

MODELO DE DINÂMICA DE VIBRAÇÕES EM DIFERENTES TIPOS DE SOLOS PRÓXIMOS A LINHAS FÉRREAS

VIBRATION DYNAMICS MODEL IN DIFFERENT TYPES OF SOIL NEAR RAILWAY LINES

Celso Gabriel BARROSO FILHO, Júlio Nogueira DIÓGENES, Lucas Bonfim Nogueira ALMEIDA, Antônio Arlândio Lima SILVA

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará. IFCE - Campus Morada Nova. Avenida Prefeito Raimundo José Rabelo, Nº - 2717 – Morada Nova – CE. E-mails: calculista009@gmail.com; julio.nogueira.diogenes60@aluno.ifce.edu.br; lucas.nogueira.almeida06@ifce.edu.br; antonio.arlandio.lima03@aluno.ifce.edu.br

Introdução
Previsão de vibrações
Previsão de vibração: ondas S e P
Validação
Metodologia e resultados
Análise dos solos e edifícios
Conclusões
Agradecimentos
Referências

RESUMO - Os edifícios estão sujeitos a vibrações provocadas pelo ambiente, tais como as provenientes da indústria, sismos, obras em geral etc. A construção de edifícios próximos as linhas férreas está se tornando cada vez mais comum nas grandes e pequenas cidades, ao redor do mundo. O presente trabalho mostra uma análise analítica das propagações das vibrações no solo, causadas pela passagem dos trens, que atingem as edificações, pessoas ou benfeitorias próximas. Uma das justificativas é a segurança estrutural e o melhor entendimento de parâmetros físicos e geotécnicos dos solos das regiões próximas às linhas de férreas. São verificados vários parâmetros geotécnicos de solo, a fim de avaliar sua influência e sensibilidade na propagação da velocidade e aceleração de vibração instantânea nos solos induzida por trens. Outros parâmetros também são analisados, tais como a distância da linha férrea, velocidade e carga do trem. Quando a curva de propagação de pico de intensidade de vibração ao longo da distância a linha ferroviária é traçada, é possível se notar um padrão de comportamento distinto entre as vibrações verticais e horizontais assim como uma diferença de sensibilidade entre os deslocamentos, velocidades e acelerações de vibrações ao aumento da velocidade do trem.

Palavras-Chave: Propagação da vibração. Vibração no solo. Ferrovia. Trem. Solo.

ABSTRACT - Buildings are subject to vibrations caused by the environment, such as those from industry, earthquakes, works in general, etc. The construction of nearby buildings such as railway lines is becoming increasingly common in large and small cities around the world. The present work shows an analytical analysis of the propagations of vibrations in the soil, caused by the passage of trains, which reach as buildings, people or nearby improvements. One of the justifications is structural safety and a better understanding of physical and geotechnical parameters of the soils of the regions near the railway lines. Several soil geotechnical parameters are verified in order to evaluate their influence and sensitivity in the propagation of speed and acceleration of instantaneous vibration in the soils induced by trains. Other parameters are also analyzed, such as rail line distance, train speed and load. When the peak propagation curve of vibration intensity along the distance the railway line is drawn, it is possible to notice a distinct pattern of behavior between vertical and horizontal vibrations as well as a difference in sensitivity between displacements, speeds and vibration accelerations to increased train speed.

Keywords: Vibration propagation. Vibration in the ground. Railroad. Train. Soil.

INTRODUÇÃO

Devido a crescente especulação imobiliária nos perímetros urbanos, se tornou inevitável a execução de vias de tráfego automobilístico e ferroviário próximas aos edifícios. O fluxo de trens induz nesses edifícios vibrações que podem afetar seus ocupantes, bem como o sistema estrutural e o funcionamento de equipamentos, segundo Carvalho (2016).

Dentre as várias e diversas poluições, as vibrações ambientais antigamente eram completamente toleradas e negligenciadas, porém atualmente tem se tornado um desconforto e incômodo para usuários de habitações próximas a fontes de vibração. De acordo com investigações

e pesquisas estatísticas em vários continentes a vibração ambiental lidera as reclamações perdendo apenas para a indústria e construção de acordo com pesquisas feitas por Carvalho (2016).

Com o aumento das velocidades dos veículos, das massas dos veículos e o crescimento do tráfego, associado com a construção de vias de tráfego urbano cada vez mais próximas dos edifícios, as influências das vibrações induzidas pelo tráfego estão se tornando cada vez mais fortes, enquanto com o desenvolvimento da sociedade, a exigência do público sobre os ambientes é cada vez mais rigorosa. Portanto, as influências das vibrações induzidas pelo tráfego sobre a vida e ambientes

de trabalho do ser humano têm despertado a atenção das autoridades municipais como bem como engenheiros e pesquisadores (Xia et al., 2005).

As vibrações ferroviárias são oriundas principalmente do contato entre a roda e os trilhos da ferrovia. As forças de contato são vertical, longitudinal e transversal, sendo a carga vertical a maior responsável pelas vibrações em edifícios localizados próximos as ferrovias, assim como descrito no trabalho de Carvalho (2016). Assim, o trem trafegando nos trilhos é considerado a fonte da vibração, ou seja, onde a carga dinâmica é gerada; o solo é o caminho por onde as ondas se propagam; essas ondas são transmitidas até um

receptor que possa estar em algum lugar do solo. Portanto, cada uma destas regiões dos solos tem suas próprias propriedades e parâmetros que afetam os níveis de vibração.

O objetivo deste trabalho é investigar e analisar a propagação das vibrações em solos sob a variação de parâmetros geotécnicos, causadas pela passagem dos trens, que podem atingir as edificações, pessoas ou benfeitorias próximas. Foi analisado também como a velocidade dos trens excitam dinamicamente os solos e qual efeito tal excitação causa de acordo com normas e regulamentos sobre acelerações e vibrações em solos.

PREVISÃO DE VIBRAÇÕES

As vibrações geradas na fonte se propagam através do campo livre na forma de ondas. Essas ondas estão divididas em ondas de corpo ou de volume e de superfície. As ondas de corpo propagam-se no interior da terra e existem dois tipos de ondas: as primárias, também denominadas de ondas *P*, e as secundárias, chamadas de ondas *S*. As ondas *P* são ondas longitudinais que fazem o solo vibrar paralelamente à direção da onda, sendo as primeiras a chegar na superfície, pois têm uma velocidade de propagação maior, conforme descrito por Persson (2016). São conhecidas como ondas de compressão e têm menores amplitudes. Proporcionam aos corpos sólidos elásticos alterações de volume, sem alterações na forma.

