



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ESTRUTURAL E CONSTRUÇÃO CIVIL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL: ESTRUTURAS E
CONSTRUÇÃO CIVIL

CELSO GABRIEL BARROSO FILHO

METODOLOGIA ANALÍTICA PARA ANÁLISE DAS VIBRAÇÕES EM SOLOS E
EDIFÍCIOS SITUADOS PRÓXIMOS A LINHAS FÉRREAS

FORTALEZA
2021

CELSO GABRIEL BARROSO FILHO

METODOLOGIA ANALÍTICA PARA ANÁLISE DAS VIBRAÇÕES EM SOLOS E
EDIFÍCIOS SITUADOS PRÓXIMOS A LINHAS FÉRREAS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Estruturas e Construção Civil, da Universidade Federal do Ceará, como requisito à obtenção do Título de Mestre em Engenharia Civil.

Área de concentração: Estruturas

Orientadora: Dra. Sc. Tereza Denyse P. de Araújo

FORTALEZA
2021

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

F498m Filho, Celso Gabriel Barroso.
METODOLOGIA ANALÍTICA PARA ANÁLISE DAS VIBRAÇÕES EM SOLOS E EDIFÍCIOS
SITUADOS PRÓXIMOS A LINHAS FÉRREAS / Celso Gabriel Barroso Filho. – 2021.
109 f. : il. color.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Estruturas e Construção Civil, Fortaleza, 2021.
Orientação: Profa. Dra. Tereza Denyse P. de Araújo.

1. Estrutura. 2. Propagação da vibração. 3. Vibração no solo. 4. Ferrovia. 5. Trem. I. Título.

CDD 624.1

CELSO GABRIEL BARROSO FILHO

METODOLOGIA ANALÍTICA PARA ANÁLISE DAS VIBRAÇÕES EM SOLOS E
EDIFÍCIOS SITUADOS PRÓXIMOS A LINHAS FÉRREAS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Estruturas e Construção Civil, da Universidade Federal do Ceará, como requisito à obtenção do Título de Mestre em Engenharia Civil.

Área de concentração: Estruturas

Orientadora: Dra. Sc. Tereza Denyse P. de Araújo

Aprovada em: ____/____/____.

BANCA EXAMINADORA

Profª. Dra. Sc. Tereza Denyse (Orientadora)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Sc. João Batista Marques de Sousa Júnior
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Sc. Zenon J. Guzman N. del Prado
Universidade Federal do Goiás (UFG)

AGRADECIMENTOS

À Deus, pois sem Ele eu nada seria e em nenhum lugar chegaria.

À minha mãe Maria do Socorro Diniz Barroso e meu pai Celso Gabriel Barroso e a todos os meus avós (in memoriam, em especial a Alzira Leopoldina Diniz), pelas interseções e orações que certamente contribuem para o meu sucesso.

À minha esposa Missielle Duarte Cordeiro Barroso, pelo amor, incentivo e motivação sempre que necessário.

A minha irmã Jeannine Diniz Barroso e Bob, pela companhia.

A Professora Tereza Denyse P. Araújo, pela paciência durante toda a orientação da dissertação e qualificação, apoio, atenção, motivação.

A todos os meus colegas de mestrado, em especial João Pedro Alexandre Silva Mota, Pedro Sanderson Bastos Barros, Juliana Cunha Alves, Maurício Alves de Melo, Diogo Ranieri Ramos e Silva, Marina Chagas de Menezes, Marina Alves Maia, Leonardo, Nikolas e todos os demais que por ventura não lembro no momento, pela ajuda e pelos bons momentos compartilhados.

Aos meus amigos, os quais não poderia citar todos, mais gostaria de agradecer em especial a Eric Vitoriano, Gilsom Inácio, Prof. Msc Gustavo Alencar, Digelson Junior, Joelsom Ramalho, Josenir Barreto e John Wayne pelo companheirismo tanto nos momentos bons quanto nos difíceis.

RESUMO

Os edifícios estão sujeitos a vibrações provocadas pelo ambiente, tais como as provenientes da indústria, construções, tráfego de veículos, dentre outros. Estas vibrações podem danificar o edifício com o tempo ou gerar desconforto em seus usuários. 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 metodologia analítica para a previsão das vibrações no solo, causadas pela passagem dos trens, que atingem as edificações, pessoas ou benfeitorias próximas. Utilizando um exemplo da literatura, pretende-se validar estas equações matemáticas, bem como discutir as vibrações físicas e os ruídos, que o tráfego de trens gera. O objetivo é a segurança estrutural e o melhor aproveitamento das regiões próximas às linhas ferroviárias, além de aumentar o entendimento do comportamento dos edifícios aos efeitos das vibrações. São verificados vários tipos de solo, a fim de avaliar sua influência na propagação da velocidade instantânea de vibração induzida no meio. Outros parâmetros também são analisados, tais como a distância da linha férrea, altura e tipo da edificação, velocidade e carga do trem e o tipo de trilho. Essas análises são feitas utilizando um programa matemático e os principais dados extraídos das análises são a velocidade de vibração, aceleração de vibração e os deslocamentos horizontais nos pavimentos das construções, assim avaliando-se a sua sensibilidade quando se varia parâmetros externos, geotécnicos e estruturais. Dessa forma, espera-se contribuir para a normatização de critérios de construções de edifícios próximos a linhas férreas.

Palavras-chave: Estrutura. Propagação da vibração. Vibração no solo. Ferrovia. Trem.

ABSTRACT

Buildings are subject to vibrations caused by the environment, such as industry, construction, and vehicle traffic. These vibrations can damage the structure overtime or create discomfort for its users. The construction of buildings close to the railway lines is becoming more and more common in large and small cities around the world. The present work shows an analytical methodology for predicting the vibrations in the ground caused by the passage of the trains that reach the buildings, people, or nearby improvements. These mathematical equations are validated using an example from the literature. Discussing is done about the physical vibrations and noise that train traffic generates. The objective is the structural security and better use of the regions close to the railway lines, increasing the understanding of the building's behavior and the effects of the vibrations. Various soil types are checked to evaluate their influence on the propagation of the instantaneous vibration speed induced in the medium. Other parameters are also analyzed, such as the distance from the railway, the building height and type, the train's speed and loading, and the rail kind. These analyses are made using mathematical software. The primary data analyzed are the speed and acceleration vibration and the horizontal displacements in the building pavements, evaluating its sensitivity to external parameters, geotechnical and structural variation. It is expected to contribute to the criteria standardization for the building construction close to railway lines.

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

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Malha ferroviária brasileira.....	11
Figura 2. Transmissão da vibração do solo para o edifício	14
Figura 3. Possíveis defeitos encontrados. (a) Linha ferroviária sem defeitos; (b) Transição da fundação; (c) Juntas de trilho; (d) Desvio; (e) Cruzamento; (f) Roda plana	15
Figura 4. (a) Vagões de trem no plano; (b) Variação da força normal das rodas do vagão	17
Figura 5. Onda P.....	18
Figura 6. Onda S.....	19
Figura 7. Onda Rayleigh (onda R)	20
Figura 8. Atenuação geométrica para ondas de superfície e de corpo	21
Figura 9. Reflexão e refração de uma onda	21
Figura 10. Modelo do semi-espaço	24
Figura 11. (a) Modelo da ferrovia; (b) Deslocamentos u , v e w do solo, segundo os eixos coordenados; (c) Carga trem-eixo	30
Figura 12. Comparação entre a Eason (9) e De Barros (1994) ($x, y, z = 0, 0, 1$).....	34
Figura 13. Comparação entre a Equação (8) e Carvalho (2016) ($x, y, z = 0, 1, 1$).....	35
Figura 14. Legislação FTA.....	36
Figura 15. Tipos de locomotivas: a) Locomotiva a vapor; b) Locomotiva a diesel; c) Locomotiva a biodiesel; d) Locomotiva elétrica	38
Figura 16. Pontos de observação e medição no interior do solo	38
Figura 17. Tipos de vagões: a) Vagão aberto; b) Vagão Carro; c) Gôndola; d) Vagão Tanque; e) Vagão fechado; f) Vagão Plataforma	39
Figura 18. Tipos de trilhos: a) Características dos trilhos; b) Dimensões Trilho UIC-60; c) Trilho UIC-60; d) Dimensões Trilho TR-57; e) Trilho TR-57.....	40
Figura 19. Velocidade eixo Z (m/s) vs. tempo (s) para a argila 1 ($V_t = 20$ km/h, TR-57, 20 metros da pista).....	41
Figura 20. Velocidade eixo Y (m/s) vs. tempo (s) para a argila 1 ($V_t = 20$ Km/h, TR-57, 20 metros da pista).....	41
Figura 21. Velocidade máxima (dB) vs. distância da pista (m) para a argila 1 – Eixo Z.....	43
Figura 22. Velocidade máxima (dB) vs. distância da pista (m) para a argila 2 – Eixo Z.....	45
Figura 23. Velocidade máxima (dB) vs. distância da pista (m) para a argila arenosa macia – Eixo Z	47
Figura 24. Velocidade máxima (dB) vs. distância da pista (m) para a areia média grossa – Eixo Z	49
Figura 25. Velocidade máxima (dB) vs. distância da pista (m) para a argila 1 – Eixo Y	51
Figura 26. Velocidade máxima (dB) vs. distância da pista (m) para a argila 2 – Eixo Y	52
Figura 27. Velocidade máxima (dB) vs. distância da pista (m) para a argila arenosa macia – Eixo Y.....	54
Figura 28. Velocidade máxima (dB) vs. distância da pista (m) para a areia média grossa – Eixo Y.....	56
Figura 29. Escala Mercalli.....	58
Figura 30. Aceleração eixo Z (m/s^2) vs. tempo (s) para a argila 1. ($V_t = 20$ Km/h, TR-57, 20 metros da pista).....	59
Figura 31. Aceleração Eixo Y (m/s^2) vs. Tempo (s) para a argila 1. ($V_t = 20$ Km/h, TR-57, 20 metros da pista).....	60
Figura 32. Aceleração máxima (dB) vs. distância da pista (m) para a argila 1 – Eixo Z.....	61
Figura 33. Aceleração máxima (dB) vs. distância da pista (m) para a argila 2 – Eixo Z.....	63
Figura 34. Aceleração máxima (dB) vs. distância da pista (m) para a argila arenosa macia –	

