Anais do Congresso Brasileiro de Iniciação Científica
(https://periodicos.unisanta.br/COB)

ISSN 2317-1316

EFEITO DA POSIÇÃO DO CENTRO DE MASSA NAS VIBRAÇÕES DE UMA TORRE ESBELTA DURANTE A COMPACTAÇÃO DE MATERIAL GRANULAR

EFFECT OF THE POSITION OF THE CENTER OF MASS ON THE VIBRATIONS OF A SLENDER TOWER DURING GRANULAR MATERIAL COMPACTION

Luiz Felipe de Morais da Costa Barros[1], Matheus Lima Santos[1], Álvaro Luiz Moreira Conrado[1], Marcella Guedes Vieira[1], Isabela Ferreira de Souza[1], Felipe Bertelli[2]

[1]Universidade Santa Cecília, Faculdade de Engenharia, Santos-SP, Brasil
[2]Universidade Federal de Tecnologia do Paraná (UTFPR), Curitiba-PR, Brasil
E-mail para contato: l.felipe.luiz3110@gmail.com

RESUMO – *Este trabalho analisa a influência da posição do centro de massa nas acelerações de uma torre esbelta durante a compactação de pellet feed de minério de ferro saturado. Foram realizados ensaios com 0%, 60% e 100% de preenchimento, medindo-se as acelerações nos eixos X, Y e Z em três alturas da estrutura. Os resultados mostraram que a influência do material variou conforme o eixo e o ponto de medição. A condição de 100% apresentou maior variação média das amplitudes nos primeiros segundos, coincidindo com um maior deslocamento do centro de massa. Os resultados sugerem que esse deslocamento pode contribuir para as variações de aceleração.*

Palavras-chave: Aceleração; Centro de massa; Compactação; Pellet feed; Torre esbelta.

ABSTRACT – This study analyzes the influence of center-of-mass position on the accelerations of a slender tower during the compaction of saturated iron ore pellet feed. Tests were conducted with 0%, 60%, and 100% filling, measuring accelerations along the X, Y, and Z axes at three heights of the structure. The results showed that the influence of the material varied according to the measurement axis and position. The 100% filling condition presented a greater average variation in acceleration amplitudes during the initial seconds, coinciding with a greater displacement of the center of mass. These findings suggest that this displacement may contribute to acceleration variations.

Keywords: Acceleration; Center of mass; Compaction; Pellet feed; Slender tower.

ISSN 2317-1316

1 INTRODUÇÃO

O minério de ferro é um material granular que, durante o carregamento e o transporte ferroviário, está sujeito a acelerações capazes de provocar o rearranjo das partículas e alterar sua compactação (TABATA, 2025). Esse comportamento depende das condições de excitação e das características do material. Moss e Glovnea (2023) observaram que o comportamento de leitos granulares submetidos à excitação horizontal varia conforme a composição e o tamanho das partículas. Wotzlaw, Aubram e Rackwitz (2025) verificaram que acelerações cíclicas podem aumentar a densidade de materiais granulares secos, com resultados influenciados pela relação entre as tensões dinâmicas e estáticas.

Durante a excitação, o movimento relativo entre as partículas pode modificar os contatos entre os grãos e favorecer seu rearranjo, permitindo que ocupem espaços vazios e alterem a densidade do material. Esse processo depende, entre outros fatores, da granulometria, do formato e da rugosidade das partículas, que influenciam as interações entre os grãos e as forças de adesão (BOGSAN, 2022). A umidade também é relevante para o comportamento do minério, especialmente em condições de saturação, nas quais os poros estão preenchidos por água. O Relato Integrado da Vale (2024) destaca a importância do monitoramento das condições da umidade do minério de ferro nas operações ferroviárias. Para o carregamento no vagão e depois, o descarregamento no porto de destino, o minério pode estar, além de úmido, compactado, dificultando a operação no virador de vagões ou realizadas pelas escavadeiras. Desta forma, estudos laboratoriais que apontem a dinâmica da compactação do minério a partir de vibrações semelhantes às encontradas no transporte ferroviário se tornam interessantes.

O desenvolvimento de bancadas experimentais para estudos de compactação de minério pode ser uma tarefa desafiadora, pois este particulado tem alta densidade, tornando o experimento dificultoso pela massa a ser manipulada. Uma bancada que contenha uma torre de minério com altura muito mais baixa que um vagão, utilizado para o transporte de minério, e com secção transversal muito larga, pode não representar corretamente os entendimentos sobre a dinâmica envolvida. Por outro lado, estruturas com altura semelhante ao vagão limitam a torre a uma secção muito menor para ser exequível laboratorialmente, mas podem gerar falhas estruturais devido a sua esbeltez (relação entre secção transversal x altura). Adicionalmente, a variação do centro de massa a medida que o minério se compacta dentro da torre pode impor oscilações muito severas devido à esbeltez.