As ondas *S* são ondas transversais ou de cisalhamento, o que significa que o solo é deslocado perpendicularmente à direção de propagação. São mais lentas que as ondas *P*, sendo as segundas a chegar na superfície e propagam-se

apenas em corpos sólidos. Provocam alterações na forma, sem alteração de volume e sua amplitude é várias vezes maior do que a das ondas *P*, porém são menores do que as ondas superficiais.

As ondas de superfície são ondas que se propagam no plano da superfície terrestre, deslocando-se mais lentamente que as ondas de corpo, cuja velocidade é aproximadamente constante. Contudo, estas ondas são mais destrutivas, devido a sua baixa frequência, longa duração e grande amplitude. São resultantes da interação das ondas *P* e *S* com a superfície. As ondas de Rayleigh (*R*) são um tipo de onda superficial, e provocam vibração no sentido contrário à propagação da onda, ou seja, em um movimento de rolamento (descrevem uma órbita elíptica e retrógrada), e a sua amplitude diminui rapidamente com a profundidade.

A velocidade de propagação das ondas *P*, *S* e *R* são calculadas pelas seguintes expressões:

$$c_p = \sqrt{\frac{\lambda - 2\mu}{\rho}} \quad c_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \quad c_r = \frac{(0,97 + 1,12\nu)c_s}{1 + \nu} \quad (1)$$

Em que c_p , c_r e c_s são as velocidades das ondas *P*, *R* e *S* respectivamente, λ é a constante de elasticidade, μ é o módulo de rigidez (também conhecido como módulo de cisalhamento) também conhecidos como constantes de Lamé, ρ é a densidade do meio segundo Sadd (2005) e ν é Coeficiente de Poisson.

Assim, a velocidade dessas ondas não é constante, mas varia diretamente com a rigidez dos materiais (quanto mais rígido, maior velocidade) e inversamente com a densidade (quanto mais denso, menor a velocidade).

A propagação da onda tem início após a

geração da vibração na fonte. Essas ondas se propagam no semi-espaço, o qual é limitado pela sua superfície, o que caracteriza um problema tridimensional. À medida que a vibração se afasta da fonte, a intensidade desta diminui. As ondas de corpo se propagam em qualquer direção, enquanto as de superfície se propagam no plano, se a onda encontrar um receptor irá transferir uma parte da sua energia para o mesmo, induzindo assim uma resposta dinâmica no receptor. De acordo com Bahrekazemi (2004), o entendimento de como a fonte emissora da vibração, o trajeto e o receptor influenciam na

situação da vibração é crucial para a previsão das respostas.

Previsão de Vibração: Ondas S E P

Para um trem em movimento, infere-se que suas cargas verticais são muito maiores que suas cargas longitudinais e transversais. Por isso, na modelagem do movimento do trem ao longo do trilho, são considerados apenas os deslocamentos causados pela carga vertical em relação ao solo. A ferrovia é considerada uma viga de Euler-Bernoulli infinita (trilho) sobre uma fundação elástica (dormentes e lastros), cujo coeficiente de rigidez é s (N/m²) (Figura 1a) que representa a resistência que os solos têm a flexões.

Sendo assim, considera-se a carga da roda como uma força exercida da pista ferroviária para o solo. Para isso, utiliza-se a curva de deflexão da pista a fim de simular a distribuição da carga da roda, em função das propriedades elásticas da pista e da magnitude da carga por eixo (Krylov & Ferguson, 1994).

Os deslocamentos do solo (u , v e w) são avaliados segundo os respectivos eixos coordenados cartesianos x , y e z , em que a superfície do solo é definida pelo plano $z = 0$ (Figura 1b), indicando que o eixo positivo z está direcionado para o interior do solo. Neste caso, o solo é considerado homogêneo, elástico, isotrópico, linear e semi-infinito, sujeito a um carregamento móvel com velocidade constante aplicado na sua superfície.

O formalismo matemático usado na previsão das vibrações no presente trabalho é retirado do trabalho de Eason (1965), no seu trabalho ele partiu das relações de tensão-deformação (Lei Hooke Generalizada) para deduzir as equações de movimento do solo. Estas equações são resolvidas através de transformadas integrais, como a transformada de Fourier e sua inversa, e através de manipulações matemáticas obtém-se as equações para o campo de deslocamentos do solo, devido a carga pontual, P_1 , que se move ao longo do trilho, na direção do eixo x .

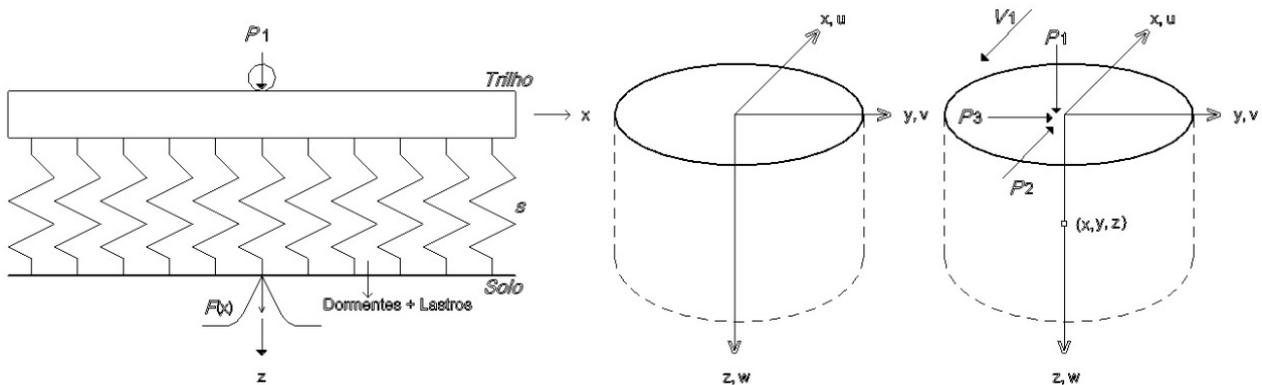


Figura 1 - (a) Modelo da ferrovia; (b) Deslocamentos u , v e w do solo, segundo os eixos coordenados; (c) Carga trem-eixo.

