

SIMULAÇÃO PELO MÉTODO DOS ELEMENTOS DISCRETOS DA CAMADA DO LASTRO BASEADO EM DADOS DO ENSAIO DE DROP WEIGHT TEST

Fernando Henrique Paim da Silva

Laura Maria Goretti da Motta

Universidade Federal do Rio de Janeiro

Programa de Engenharia Civil, COPPE

RESUMO

O lastro é a camada de suporte dos dormentes da infraestrutura ferroviária, usado para distribuir as tensões oriundas da superestrutura a níveis aceitáveis do subleito. É sabido que a manutenção e a reabilitação das vias férreas devido a degradação do lastro provocam um ônus considerável. A aceleração deste problema de degradação provoca aumento da frequência de manutenção e provém do aumento da quantidade de material transportado nas vias férreas. O entendimento da capacidade de carga de lastros e das mudanças que ocorrem com a passagem das composições vem induzindo os pesquisadores a utilizarem cada vez mais modelos computacionais, em razão da grande escala dos ensaios, que exigem ampla quantidade de material. A presente pesquisa apresenta a construção de um ambiente computacional, baseado em dados coletados em um modelo experimental, no qual, realizou-se a simulação da solicitação do lastro mediante aplicação de carga sobre um dormente. Foram feitos ensaios de caracterização do material do lastro, por técnica de imagem digital e ensaios de quebra individual de partículas. O objetivo foi observar o desempenho do lastro construído e os efeitos iniciais das solicitações impostas pelo dormente. A simulação apresentou um resultado condizente com o modelo experimental com tensões no topo e na base do lastro aproximadas, porém a diferença de energia de compactação utilizada modificou o comportamento da deformação da camada.

ABSTRACT

Ballast is the supporting layer of railroad sleepers, used to distribute stresses from the superstructure to acceptable levels of the subgrade. It is well known that the maintenance and rehabilitation of the railways due to the degradation of the ballast causes a considerable burden. The acceleration of this degradation problem causes an increase in the maintenance frequency and comes from the increase for material transported in the railways. The understanding of the ball bearing capacity and the changes that occur with the passage of compositions has led researchers to use more and more computational models due to the large scale of the tests, which require a large amount of material. The present research presents the construction of a computational environment, based on data collected in an experimental model, in which, the simulation of the ballast request was performed by applying load on a dormant. Characterization tests of the ballast material were done by digital imaging technique and individual particle breaking tests. The objective was to observe the performance of the built-in ballast and the initial effects of the demands imposed by the sleeper. The simulation presented a result consistent with the experimental model with tensions at the top and base of the approximate ballast, however, the compaction energy difference used modified the deformation behavior of the layer.

1. INTRODUÇÃO

As pesquisas realizadas no sentido de melhor conhecer o comportamento da camada de lastro têm sido difíceis, visto o comportamento não linear do material que a constitui e o comportamento plástico associado ao rearranjo do meio (por quebra e movimento das partículas). Assim, há uma dificuldade em estabelecer ensaios que permitam avaliar adequadamente o desempenho dos materiais quando colocados em campo, McDowell *et al.* (2003). Essa dificuldade leva a que os ensaios de caracterização mecânica definidos em normas internacionais para aceitação do material, normalmente os ensaios micro-Deval e Los Angeles, se mantenham há muitas dezenas de anos. Contudo, vários autores reconhecem a pouca relação dos resultados obtidos nestes ensaios com os requisitos de desempenho exigidos do material quando colocado na via, Hudec (1982).

Várias pesquisas, nos últimos anos, foram realizadas com objetivo de caracterizar as propriedades que influenciam no comportamento mecânico do lastro. As influências vão desde

a origem geológica da rocha mãe, que rege as propriedades fundamentais das partículas do agregado, até o tamanho e forma da partícula do agregado, que atua no comportamento global do lastro. Para isto um controle das propriedades do material utilizado é de extrema importância. Contudo, é difícil estudar em laboratório os mecanismos que governam o comportamento da camada, particularmente devido à grande dimensão das partículas que a constituem. Para compreender melhor o comportamento do material, simulações computacionais são usadas para auxiliar na compreensão, de forma mecanicista, dos fenômenos que ocorrem na camada.

Destas influências a quebra das partículas do lastro atualmente tem sido o foco de grandes pesquisas para melhorar a previsão de desempenho do pavimento ferroviário. Pesquisas com o material do lastro sempre foram mais complexas para realização em laboratório, por ser um sistema de partículas de tamanho superior a 35 mm e apresentar faixa granulométrica muito uniforme (normalmente entre 19 e 63 mm). Assim, por muito tempo, os esforços foram concentrados em poucos centros de pesquisa que dispunham de equipamentos de grande porte.

1.1. Granulometria

As normas referentes às faixas granulométricas do material de lastro não tiveram mudanças significativas nesta última década. Muito dessa falta de variação vem da definição simplista do lastro: “Agregado graúdo de drenagem livre usado como suporte para via férrea”. Indraratna *et al.* (2004) ao avaliar diversas curvas granulométricas, apresentou o efeito do coeficiente de uniformidade (C_{nu}), no efeito da quebra das partículas na camada de lastro. Os autores mostraram que a elevação do C_{nu} , ou seja, a redução da uniformidade, reduz a quebra das partículas, com exceção das curvas de granulometria descontínua (gap-graded) que exclui tamanhos de partículas vulneráveis a quebra gerando os “gaps”. A pesquisa recomenda as faixas granulométricas com C_{nu} em torno de 2,3 e 2,6, que resultam em curvas mais resistentes e resilientes, com baixo impacto na drenagem.

