

Avaliação do método de estabilização dinâmica do lastro na Estrada de Ferro Carajás

Paulo Pereira^{1*}, Ronaldo Silva², Silvio Tumelero³, Alfredo Gay³, Iara Melo⁴, Liedi Bernucci¹, Rosângela Motta¹, Edson Moura¹

¹ Departamento de Eng. de Transportes (EPUSP), ³ Departamento de Eng. de Estruturas e Geotécnica (EPUSP), Av. Prof Almeida Prado 83, 05508-070, São Paulo - SP

² Centro de Excelência - Vale S.A., Av. Dante Michelini 5500, 29090-900, Vitória - ES

⁴ Eng. de Ferrovia do Corredor Norte - Vale S.A., Av. dos Portugueses s/n, 65085-581, São Luís - MA

e-mail: paulompereira@usp.br, ronaldo.silva@vale.com, silvio.tumelero@usp.br, alfredo.gay@usp.br, iara.melo@vale.com, guilherme.tsuji@usp.br, liedi@usp.br, rosangela.motta@usp.br; edmoura@usp.br, eng.josejoao@gmail.com

Resumo: Ao longo de sua utilização para transporte de carga, a via férrea adquire defeitos, tais como deslocamentos permanentes, que alteram sua geometria. Isso pode levar a comportamentos não desejados na interação de contato roda-trilho, além de aumentar o risco de descarrilamento, devido a perda de qualidade geométrica, que pode ser excessiva. Como forma de manutenção, geralmente é realizada a operação de socaria. Entretanto, essa resulta em desestabilização da camada de lastro pela mobilização de seus agregados durante a inserção das hastes vibratórias. Um dos efeitos imediatos é a diminuição da rigidez lateral da via, por exemplo. Para mitigar esse problema, e retornar de maneira parcial e rápida a uma condição mais estável, podem ser empregados métodos de estabilização dinâmica, como o realizado pelo equipamento *Dynamic Ground Stabilization* (DGS). Com o objetivo de se atingir um melhor rendimento dessa estabilização, diferentes fatores operacionais como frequência de vibração horizontal, velocidade de operação, carga vertical, dentre outros, são normalmente considerados como elementos de configuração do equipamento. Assim, esta pesquisa visa o estudo detalhado dos procedimentos técnicos e da eficiência do processo de estabilização dinâmica de lastro na Estrada de Ferro Carajás (EFC) por meio da: (i) construção de trechos experimentais em campo com diferentes parâmetros operacionais do conjunto socadora/estabilizadora; (ii) realização de ensaios de ordem física e mecânica para mensurar a efetividade da manutenção; e (iii) desenvolvimento de modelo numérico pelo Método dos Elementos Discretos no *software* Rocky para avaliar as propriedades mecânicas nos diversos casos simulados, procurando prever a influência em propriedades equivalentes e de interesse, como o módulo da via e a rigidez lateral da mesma. Como resultados, espera-se determinar valores dos parâmetros testados (frequência, carga e tempo e número de inserções de socaria) que proporcionariam à via um melhor desempenho estrutural ao restabelecer a densidade e os valores de rigidez lateral/vertical da camada de lastro por meio do DGS.

Palavras-Chaves: Ferrovia; Via Permanente; Estabilização dinâmica de lastro; Dynamic Ground Stabilization.

1. INTRODUÇÃO

Após as operações de correção geométrica, ocorre certa desestabilização da via, em particular da camada de lastro. Esta desestabilização resulta em uma diminuição da rigidez da mesma, ocasionando restrições

de velocidade operacional por determinado período (até a consolidação do lastro), tomados como medida de segurança. Essas restrições impactam na disponibilidade da via permanente ao tráfego e no volume de carga transportada, sendo indesejáveis para a operação ferroviária. Objetivando-se mitigar

esses problemas apresentados após a correção geométrica e retornar, de maneira parcial e rápida a uma condição mais estável, podem ser empregados processos de estabilização dinâmica da via (*Dynamic Track Stabilization*, DTS) que ocasionem determinado acréscimo de densificação desta camada, gerado pelo rearranjo das partículas da camada de lastro.

