

ANÁLISE COMPUTACIONAL DA OPERAÇÃO DE UM VIRADOR DE VAGÕES DE MINÉRIO UTILIZANDO A INTEGRAÇÃO DOS MÉTODOS NUMÉRICOS DE ELEMENTOS DISCRETOS E FINITOS E DA DINÂMICA MULTICORPOS

Daniel Borges de Oliveira, danielbo1709@gmail.com¹

Matheus Dutra Baptista Oliveira, matheus.mdbo@gmail.com¹

Luiza Fabrino Favato, lfavato@gmail.com¹

Claysson Bruno Santos Vimieiro, claysson@pucminas.br¹

Anderson Andrade Gomes, anderson.gomes.894962@sga.pucminas.br¹

Jánes Landre Junior, janes@pucminas.br¹

Luiz Henrique Andrade Maia, luismaia@pucminas.br¹

¹Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Av. Dom José Gaspar, 500 Coração Eucarístico, CEP 30535-901, Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil.

Resumo: O objetivo deste trabalho foi identificar as componentes das forças resultantes e suas variações no contato entre o piso e o suporte de um virador de vagões. Essas forças resultantes foram obtidas por uma análise numérica do processo de descarregamento de minério para a condição de operação mais severa em que a coesão do material foi máxima. A análise numérica foi realizada utilizando a Dinâmica Múltiplos Corpos (MBD) integrada ao acoplamento dos Métodos dos Elementos Discretos (DEM) e Elementos Finitos (FEM). A integração dos métodos numéricos à dinâmica foi realizada para auxiliar estudos mais acurados em relação a condição real de operação do virador de vagões. Na integração entre o DEM-FEM as forças de contato extraídas da parede granular, que representa o vagão, da simulação DEM foram importadas no estudo FEM. Nesse último foram definidas as condições de contorno do vagão com os grampos do virador e foram extraídas as reações ao longo do tempo nas quatro regiões de contato dos grampos de fixação. Essas reações foram importadas para o estudo MBD e foi observada a dinâmica do conjunto durante o processo de rotação da estrutura ao longo do tempo e foram obtidas as variações das componentes das forças resultantes sobre a junta de contato entre o piso e o suporte do virador de vagões. Para a realização do estudo foram utilizados os softwares open-source LIGGGHTS-PUBLIC 3.7, code_aster 13.4 e o software versão academic research do ANSYS Mechanical APDL 19.0 para as simulações DEM, FEM e MBD respectivamente.

Palavras-chave: Método de Elementos Discretos, Método de Elementos Finitos, Dinâmica Múltiplos Corpos, Virador de Vagões, Integração

1. INTRODUÇÃO

As exportações brasileiras de minério de ferro atingiram um volume recorde de 373,962 milhões de toneladas em 2016, alta de 1,7% em relação a 2015, segundo dados divulgados pelo Ministério da Indústria, Comércio Exterior e Serviços. A cadeia produtiva de uma mineradora depende que todas as etapas estejam em perfeito funcionamento. Um dos equipamentos de extrema importância dessa cadeia é o virador de vagões, por estar posicionado no final do processo. Esse equipamento é utilizado para realizar a extração do minério dos vagões que chegam das minas de exploração mineral. Essa extração é realizada através do giro dos vagões até que o material se desprenda e seja despejado nas correias transportadoras, que por sua vez, transportam o minério para ser embarcado nos navios ou para ser direcionado para empresas siderúrgicas. Qualquer que seja o destino do material, atrasos na operação podem gerar multas que podem chegar a casa dos milhões de dólares. Apesar das paradas de manutenção preventivas serem necessárias elas não devem ser recorrentes nem longas e as paradas corretivas devem ser evitadas. Isso faz com que haja um esforço considerável por manter os viradores de vagões em perfeitas condições de operação.

Apesar da simplicidade do equipamento e da operação, as solicitações e cargas movimentadas por um virador de vagões são bastante consideráveis e este opera em condições extremamente adversas. Um virador de vagões típico operado pela empresa Vale descarrega dois vagões simultaneamente, cada um carregado, em média, com cem toneladas de minério de ferro. Os ciclos de operação são de trinta segundos aproximadamente. Como o minério transportado pelos

vagões possui características variadas, como por exemplo variações de granulometria e umidade, o esforço gerado sobre a estrutura do vagão pode, em alguns momentos, ser superior ao estipulado no projeto. Isso ocorre devido a complexidade de transporte e manipulação de materiais granulares. Dessa forma, existe um crescente interesse no desenvolvimento de métodos matemáticos capazes de prever o comportamento desses fenômenos físicos complexos.

As simulações multifísicas representam uma forma extremamente complexa de simulação. O acoplamento entre métodos numéricos distintos possibilita uma visão genérica e mais precisa do fenômeno em estudo para equipes de projetos de engenharia. O DEM (Discrete Element Method), por exemplo, é uma técnica de simulação de fluxo de materiais granulares e interações de partículas, podendo ser partícula a partícula ou partícula sobre uma geometria. É possível, por exemplo, obter as cargas superficiais originadas pelo impacto do material granular sobre uma geometria que é definida como parede granular. Já o FEM (Finite Element Method) é um modelo matemático, no qual é possível extrair, por exemplo, as tensões, deformações e deslocamentos de uma geometria contínua no qual é aplicada uma carga. Com o acoplamento de ambos métodos é possível obter as tensões, deformações e deslocamentos de uma geometria contínua que recebe impacto de um material granular. Em complemento, com o MBD (Multibody Dynamics) é possível, por exemplo, obter a somatória das resultantes das forças sobre uma estrutura que possua graus de liberdade em regiões de contato que são definidos como juntas de conexão. Essa é a situação na qual os componentes do virador de vagão estão expostos. Com essa análise computacional DEM-FEM-MBD causas de falhas podem ser identificadas e soluções podem ser implementadas.

