

SIMULAÇÃO DO CARREGAMENTO DE PELOTAS DE MINÉRIO DE FERRO EM NAVIOS DE PORÃO CONJUGADO COM O MÉTODO DE ELEMENTOS DISCRETOS *

Guilherme Pereira de Oliveira¹
Rodrigo Magalhães de Carvalho²
Brayan Pastro Machado³

Resumo

O Método de Elementos Discretos tem sido utilizado com sucesso na simulação de processos industriais, principalmente no manuseio de materiais da indústria mineral. O presente trabalho tem como objetivo aplicar o Método dos Elementos Discretos com abordagem da partícula macia para simular a operação de estivagem / carregamento de navios com pelotas em embarcações com porões conjugados de forma a aproveitar ao máximo o espaço dos porões. Devido ao alto custo computacional para simular o porão inteiro do navio com partículas de tamanho real, foi necessário utilizar partículas em escala e adaptar os parâmetros de contato para obter o mesmo comportamento de partículas com tamanhos reais. Com as partículas em escala, foi possível utilizar um valor para o passo de tempo de integração relativamente alto, ainda sendo adequado para garantir que pequenas sobreposições entre partículas/fronteiras fossem contempladas em cada etapa de cálculo. As simulações permitiram constatar que pequenas variações no fator de estiva são suficientes para inviabilizar o cumprimento em um plano de carregamento, além de verificar a influência que cada passada do carregamento gera nas outras passadas devido ao escoamento das pelotas.

Palavras-chave: Método dos Elementos Discretos; Carregamento de Navios; Manuseio de Granéis.

SIMULATION OF IRON ORE PELLETS LOADING IN DOUBLE-HATCH HOLD SHIPS APPLYING DISCRETE ELEMENTS METHOD

Abstract

The Discrete Element Method (DEM) have been used successfully to simulate industrial processes, especially handling materials of mineral industry. This paper aims to apply DEM soft particle approach to simulate iron ore pellets loading in double-hatch hold ships intending make the most of the useful space in the hold.

Due the high computational cost to simulate a digital twin of the hold with particles in real size, it was necessary use scaled particles and adapt the contact parameters to obtain the same behavior of real size particles. The scaled particles allowed to use a relatively high value to integration time step, still being appropriate to ensure that small overlapping between particles/boarding were taken in the calculation step. The simulations allowed conclude that small variations in the stowage factor are enough to become a loading plan infeasible, besides to see the influence of each loading turn in the other ones because the pellets flowing.

Keywords: DEM; Ship Loading; Bulk Handling; Digital Twin.

¹ Engenheiro Mecânico, mestrando em Engenharia Metalúrgica e de Materiais. Vale S/A. Diretoria Corredor Sudeste. Vitória, Espírito Santo, Brasil.

² Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Professor Adjunto, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil.

³ *Engenheiro Mecânico. Vale S/A. Diretoria Corredor Sudeste. Vitória, Espírito Santo, Brasil.*

1 INTRODUÇÃO

O carregamento de navios nos terminais de graneis sólidos é realizado por equipamentos denominados Carregadores de Navios, os quais via de regra são compostos de Transportadores de Correia capazes de deslocar seu ponto de descarga em três graus de liberdade. Tal mobilidade permite os operadores destes equipamentos estivar a carga de maneira homogênea e bem distribuída nos porões, mantendo o equilíbrio do navio.

A capacidade total de carga que um navio pode transportar depende das dimensões das áreas de carga (porão, no caso de navios graneleiros) e do fator de estiva da mercadoria, que segundo ASSIS (2010) é definido como a razão entre o volume ocupado pelo produto e o seu peso. No Sistema Internacional de Unidades (SI) o fator de estiva é medido em m^3/kg . A Figura 1 apresenta um perfil típico de um porão de navio graneleiro.

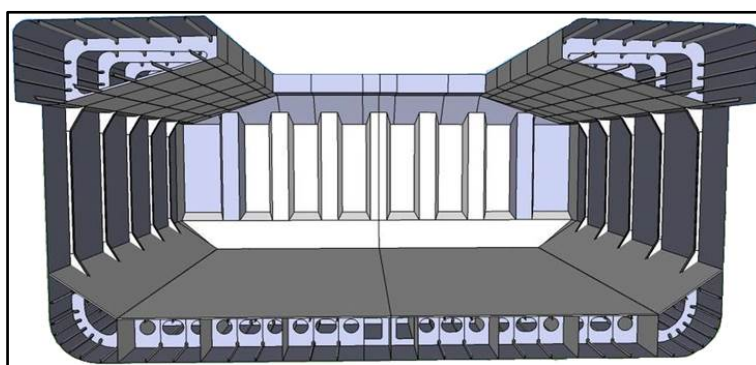


Figura 1. Perfil típico de um porão de navio graneleiro.