ISSN 2317-1316

Estudos que relatem a compactação por vibração de particulados dentro de estruturas esbeltas são inexistentes na literatura, ou, no mínimo, escassos. Normalmente estes trabalhos são voltados para estruturas civis maciças. Nesse tipo de estrutura, a distribuição de densidade pode influenciar seu comportamento dinâmico em relação às frequências naturais de vigas, com influência de massas concentradas e apoios elásticos (JACQUOT E GIBSON, 1972). Em uma torre esbelta preenchida com minério, a movimentação e a redistribuição das partículas durante a compactação podem alterar a posição do centro de massa do conjunto. Se não forem investigadas corretamente, as oscilações inerentes da vibração podem ser severas, a ponto de haver uma falha estrutural do aparato.

Diante disso, este trabalho investiga a influência da compactação de minério de ferro do tipo pellet feed na mudança da posição do centro de massa dentro de uma torre de acrílico esbelta através da medição das acelerações horizontais e verticais. Para isso, são avaliadas três condições de preenchimento com minério: estrutura vazia (0%), preenchimento de 60% e preenchimento de 100%. A condição de excitação do motor foi mantida constante, para comparar os resultados entre os níveis de preenchimento e analisar sua relação com a redistribuição do material e a compactação do minério.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Caracterização do estudo

O presente trabalho caracteriza-se como uma pesquisa experimental, realizada em bancada, com o objetivo de investigar a influência da distribuição de massa no interior de uma torre esbelta sobre as acelerações medidas durante a compactação de material granular. Os ensaios foram realizados com minério de ferro do tipo pellet feed saturado

2.2 Bancada experimental

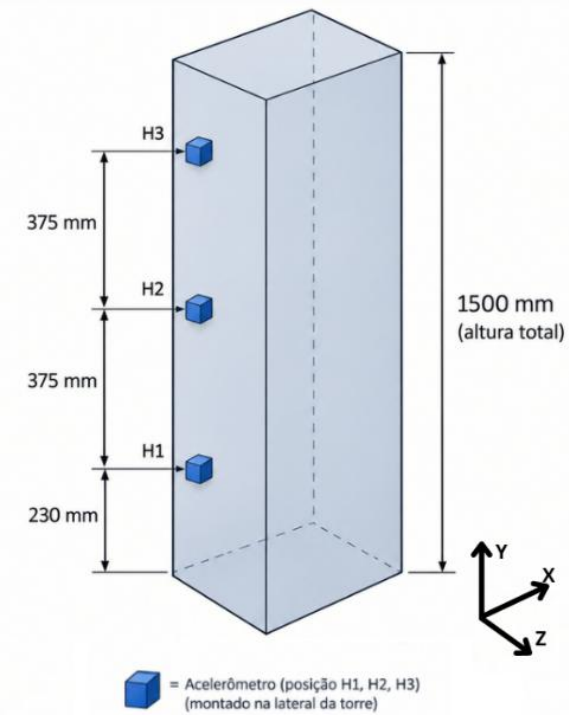
Os ensaios foram realizados em uma bancada experimental composta por uma torre de acrílico com 1,5 m de altura e seção transversal quadrada, com dimensão interna de 80 mm, destinada à acomodação e compactação do material granular. A relação entre a altura e as dimensões da seção transversal caracteriza uma geometria esbelta, aspecto relevante para a análise do comportamento dinâmico da estrutura. A torre possui uma estrutura de suporte e está instalada sobre uma mesa vibratória apoiada em molas, que reduzem a transmissão de vibrações para o solo durante os ensaios.

ISSN 2317-1316

A excitação foi gerada por meio de um motovibrador de 1 cv (0,745 kW), responsável por produzir o movimento vibratório do conjunto. Dessa forma, foi possível realizar os ensaios com diferentes massas de material, mantendo as demais condições experimentais constantes.

A resposta vibratória do sistema foi monitorada por meio de um acelerômetro LYNX cujas medições foram realizadas em três pontos distintos da estrutura. O primeiro ponto (H1) foi localizado a 230 mm da base, o segundo (H2) a 605 mm e o terceiro (H3) a 980 mm. Em cada ponto foram registrados os sinais de aceleração nos eixos X, Y e Z, apresentados na figura 1.

Figura 1: Disposição das alturas de coleta de dados do acelerômetro.