2. PROBLEMA

Neste trabalho teve-se como objetivo obter as variações das componentes das forças de reação na junta de conexão entre o solo e o suporte dos viradores de vagões, sendo que estas forças são resultantes de dois acoplamentos de modelos matemáticos, nos quais é simulado o comportamento do fluxo do material granular ao se rotacionar a estrutura do virador de vagões. O primeiro estudo acopla os métodos DEM e FEM e como resultados temos as reações nas regiões dos grampos de fixação. O segundo acopla os métodos FEM e MBD, no qual são inseridas as componentes das forças nos grampos de apoio dos vagões extraídas do FEM no MBD. O acoplamento dos métodos matemáticos de Elementos Finitos, Discretos e Múltiplos Corpos foi desenvolvido para ser uma ferramenta do modelamento matemático do fenômeno físico deste descarregamento. O material granular utilizado na simulação foi calibrado com as propriedades do tipo SBFA com 11% umidade. O equipamento modelado foi o virador de vagões utilizado no porto de Tubarão pela mineradora Vale, conforme Fig. 1.

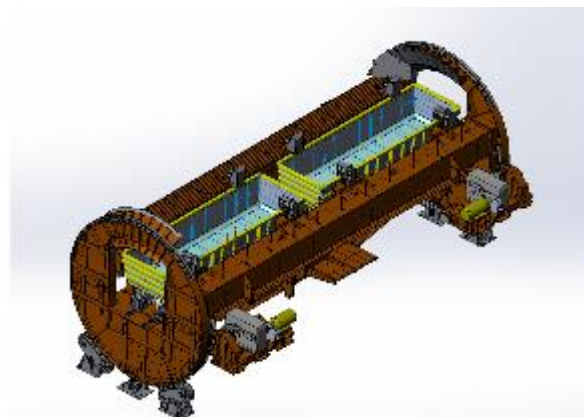


Figura 1. Objeto de Estudo

3. REVISÃO DE LITERATURA

O software Code_Aster Open Source - general FEA software v13.4 (code_aster 2017) é um solver FEM. Ele é open-source, escrito, majoritariamente, nas linguagens Fortran e Python, desenvolvido pela empresa Électricité de France. Esse solver possui algoritmos para solução de muitos problemas de engenharia, como por exemplo nas áreas de estruturas, térmica, sísmica, fratura, dano e fadiga.

O software LIGGGHTS-PUBLIC 3.7 é um solver DEM. Trata-se de um software open-source desenvolvido pela empresa austríaca DCS Computing gmbh, baseado no programa LAMMPS e escrito na linguagem c++. O objetivo dos desenvolvedores desse software foi de melhorar e otimizar o algoritmo do software de dinâmica molecular LAMMPS para simulações granulares. As funcionalidades adicionadas incluem a importação e movimentação de geometrias CAD complexas, inclusão de modelos de contatos otimizados, modelos de transferência de calor entre os corpos do sistema, etc. Descrições sobre o software podem ser encontradas em Kloss *et al.* (2012) e Favato *et al.* (2016).

Sistemas de Dinâmica de Múltiplos Corpos (MBD) consistem na interligação entre corpos rígidos através de juntas e restrições de movimentos. Uma análise em múltiplos corpos descreve como um sistema se comporta dinamicamente quando submetidos a forças externas. Alguns softwares como ADAMS (Automated Dynamic Analysis of Mechanical Systems), DADS, Comsol, ANSYS Rigid Body Dynamics são capazes de fazer este tipo de análise, conforme dito por Tyler Ross Lambert *et al.* (2017).

Muitas pesquisas de movimentação e manipulação de material granular utilizam softwares que possuem o acoplamento DEM-FEM nativo ao software utilizado. Tal procedimento impossibilita a reutilização dos resultados e informações do estudo DEM ou FEM em outras aplicações. Uma alternativa para uma maior flexibilidade é o acoplamento de solvers de análise numérica já existentes através de protocolos específicos. Nesta linha de pensamento Katterfeld e Dratt (2016) desenvolveram um acoplamento FEM-DEM, tendo como softwares-base ANSYS e LIGGGHTS. A validação desse estudo citado se deu a partir de um simples teste onde um feixe fixo sob carga constante foi utilizado para verificar os algoritmos de acoplamento. Villard *et al.* (2008) por sua vez, desenvolveu um modelo numérico FEM-DEM que levou em conta o comportamento de tração do geossintético e o atrito da interface entre o solo.

Partindo para um estudo realizado apenas com base no método DEM, Mishra *et al.* (2015), com o auxílio do software LIGGGHTS, analisou a mistura de partículas em um misturador de tambor rotativo, buscando entender o mecanismo da formação da zona morta e o grau de mistura. Em ambos os casos a análise granular do escoamento se fez necessária.

No âmbito ferroviário é possível observar a repercussão causada pela parada do virador de vagões, muitas vezes causadas por solicitações excessivas sofridas pela estrutura durante o escoamento do material. Oliveira e Guachalla (2013) destacaram os efeitos deste fenômeno analisando que a redução de 5% da quantidade global de manutenções corretivas do virador de vagões implicaria na redução média de 9,4% da fila para descarga, o que favorece as relações entre as reduções do tempo de ciclo dos trens e o custo de transporte. Referindo-se aos gastos gerados por manutenções e descarrilamentos ocorridos em viradores de vagão, Dobson (2016) destacou as perdas anuais de aproximadamente 450 mil toneladas ocorridas, por exemplo em Dampier, na Austrália, consequentemente gerando gastos de aproximadamente US \$ 24 milhões.

Palermo, *et al.* (2013) propuseram um modelo para realizar estudos da dinâmica de contato de engrenagens de dentes retos e helicoidais tridimensionais de maneira que esses elementos fossem considerados rígidos, e a partir dessa consideração, foi possível avaliar melhor os efeitos instantâneos do contato. Com a carga computacional de simulação sendo reduzida foi possível melhorar o nível de detalhamento dos elementos. O modelo criado atua diretamente na rigidez da malha criada para a simulação em múltiplos corpos, por este motivo o modelo pode ser expandido e aplicado a elementos em geral sem restrição a priori. Como resultados foram obtidos os efeitos dinâmicos relativos a inércia e amortecimento, a carga não linear dependente das modificações micro geométricas, efeitos do desalinhamento e a posição axial do ponto de contato entre os dentes de engrenagem.