Eixo Z.....	65
Figura 35. Aceleração máxima (dB) vs. distância da pista (m) para a areia media grossa – Eixo Z.....	67
Figura 36. Vibração do solo versus distância da linha do trem.....	68
Figura 37. Aceleração máxima (dB) vs. distância da pista (m) para a argila 1 – Eixo Y.....	70
Figura 38. Aceleração máxima (dB) vs. distância da pista (m) para a argila 2 – Eixo Y.....	72
Figura 39. Aceleração máxima (dB) vs. distância da pista (m) para a argila arenosa macia – Eixo Y.....	74
Figura 40. Aceleração máxima (dB) vs. distância da pista (m) para a areia media grossa – Eixo Y.....	76
Figura 41. Velocidade máxima eixo Z (dB) vs. Módulo de Elasticidade ($\times 10^6$ N/m ²) ($V_t = 20$ Km/h, 100 ton, TR-57, $\rho=2000$ kg/m ² , $\nu=0,25$, ponto de medição a 10 cm abaixo da pista ferroviária.).....	78
Figura 42. Aceleração máxima eixo Z (dB) vs. Módulo de Elasticidade ($\times 10^6$ N/m ²) ($V_t = 20$ Km/h, 100 ton, TR-57, $\rho=2000$ kg/m ² , $\nu=0,25$, ponto de medição a 10 cm abaixo da pista ferroviária.).....	80
Figura 43. Velocidade máxima eixo Z (dB) vs. Módulo de Elasticidade ($\times 10^6$ N/m ²). ($V_t = 40$ Km/h, 100 ton, TR-57, $\rho=2000$ kg/m ² , $\nu=0,25$, ponto de medição a 10 cm abaixo da pista ferroviária.).....	81
Figura 44. Aceleração máxima eixo Z (dB) vs. Módulo de Elasticidade ($\times 10^6$ N/m ²). ($V_t = 40$ Km/h, 100 ton, TR-57, $\rho=2000$ kg/m ² , $\nu=0,25$, ponto de medição a 10 cm abaixo da pista ferroviária.).....	82
Figura 45. Velocidade máxima eixo Z (dB) vs. Módulo de Elasticidade ($\times 10^6$ N/m ²) ($V_t = 60$ Km/h, 100 ton, TR-57, $\rho=2000$ kg/m ² , $\nu=0,25$, ponto de medição a 10 cm abaixo da pista ferroviária.).....	83
Figura 46. Aceleração máxima eixo Z (dB) vs. Módulo de Elasticidade ($\times 10^6$ N/m ²) ($V_t = 60$ Km/h, 100 ton, TR-57, $\rho=2000$ kg/m ² , $\nu=0,25$, ponto de medição a 10 cm abaixo da pista ferroviária.).....	84
Figura 47. Espaçamento da aplicação da carga dos Vagões ($V_t=60$ Km/h).....	85
Figura 48. Deslocamento horizontal do solo (20 metros da pista) x profundidade do solo.....	86
Figura 49. Deslocamento (20 m da pista / 10 cm de profundidade) x tempo – Carga de um vagão.....	86
Figura 50. Edifício térreo.....	87
Figura 51. Deslocamento em módulo no solo da base na edificação (20 metros da linha ferroviária).....	89
Figura 52. Força em módulo no solo da base da edificação (20 metros da linha ferroviária)..	89
Figura 53. Deslocamento topo do pavimento (m) x tempo (s) - (Sem Amortecimento).....	90
Figura 54. Aceleração topo do Pavimento (m) x tempo (s) - (Sem Amortecimento).....	91
Figura 55. Deslocamento topo do pavimento (m) x tempo (s) - (Com Amortecimento).....	91
Figura 56. Aceleração topo do pavimento (m) x tempo (s) - (Com Amortecimento).....	92
Figura 57. Edifício de 2 pavimentos – S2GL.....	93
Figura 58. Modos de Vibração.....	94
Figura 59. Deslocamentos Pavimentos.....	96
Figura 60. Acelerações Pavimentos.....	97
Figura 61. Edifício 2 Pavimentos - S3GL (Interação Solo-Estrutura).....	97
Figura 62. Hipótese de Winkler: deformação do solo através de molas discretas.....	98
Figura 63. Fator de Influência I_p	90
Figura 64. Deslocamento Horizontal dos Pavimentos e Fundação Considerando interação Solo-Estrutura.....	100
Figura 65. Aceleração Horizontal dos Pavimentos considerando interação Solo-Estrutura..	101

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Características dos solos para o estudo de caso	40
Tabela 2 Resumo dos valores de velocidade e aceleração pelo módulo de elasticidade.....	84

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	Considerações iniciais	11
1.2	Objetivos	12
1.3	Estrutura do trabalho	13
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
2.1	Carga de excitação	16
2.1.1	Parcela quase estática	16
2.1.2	Parcela dinâmica	18
2.2	Propagação da vibração.....	18
2.3	Avaliação das vibrações.....	22
2.3.1	Simulações analíticas e numéricas	23
3	FORMULAÇÃO MATEMÁTICA PARA OS SOLOS.....	30
3.1	Validação.....	33
3.2	Legislação FTA (Velocidade).....	35
4	ESTUDO DE CASO	37
4.1	Dados do Problema	37
4.2	Análise dos Solos	39
4.2.1	Direção do Eixo Z	41
4.2.2	Direção do Eixo Y	50
4.3	Avaliação das Acelerações.....	57
4.3.1	Aceleração - Eixo Z.....	58
4.3.2	Aceleração - Eixo Y	68
4.4	Variação dos parâmetros geotécnicos	77
5	AValiação DE EDIFÍCIOS DE CONCRETO.....	85
5.1	Primeira Situação: Edifício Térreo.....	87
5.2	Segunda Situação: Edifício 2 Pavimentos.....	92
5.3	Terceira Situação: Edifício 2 Pavimentos – Interação solo estrutura.....	97
6	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS.....	102
	REFERÊNCIAS.....	105

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações iniciais

As vibrações físicas e sonoras estão entre as principais poluições nos ambientes urbanos. Estas têm influência nas edificações e causam desconforto aos seus usuários. Podem ser causadas pelo tráfego ferroviário, indústria e construção civil, dentre outros. Através de investigações estatísticas em diversos países do mundo, constatou-se que as vibrações geradas pelo tráfego ferroviário causam um expressivo número de reclamações do público segundo Carvalho (2016). Por isso, este será o foco desse trabalho.

Historicamente, as vias sobre trilhos surgiram no início do século XVI para o transporte de carvão e minérios, cujos vagões eram movimentados por homens ou animais. Contudo, a primeira estrada de ferro, como hoje a conhecemos, foi inaugurada no Reino Unido em 1825, cobrindo uma distância de 32 km. No Brasil, a primeira estrada de ferro foi inaugurada em 1854, com uma extensão inicial de 14,5 km. Atualmente, são 30,6 mil km (CNI, 2018) de extensão de ferrovias, sendo que apenas 29,8 mil km estão em operação (BRASIL, 2018) distribuídas em 12 concessões ferroviárias (Figura 1). A maior parte das estradas em utilização transportam ferro e derivados do petróleo e se localizam nas zonas rurais. Porém cruzam trechos urbanizados e têm influência nas edificações.

Figura 1. Malha ferroviária brasileira



Fonte: BRASIL (2018)

Devido a crescente especulação imobiliária nos perímetros urbanos, se tornou inevitável a execução de vias de tráfego automobilístico e ferroviários próximas aos edifícios em geral. O fluxo de trens induz nesses edifícios vibrações, as quais podem afetar seus ocupantes bem como o sistema estrutural e o funcionamento de equipamentos. Deve ser lembrado também dos metrô, que são linhas ferroviárias que se movimentam nos subterrâneos das maiores cidades do mundo. Portanto, a falta de planejamento contribui para que a vibrações geradas tenham efeitos mais acentuados e danosos as construções. Por isso, as autoridades e órgãos responsáveis pela fiscalização e execução de edificações em ambientes urbanos, tentam estabelecer critérios para a redução desse potencial dano.

Na China, por exemplo, uma série de prédios foram construídos diretamente acima da linha do metrô, o que se tornou objeto de estudo de vários artigos naquele país. No final de agosto de 2015, vinte e duas cidades na China continental somavam um total 3.140 km de linhas de metrô em serviço. No entanto, até 2020, espera-se que mais de 45 cidades chinesas construam 7.395 km adicionais de linhas de metrô (CDMC, 2014, *apud* ZOU *et al.*, 2017).

