



**Gino Omar Calderón Vizcarra**

**Efeito da Granulometria no Comportamento  
Mecânico de Lastro Ferroviário**

**Tese de Doutorado**

Tese apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Doutor pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Departamento de Engenharia Civil da PUC-Rio.

Orientadora: Profª. Michéle Dal Toé Casagrande  
Co-orientador: Prof. Buddhima Indraratna

Rio de Janeiro  
Maio de 2015



**Gino Omar Calderón Vizcarra**

**Efeito da Granulometria no Comportamento  
Mecânico de Lastro Ferroviário**

Tese apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Doutor pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Departamento de Engenharia Civil da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

**Prof<sup>a</sup>. Michéle Dal Toé Casagrande**  
Orientadora  
Departamento de Engenharia Civil - PUC-Rio

**Prof<sup>a</sup>. Laura Maria Goretti da Motta**  
Universidade Federal do Rio de Janeiro

**Prof. Antônio Carlos Rodrigues Guimarães**  
Instituto Militar de Engenharia, IME/RJ

**Dr. Luiz Francisco Muniz da Silva**  
Muniz & Spada Engenheiros Consultores S/C Ltda

**Prof. Eurípedes do Amaral Vargas Jr.**  
Departamento de Engenharia Civil - PUC-Rio

**Prof<sup>a</sup>. Raquel Quadros Velloso**  
Departamento de Engenharia Civil - PUC-Rio

**Prof. José Eugênio Leal**  
Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 29 de maio de 2015

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

### **Gino Omar Calderón Vizcarra**

Graduou-se em Engenharia Civil pela Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann (Tacna – Perú). Em 2010 obteve o título de Mestre em Engenharia Civil no programa oferecido pelo Departamento de Engenharia Civil da PUC-Rio. Durante o período de doutorado, desenvolveu pesquisa na área de geotecnologia ferroviária. Atualmente trabalha na firma Muniz & Spada engenheiros consultores no Rio de Janeiro.

### **Ficha Catalográfica**

Calderón Vizcarra, Gino Omar

Efeito da granulometria no comportamento mecânico de lastro ferroviário / Gino Omar Calderón Vizcarra ; orientadora: Michéle Dal Toé Casagrande ; co-orientador: Buddhima Indraratna. – 2015.

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

Tese (doutorado)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil, 2015.

Inclui bibliografia

1. Engenharia civil – Teses. 2. Lastro ferroviário. 3. Granulometria. 4. Ensaio triaxial. 5. Métodos dos elementos discretos. I. Casagrande, Michéle Dal Toé. II. Indraratna, Buddhima. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil. VI. Título.

CDD: 624

Ao meu pai,  
Rosendo Calderón Alanoca.

## Agradecimentos

Passou algum tempo desde que comecei este empreendimento, além de uma pesquisa acadêmica, é fruto de trabalho intenso, perseverança, emoções e sentimentos.

Ao longo desta caminhada, contei com o apoio de muitas pessoas, sirva estas poucas palavras para tentar agradecer a maioria delas, desculpem àquelas que não consigo lembrar neste momento.

Primeiramente agradeço à minha família, especialmente ao meu pai, Rosendo, quem me formou para poder afrontar todas as dificuldades que a vida coloca no caminho; à minha mãe Rosa, pelo amor e carinho; à minha avó Carmen, aos meus tios, irmãos e primos, por sempre estarem pendentes de mim e ser aquela força necessária para continuar neste caminho.

À minha orientadora Profª. Michéle Dal Toé Casagrande, quem sempre apostou por mim, me brindando total apoio para conseguir os meus objetivos.

Ao prof. Buddhima Indraratna, por ter me aceito como pesquisador visitante na Universidade de Wollongong, o qual tem sido uma experiência marcante na minha vida.

Ao Dr. Sanjay Nimbalkar, pelas valiosas contribuições na minha pesquisa na área ferroviária e apoio constante desde que cheguei a Wollongong até hoje.