Com relação aos métodos de estabilização dinâmica da via, destaca-se o realizado pelo equipamento DGS (*Dynamic Ground Stabilization*). O desempenho deste demonstra certo nível de variabilidade, pois depende das características de utilização do equipamento. Assim, uma avaliação quanto à estabilização do lastro mostra-se de fundamental importância no sentido de se determinar uma condição otimizada (configuração) quanto às características de operação dos equipamentos de correção geométrica e estabilização de lastro que garantam uma eficiência adequada.

Portanto, a presente pesquisa objetiva avaliar o processo de estabilização dinâmica da via (DGS) através da realização de ensaios *in situ* do comportamento da via e da criação de modelos computacionais com o método dos elementos discretos para melhor compreender os mecanismos físicos envolvidos, de forma a desenvolver um procedimento otimizado.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 A manutenção por socaria e o seu impacto na via permanente

A socaria é a operação de manutenção e correção geométrica mais presente na atualidade. Em geral, as partículas que compõem a camada de lastro se degradam por meio de quebra e abrasão, devido ao acúmulo de carga e/ou ações de socaria, podendo ocorrer inclusive de modo complementar no sentido de deterioração do grão [1]. Durante o processo, as elevadas forças de vibração e de imersão proporcionadas pelas hastas do equipamento frequentemente causam quebra dos grãos, sendo este o elemento mais destrutivo nas operações ferroviárias em termos de deterioração do lastro [2]. A Fig. 1 apresenta a atuação da socaria na camada de lastro.

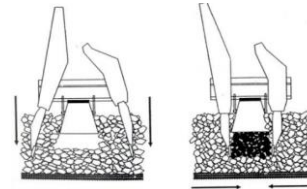


Fig. 1 Atuação da socaria [3]

Além disso, o tempo entre operações de manutenções de alinhamento e nivelamento por ações de socaria se reduz ao longo do tempo, devido a essas ações também causarem degradação das partículas (Fig. 2). Assim, é originada uma maior perda de produtividade da linha pelo excesso de tempo despendido em manutenções, acompanhada de reduções de velocidade após cada um desses serviços. Consequentemente, um método de manutenção mais eficiente, que mantenha a geometria dentro dos limites de segurança, expressos pelos índices de qualidade geométrica, possui demasiada importância na redução dos custos de manutenção e em outros custos associados.

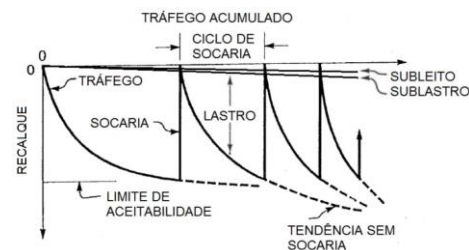


Fig. 2 Contribuições de cada camada no recalque da via e redução do tempo entre os ciclos de socaria [3]

2.2 A estabilização dinâmica da camada de lastro

No sentido de devolver parte da estabilização do lastro perdida durante as ações de socaria, acelerando o retorno a velocidades usuais de operação, buscaram-se métodos complementares que pudessem proporcionar maior eficiência nas manutenções, tal como o DGS. Este, simplificada, consiste em vibrar a via permanente, imediatamente após a socaria, de forma a promover um rearranjo mais denso das partículas de lastro, acelerando os recalques que ocorreriam em um período maior de tempo pelas solicitações do tráfego (Fig. 3). A via permanente pós-estabilizada oferece uma maior segurança na operação e permite, em linhas recém-construídas, renovadas, ou após o processo de manutenção por correção

geométrica, a liberação da linha sem redução na velocidade operacional, diminuindo os períodos de restrições de velocidade, ou seja, minimizando o impacto na disponibilidade da via permanente [4].



