

CISALHAMENTO DIRETO DE LASTRO FERROVIÁRIO: MODELO NUMÉRICO E SUA CALIBRAÇÃO

Direct shear of railway ballast: numerical model and its calibration

Sílvio Tumelero de Moraes^a, Paulo Pereira^b, Alfredo Gay Neto^a, Liedi Bernucci^b, Rosângela Motta^b, Edson Moura^b

^a Departamento de Engenharia de Estruturas e Geotécnica, Universidade de São Paulo, Brasil

^b Departamento de Engenharia de Transportes, Universidade de São Paulo, Brasil

RESUMO – Esse trabalho objetiva comparar as formas de representação, por meio de modelagem numérica computacional pelo Método dos Elementos Discretos (MED), do lastro ferroviário, quando submetido ao ensaio da caixa de cisalhamento direto. Os parâmetros de maior variabilidade na literatura são analisados: coeficiente de atrito, módulo de elasticidade e coeficiente de resistência ao rolamento. Essa análise ocorre com a finalidade de compreender como estes afetam o resultado macroscópico final da simulação de calibração, verificando-se tanto a tensão de cisalhamento quanto a variação volumétrica. Comparam-se modelos compostos por partículas esféricas e poliédricas digitalizadas, sendo possível verificar a dificuldade do modelo composto por partículas esféricas em alcançar o nível de tensão esperado, adicionalmente à variação volumétrica, não se conseguindo representar a contração inicial vista em laboratório. Por fim, foram possíveis melhores calibrações empregando-se o modelo composto por partículas poliédricas digitalizadas, que proveram melhor descrição do nível de tensão e variação volumétrica do material de lastro.

ABSTRACT – This paper aims to compare the representation of the railway ballast, through computational modeling by the Discrete Element Method (DEM), when submitted to the direct shear box test. The parameters of greatest variability in the literature are analyzed: coefficient of friction, modulus of elasticity and coefficient of rolling resistance. This analysis appears in order to understand how these parameters affect the final macroscopic result of the calibration simulation, verifying both the shear stress and the volumetric variation. Models composed of spherical particles are compared with models composed of digitalized polyhedral particles. It was possible to verify the difficulty of spherical particle models in reaching the expected stress level, such as well initial contraction denoted by the volumetric variation seen in laboratory. Finally, it was possible to better calibrate the model through the digitalized polyhedral particles, which provided a better description for the stress level and volumetric variation of the ballast material.

Palavras Chave – Método dos elementos discretos, calibração, cisalhamento direto.

Keywords – Discrete element method, calibration, direct shear.

E-mails: silvio.tumelero@usp.br (S. Tumelero), paulompereira@usp.br (P. Pereira), alfredo.gay@usp.br (A. Neto), liedi@usp.br (L. Bernucci), rosangela.motta@usp.br (R. Motta), edmoura@usp.br (E. Moura)

ORCID: orcid.org/0000-0001-7583-0955 (S. Tumelero), orcid.org/0000-0002-4499-9384 (S. Tumelero), orcid.org/0000-0002-3961-1488 (A. Neto), orcid.org/0000-0002-4768-0993 (L. Bernucci), orcid.org/0000-0002-6005-8285 (R. Motta), orcid.org/0000-0003-0370-4532 (E. Moura)

1 – INTRODUÇÃO

A camada de lastro é um dos principais componentes de uma via férrea, possuindo a função de receber os esforços transmitidos pelos dormentes e distribuí-los em níveis aceitáveis para as camadas subjacentes, além de propiciar uma elasticidade adequada à via, permitir a drenagem da via e facilitar as manutenções de socaria através do rearranjo de suas partículas (Selig e Waters 1994). No estudo do comportamento mecânico do lastro ferroviário, um dos modelos numéricos computacionais mais efetivamente aplicados têm sido o Método dos Elementos Discretos (MED) por considerar o comportamento complexo dos movimentos e das interações das partículas de materiais granulares de maneira individual (Mortensen et al. 2021). Entretanto, tal como qualquer outro modelo numérico, para que os resultados das simulações através do MED sejam verdadeiros e acurados, é necessária a calibração de parâmetros importantes deste modelo (Guo et al. 2020).

De acordo com Marigo e Stitt (2015) uma das principais dificuldades para a aplicação industrial do MED é determinar de forma eficiente os parâmetros de entrada dos materiais para as simulações. Ademais, nos problemas industriais, geralmente as partículas são irregulares e em grandes quantidades, o que dificulta, em termos de custo computacional, a obtenção dos resultados.

É evidente que a forma geométrica das partículas é importante para o comportamento final de uma simulação. Por exemplo, em um estudo realizado por Gajjar et al. (2021) verificou-se o efeito de segregação ocorrido entre dois grãos com formatos diferentes, em que um tipo de grão movia-se para a superfície na presença de vibração. Além disso, a pesquisa de Höhner et al. (2015) revela as diferenças na vazão de um funil somente com a alteração da forma das partículas, quanto maior a esfericidade, maior a vazão observada.

A utilização de formas de partículas não realistas implica em um processo de calibração mais complexo, exigindo, frequentemente, o uso de parâmetros também não realistas, a fim de compensar a falta de fidelidade geométrica. Um desses parâmetros é o coeficiente de resistência ao rolamento, que aplica um momento contrário ao movimento de forma a dificultar a rotação, tentando, por exemplo, conotar a uma partícula esférica um comportamento de uma partícula não esférica (alongada, cúbica ou até mesmo côncava).

Logo, a busca pela representação de partículas com forma mais realista cresce na literatura. Diversos são os trabalhos que utilizam, por exemplo, escâneres a laser (Ferrellec et al. 2017) e fotogrametria (Paixão et al. 2018) para retratar os grãos. Todavia, independente do processo de captação da geometria, para esta poder ser empregada numa simulação, é necessário um processo de simplificação (Guo et al. 2020).

A geometria da partícula pode ser representada de diversas formas. O presente artigo traz uma comparação entre esferas e poliedros, obtidos a partir da digitalização de uma amostra de lastro da Estrada de Ferro Carajás (EFC), uma das mais importantes ferrovias de transporte de cargas do Brasil. As esferas, por exemplo, são as partículas mais convenientes em um modelo para fins de detecção de contato, entretanto, dependendo da partícula que se deseja representar, esta pode trazer prejuízos à descrição mecânica do sistema (Han et al. 2020). Por outro lado, também tem-se a possibilidade de se modelar uma partícula como um aglomerado de esferas, resultando em um custo computacional razoável e lidando bem com concavidades, mas de difícil replicabilidade quanto à angularidade (Suhr e Six 2020). Por fim, a utilização de poliedros permite formas mais fidedignas, porém, é uma opção mais cara computacionalmente e exige uma drástica redução do número de faces para que se torne viável.