Ao meu amigo Dr. Mehdi Biabani, por ter me ajudado na realização dos ensaios na Universidade de Wollongong, e por sua sincera amizade, obrigado por me mostrar que a generosidade independe da nacionalidade, crença ou língua.

À Profª. Ana Ribeiro Heitor, por sua gentil ajuda na minha chegada à Wollongong, também pelos cafés, companhia e conselhos.

Aos funcionários do Laboratório de Geotecnica da UOW: Ian Bridge, Rick McLean, Col Devenish, Cameron Neilson, Nando Eribano, Wayne Ireland e especialmente ao Alan Grant pelo apoio durante a realização dos ensaios.

Aos colegas da UOW: Qideng Sun, Dennis Alazhiga, Hooman Ghojavand, Firman Siahaan, Arash Moslemi, Soledad Mashiri.

Aos meus vizinhos de “Gundi” na Austrália em especial aos meus “housemates”: Nima Mirsepassi, Fred Raof, Nadeera Ranabahu, Miho Sugiura, Afsaneh Khansari, Vi Nguyen e Nelson, por ter me acolhido em “Unit 6”, também aos meus amigos: Alex Arce, Ernesto Lozano, Katerina, Fariba e Silvana.

À firma Muniz & Spada engenheiros consultores, especialmente aos meus mestres: Dr. Luis Francisco Muniz da Silva e Dr. Jorge Goudene Spada, por ter me incentivado a fazer pesquisa nesta área, e brindado valioso apoio. Muito obrigado pelos ensinamentos.

Também agradeço aos colegas com os quais compartilhei o trabalho diário: Candice, Mariângela, Marcelo, Janaina, Jefferson, Marcio, Welson, Rosemeri, Flavio, Claudio, Frederico, Silvana, Raissa, Mari, Matilde, Antonia, Carlos e Rulian.

Aos meus amigos no Rio de Janeiro, especialmente à Juliana Meza, Nilthson Noreña, Bruno Carvalho, Carlos Paredes e Antônio Nunes.

Aos integrantes do time olímpico: Luis Fernando, Elvis, Eliot e Julio pelas inúmeras histórias vivenciadas.

À firma Intertechne, por ter me acolhido durante o último período da tese, especialmente ao José Henrique Pereira, Marcelo Miqueletto, Pedro Thá.

Ao meu amigo João Guedes Pinto, também ao Otto, Marcel, Cesar e Joaquin pelas boas risadas no espanhol, obrigado por fazerem sentir em casa, o período que estive em Curitiba.

Ao Laboratório de Engenharia de Transportes da USP, à Prof<sup>a</sup>. Liedi Bernucci, Robson Costa e Antonio Merheb por ter compartilhado gentilmente as suas experiências no ensaio triaxial cílico.

Aos meus amigos da Universidad Nacional de Tacna, no Perú (Código 96): por sempre torcerem por mim.

Aos integrantes da banca examinadora que contribuíram para a revisão com sugestões para a melhoria do trabalho.

A todos os amigos e amigas de mestrado e doutorado que compartilharam das várias etapas transcorridas durante o doutoramento.

Ao CNPq, a CAPES e à PUC-Rio, pelos auxílios concedidos, sem os quais este trabalho não poderia ter sido realizado.

A todos os funcionários da PUC que sempre deram o apoio necessário para o bom andamento das atividades, em especial a Rita de Cássia.

E por último e não menos importante, à Jucicleia Florencio, pelo amor, paciência, felicidade e paz destes últimos tempos.