Fig. 3 Princípio da estabilização dinâmica da via [5]

Segundo [6], os fatores que influenciam no efeito da estabilização dinâmica da via são: (i) frequência de vibração lateral; (ii) carga estática vertical; (iii) velocidade de operação; e (iv) carga de impacto dinâmico. Ainda segundo o autor, a frequência de vibração lateral é um dos principais fatores, devido a duas causas: (i) propriedades elastoplásticas da camada de lastro, que se modificam conforme se eleva a frequência da vibração; e (ii) acréscimo linear nesta frequência, que gera um aumento quadrático na carga de impacto. A Tabela 1 apresenta os valores recomendados para que seja atingida uma efetividade mínima na estabilização dinâmica da via, de acordo com [6].

Tabela 1. Valores de parâmetros recomendados para uma mínima efetividade de DTS [6]

Parâmetro	Recomendação
Frequência de vibração lateral	~30 Hz
Carga vertical estática	240 kN
Velocidade de operação	1,5 km/h
Carga de impacto dinâmico	~200 kN

Em uma linha de transporte de carvão em Natal (África do Sul), [7] realizaram um estudo utilizando DGS em trechos experimentais em curvas. Foi observado que a estabilização dinâmica reduziu a taxa de deterioração da geometria da via, expressa em termos da superelevação. Além disso, também foi observada uma menor taxa de deterioração do alinhamento vertical o que, segundo os autores, significaria em uma extensão de cerca de 6 a 18 meses o ciclo entre manutenções.

Igualmente, [8] também avaliaram o impacto do uso do DGS nos índices de geometria em curva e em tangente, em uma região próxima à Tehran (capital do Irã). Como forma de avaliação, estes utilizaram os índices geométricos de “TGI” e “J”, que são mais

frequentemente empregados na Índia e Polônia, respectivamente [9]. Como resultados, em termos de “TGI”, observou-se uma maior taxa de degradação geométrica na seção não-estabilizada, a partir do 6º mês de avaliação. Em contrapartida, no 8º mês de medições, a seção estabilizada possuía menor valor de “J” (maior qualidade geométrica) e menor taxa de degradação.

Já em relação de comportamento mecânico da via, o emprego DGS pode representar um aumento de 21 a 37% de resistência lateral de dormentes, em comparação com uma seção não estabilizada [10]. Além de tal comportamento reduzir os riscos de flambagem da via, medidas de resistência lateral são ferramentas importantes para avaliação da efetividade da estabilização dinâmica por representar características da camada de lastro. Por exemplo, uma maior resistência lateral pode significar uma melhor distribuição de esforços de contato na interface dormente-lastro, como consequência de uma maior densificação da camada próxima a esta região. Além disso, [11] reportaram que a estabilização dinâmica elevou em três vezes o módulo de via em comparação com uma seção que passou apenas por uma socaria. Tal elevação na rigidez vertical demonstra como essa técnica de manutenção proporciona uma maior estabilidade vertical da via, o que pode reduzir a geração de possíveis recalques logo após as atividades de manutenção na via.

2.3 O Método dos Elementos Discretos para modelagem da camada de lastro

O Método dos Elementos Discretos (MED) é uma maneira adequada de representar computacionalmente o comportamento dinâmico do lastro ferroviário, visto que este método foi criado para análise comportamental de materiais granulares, tanto em nível micro quanto macro, sendo apropriado para trabalhar com elementos descontínuos [12].

Seu funcionamento consiste em detectar o contato de uma partícula com os seus vizinhos imediatos (Fig. 4a) e calcular as forças das partículas interagindo entre si (Fig. 4b). Posteriormente, integram-se as equações do movimento de cada partícula, descritas pelas Leis de Newton/Euler (Fig. 4c), decorrendo o deslocamento, velocidade e aceleração, a fim de determinar a nova posição e orientação de

cada partícula para um pequeno intervalo de tempo (Fig. 4d) [13].