Para descrever esse fenômeno Boler *et al.* (2014), fizeram uma analogia com o método Bailey que é utilizado para verificar o empacotamento do esqueleto mineral de misturas asfálticas. Ao observar a granulometria do lastro nota-se que há somente a parcela graúda de uma composição de agregados, visto que a peneira de separação entre a fração graúda e a miúda, denominada de peneira de controle primária (PCP), para um agregado de tamanho máximo nominal (TMN) de 63,5 mm é 12,7 mm. Usaram o parâmetro razão de agregado graúdo (CA), descrita por Vavrik *et al.* (2002), Equação 1:

$$CA = \frac{\%Passante na peneira média - \%Passante na PCP}{100\% - \%Passante na peneira média} \quad (1)$$

Em que: PCP: a abertura da peneira mais próxima a 0,22 x TMN;
Peneira média: a abertura da peneira mais próxima a metade do TMN.

Observa-se que a razão aumenta exponencialmente com o aumento do material menor que a peneira média. Vavrik *et al.* (2002) no artigo sobre o método Bailey, descrevem estas partículas que ficam entre a peneira média e a peneira de controle primária, dando o nome de interceptores (*interceptors*). À medida que essa razão se aproxima de 1, o agregado graúdo começa a desequilibrar. Este desequilíbrio resulta numa ruptura no esqueleto de partículas graúdas, observado pela redução do número de coordenação, pelo efeito dos interceptores tentarem tomar o controle do esqueleto pétreo, até chegar em um nível tal que empurram as pedras maiores. Assim, há um empacotamento do agregado diferente do desejado. Para manter o

comportamento do lastro num nível adequado foi recomendado aumentar a porcentagem de partículas entre o tamanho máximo nominal e a peneira média, enquanto se limita as partículas entre a peneira média e a peneira de controle primária. Contudo, tanto o número de coordenação como o número de contatos aumentaram com a elevação da porcentagem de material passante na primeira peneira de controle segundo Boler *et al.* (2014).

1.2. Gênese da Rocha

Dos fatores que mais influenciam as características físicas do material, a gênese da rocha é a que tem maior atuação sobre a degradação do lastro. A composição e arranjo dos minerais contribuem na resistência física (compressão e tração) e química (sanidade) das partículas. Partículas de gêneses diferentes apresentam, no mesmo estado de carga e condições de fronteira, tenacidades bastante distintas, Indraratna *et al.* (2011). Esta variação tem que ser levada em consideração, visto que, num meio particulado, a tensão efetiva de contato é proporcional à dimensão da partícula. Em partículas maiores que 60 mm de diâmetro, as tensões chegam a ser 1.000 vezes superiores que as encontradas em partículas de 2 mm, Lambe e Whitman (1991).

Contudo, poucas normas apresentam critérios de avaliação direta da resistência da rocha. No geral a avaliação se faz por ensaios empíricos como Abrasão Los Angeles, Micro-Deval e Mill. Estes ensaios não reproduzem as condições de campo, como as solicitações do material rodante, mas admite-se que a ação de impacto entre partículas, bolas de metal e um tambor metálico, sem nenhuma representação das condições de contorno da via possam gerar um parâmetro correlacionável com o a degradação vista em campo. Os resultados dos ensaios estariam mais para hierarquizar diferentes materiais e não para representar o que de fato acontece em campo. Rangel *et al.* (2016) mostram que avaliar o material do lastro somente por estes ensaios não é prudente, o que pode resultar em uso do um material frágil às solicitações básicas de manutenção da via, como a socaria. Neste trabalho, a avaliação do basalto alterado com uma complementação por laminas petrográficas permitiria uma melhor compreensão do material utilizado no lastro.

Selig e Boucher (1990) mostram resultados de diferentes rochas nos ensaios Los Angeles (LAA) e Mill (MA) e um fator de abrasão proposto (AN), que é o valor do resultado do Los Angeles somado com cinco vezes o valor do Mill. Na Tabela 2 1, nota-se a diferença de posição relativa da mesma rocha perante os dois ensaios. Essa variação entre os ensaios mostra que uma rocha apresenta variação da sua resistência conforme a situação de solicitação, visto que, no ensaio Los Angeles as partículas sofrem maiores forças de impacto, enquanto no Mill a força de abrasão age mais intensamente

1.3. Método Dos Elementos Discretos Aplicado A Ferrovia

Vários pesquisadores buscaram compreender os parâmetros chave dos materiais que constituem a camada do lastro, com o auxílio de modelagem numérica, para propor novos ensaios. Destas ferramentas, nos últimos anos a comunidade científica tem mostrado grande interesse pelo Método dos Elementos Discretos (*Discrete Element Method - DEM*), Bobet *et al.* (2009).

Proposto por Cundall e Strack (1979), este método permite analisar o comportamento mecânico de meios particulados a partir da sua discretização através de elementos individuais, cujo comportamento durante a modelagem pode ser diverso, conforme as propriedades que são atribuídas às partículas. Na aplicação do método são avaliadas as interações intergranulares e é

analisado o movimento das partículas, calculando-se as posições, individualmente, para cada passo de tempo.

Com os processos de calibração apropriados, os modelos DEM fornecem informações realistas sobre o meio particulado à medida que são solicitados. Essas informações, sobre a transmissão de forças entre elementos e as consequentes deformações do meio particulado, são muito interessantes para a modelagem do funcionamento da via férrea, em especial da camada de lastro, Aikawa, (2013); Lobo-Guerrero e Vallejo (2006).

A camada de lastro pode ser considerada um leito de partículas definido por Schönert (1996) como um arranjo de partículas no qual os contatos partícula/partícula são direcionados perpendicularmente à superfície responsável pela aplicação dos esforços. Os leitos de partículas podem, ainda, ser descritos como monodispersos, formados por uma faixa granulométrica estreita, como o lastro, e polidispersos, formados por partícula sem restrição granulométrica. Alguns modelos de quebra foram gerados para previsão da quebra de leitos a partir de informações de partículas individuais.

