrada a linha do tempo, com os estágios desenvolvidos durante a simulação. Cada simulação dura 4 segundos e levou 48 horas de tempo computacional.

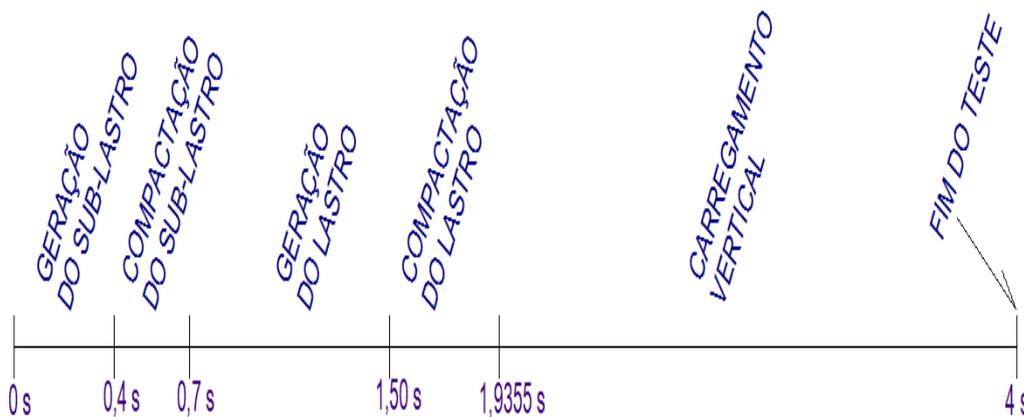


Figura 4.5. Linha do tempo do ensaio na modelagem numérica desta pesquisa.

4.2.4 Geração de partículas

Dentro de um paralelepípedo virtual de 600 x 800 x 600 mm com a face inferior elevada 300 mm em relação à face inferior da câmara, 22.635 esferas com diâmetro uniforme de 15 mm foram geradas para representar o sublastro. As posições foram aleatoriamente escolhidas pelo programa EDEM 2.6, com a limitação de não haver sobreposição de partículas.

Após a geração de partículas, elas se estabeleceram e rearranjaram sob a ação do campo da gravidade normal ($9,8 \text{ m/s}^2$). Este processo levou 0,4 segundos (tempo virtual). Uma chapa de aço (virtual) desceu para compactar o sublastro até atingir uma espessura de 15 cm (Figura 4.6a). As partículas de lastro foram criadas após similarmente, atingindo uma espessura de 30 cm em 1 segundo (Figura 4.6b). Os correspondentes índices de vazios inicial (e_0) das camadas de lastro e de sublastro foram de 0,60 e 0,80 respectivamente.

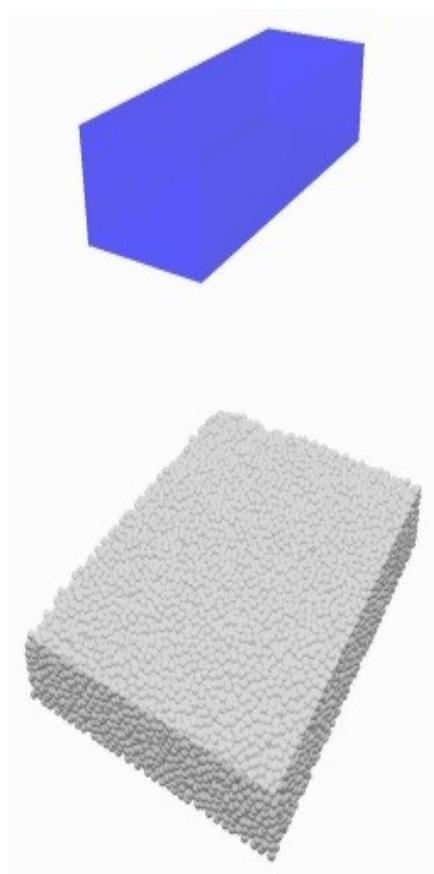


Figura 4.6 (a)

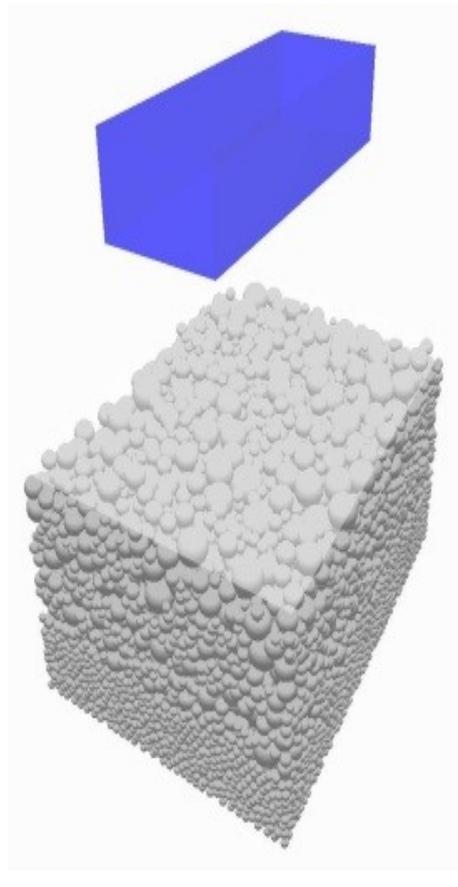


Figura 4.6 (b)

Figura 4.6. Criação de partículas de (a) sublastro e (b) lastro na modelagem numérica desta pesquisa.