Apesar de tudo isso, o problema ainda não é totalmente entendido, pois envolve a interação do trem com o trilho e o suporte deste, a propagação de ondas através do solo e a interação do solo com a fundação do edifício. Além disso, fatores como a rugosidade da roda e do trilho, o amortecimento do solo, a velocidade do veículo e as propriedades dinâmicas do trem afetam a amplitude e a frequência das vibrações que são geradas.

Análises dinâmicas baseadas no método dos elementos finitos têm sido utilizadas por vários pesquisadores para esse problema. Softwares comerciais como o ANSYS e ABAQUS são muito usados, pois permitem modelar as interações existentes no problema através de mecanismos de contato.

Além disso, hipóteses iniciais são adotadas para a análise dinâmica, as quais podem ser citadas: a velocidade do trem, as dimensões das peças ou medidas mitigadoras, frequência do trem, carga dos vagões, distância até as estruturas de concreto armado, dentre outros. Sob a variação desses parâmetros, são medidas as respostas do solo e das estruturas nas proximidades das linhas ferroviárias.

1.2 Objetivos

O objetivo geral do presente trabalho é avaliar uma metodologia analítica para a

previsão da propagação e do comportamento das vibrações em solos e edifícios próximos a ferrovias, a partir de manipulações matemáticas de equações presentes na literatura. Como objetivos específicos temos:

- a) Analisar as respostas dos solos a propagação das vibrações, sob a variação de parâmetros geotécnicos;
- b) Especificar medidas de afastamento mínimas para se obter conforto humano e estrutural das vibrações em solo, sob o olhar de normas presentes na literatura;
- c) Investigar a intensidade e o comportamento das vibrações a depender do eixo de orientação da propagação;
- d) Analisar as respostas induzidas em edificações de um ou mais pavimentos, provocadas pelas vibrações oriundas das ferrovias.

1.3 Estrutura do trabalho

O presente trabalho está dividido em quatro capítulos, os quais são descritos a seguir. O Capítulo 1 trata desta introdução, onde consta a contextualização do tema em um alcance nacional e global oferecendo assim as devidas justificativas para a realização do estudo, descreve ainda os objetivos geral e específicos do trabalho.

No Capítulo 2 faz-se uma ampla revisão bibliográfica, apresentando os principais trabalhos já realizados na área de vibrações voltados para a modelagem do problema. São exemplificados diversos métodos de modelagem e previsão de vibração em solos e estruturas que já estão bem difundidos atualmente, ou seja, o tópico trata do estado geral e atual da arte do tema.

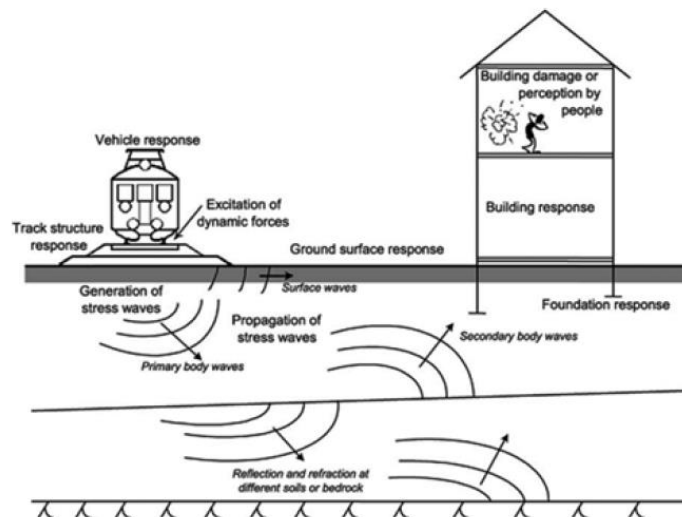
O Capítulo 3 trata da análise de dados usada para a realização do estudo, onde a mesma será baseada em essência nas equações analíticas, para o cálculo do nível geral de vibração do meio e para a consideração da interação solo-estrutura e das respostas das edificações.

O Capítulo 4 contém a conclusão do trabalho e as referências de todas as fontes, livros, trabalhos, artigos e dissertações usadas para compor a base do conhecimento e o estado atual da arte a respeito do tema do presente estudo.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

As vibrações ferroviárias são oriundas principalmente das forças geradas devido ao contato entre a roda e os trilhos da ferrovia, as quais se propagam pelo solo como ondas, fazendo com que as paredes, o piso e a estrutura do edifício vibrem (Figura 2). Assim, o trem trafegando nos trilhos é considerado a fonte da vibração, ou seja, onde a carga dinâmica é gerada; o solo se constitui no caminho por onde as ondas se propagam; essas ondas são transmitidas até o edifício que é tido como o receptor. Portanto, cada uma destas regiões tem suas próprias propriedades e parâmetros que afetam os níveis de vibração global. Apesar destas regiões funcionarem como uma sequência, às vezes pode ser útil estudar cada uma delas separadamente.

Figura 2. Transmissão da vibração do solo para o edifício



Fonte: HESAMI *et al.* (2016)

As vibrações que se propagam pelo meio são denominadas como "vibrações transmitidas pelo solo", as quais podem também resultar em ruído (conhecido por "ruído re-irradiado") com valores em decibéis. Em sua maioria, essas vibrações e ruídos são superiores ao limite máximo permitido como será mostrado nesse presente estudo.

Portanto, o ruído e a vibração consistem em um desafio generalizado da engenharia ferroviária. Nota-se que há uma crescente conscientização pública sobre as vibrações do solo, e a comunidade internacional vem estabelecendo limites cada vez mais

critérios para tais fatores. Como resolução de tais problemas, são usadas medidas mitigadoras, que podem ser ativas ou passivas. As estratégias mais comumente utilizadas para a redução da vibração é a modificação da estrutura da ferrovia (mitigação ativa), em vez da implementação de modificações no edifício (mitigação passiva). Uma solução passiva que tem sido muito utilizada é a colocação de barreiras ou trincheiras, além da melhoria e preparo de camadas de solos subjacente.

Algumas fontes de vibração (Figura 3) podem ser citadas (HESAMI *et al.*, 2016), que são:

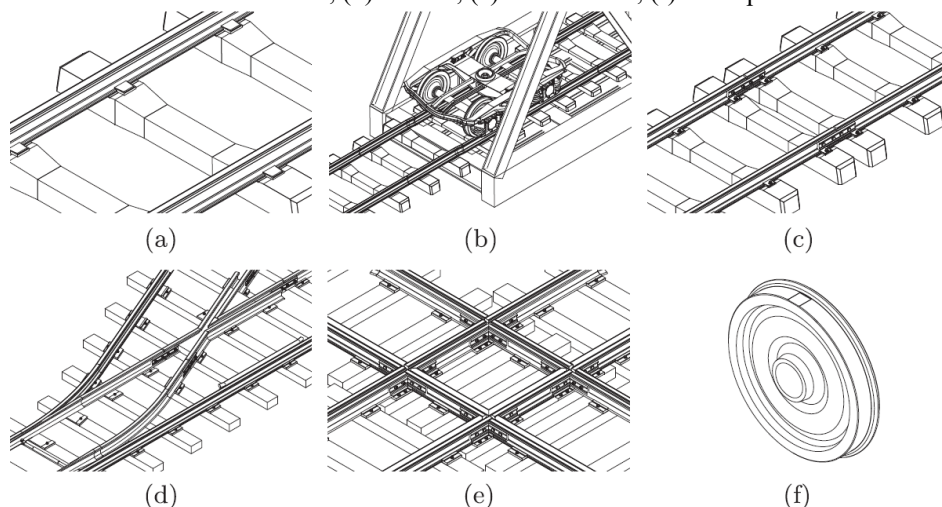
a) Deformação do solo devido ao carregamento das rodas, cujas vibrações dependem da massa do comboio, da distância entre dois trens, do comprimento do eixo e da velocidade do comboio.

b) Interação trem-trilho, que é exemplificado por imperfeições e danos da roda (Figura 3d), e aceleração/retardação do trem.

c) Desnívelamento do trilho, que pode ser ao longo do seu eixo horizontal e vertical. Também pode ser devido a curvas na pista (Figura 3d), dando origem as forças centrípetas no sistema.

d) Vibrações induzidas pelo apoio desigual do aterro (Figura 3b), as quais resultam da variabilidade geométrica do aterro, da geometria do lastro e da rigidez de ambos.

Figura 3. Possíveis defeitos encontrados. (a) Linha ferroviária sem defeitos; (b) Transição da fundação; (c) Juntas de trilho; (d) Desvio; (e) Cruzamento; (f) Roda plana



Fonte: KOUROUSSIS *et al.* (2015)

2.1 Carga de excitação

Como já foi dito, as vibrações transmitidas até o edifício são geradas na fonte, o que envolve o trem, a estrutura do trilho, a estrutura de apoio e o solo na vizinhança destas estruturas. As vibrações oriundas do contato trem-trilho são de natureza aleatória, pois há variações das massas e tipos de vagões e locomotivas que compõe o trem.