Considerando que a carga da roda P_1 (N) é distribuída elasticamente em $x = 0$ e $z = 0$, então, a função de distribuição da carga na pista ferroviária pode ser escrita como:

$$F(x) = \frac{P_1}{2\alpha} e^{-|x|/\alpha} \left(\cos\left(\frac{|x|}{\alpha}\right) + \sin\left(\frac{|x|}{\alpha}\right) \right) \quad (2)$$

Em que, α é o comprimento característico da pista ferroviária, que depende do Módulo de

Elasticidade do material do trilho, E (N/m²), e de sua inércia, I (m⁴):

$$\alpha = \sqrt[4]{\frac{4EI}{s}} \quad (3)$$

Dentre as equações deduzidas por Eason (1965), as equações 4 e 5 medem os deslocamentos verticais (w) e horizontais (v) ao longo dos eixos z e y respectivamente:

$$v = \frac{F(x)r}{4\pi^2\mu} \int_0^\pi \frac{\sin\varphi \cos(\theta - \varphi)}{H} \left\{ \frac{1 - \frac{1}{2} \alpha_2^2 (\cos\varphi)^2}{R_1^2} - \frac{\gamma_1 \gamma_2}{R_2^2} \right\} d\varphi \quad (4)$$

$$w = \frac{F(x)z}{4\pi^2\mu} \int_0^\pi \frac{\gamma_1}{H} \left\{ \frac{\gamma_1 \left(1 - \frac{1}{2} \alpha_2^2 (\cos\varphi)^2 \right)}{R_1^2} - \frac{\gamma_1}{R_2^2} \right\} d\varphi \quad (5)$$

Em que, z representa a profundidade do solo, μ é módulo de cisalhamento do meio por onde a

onda se propaga. Os parâmetros γ_1 , γ_2 , R_1 , R_2 e H são simplificações matemáticas, definidas como:

$$\gamma_1 = \sqrt{1 - \alpha_1^2 (\cos\varphi)^2} \quad \gamma_2 = \sqrt{1 - \alpha_2^2 (\cos\varphi)^2} \quad (6)$$

$$H = \left(1 - \frac{1}{2} \alpha_1^2 (\cos\varphi)^2\right)^2 - \gamma_1 \gamma_2 \quad (7)$$

$$R_1 = \sqrt{r^2 ((\cos(\theta - \varphi))^2 + \gamma_1^2 z^2)} \quad R_2 = \sqrt{r^2 ((\cos(\theta - \varphi))^2 + \gamma_2^2 z^2)} \quad (8)$$

Em que, r (m) e θ (graus) representam a localização em coordenadas polares do ponto no espaço onde os deslocamentos são medidos e o φ (graus) é um parâmetro que varia de 0 a π nas integrais das equações 4 e 5. Os coeficientes α_1 e α_2 são determinados a partir da velocidade do trem V_t e das velocidades das ondas P (c_p) e S (c_s), definidas pela equação 1. Então, estes coeficientes são definidos por:

$$\alpha_1 = \frac{V_t}{C_p} \quad \alpha_2 = \frac{V_t}{C_s} \quad (9)$$

$$\frac{d}{dt}(v) = v_v = \frac{d}{dt} \left(\frac{F(x)r}{4\pi^2\mu} \right) \int_0^\pi \frac{\sin\varphi \cos(\theta - \varphi)}{H} \left\{ \frac{1 - \frac{1}{2} \alpha_2^2 (\cos\varphi)^2}{R_1^2} - \frac{\gamma_1 \gamma_2}{R_2^2} \right\} d\varphi \quad (10)$$

$$\frac{d^2}{dt^2}(v) = a_v = \frac{d^2}{dt^2} \left(\frac{F(x)r}{4\pi^2\mu} \right) \int_0^\pi \frac{\sin\varphi \cos(\theta - \varphi)}{H} \left\{ \frac{1 - \frac{1}{2} \alpha_2^2 (\cos\varphi)^2}{R_1^2} - \frac{\gamma_1 \gamma_2}{R_2^2} \right\} d\varphi \quad (11)$$

$$\frac{d}{dt}(w) = v_w = \frac{d}{dt} \left(\frac{F(x)r}{4\pi^2\mu} \right) \int_0^\pi \frac{\gamma_1}{H} \left\{ \frac{\gamma_1 \left(1 - \frac{1}{2} \alpha_2^2 (\cos\varphi)^2\right)}{R_1^2} - \frac{\gamma_1}{R_2^2} \right\} d\varphi \quad (12)$$

$$\frac{d^2}{dt^2}(w) = a_w = \frac{d^2}{dt^2} \left(\frac{F(x)r}{4\pi^2\mu} \right) \int_0^\pi \frac{\gamma_1}{H} \left\{ \frac{\gamma_1 \left(1 - \frac{1}{2} \alpha_2^2 (\cos\varphi)^2\right)}{R_1^2} - \frac{\gamma_1}{R_2^2} \right\} d\varphi \quad (13)$$

Todas as equações aqui descritas têm as suas unidades no Sistema Internacional (S.I).

Os deslocamentos horizontais vibram e oscilam as partículas de solo lateralmente (afastando e aproximando um ponto do solo da pista ferroviária). E os deslocamentos verticais têm o efeito de levantar e baixar as partículas de solo e nesse presente trabalho são avaliados os efeitos da sensibilidade dos deslocamentos, velocidades e acelerações de tais partículas sob o efeito de fontes indutoras de vibração.

Validação

A validação das equações de Eason (1965) que foram usadas nesse respectivo trabalho, foi feita por Carvalho (2016) utilizando os dados de entrada do estudo de caso abordado por Yang &

A equações (4) a (5) podem ser usadas para extrair soluções numéricas em qualquer ponto no interior do solo, porém não pode ser resolvida na superfície, já que, em $z = 0$, a integral do limite não é igual ao limite da integral. Para o cálculo da velocidade instantânea do solo no eixo z , deve-se derivar uma vez o deslocamento em relação ao tempo, já para o cálculo da aceleração instantânea no solo deriva-se duas vezes as equações do deslocamento, obtendo-se:

Hung (2009), e então os resultados obtidos foram comparados com os resultados destes autores. Neste caso, o trem é representado através de uma carga pontual móvel P_l normal ao solo, sendo que este possui as propriedades de Coeficiente de Poisson $\nu = 0,25$, densidade $\rho = 2.000 \text{ kg/m}^3$ e velocidades de propagação das ondas sendo $c_R = 331,2 \text{ km/h}$, $c_s = 360 \text{ km/h}$ e $c_p = 623,52 \text{ km/h}$. Admite-se o sistema de coordenadas cartesiano e o ponto de análise do deslocamento vertical do solo a um metro de profundidade da origem (0,0,1), considerando que o trem se move a uma velocidade constante $V_t = 324 \text{ km/h}$ ao longo do eixo x , a qual é inferior à velocidade das ondas de Rayleigh no solo. Observa-se na Figura 2 que há uma concordância quase exata entre os resultados.