4.2.5 Carregamento

Após a criação de partículas, o dormente começou a se movimentar verticalmente até encostar com uma velocidade constante de 10 m/s (1×10^{-7} m/passos). Após algum deslocamento, fez contato com as partículas. A compressão vertical começou e então, a velocidade do dormente mudou para 2×10^{-2} m/s (2×10^{-8} m/passos), permanecendo constante até o fim do teste em 4 segundos. O teste foi conduzido para pesquisar a resposta de carregamento num lastro ferroviário. A deformação do modelo foi analisada através deste teste, onde foi estudado o movimento das partículas quando submetido à carga vertical.

Também, simularam-se situações com carregamentos cíclicos de deslocamento controlado, com amplitude de 0,02 mm que é a media do deslocamento/ciclo obtido nos ensaios triaxiais cíclicos realizados na Universidade de Wollongong, como parte desta pesquisa.

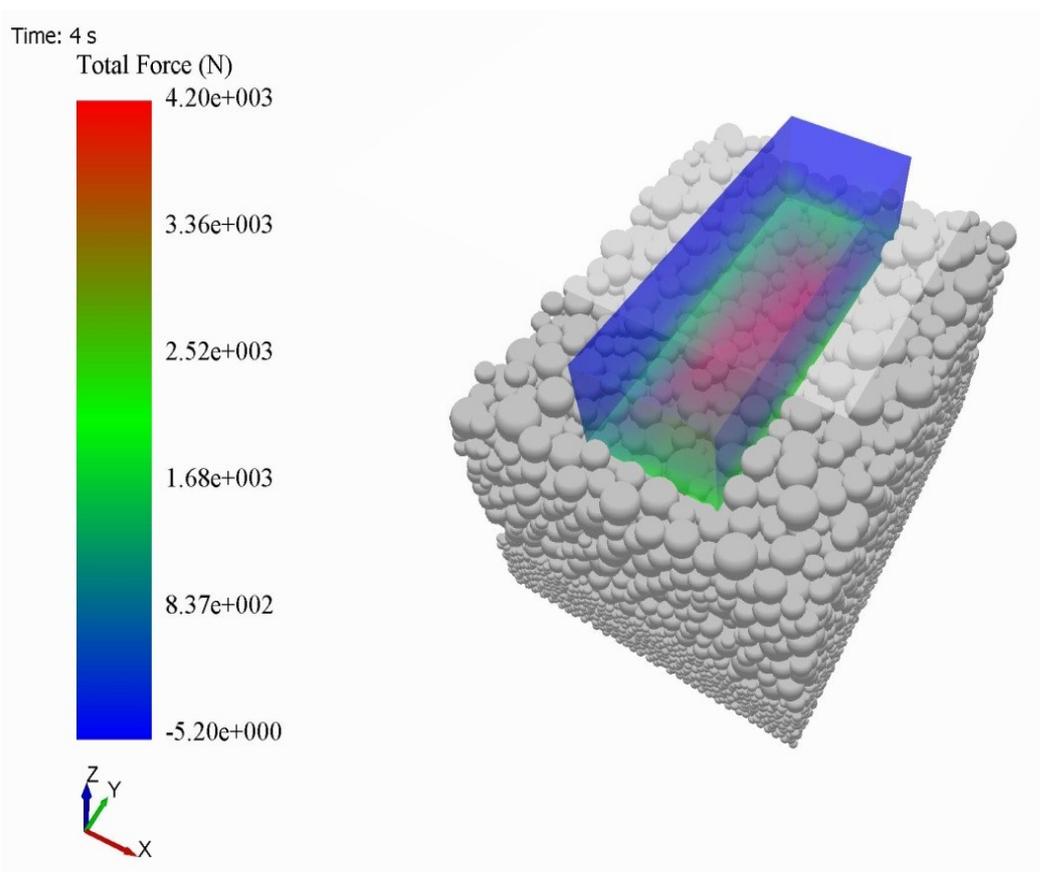


Figura 4.7. Força vertical no contato dormente - lastro para a granulometria B aos 4 segundos.