Já Betsch e Sängner (2013) utilizaram sistemas de múltiplos corpos para definir uma formulação para a distribuição de torques internos em estruturas livres de rotação, a formulação foi aplicada em múltiplos corpos rígidos e flexíveis. O estudo utilizou apenas coordenadas naturais para descrever sistemas complexos. Foi tido como conclusão a noção da importância da aplicação dos torques externos bem consistentes na formulação de sistemas múltiplos corpos sem rotação, as vezes até tratando os dados relativos aos torques para um controle ótimo dos múltiplos corpos flexíveis.

4. METODOLOGIA

A integração dos métodos numéricos de Elementos Discretos e Finitos e da Dinâmica Multicorpos foi utilizada como ferramenta de auxílio para a execução do estudo, para tal foram utilizados os softwares open sources LIGGGHTS-PUBLIC 3.7 e code_aster 13.4 na plataforma Debian 8 x64 em um computador DELL Tower 3620, para as simulações DEM e FEM respectivamente. E o software ANSYS Mechanical APDL 19.0 versão academic research na plataforma Windows 10 x64 foi utilizado para a simulação MBD. O fluxograma apresentado na Fig. 2 descreve os passos tomados para viabilizar o estudo proposto.

A primeira etapa da simulação DEM consistiu em realizar a calibração do estudo, de forma a obter um modelo do material granular que se comporte de acordo com as características de escoamento do material físico. Para realizar a calibração, o diâmetro das partículas introduzidas no sistema foi superior em relação aos valores físicos reais. Este procedimento é apresentado por diversos autores (Rackl *et al.*, 2017, Sykut *et al.*, 2007, Xavier *et al.*, 2017). Para o presente estudo foi utilizado partículas no diâmetro de 20mm. No procedimento de calibração é comum obter valores das propriedades do material (e.g. coeficiente de atrito, energia de coesão, etc.) acima dos valores observados em experimentos práticos, conforme Rackl *et al.* (2017). Isso ocorre porque o que foi calibrado foi a característica de fluxo e escoamento e não todas as propriedades físicas e químicas do material granular.

O ciclo de operação considerado consiste em um vagão do tipo GDE carregado com cem toneladas de material do tipo SBFA com condição de umidade em 11%. Nessas condições o material apresenta ângulo de repouso de aproximadamente 37 graus. A Figura 3 exibe o resultado do processo. A linha da figura indica o ângulo de repouso de aproximadamente 37 graus encontrado durante a calibração.

A operação de descarregamento é dividida em duas etapas. Na primeira etapa tem-se a inserção de material no interior da geometria. Esta etapa ocorre em 10 segundo e são inseridas 20 toneladas de material a cada 2 segundos. Ao término dessa fase inicia-se a fase de giro. Para essa etapa foi aplicada uma rotação na geometria no sentido horário até

170° e em seguida foi aplicado um giro no sentido anti-horário até retomar ao estado inicial, conforme a curva de velocidade angular do Fig. 4.

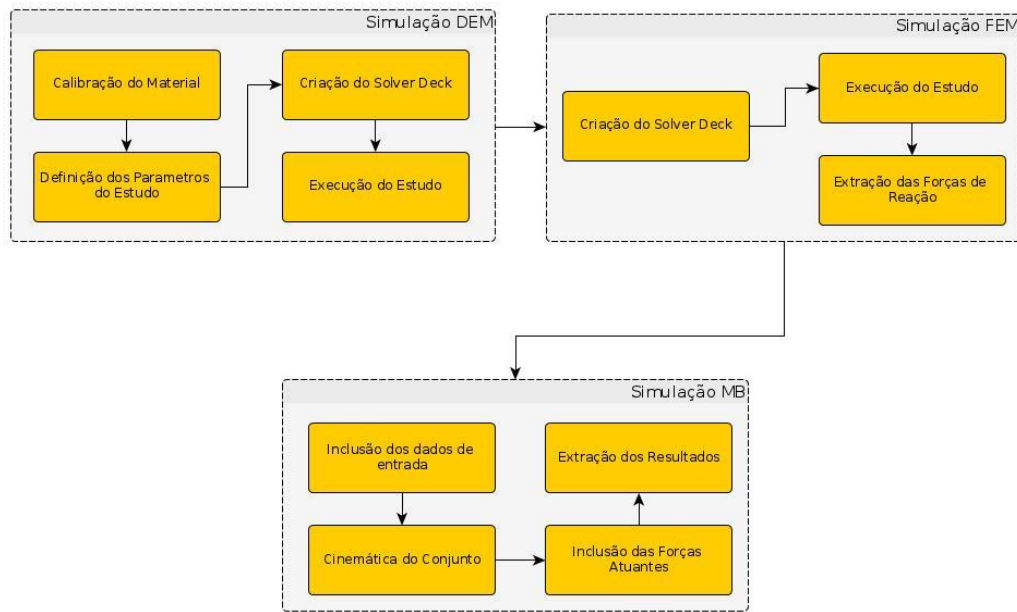


Figura 2. Fluxograma de Trabalho



Figura 3. Análise do ângulo de repouso do material granular

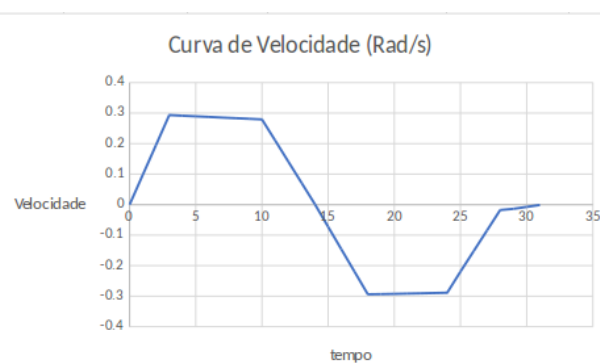


Figura 4. Análise do ângulo de repouso do material granular

Durante a operação de giro foi modelado a influência de uma vibração externa na frequência de 500 Hz com amplitude de 5mm que fica ativo até o término do deslocamento. Essa vibração foi implementada para representar o acionamento de um motor vibratório presente no projeto do virador.

O solver deck utilizado no estudo DEM foi desenvolvido utilizando as informações adquiridas da calibração, os parâmetros do estudo e as condições de operação definidas. Para a condição de contato foi utilizado o modelo de Hertz-Midlin com o modelo de coesão SJKR (Simplified Johnson-Kendall-Roberts). As condições de atrito e coesão foram extraídas do processo de calibração.