Uma das estimativas mais comuns para a modelagem da distribuição de fragmentos da quebra foi a probabilidade de quebra proposta por Narayanan e Whiten (1983). Os autores propuseram a caracterização de tais curvas por meio dos parâmetros 't_n', os quais descrevem a fração passante de um tamanho n vezes menor que o tamanho inicial, sendo o parâmetro t₁₀ o mais comumente utilizado na área, e refere-se à porcentagem do produto que passa por uma peneira de abertura de 1/10 do tamanho de partícula inicial. O índice de quebra apresenta uma relação exponencial com a energia aplicada, tal como é descrito na Equação 2-7, com a Tabela 2 8 expressando os limites de classificação de quebra, Napier-Munn *et al.* (1996).

Diversas modificações do modelo original t₁₀ têm sido propostas para a sua customização. Considerando a hipótese do modelo de probabilidade de fratura para a descrição qualitativa da função de distribuição da quebra, Shi e Kojovic (2007) modificaram esta função visando a descrição quantitativa do t₁₀. A expressão resultante é apresentada na forma da Equação 2:

$$t_{10} = A \{ 1 - e^{-f_{mat} \cdot d_i \cdot k \cdot (E - E_{min})} \} \quad (2)$$

Em que:

A: o máximo valor do t₁₀;

f_{mat}: parâmetro do modelo específico do material (kg/J);

d_i: diâmetro médio da amostra normalizada;

k: número de impactos sucessivos para fragmentar o material;

E: energia aplicada sobre o material (J/kg);

E_{min}: energia de quebra do material (J/kg).

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Metodologia Experimental

Os dados de validação do modelo computacional foram utilizados do pavimento experimental empregado no modelo físico de verdadeira grandeza construído por Paim da Silva *et al.* (2017): o lastro, oriundo da pedreira J. Serrão, da cidade de Japeri-RJ, com classificação geológica da frente da pedreira que indica um maciço composto de gnaisse migmatítico, a curva granulométrica conforme a Figura 1. As estruturas inferiores utilizadas foram um subleito classificado NG' pela classificação MCT, com MR de 182 MPa; e o colchão de brita de seixo

rolado. A Figura 2 (a) apresenta o aspecto da pilha de estocagem do material no laboratório de geotecnia em que foi obtido o valor de 31° para o ângulo de repouso, Figura 2 (b).

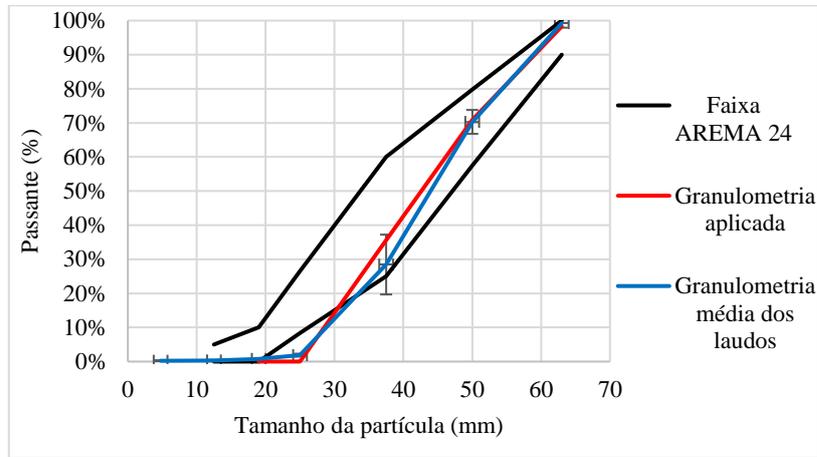


Figura 1: Granulometria do lastro estudado



Figura 2: Pilha do material (a) e a medição do ângulo de repouso em 31° (b)

Para investigar a resistência à fragmentação do material e sua posterior distribuição granulométrica foi desenvolvido pelo *Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre* (SMI-JKMRC) o ensaio de queda de peso ou *Drop Weight Test* (DWT) sobre partículas individuais. Neste ensaio de quebra os lotes de amostras são submetidos a diferentes alturas de queda, de modo a estabelecer a distribuição granulométrica do produto da fragmentação com a energia aplicada.

No procedimento de ensaio cada faixa granulométrica é dividida em três lotes com o mesmo número de partículas em cada lote. Contudo, Marotta *et al.* (2012) ao realizarem estudos com vários tipos de material concluíram que há necessidade de controlar a massa, a forma e a mineralogia de cada lote, tendo em vista a influência destes parâmetros nos resultados.

Para isto, na presente pesquisa, estabeleceram-se os seguintes cuidados no preparo de cada lote: a variação máxima da massa entre lotes foi de 0,5g; a proporção da razão de forma encontrada na análise do *Aggregate Image Measurement System* (AIMS 2) foi adotada para distribuir as razões de lamelaridade das partículas nos lotes. Figura 3; e na avaliação mineralógica dividiu-se o material em dois grupos (gnaisse e outros e melanossoma) distribuídos em fração igual nos lotes.