METODOLOGIA E RESULTADOS

Análises dos solos e edifícios

Um programa computacional baseado na formulação de Eason (1965) foi desenvolvido no aplicativo matemático MAPLE, a fim de avaliar

os problemas aqui estudados.

A formulação matemática considera o solo como homogêneo, elástico, isotrópico e semi-infinito. O veículo ferroviário é representado por

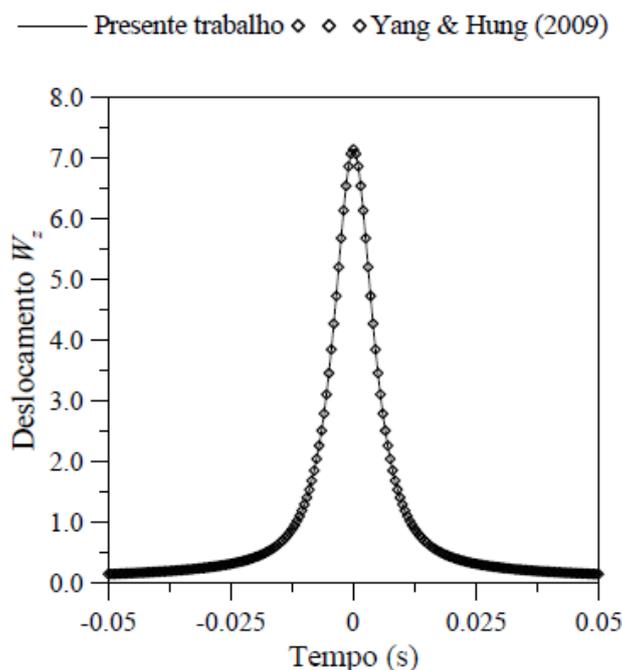


Figura 2 - Validação da equação extraída de Eason (1965) que consta no trabalho de Carvalho (2016).

uma carga pontual móvel, a velocidade constante, aplicado na sua superfície. Barros & Lucco (1994) em seu trabalho observaram singularidades matemáticas aparentes no roteiro matemático da formulação de Eason. Devido a essa impossibilidade matemática, Barros & Lucco (1994) optaram por recalcular as expressões, avaliando os integrandos numericamente, para que esses parâmetros apareçam na equação de forma bem-comportada, fazendo com que a solução esteja em um conjunto bem definido

Para evitar as singularidades matemáticas mencionadas anteriormente, as coordenadas polares são consideradas fixas para cada situação de análise (r depende da distância da pista e o θ é fixado em 90°).

A formulação de Eason (1965) é utilizada para fazer a previsão dos deslocamentos longitudinais em uma determinada região no interior do solo (segundo Carvalho (2016) as equações não funcionam para profundidade nula), o deslocamento de uma partícula de solo segue o padrão topológico apresentado na Figura 2 para

todos os casos analisados, porém se algum parâmetro mudar como o peso do vagão, velocidade do trem ou tipo de solo, o gráfico muda e os valores máximos de deslocamento mudam.

No gráfico da Figura 2 (validação equações) é possível notar que o ponto em que o deslocamento no solo é máximo é o instante em o vagão passa pela origem do sistema cartesiano euclidiano determinado (Figura 1), o deslocamento decai rapidamente para um valor próximo a zero nos instantes depois dessa origem.

No referido trabalho foram usados cinco tipos de velocidades de trem, com dois tipos de solos cada um com suas respectivas propriedades geotécnicas, para analisar o comportamento das vibrações das partículas dos solos (deslocamento, velocidade de vibração e aceleração de vibração, Figura 3). Os valores de deslocamento nos eixos horizontal (por questões analíticas o deslocamento horizontal é medido a partir de 1 metro perpendicular a pista) e vertical são apresentados nas tabelas 1 a 5.

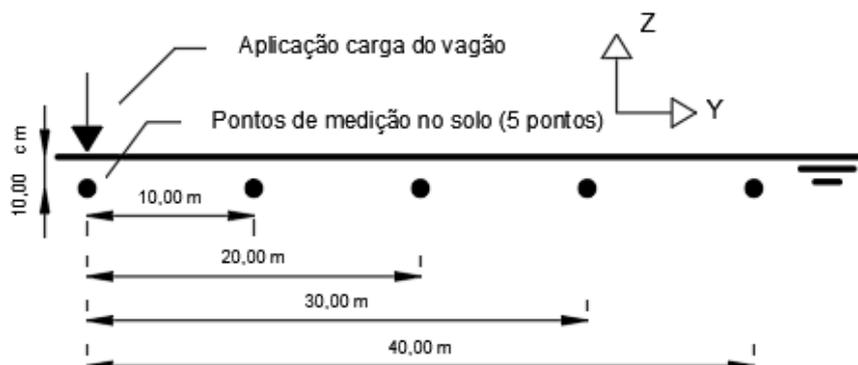


Figura 3 - Pontos de observação e medição no interior do solo.

Tabela 1 - Características dos solos para o estudo de caso

Tipo de solo	c_R (m/s)	c_S (m/s)	c_P (m/s)	ν	ρ (kg/m ³)	E (N/m ²)	G (N/m ²)
Solo 1	157,56	169,84	317,74	0,30	1600,00	120 x 10 ⁶	46,1 x 10 ⁶
Solo 2	26,33	28,29	54,99	0,32	1850,00	39,1 x 10 ⁶	14,81 x 10 ⁶

Tabela 2 – Análise dos deslocamentos horizontais ν do solo 1.