Como o eixo Y do acelerômetro foi orientado verticalmente, com sentido positivo para cima, a aceleração da gravidade contribui para a leitura do sensor conforme sua convenção de sinais. Para facilitar a interpretação dos resultados, foi realizado o ajuste da referência do sinal, de modo que a aceleração no eixo Y fosse representada em torno de zero, permitindo analisar as variações associadas à vibração do sistema.

2.3 Procedimento experimental

ISSN 2317-1316

Foram realizados ensaios em três condições de massa: a primeira condição correspondeu a aproximadamente 20 kg de pellet feed saturado, preenchendo 100% da estrutura, a segunda condição utilizou 13 kg de material, correspondendo a 60% do preenchimento, a terceira condição foi realizada com a estrutura vazia, sem a presença de material, para fins de referência.

Para cada condição, a bancada foi submetida à vibração durante 30 minutos, enquanto os sinais de aceleração eram registrados. A aquisição dos dados foi realizada com frequência de amostragem de 500 Hz, correspondendo a 500 registros por segundo para cada eixo de medição.

Durante os ensaios com pellet feed, a altura do material foi medida em intervalos de tempo definidos, utilizando-se uma régua graduada, permitindo acompanhar sua variação ao longo do processo de vibração. A redução da altura de material foi utilizada como indicador da evolução da compactação.

A condição sem material foi utilizada como referência para a análise da resposta vibratória da estrutura sem a influência da carga de pellet feed. As condições de 13 kg e 20 kg permitiram avaliar a resposta do sistema com diferentes níveis de preenchimento e sua relação com a compactação do material.

2.4 Tratamento e análise dos dados

Os dados de aceleração foram organizados de acordo com a condição de preenchimento, o ponto de medição e o eixo analisado. Foram elaborados gráficos de aceleração em função do tempo para as condições de 0, 13 e 20 kg, com o objetivo de identificar o intervalo inicial de maiores oscilações e o período em que a aceleração passa a apresentar comportamento mais estável. Para os ensaios com material, também foram elaborados gráficos da altura do pellet feed em função do tempo, permitindo acompanhar a evolução da compactação e calcular as taxas médias de redução da altura nos intervalos analisados.

A taxa média de redução da altura do material foi calculada pela diferença entre as alturas inicial e final de cada intervalo, dividida pelo tempo decorrido, conforme a Equação 1

$$v_h = \frac{h_f - h_i}{t_f - t_i} \tag{1}$$

Sendo:
v_h = taxa média de redução da altura (cm/s);
h_i = altura inicial do material (cm);

ISSN 2317-1316

h_f = altura final do material (cm);
t_i = instante inicial (s);
t_f = instante final (s).

A posição do centro de massa do material foi estimada considerando uma distribuição uniforme de massa ao longo da altura da coluna. Dessa forma, foram consideradas tanto as posições iniciais correspondentes aos diferentes preenchimentos quanto as alterações dessa posição ao longo da compactação. O deslocamento estimado do centro de massa foi determinado a partir da diferença entre suas posições inicial e final em cada intervalo analisado, permitindo considerar as diferenças de distribuição de massa entre as condições de 60% e 100% de preenchimento.

O deslocamento do centro de massa foi estimado considerando uma distribuição uniforme de massa ao longo da altura da coluna. Sob essa hipótese, a posição vertical do centro de massa foi estimada pela Equação 2

$$y = \frac{H}{2} \tag{2}$$

Onde:
y = Altura estimada do centro de massa (cm);
H = Altura da coluna de minério (cm).

Com base nas posições estimadas para os instantes inicial e final de cada intervalo, o deslocamento do centro de massa foi calculado pela Equação 3

$$\triangle y = y_i - y_f \tag{3}$$

Onde:
$\triangle y$ = deslocamento estimado do centro de massa (cm);
y_i = altura inicial do centro de massa (cm);
y_f = altura final do centro de massa (cm);

As amplitudes de aceleração foram determinadas a partir dos valores máximo e mínimo registrados em cada intervalo, conforme a Equação 4:

$$A_{pp} = a_{max} - a_{min} \tag{4}$$

Onde:
A_{pp} = amplitude pico a pico da aceleração (g);
a_{max} = valor máximo de aceleração registrado no intervalo (g);

ISSN 2317-1316

a_{min} = valor mínimo de aceleração registrado no mesmo intervalo (g).