4.3 Resultados

4.3.1 Evolução da deformação

O estágio de carregamento começa e as partículas foram rearranjadas como resultado da carga aplicada. A Figura 4.8 mostra as curvas de deslocamento aplicado vs. forças de reação para a face inferior do dormente, na qual se observa a maior força desenvolvida pela amostra de granulometria B. Na Figura 4.9, se observa uma comparação entre as granulometrias C, D e E, onde a granulometria E gera uma força de contato maior que as outras, devido ao maior tamanho de partícula. Na Figura 4.10, se faz uma comparação entre o carregamento estático e os carregamentos dinâmicos de diferentes frequências, não tendo grandes diferenças até os 4 segundos do ensaio, no entanto poderiam ter comportamentos diferentes se os ensaios tivessem mais ciclos de carregamento, como foi observado nos ensaios reais considerados no capítulo 3.

As primeiras partículas sujeitas a grandes tensões foram localizadas na região média superior da amostra, e no geral, altas tensões ficaram concentradas na região superior durante o carregamento (Figura 4.11). A Figura 4.12 mostra a relação da força de compressão média com o diâmetro de partícula de cada partícula, onde é mostrado que partículas de maiores tamanhos suportam maiores forças de compressão. Na Figura 4.13 é mostrada a evolução do número de contatos durante o carregamento para cada granulometria.

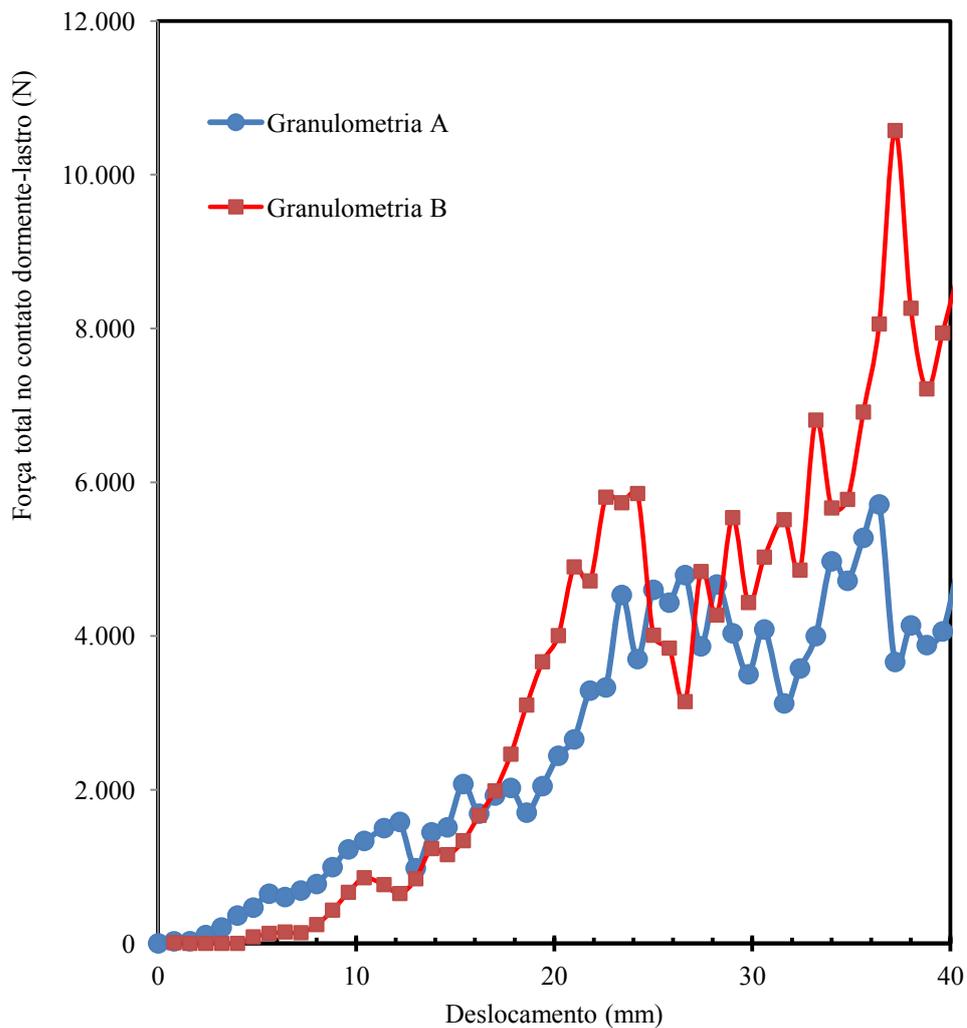


Figura 4.8. Força vertical total no contato dormente/lastro, comparação entre granulometrias A e B, na modelagem numérica desta pesquisa.