(Solo 1)

Máx. Deslc. Horz. (mm): TR-57/ 80.000,00 kg				ν	ρ (kg/m ³)	E (N/m ²)
				0,30	1600	120 x 10 ⁶

Distância para a pista (m) – Deslocamentos horizontais no solo (mm)

(km/h)	(m/s)	1 m	10 m	20 m	30 m	40 m
60 (km/h)	16,67 m/s	0,028913	0,004265	0,002171	0,001456	0,001095
50 (km/h)	13,89 m/s	0,028857	0,004257	0,002167	0,001453	0,001093
40 (km/h)	11,11 m/s	0,028812	0,004250	0,002164	0,001451	0,001091
30 (km/h)	8,33 m/s	0,028762	0,004245	0,002161	0,001449	0,001090
20 (km/h)	5,56 m/s	0,028751	0,004241	0,002159	0,001448	0,001089

Tabela 3 – Análise dos deslocamentos verticais w do solo 1.

(Solo 1)

Máx. Deslc. Vert. (mm): TR-57/ 80.000,00 kg				ν	ρ (kg/m ³)	E (N/m ²)
				0,30	1600	120 x 10 ⁶

Distância para a pista (m) – Deslocamentos verticais no solo (mm)

(km/h)	(m/s)	0 m	10 m	20 m	30 m	40 m
60 (km/h)	16,67 m/s	0,155151	0,015482	0,007741	0,005160	0,003870
50 (km/h)	13,89 m/s	0,154807	0,015448	0,007724	0,005149	0,003862
40 (km/h)	11,11 m/s	0,154527	0,015420	0,007710	0,005140	0,003855
30 (km/h)	8,33 m/s	0,154310	0,015399	0,007699	0,005133	0,003850
20 (km/h)	5,56 m/s	0,154155	0,015384	0,007692	0,005128	0,003846

Tabela 4 – Análise dos deslocamentos horizontais ν do solo 2.

(Solo 2)

Máx. Deslc. Horz. (mm): TR-57/ 80.000,00 kg				ν	ρ (kg/m ³)	E (N/m ²)
				0,32	1850	39,1 x 10 ⁶

Distância para a pista (m) – Deslocamentos horizontais no solo (mm)

(km/h)	(m/s)	1 m	10 m	20 m	30 m	40 m
60 (km/h)	16,67 m/s	0,079124	0,012143	0,006191	0,004154	0,003125
50 (km/h)	13,89 m/s	0,078527	0,012052	0,006145	0,004123	0,003102
40 (km/h)	11,11 m/s	0,078046	0,011979	0,006107	0,004098	0,003083
30 (km/h)	8,33 m/s	0,077678	0,011923	0,006079	0,004078	0,003069
20 (km/h)	5,56 m/s	0,077417	0,011884	0,006058	0,004065	0,003058

Tabela 5 – Análise dos deslocamentos verticais w do solo 2.

(Solo 2)

Máx. Deslc. Vert. (mm): TR-57/ 80.000,00 kg				ν	ρ (kg/m ³)	E (N/m ²)
				0,32	1850	39,1 x 10 ⁶

Distância para a pista (m) – Deslocamentos verticais no solo (mm)

(km/h)	(m/s)	0 m	10 m	20 m	30 m	40 m
60 (km/h)	16,67 m/s	0,478867	0,047761	0,023879	0,015919	0,011939
50 (km/h)	13,89 m/s	0,474957	0,047376	0,023687	0,015791	0,011843
40 (km/h)	11,11 m/s	0,471822	0,047068	0,023533	0,015689	0,011767
30 (km/h)	8,33 m/s	0,469423	0,046832	0,023415	0,015610	0,011708
20 (km/h)	5,56 m/s	0,467729	0,046666	0,023332	0,015555	0,011666

De acordo com FTA (Federal Transient Administration, 2006), a vibração induzida por trens consiste em esforços e deflexões oscilantes a depender da velocidade e massa dos vagões. Existem vários métodos diferentes que são usados para quantificar o nível de vibração. A velocidade de pico de partículas (Peak Particle Velocity - PPV) é definida como o pico positivo ou negativo instantâneo máximo do sinal de vibração, e no presente trabalho será o método utilizado.

É traçado um gráfico de aceleração e velocidade de vibração para cada situação de velocidade do trem, solo e afastamento da pista

A equação para converter o nível aceleração de vibração de cm^2/s para dB (decibéis) é extraída do trabalho de Xia et al. (2005), onde a é a amplitude máxima da aceleração das partículas do solo em cm/s^2 e G é o nível de aceleração de vibração em decibéis (esses valores de aceleração serão comparados com a escala Mercalli para interpretação e classificação qualitativa dos efeitos causados pela vibração).

Para converter o nível de velocidade de vibração de m/s para dB (decibéis) é usado uma equação sugerida pela FTA (Federal Transient Administration, 2006) onde, L_v , é o nível de velocidade de vibração em decibéis, o v_t é a amplitude máxima da velocidade das partículas do solo em m/s , o v_{ref} é a faixa de velocidade de referência, a FTA (2006) sugere que o valor de referência para a velocidade de vibração seja $2,54 \times 10^{-8} \text{ m}/\text{s}$. As duas equações que convertem tanto a velocidade quanto a aceleração de vibração para decibéis podem ser descritas como:

$$L_v = 20 \log_{10} \left(\frac{v_t}{v_{ref}} \right) \quad G = 20 \log_{10}(a) + 60 \quad (14)$$

Dependendo da potência da locomotiva e do número de vagões engatados, os trens podem chegar a uma velocidade máxima de 60 km/h, de acordo com a ANTT. Para o presente estudo, são considerados cinco tipos de velocidade: 20 km/h, 30 km/h, 40 km/h, 50 km/h e 60 km/h.

Para os fins deste estudo, foi utilizado o valor de 80.000 kg para a carga do vagão. A análise é feita a uma distância de até 40 metros da pista, com os parâmetros medidos no eixo z (vertical) e y (horizontal) a uma profundidade de 10 cm da superfície solo. O tipo de trilho usado na análise é o TR-57, cujo valor de α (equação 3) é igual a 0,77.

Os valores e gráficos que representam os máximos valores de velocidade e aceleração de vibração do solo 1 e 2 para cada afastamento da pista e velocidade do trem, são feitos pela análise das equações de 10 a 13 para o eixo horizontal e vertical e são apresentados a seguir.