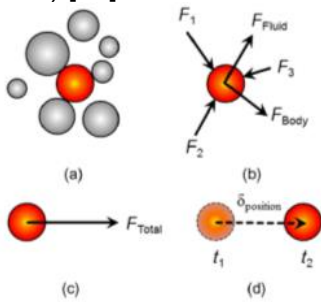


Fig. 4 Identificação do contato (a), forças aplicadas (b), força resultante (c) e deslocamento (d) [13]

Os programas de computador desenvolvidos para essa finalidade evoluíram consideravelmente desde o primeiro deles, o BALL, introduzido por Cundall e Strack em 1979 [14], cujo modelo era bidimensional com partículas circulares. Atualmente, é possível trabalhar tridimensionalmente com geometrias arbitrárias para os grãos, representados por poliedros ou aglomerados de esferas, a fim de enriquecer o tratamento mecânico dos contatos envolvidos no problema real.

Conhecer a geometria do lastro é extremamente importante para a definição do seu comportamento dinâmico [15]. Formas cúbicas e vértices pontiagudos aumentam a resistência ao rolamento, já que aumentam o número de contatos e, portanto, melhoram a estabilidade geral da camada [16,17].

3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

A presente pesquisa se encontra em andamento e, de forma geral, se subdivide em duas etapas: (i) construção/monitoramento de trechos experimentais com diferentes parâmetros operacionais e a realização de ensaios de caráter estrutural, geométrico e físico para mensurar a efetividade do conjunto socaria/estabilização; e (ii) desenvolvimento de modelo numérico pelo Método dos Elementos Discretos no *software* Rocky DEM [18] para prever a influência em propriedades equivalentes e de interesse, como o módulo da via e a rigidez lateral da mesma.

3.1 Construção das seções experimentais e ensaios físicos, mecânicos e geométricos

Para a avaliação da combinação otimizada de parâmetros operacionais do conjunto

socaria/estabilização que ocasionarão no melhor comportamento da via, serão avaliados dois trechos experimentais, um em pátio ferroviário e outro na linha tronco da Estrada de Ferro Carajás (EFC). O primeiro, possui o objetivo de avaliar a efetividade de diferentes combinações dos parâmetros de socaria/estabilização de modo isolado (sem tráfego), além de reduzir o número de variáveis no estudo. Por outro lado, o trecho na linha tronco objetiva avaliar o comportamento da via ao longo do acúmulo do tráfego, utilizando-se as melhores combinações encontradas durante a fase no pátio.

O trecho selecionado em pátio ferroviário foi condicionado para o estudo no Pátio 5 do ramal Serra Sul da EFC. Este possui 720 m de extensão, subdivididos em 8 subtrechos de 90 m, possuindo cada um diferentes parâmetros operacionais de socaria e estabilização (Tabela 2). Como valores empregados nesta fase do estudo, apresentados na Tabela 2, tomou-se como referência as práticas atuais de manutenção empregadas na EFC, estando também dentro dos valores recomendados pela bibliografia.

Tabela 2. Valores dos parâmetros considerados nos ensaios *in situ*

Subtrecho	DGS		Socadora*
	Frequência (Hz)	Pressão dos cilindros (MPa)	Tipo de inserção
1	28	40	Única (1,0 s)
2	28	60	
3	35	40	
4	35	60	
5	28	40	Múltipla (1 ^a – 0,8 s 2 ^a – 0,6 s)
6	28	60	
7	35	40	
8	35	60	

*Frequência de 35 Hz, levante de 20 mm e profundidade de socaria de 15 mm abaixo do dormente

Em cada subtrecho apresentado na Tabela 2, serão realizados ensaios de caráter estrutural, geométrico e físico nas etapas pós-socaria e pós-socaria/estabilização (Tabela 3). Os resultados advindos destes ensaios serão as ferramentas que auxiliarão na seleção das

melhores combinações a serem empregadas no trecho da linha tronco. Além disso, também serão realizados em laboratório, ensaios de caracterização física e mecânica dos materiais componentes geotécnicos (lastro, sublastro e subleito).