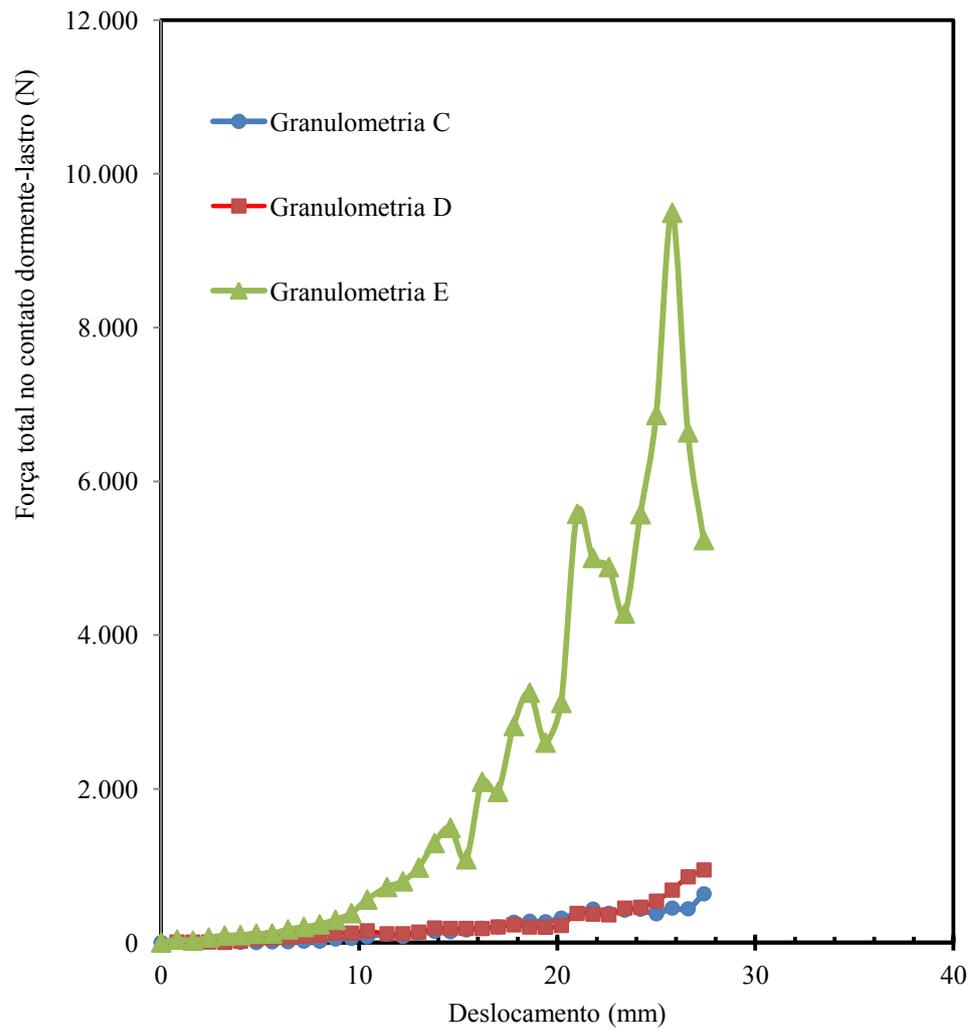


Figura 4.9. Força vertical total no contato dormente/lastrô, comparação entre granulometrias C, D e E, na modelagem numérica desta pesquisa