Toda a parte fração da capacidade do porão que fica sem uso, sendo um espaço perdido entre as unidades da carga por ser necessário à ventilação ou à separação / carregamento da carga é considerada Quebra de Estiva (Valer, 2017).

Algumas embarcações possuem porões com duas tampas para carregamento, os quais são chamados de navios com porões conjugados (Figura 2). A viga central, que separa as duas tampas de um mesmo porão, se torna um obstáculo para a estivagem, ocasionando uma possível quebra de estivagem, e em casos extremos, dificultando o fechamento das tampas do porão por excesso de carga (em volume).

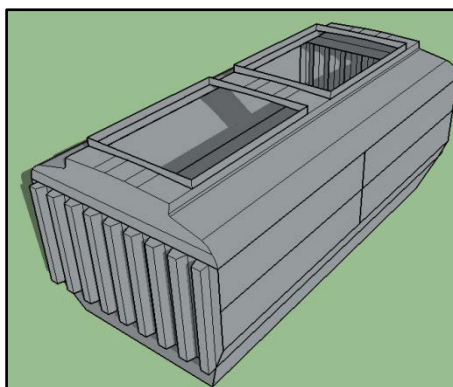


Figura 2. Porão conjugado - modelo tridimensional.

Todo carregamento é precedido do preenchimento do Bulk Cargo Information (BCI), documento onde são informadas as principais características da carga que será

embarcada. Quando o terminal portuário não consegue cumprir o fator de estiva anunciado no BCI, ele pode sofrer sanções administrativas e comerciais, ocasionando em prejuízo financeiro e danos à reputação do terminal. Um exemplo de carregamento onde o fator de estiva não foi alcançado é apresentado na Figura 3.



Figura 3. Situação final de carregamento de pelotas onde o fator de estiva determinado não foi atingido.

Recentemente, o Método de Elementos Discretos (DEM) tem sido utilizado com sucesso na simulação de processos industriais (CÂMARA *et al.* 2013), principalmente no manuseio de materiais da indústria mineral (ASSUMPÇÃO *et al.* 2015; BARRIOS *et al.*, 2013). Tal sucesso se deve à facilidade de descrever o comportamento de sistemas complexos como resultado do comportamento individual de partículas.

A primeira técnica de simulação de dinâmica de partículas publicada na literatura aberta foi desenvolvida por CUNDALL e STRACK (1979), ficando conhecida como abordagem da partícula macia. No trabalho, os complexos comportamentos desenvolvidos por sistemas granulares sob condições de carga foram estudados através de partículas discretas que se movimentam independente uma da outra e interagem entre si apenas pelos pontos de contato.

No DEM, os cálculos realizados alternam entre a aplicação da segunda lei de Newton às partículas e uma lei de força-deslocamento nos contatos. A segunda lei de Newton descreve o movimento de uma partícula que resulta do resultante das forças que atuam sobre ela, enquanto a lei da força-deslocamento é usada para encontrar forças de contato de deslocamentos.

As forças de contato estão relacionadas à sobreposição que é permitida entre as partículas nos pontos de contato. A magnitude das forças é proporcional aos tamanhos das sobreposições (δ_{ij}).

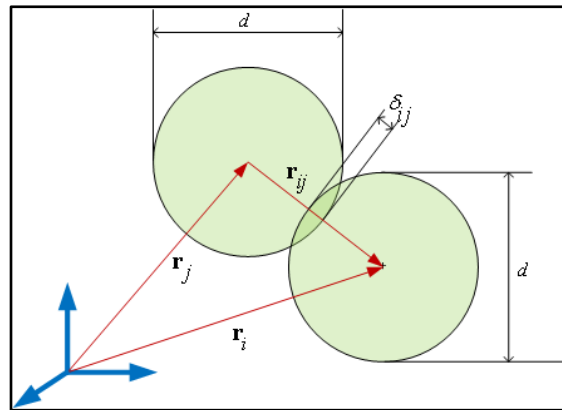


Figura 4. Esquema mostrando a sobreposição entre os elementos na abordagem de partículas macias.

Em cada passo de tempo, velocidades e acelerações são assumidas como constantes, portanto o passo de tempo escolhido deve ser tão pequeno que, durante um único intervalo de tempo, os distúrbios não possam se propagar a partir de qualquer partícula além das vizinhas. O tamanho do passo de tempo na integração ainda é afetado fortemente pelo tamanho dos elementos, velocidades das partículas e rigidez do material, de modo que, pelotas, com tamanho médio por volta de 12 milímetros de diâmetro sendo carregadas em um porão de navio podem chegar velocidades da ordem de 10 m/s.