Tabela 3. Ensaios a serem realizados em cada subtrecho experimental no pátio ferroviário

Estrutural	Ensaio de resistência lateral de um único dormente
	Deslocamento vertical (no patim do trilho)
Geométrico	Levantamento da qualidade geométrica da via
Físico	Medida de peso específico aparente da camada de lastro
	Avaliação da quebra de partículas de lastro

O ensaio de resistência lateral de um único dormente possui o objetivo de verificar se há possível elevação da resistência lateral com o uso do DGS, através do Dispositivo Medidor de Resistência Lateral (DMRL) proposto pelo LTP-LIM-EPUSP (Fig. 5). Na realização deste ensaio, o trilho é erguido por macacos hidráulicos e a viga de reação é fixada no dormente. Posteriormente, aplica-se a carga na alma do trilho através do deslocamento constante do pistão hidráulico (4,5 mm/s), ocasionando movimentação do dormente. A leitura da força é obtida por uma célula de carga e o deslocamento do dormente é medido por LVDT'S (*Linear Variable Differential Transformer's*).

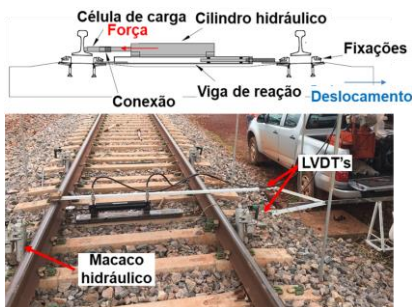


Fig. 5 Dispositivo Medidor de Resistência Lateral (DMRL)

Por outro lado, a medição do deslocamento vertical no patim do trilho objetiva avaliar se a estabilização dinâmica ocasionou uma elevação na rigidez da via (medida indireta). Para tal, será utilizado o Dispositivo para Medição de Deslocamentos (DMD) também proposto pelo LTP-LIM-EPUSP [19] (Fig. 6).

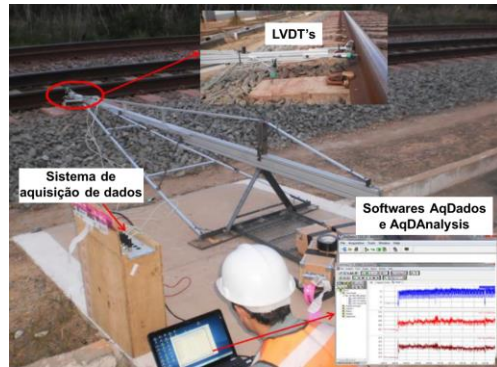


Fig. 6 Dispositivo para Medição de Deslocamentos (DMD) [19]

Adicionalmente, no caso da medição da geometria da via, esta permite determinar o recalque desta, pela estabilização dinâmica, cujos impactos se refletem em índices geométricos de alinhamento vertical, transversal, superelevação e empeno. Para estas medições foi desenvolvido pelo LTP-LIM-EPUSP o Dispositivo Medidor de Perfil Topográfico (DMPT) (Fig. 7). Além disso, também serão realizadas medições com o uso do carro controle modelo EM-100.



Fig. 7 Dispositivo Medidor de Perfil Topográfico (DMPT)

De maneira geral, o DMPT se encaixa na bitola da via, possuindo pequenas esferas no contato com o trilho, que permitem seu deslocamento sobre a via. Na sua estrutura tem-se barras que são livres para se movimentar verticalmente, com prismas fixados nas extremidades superiores. Para a medição da posição dos primas e, por conseguinte, do perfil vertical do trilho, é utilizada uma estação total robótica. Assim, é possível medir-se pontos de 50 cm a 2,5 m de distância entre si, em ambos os trilhos, de forma rápida e simultânea.

Para a determinação da densidade da camada de lastro (*in situ*) em todos os subtrechos experimentais, será utilizado o método proposto por [20]. Tal medição objetiva avaliar se o emprego do DGS proporcionou uma maior e densidade na camada de lastro,

ocasionando uma maior resistência e estabilidade da camada. O ensaio baseia-se na abertura de um furo na camada de lastro e o preenchimento deste furo com água (Fig. 8). A densidade é, portanto, obtida pela relação da massa de material de lastro retirado do furo pelo volume de água que ocupou seu vazio. Os ensaios serão realizados na área subjacente ao trilho e no eixo da via.