Para a velocidade de vibração das partículas do solo 1 no eixo y , considerando a primeira situação (Figura 4a), para todas as velocidades de trem analisadas, observa-se em relação as distâncias da pista ferroviária, que o impacto de vibração é inferior a 100 dB, podendo chegar a 84 dB apenas nas proximidades da linha ferroviária com trens a uma velocidade de 60 km/h, sendo que o efeito sentido pelos usuários de habitações próximas, será um aborrecimento momentâneo.

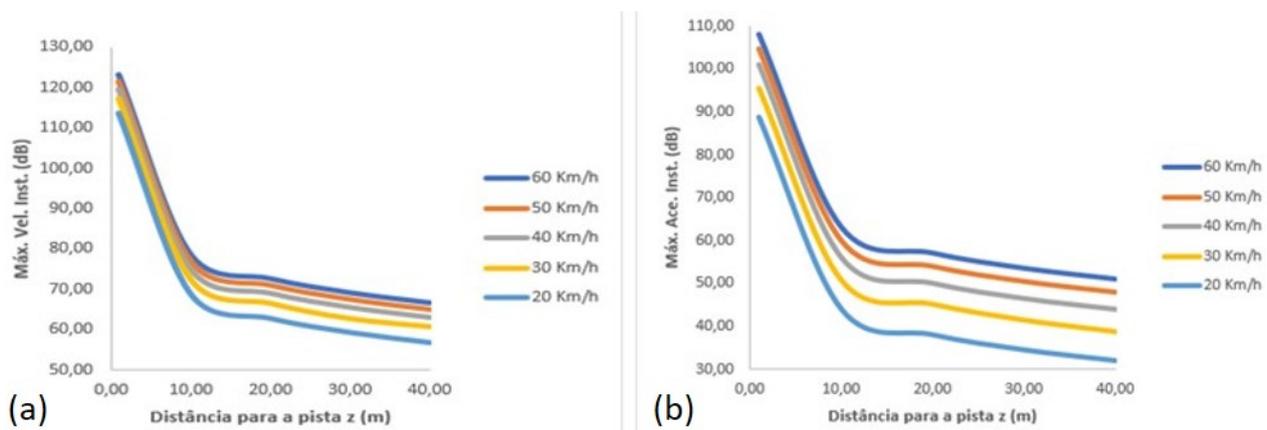


Figura 4. Vibração do solo ao longo do eixo y , em função da velocidade de vibração (a) e da aceleração de vibração (b) para o solo 1.

Entretanto, para o eixo z (Figura 5a) podemos observar que próximo da linha ferroviária e para todas as velocidades de trem analisadas, temos que o impacto de vibração pode chegar a valores acima de 100 dB (a cinco metros da pista), onde

segundo a escala FTA, podemos ter danos a estruturas e edifícios.

Para a aceleração de vibração das partículas do solo 1 no eixo y (Figura 4b), com relação as velocidades de trem analisadas e as distâncias, o

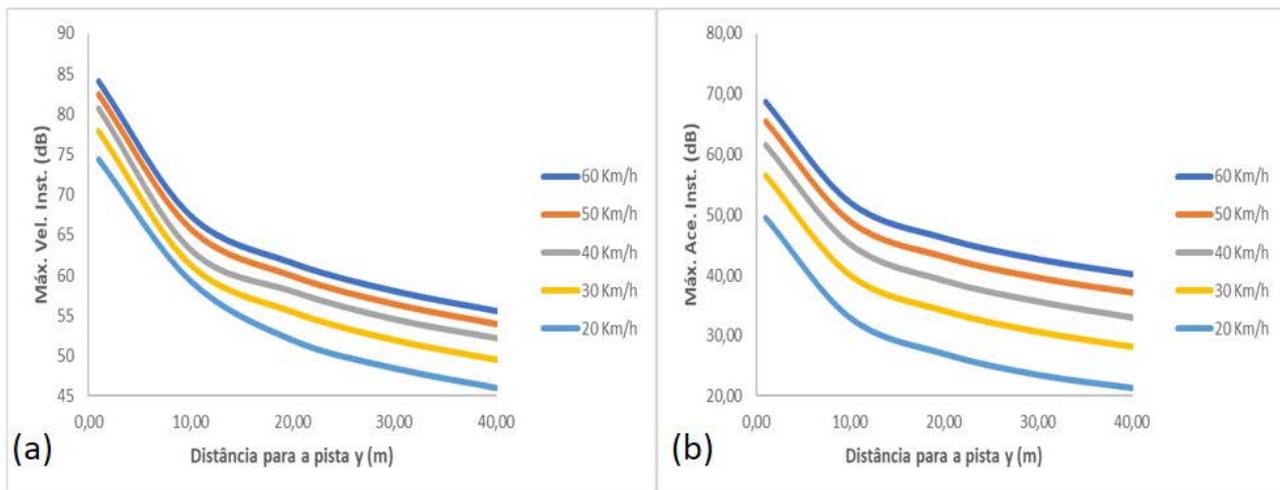


Figura 5. Vibração do solo ao longo do eixo z, em função da velocidade de vibração (a) e da aceleração de vibração (b) para o solo 1.

máximo valor atingido é de aproximadamente 68,6 dB decaindo rapidamente à medida que se distancia da pista, valor esse, é um pouco menor que 70 dB que é o limite para percepção, a aceleração chega a valores menores que 50 dB a 40 metros da pista, para todas as velocidades de trem, onde as mesmas, não são perceptivas.

Já para a aceleração de vibração do eixo z, considerando a situação (Figura 5b), para as velocidades acima de 30 km/h, observa-se que, para as distâncias ao lado da pista ferroviária, o impacto de vibração é superior a 100 dB, podendo ter possíveis danos a estruturas e edifícios, segundo a escala Mercalli.

Para a velocidade de vibração das partículas do solo 2 no eixo y, considerando a primeira situação (Figura 6a), para todas as velocidades de trem analisadas, observa-se em relação as distâncias da pista ferroviária, que o impacto de vibração também é inferior a 100 dB, podendo chegar a 94 dB apenas nas proximidades da linha ferroviária com trens a uma velocidade de 60 km/h. Entretanto, para o eixo z (Figura 7a) podemos observar que próximo da linha ferroviária e para todas as velocidades de trem analisadas, temos que o impacto de vibração pode chegar a valores acima de 130 dB, onde segundo a escala FTA, podemos ter danos a estruturas de edifícios.