É importante ressaltar que a calibração dos parâmetros das partículas apresenta limitações. Ao usar um ensaio como referência para calibração do modelo numérico, Wensrich e Katterfeld (2012) perceberam que, através de diversas combinações de parâmetros (no caso, coeficiente de atrito e coeficiente de resistência ao rolamento), foi possível alcançar o mesmo resultado macroscópico final do ensaio de calibração. Assim, para a utilização de partículas não realistas, com necessidade de emprego do coeficiente de resistência ao rolamento, apenas um ensaio de calibração não é suficiente

para calibrar o modelo (Roessler et al. 2019). Com isto, um modelo pode estar calibrado para um tipo de ensaio, porém não apresenta resultados confiáveis para outro tipo.

O ensaio de cisalhamento direto mostra-se interessante para a calibração, através de dois resultados distintos: a resistência ao cisalhamento entre partículas e a variação volumétrica da caixa em decorrência do rearranjo delas durante o cisalhamento. Dessa forma, busca-se, neste artigo, calibrar um modelo numérico através desse ensaio, tendo como referência um ensaio laboratorial de literatura. Os ensaios de sensibilidade paramétrica executados na presente contribuição permitem um entendimento mais aprofundado sobre o que é preciso fazer para calibrar uma simulação de cisalhamento direto, quais parâmetros não possuem grande influência e quais são essenciais. Esse estudo criterioso possibilita um processo de calibração mais eficiente, demonstrando que a geometria e o módulo de elasticidade das partículas são as chaves para este feito.

2 – MÉTODO DOS ELEMENTOS DISCRETOS

O MED é uma abordagem numérica que consiste em utilizar leis e/ou modelos para determinar a força resultante em cada elemento e, assim, determinar o movimento dos corpos para cada intervalo de tempo. Ele tem como premissa fundamental que, a partir da solução do movimento de cada partícula, é possível determinar o comportamento global de um conjunto de partículas (Campello 2018).

Esse método foi introduzido à comunidade científica por Cundall e Strack (1979), quando foi validado o primeiro programa a aplicá-lo, o BALL, desenvolvido para a análise bidimensional de discos. A abordagem utilizada é baseada na ideia de que o intervalo de tempo é pequeno o suficiente para que os distúrbios não se propaguem além de seus vizinhos imediatos, tornando o método viável computacionalmente (Cundall e Strack 1979).

Apesar de a solução de contato envolvendo discos e esferas ser a mais eficiente, perde-se o intertravamento entre os grãos (Guo et al. 2020). Dentro deste contexto, a forma da partícula é considerada essencial para a representação mais fidedigna de alguns tipos de grãos, como os que compõem o lastro ferroviário. Em uma caixa de cisalhamento direto, Zhao et al. (2015) encontraram uma relação direta entre a angularidade das partículas, tensão de cisalhamento e dilatação. Segundo Suhr e Six (2020), a angularidade é amplamente discutida na literatura, enquanto a sua concavidade é negligenciada. Gay Neto e Wriggers (2021) propuseram uma nova técnica de tratamento de contato que permite lidar de forma robusta com geometrias poliédricas complexas, incluindo formas côncavas.

O uso de partículas esféricas pode vir associado a um parâmetro adicional denominado por “coeficiente de resistência ao rolamento”. Com este, modela-se o surgimento de um momento que se opõe ao movimento de rolamento da partícula. Segundo Ai et al. (2011), esse coeficiente apresenta a função de incorporar às partículas esféricas o comportamento de partículas não esféricas ou de irregularidades superficiais.

O Rocky DEM (ESSS 2020) é o programa comercial de elementos discretos de abordagem explícita que foi escolhido para realizar as simulações necessárias para este trabalho, apresentando aceleração gráfica através de GPU e possibilidade de processamento em paralelo. Outrossim, permite trabalhar com vários tipos de formas de partículas, possibilitando importar qualquer geometria no formato STL (*Standard Tessellation Language*). A abordagem empregada para a solução do contato é denominada “macia” (*soft*), a qual baseia-se em sobreposições (*overlaps*) proporcionais aos módulos de elasticidade dos materiais em contato.

No Rocky DEM, cada intervalo de tempo é definido como uma fração do período de oscilação de um sistema massa-mola equivalente:

$$2\pi\sqrt{\frac{m}{K}} \quad (1)$$

onde m e K são valores críticos da massa e rigidez. Para o modelo de contato normal escolhido neste trabalho, o *Hertzian Spring-Dashpot*, a rigidez pode ser definida como uma relação entre o módulo de elasticidade equivalente entre as partículas em contato (E) e o seu tamanho equivalente (L), logo,

$$K = \frac{4}{3} E \sqrt{L} \quad (2)$$

Dessa forma, é perceptível que a rigidez está correlacionada ao módulo de elasticidade e ao tamanho da partícula. Sendo assim, quanto maior o módulo de elasticidade dos materiais utilizados, maior a rigidez e menor o passo de integração no tempo que deve ser utilizado na solução do modelo numérico (condição de Courant), logo, a simulação é mais custosa computacionalmente.

3 – ENSAIO DE CISALHAMENTO DIRETO

O ensaio de cisalhamento direto consiste na inserção de partículas dentro de uma caixa bipartida, seguida de uma aplicação de carga vertical constante no topo, enquanto impõe-se um deslocamento lateral constante em uma das metades. Assim, a força lateral de reação é medida na metade fixa e, como o plano de cisalhamento é conhecido, determina-se a tensão de cisalhamento entre as partículas em função do deslocamento lateral (Figura 1a). Identificam-se dois pontos importantes nessa curva: a tensão de pico, que é considerada a tensão de ruptura ou tensão máxima, e a tensão residual, que o material sustenta após ultrapassada a tensão de cisalhamento. O comportamento obtido por Marangon (2018), expresso na Figura 1, foi observado em areias no estado solto e denso, no entanto é perceptível grandes similaridades com o comportamento do lastro ferroviário, apenas com uma grande distinção de escala das partículas.

Vale ressaltar que a tensão de cisalhamento de pico aumenta conforme a sua compactação e que, se o material não apresentar nenhum grau de compactação, teoricamente, a tensão de cisalhamento residual será a tensão máxima (Figura 1a).