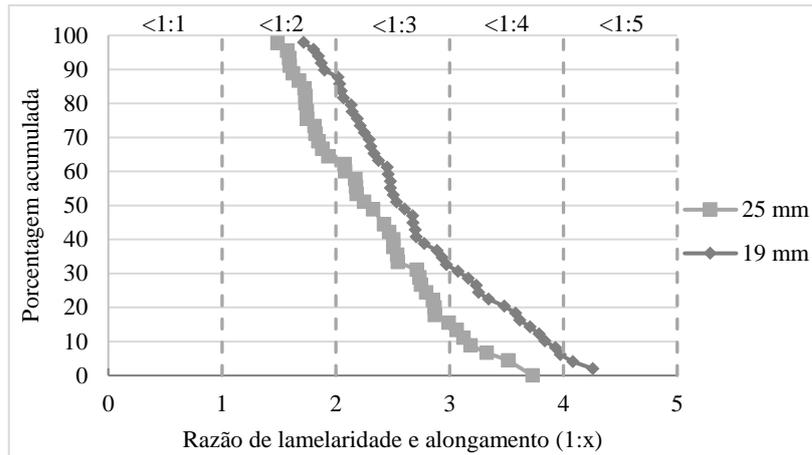


Figura 3: Resultados das propriedades de forma no AIMS 2 de lamelaridade e alongamento

Para esta pesquisa foram realizados ensaios em dois lotes com as faixas granulométricas de 45 a 37,5 mm e 31,5 a 26,5 mm, com 30 partículas em cada lote. As energias utilizadas foram 3600, 900 e 360 J/kg (45 a 37,5 mm) e 9000, 3600 e 900 J/kg (31,5 a 26,5 mm).

Com os dados da fragmentação é possível obter o comportamento do tamanho de partícula para cada t_{10} de dada energia específica. Na Figura 4 observa-se que os valores do t_{10} são muito similares coincidindo suas curvas, mostrando que não existe influência do tamanho do t_{10} , isto é, nas propriedades de fragmentação do material.

Outro parâmetro que se obtém na Figura 4 é a função de distribuição da quebra dada pela Equação 2 que será usada para alimentar o modelo de simulação. A Tabela 1 apresenta os resultados para o modelo de Shi e Kojovic (2007) e observa-se que a energia de quebra da partícula tem um incremento de quase 50% ao reduzir o tamanho médio das partículas em 70%.

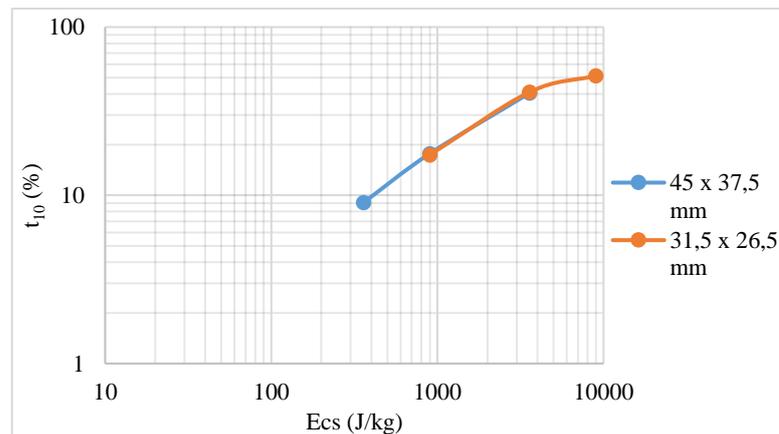


Figura 4: Parâmetro t_{10} para diferentes energias de impacto e diferentes tamanhos de partícula do material desta pesquisa

Tabela 1: Parâmetros de quebra do material de Shi e Kojovic (2007) para o material estudado

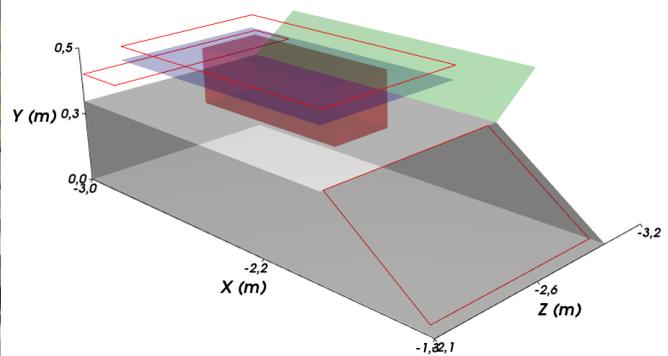
Parâmetros	Frações do material		
	45 a 37,5 mm	31,5 a 26,5 mm	Média
A	47,13	52,10	51,54
F_{mat} (kg/J)	0,00055	0,00044	0,00048
E_{min} (J/kg)	10,70	15,21	12,72

2.2. Metodologia Computacional

Na construção do modelo computacional para a simulação da quebra do lastro, foi reduzido o ambiente de simulação, feito em um software próprio, para a proporção do material retirado da camada do lastro. Assim, o material do lastro já existente e as camadas inferiores ao lastro foram descritas como os limites do domínio da simulação, sendo substituídas por paredes, com restrição de movimento nos três eixos, com intuito de reduzir o tempo computacional. Como o objetivo desta simulação é avaliar a quebra do material do lastro, as partículas que compõem a camada foram criadas com a maior semelhança possível ao material experimental, tanto morfológicamente quanto pelas suas propriedades físicas, o que elevou o custo computacional. A Figura 5 (a) apresenta a representação do modelo real no ambiente simulado, Figura 5 (b), onde o plano inclinado em verde tem a função de remover as partículas acima do nível do ambiente da simulação; o plano horizontal em roxo atua como uma placa vibratória, ao compactar as partículas; e o dormente está representado em vermelho.



(a)



(b)

Figura 5: Aspecto do equipamento (a) e a representação do modelo para simulação (b)

O ambiente para a simulação foi criado no software Rocky4, versão 4.0.6. As partículas simuladas foram previamente calibradas com a granulometria aplicada no tanque e a proporção de partículas lamelares obtidas no AIMS 2, além da densidade do material e seu ângulo de repouso medido de 31° como indicado na Figura 2 (b). Para o ângulo de atrito estático do material foi utilizado o valor de 0,3, baseado no valor encontrado por Huang (2010). Na Tabela 2 observa-se os parâmetros de densidade e módulo de elasticidade utilizados na simulação.