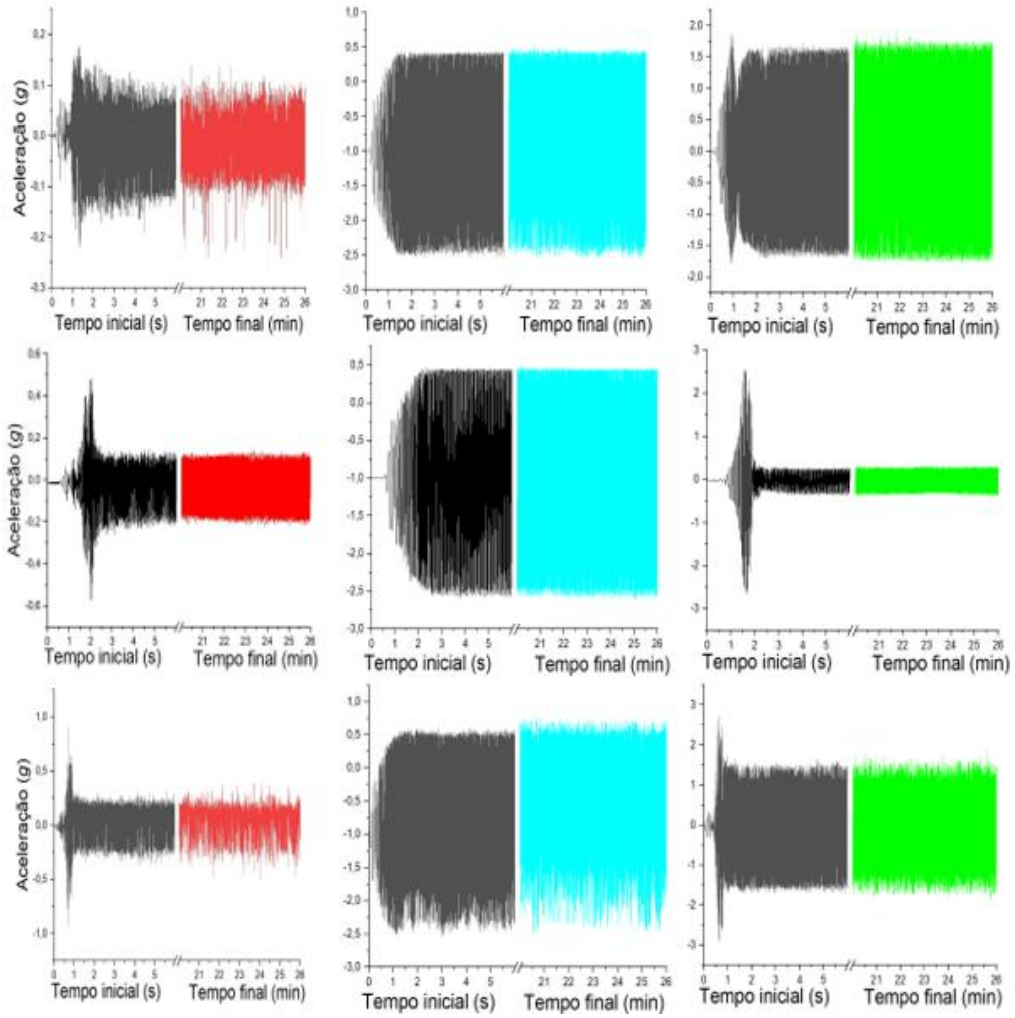
Por fim, os resultados foram analisados em conjunto para investigar a relação entre a taxa de compactação, o deslocamento estimado do centro de massa e a variação das amplitudes de aceleração entre as condições de preenchimento, considerando também a correspondência temporal entre a compactação mais intensa e as maiores oscilações observadas nos sinais.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Comportamento vibratório da estrutura

A Figura 2 apresenta, de modo esquemático, que o plano horizontal XZ de referência representam as movimentações laterais da torre, enquanto as vibrações verticais são representadas pela coordenada Y.

Figura 2: Representação esquemática dos pontos de medição da aceleração na torre, sendo a primeira linha correspondente ao ponto H1, a segunda ao ponto H2 e a terceira ao ponto H3.



ISSN 2317-1316

A condição de 0% de preenchimento foi utilizada como referência para a análise do comportamento vibratório da torre sem a presença do material granular. Nos três eixos de medição (X, Y e Z) e nos pontos H1, H2 e H3, não foi observada variação significativa da aceleração ao longo do ensaio, indicando que a resposta vibratória permaneceu praticamente constante após o acionamento do motor. Como não havia material no interior da torre, não ocorreu alteração na distribuição de massa do minério nem deslocamento do seu centro de massa. Dessa forma, essa condição permite comparar os resultados dos ensaios com 60% e 100% de preenchimento e avaliar a influência da presença e da compactação do material sobre a resposta vibratória do sistema.

A Tabela 1 apresenta as amplitudes de aceleração registradas nos períodos inicial e final para a condição de 0% de preenchimento, servindo como referência para a comparação com os ensaios realizados com material.