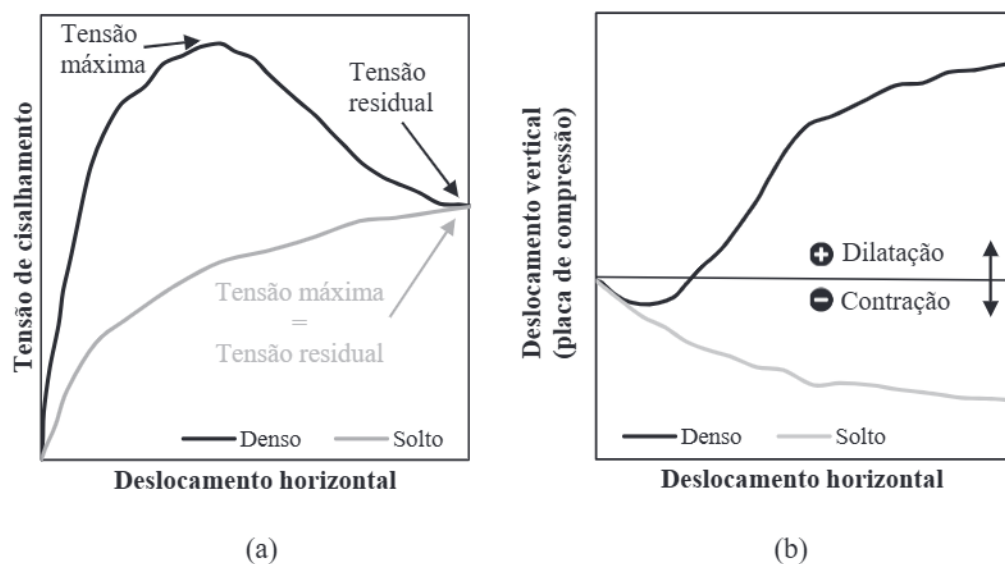


Fig. 1 – (a) Gráfico típico da tensão de cisalhamento e variação volumétrica para areia no estado denso e solto.

Outro dado obtido a partir deste ensaio é a variação volumétrica (Figura 1b), caracterizada pelo deslocamento vertical da placa de aplicação de carga. O comportamento dessa curva geralmente é subdividido em duas etapas: contração e dilatação. A primeira etapa consiste em um rearranjo das partículas, dependendo primordialmente da porosidade inicial da camada e da tensão aplicada (Reis 2006). Caso inicialmente a camada tenha uma alta porosidade (Figura 2a), quando é aplicada uma carga, ocorrerá um rearranjo das partículas, levando a uma retração volumétrica (Figura 2b); conforme o deslizamento ocorre, as partículas vão se reacomodando e causando uma expansão volumétrica (Figura 2c). Pode ser que as partículas já estejam, inicialmente, com um grau de compactação elevado e, assim, a fase do rearranjo das partículas é branda; mais aspectos conceituais podem ser vistos em Rowe (1962).

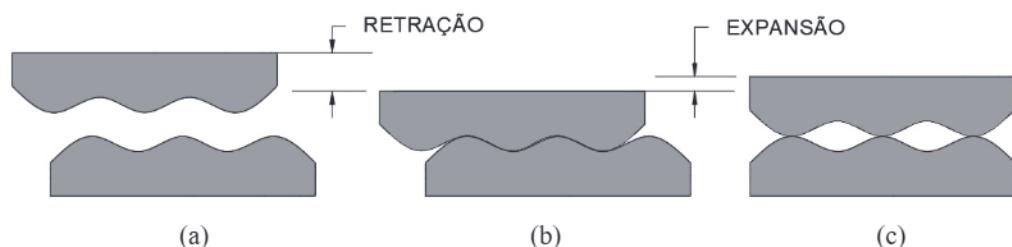


Fig. 2 – Analogia referente à retração e expansão volumétrica: (a) no início, com porosidade elevada, (b) após a aplicação de carga vertical, quando ocorre o rearranjo, e (c) a dilatação que ocorre, conforme o deslocamento lateral.

Para poder realizar o ensaio de cisalhamento direto em lastro, de forma fidedigna, é necessária uma caixa de cisalhamento de dimensões consideradas grandes, pois esta precisa, pelo menos, comportar partículas de até 63 mm. O tamanho da caixa de cisalhamento é essencial para a correta determinação da resistência ao cisalhamento entre os grãos, devendo estar de acordo com a norma D3080 (ASTM, 2011).

Segundo Stark et al. (2014), caso os requisitos da norma sobre as dimensões mínimas da amostra não sejam satisfeitos, o efeito de confinamento causado pelas paredes da caixa de cisalhamento pode aumentar o valor da tensão e ser incongruente com as condições em campo. De acordo com Estaire e Santana (2018), ao comparar uma caixa com seção de cisalhamento de 1 x 1 m com uma de 0,3 x 0,3 m, observaram que a caixa de cisalhamento menor gerou medidas de tensões de cisalhamento de pico 40 a 60% maiores.

4 – SIMULAÇÃO DE CALIBRAÇÃO

O procedimento de calibração é essencial para a obtenção de dados coerentes através do MED. O resultado laboratorial do ensaio de cisalhamento direto desenvolvido por Estaire e Santana (2018) será utilizado como base para a calibração do modelo computacional deste trabalho. Dessa forma, foi desenvolvida uma caixa de cisalhamento conforme as dimensões laboratoriais, com um plano de cisalhamento quadrado (1 m²) e uma altura de amostra de aproximadamente 50 cm.

A velocidade de cisalhamento usada em laboratório em testes de cisalhamento direto normalmente é próxima de 1 mm/min. Para simulações computacionais, essa velocidade implicaria em um elevado custo computacional, pois aumentaria o número de intervalos de tempo necessários para concluir a simulação. Dessa forma, Stahl e Konietzky (2011) utilizaram uma velocidade de 0,01 m/s e afirmam que esse aumento não gera discrepância significativa nos resultados.

Como etapas da simulação numérica, inicialmente as partículas são soltas, dentro da caixa de cisalhamento, de uma altura de 0,20 m do seu topo (Figura 3a); esse processo tem duração de 1 s. É permitido 0,5 s para o assentamento residual das partículas. Após esse intervalo, assenta-se

vagarosamente a placa de compressão sobre a amostra; em seguida, começa-se a aplicar uma força fixa, com tensão equivalente à 196 kPa na direção vertical para baixo (Figura 3b), e impõe-se um deslocamento lateral, com velocidade contínua de 0,01 m/s na metade inferior da caixa de cisalhamento (Figura 3c). Foi realizado o cisalhamento até o deslocamento máximo de 0,18 m, logo, a tensão neste ponto será denominada tensão residual e o tempo total de simulação é de 19,5 s. A faixa granulométrica de 25 a 63 mm e implica na utilização de cerca de 10 mil partículas.

O computador empregado para o processamento das simulações possui placa de vídeo NVIDIA Quadro RTX 5000 16 GB GDDR6, CPU Intel Xeon 3104 1,70 GHz e 64 GB de RAM.