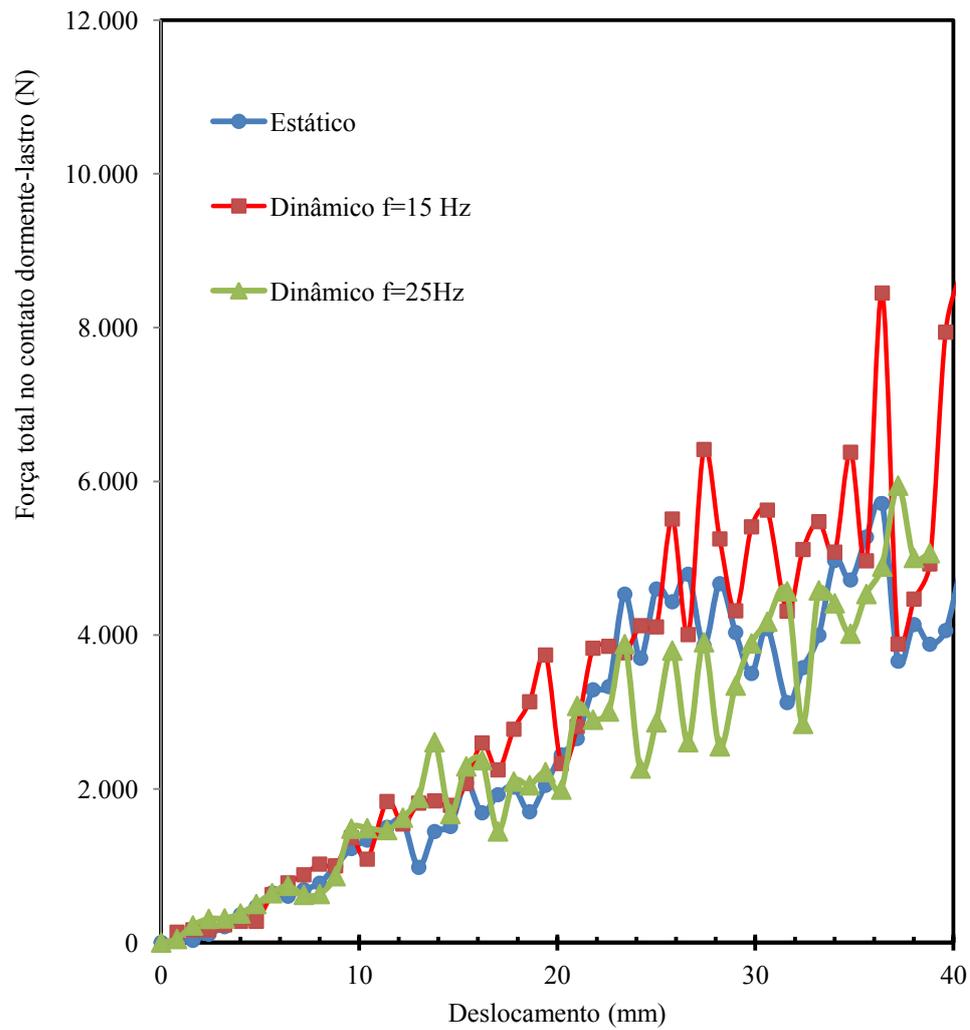


Figura 4.10. Força vertical total no contato dormente/lastro, comparação entre diferentes frequências de carregamento para a granulometria A, na modelagem numérica desta pesquisa.

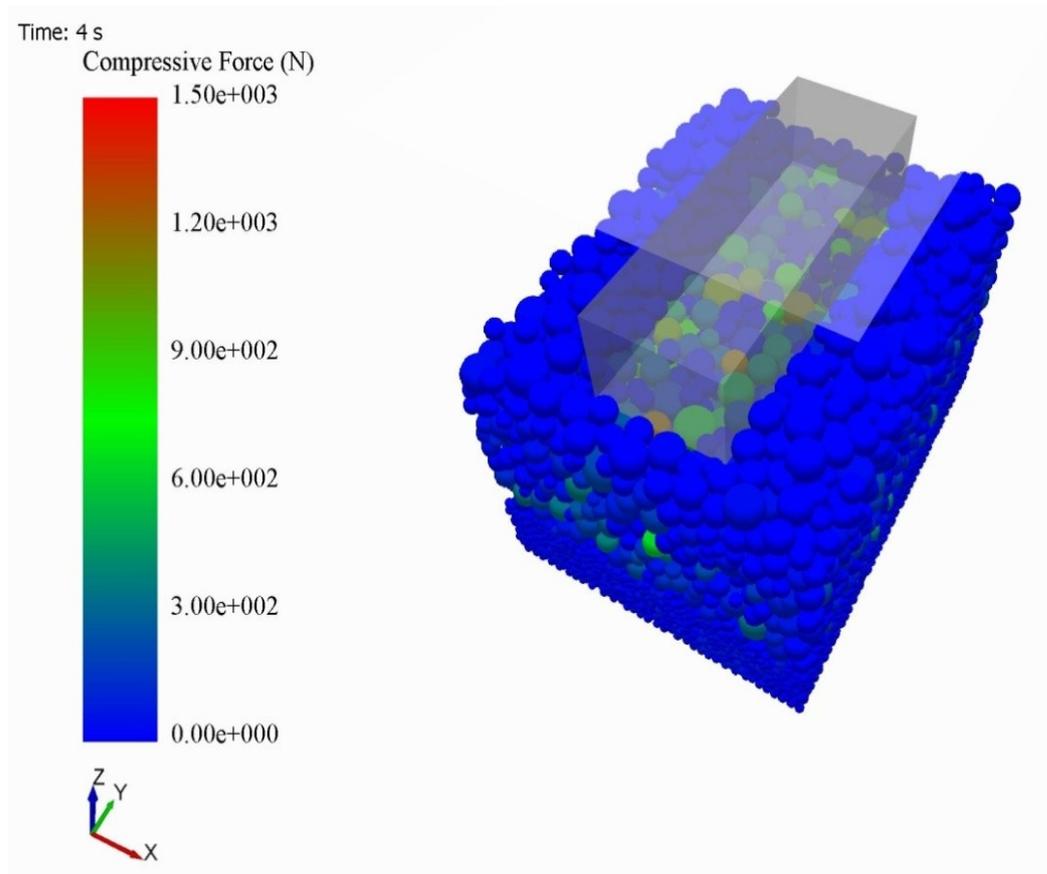


Figura 4.11. Força de compressão nas partículas aos 4 segundos, para a granulometria B, na modelagem numérica desta pesquisa.