Uma das limitações da técnica é a quantidade de partículas simuladas no ambiente computacional. Atualmente, aplicações de engenharia, visando resultados quantitativos, conseguem alcançar por volta de 2 milhões de partículas, enquanto que algumas aplicações de vanguarda, cujos softwares de DEM foram escritos especificamente para determinada arquitetura de hardware e cenário virtual, podem chegar a 50 milhões de partículas. Número este, ainda insuficiente para representar completamente a quantidade de pelotas carregadas em um porão de navio granelereiro.

O presente trabalho tem como objetivo utilizar o Método dos Elementos Discretos com abordagem da partícula macia, com partículas em tamanho escalonado, para simular a operação de um sistema de estivagem / carregamento de navios com pelotas em embarcações com porões conjugados, de forma a gerar subsidiar a avaliação da melhor estratégia de carregamento visando aproveitamento máximo do espaço dos porões.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Recursos utilizados

Para simulação do carregamento foi utilizado o software comercial Rocky versão 3.11 fornecido pela empresa Engineering Simulation and Scientific Software (ESSS).

O computador utilizado para as simulações foi montado especificamente para trabalhar com softwares de Elementos Discretos, com dois processadores Intel® Xenon® 2,1 GHz de 12 núcleos cada e 128 Gb de memória RAM.

2.2 Características da embarcação

O modelo tridimensional (digital twin) foi construído utilizando o software SketchUp, fornecido pela Trimble Navigation, para reproduzir o Porão 3 do navio graneleiro GEMMA, construído em 2012, com capacidade de 300.000 DWT (DSIC 2008). Este porão tem capacidade volumétrica de 42.494,6 m³ e é evidenciado no diagrama da Figura 5.

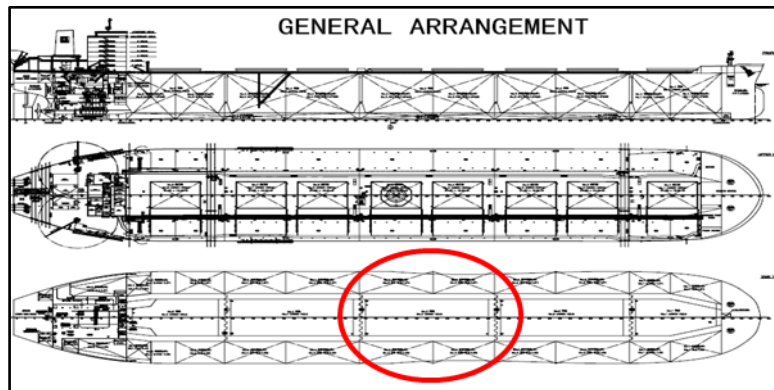


Figura 5. Porão 3 do Navio a ser modelado (DSIC 2008).

É sabido que a popa dos navios graneleiros é a parte mais pesada deste tipo de embarcação, o que acarreta em uma leve inclinação para a popa, que pode chegar até a 2°. Esta inclinação também foi levada em consideração na construção do modelo, conforme pode ser verificado visualmente na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**

2.3 Características do material transportado

Considerou-se inicialmente uma pelota com especificações de alto-forno com densidade aparente de 2.130 kg/m³, ângulo de repouso de 28 graus e tamanho médio de 12 mm.

Obviamente, dado o grande número de partículas necessárias para representar completamente o carregamento de um porão de navio, duas estratégias de simulação podem ser utilizadas: a primeira seria reduzir o tamanho do porão e utilizar o tamanho real da partícula (12 mm); enquanto a segunda opção seria manter o tamanho real do porão do navio e aumentar o tamanho das partículas na simulação.

Neste trabalho optou-se pelo escalonamento das partículas na simulação, pois seus resultados representariam exatamente a carga aplicada no navio, sem nenhuma necessidade de cálculo de escala para o volume ou massa da carga. O único ajuste necessário seria o dos parâmetros de contato das partículas para o tamanho de partícula simulado. Na prática, serão necessários parâmetros de contato que representem o comportamento de partículas de 12 mm com a aplicação de partículas de maior tamanho. No caso de pelotas, cuja forma se aproxima de esfera, é esperado, que apenas um ajuste fino seja realizado nos parâmetros de contato.

Após algumas simulações preliminares, observou-se que 700 mm seria um tamanho de partícula bom para simulações com os hardwares disponíveis.

A tabela a seguir mostra a comparação entre dois tamanhos de partículas simulados: 400 e 700 mm.

Tabela1. Comparação entre tamanho de partículas x custo computacional.

Tamanho de partícula	de 400 mm	700 mm
Partículas geradas	450.000	97.000
Tempo de simulação	10 dias	28 horas

2.4 Parâmetros de contato

BARRIOS et al. (2013) obtiveram experimentalmente parâmetros de contato para manuseio de pelotas de minério de ferro e propriedades dos materiais.

Tabela2. Propriedades dos materiais fornecida por BARRIOS et al. (2013).