Segundo Connolly *et al.* (2015), a forma de caracterizar a vibração varia de acordo com o tipo de trem. Os que têm sido motivo de preocupação na literatura são: **trens subterrâneos** – geram vibrações com um espectro de frequência mais alto do que as de ferrovias acima do solo, cuja principal preocupação são as estruturas situadas acima da linha; **trens de alta velocidade** – geram vibrações de amplitudes elevadas devido a suas altas velocidades. Mas, quando sua velocidade se torna comparável à velocidade da onda Rayleigh do solo abaixo da estrutura da ferrovia, ocorre o fenômeno da ressonância na vibração e os deslocamentos se amplificam; **trens elétricos urbanos** – geram vibrações de amplitude relativamente baixa, porém causa efeitos negativos nas estruturas de edifícios próximos a linha do trem; **trens de carga** – geram altas amplitudes cuja vibração é de baixa frequência (devido à sua baixa velocidade) e pode se propagar a grandes distâncias da ferrovia.

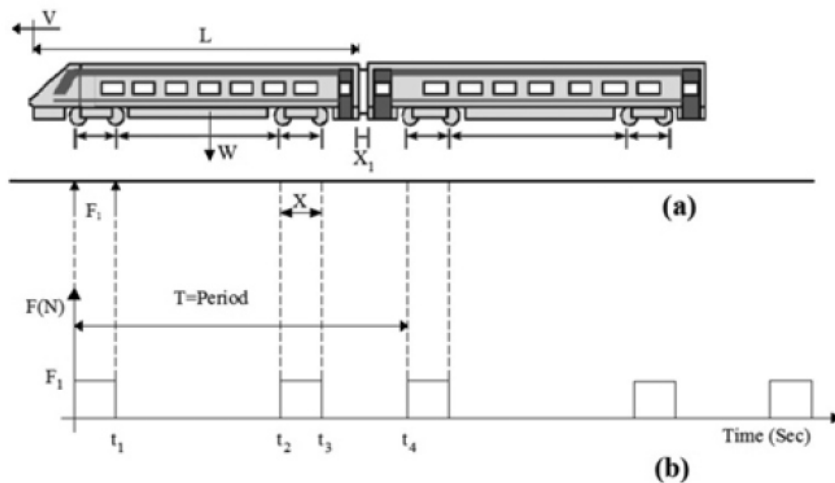
A carga de excitação gerada na interface trem-trilho pode ser dividida em duas parcelas: a parcela quase estática e a parcela dinâmica. A parcela quase estática aparece devido ao peso do trem e independe de sua velocidade, sendo usada, geralmente, quando a velocidade do veículo é significativamente mais baixa do que as velocidades da onda do solo e a velocidade crítica do trilho. A parcela dinâmica depende da velocidade do trem, além de fatores como mudanças na rigidez devido à colocação dos dormentes, às irregularidades na relação da roda/trilho e às condições de apoio do solo. No caso de velocidades baixas (por exemplo, até 80 km/h em uma área urbana), a parcela dinâmica tem uma influência dominante nos níveis de vibração do solo (CONNOLLY *et al.*, 2015; KOUROUSSIS *et al.*, 2017).

2.1.1 Parcela quase estática

A maioria dos trabalhos encontrados na literatura (NEJATI *et al.*, 2012; HESAMI *et al.* 2016; CONNOLLY *et al.*, 2015) consideram somente a parcela quase estática da carga,

pois esta domina a vibração do solo quando há poucas irregularidades na linha do trem. Essa carga é considerada periódica (Figura 4) e simula a passagem do trem sobre a ferrovia, que consiste no primeiro par de rodas gerando uma força (F_1) que atua num determinado intervalo de tempo $[0, t_1]$, deixando de atuar até t_2 . Então, t_1 é o tempo final de aplicação da força F_1 pelo primeiro par de rodas do primeiro vagão de trem no trilho, enquanto t_2 é o tempo de início de aplicação da força normal pelo segundo par de rodas do primeiro vagão. O valor da força normal no intervalo $[t_2, t_3]$ é F_1 . De t_3 a t_4 , a força normal das rodas desaparece, sendo que t_4 é o tempo de um ciclo completo de força do trem. Portanto, a força normal de outros vagões do trem pode ser calculada em um procedimento similar.

Figura 4. (a) Vagões de trem no plano; (b) Variação da força normal das rodas do vagão



Fonte: HESAMI *et al.* (2016)

A força F_1 é calculada dividindo o peso do vagão pelo seu número de rodas, que pode ser aplicada no trilho como força concentrada ou distribuída. Para uma carga linearmente distribuída aplicada em toda a extensão do trilho, divide-se a força concentrada F_1 pelo comprimento do vagão (L na Figura 4). O tempo de aplicação da força é determinado dividindo a distância entre duas rodas adjacentes (X na Figura 4) pela velocidade do trem. A função da força de excitação do trem $f(t)$ no intervalo de tempo $[0, t_4]$ é apresentada como

$$f(t) = \begin{cases} F_1 & 0 < t < t_1 \\ 0 & t_1 < t < t_2 \\ F_1 & t_2 < t < t_3 \\ 0 & t_3 < t < t_4 \end{cases} \quad (1)$$

Se $f(t)$ é uma função suave, esta pode ser expressa como uma série de senos e

cosenos, através da série de Fourier (NEJATI *et al.*, 2012).

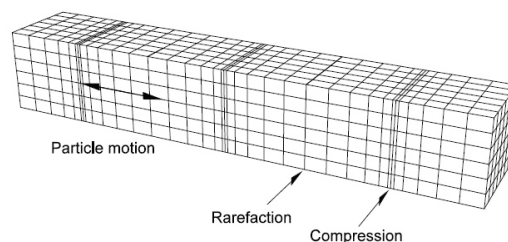
2.1.2 Parcela dinâmica

Segundo Carvalho (2016), a parcela dinâmica é extremamente complexa e de difícil definição, pois o trem está em constante interação com a pista e a pista com o solo, durante o seu movimento. Nesse caso, as forças de interação entre a roda e o trilho são determinadas através de um modelo analítico, em que são incluídos todos os vagões do trem, juntamente com a pista e o solo. Além disso, é necessário um modelo matemático que caracterize com exatidão as irregularidades geométricas dos trilhos e das rodas. Esta parcela quando somada a parcela quase estática amplifica as vibrações do solo.

2.2 Propagação da vibração

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 (Figura 5) 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. São conhecidas como ondas de compressão e têm menores amplitudes. Proporcionam aos corpos sólidos elásticos alterações de volume, sem alterações na forma.

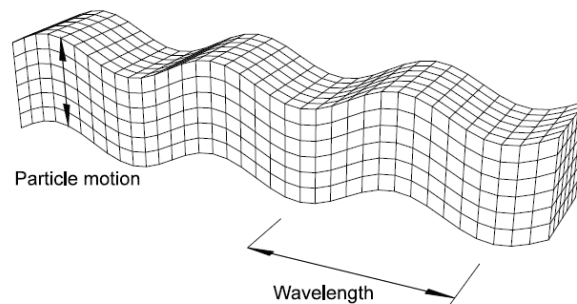
Figura 5. Onda P



Fonte: PERSSON (2016)

As ondas S (Figura 6) 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.

Figura 6. Onda S



Fonte: PERSSON (2016)

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

$$c_p = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} \quad (2)$$

$$c_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \quad (3)$$

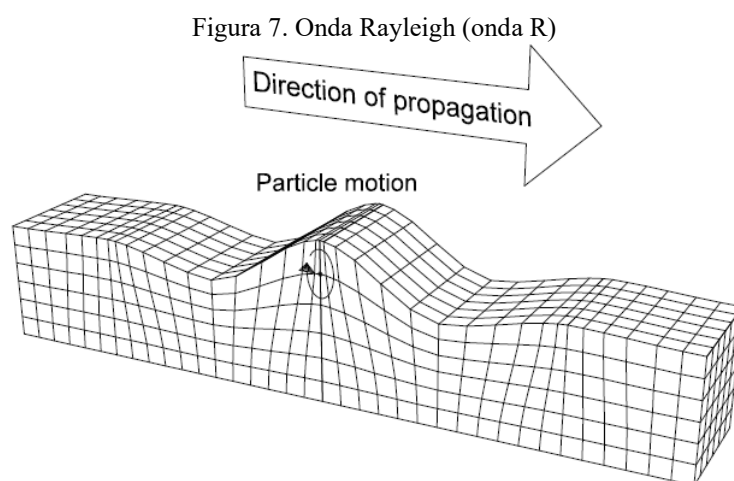
Em que c_p e c_s são as velocidades das ondas P e S, respectivamente, λ é a constante de elasticidade, μ é o módulo de rigidez (também conhecido como módulo de cisalhamento) também conhecidos como constantes de Lamé, ρ é a densidade do meio segundo Sadd (2005). Assim, a velocidade dessas ondas não é constante, mas variam diretamente com a rigidez dos materiais (quanto mais rígido, maior velocidade) e inversamente com a densidade (quanto mais denso, menor a velocidade).