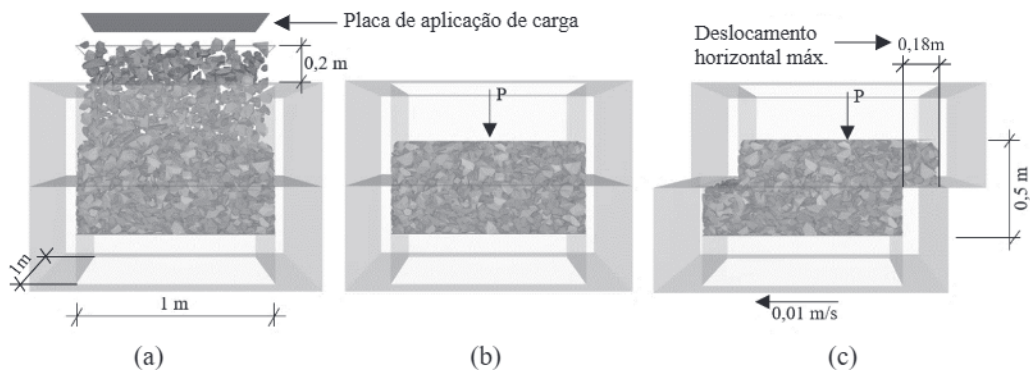


Fig. 3 – Caixa de cisalhamento: (a) inserindo as partículas, (b) aplicando uma força vertical para baixo e (c) impondo um deslocamento lateral constante.

Ademais, ao comparar o lastro utilizado por Estaire e Santana (2018) e o amostrado na EFC para este trabalho, é perceptível a existência de grandes similaridades (Quadro 1). Dessa forma, a comparação do resultado da caixa de cisalhamento direto entre ambas é apropriada para sua calibração.

O lastro ensaiado por Estaire e Santana (2018) é considerado novo, sem degradação, e a faixa granulométrica contém partículas compreendidas entre as peneiras de 63 e 25 mm, assim como o lastro da EFC. Ademais, as amostras são ensaiadas no estado solto e as massas específicas dos grãos são similares.

Quadro 1 – Comparação entre o lastro da EFC e o de Estaire e Santana (2018).

	Lastro EFC	Lastro Estaire e Santana (2018)
Material	Granito	Andesito
Tipo de rocha	Magmática	Magmática
Massa específica	2641 kg/m³	2620 kg/m³
Granulometria	AREMA Nº 24	AREMA Nº 24

Foi realizada a digitalização de 90 partículas de lastro da EFC. As partículas foram simplificadas para poliedros com 24 faces cada uma, chamadas de partículas poliédricas digitalizadas. O procedimento de digitalização e simplificação são descritos por Moraes et al. (2020).

4.1 – Parametrização

Os parâmetros de material e contato são essenciais para a correta representação do comportamento do lastro. Eles dependem das propriedades dos materiais e suas interações. No

entanto, alguns desses valores variam consideravelmente na literatura. Na literatura (Quadro 2), os *clusters* (aglomerados de esferas) são muito utilizados como uma forma de representar a geometria do lastro e manter o custo computacional controlado, dependendo do número de esferas por partículas. No entanto, os poliedros digitalizados seriam uma maneira de representar a partícula de forma mais fidedigna, devido à sua angularidade preservada.

De acordo com a literatura analisada (Quadro 2), pode-se dizer que não houve grande variação do coeficiente de Poisson adotado nas simulações de lastro ferroviário. Ademais, a maioria dos coeficientes de restituição apresentam valores baixos, em que quanto menor o valor, mais simplificado é o processo de deposição e compactação, já que a energia é dissipada mais rapidamente (Azéma et al. 2009).

Gonzáles (2015) afirma que o coeficiente de atrito estático entre partículas de lastro varia de 0,57 a 0,84; observando o Quadro 2, percebe-se uma variação de 0,4 a 0,9. Esse é um dos parâmetros mais utilizados para a calibração dos modelos, sendo geralmente aplicado para compensar algumas falhas na representação geométrica das partículas.

De acordo com Gonzáles (2015), o módulo de elasticidade varia de 2 a 9 GPa em rochas. Entretanto, com esses valores, os passos de tempo (*timesteps*) requeridos para rodar as simulações são muito pequenos, tornando o custo computacional demasiadamente elevado. Portanto, o número

Quadro 2 - Revisão bibliográfica das características e parâmetros da modelagem computacional do lastro ferroviário.

Referência	Módulo de Elasticidade (GPa)	Coef. de restituição	Coef. de atrito est. (entre partículas)	Coef. de resistência ao rolamento	Massa específica (kg/m³)	Coef. de Poisson	Forma
Mortensen et al. (2021)	60	-	0,7	-	2700	0,1	Cluster
Danesh et. al. (2020)	-	-	0,6	-	2500	-	Cluster
Bian et al. (2019)	-	-	0,6	-	2850	-	Poliedro Dig.
Kumar et al. (2019)	30	-	0,45	-	2660	0,2	Cluster
Paim da Silva (2018)	0,25	0,15	0,5	0,2	2775	-	Poliedro
Kim et al. (2018)	-	0,2	0,57	-	2640	-	Cluster
Khatibi et. al. (2017)	-	-	0,9	-	2600	0,2	Cluster
Ferrellec et al. (2017)	-	0	0,8	-	2700	-	Poliedro Dig.
Gonzáles (2015)	0,12	0,4	0,6	0,3	2700	0,18	Cluster
Wang et al. (2015)	0,5 a 1	-	0,5	-	2600	-	Cluster
Ngo et al. (2014)	-	-	0,8	-	2700	-	Cluster
Hoang et al. (2011)	-	-	0,7	-	-	-	Poliedro
Tutumluer et al. (2009)	-	-	0,7	-	-	-	Poliedro Dig.
Cheng e Minh (2009)	-	-	0,5	-	2650	-	Discos
Azéma et al. (2009)	-	0	0,5	-	-	-	Poliedro Dig.

razoável adotado por aquele autor foi 0,12 GPa. É comum na literatura encontrar valores entre 0,1 a 1 GPa (Quadro 2), embora Kumar et al. (2019) tenham utilizado 30 GPa e dependendo do tipo do material do lastro pode chegar até 60 GPa, em concordância com Mortensen et al. (2021). Battini (2012), que realizou extensa revisão bibliográfica sobre o módulo de elasticidade do lastro, encontrou uma variabilidade de 0,10 a 0,35 GPa nesse parâmetro.

Sobre a distinção do coeficiente de atrito em estático e dinâmico, poucos são os estudos que os diferenciam. Com base na literatura analisada, apenas Paim da Silva (2018) adotou um valor diferente para o coeficiente de atrito dinâmico: 0,4 (diferença de 0,1 entre os coeficientes).

Os parâmetros a serem calibrados são aqueles de maior incerteza e variabilidade. Para poder realizar um ensaio de calibração é necessário entender como cada parâmetro de entrada afeta o comportamento global da amostra. Em suma, ao analisar a literatura para os parâmetros de material e contato das partículas de lastro ferroviário, percebe-se grande discrepância quanto ao módulo de elasticidade (E) e os coeficientes de atrito estático (A) e dinâmico. Além de discutir o coeficiente de resistência ao rolamento (RR) para esferas.