## Resumo

Vizcarra, Gino Omar Calderón; Casagrande, Michéle Dal Toé; Indraratna, Buddhima. **Efeito da Granulometria no Comportamento Mecânico do Lastro Ferroviário**. Rio de Janeiro, 2015. 130 p. Tese de Doutorado. Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

O efeito da granulometria no comportamento mecânico do lastro tem sido estudado por vários pesquisadores. A revisão destes estudos indicou que uma granulometria mais uniforme que as atualmente usadas pela indústria ferroviária diminuiria a deformação permanente e a degradação do lastro ferroviário. Neste estudo, foi utilizado o equipamento prismoidal triaxial cíclico, projetado e construído na Universidade de Wollongong - Austrália. O deslocamento lateral do lastro ferroviário no campo não está restrito, devido a insuficiente tensão lateral (tensão confinante); por isso a câmera prismoidal triaxial com lados não restritos é uma instalação ideal para a modelagem física das deformações do lastro. Duas granulometrias de lastro foram testadas, sob tensão vertical cíclica máxima de 450 kPa. Uma delas estava de acordo com a granulometria recomendada por Indraratna et al. (2004), para revisão da Norma Australiana AS 2758.7 (1996) e a outra foi preparada em concordância com a norma Brasileira, NBR 5564. Os resultados mostram que a granulometria tem grande influência na deformação permanente e na quebra de lastro ferroviário. Também se apresenta a modelagem de um ensaio de compressão sobre lastro ferroviário utilizando o método dos elementos discretos. 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.

## Palavras-chave

Lastro ferroviário; granulometria; ensaio triaxial; método dos elementos discretos.

## Abstract

Vizcarra, Gino Omar Calderón; Casagrande, Michéle Dal Toé (Advisor); Indraratna, Buddhima (Co-advisor). **Effect of Particle-size-distribution on Mechanical Behavior of Railway Ballast.** Rio de Janeiro, 2015. 130 p. DSc. Thesis – Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The effect of the particle-size-distribution on mechanical behaviour of ballast has been studied by several researchers in the past. The review of these past studies indicated that more uniform gradation than actually used by the railway industry would decrease permanent deformation and degradation of railroad ballast. In this study, the prismoidal cyclic triaxial apparatus designed and built at the University of Wollongong was used. The lateral displacement of railroad ballast in the field is not restricted in the absence of sufficient lateral stress (confining pressure); hence the prismoidal triaxial chamber with unrestrained sides provides an ideal facility for physical modeling of the deformations of ballast. Two different particle size distributions of ballast were tested under cyclic vertical maximum stress of about 450 kPa. One of them was according to PSD recommended by Indraratna et al. (2004) as an improvement to Australian Standard AS 2758.7 (1996) and the other one was prepared in accordance with Brazilian standard NBR 5564. The results showed that gradation had major influence on the permanent deformation and breakage of railroad ballast. Also, it is presented a compression test modelling on railway ballast using the discrete element method. Typical railways ballast properties, such as specific weight, particle-size-distribution, void ratio, layers thickness were used. The virtual test comprises monotonic vertical loading through a piece with similar dimensions to sleeper on particles that simulates ballast inside a 600 x 800 x 800 mm box. Stresses and velocities developed in particles are observed, which are difficult sighting characteristics in real conventional tests.

## Keywords

Railway ballast; particle-size-distribution; triaxial test; discrete element method.

## Sumário

1 Introdução	22
1.1 Relevância e justificativa da pesquisa	22
1.2 Objetivos	24
1.3 Organização da Tese	24
2 Revisão Bibliográfica	25
2.1 Características da partícula	25
2.1.1 Tamanho da partícula	25
2.1.2 Angularidade da Partícula	28
2.1.3 Forma da partícula	29
2.1.4 Textura da superfície	30
2.1.5 Resistência da rocha mãe	31
2.1.4.1 Identificação petrográfica de tipos de rocha	31
2.1.4.2 Análise petrográfica de lâmina delgada	32
2.1.4.3 Difração de raios-X	33
2.1.5 Resistência ao esmagamento da partícula	33
2.2 Características dos agregados	34
2.2.1 Granulometria	34
2.2.1.1 Especificação Brasileira	38
2.2.1.2 Especificação Australiana	40
2.2.1.3 Especificação dos Estados Unidos	43
2.2.1.4 Especificação Européia	46
2.2.1.5 Especificação Russa	47
2.2.2 Índice de vazios	48
2.3 Características do carregamento.	49
2.3.1 Tensão confinante	49
2.3.2 História de tensões	51
2.3.3 Estado de tensões atual	54
2.3.4 Número de ciclos de carga	55
2.4 Degradação da partícula	59