O tempo necessário para a execução do estudo DEM foi de 330 minutos e 46 segundos. Foram inseridas 580.175 partículas no sistema. Para esta etapa foi necessário modificar o código fonte do software LIGGGHTS-PUBLIC 3.7 de maneira a possibilitar a extração da condição de carregamento durante o processo de despejo do material granular. Foi modificado o arquivo responsável por gerar os arquivos de resultados com as tensões de contato. Mais detalhes sobre o desenvolvimento deste algoritmo podem ser encontrados em *Daniel et al.* (2016). As tensões de contato foram salvas em um arquivo de texto em que é armazenado um Python List que representa o carregamento de cada elemento da malha em cada instante de cálculo Eq. (1).

$$Forces = \begin{bmatrix} Fx_1^1 & Fy_1^1 & Fz_1^1 & Fx_2^1 & Fy_2^1 & Fz_2^1 & \cdots & Fx_n^1 & Fy_n^1 & Fz_n^1 \\ Fx_1^2 & Fy_1^2 & Fz_1^2 & Fx_2^2 & Fy_2^2 & Fz_2^2 & \cdots & Fx_n^2 & Fy_n^2 & Fz_n^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ Fx_1^n & Fy_1^n & Fz_1^n & Fx_2^n & Fy_2^n & Fz_2^n & \cdots & Fx_n^n & Fy_n^n & Fz_n^n \end{bmatrix} \quad (1)$$

Cada subscrito representa o número do elemento na variável de carga e cada sobrescrito representa o número do timestep armazenado. Esse carregamento é importado no estudo FEM e aplicado na malha de elementos finitos compatível à parede granular do estudo DEM.

Para a simulação FEM foi necessário desenvolver um acoplamento em linguagem python 2.7. O solver suporta a linguagem nativamente e não foi necessário modificar o código fonte. O carregamento extraído no estudo DEM foi importado no estudo FEM utilizando estruturas de controle FOR que foram responsáveis por aplicar os carregamentos em cada direção (X, Y e Z) em cada elemento da malha. Esse processo gerou um solver deck de 41.779 linhas. A quantidade grande linhas é devido a quantidade de funções de carga geradas (3 funções para cada elemento além de 3 carregamentos). As funções de carga são o resultado do processo de transposição da Python list gerada no estudo DEM. A Figura 5 ilustra a função de carga em cada timestep para o elemento 53.

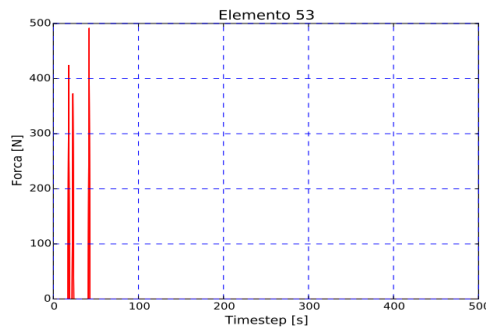


Figura 5. Força x Timestep do elemento 53

Após a criação do solver deck foi iniciada a execução do estudo. A malha utilizada foi extraída do estudo DEM. É importante que a malha seja criada no estudo DEM, pois é necessário haver uma compatibilidade entre os ID's dos elementos nos dois estudos, visto que a estratégia adotada visa aplicar as cargas geradas no DEM nas mesmas posições de malha no estudo FEM. O elemento utilizado é do tipo DTK (*Discrete Kirchhoff*), que é um elemento de placa tridimensional de primeira ordem. A espessura de casca utilizada foi de 10mm. Foram definidas condições de engaste nas quatro regiões tingidas em amarelo exibidas na Fig. 6.

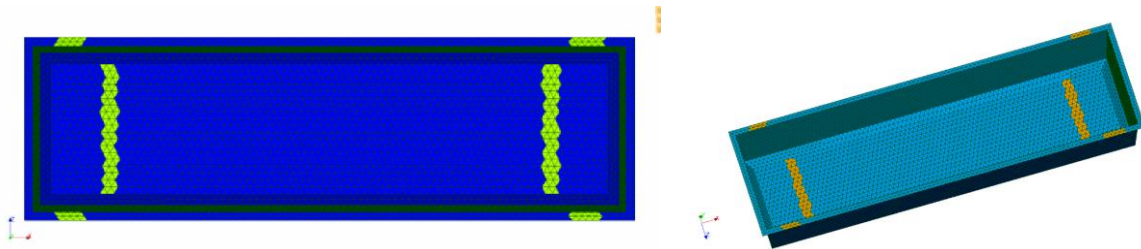


Figura 6. Regiões de engaste definidas para o estudo FEM

Por fim, as funções de carga são definidas elemento por elemento e a resolução do sistema de equações é iniciada. A modelagem utilizada foi estática não linear (STAT_NON_LINE), ou seja, comportamento de material e comportamento geométrico de pequeno deslocamento. O sistema foi resolvido utilizando um solver direto.

Como resultado, foram extraídas as reações nos apoios que representam as regiões onde estão os grampos de fixação do vagão, conforme Fig. 7. Essas reações foram extraídas para cada grampo em arquivo de texto em formato tabular e esse arquivo de texto foi importado no estudo MBD.