Os parâmetros adotados para as simulações deste trabalho estão expressos no Quadro 3. O coeficiente de atrito dinâmico adotado será sempre 0,1 menor que o estático.

Quadro 3 – Parâmetros adotados para as simulações deste trabalho.

Parâmetro	Tipo	Valor	Tipo	Valor
Massa específica	Propriedade da partícula	2620 kg/m ³	Propriedade da caixa	2700 kg/m ³
Módulo de Elasticidade		0,25 a 5,00 GPa		70,00 GPa
Coeficiente de Poisson		0,20		0,30
Coef. Atrito Estático	Propriedade de contato partícula-partícula	0,50 a 1,00	Propriedade de contato partícula-caixa	0,40
Coef. Atrito Dinâmico		0,40 a 0,90		0,40
Coef. Restituição		0,10		0,10

5 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 – Estudo paramétrico

Ao analisar a influência do coeficiente de atrito no comportamento das partículas esféricas (Figura 4), fica evidente que somente com a sua alteração não é possível alcançar os níveis de tensão de cisalhamento obtidos em laboratório por Estaire e Santana (2018). Ademais, os resultados do gráfico de volumetria mostram grande discrepância do resultado esperado, em especial pela falta de uma contração inicial significativa.

Assim, para a utilização de partículas esféricas, surge a necessidade de uso do coeficiente de resistência ao rolamento, como uma forma de simular o intertravamento fornecido pela geometria das partículas poliédricas digitalizadas. Através da Figura 5 é perceptível que o emprego desse parâmetro permite alcançar valores de tensão de cisalhamento mais elevados que os anteriormente observados, entretanto, não foi possível obter o mesmo comportamento, já que para a curva em que o valor residual é similar ao resultado de Estaire e Santana (2018) o valor de pico é muito superior ao esperado. Considerando a resistência ao rolamento de 0,3 como a que melhor se aproximou da curva de literatura no trecho de 0,10 a 0,18 m de deslocamento horizontal, o valor de pico foi aproximadamente 58% maior. Ademais, o comportamento da curva volumétrica não pôde ser replicado adequadamente.

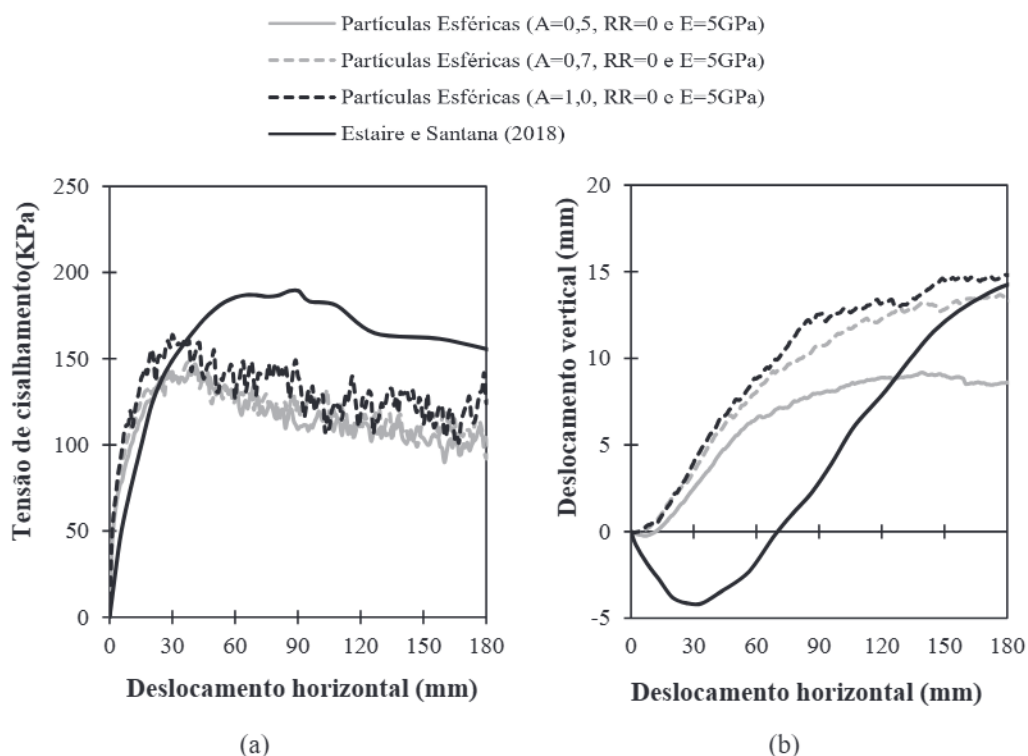


Fig. 4 – Gráfico da (a) tensão de cisalhamento e da (b) variação volumétrica obtidos através do ensaio de cisalhamento direto para comparação da influência do coeficiente de atrito (A) para partículas esféricas.

Ao comparar as partículas esféricas com as partículas poliédricas digitalizadas é possível ver como a quantidade de informação presente na forma da partícula é capaz de interferir no resultado de uma simulação. Do mesmo modo, é interessante observar que no início do deslocamento (até 0,40 m) as tensões de cisalhamento foram similares, e depois começaram a se distanciar. Já ao analisar a variação volumétrica, fica evidente que as partículas esféricas apresentaram uma contração inicial muito baixa, seguida de uma acentuada expansão. O comportamento evidenciado pelas partículas esféricas é típico de uma amostra mais compactada, apresentando um pico inicial na tensão de cisalhamento e baixa contração, o que é possível confirmar através do Quadro 4.

Analisando a influência do módulo de elasticidade (Figura 6), percebe-se discrepância preponderante na rigidez inicial da amostra. No entanto, ambas as curvas tendem a convergir ao final do ensaio. Vale ressaltar que o módulo de elasticidade foi o responsável pelo valor de pico. As diferenças no gráfico de variação volumétrica são mais significativas para as partículas poliédricas, que apresentaram maior contração inicial e menor expansão, sendo esse comportamento característico de uma amostra menos densa. A contração inicial maior também é influenciada pelos maiores valores de *overlap* entre as partículas.