As ondas de superfície são ondas que se propagam imediatamente acima da superfície terrestre, deslocando-se mais lentamente que as ondas de corpo, cuja velocidade é aproximadamente constante. Contudo, estas ondas são mais destrutivas, devido à sua baixa frequência, longa duração e grande amplitude. São resultantes da interação das ondas P e S

com a superfície. A onda Rayleigh (Figura 7) é um tipo de onda superficial, e provoca 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. Sua velocidade de propagação (c_R) é calculada por:

$$c_R = \frac{(0,97 + 1,12\nu)c_S}{1 + \nu} \quad (4)$$

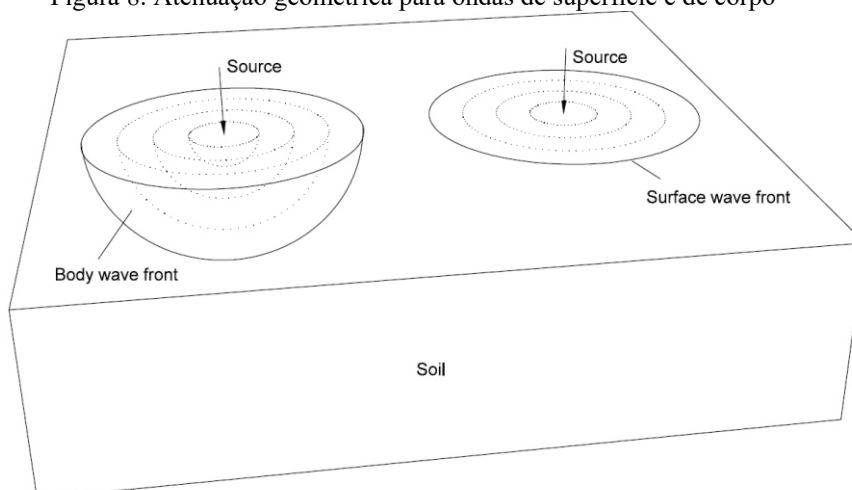
Em que c_S é a velocidade da onda S e ν é o coeficiente de Poisson. A Equação (4) é considerada exata para valores de $0 < \nu < 0,5$, um intervalo que é válido para solos. A equação mostra ainda que a velocidade da onda R é muito próxima, mas ligeiramente menor do que a velocidade da onda S para um mesmo material. Na faixa de $0 < \nu < 0,5$, a velocidade da onda R varia entre $0,87c_S$ e $0,95c_S$ (PERSSON, 2016).



Fonte: PERSSON (2016)

A propagação da onda tem início após a geração da vibração na fonte. Essas ondas se propagam no semiespaço, 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 (Figura 8).

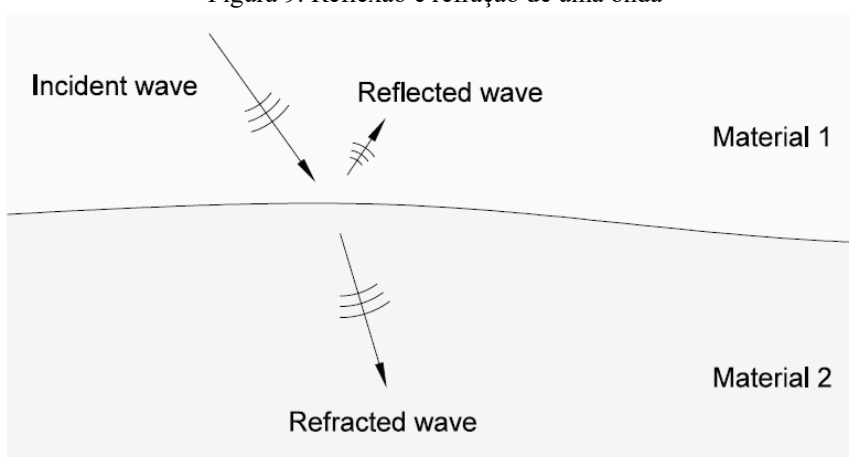
Figura 8. Atenuação geométrica para ondas de superfície e de corpo



Fonte: PERSSON (2016)

Muitas vezes, o solo em que as ondas se propagam é composto de uma ou mais camadas de solo em cima da rocha. Quando uma frente de onda encontra uma interface entre dois materiais, esta experimenta reflexão e refração (Figura 9). Na reflexão, as ondas são propagadas para trás, enquanto na refração, as ondas continuam no novo material. As amplitudes e ângulos das ondas refletidas e refratadas dependem do ângulo de incidência, bem como das impedâncias dos dois materiais. A impedância, Z , é definida como a densidade (ρ) multiplicada pela velocidade da onda (c), $Z = \rho c$.

Figura 9. Reflexão e refração de uma onda



Fonte: PERSSON (2016)

Pode-se dizer que quanto mais rígido e compacto é o solo, mais rapidamente as

ondas são transportadas pelo meio. Ou seja, solos com baixo grau de compactação tem um fator de amortecimento mais alto, o que acontece principalmente nos solos superficiais, e diminui com a profundidade. A onda perde energia quando passa através dos vazios. Ondas físicas não se propagam no vácuo.

2.3 Avaliação das vibrações

O edifício, suas fundações e o solo envolvente se constituem na região receptora, onde o efeito das vibrações é avaliado. No caso, as vibrações são transferidas do solo para a fundação, o que envolve uma interação solo-estrutura, e posteriormente para o edifício, as quais podem ser amplificadas fazendo com que as paredes e pavimentos do edifício vibrem. Portanto, a resposta do edifício varia com as propriedades do solo, o tipo de fundação, a geometria do edifício e o material do sistema estrutural.

O efeito das vibrações devido ao tráfego de trens em edifícios, ou mesmo nos ocupantes destes, pode ser avaliado por quatro métodos diferentes, que são: modelos empíricos, experimentais, numéricos e analíticos (ZOU *et al.*, 2018).

Os **modelos empíricos** são baseados em observações empíricas de um fenômeno. Em geral, são modelos simples e são usados na previsão das vibrações na fase inicial do projeto. Apesar desses modelos serem altamente eficientes, a precisão destas previsões é pobre. Os **modelos experimentais** são baseados em funções de transferência diretamente medidas em campo e são amplamente utilizadas para prever a resposta da vibração dentro dos edifícios. A fim de garantir resultados precisos, as medições de campo devem ser extensas, tornando-se assim dispendiosas e, em alguns casos, a aplicação do teste é inaceitável devido as interferências ambientais (acesso, ruídos urbanos, dentre outros). Contudo, este método não pode ser usado para estimar os níveis de vibração em edifícios antes da construção.

Os **modelos numéricos** são baseados na mecânica e fornecem modelagem exata da geometria. Os avanços na potência dos computadores permitem a análise de modelos cada vez maiores e mais detalhados. Modelos detalhados, no entanto, geralmente exigem muitos parâmetros de entrada, tais como propriedades de material e geométricas, os quais devem ser conhecidos de antemão. Uma desvantagem de simulações numéricas é que podem ser demorados (em comparação com o uso de modelos empíricos e experimentais), tanto em

termos de criação do modelo e tempo de computação.

Os **modelos analíticos** são formulações de forma fechada baseadas na mecânica e exigem simplificações sobre a transmissão das vibrações. Muitos pesquisadores desenvolveram modelos analíticos para prever estas vibrações. No contexto das vibrações induzidas pela ferrovia, uma abordagem simplificada que pode ser usada para estudar a resposta no trilho devido a passagem de um trem, é considerar o trilho como vigas infinitas apoiadas por uma fundação elástica representando o solo.

2.3.1 Simulações analíticas e numéricas

Dentre os métodos numéricos existentes, os mais utilizados na simulação numérica de ferrovias são o método das diferenças finitas (MDF), o método dos elementos de contorno (MEC) e o método dos elementos finitos (MEF). O MDF é um método numérico que utiliza uma formulação forte das equações de ondas sísmicas para simular a propagação de ondas, em geral no domínio do tempo. É um método muito utilizado pelos pesquisadores na exploração sísmica, sendo uma ferramenta básica comumente usada para executar as inversões completas da onda. Seu uso nas vibrações ferroviárias apresenta como principal vantagem o fato de os cálculos poderem ser executados de forma relativamente rápida. A principal desvantagem deste método para problemas ferroviários é que as geometrias complexas, em particular perto das superfícies livres, são difíceis de modelar (KOUROUSSIS *et al.*, 2014b).

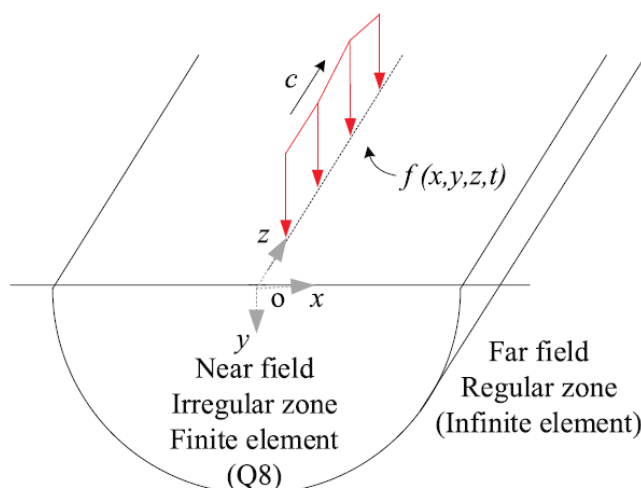
O MEC tem a capacidade de representar domínios infinitos, sendo muito eficiente para resolver problemas de propagação de ondas principalmente quando é formulado no domínio da frequência. Esse método permite considerar com precisão o amortecimento da radiação, ou seja, a perda de energia devido à propagação das ondas para o infinito, através do uso de soluções fundamentais adequadas. Contudo, a representação de geometrias complexas torna o método inconveniente e o domínio da frequência é limitado a problemas lineares. Além disso, as irregularidades da pista e do solo subjacente são aspectos difíceis de serem considerados, a não ser que se utilizem funções de Green mais complicadas ou uma subdivisão mais refinada do domínio.