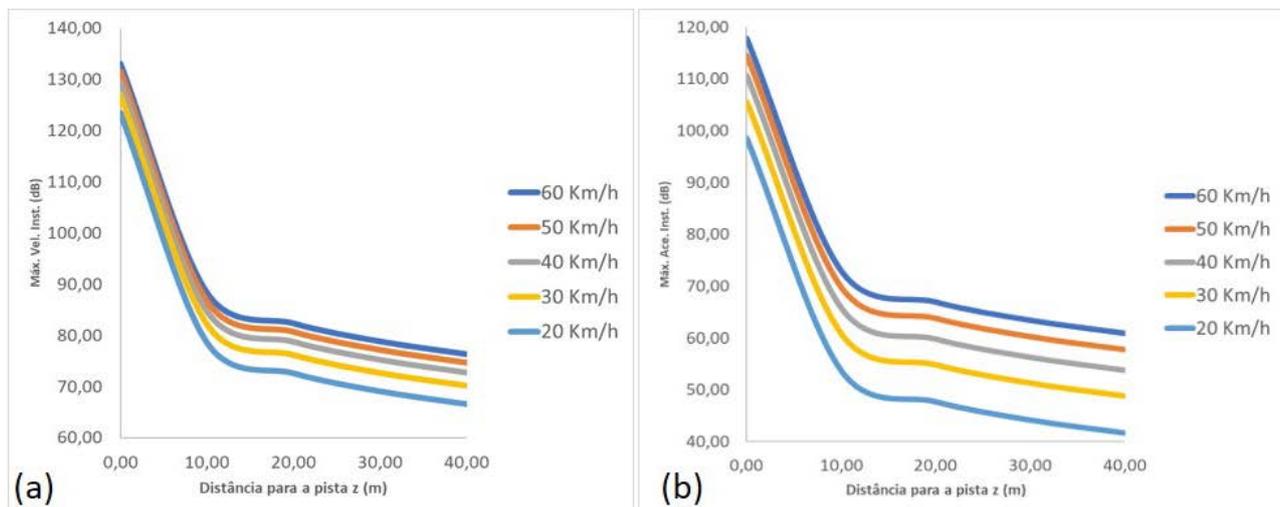


Figura 6. Vibração do solo ao longo do eixo y, em função da velocidade de vibração (a) e da aceleração de vibração (b) para o solo 2.

Para a aceleração de vibração das partículas do solo 2 no eixo y (Figura 6b), com relação as velocidades de trem analisadas e as distâncias, o máximo valor atingido é de aproximadamente 77,9 dB decaindo abruptamente ao passo em que se distancia da pista, valor esse menor que 85 dB, que é o limite para causar desconforto aos usuários.

A aceleração chega a valores menores que 60 dB a 40 metros da pista para todas as velocidades de trem onde as mesmas não são perceptivas. Já para a aceleração de vibração do eixo z (Figura 7b), considerando as velocidades acima de 30 km/h, observa-se que, para as distâncias próximas em relação a pista ferroviária, o impacto de vibração

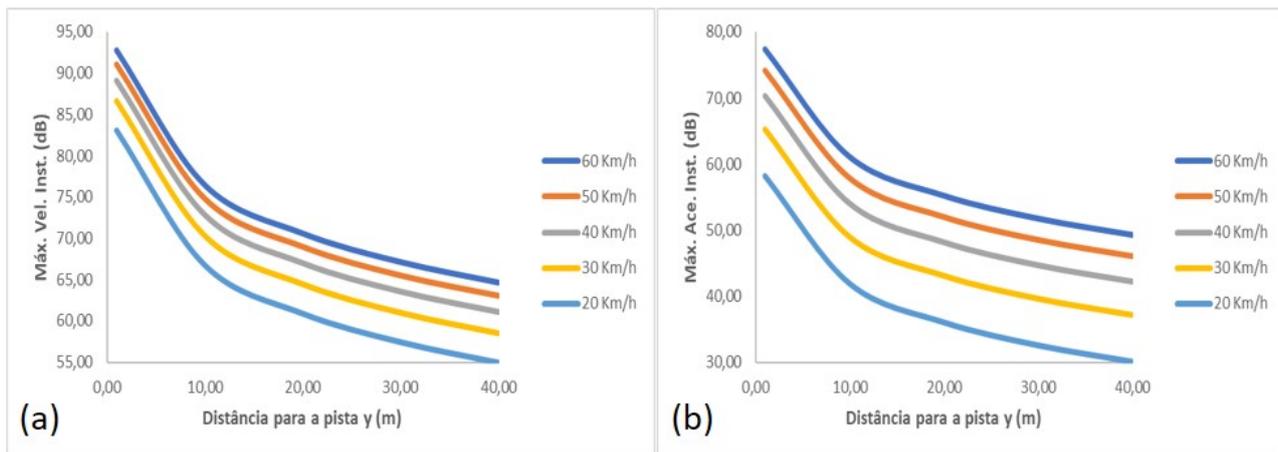


Figura 7. Vibração do solo ao longo do eixo z, em função da velocidade de vibração (a) e da aceleração de vibração (b) para o solo 2.

é superior a 105 dB. Esses valores de vibração são passíveis de ocasionar micro e macro fissuração em estruturas de concreto como determinado pela escala Mercalli.

Ambos os solos têm comportamentos semelhantes quanto a propagação de vibrações, porém o solo com maior módulo de elasticidade oferece uma maior resistência a passagem de vibrações entre as partículas do mesmo, logo tem um menor valor absoluto de vibração. Também é

observado que para todas as situações analisadas os valores de vibração das partículas do eixo z são maiores do que a vibração das partículas do eixo y, pois o eixo z é o eixo de aplicação da carga.

Os gráficos que descrevem aceleração têm uma boa semelhança e aproximação em formato topológico com valores medidos experimentalmente e descritos no trabalho do Xia et al. (2005), ilustrados na Figura 8.