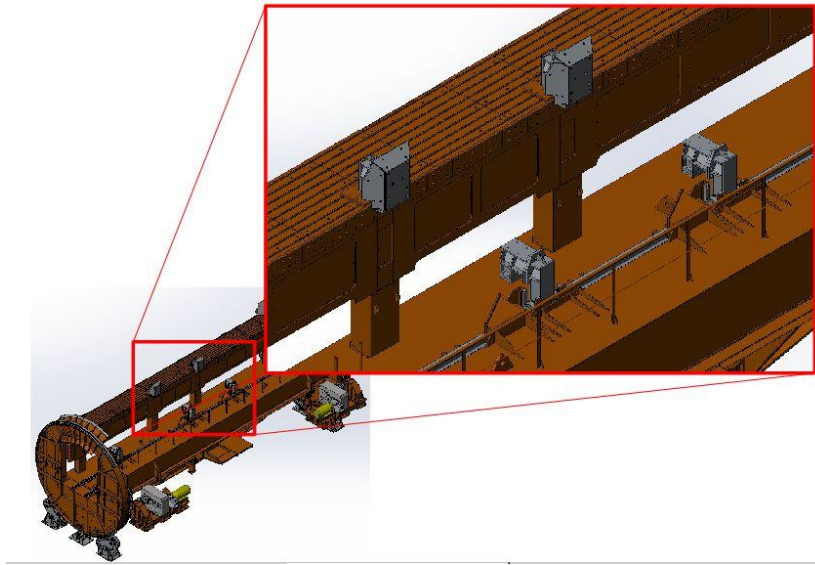


Figura 7. Grampos de Fixação do Virador de Vagões

No estudo em MBD foram inseridas todas as juntas, conexões e contatos do modelo, e especificados seus respectivos graus de liberdade e tipos de contato, conforme pode ser visto na Fig. 8. A velocidade de rotação utilizada foi a mesma utilizada nos modelos FEM e DEM, simulando assim a cinemática do giro do processo de descarregamento do virador de vagões de forma a condizer com a condição de operação do mesmo. Para esta análise MBD todos os corpos foram considerados rígidos.

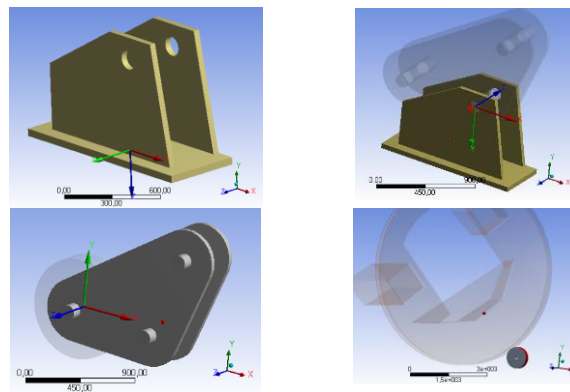


Figura 8. Juntas, conexões e contatos do virador de vagões

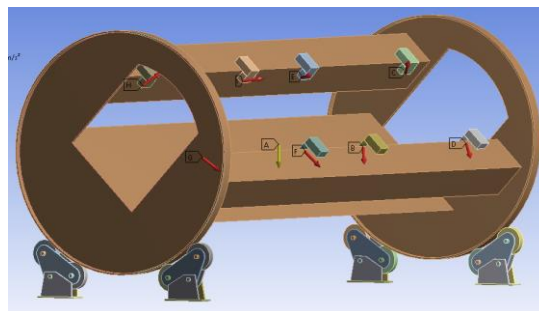


Figura 9. Componentes das Forças Resultantes Extraídas da Simulação FEM

Após a definição dos parâmetros iniciais, as componentes das forças resultantes da análise em FEM foram inseridas nos grampos, ilustrado na Fig. 9, sendo que foi considerada a variação das forças em relação a posição da estrutura do virador de vagões e ao tempo de operação.

5. RESULTADOS

A Figura 10 apresenta as condições do estudo DEM nos timesteps 50 (10 segundos), 75 (15 segundos), 80 (16 segundos) e 88 (17.6 segundos).

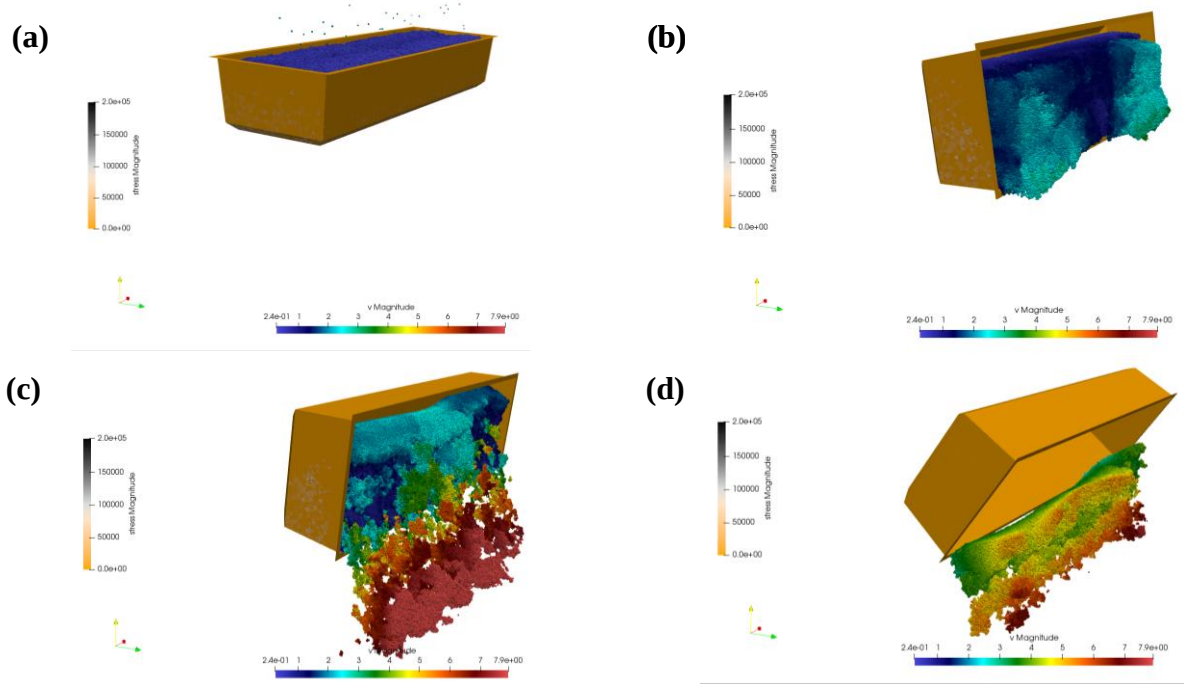


Figura 10. Simulação DEM nos timesteps (a) 50, (b) 75, (c) 80 e (d) 88.