O *overlap* é um dos artifícios computacionais que podem ser usados para tratar os corpos como não rígidos, permitindo uma flexibilidade local no contato. Por construção, a quantidade dessa sobreposição entre os corpos está diretamente correlacionada com o módulo de elasticidade. Isso é perceptível através do Quadro 4, já que aumentando o módulo de elasticidade em 20 vezes tem-se uma redução do *overlap* médio em cerca de 7 vezes. Ademais, o Quadro 4 também deixa evidente a influência do módulo de elasticidade e da forma da partícula no custo computacional. Outrossim,

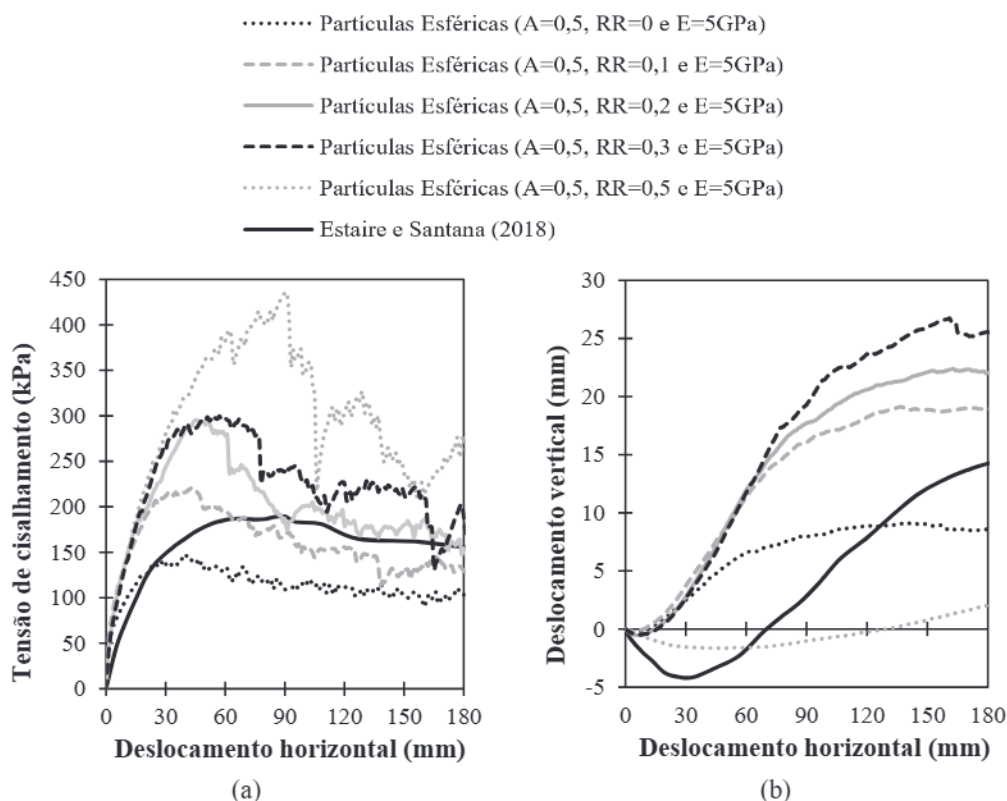


Fig. 5 – Gráfico da (a) tensão de cisalhamento e da (b) variação volumétrica obtidos através do ensaio de cisalhamento direto para comparação da influência do coeficiente de resistência ao rolamento (RR) para partículas esféricas.

é notório que o *overlap* interfere significativamente na massa específica aparente, que considera o volume de vazios da amostra, e deve ser tratado com atenção, já que valor de *overlap* excessivo altera a geometria local da partícula e pode gerar resultados inconsistentes.

Quadro 4 – Influência da forma e módulo de elasticidade no comportamento da amostra simulada.

Forma	Módulo de Elasticidade (GPa)	Massa específica aparente (kg/m^3)	Média <i>overlap</i> (mm)	Custo computacional (h)
Esférica	0,25	1688	0,490	0,7
Esférica	5,00	1628	0,072	2,8
Poliédrica	0,25	1608	0,470	13,5
Poliédrica	5,00	1531	0,066	47,0

Por fim, o resultado calibrado corresponde a curva das partículas poliédricas digitalizadas ($A=0,5$, $RR=0$ e $E=5\text{GPa}$) da Figura 6. É perceptível que a adoção das partículas poliédricas ajudaram significativamente na forma das curvas, em especial na variação volumétrica do sistema, que não obteve boa representabilidade através de partículas esféricas, até mesmo com o coeficiente de resistência ao rolamento.

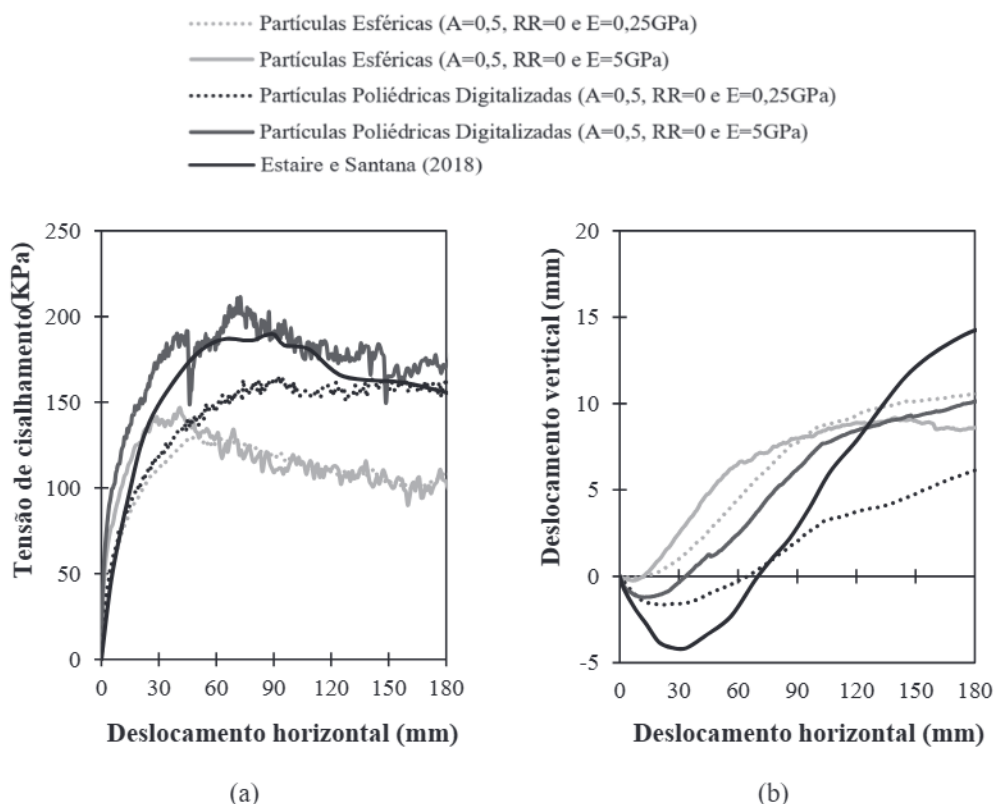


Fig. 6 – Gráfico da (a) tensão de cisalhamento e da (b) variação volumétrica obtidos através do ensaio de cisalhamento direto para comparação da influência da forma e módulo de elasticidade.