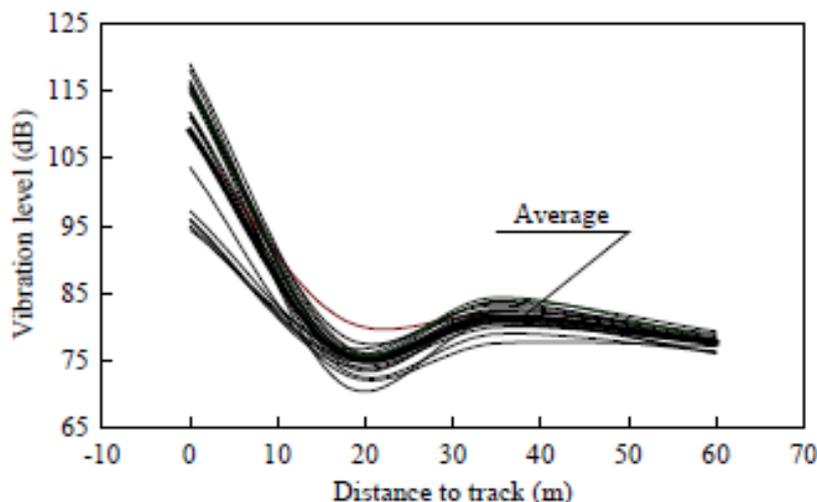


Figura 8. Vibração do solo - aceleração eixo z versus distância perpendicular a linha do trem (trabalho experimental) (Fonte: Xia et al. (2005)).

CONCLUSÕES

No presente trabalho são apresentados os deslocamentos dos solos, ou seja, o quanto eles oscilam por causa da passagem de um trem com velocidades variando de 20 a 60 km/h e 80 toneladas de massa. Analisando os valores de deslocamento de solo provocados pelo movimento retilíneo de veículos ferroviários, é observado um rápido decaimento nos deslocamentos das partículas de solo nos primeiros 15 metros a partir da linha de trem, após essa distância o decaimento é mais atenuado. Como já mencionado anterior-

mente, o solo com maior módulo de elasticidade oferece uma maior resistência a passagem de vibrações entre as partículas do mesmo, logo os valores de vibração são mais atenuados. A velocidade de vibração e a aceleração de vibração para o eixo vertical têm três regiões distintas no formato do gráfico, na primeira é observado um intenso decaimento nos valores máximos de velocidade e aceleração das partículas do solo até uma distância de quinze metros da pista ferroviária, seguida por uma zona de amplificação e

que há uma sutil elevação nos valores de vibração a vinte metros da origem da vibração e a terceira região fica pós zona de amplificação numa região em que os valores de vibração são menores e decaem de forma lenta a medida que se tem um afastamento da pista. O trabalho experimental desenvolvido por Xia et al. (2005) chegou a um padrão de comportamento de propagação de vibração coincidente com os valores apresentados nesse presente estudo, o que mostra uma boa confiabilidade na formulação de Eason (1965), e que a mesma é satisfatória para fornecer uma previsão analíticas de propagações de vibrações em solos.

A velocidade de vibração e a aceleração de vibração para o eixo horizontal tem um formato topológico de curva diferente do eixo vertical, com duas regiões distintas e valores absolutos moderadamente menores em comparação ao eixo vertical do solo.

Na primeira região é observado um decaimento brusco nos valores de vibração e na segunda região é observado um decaimento mais atenuado nos valores de vibração tanto para a velocidade quanto para a aceleração das partículas de solo.

Quando as curvas de deslocamentos, velocidade e aceleração de vibração dos pontos no interior do solo são analisadas, é observado que os deslocamentos são menos sensíveis e reagem

menos ao aumento da velocidade do trem quando comparado com a velocidade e aceleração de vibração das partículas de solo, ou seja, quando aumentamos a velocidade do trem os valores de deslocamento, velocidade de vibração e aceleração de vibração das partículas do solo aumentam, porém, a aceleração aumenta com uma taxa percentualmente maior que a velocidade, e a velocidade, por sua vez, aumenta percentualmente mais do que os deslocamentos.

Os maiores deslocamentos e valores absolutos de velocidade e aceleração de vibração foram obtidos no eixo vertical z (que é o eixo de aplicação da carga), sendo que as vibrações se expandem e irradiam horizontal e perpendicularmente a linha ferroviária e ponto de origem. Esse efeito percussivo pode, a depender da distância da pista ferroviária, acarretar danos estruturas a médio e longo prazo em construções e benfeitorias devido a fadiga e estresse causados nos elementos estruturais.

Recomenda-se como sugestão para trabalhos futuros a realização de ensaios *in situ* com acelerômetros para medir as vibrações no eixo perpendicular à via férrea. O objetivo será comparar os novos resultados com os obtidos no presente estudo, desde que os valores como carga, velocidade do trem e parâmetros dos solos sejam mantidos.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio do IFCE Campus Morada Nova (Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará).

REFERÊNCIAS

- BAHREKAZEMI, M. **Train-induced ground vibration and its prediction**. Índia. 2004. 168 p. Tesis (Doctoral), Institutionen för Byggetenskap.
- BARROS, F.C.P. & LUCO, J.E. Response of a layered viscoelastic half-space to a moving point load. *Wave motion*, v. 19, n. 2, p. 189-210, 1994.
- CARVALHO, A.F.P. **Análise paramétrica da vibração do solo induzida pelo tráfego ferroviário**. Goiânia, 2016. 109 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil - Geotecnia, Estruturas e Construção Civil, Universidade Federal de Goiás.
- EASON, G. The stresses produced in a semi-infinite solid by a moving surface force. *International Journal of Engineering Science*, v. 2, pp. 581-609, 1965.
- FTA (Federal Transit Administration), **Transit noise and vibration impact assessment**. Department of Transportation – USA, 2006.
- KRYLOV, V. & FERGUSON, C. Calculation of low-frequency ground vibrations from railway trains. *Applied Acoustics*, Nottingham, v. 42, p. 199-213, 1994.
- PERSSON, N. **Predicting railway-induced ground vibrations**. Lund. 2016. 76 f. Dissertação (Mestrado em Mecânica Estrutural). Department of Construction Sciences, Lund University, Suécia.
- SADD, M.H. **Elasticity: Theory, applications, and numerics**. 1. ed. Oxford: Elsevier Butterworth Heinemann, 2005. 474 p.
- XIA, H.; ZHANG, N.; CAO, Y.M. Experimental study of train-induced vibrations of environments and buildings. *Journal of Sound and Vibration*, v. 280, n. 3-5, p. 1017-1029, 2005.
- YANG, Y.B. & HUNG, H.H. **Wave propagation for train-induced vibrations: A finite/infinite element approach**. 1. ed. Singapura: World Scientific Publishing Company, 2009. 471 p.

Submetido em 16 de setembro de 2022

Aceito para publicação em 24 de outubro de 2023