Nessas imagens é possível observar o fluxo de material do estudo DEM. A escala de cores na horizontal exibe a velocidade em metros por segundo das partículas do sistema no momento indicado. A escala na vertical exibe as forças de contato geradas na geometria de estudo durante o contato das partículas com essa geometria. Deve-se observar que nesta escala está indicado que se trata de tensão de contato, mas o código fonte do software foi modificado para extrair as forças de contato.

A Figura 11 exibe os resultados da simulação FEM nos timesteps 50 (10 segundos), 75 (15 segundos), 80 (16 segundos) e 88 (17.8 segundos). As regiões das malhas onde as cores estão em destaque representam as reações de apoio calculadas nas regiões de engaste que representam cada grampo de fixação do equipamento. Nesta figura é possível observar a variação nas reações devido a variação de carregamento ocasionado devido ao processo de descarregamento.

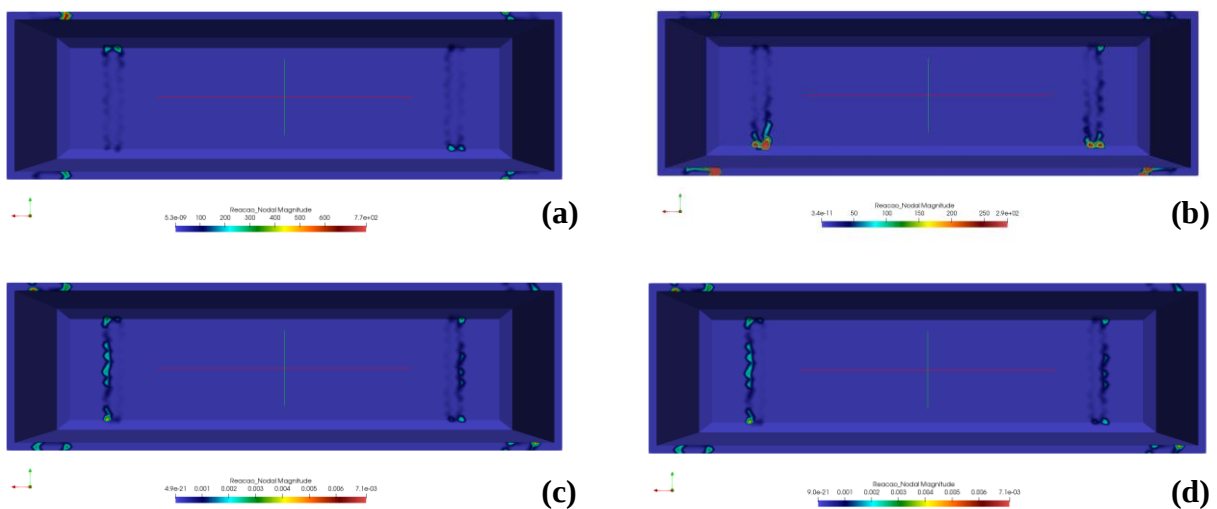


Figura 11. Simulação FEM nos timesteps (a) 50, (b) 75, (c) 80 e (d) 88.

Para obter um único vetor resultante em cada região de engaste, com um intervalo de 1s entre os resultados, as reações nos nós obtidas pela simulação FEM, nessas regiões, foram extraídas e somadas em cada uma de suas componentes. Os resultados desta soma foram extraídos em formato tabular. A Tabela 1 exibe esse somatório nos timesteps 1, 2 e 3 para a região de engaste “grampo0”. Essas informações foram organizadas e adicionadas no estudo MBD.

Tabela 1: Somatório das componentes das forças de reação na região de engaste grampo0

Timestep	Força em X	Força em Y	Força em Z	Momento em X	Momento em Y	Momento em Z
1	-5.502	-0.6589	-5.691	-7.361	14.06	5.494
2	-177.9	196.5	-41.8	-298.8	-196.9	974
3	-98.97	109.7	-57.49	-213.3	4.514	536.1