Tabela 1: Amplitudes de aceleração para 0% de preenchimento

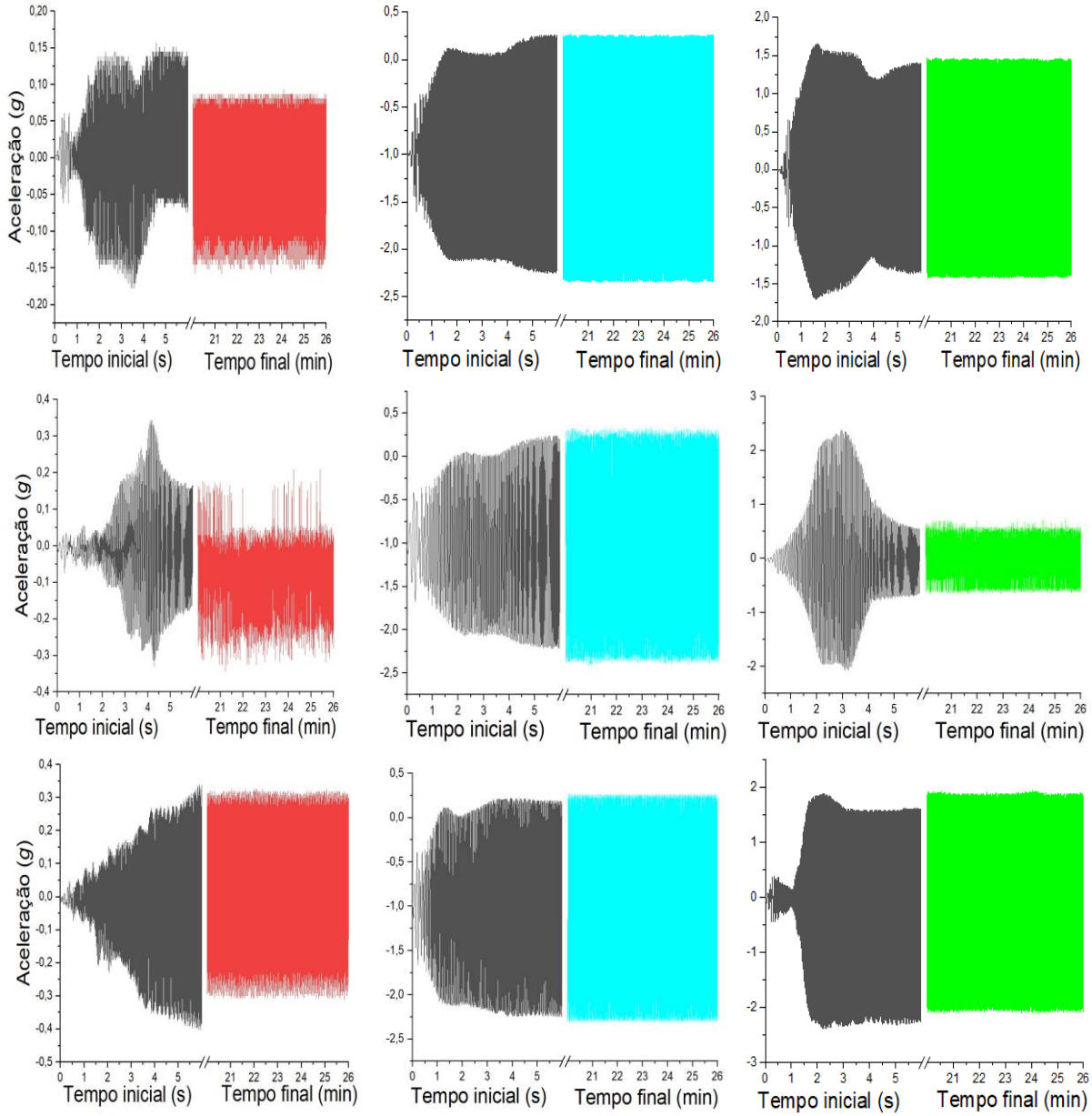
	$X_{inicial}\,(g)$	$X_{final}\,(g)$	$Y_{inicial}\,(g)$	$Y_{final}\,(g)$	$Z_{inicial}\,(g)$	$Z_{final}\,(g)$
H1	0,4	0,39	2,98	3,08	3,64	3,72
H2	1,05	0,37	3,06	3,07	5,21	3,13
H3	1,81	0,88	3,14	3,25	5,63	3,7

Para a condição de 0% de preenchimento, as variações das amplitudes de aceleração foram pouco expressivas ao longo do ensaio. Como não havia material no interior da torre, não ocorreu deslocamento do centro de massa associado à compactação do pellet feed. Assim, as diferenças observadas entre as amplitudes iniciais e finais podem ser atribuídas principalmente ao transiente provocado pela partida do motor no início do ensaio, seguido pela estabilização do sistema. Dessa forma, essa condição serve como referência para a comparação com os ensaios com material.