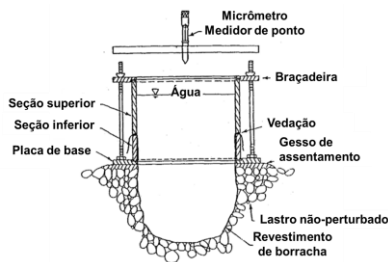


Fig. 8 Ensaio de densidade na camada de lastro [20]

Por fim, para avaliação da quebra das partículas do lastro possivelmente geradas pelas etapas de socaria/estabilização, serão coletadas amostras de lastro de maneira padronizada na região subjacente ao trilho em cada um dos subtrechos experimentais (Fig. 9). A caixa possui dimensões de 60 x 60 cm, e é posicionada na camada de lastro de forma a servir como referência para a coleta que é efetuada na região interna desta, até atingir-se a camada de sublastro. As coletas serão realizadas após cada uma das etapas de socaria e estabilização, sendo avaliadas posteriormente em laboratório as curvas granulométricas (por peneiramento) para fins de comparação.



Fig. 9 Caixa padronizada para coleta de lastro

Após a finalização da fase de testes no pátio ferroviário e seleção dos parâmetros de socaria/estabilização que obtiveram melhores resultados, será condicionado para estudo o trecho experimental na linha tronco da EFC. Como ferramentas para a avaliação do comportamento da via ao longo do acúmulo do tráfego serão realizados os ensaios apresentados na Tabela 4.

Tabela 5. Ensaio a serem realizados em cada subtrecho experimental na linha tronco da EFC

Estrutural	Deslocamento vertical (no patim do trilho)
Geométrico	Levantamento da qualidade geométrica da via
Físico	Medida de densidade da camada de lastro

Assim sendo, ao final do estudo na linha tronco, será(ão) selecionada(s) a(as) melhor(es) combinação(ões) de manutenção por socaria/estabilização a serem empregadas na EFC.

3.2 Desenvolvimento do Modelo Numérico Computacional pelo Método dos Elementos Discretos

Para a simulação computacional pretende-se avaliar o comportamento macro do lastro, a partir de diversos tipos de formas de partículas poliédricas, utilizando o *software* Rocky DEM; sempre respeitando a granulometria de campo. Ademais, serão utilizadas partículas escaneadas tridimensionalmente, representando uma amostra significativa dos grãos da EFC, objetivando a construção de uma biblioteca digital de lastro da região.

Ao realizar a digitalização através de escâner 3D BQ Ciclop obtém-se uma nuvem de pontos, a qual deve servir de base para reconstrução da superfície da partícula, através do *software* Meshlab [21]. Entretanto, essa superfície apresenta uma grande quantidade de faces, a qual deve ser reduzida a valores mínimos aceitáveis que mantenham as propriedades geométricas da superfície da partícula e o custo computacional não seja demasiadamente elevado.

3.2.1. Resultados preliminares

A seguir são apresentados resultados preliminares do estudo em MED. Analisou-se a redução percentual do volume e da área em comparação com a superfície original reconstruída de um grão de lastro específico, de acordo com a diminuição do número de faces (Fig. 10). Percebeu-se uma acentuada redução das propriedades geométricas para número de face menor que 24. Como esperado, observou-se um aumento geral do custo computacional com a elevação do número de faces.

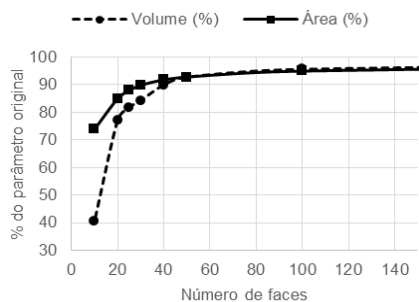


Fig. 10 Alteração geométrica com a redução do número de faces

Preparou-se para o ensaio apenas partículas retidas nas peneiras 25 mm, 38 mm e 50 mm. A princípio, separou-se uma partícula de cada peneira (Fig. 11a), realizou-se a digitalização (Fig. 11b) e reduziu-se o número de faces para 50 (Fig. 11c) e 24 (Fig. 11d). Ao final do estudo, será utilizado um total de 90 tipos de partículas.