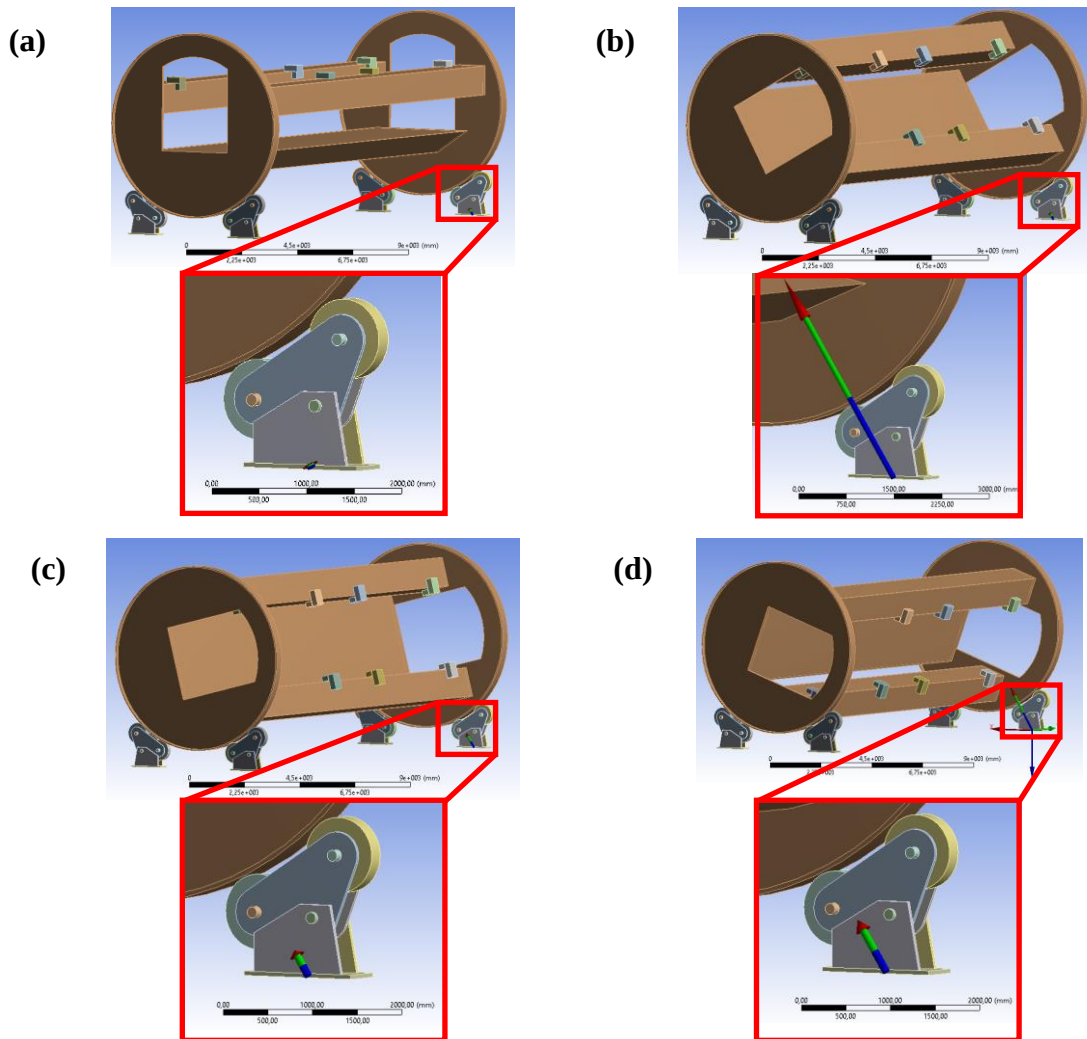


Figura 12. Força total resultante do estudo MBD em (a) 0s, (b) 2s, (c) 5s e (d) 6s de operação

Após a importação destes dados no estudo MBD, foi elaborada a análise matemática e extraídas as reações nas juntas de contato entre o suporte do virador e o solo, como mostra a Fig. 12, onde no giro da estrutura ao longo do tempo o vetor resultante das forças resultantes varia. A variação das componentes deste vetor resultante é demonstrada pelo Fig. 13.

O modelo matemático em MBD é capaz de realizar um somatório de todas as forças aplicadas nos grampos e convertê-las às diversas regiões do virador de vagões ao identificar as coordenadas e geometrias utilizadas. Os resultados, ao serem convertidos em gráfico, nos dá uma percepção da realidade dinâmica da operação, obtendo assim as condições mais críticas no tempo relativo. Com a interpretação gráfica pode-se entender a relação entre as regiões de maiores tensões com as cargas dinâmicas aplicadas, e a partir disto prever soluções para amenizar esses picos e ainda obter uma previsão de falha dos componentes.

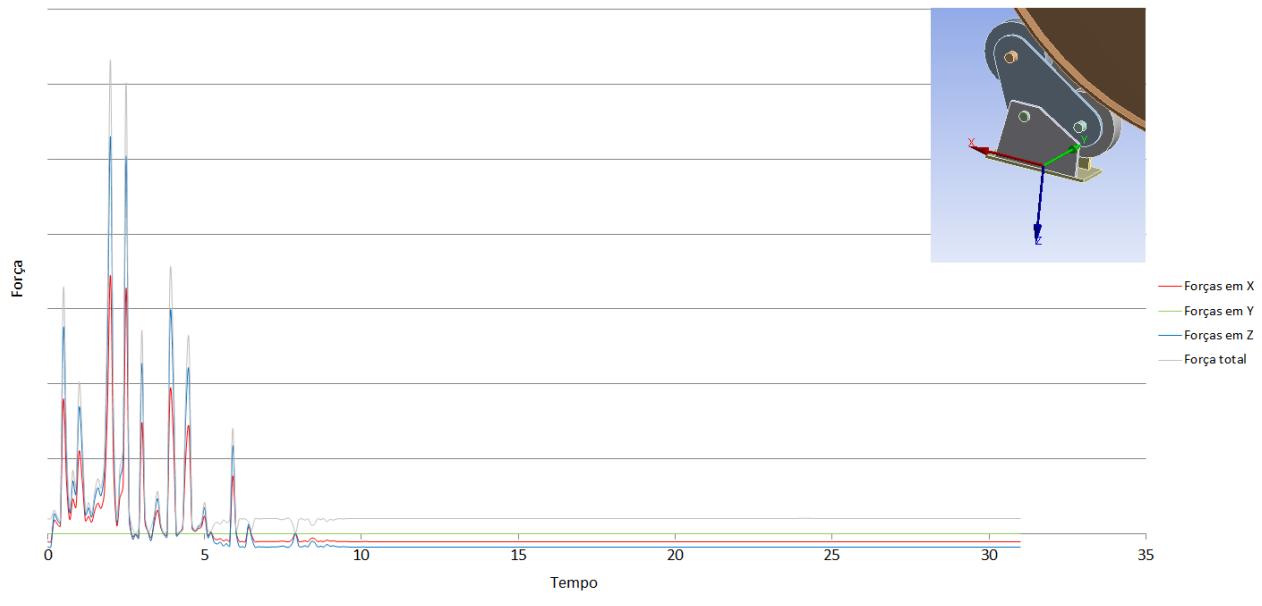


Figura 13. Força em função do tempo na junta de conexão Virador de vagões-Solo

6. CONCLUSÃO

Com o estudo DEM foi possível obter as forças de contato entre as partículas e a geometria de estudo para um ciclo padrão de operação do virador de vagões. O material granular foi calibrado para apresentar o ângulo de repouso de aproximadamente 37 graus condizente com o material estudado. Essas forças de contato foram aplicadas com sucesso em um estudo FEM. As forças de contato foram extraídas e foi realizado um somatório de forças de reação nas regiões de engastes da geometria para obter um vetor resultante em cada região. Essas informações foram armazenadas em um arquivo texto, de forma a ter-se os vetores resultantes de cada região de engaste e em cada instante da simulação FEM, com intervalos de 1 segundo. Essas cargas dinâmicas sobre as regiões dos engastes, foram inseridas no modelo MBD e foram extraídas as resultantes no contato entre solo e suporte da estrutura do virador de vagões.

Com este trabalho foram identificadas as componentes e as variações das forças resultantes na junta de contato entre o solo e o suporte do virador de vagões, no processo de operação do descarregamento do vagão, tipo GDE, de cem toneladas de minério, do tipo SBFA, com condição de maior coesão com a umidade de 11%. Esses resultados foram obtidos pelo acoplamento DEM-FEM-MBD, o que possibilitou uma análise abrangente da variação das cargas durante a operação de descarregamento do equipamento, de forma a identificar e considerar a influência das cargas dinâmicas provocadas pelo escoamento do material granular.