Os gráficos a seguir apresentam as acelerações registradas nas condições de 60% e 100% de preenchimento, contemplando os três pontos de medição e os eixos X, Y e Z. A comparação entre os períodos inicial e final permite avaliar as alterações nas amplitudes de aceleração e as diferenças observadas entre as condições de preenchimento.

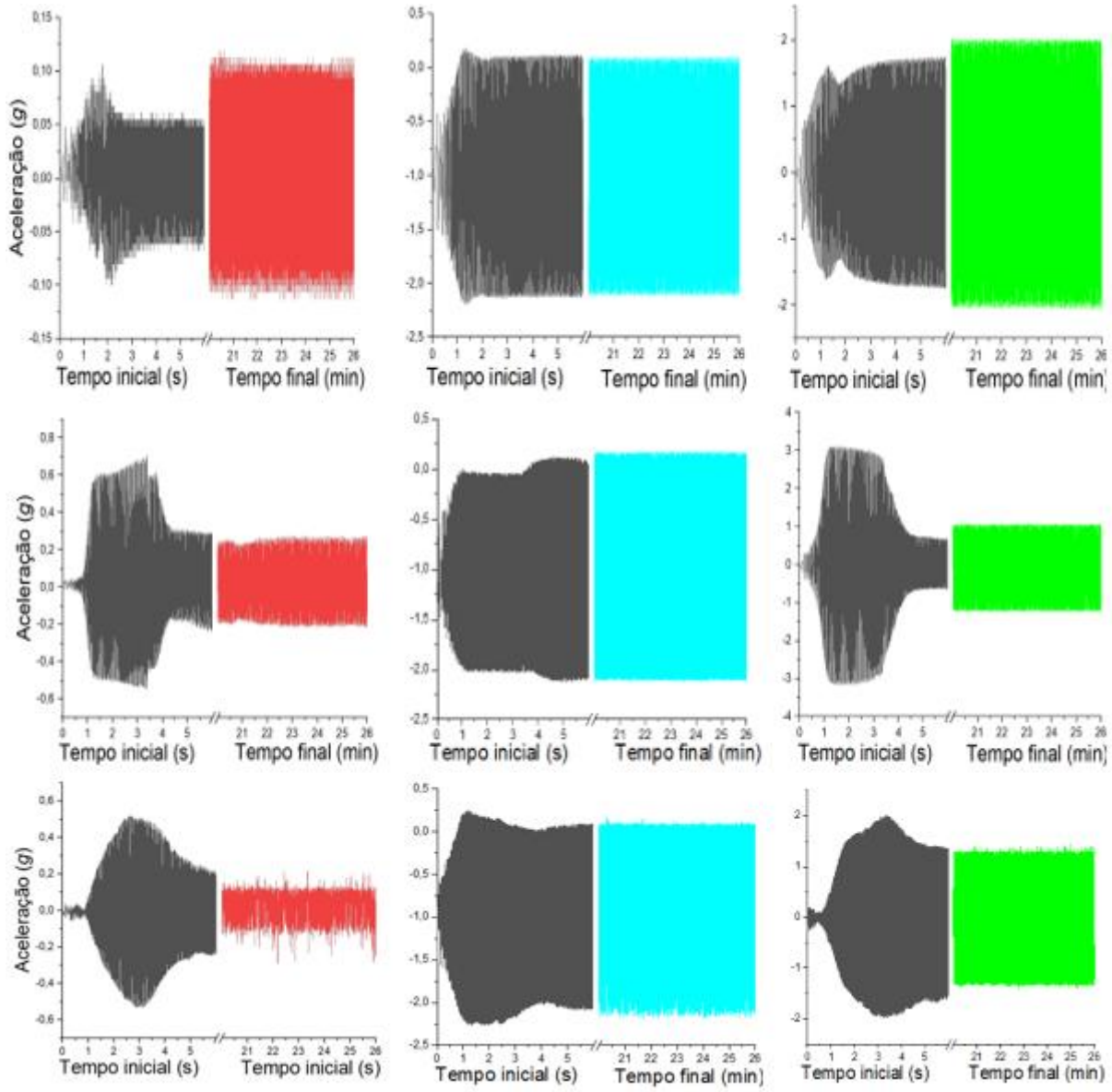
ISSN 2317-1316

Figura 3: Variação da altura do pellet feed e da aceleração da torre em função do tempo para a condição de 60% de preenchimento.



ISSN 2317-1316

Figura 4: Variação da altura do pellet feed e da aceleração da torre em função do tempo para a condição de 100% de preenchimento.