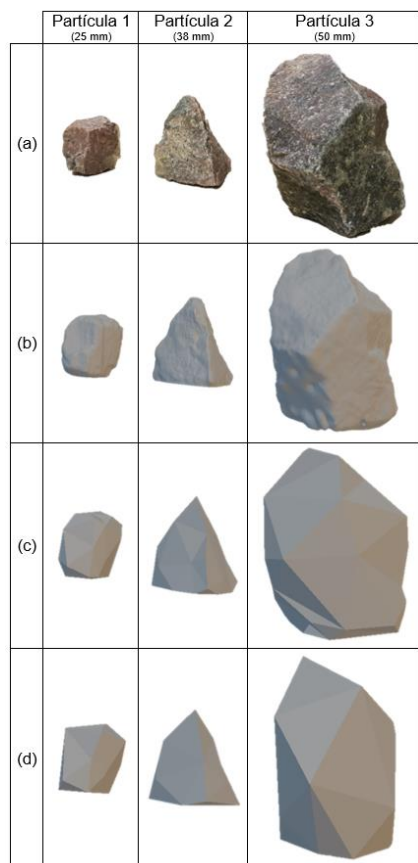


Fig. 11 Partículas 1, 2 e 3 retidas nas peneiras de 25, 38 e 50 mm respectivamente, sendo original (a), digitalizada (b) e com número de faces reduzido para 50 (c) e 25 (d)

Essas geometrias foram introduzidas no Rocky DEM, a fim de simular de forma mais realista o desempenho da camada de lastro. A simulação consiste em utilizar uma seção

transversal da via de 60 cm de largura, com um único dormente presente (Fig. 12). Posteriormente, introduz-se as hastas de socaria, com vibração e aperto lateral preestabelecidos (Fig. 13), cujas vibração e carga no dormente representariam as condições de trabalho do DGS.

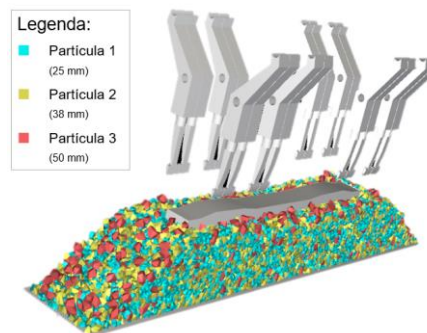


Fig. 12 Simulação computacional da seção transversal da via

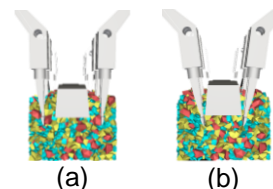


Fig. 13 Simulação computacional da inserção das hastas de socaria e do aperto lateral

4. RESULTADOS ESPERADOS AO FINAL DA PESQUISA E COMENTÁRIOS FINAIS

Conforme citado anteriormente, a pesquisa se encontra em andamento. Atualmente, estão sendo realizados os ensaios nos subtrechos experimentais no pátio ferroviário para posterior estudo na linha tronco da EFC. Por outro lado, a modelagem utilizando o MED encontra-se nas primeiras simulações de socaria.

Como resultados esperados ao fim desta pesquisa estão:

- Determinação dos valores de melhor desempenho de socadora/estabilizadora dinâmica usada na EFC;
- Avaliação do impacto destes processos na degradação do lastro (após socaria e após estabilização);
- Verificação da influência da estabilização dinâmica na densidade da camada de lastro, avaliando se esta foi feita de forma homogênea;

- Avaliação do impacto destes métodos na qualidade geométrica da via;
- Simulação computacional do comportamento dinâmico do lastro para as condições de socaria e estabilização (validado através da comparação com os ensaios realizados em campo).