Property	Steel	Pellet
Poisson's ratio	0.30 ^a	0.25 ^a
Shear modulus (MPa)	7000 ^b	16
Density (kg/m ³)	7800 ^b	3948

Tabela3. Parâmetros de contato obtidos experimentalmente por BARRIOS et al. (2013).

Parameter	Pellet model	Contact type	
		Pellet-steel	Pellet-pellet
Coefficient of static friction	–	0.50	0.49
Coefficient of rolling friction	Sphere	0.25	0.21
	Overlapping spheres	0.01	0.02
Coefficient of restitution	Sphere	0.39	0.48
	Overlapping spheres	0.42	0.51

Entretanto, os parâmetros obtidos por Barrios et al. (2013), previam seu uso com o modelo de contato de Hertz-Mindlin (sem escorregamento), que embora mais custoso computacionalmente, é conhecido por fornecer resultar em valores de dissipação de energias quantitativamente melhores.

Desta forma, utilizou-se os parâmetros das tabelas 2 e 3 como ponto de partida para simulações preliminares com as partículas escalonadas (700 mm de diâmetro visando alcançar os valores de ângulo de repouso de 28° e 2.130 kg/m³ de densidade aparente, conforme especificação do produto, conforme exemplificado na Figura 6.

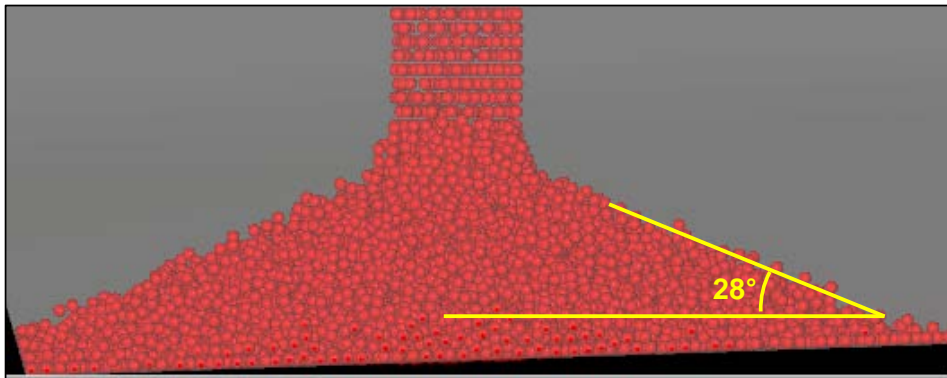


Figura 6. Exemplo de simulação do teste do ângulo de repouso.

Sabendo que as forças de atrito ocorrem devido às rugosidades entre as superfícies em contato e de forma proporcional a estas rugosidades (HALLIDAY e RESNICK 2005), espera-se que com partículas maiores as forças de atrito sejam menores, ou seja, para que uma partícula maior tenha o mesmo comportamento de uma partícula menor, ela precisa de um coeficiente de atrito maior. Isto ocorre porque com o aumento da partícula o efeito da rugosidade entre as superfícies é reduzido.

Esse efeito, aliado à diferença de modelos de contato, resultou na adoção de coeficientes de atrito maiores do que os utilizados por Barrios et al. (2013) tanto para o atrito estático quanto para o atrito de rolamento, conforme mostrado na Tabela 4.

Tabela 4. Parâmetros ajustados para a escala.

	Pellet - Steel	Pellet - Pellet
Coefficient of static friction	0,7	0,6
Coefficient of rolling friction	0,3	0,3
Coefficient of restitution	0,1	0,1

Efeito contrário foi verificado no coeficiente de restituição. Foi necessário utilizar valores menores para este parâmetro do que os utilizados pelos autores para obter os mesmos comportamentos.

2.5 Dimensionamento do passo de tempo

Mesmo com elevado valor da vazão de material, e conseqüente velocidade de entrada, foi possível utilizar um valor para o passo de tempo de integração relativamente alto (0,05 s). Devido ao tamanho maior das partículas, este valor se mostrou adequado para garantir que pequenas sobreposições entre partículas/fronteiras fossem contempladas em cada etapa de cálculo.

2.6 Características do Carregador de Navios

O Carregador de Navio utilizado é do tipo Quadrante Duplo, o qual é constituído de duas lanças pivotadas em sua traseira com três graus de liberdade: elevação, avanço e giro. De modo que o carregamento possa ocorrer em qualquer ponto das bocas do porão (Figura 7).