A Tabela 2 e 3 reúne as amplitudes de aceleração inicial e final obtidas nas condições de 60% e 100% de preenchimento, permitindo comparar as variações registradas nos diferentes eixos e pontos de medição.

As acelerações registradas no eixo X foram inferiores às observadas no eixo Z. Essa diferença pode estar relacionada às características da estrutura de suporte, que restringem a movimentação da torre na direção X, enquanto o eixo Z coincide com a direção de rotação do motovibrador.

ISSN 2317-1316

Nos eixos X e Z, as acelerações registradas em H2 foram inferiores às observadas em H1 e H3. Esse comportamento está relacionado à influência da estrutura de suporte sobre a resposta dinâmica da torre, que reduz a movimentação na região intermediária. Dessa forma, a aceleração apresenta uma distribuição não uniforme ao longo da altura da estrutura, com menores valores no ponto intermediário em comparação aos pontos inferior e superior.

Tabela 2: Amplitudes de aceleração nos pontos de medição H1, H2 e H3 para a condição de 60% de preenchimento.

60%	$X_{inicial}$ (g)	X_{final} (g)	$Y_{inicial}$ (g)	Y_{final} (g)	$Z_{inicial}$ (g)	Z_{final} (g)
H1	0,33	0,25	2,52	2,62	3,37	2,90
H2	0,68	0,55	2,47	2,75	4,47	1,39
H3	0,74	0,64	2,47	2,58	4,28	4,04

Tabela 3: Amplitudes de aceleração nos pontos de medição H1, H2 e H3 para a condição de 100% de preenchimento.

100%	$X_{inicial}$ (g)	X_{final} (g)	$Y_{inicial}$ (g)	Y_{final} (g)	$Z_{inicial}$ (g)	Z_{final} (g)
H1	0,4	0,39	2,98	3,08	3,64	3,72
H2	1,05	0,37	3,06	3,07	5,21	3,13
H3	1,81	0,88	3,14	3,25	5,63	3,7

Em relação à influência da massa de material, o eixo Y foi o único a apresentar uma redução da aceleração com o aumento do preenchimento, seguindo a relação 0% > 60% > 100%. Esse resultado indica que o aumento da massa está associado à redução da aceleração vertical registrada, possivelmente devido ao aumento da inércia do conjunto e às alterações na distribuição de massa durante a compactação do material.

3.2 Análise da compactação

Os perfis de compactação do pellet feed para os preenchimentos de 60% e 100% são apresentados nas Figuras 6 e 7, respectivamente. Em ambas as condições, a maior redução de altura ocorreu nos primeiros 10 segundos, com taxas médias de 1,135 cm/s para 60% e 2,4 cm/s para 100%. Após esse intervalo, a taxa de compactação diminuiu, indicando que a redução da altura ocorreu de forma mais lenta ao longo do ensaio.

ISSN 2317-1316

Figura 5: Variação da altura do pellet feed durante a vibração para 60% de preenchimento.

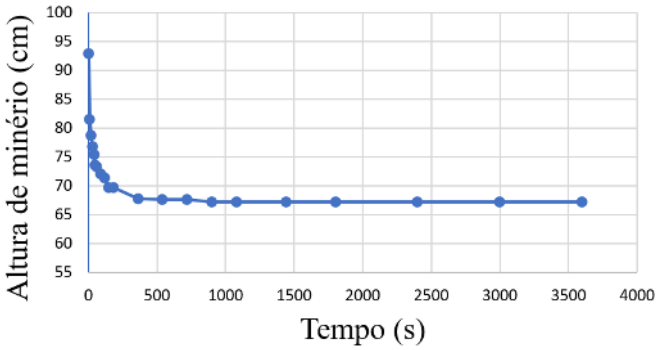
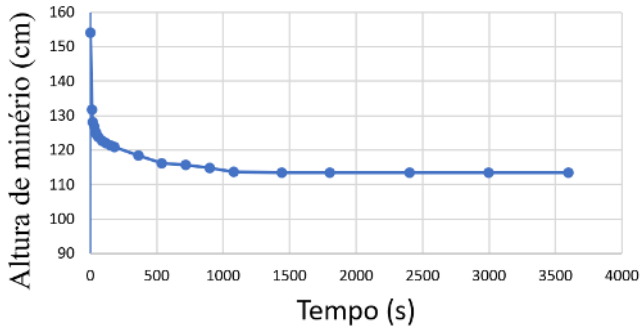


Figura 6: Variação da altura do pellet feed durante a vibração para 100% de preenchimento.