5.2 – Análise do comportamento global das partículas

A fim de compreender melhor o comportamento global das partículas quando submetidas ao ensaio de cisalhamento direto, em especial quanto à variação volumétrica da amostra, analisou-se, para a simulação calibrada, uma seção intermediária transversal ao cisalhamento, e comparou-se a condição do lastro no início (Figura 7a) e no fim da simulação (Figura 7b). Por conseguinte, observou-se uma maior quantidade de vazios ao final da simulação. Ao verificar a trajetória das partículas durante a simulação de cisalhamento direto (Figura 8), é interessante notar que as partículas da camada inferior não apresentaram nenhuma movimentação significativa além do deslocamento lateral imposto. É possível perceber, ao analisar a camada superior, uma tendência de

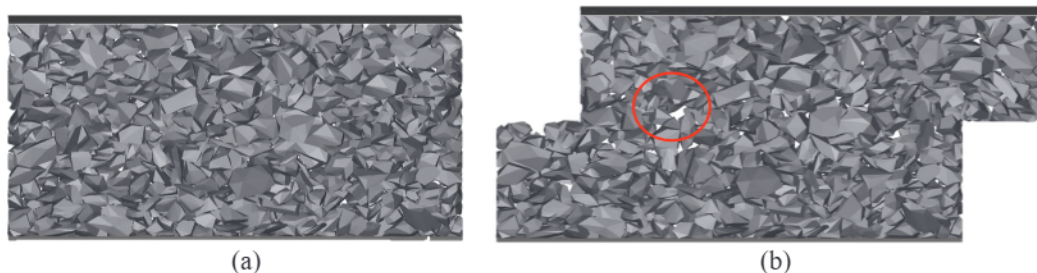


Fig. 7 – Simulação de ensaio de cisalhamento direto, condição (a) inicial e (b) final.

rotação no sentido horário e ascensão das partículas. Já, no plano de cisalhamento, vale observar a formação de um vórtice no lado direito, que contribui no efeito rotacional das partículas.

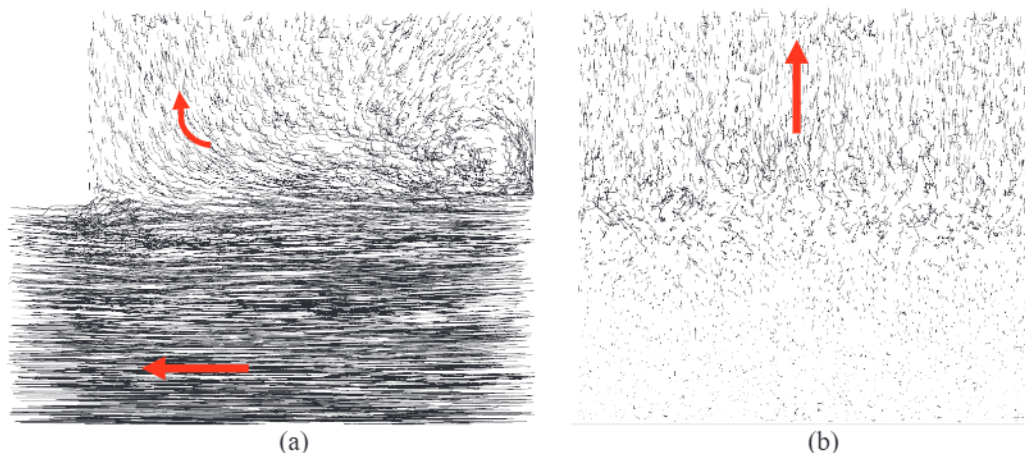


Fig. 8 – Visualização da trajetória das partículas (com setas de tendência destacadas) durante a simulação do ensaio de cisalhamento direto: (a) vista frontal e (b) vista lateral.

6 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho calibrou-se um modelo computacional de lastro ferroviário através do MED utilizando-se resultados de um ensaio laboratorial de cisalhamento direto obtido em literatura. O estudo de sensibilidade paramétrica realizado permite que usuários compreendam *a priori* a influência de cada parâmetro e saibam quais ajustar para melhor calibração do modelo numérico.

Esse estudo revelou que o coeficiente de atrito teve pouca influência nos valores de tensão de cisalhamento da amostra de partículas, avaliada utilizando-se partículas esféricas, enquanto o coeficiente de resistência ao rolamento influenciou significativamente nos resultados. Porém, o comportamento das curvas de tensão de cisalhamento e variação volumétrica para a amostra de partículas não foram satisfatórios, tendo em vista a discrepância gerada entre o valor de pico e o residual. Ademais, as partículas esféricas apresentaram baixíssimo grau de compressão inicial, quando analisada a variação volumétrica.

Outrossim, destaca-se que o módulo de elasticidade, tanto para partículas esféricas quanto poliédricas, foi essencial para alcançar o formato de curva desejado, influenciando na rigidez inicial e no pico, sem alterações significativas no valor residual.

É interessante perceber que, ao utilizar partículas poliédricas digitalizadas, o valor da tensão de cisalhamento esperado foi facilmente alcançado, proporcionando um bom alinhamento entre a simulação e o resultado de literatura. A variação volumétrica também possui semelhança qualitativa com os dados laboratoriais. Dessa forma, fica evidente que a geometria irregular das partículas, modelada por meio de poliedros, causa um intertravamento importante, resultando em tensões de cisalhamento elevadas e prevendo o comportamento esperado na simulação de cisalhamento do lastro ferroviário.

7 – AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Vale S.A., pelo suporte através da Cátedra Under-Rail, e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), processo 304321/2021-4.