O MEF tem sido uma alternativa viável para a análise de estruturas em geral, permitindo a modelagem de irregularidades geométricas e de solos estratificados. Em

problemas dinâmicos, este método pode ser formulado tanto no domínio do tempo como no da frequência. Porém, quando o solo é semi-infinito, este não pode ser modelado com elementos de tamanho finito, ou seja, o amortecimento da radiação não pode ser modelado com precisão, principalmente no domínio da frequência. Então, condições de contorno apropriadas devem ser definidas para os contornos artificiais, caso contrário, as reflexões de ondas, que não existem na realidade, serão causadas por esses contornos comprometendo significativamente a análise. Para minimizar os efeitos negativos, os contornos artificiais podem ser colocados suficientemente longe das fontes de vibração, resultando em um grande modelo que pode ser muito caro para executar.

A fim de superar esse problema, o MEF tem sido acoplado a outros métodos, tornando-o híbrido. Por exemplo, pode-se usar os métodos MEF e o MEC, em que o MEF é usado para modelar o campo próximo (*near field* na Figura 10 - região de solo próxima da fonte de vibração), enquanto o MEC é usado para simular a vibração do campo distante (*far field* na Figura 10 - região de solo distante da fonte de vibração). Além do MEC, pode-se usar o contorno viscoso (amortecedores, por exemplo), o método do elemento infinito (Figura 10) e o método de célula de elemento finito infinitesimal consistente (CARVALHO, 2016).

Figura 10. Modelo do semi-espaco



Fonte: YANG *et al.* (2019)

Várias estratégias de modelagem são usadas para modelar o semi-espaco, em relação a sua dimensão, podendo-se citar o 3D (tridimensional), o 2D (bidimensional) e o 2,5D (dois e meio dimensional). O MEF completo 3D são mais atrativos do que os outros dois, pois

permitem previsões absolutas de transmissão de vibração, além de capturar os efeitos locais. Contudo, são demasiadamente onerosos devido ao custo computacional. Já os modelos MEF 2D são bastante flexíveis para serem usados em estudos paramétricos. As principais desvantagens nesses modelos são: não podem considerar o movimento do trem e a propagação da onda na direção da pista; e superestimam muitas vezes os níveis de vibração do solo.

O modelo MEF 2,5D usa as mesmas condições adotadas para o modelo 2D em relação às propriedades do material e geométricas, porém considera um perfil 2D perpendicular à pista que leva em conta o efeito da carga em movimento na terceira dimensão (Figura 10), simulando assim o comportamento dinâmico 3D do semi-espaço. Além disso, este modelo possibilita a consideração do efeito da radiação Mach, que ocorre quando a velocidade do trem aumenta e se aproxima da velocidade crítica do solo (Velocidade da Onda Rayleigh) (CARVALHO, 2016). Segundo alguns autores (YANG *et al.*, 2017 *apud* SHENG, 2019), o modelo 2,5D é mais realista do que o 2D, pois leva em conta vários fatores do semi-espaço, incluindo a rugosidade do trilho e a transmissão da onda ao longo do eixo da ferrovia.

No trabalho desenvolvido por Carvalho (2016), usando equações que foram propostas por Eason (1965), foi feita uma série de análises variando parâmetros como carga na pista, velocidade, tipo de solo, trilho e influência de imperfeições no trilho, para extração de valores de deslocamento e velocidade. As equações de Eason (1965) podem ser usadas para extrair soluções numéricas em qualquer ponto no interior do solo, porém não podem ser resolvidas na superfície, já que, em $z = 0$, a integral do limite não é igual ao limite da integral. Como principais conclusões no trabalho desenvolvido por Carvalho (2016) têm-se:

- a) O deslocamento vertical do solo aumenta à medida em que a carga se aproxima do ponto de observação, atingindo seu valor máximo quando a carga está aplicada sobre ele. Quando a carga se afasta deste ponto, o deslocamento diminui, tendendo a zero;
- b) Como a carga do trem é pontual, ela atua como um impulso, cuja duração tende a zero, o que explica a concentração dos maiores valores de deslocamentos verticais próximos do ponto de aplicação da carga;
- c) Quanto menor a velocidade do trem, mais suave é esse impulso. Consequentemente, é observado que ao se afastar do ponto de observação, os deslocamentos do solo correspondentes a velocidades mais altas do trem tendem a zero mais rapidamente do que os deslocamentos correspondentes a velocidades mais baixas;
- d) Quanto maior a velocidade do trem, maiores são os valores de deslocamento e velocidade verticais máximos do solo;

- e) Os maiores deslocamentos e velocidades verticais ocorrem quando a velocidade do trem se aproxima da velocidade das ondas Rayleigh no solo considerado. Sendo assim, pode-se dizer que ela é uma velocidade crítica para o tráfego ferroviário;
- f) Quanto maior a carga correspondente ao peso do trem em cada roda, maiores são os deslocamentos e velocidades do solo. As respostas do solo são diretamente proporcionais à carga aplicada, sob uma dependência linear;
- g) Os deslocamentos e as velocidades máximas do solo diminuem com o aumento da distância transversal do ponto de observação à pista;
- h) A consideração do termo dinâmico da carga não influencia no deslocamento máximo do solo. Já a velocidade máxima do solo aumenta o seu valor, e quanto menor é a velocidade do trem, maior é esse aumento;
- i) Os valores de deslocamento e velocidade máximos são maiores para os solos com velocidade das ondas Rayleigh mais próximas da velocidade do trem.

Adam e Estorff (2005) analisaram numericamente a eficiência das valas ou trincheiras, com posterior preenchimento destas para redução das vibrações do edifício, através do Método dos Elementos Finitos. Para isso, os autores consideraram um sistema estrutural composto por solo bidimensional, incluindo a seção transversal de uma porção de solo do aterro da ferrovia, o solo imediatamente abaixo, uma barreira de trincheira e um edifício nas proximidades de seis andares.

O objetivo principal da trincheira é servir como uma barreira entre a emissão da onda e o edifício a ser isolado, o que se chama de isolamento do receptor. Quando o mecanismo de isolamento está mais próximo da fonte da vibração, se configura como isolamento da fonte.

Os referidos autores discutem sobre as dimensões das trincheiras e verificam a necessidade de preenchimento da vala com material adequado. Para isso, usaram o solo bentonita (que tem efeito tixotrópico, isto é, adquire certa fluidez quando agitado). As análises no domínio do tempo foram realizadas utilizando o método dos elementos finitos junto com o método dos elementos de contorno. Os efeitos das propriedades geométricas e materiais da trincheira, bem como do seu aterro, sobre a resposta estrutural são investigados. Deve-se lembrar que a localização da trincheira entre a linha férrea e a edificação é variável, justamente para que se possa fazer a devida otimização do layout no intuito de minimizar os efeitos decorrentes das vibrações.

Adam e Estorff (2005) obtiveram as seguintes conclusões: trincheiras abertas ou

preenchidas reduzem significativamente as vibrações verticais e as forças internas da estrutura do edifício, sendo que a redução das forças axiais nas colunas é maior de que para os momentos fletores e as forças de cisalhamento; a trincheira aberta é mais eficaz do que a preenchida, sendo limitada contudo em sua profundidade, pois são relativamente rasas; o material de aterro das trincheiras podem ser suaves, aumentando a eficiência da trincheira preenchida e permitindo maiores profundidades. Além disso, esses autores recomendam, em muitos casos práticos, realizar uma investigação mais detalhada do sistema de estrutura/solo/trincheira.

Por fim, é possível distinguir três zonas distintas para se colocar a trincheira, que são: a região próxima da fonte da vibração, a região próxima da edificação e a zona intermediária entre as duas. Contudo, a trincheira tem sua eficiência garantida quando está perto da fonte ou perto do edifício.

Hesami *et al.* (2016) investigaram a influência das vibrações induzidas pela passagem de trens ferroviários no solo e em um edifício de seis andares, usando o método dos elementos finitos. O objetivo destes autores foi verificar o efeito de diferentes parâmetros, tais como os níveis de vibração da superfície do solo e dos pavimentos do edifício em termos de velocidade e aceleração, bem como as influências da distância da borda do prédio a linha central do trilho, o efeito da velocidade do trem, da carga do veículo e de alguns outros fatores.

Um modelo 2D de elementos finitos foi utilizado para realizar as análises, o qual foi validado usando as medições de campo das vibrações do solo induzidas pela passagem de um trem com velocidade de 142 km/h em Ledsgaard realizadas por Hall (2003). Os autores obtiveram as seguintes conclusões: o nível de vibração é atenuado significativamente com o aumento da distância do edifício a linha central da pista devido ao amortecimento geométrico e material. Isto é mais notável pelo aumento da distância de 12 para 18 metros. A vibração induzida pelo trem no solo e na construção aumenta quando a velocidade do trem aumenta. Um aumento na velocidade do trem tem um efeito insignificante sobre o nível de velocidade, mas o peso do vagão tem um efeito significativo no aumento do nível de velocidade e o nível de vibração vertical no solo e nos pavimentos do edifício é maior do que as vibrações horizontais. Os autores também observaram que a influência da vibração induzida pelo tráfego sobre o desempenho de um edifício é tipicamente considerada em termos de respostas de aceleração e velocidade absoluta de pavimentos do edifício. É possível observar que a localização da frequência dominante do edifício (2,5-5,5 Hz) e do pico de velocidade da partícula é coincidente com os locais correspondentes para o campo livre e a interface solo-

estrutura. O edifício apenas influencia na amplitude do nível de vibração e na condição de solo estático que deve ser considerado no processo de projeto. Este ponto é confirmado pela consideração do momento fletor da fundação. Portanto, a distância do trilho ao edifício de 18 m é proposta como um caso otimizado.