Tabela 2: Parâmetros físicos dos materiais usados nas simulações de quebra desta pesquisa

Parâmetro	Material			
	Aço	Gnaise	Solo	Concreto Armado
Densidade (kg/m^3)	7860	2775	1800	2500
Módulo de Young (GPa)	210	0,25	0,2	15

Para descrever a quebra do material com mais facilidade foi preterido utilizar as geometrias customizada disponível no software em detrimento da importação de formas da partícula, mantendo, ainda assim, a proporção entre as razões de lamelaridade obtidas na Figura 3. Em partes a escolha foi fundamentada na falta de informação do modelo de fragmentação com a malha da partícula e tentar reduzir o número de polígonos no sistema. Assim, foram calibrados os parâmetros morfológicos do agregado (número de quinas e grau de superquádrlica) e a resistência ao rolamento, de forma a descrever com a maior veracidade o comportamento físico do agregado.

Para descrever a quebra do material com mais facilidade foram utilizadas as geometrias customizadas disponível no software em detrimento da importação de formas da partícula. Esta escolha foi fundamentada na falta de informação do modelo de fragmentação real, visando, em parte, reduzir o número de polígonos no sistema. Assim, foram calibrados os parâmetros morfológicos do agregado, número de quinas e grau de superquádrica (superfície esférica S de centro C e raio $r > 0$, cuja equação cartesiana é uma equação de segundo grau do tipo $(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2 = r^2$) e a resistência ao rolamento, de forma a descrever com a maior veracidade o comportamento físico do agregado desta pesquisa.

Visando avaliar a influência de cada parâmetro adotado no ângulo de repouso e no tempo de simulação foram criadas 4 situações para cada parâmetro. O modelo de simulação criado é constituído por um cilindro de 40 cm de diâmetro por 1 m de altura, obedecendo a razão agregado sobre diâmetro do tubo de 1/5, com o tempo total de simulação de 4s (1,5 s de criação das partículas e acomodamento no cilindro e 2,5 s para a liberação do cilindro e estabilização das partículas).

A escolha do melhor parâmetro foi definida pelo que apresenta a melhor aproximação ao ângulo de repouso medido com o menor tempo de simulação. Iniciou-se a calibração com a variação da resistência ao cisalhamento, e, após a escolha do valor julgado mais coerente fixou-se este valor e passou-se a avaliação para o número de quinas e por último para o grau superquádrica.

2.3. Parâmetros Utilizados nas Simulações

Com o término da calibração os valores de interação partícula/partícula ficaram definidos conforme mostra a Tabela 3, e a forma das partículas na simulação mostradas na Tabela 4 e Figura 6. A escolha dos parâmetros de contato entre os materiais e as partículas foram determinados segundo a literatura.

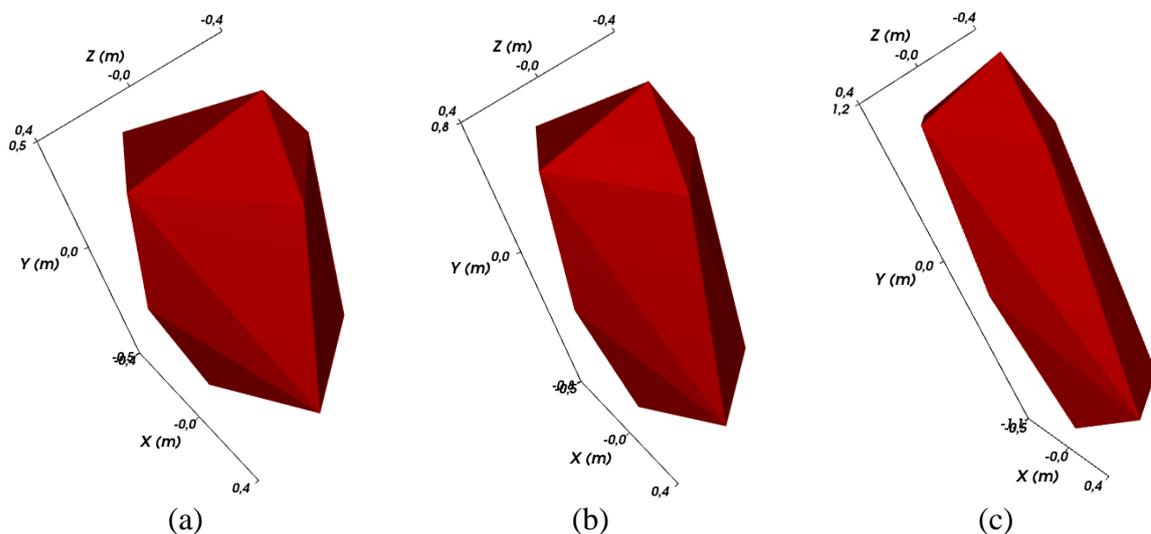


Figura 6: Forma das partículas utilizadas nas razões 1:1 (a), 1:2 (b) e 1:3 (c)

Tabela 3: Parâmetros de contato dos materiais com as partículas usados nesta pesquisa

Parâmetro	Material			
	Aço	Gnaise	Solo	Concreto Armado
Atrito estático	0,6	0,5	0,7	0,3
Atrito Dinâmico	0,6	0,4	0,6	0,2
Coefficiente de restituição	0,15	0,15	0,3	0,1

Tabela 4: Parâmetros morfológicos utilizados na simulação desta pesquisa

Parâmetro	Valor
Tipo de formato	Facetado
Relação de aspecto vertical	1,27 - 1,87 - 2,63
Relação de aspecto horizontal	0,75
Número de quinas	10
Grau de superquádrlica	2

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Experimentais

O agregado analisado apresenta um alto grau de uniformidade com coeficiente de não uniformidade (C_{nu}) igual a 1,6, curvas com esta característica tentem a apresentar deformação permanente excessiva e alta permeabilidade. Sobre os resultados da análise da distribuição da tensão durante os ciclos de cargas a Figura 7 mostra os registros das leituras da tensão de pico do pavimento. Verifica-se no gráfico tensões superiores as calculadas, efeito da quantidade limitada de arestas das partículas do lastro em contato com o dormente, devido as grandes dimensões do agregado, o que reduz a área de contato inicial. Ao longo do ensaio as tensões mostraram redução proporcional com diferença média entre o início e final do ensaio de 20%, possivelmente por consequência da quebra e acomodamento do material. Este efeito elevou a área de contato dormente-lastro o que favoreceu a melhor distribuição das tensões.