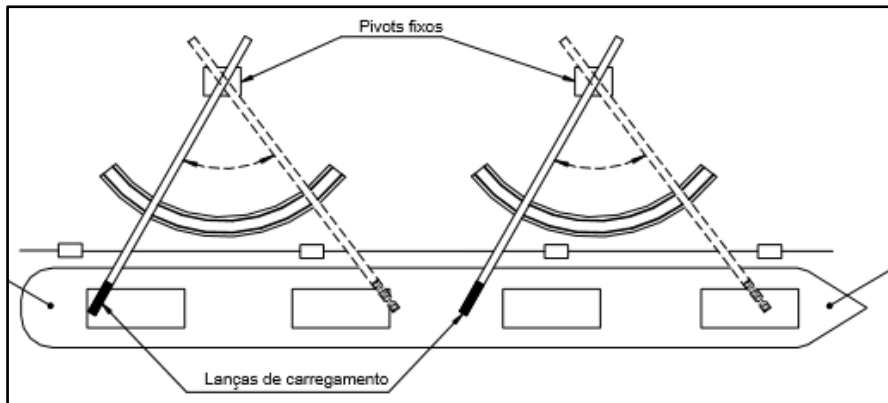


Figura 7. Carregador de Navios tipo Quadrante Duplo. (GOES FILHO, 2010).

2.7 Método tradicional de carregamento de porão singelo (VALE, 2016)

O método tradicional de carregamento consiste em iniciar o porão com 30% de da carga no centro, em seguida 15% nos cantos (de popa para proa e de bombordo para boreste) e para finalizar mais 2,5% em cada extremidade na ordem de popa, proa, boreste e bombordo). Normalmente cada porão recebe duas passadas de carregamento, sendo que no porão conjugado, são realizadas duas passadas em cada boca, totalizando 4 passadas no mesmo porão (Figura 8).

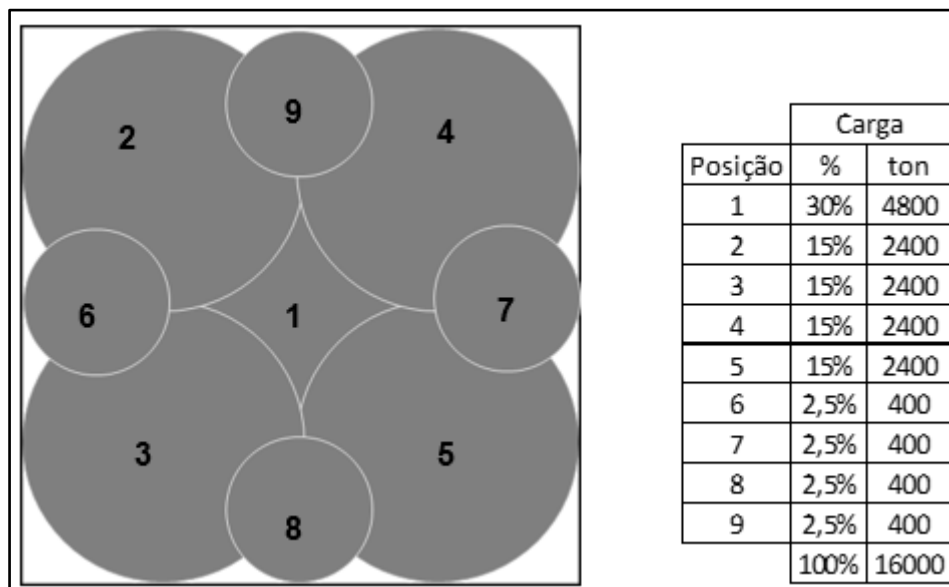


Figura 8. Plano de carga do porão singelo (vista do operador do Carregador de Navio).

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Verificação da densidade aparente

O software utilizado não solicita como parâmetro de entrada a taxa de compactação, sendo necessário fornecer apenas o valor da densidade aparente. Para verificar se os cálculos de taxa de compactação estavam coerentes com o tamanho de partícula utilizado, foi gerado um cubo virtual de tamanho conhecido (10 x 10 x 10 m), ou seja, um cubo de 1.000 m³, o qual se preenchido com material na densidade de 2.130

kg/m³, deverá comportar uma massa de 2.130 t. A massa de partículas obtida no cubo de controle foi 2200 t, o que corrobora com a massa específica das pelotas virtuais usada nas simulações. A simulação pode ser vista na Figura 9.