3 Ensaio Triaxial Cíclico	63
3.1 Introdução	63
3.2 Equipamento prismoidal triaxial cíclico	64
3.2.1 Célula triaxial prismoidal	66
3.2.2 Unidade de carregamento axial	67
3.2.3 Sistema de controle de pressão confinante	67
3.2.4 Dispositivos de monitoramento de deslocamento horizontais e verticais	70
3.3 Materiais	71
3.3.1 Sublastro	71
3.3.2 Lastro	74
3.4 Procedimentos do Ensaio	80
3.4.1 Preparação de amostras	80
3.4.2 Carregamento	90
3.5 Programa experimental	91
3.6 Resultados experimentais	94
3.6.1 Características de recalque	94
3.6.2 Características da deformabilidade	96
3.6.3 Módulo resiliente	97
3.6.4 Quebra de partículas	98
4 Simulação Numérica	102
4.1 O Método dos Elementos Discretos	102
4.2 Modelagens do Ensaio	105
4.2.1 Modelo	105
4.2.2 Descrição de Partículas	106
4.2.3 Passo de tempo	109
4.2.4 Geração de partículas	111
4.2.5 Carregamento	112
4.3 Resultados	113
4.3.1 Evolução da deformação	113
4.3.2 Tendência de movimento do lastro	118
4.3.3 Sobreposição de partículas	119

4.4 Considerações finais	119
5 Considerações finais	121
5.1 Conclusões	121
5.1.1 Ensaio triaxial cíclico	121
5.1.2 Simulação numérica	122
5.2 Sugestões para pesquisas futuras	123
6 Referências Bibliográficas	124

## **Lista de Figuras**

Figura 1.1. Expansão da malha ferroviária brasileira (PAC 2).	23
Figura 2.1. Efeito do tamanho de grão no ângulo de atrito (Marachi et al., 1972).	23
Figura 2.2. Efeito do tamanho de grão no Modulo Resiliente do Lastro (Janardhanam e Desai, 1983).	28
Figura 2.3. Influencia da forma da partícula na resistência (Holz e Gibbs, 1956).	29
Figura 2.4. Efeito da forma da partícula no ângulo de atrito (Vallerga et al.).	29
Figura 2.5. Diagrama de um microscópio petrográfico padrão e visualização ampliada da amostra de rocha (Idaho State University, 2015).	32
Figura 2.6. Diagrama simplificado do difratômetro de raios-x.	33
Figura 2.7.(a) Graduação de partículas, e seus efeitos em (b) ângulo de atrito, (c) densidade, (modulo de cisalhamento) e (e) permeabilidade. Thom e Brown (1988)	35
Figura 2.8. Efeitos da graduação nas deformações verticais do lastro sob carregamento cíclico (Raymond e Diyaljee, 1979).	36
Figura 2.9. Distribuições granulométricas – ABNT NBR 5564:2012	40
Figura 2.10. Distribuições granulométricas – AS 2758.7.	41
Figura 2.11. Distribuições granulométricas – RIC e Queensland Rail (Indraratna et al, 2011).	42
Figura 2.12 – Distribuições granulométricas- AREMA (2009)	45
Figura 2.13 – Distribuições granulométricas - EN 13450 (2003)	47
Figura 2.14 – Distribuição granulométrica para ferrovias russas.	48
Figura 2.15. Envoltória de resistência não linear a baixas pressões confinantes (Charles e Watts, 1980).	50
Figura 2.16. Influencia da pressão confinante no ângulo de atrito (Indraratna et al, 1998).	51