No trabalho desenvolvido por Feng *et al.* (2017), são discutidos os efeitos do tratamento do solo em especial o subleito, em especial o uso de fileiras de estacas e a melhoria do solo ao lado do trilho na atenuação das vibrações do solo, isto é, uma forma passiva de combate aos efeitos vibracionais. O artigo descreve as vibrações do solo com modelos tridimensionais formulado no domínio do tempo usando o método dos elementos finitos com 2,5D (MEF). A fonte das vibrações aqui analisadas vem das ferrovias de alta velocidade, essas funcionam como um meio de transporte mais seguro e rápido, que cresceu rapidamente ao redor do mundo, em vários locais inclusive na China. As vibrações provocadas pelo trem de alta velocidade (HST) inspira bastante cuidado e estimula o controle e a regulamentação dos efeitos vibracionais provocados pelos trens ou metrô acima citados. Para a análise, os autores consideraram que a carga (peso) do trem fosse distribuída simetricamente em toda a extensão do trilho, nos pontos de contato com a roda e a velocidade do veículo ferroviário. A velocidade e frequência do trem são variáveis para se medir e observar os efeitos de vibração no solo. Para evitar reflexos de onda nas bordas artificiais e simular o amortecimento do material, respectivamente, são usados os conceitos de Limites de absorção e Rayleigh. Investigações de vibrações no solo causadas por cargas unitárias a diferentes velocidades e frequências são dadas. Além disso, os efeitos do tratamento de subleito e tratamento de subsolo no isolamento da vibração são debatidos como formas de minimização.

Concluiu-se que devido ao trabalho de atenuação das estruturas de subleito, reduções perceptíveis podem ser obtidas na vibração do solo da superfície. Com relação ao subleito imediatamente abaixo da superfície, os efeitos são melhores. A substituição do solo em profundidade para o isolamento de vibração do solo tem custos relativamente menores, quando comparado com a substituição da largura. Influência negativa pode ocorrer mesmo quando a largura do tratamento do subsolo se torna maior, ou seja, prevalece o tratamento da profundidade em detrimento da largura, como medida de atenuação mais significativa.

Como resultados obtidos na análise no referido artigo tem-se:

a) Foi constatado a existência da zona de amplificação, onde os deslocamentos no eixo z (profundidade) são relativamente maiores que no eixo x (direção perpendicular ao eixo

do trilho) e este levemente maiores que o eixo y (direção ao longo do eixo do trilho);

b) A velocidade crítica do trem, ou seja, a velocidade cujos deslocamentos aumentam significativamente é de 115 m/s;

c) Pequenos valores de frequência tendem a causar deslocamentos e vibrações maiores em todos os três eixos de medição considerados, enquanto valores altos de frequência têm a tendência de terem seus efeitos atenuados mais rapidamente;

d) O valor de 30 Hz pode ser definido como o valor limite de frequência para que se encontre altos deslocamentos quando se tem valores de frequência menores que 30 Hz e baixos deslocamentos quando a frequência é maior que 30 Hz;

e) O tratamento da profundidade (substituição e enrijecimento) do solo se mostra mais eficiente do que o tratamento da largura do solo tanto nos solos superficiais quanto nos solos subsuperficiais;

f) Os trens de alta velocidade aqui estudados podem causar desconforto e desalinhamento de equipamentos sensíveis além de danos estruturais e estéticos a edificações que estejam nas proximidades.

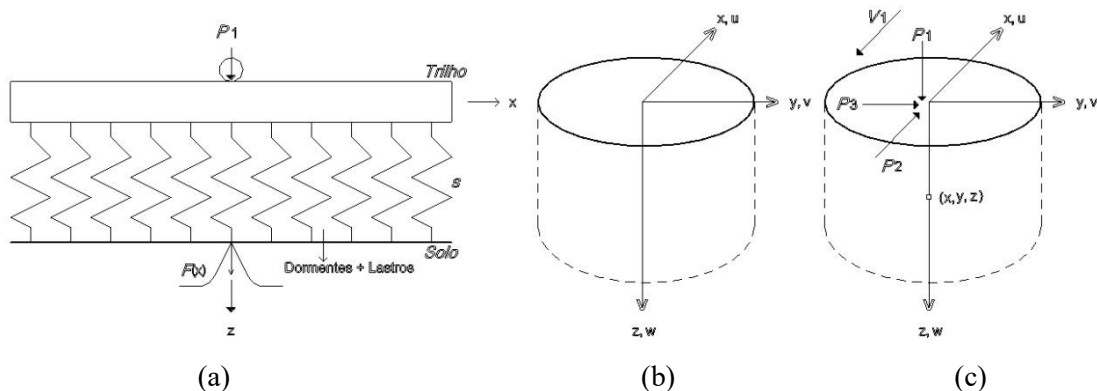
3 FORMULAÇÃO MATEMÁTICA PARA OS SOLOS

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 lastro), cujo coeficiente de rigidez é s (Figura 11a).

Os deslocamentos do solo (u , v e w) são avaliados segundo os respectivos eixos coordenados x , y e z , em que a superfície do solo é definida pelo plano $z = 0$ (Figura 11b), 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.

Eason (1965) 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 11c).

Figura 11. (a) Modelo da ferrovia; (b) Deslocamentos u , v e w do solo, segundo os eixos coordenados; (c) Carga trem-eixo



Fonte: o Autor

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

$$F(x) = \frac{P_1}{2\alpha} e^{-|x|/\alpha} \left(\cos\left(\frac{|x|}{\alpha}\right) + \sin\left(\frac{|x|}{\alpha}\right) \right) \quad (5)$$

Em que, α é o comprimento característico da pista ferroviária, que depende do módulo de elasticidade do material do trilho, E , e de sua inércia, I :

$$\alpha = \sqrt[4]{\frac{4EI}{s}}. \quad (6)$$

Dentre as equações mencionadas por Carvalho (2016) do trabalho de Eason (1965), as equações (7) a (9) medem, respectivamente, os deslocamentos horizontais (u e v) ao longo dos eixos x e y e o deslocamento vertical (w) ao longo do eixo z :

$$u = \frac{F}{4\pi^2\mu} \frac{x}{r} \int_0^\pi \frac{\cos \varphi \cos(\theta - \varphi)}{H} \left\{ \frac{\left(1 - \frac{1}{2}\alpha_2^2 \cos^2 \varphi\right)}{R_1^2} - \frac{\gamma_1\gamma_2}{R_2^2} \right\} d\varphi \quad (7)$$

$$v = \frac{F}{4\pi^2\mu} \frac{x}{r} \int_0^\pi \frac{\sin \varphi \cos(\theta - \varphi)}{H} \left\{ \frac{\left(1 - \frac{1}{2}\alpha_2^2 \cos^2 \varphi\right)}{R_1^2} - \frac{\gamma_1\gamma_2}{R_2^2} \right\} d\varphi \quad (8)$$

$$w = \frac{F}{4\pi^2\mu} \frac{x}{z} \int_0^\pi \frac{\gamma_1}{H} \left\{ \frac{\gamma_1 \left(1 - \frac{1}{2}\alpha_2^2 \cos^2 \varphi\right)}{R_1^2} - \frac{\gamma_1}{R_2^2} \right\} d\varphi. \quad (9)$$

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:

$$\gamma_1 = \sqrt{1 - \alpha_1^2 \cos^2 \varphi} \quad \gamma_2 = \sqrt{1 - \alpha_2^2 \cos^2 \varphi}. \quad (10)$$

$$H = \left(1 - \frac{1}{2}\alpha_1^2 \cos^2 \varphi\right)^2 - \gamma_1\gamma_2. \quad (11)$$

$$R_1 = \sqrt{r^2 \cos^2 \theta - \varphi + \gamma_1^2 z^2} \quad R_2 = \sqrt{r^2 \cos^2 \theta - \varphi + \gamma_2^2 z^2}. \quad (12)$$

Em que, r e θ representam a localização em coordenadas polares do ponto no espaço onde os deslocamentos são medidos. 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 pelas equações (2) e (3). Então, estes coeficientes são definidos por:

$$\alpha_1 = \frac{V_t}{c_p} \quad \alpha_2 = \frac{V_t}{c_s}. \quad (13)$$

A equações (7) a (9) 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 a equações em relação ao tempo, já para o cálculo da aceleração instantânea no solo deriva-se duas vezes as equações do deslocamento, obtendo-se assim as seguintes expressões:

$$\frac{d}{dt} u = v_u = \frac{d}{dt} \left(\frac{F x r}{4\pi^2 \mu} \right) \int_0^\pi \frac{\cos \varphi \cos(\theta - \varphi)}{H} \left[\frac{\left(1 - \frac{1}{2} \alpha_2^2 \cos^2 \varphi \right)}{R_1^2} - \frac{\gamma_1 \gamma_2}{R_2^2} \right] d\varphi \quad (14)$$

$$\frac{d^2}{dt^2} u = a_u = \frac{d^2}{dt^2} \left(\frac{F x r}{4\pi^2 \mu} \right) \int_0^\pi \frac{\cos \varphi \cos(\theta - \varphi)}{H} \left[\frac{\left(1 - \frac{1}{2} \alpha_2^2 \cos^2 \varphi \right)}{R_1^2} - \frac{\gamma_1 \gamma_2}{R_2^2} \right] d\varphi \quad (15)$$