A Figura 7 mostra as deformações permanente acumuladas medidas nos 4 LVDTs, sendo os LVDTs 1 e 2 os que se encontravam nas extremidades e os LVDTs 3 e 4 no centro do dormente, acompanhado da média. O resultado do LVDT 1 indicou uma deformação bem acima da média após o estágio inicial de acomodamento. A variação do resultado deve-se parcialmente em função do LVDT estar localizado na borda do lado não confinado do lastro. O não confinamento permite que as partículas apresentem maior grau de liberdade para movimento dentro da camada, o que pode influenciar no desempenho do dormente.

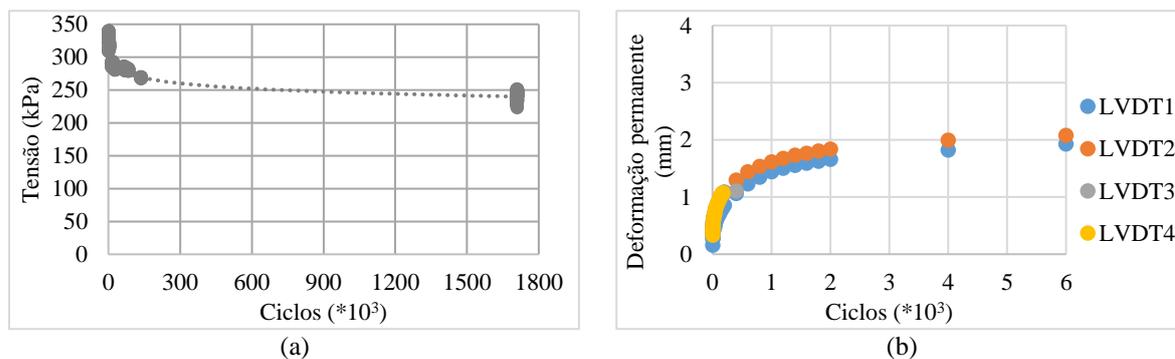


Figura 7: Variação da tensão ao longo do ensaio no topo do lastro (a) e deformação permanente acumulada (b)

3.2. Simulações

O processo do ensaio simulado no MED foi durante 15,45 segundos com o sistema de quebra ativado, divididos em 12 s de preparação do ambiente e 3,45 s de ensaio. O ensaio consistiu de um total de 6 mil partículas com uma massa total de 520 kg de material. Os passos de tempo iniciais foram divididos em: 0 a 5,5 s para criação das partículas; 5,5 a 7,5 s de compactação; 7,5 a 11,5 s de nivelamento da camada e de 12 a 12,5 s o lançamento do dormente, a ativação do modelo de Shi e Kojovic (2007) no momento 12,5 s e os picos de carga na frequência de 2 Hz.

As simulações com o software ROCKY contribuiram para o entendimento e observação da distribuição das tensões ao longo da superfície da camada e no acúmulo de energia de impacto específica. A Figura 8 mostra a distribuição da carga sobre as partículas da camada de lastro nos tempos compreendidos entre um ciclo, observa-se que a região mais solicitada fica próxima à zona confinada, com o lado não confinado apresentando forças insignificantes. Ao avaliar a influência da carga ao longo da camada, nota-se a rápida redução da carga aplicada, que resulta nas partículas do topo da camada serem degradadas primeiramente que as partículas mais abaixo. Este efeito corrobora com os dados encontrados, visto que, aliado a restrição de movimento faz com que as partículas não tenham muitos locais para se deslocar. Também é possível observar que as maiores partículas sofrem maiores solicitações da carga o que contribuiu para a quebra e degradação destas partículas.

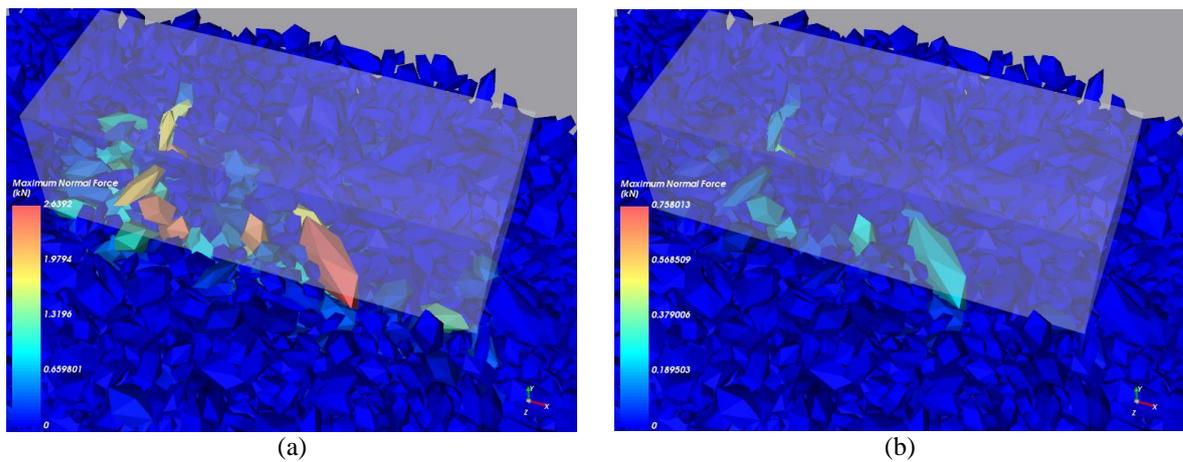


Figura 8: Força aplicada sobre as partículas nos momentos (a) 15,1 s e (b) 15,15 s