7. AGRADECIMENTOS

A Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais – PUCMINAS e aos seus funcionários e professores, a empresa Vale S. A., a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais – FAPEMIG e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq pelo apoio e as contribuições relacionadas à realização da pesquisa e do artigo.

8. REFERÊNCIAS

- Rackl, M., Hanley e K. J. A., 2017. “A methodical calibration procedure for discrete element models.”, Powder Technology, Elsevier Science, v. 307, 02.
- Sykut, J., Molenda, M., Horabik, J., 2007 – “Discrete Element Method (Dem) As A Tool For Investigating Properties Of Granular Materials”, Polish Journal Of Food And Nutrition Sciences. Vol. 57, No. 2(A), pp. 169-173.
- Xavier, B., Sylvain, M., Ndiaye, A., Peres, V., Bonnefoy, O., 2017. “Calibration of DEM parameters on shear test experiments using Kriging method”, Powders and Grains 2017 – 8th International Conference on Micromechanics on Granular Media, Jul 2017, Montpellier, France. EDP Sciences, EPJ Web of Conferences, 140 (15016). Disponível em: < <https://epjwoc.epj.org/articles/epjconf/abs/2017/09/epjconf162369/epjconf162369.html> >.
- Kloss, C., Goniva, C., Hager, A., Amberger, S., Pirker, S., 2012. "Models, algorithms and validation for opensource DEM and CFD-DEM", Progress in Computational Fluid Dynamics, An Int. J. 2012 - Vol. 12, No.2/3 pp. 140 – 152.

- code_aster 2017. Disponível em: <https://www.code-aster.org/V2/UPLOAD/DOC/Presentation/plaquette_aster_en.pdf>.
- Favato, L., Oliveira, D. B., Junior, J. L., Junior, P. A. M., Vimieiro, C. B. S., 2016. “Descrição da operação do software liggghs®- public para a deposição de partículas com coesão pelo dem em uma caçamba de caminhão”, Proceedings of the XXXVII Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering. November 6-9. Disponível em: <<http://periodicos.unb.br/index.php/ripe/article/view/23645/16948>>.
- Oliveira, D. B., Favato, L., Junior, J. L., Junior, P. A. M., Vimieiro, C. B. S., 2016. “Desenvolvimento da integração med-mef (liggghs r -public e code_aster) para a análise da deposição de partículas com coesão em uma caçamba”. V. 2, n.31. Disponível em: < <http://periodicos.unb.br/index.php/ripe/article/view/24643>>.
- Oliveira, L. K. e Guachalla, W., 2013. “Evaluation of the operation of the car dumper in queue trains to unloading of product: a study using simulation”, Disponível em: <http://portal.antt.gov.br/index.php/content/view/26478/Avaliacao_da_operacao_do_virador_de_vagoes_na_fila_d_e_trens_para_descarga_de_produtos_um_estudo_utilizando_simulacao.html>
- Palermo, A., Mundo, D., Hadjit, R., & Desmet, W., 2013. ”Multibody element for spur and helical gear meshing based on detailed three-dimensional contact calculations”, Mechanism and Machine Theory, 62, 13–30. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2012.11.006>>.
- Betsch, P., & Sanger, N., 2013. “On the consistent formulation of torques in a rotationless framework for multibody dynamics”, Computers and Structures, 127, 29–38. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2012.10.005>>.
- Lambert, T.R., Gurley, A. e Beale, D., 2017. “SMA actuator material model with self-sensing and sliding-mode control; experiment and multibody dynamics model”, Smart Mater. Struct. 26 035004, 12pp. Disponível em: <[doi:10.1088/1361-665X/aa5485](https://doi.org/10.1088/1361-665X/aa5485)>

9. RESPONSABILIDADE AUTURAL

COMPUTATIONAL ANALYSIS OF THE OPERATION OF A ORE CAR DUMPER USING THE INTEGRATION OF NUMERICAL METHODS OF DISCRETE AND FINITE ELEMENTS AND MULTIBODY DYNAMICS

Daniel Borges de Oliveira, danielbo1709@gmail.com¹
 Matheus Dutra Baptista Oliveira, matheus.mdbo@gmail.com¹
 Luiza Fabrino Favato, lfavato@gmail.com¹
 Claysson Bruno Santos Vimieiro, claysson@pucminas.br¹
 Anderson Andrade Gomes, anderson.gomes.894962@sga.pucminas.br¹
 Janes Landre Junior, janes@pucminas.br¹
 Luiz Henrique Andrade Maia, luismaia@pucminas.br¹

¹Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Av. Dom José Gaspar, 500 Coração Eucarístico, Zip-code 30535-901, Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil.

Abstract. The objective of this work was to identify the components of the resulting forces and their variations in the contact between the floor and the car dumper support, these resulting forces were obtained by a numerical analysis of the ore unloading process for the most severe operation condition in that the cohesion of the material was maximal. The numerical analysis was performed using the Multiple Body Dynamics (MBD) integrated to the discrete elements (DEM) and Finite Element (FEM) coupling. The integration of the numerical methods with the dynamics was carried out to assist more accurate studies in relation to the actual condition of the operation of the car dumper. In the integration between the DEM-FEM the contact forces extracted from the granular wall, representing the wagon, of the DEM simulation were imported into the FEM study. In this last one the boundary conditions of the wagon with the dumper clips were defined and the reactions were extracted over time in the four regions of contact of the fixation clips. These reactions were imported into the MBD study and the dynamics of the assembly were observed during the process of rotation of the box over time and variations of the components of the resulting forces were obtained on the contact joint between the floor and the car dumper. The open source software LIGGGHTS-PUBLIC 3.7, code_aster 13.4 and the academic research software of ANSYS Mechanical APDL 19.0 were used for the DEM, FEM and MBD simulations, respectively.

Keywords: Discrete Element Method, Finite Element Method, Multiple Bodies Dynamics, Car Dumper, Integration

Os autores são os nicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.