8 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ai, J.; Chen, J.; Rotter, J.; Ooi, J. (2011). *Assessment of rolling resistance models in discrete element simulations*. Powder Technology, v. 206, n. 3, p. 269–282.
- ASTM D3080/D3080M (2011). *Standard test method for direct shear test of soils under consolidated drained conditions*. ASTM International.
- Azéma, E.; Radjai, F.; Saussine, G. (2009). *Quasistatic rheology, force transmission and fabric properties of a packing of irregular polyhedral particles*. Mechanics of Materials, v. 41, n. 6, p. 729–741.
- Battini, J. M. (2012). *The non-linear influence of ballast on the vibrations of railway bridges*. Civil-Comp Proceedings, v. 99.
- Bian, X.; Li, W.; Qian, Y.; Tutumluer, E. (2019). *Micromechanical Particle Interactions in Railway Ballast through DEM Simulations of Direct Shear Tests*. International Journal of Geomechanics, v. 19, n. 5, p. 1–19.
- Campello, E. M. B. (2018). *A computational model for the simulation of dry granular materials*. International Journal of Non-Linear Mechanics, v. 106, p. 89–107.
- Cheng, Y. P.; Minh, N. H. (2009). *DEM investigation of particle size distribution effect on direct shear behaviour of granular agglomerates*. AIP Conference Proceedings, v. 1145, p. 401–404.
- Cundall, P. A.; Strack, O. D. L. (1979). *A discrete numerical model for granular assemblies*. Geotechnique, v. 30, n. 3, p. 331–336.
- Danesh, A.; Mirghasemi, A. A.; Palassi, M. (2020). *Evaluation of particle shape on direct shear mechanical behavior of ballast assembly using discrete element method (DEM)*. Transportation Geotechnics, v. 23, p. 100357.
- ESSS (2020). Rocky DEM Technical Manual: version 4.3.
- Estaire, J.; Santana, M. (2018). *Large Direct Shear Tests Performed with Fresh Ballast*. Railroad Ballast Testing and Properties. ASTM International. p. 144–161.
- Ferrellec, J.-F.; Perales, R.; Nhu, V.-H.; Wone, M.; Saussine, G. (2017). *Analysis of compaction of railway ballast by different maintenance methods using DEM*. EPJ Web of Conferences, v. 140, p. 15032.
- Gajjar, P.; Johnson, C. G.; Carr, J.; Chrispeels, K.; Gray, J. M. N. T.; Withers, P. J. (2021). *Size segregation of irregular granular materials captured by time-resolved 3D imaging*. Scientific Reports, v. 11, n. 1, p. 8352.
- Gay Neto, A.; Wriggers, P. (2021). *Discrete element model for general polyhedra*. Computational Particle Mechanics.
- González, F. S. (2015). *Numerical Modelling of Railway Ballast Using the Discrete Element Method*. UPC Barcelonatech.
- Guo, Y.; Zhao, C.; Markine, V.; Jing, G.; Zhai, W. (2020). *Calibration for discrete element modelling of railway ballast: A review*. Transportation Geotechnics, v. 23, n. January, p. 100341.
- Han, Y.; Zhao, D.; Jia, F.; Qiu, H.; Li, A.; Bai, S. (2020). *Experimental and numerical investigation on the shape approximation of rice particle by multi-sphere particle models*. Advanced Powder Technology, p. 1–13.

- Hoang, T. M. P.; Alart, P.; Dureisseix, D.; Saussine, G. (2011). *A domain decomposition method for granular dynamics using discrete elements and application to railway ballast*. Annals of Solid and Structural Mechanics, v. 2, n. 2–4, p. 87–98.
- Höhner, D.; Wirtz, S.; Scherer, V. (2015). *A study on the influence of particle shape on the mechanical interactions of granular media in a hopper using the Discrete Element Method*. Powder Technology, v. 278, p. 286–305.
- Khatibi, F.; Esmaeili, M.; Mohammadzadeh, S. (2017). *DEM analysis of railway track lateral resistance*. Soils and Foundations, v. 57, n. 4, p. 587–602.
- Kim, D. S.; Hwang, S. H.; Kono, A.; Matsushima, T. (2018). *Evaluation of ballast compactness during the tamping process by using an image-based 3D discrete element method*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, v. 232, n. 7, p. 1951–1964.
- Kumar, N.; Suhr, B.; Marschning, S.; Dietmaier, P.; Marte, C.; Six, K. (2019). *Micro-mechanical investigation of railway ballast behavior under cyclic loading in a box test using DEM: effects of elastic layers and ballast types*. Granular Matter, v. 21, n. 4, p. 1–17.
- Marangon, M. (2018). *Resistência ao cisalhamento dos solos*. Apostila Mecânica dos Solos II. ed. Juiz de Fora: Universidade Federal de Juiz de Fora - Faculdade de Engenharia - Núcleo de Geotecnologia, 2018. p. 101–115.
- Marigo, M.; Stitt, E. H. (2015). *Discrete Element Method (DEM) for Industrial Applications: Comments on Calibration and Validation for the Modelling of Cylindrical Pellets*. KONA Powder and Particle Journal, v. 32, n. 32, p. 236–252.
- Moraes, S. T.; Gay Neto, A.; Bernucci, L. L. B. (2020). *Particle shape and its importance to Discrete Element Modeling in the context of railway ballast simulation*. Proceedings of the Ibero-Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering, Foz do Iguaçu.
- Mortensen, J.; Faurholt, J. F.; Hovad, E.; Walther, J. H. (2021). *Discrete element modelling of track ballast capturing the true shape of ballast stones*. Powder Technology, v. 386, p. 144–153.
- Ngo, N. T.; Indraratna, B.; Rujikiatkarnjorn, C. (2014). *DEM simulation of the behaviour of geogrid stabilised ballast fouled with coal*. Computers and Geotechnics, v. 55, n. March 2019, p. 224–231.
- Paim Da Silva, F. H. (2018). *Estudo do comportamento de um lastro ferroviário sob carga repetida em modelo físico de verdadeira grandeza*. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- Paixão, A.; Resende, R.; Fortunato, E. (2018). *Photogrammetry for digital reconstruction of railway ballast particles – A cost-efficient method*. Construction and Building Materials, v. 191, p. 963–976.
- Reis, J. H. C. (2006). *Modelo de Atrito Estático em Interfaces de Contato entre Concreto e Areia*. p. 188.
- Roessler, T.; Richter, C.; Katterfeld A.; Will, F. (2019). *Development of a standard calibration procedure for the DEM parameters of cohesionless bulk materials – part I: Solving the problem of ambiguous parameter combinations*. Powder Technology, v. 343, p. 803–812.
- Rowe, A. P. W. (1962). *The stress-dilatancy relation for static equilibrium of an assembly of particles in contact*. Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences, v. 269, n. 1339, p. 500–527.

- Selig, E. T.; Waters, J. M. (1994). *Track Geotechnology and Substructure Management*. London: Thomas Telford Services Ltd.
- Stahl, M.; Konietzky, H. (2011). *Discrete element simulation of ballast and gravel under special consideration of grain-shape, grain-size and relative density*. *Granular Matter*, v. 13, n. 4, p. 417–428.
- Stark, T. D.; Swan, R. H.; Yuan, Z. (2014). *Ballast direct shear testing*. 2014 Joint Rail Conference.
- Suhr, B.; Six, K. (2020). *Simple particle shapes for DEM simulations of railway ballast: influence of shape descriptors on packing behaviour*. *Granular Matter*, v. 22, n. 2, p. 1–17.
- Tutumluer, E.; Huang, H.; Hashash, Y.M.A.; Ghaboussi, J. (2009). *AREMA Gradation Affecting Ballast Performance Using Discrete Element Modeling (DEM) Approach*. *Bifurcations*, v. 45, n. 1, p. 1–19.
- Wang, Z.; Jing G.; Yu, Q.; Yin, H. (2015). *Analysis of ballast direct shear tests by discrete element method under different normal stress*. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, v. 63, p. 17–24.
- Wensrich, C. M.; Katterfeld, A. (2012). *Rolling friction as a technique for modelling particle shape in DEM*. *Powder Technology*, v. 217, p. 409–417.
- Zhao, S.; Zhou, X.; Liu, W. (2015). *Discrete element simulations of direct shear tests with particle angularity effect*. *Granular Matter*, v. 17, n. 6, p. 793–806.