5. AGRADECIMENTOS

À empresa Vale S.A. pelo financiamento dessa pesquisa no âmbito da Cátedra Infraestrutura Ferroviária - *Under-Rail*, em particular ao Eng. Luciano Oliveira. Ao CNPq pelo apoio ao co-autor Alfredo Gay, sob o número de processo 304680/2018-4.

6. REFERÊNCIAS

- [1] S. E. Wright, *Damage caused to ballast by mechanical maintenance techniques*, Br. Rail Res. Tech. Memo. (1983).
- [2] E. T. Selig, J. M. Waters, *Track Geotechnology and Substructure Management*, Thomas Telford Services Ltd., Londres, 1994.
- [3] J. J. Pires, A. G. D. Dumont, *Railway Ballast Degradation*, Anais da 15th Swiss Transp. Res. Conf., Ascona, 2015.
- [4] C. Esveld, *Modern Railway Track*, 2a, MRT Productions, 2001.
- [5] K. Rießberger, R. Wenty, *40 Years of “Dynamic Track Stabilisation”*, (2015).
- [6] B. Lichtberger, *Track Compendium*, 2o, Eurail Press, 2011.
- [7] P. J. Gräbe, J. S. Maree, *The use of a dynamic track stabiliser to improve track maintenance and the optimisation of track tamping*, Anais do Heavy Haul Assoc. Conf., 1997.
- [8] K. Jadidirendi, J. A. Zakeri, H. H. Teng, *Field Investigation for identifying the effects of dynamic track stabilizing operation on track geometrical indices*, Anais do Jt. Rail Conf., San Jose, 2015.
- [9] J. J. Pires, *Integrated Maintenance Model for Heavy Haul Tracks*, Escola Politécnica Federal de Laussane, 2015.
- [10] T. Sussmann, A. Kish, M. Trosino, *Influence of Track Maintenance on Lateral Resistance of Concrete-Tie Track*, Anais do 82nd Annu. Meet. Transp., Washington, D.C., 2003.
- [11] M. W. Khordehbinan, *Investigation on the Effect of Railway Track Support System Characteristics on the Values of Track Modulus*, Anais do AREMA 2010 Annu. Conf. Expo., Orlando, 2010.
- [12] X. Geng, W. Fraser, B. Vandenbygaart, S. Smith, A. Waddell, Y. Jiao, G. Patterson, *Progress in Soil Science: Digital Soil Mapping*, 2010.
- [13] B. A. Wills, J. A. Finch, *Modeling and Characterization, Wills’ Miner. Process. Technol.*, 2016.
- [14] P. A. Cundall, O. D. L. Strack, *A discrete numerical model for granular assemblies*, Geotechnique. 29 (1979) 47–65.
- [15] P. da S. Jerónimo, *Caracterização Mecânica, Digitalização Volumétrica e Modelação Numérica de Partículas Rochosas para Balastro Ferroviário*, Universidade do Porto, 2014.
- [16] A. Paixão, R. Resende, E. Fortunato, *Photogrammetry for digital reconstruction of railway ballast particles – A cost-efficient method*, Constr. Build. Mater. 191 (2018) 963–976.
- [17] H. Boler, Y. Qian, E. Tutumluer, *Influence of size and shape properties of railroad ballast on aggregate packing statistical analysis*, Transp. Res. Rec. 2448 (2014) 94–104.
- [18] Rocky DEM. *DEM Technical Manual 4.2*, 2018.
- [19] R. C. da Costa, *Proposição de dispositivo de medidas “in situ” para avaliação do comportamento mecânico de lastro ferroviário: Estudo de caso na Estrada de Ferro Carajás*, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2016.
- [20] T. Yoo, H. Chen, E. Selig, *Railroad Ballast Density Measurement*, Geotech. Test. J. 1 (1978).
- [21] P. Cignoni, M. Callieri, M. Corsini, M. Dellepiane, F. Ganovelli, G. Ranzuglia, *MeshLab: an Open-Source Mesh Processing Tool*, 6th Eurographics Italian Chapter Conference, p. 129-136, 2008