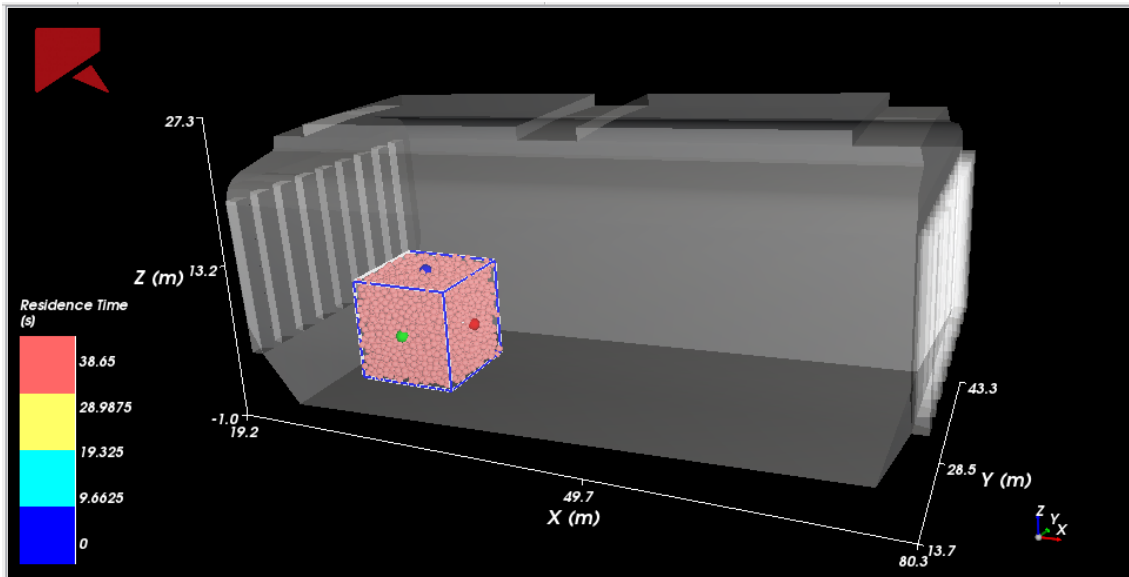


Figura 9. Procedimento para porão singelo com fator de estiva de 0,47 m³/t.

3.2 Procedimento tradicional para porão singelo e fator de estiva 0,47 m³/t

A simulação DEM utilizando o procedimento padrão para carregamento de porão singelo (Figura 10), mostrou é possível atender o fator de estiva de 0,47 m³/t, o que indica que é possível comportar toda a carga dentro das partes admissíveis do porão.

Adicionalmente, utilizando a escala de cores discretizada pelo tempo de residência das partículas foi possível verificar a influência que cada passada gera nas outras passadas (Figura 10). Devido ao escoamento das partículas alimentadas nas passadas anteriores, o topo da pilha de material na boca de proa (em azul escuro na Figura 10) tende a ser mais alto do que o topo da pilha na boca de popa (em azul claro).

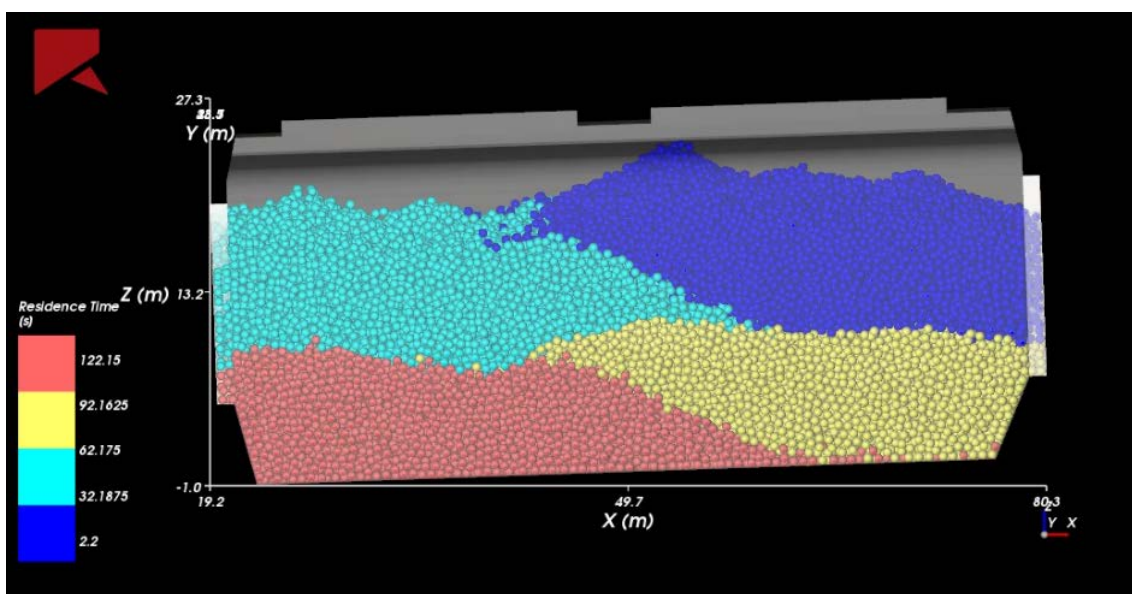


Figura 10. Procedimento para porão singelo com fator de estiva de 0,47 m³/t.

3.3 Procedimento tradicional para porão singelo e fator de estiva 0,55 m³/t

Uma situação comum encontrada na operação é quando algumas pelotas apresentam densidade mais baixa do que 2.130 kg/m³, o que resulta na utilização de fatores de estiva ainda maiores para o carregamento, como é caso da pelota de especificação AF50, que apresenta 1.800 kg/m³ de densidade aparente, e consequentemente fator de estiva de 0,55m³/t.