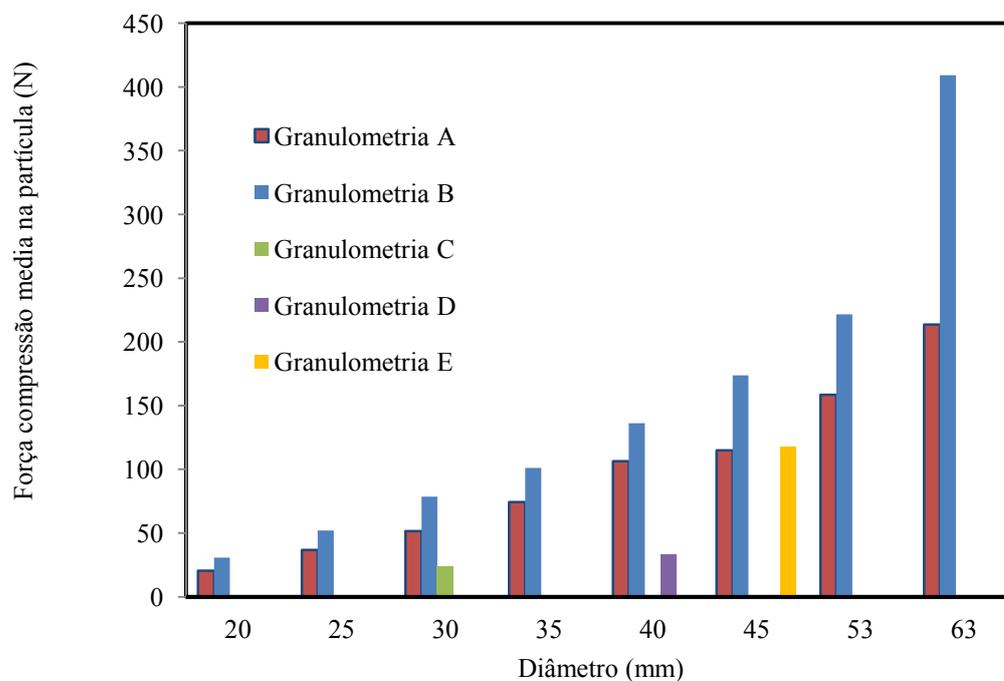


Figura 4.12. Força de compressão média nas partículas vs. Diâmetro das partículas (comparação entre granulometrias), na modelagem numérica desta pesquisa.

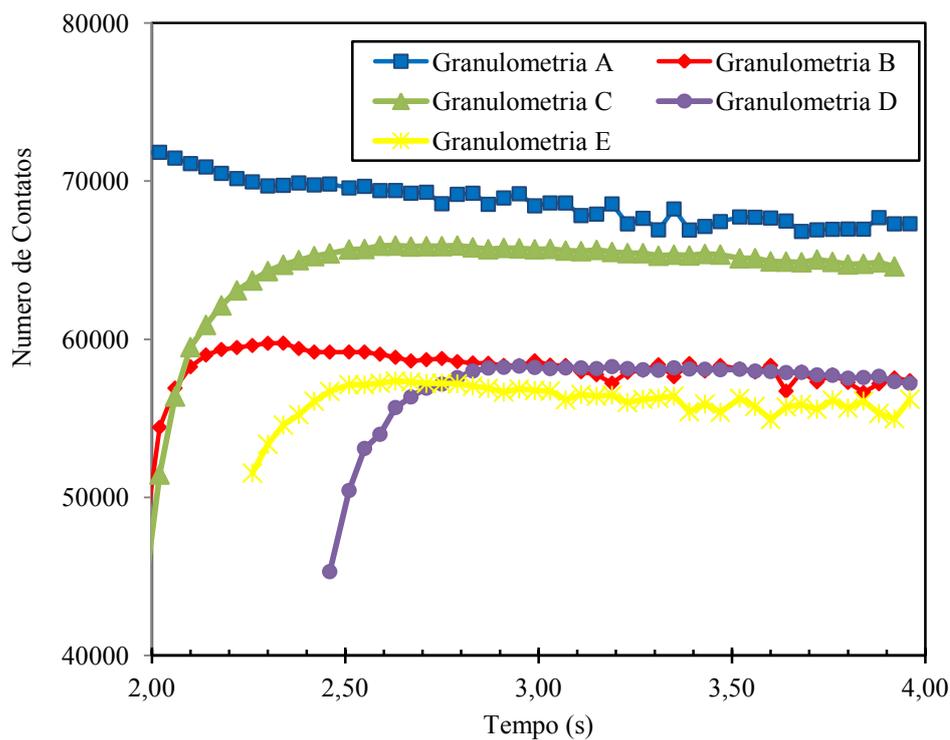


Figura 4.13. Número de contatos (comparação entre granulometrias), na modelagem numérica desta pesquisa.