Esse comportamento coincide com os resultados apresentados na Seção 3.1, nos quais as acelerações apresentam oscilações mais acentuadas no início e, posteriormente, tornam-se mais estáveis, sem diferenças significativas na intensidade das oscilações ao longo do tempo. Assim, o período de compactação mais intensa ocorre na mesma etapa em que a resposta dinâmica da torre apresenta maiores variações, enquanto a redução da taxa de compactação é acompanhada pela estabilização das acelerações.

A altura do material atingiu estabilidade aos 900 segundos para 60% e aos 1800 segundos para 100%, embora as acelerações já apresentem comportamento mais estável anteriormente.

3.3 Relação entre vibração e compactação

Inicialmente, o centro de massa estimado para o preenchimento de 100% estava 30,575 cm acima daquele correspondente a 60%, devido à diferença entre as alturas iniciais do material. Nos primeiros 10 segundos de ensaio, o deslocamento estimado do centro de massa do material foi de 5,675 cm para o preenchimento de 60% e de 12 cm para o preenchimento de 100%, considerando uma distribuição uniforme de massa ao longo da altura.

ISSN 2317-1316

Portanto, a condição de 100% apresentou um deslocamento estimado cerca de 2,11 vezes maior nesse intervalo, que também correspondeu ao período de maior taxa de compactação e de maiores oscilações de aceleração.

A condição de 100% de preenchimento apresentou uma variação percentual média das amplitudes de aceleração de 22,5%, enquanto, para 60% de preenchimento, a média foi de 18,3%. Essa diferença ocorreu juntamente com um maior deslocamento do centro de massa na condição de 100%, estimado em 12 cm, em comparação aos 5,675 cm observados para 60%. Esses resultados sugerem que a maior queda do centro de massa pode ter contribuído para o aumento da variação das amplitudes de aceleração, embora essa relação não tenha sido proporcional.

4 CONCLUSÃO

Os resultados mostraram que o preenchimento influenciou as acelerações da torre de forma distinta entre os eixos e os pontos de medição. A condição de 100% apresentou maior variação média das amplitudes (22,5%), em comparação a 18,3% para 60%, sugerindo uma possível influência do maior deslocamento do centro de massa. Para trabalhos futuros, propõe-se avaliar condições intermediárias de preenchimento, como 30% e 80%, além de investigar a influência de diferentes frequências de excitação sobre a resposta dinâmica da torre. Os autores agradecem à VALE S.A. pelo apoio financeiro ao projeto para desenvolvimento de pesquisas, em parceria com a Universidade Santa Cecília, em Santos-SP, ao orientador Prof. Dr. Felipe Bertelli, às mestrandas Marcella Guedes Vieira e Isabela Ferreira de Souza, coorientadoras deste trabalho e ao colaborador técnico do projeto Vale, engenheiro Álvaro Luiz Moreira Conrado, pelo acompanhamento e apoio durante a realização deste estudo.

5 DECLARAÇÃO DE USO DE IA

Declaração de Uso de IA: Durante a elaboração deste trabalho, utilizou-se a ferramenta Gemini para Correção de pontuação e ortografia. O conteúdo gerado foi revisado, editado e validado pelos autores, que assumem total responsabilidade pelo texto final.

ISSN 2317-1316

6 REFERÊNCIAS

Bogsan, M. Desenvolvimento de uma bancada experimental para estudos de percolação e drenagem de água em minérios. 2022. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Santa Cecília, Santos, 2022.

Jacquot, R. G., Gibson, J. D. The effects of discrete masses and elastic supports on continuous beam natural frequencies. *Journal of Sound and Vibration*, v. 23, n. 2, p. 237–244, 1972. DOI: 10.1016/0022-460X(72)90563-9.

Moss, J., Glovnea, R. Behavioural responses to horizontal vibrations of quasi-2D ideal granular beds: an experimental approach. *Granular Matter*, v. 25, art. 63, 2023. DOI: 10.1007/s10035-023-01354-7.

Tabata, Ga. Influência da umidade dos minérios de ferro do tipo pellet feed e sinter feed no comportamento de compactação e adesão em diferentes geometrias. 2025. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Santa Cecília, Santos, 2025.

Vale S.A. *Relato Integrado 2024*. [S. l.]: Vale S.A., 2025. Disponível em: https://vale.com/documents/44618/429697/Relato%2BIntegrado%2BVale%2B2024.pdf/2a2958a5-6a68-3b71-867b-9c790c4dc244. Acesso em: 9 out. 2026.

Wotzlaw, M., Aubram, D., Rackwitz, F. Vibrocompaction behaviour of dry granular matter depends on the dynamic to static stress ratio. *Granular Matter*, v. 27, art. 68, 2025. DOI: 10.1007/s10035-025-01539-2.