Figura 2.17. Efeitos da história de tensões na deformação do lastro sob carregamento cíclico. (a) Tensão desviadora até 210 kPa, (b) Tensão cíclica acima de 210 kPa (Diyaljee, 1987)	53
Figura 2.18. Efeitos do estado de tensões nas deformações plásticas (Poorooshasb et al, 1966)	55
Figura 2.19. Recalque de via após socaria, (a) em escala plana, (b) em escala semi-log (Shenton, 1975)	56
Figura 2.20. Efeitos de ciclos de carga nas deformações axial e volumétrica (Raymond et al, 1975)	56
Figura 2.21. Recalque de via em diferentes partes do mundo (Shenton, 1975).	57
Figura 2.22. Recalque de lastro sob carregamento cíclico (Jeffs e Marich, 1987).	58
Figura 2.23. Recalque de lastro sob carregamento cíclico (Ionescu et al, 1998).	58
Figura 2.24. Determinação do Índice de quebra de lastro (BBI).	60
Figura 2.25. Efeito da quebra de partículas na razão de tensões principais na ruptura (Marsal, 1967).	61
Figura 2.26. Efeito da taxa de quebra de partículas na razão de tensões principais na ruptura (Miura e O-hara, 1979)	62
Figura 2.31. Influência da quebra de partículas na razão de tensões principais e o ângulo de atrito (Indraratna et al., 1998)	62
Figura 3.1. Equipamento triaxial prismoidal cíclico da Universidade de Wollongong na Austrália.	64
Figura 3.2. Ilustração esquemática em planta da câmera triaxial cíclica (dimensões em mm)	65
Figura 3.3. Ilustração esquemática na seção Y-Y da câmera triaxial cíclica (dimensões em mm)	65
Figura 3.4. Ilustração esquemática na seção X-X da câmera triaxial cíclica (dimensões em mm)	66
Figura 3.5. Unidade de carregamento axial do equipamento triaxial	67
Figura 3.6. Vista lateral do equipamento	68
Figura 3.7. Detalhe da unidade de carregamento lateral	68

Figura 3.8. Detalhe da unidade de carregamento lateral	69
Figura 3.9. Detalhe da unidade de carregamento lateral	69
Figura 3.10. Detalhe do computador de aquisição de dados da instrumentação	70
Figura 3.11. Tela de controle do atuador de carga	71
Figura 3.12. Granulometria do sublastro	72
Figura 3.13. Sublastro	73
Figura 3.14. Analise mineralógica qualitativa por difratometria de raios x	75
Figura 3.15. Diagrama QAPF de um latito típico	76
Figura 3.16. Gradação A	77
Figura 3.17. Gradação B	78
Figura 3.18. Granulometria e coeficiente de uniformidade dos dois lastros utilizados nesta pesquisa.	79
Figura 3.19. Peneiramento do lastro nesta pesquisa	81
Figura 3.20. Diferentes tamanhos de partícula para obter uma granulometria.	82
Figura 3.21. Câmera triaxial vazia.	82
Figura 3.22. Compactação de camada de sublastro.	83
Figura 3.23. Arranjo da instrumentação na interface sublastro-lastro.	83
Figura 3.24. Vista superior do topo do lastro de suporte antes de colocar o dormente.	84
Figura 3.25. Colocação do dormente	84
Figura 3.26. Enchimento do lastro do ombro	85
Figura 3.27. Vista lateral	85
Figura 3.28. Topo da câmera triaxial mostrando dormente e trilho	86
Figura 3.29. Colocação de LVDTs no dormente	86
Figura 3.30. Medição dos deslocamentos verticais.	87
Figura 3.31. Fim do ensaio	87
Figura 3.32. Quebra de partículas	88
Figura 3.33. Retiro do material ensaiado	88
Figura 3.34. Material fino que provem do lastro ao final do ensaio.	89
Figura 3.35. Detalhe do material fino	89