4.3.2 Tendência de movimento do lastro

No processo de carregamento, a ação das forças verticais produz movimentação das partículas do lastro. A fim de estudar qualitativamente o comportamento do lastro ferroviário durante o carregamento, no processo de simulação, foi extraída a tendência de movimento do lastro como mostrado na Figura 4.14. As setas claramente mostram as tendências de movimento das partículas de lastro durante o carregamento.

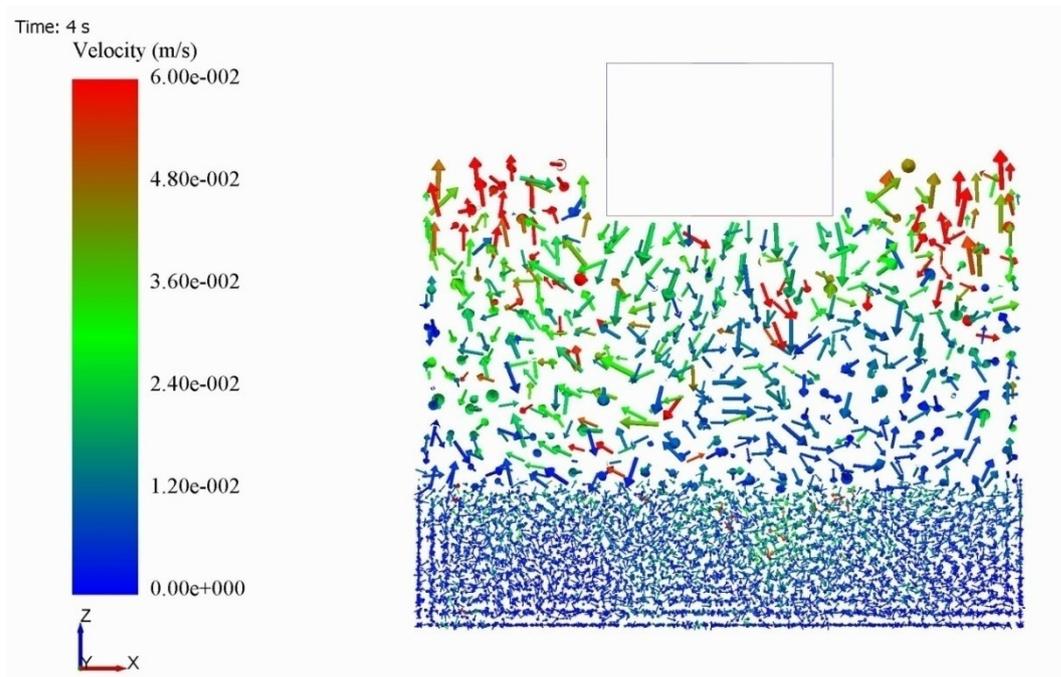


Figura 4.14. Vetores de velocidade do lastro na seção média da caixa durante o carregamento (Granulometria B), na modelagem numérica desta pesquisa.

4.3.3 Sobreposição de partículas

Um dos mais importantes parâmetros nas simulações MED é a sobreposição normal das partículas. É sugerido que sobreposições médias de 0,1 – 1,5 % sejam requeridas para garantir resultados mais realistas (Lommen, 2014). Nestes ensaios, a sobreposição máxima para partículas de diâmetro 63 mm é 0,114 mm (0,18 % do diâmetro) e de 0,06 mm (0,4%) para partículas de diâmetro 15 mm (Figuras 4.15 e 4.16).

4.4 Considerações finais

Como mostrado neste capítulo, o MED pode ser uma poderosa ferramenta para analisar o comportamento micromecânico das partículas constituintes do lastro ferroviário. Estes resultados devem ser verificados com ensaios de laboratório para sua validação. Posteriores pesquisas precisam ser realizadas com a finalidade de incorporar esta ferramenta na prática da engenharia ferroviária.