A Figura 9 (a) apresenta a tensão que chega na camada de lastro, simulada, medida abaixo do dormente, o valor lido é similar ao encontrado no ensaio de laboratório, sendo que no software o cálculo da área é feito considerando a área de contato das partículas. Isto demonstra que a geometria escolhida para o trabalho conseguiu representar bem o número de contatos do lastro no dormente. O resultado ratifica a pequena área de contato entre o dormente e as partículas da camada de lastro, como observado na Figura 4 85, demonstrando a necessidade de compreender melhor a interface de contato para ampliar a eficiência do dimensionamento da camada de lastro.

Na Figura 9 (b) é apresentada a tensão obtida da simulação do fundo da camada de lastro e observa-se que o resultado foi superior ao observado nas células de carga do cenário 2, mas dentro da mesma ordem de grandeza. O resultado obtido pode ter sido influenciado pela rigidez do fundo do ambiente simulado, o que diminuiu a dissipação de energia, o que eleva as tensões na região de interface fundo/lastro.

Já o valor da energia específica acumulada nas partículas, Figura 10 (a), aumentou conforme o ciclo de carregamento/descarregamento da simulação, pode-se perceber que a taxa de crescimento cresce com a taxa de deformação permanente vista na Figura 10 (b). Como a energia de impacto é dada pela multiplicação da carga pela gravidade e a altura de queda, à medida que o carregamento é realizado a altura entre a interface diminui. No entanto, em campo a existência do efeito de tração ocasionado pelo trilho no dormente resulta em um gap na interface entre o dormente/lastro. Assim, quando este for solicitado em campo a energia de

impacto poderá ser muito maior que o observado em laboratório.

Na Figura 10 (b) apresentam-se as leituras da deformação no topo do dormente durante a simulação. As leituras mostram as duas parcelas de deformação ocorridas no material do lastro, com a deformação elástica ou deslocamento da camada média de 0,44 mm, um valor bem próximo ao encontrado no ensaio do tanque, com um comportamento igual de acomodação. Contudo, a deformação plástica apresentou um resultado muito superior ao medido no modelo experimental, possivelmente influenciado pela energia de compactação que no experimento se deu por uma placa vibratória de pequenas dimensões por um tempo muito maior, enquanto na simulação foi uma placa que ocupava todo o ambiente de simulação e aplicou o impacto por pouco tempo.

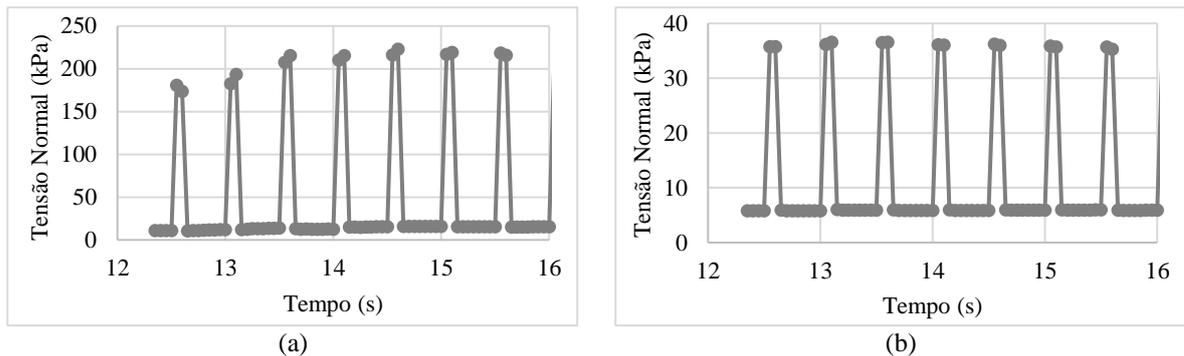


Figura 9: Tensão normal total abaixo do dormente (a) e sobre o fundo da camada de lastro (b)

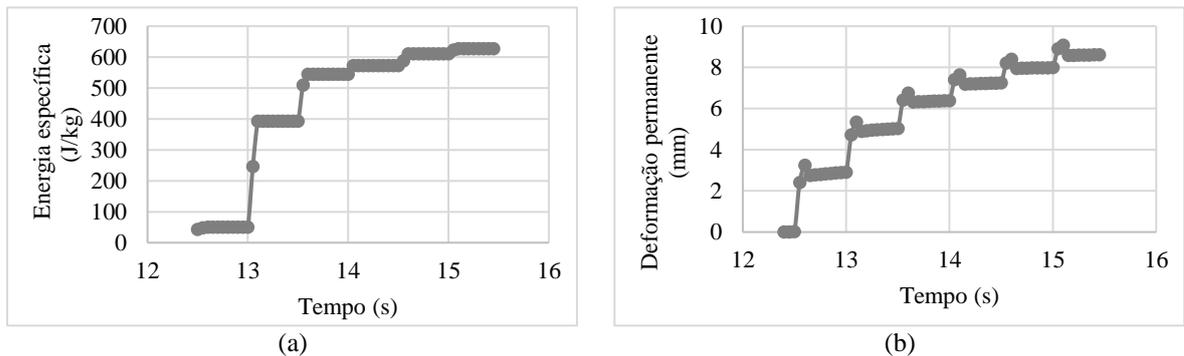


Figura 10: Variação da energia específica (a) e deformação permanente acumulada (b)

4. CONCLUSÕES

A análise pelo método dos elementos discretos mostrou-se capaz de ilustrar fenômenos do comportamento do lastro adequadamente, apresentando certa concordância para o tempo de simulação da estrutura analisada. As características de quebra foram reduzidas na simulação, porém auxiliaram na interpretação das diferenças de energias aplicadas em campo e no modelo físico, visto que o gap existente na via real resulta em maior energia de impacto sobre as partículas.