Figura 3.36. Quantidade do material fino	90
Figura 3.37. Detalhe do carregamento cíclico, $f=15$ Hz (carga do atuador)	92
Figura 3.38. Detalhe do carregamento cíclico, $f=15$ Hz (tensão no contato dormente-lastro)	92
Figura 3.39. Detalhe do carregamento cíclico, $f=25$ Hz (carga do atuador)	93
Figura 3.40. Detalhe do carregamento cíclico, $f=25$ Hz (tensão no contato dormente-lastro)	93
Figura 3.41. Comparação do deslocamento vertical no contato lastro-face inferior do dormente para ambas as granulometrias na frequência 15 Hz.	94
Figura 3.42. Comparação do deslocamento vertical no contato lastro-face inferior do dormente para ambas as granulometrias na frequência 25 Hz.	95
Figura 3.43. Comparação do deslocamento vertical contato lastro-face inferior do dormente para a granulometria A e diferentes frequências de carregamento cíclico.	95
Figura 3.44. Comparação do deslocamento vertical contato lastro-face inferior do dormente para a granulometria B e diferentes frequências de carregamento cíclico.	95
Figura 3.45. Comparação da deformação vertical da camada do lastro para ambas as granulometrias e diferentes frequências de carregamento cíclico.	96
Figura 3.46. Comparação da deformação volumétrica da camada do lastro para ambas as granulometrias e diferentes frequências de carregamento cíclico.	97
Figura 3.47. Comparação da deformação cisalhante da camada do lastro para ambas as granulometrias e diferentes frequências de carregamento cíclico.	97
Figura 3.48. Variação do Modulo Resiliente com o numero de ciclos.	98

Figura 3.49. Comparação da mudança no tamanho de partícula do lastro para ambas as granulometrias sob carregamento cíclico.	99
Figura 3.50. Comparação da mudança no tamanho de partícula do lastro para a granulometria A e diferentes frequências de carregamento cíclico.	99
Figura 3.51. Avaliação do índice de quebra de lastro para a graduação A	100
Figura 3.52. Avaliação do índice de quebra de lastro para a graduação B	101
Figura 4.1. Diagrama do modelo de contato Hertz-Mindlin (adaptado de Roufail, 2011).	103
Figura 4.2. Ilustração da câmera triaxial.	106
Figura 4.3. Granulometria e coeficiente de uniformidade dos lastros modelados numericamente.	108
Figura 4.4. Numero de partículas vs. Diâmetro para cada granulometria dos lastros modelados numericamente.	109
Figura 4.5. Linha do tempo do ensaio.	110
Figura 4.6. Criação de partículas. (a) sub-lastro, (b) lastro.	112
Figura 4.7. Força vertical no contato dormente - lastro para a granulometria B aos 4 segundos.	113
Figura 4.8. Força vertical total no contato dormente/lastro comparação entre granulometrias A e B na modelagem numérica desta pesquisa..	114
Figura 4.9. Força vertical total no contato dormente/lastro comparação entre granulometrias C, D e E na modelagem numérica desta pesquisa.	115
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.	116
Figura 4.11. Força de compressão em partículas aos 4 segundos, para a granulometria B, na modelagem numérica desta pesquisa.	117
Figura 4.12. Força de compressão media na partícula vs. Diâmetro das partículas (comparação entre granulometrias), na modelagem	117

numérica desta pesquisa.