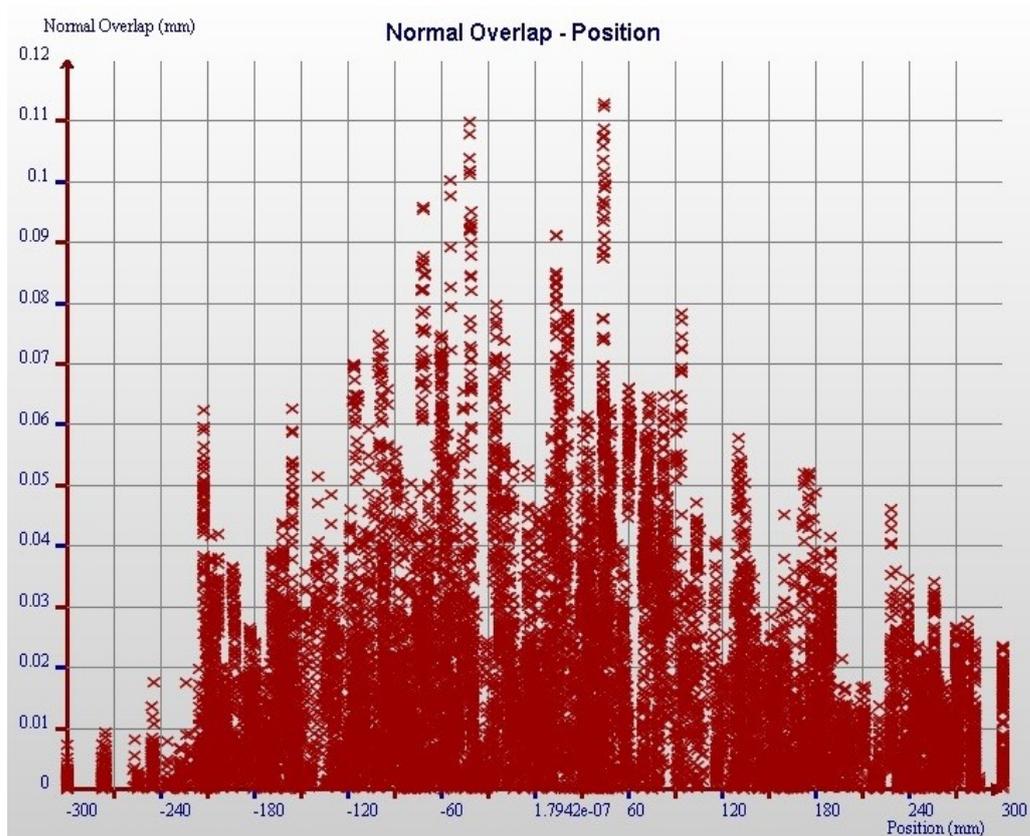


Figura 4.15. Posição no eixo X vs. Sobreposição normal das partículas de diâmetro 63 mm. (Granulometria B), na modelagem numérica desta pesquisa.

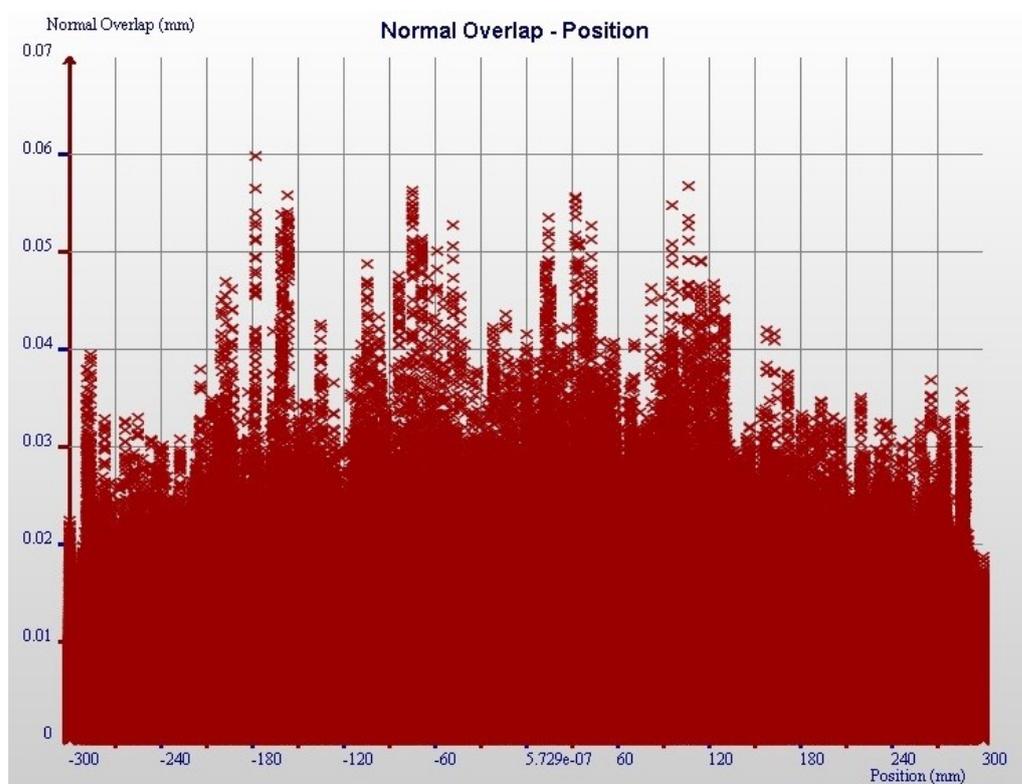


Figura 4.16. Posição no eixo X vs. Sobreposição normal das partículas de diâmetro 15 mm (Granulometria B), na modelagem numérica desta pesquisa.