A simulação DEM, considerando o cenário com o procedimento padrão para carregamento de porão singelo mostrou que não é possível atender o fator de estiva de 0,55 m³/t, não sendo possível comportar toda a carga dentro das partes admissíveis do porão. Nesse caso, o número total de partículas atingiu 110 mil elementos, elevando o tempo de simulação para 36 horas, conforme mostrado na Tabela 5. Adicionalmente, interrompeu-se o carregamento antes que toda a massa de pelotas fosse carregada no porão. O estado final da simulação é apresentado na Figura 11.

Tabela5. Comparação entre densidades x custo computacional.

<i>Densidade aparente</i>	2.130	1.800
	kg/m ³	kg/m ³
<i>Partículas geradas</i>	97.000	110.000 ¹
<i>Tempo de simulação</i>	28 horas	36 horas ¹

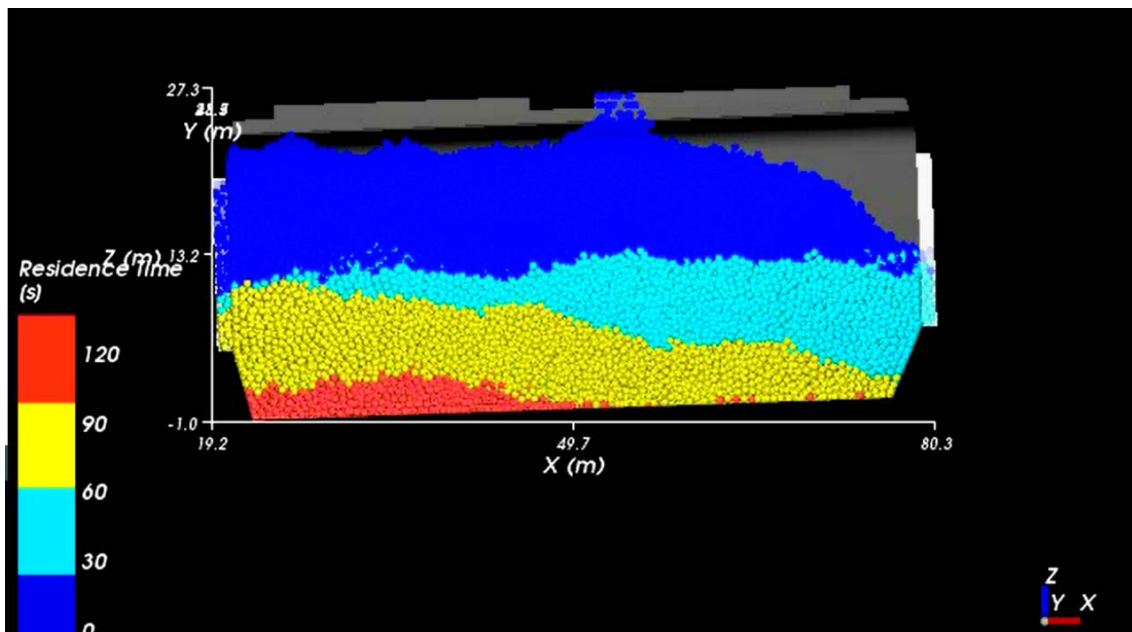


Figura 11. Procedimento para porão singelo com fator de estiva de 0,55 m³/t.

¹A simulação foi interrompida ao ser atingido o limite de carregamento do porão.

4 PRÓXIMOS TRABALHOS

Dando continuidade a este trabalho pode-se realizar simulações com o procedimento de carregamento de porão conjugado descrito a seguir, verificando se a caracterização utilizada neste trabalho também será coerente com este outro método de carregamento.

4.1 Método tradicional de carregamento de porão conjugado (VALE 2016)

A estivagem da carga em porões conjugados é iniciada no meio próximo à ré da boca de ré, formando o cone de material até a altura da antepara da boca do porão, dividindo a carga entre o meio (50%), bombordo (25%) e boreste (25%) do porão. Neste caso, a base do cone criado atinge a área sob a boca de vante e no tempo de carregamento da boca de vante, as cargas se encontram. Em seguida segue-se para o meio, próximo da vante da boca de vante formando também um cone de material até a altura da antepara da boca do porão, dividindo a carga entre o meio (50%), bombordo (25%) e boreste (25%) do porão. Após, segue-se novamente para o porão de ré (parte de meio) e repete-se os procedimentos de carregamento alternando entre as bocas de ré e de vante.