Analisando-se os resultados da simulação preliminar em DEM pode-se verificar que o objeto em estudo teve uma representatividade satisfatória, mas o sistema de quebra e energia do programa ainda sofre com alguns problemas, em parte pela simulação de quebra ter sido em um espaço curto de tempo e o modelo empregado pelo software usar valores de energia mínima elevados. Assim, a simulação tem potencial de auxiliar a análise do comportamento do lastro e

sua quebra, conforme é refinado o software. Sugere-se realizar futuramente as simulações na nova versão do software, quando for lançado para avaliar novamente os resultados obtidos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aikawa, A. (2013) Dynamic interaction within boundary layer between a sleeper and ballast based on field measurement. *8th World Congress on Railway Research* (p. 8). Sydney. Obtido de <https://www.sparkrail.org/Lists/Records/DispForm.aspx?ID=12326>
- Bobet, A., Fakhimi, A., Johnson, S., Morris, J., Tonon, F., e Yeung, M. R. (2009) Numerical Models in Discontinuous Media: Review of Advances for Rock Mechanics Applications. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 135(11), 1547–1561. doi:10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000133
- Boler, H., Qian, Y., e Tutumluer, E. (2014) Influence of Size and Shape Properties of Railroad Ballast on Aggregate Packing. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2448, 94–104. doi:10.3141/2448-12
- Cundall, P. A., e Strack, O. D. L. (1979) A discrete numerical model for granular assemblies. *Géotechnique*, 29(1), 47–65. doi:10.1680/geot.1979.29.1.47
- Huang, H. (2010) *Discrete element modeling of railroad ballast using imaging based aggregate morphology characterization*. University of Illinois at Urbana-Champaign. Obtido de <http://hdl.handle.net/2142/16060>
- Hudec, P. P. (1982) Aggregate tests: Their relationship and significance. *Durability of Building Materials*, 1, 273–300.
- Indraratna, B., Khabbaz, H., Salim, W., Lackenby, J., e Christie, D. (2004) Ballast characteristics and the effects of geosynthetics on rail track deformation. *Int. Conference on Geosynthetics and Geoenvironmental Engineering* (p. 3–12). Mumbai.
- Indraratna, B., Salim, W., e Rujikiatkamjorn, C. (2011) *Advanced rail geotechnology – ballasted track*. CRC Press, London.
- Lambe, T. W., e Whitman, R. V. (1991) *Soil Mechanics*. John Wiley & Sons, Inc.
- Lobo-Guerrero, S., e Vallejo, L. E. (2006) Discrete Element Method Analysis of Railtrack Ballast Degradation during Cyclic Loading. *Granular Matter*, 8(3–4), 195–204. doi:10.1007/s10035-006-0006-2
- Marotta, E., Minotti, M., e Salvini, P. (2012) Effect of fracture tunneling in DWT Tests. *Engineering Fracture Mechanics*, 81, 33–42. doi:10.1016/j.engfracmech.2011.09.003
- McDowell, G. R., Lim, W. L., e Collop, A. C. (2003) Measuring the strength of railway ballast. *Ground Engineering*, 36(1), 25–28.
- Napier-Munn, T. J., Morrell, S., Morrison, R. D., e Kojovic, T. (1996) *Mineral comminution circuits: their operation and optimisation*. (T. Napier-Munn, Ed). Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre, Indooroopilly.
- Narayanan, S., e Whiten, W. J. (1983) Breakage Characteristics for Ores for Ball Mill Modelling. *Proceedings of the Australasian Institute of Mining and Metallurgy*, (286), 31–39.
- Paim da Silva, F. H., Lima, C. D. A. de, e Motta, L. M. G. da. (2017) Estudo de uma brita de lastro em um modelo físico de verdadeira grandeza de pavimento ferroviário. F. J. C. Cunto & C. M. de Oliveira (Eds), *XXXI Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes* (p. 1110–1121). Associação Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes, Recife.
- Rangel, G. W. A., Aragão, F. T. S., Motta, L. M. G., e Pontes Júnior, C. L. (2016) Verificação da diferença entre agregados basálticos para lastro ferroviário oriundos de uma mesma jazida em diferentes profundidades. F. J. C. Cunto, C. M. de Oliveira, & D. N. S. Gonçalves (Eds), *XXX Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes* (p. 207–218). Associação Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes, Rio de Janeiro.
- Schönert, K. (1996) The influence of particle bed configurations and confinements on particle breakage. *International Journal of Mineral Processing*, 44–45(SPEC. ISS.), 1–16. doi:10.1016/0301-7516(95)00017-8
- Selig, E., e Boucher, D. (1990) Abrasion Tests for Railroad Ballast. *Geotechnical Testing Journal*, 13(4), 301–311. doi:10.1520/GTJ10173J
- Shi, F., e Kojovic, T. (2007) Validation of a model for impact breakage incorporating particle size effect. *International Journal of Mineral Processing*, 82(3), 156–163. doi:10.1016/j.minpro.2006.09.006
- Vavrik, W., Pine, W., e Carpenter, S. (2002) Aggregate Blending for Asphalt Mix Design: Bailey Method. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1789(02), 146–153. doi:10.3141/1789-16

Fernando Henrique Paim da Silva (fernandopaim@coc.ufrj.br)

Laura Maria Goretti da Motta (laura@coc.ufrj.br)

Programa de Engenharia Civil - COPPE, UFRJ, Laboratório de Geotecnia/Pavimentos. Rio de Janeiro/RJ