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

118

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

119

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

120

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

120

## **Lista de Tabelas**

Tabela 2.1. Classificação do lastro quanto à contaminação (Selig e Waters, 1994)	37
Tabela 2.2. Características do lastro ferroviário segundo a norma brasileira NBR 5564:2012.	39
Tabela 2.3. Distribuição granulométrica do lastro-padrão segundo a norma brasileira NBR 5564:2012.	39
Tabela 2.4. Requerimentos de granulometria pela norma Australiana AS2758.7 (Standards Australia, 1996)	41
Tabela 2.5. Requerimentos de granulometria pela Queensland Rail e RIC (Apud Indraratna et al. 2011)	42
Tabela 2.6. Requerimentos de granulometria da AREMA (Graduações 24, 25 e 3)	43
Tabela 2.7. Requerimentos de granulometria da AREMA (Graduações 4A, 4, 5 e 57)	44
Tabela 2.8. Requerimentos de granulometria pela norma EM 13450 (2003)	46
Tabela 2.9. Requerimentos de granulometria pela norma russa.	47
Tabela 3.1. Locais onde foram realizados ensaios triaxiais de grande escala em estudos de lastro (Apud Merheb et al., 2014).	63
Tabela 3.2. Faixa granulométrica do sublastro recomendado pelo Public Transport Victoria (1997) e a granulometria do sublastro utilizado.	72
Tabela 3.3. Análise química quantitativa total por espectrometria de fluorescência de raios-X.	74
Tabela 3.4. Composição mineralógica, identificados por comparação com os padrões do ICDD (International Centre for Diffraction Data).	75
Tabela 3.5. Granulometria de lastro recomendada por Indraratna et al (2004)	77
Tabela 3.6. Granulometria de lastro segundo a norma brasileira (NBR 5564:2012)	78

Tabela 3.7. Comparação das granulometrias dos materiais utilizados nesta pesquisa.	79
Tabela 3.8. Resumo dos ensaios realizados.	91
Tabela 4.1. Parâmetros da simulação numérica adotados para esta pesquisa	106
Tabela 4.2. Granulometria A	107
Tabela 4.3. Granulometria B	107
Tabela 4.4. Granulometria C	108
Tabela 4.5. Granulometria D	108
Tabela 4.6. Granulometria E	108

## **Lista de Abreviaturas**

ABNT	= Associação Brasileira de Normas Técnicas
NBR	= Norma Brasileira
CBR	= <i>Califórnia Bearing Ratio</i>
CH	= Argila Inorgânica de Alta Plasticidade

## **Lista de Símbolos**

$w_{\text{ótm}}$	= umidade ótima de compactação
$\gamma_{\text{dmáx}}$	= peso específico seco aparente máximo
$\gamma_{\text{d}}$	= massa específica seca
$w$	= umidade
$\text{MR}$	= módulo resiliente
$\sigma_{\text{d}}$	= tensão desviadora
$\sigma_3$	= tensão confinante
$E$	= expansão
$h$	= altura final do corpo de prova.
$h_{\text{i}}$	= altura inicial do corpo de prova.
$N_{\text{f}}$	= vida de fadiga
$\varepsilon_{\text{t}}$	= deformação específica de tração
$G_{\text{s}}$	= massa específica real dos grãos
$e$	= espessura
$\nu$	= coeficiente de Poisson
$\text{SiO}_2$	= Sílica
$\text{Al}_2\text{O}_3$	= Alumina
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	= Hematita
$\text{SO}_3$	= anidrido sulfúrico
$\text{CaO}$	= óxido de cálcio
$\text{Cl}$	= cloro
$\text{TiO}_2$	= Dióxido de titânio
$\text{K}_2\text{O}$	= Óxido de potássio
$\text{P}_2\text{O}_5$	= Pentóxido de fósforo
$\text{ZnO}$	= Óxido de zinco
$\text{Cr}_2\text{O}_3$	= Óxido de crômio (III)
$\text{MnO}$	= Óxido de manganês (II)
$\text{SrO}$	= Óxido de estrôncio
$\text{ZrO}_2$	= Óxido de zircônio
$\text{CuO}$	= Óxido de cobre (II)
$\text{PbO}$	= Óxido de chumbo (II)