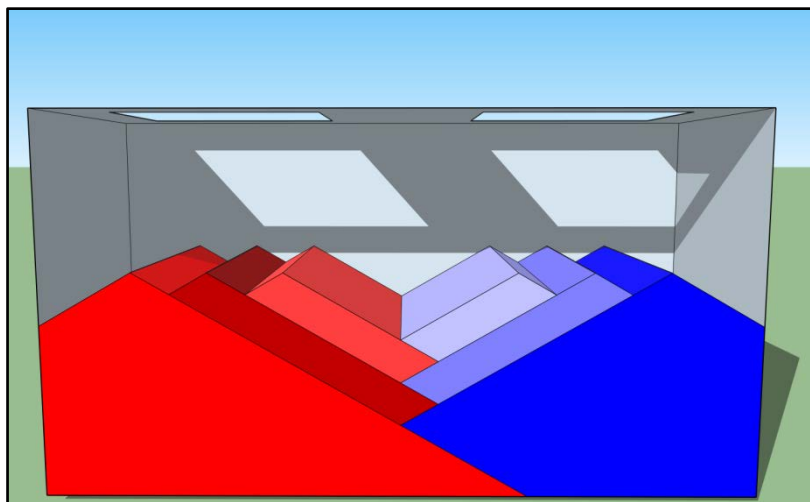


Figura 12. Plano de carga do porão conjugado.

5 CONCLUSÕES

O Método de Elementos Discretos se mostrou muito útil para a simulação do carregamento de pelotas em navios com porão conjugado, permitindo simular procedimentos de carregamento, com diferentes fatores de estiva, de forma relativamente rápida e de baixo custo.

Devido ao alto custo computacional ao simular o porão inteiro do navio com partículas de tamanho real (12 mm), foi necessário utilizar partículas em escala (700 mm) e adaptar os parâmetros de contato para obter o mesmo comportamento de partículas reais. Para tanto, foi necessário utilizar coeficientes de atrito maiores do que os utilizados em trabalhos disponíveis na literatura – para tamanhos reais de partícula, tanto para o atrito estático quanto para o atrito de rolamento, já para o coeficiente de restituição foram utilizados valores menores.

As simulações permitiram validar a taxa de compactação utilizada pelo software para o tamanho de partícula utilizado e verificar a influência que cada passada do

carregamento gera nas outras passadas devido ao escoamento das passadas anteriores.

Utilizando o procedimento padrão para carregamento de porão singelo, verificou-se que é possível atender o fator de estiva de 0,47 m³/t, sendo possível comportar toda a carga dentro das partes admissíveis do porão. Já para um fator de estiva de 0,55 m³/t, não é possível cumprir o plano de carregamento para o porão singelo, sendo necessário reduzir a carga (peso) planejada.

REFERÊNCIAS

- 1 ASSIS, L. F. Organização e Tecnologia do Transporte Marítimo. Apostila Pós-graduação em Engenharia Portuária. Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). Vitória, outubro 2010. p.11.
- 2 ASSUMPÇÃO, M. E., MAZZINGHY, D. B., SOUZA, L. D., RUSSO, J. F. C., BAILONA, B. A. e SPOGIS, N. Aplicação do Método dos Elementos Discretos na Avaliação de Chutes de Escoamento de Minérios de Ferro Itabiríticos. XXVI Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa. Poços de Caldas, outubro 2015.
- 3 BARRIOS, Gabriel K.P.; DE CARVALHO, Rodrigo M.; KWADE, Arno; TAVARES, Luís Marcelo. Contact Parameter Estimation for DEM Simulation of Iron Ore Pellet Handling. Powder Technology (Print), v. 248, p. 84-93, 2013.
- 4 CÂMARA, L. D. T.; LUGON JUNIOR, J.; SILVA, F. de M.; OLIVEIRA, G.P.; ECHEVARRIA, L. C.; SANTIAGO, O. L; SILVA NETO, A. J. Continuous Chromatography Modelling with 2D and 3D Networks and Stochastic Methods - Effects of Porous Structure and Solute Population. In: Hironori Nakajima. (Org.). (Org.). Mass Transfer - Advances in Sustainable Energy and Environment Oriented Numerical Modeling. 1ed.Rijeka: InTech, 2013, v. Cap. 4, p. 107-123.
- 5 CUNDALL, P., and STRACK, O.D.L. A discrete numerical model for granular assemblies, Géotechnique, 1979, (29): 47-65.
- 6 DSIC - Dalian Shipbuilding IND. Shipbuilding and offshore Engineering and Development Research Center. General Arrangement DS405-010-5002. Dalian, 2008.
- 7 GOES FILHO, Hildebrando de Araújo. Planejamento Portuário. Apostila Pós-Graduação em Engenharia Portuária. Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). Vitória, outubro 2010. p.177.
- 8 HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; Fundamentals of Physics. Volume 1. Chapter 5.8. 7th Edition June 2005. Published by Wiley, John & Sons.
- 9 VALE S/A. Procedimento Operacional 000443 – Carregamento de Navios. Revisão 10. Vitória 2016.
- 10 VALER - EDUCAÇÃO VALE. Carga e Transporte Marítimo. Academia de Logística. Vitória 2017. p. 5..