$$\frac{d}{dt} v = v_v = \frac{d}{dt} \left(\frac{F x r}{4\pi^2 \mu} \right) \int_0^\pi \frac{\sin \varphi \cos(\theta - \varphi)}{H} \left[\frac{\left(1 - \frac{1}{2} \alpha_2^2 \cos^2 \varphi \right)}{R_1^2} - \frac{\gamma_1 \gamma_2}{R_2^2} \right] d\varphi \quad (16)$$

$$\frac{d^2}{dt^2} v = a_v = \frac{d^2}{dt^2} \left(\frac{F x r}{4\pi^2 \mu} \right) \int_0^\pi \frac{\sin \varphi \cos(\theta - \varphi)}{H} \left[\frac{\left(1 - \frac{1}{2} \alpha_2^2 \cos^2 \varphi \right)}{R_1^2} - \frac{\gamma_1 \gamma_2}{R_2^2} \right] d\varphi \quad (17)$$

$$\frac{d}{dt} w = v_w = \frac{d}{dt} \left(\frac{F x z}{4\pi^2 \mu} \right) \int_0^\pi \frac{\gamma_1}{H} \left\{ \frac{\gamma_1 \left(1 - \frac{1}{2} \alpha_2^2 \cos^2 \varphi \right)}{R_1^2} - \frac{\gamma_1}{R_2^2} \right\} d\varphi. \quad (18)$$

$$\frac{d^2}{dt^2} w = a_w = \frac{d^2}{dt^2} \left(\frac{F x z}{4\pi^2 \mu} \right) \int_0^\pi \frac{\gamma_1}{H} \left\{ \frac{\gamma_1 \left(1 - \frac{1}{2} \alpha_2^2 \cos^2 \varphi \right)}{R_1^2} - \frac{\gamma_1}{R_2^2} \right\} d\varphi \quad (19)$$

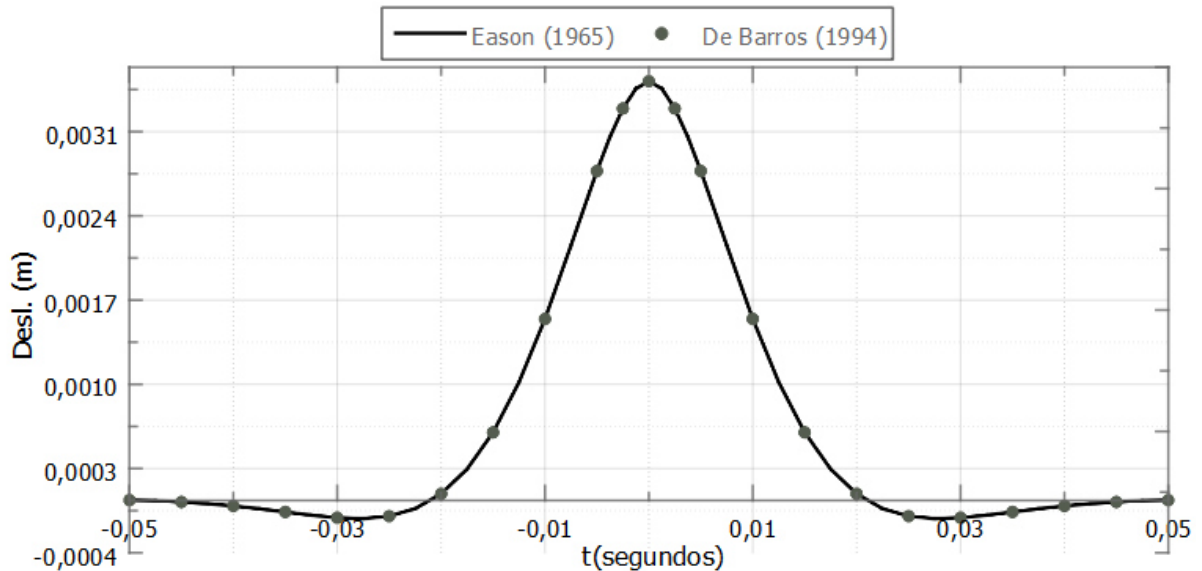
3.1 Validação

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 foi validada comparando uma determinada situação, com as equações apresentadas no trabalho desenvolvido por De Barros (1994). As duas formulações matemáticas, consideram o solo como homogêneo, elástico, isotrópico e semi-infinito. O veículo ferroviário é representado por uma carga pontual móvel, a velocidade constante, aplicado na sua superfície.

De Barros em seu trabalho observou singularidades matemáticas aparentes, no roteiro matemático da formulação de Eason. Devido a essa impossibilidade matemática, Barros optou por recalculas as expressões, avaliando os integrandos numericamente, para que os mesmos se comportem na equação de forma bem-comportada, fazendo com que a solução esteja em um conjunto bem definido. O trem é representado por uma carga móvel pontual P_1 , equivalente a uma massa com valor de 10.000,00 kg, sendo a massa total do vagão igual a 80 toneladas distribuída em oito pontos de contato com a pista (quatro rodas em cada trilho), movendo-se a uma velocidade de 324 km/h que é próximo do valor da velocidade da onda Rayleigh no solo (331,2 km/h). As características geotécnicas do solo são 50 MPa para o módulo de elasticidade longitudinal, 0,25 para o coeficiente de Poisson e 2000 kg/m³ é a densidade do solo. São feitas medições para um intervalo de tempo de -0,05 s a 0,05 s, sendo o instante zero o ponto onde ocorre o maior deslocamento vertical no solo, cujo valor é 3,48 mm. Para evitar as singularidades matemáticas mencionadas anteriormente as coordenadas polares, são consideradas fixas para cada situação de análise. Neste instante, a carga móvel está alinhada com o ponto de observação que está a um metro de profundidade do solo. Verifica-se, portanto,

que há uma boa concordância entre os dois resultados, principalmente no ponto de pico (Figura 12).

Figura 12. Comparação entre a Eason (9) e De Barros (1994) ($x, y, z = 0, 0, l$)



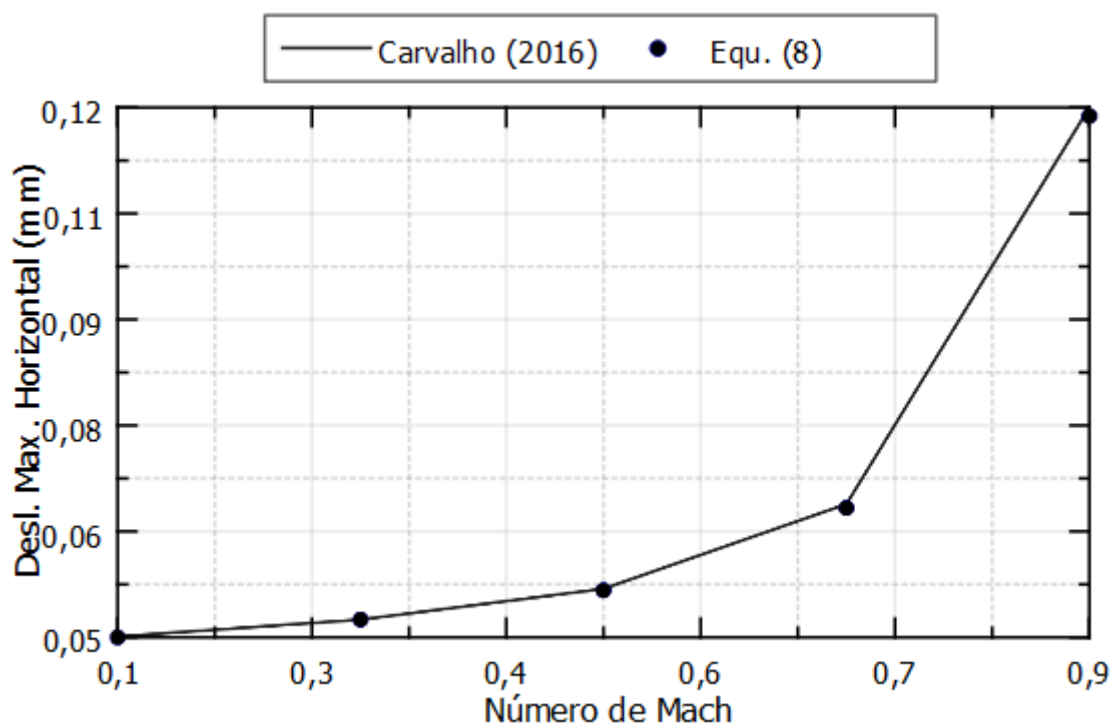
Fonte: Autor

Quando a carga se afasta deste ponto, o deslocamento diminui, tendendo a zero. Como a carga produzida pelo vagão é pontual, ela atua como um impulso, cujo período de duração tende a zero, o que explica a concentração dos maiores valores deslocamentos verticais próximos à origem. Comparando a curva obtida no presente trabalho com os resultados pontuais de De Barros (1994), nota-se que atingiram valores coincidentes.

Para os deslocamentos horizontais a validação é feita analisando o número de Mach no instante $t=0$, ou seja, no momento em que o deslocamento no eixo horizontal é máximo, ou seja, apenas os valores máximos são usados para confeccionar o gráfico. A comparação é feita entre a equação (8) do presente trabalho e um gráfico presente no trabalho de Carvalho (2016). Considerando a velocidade do trem, define-se o número de Mach M_2 como sendo uma medida adimensional da velocidade, correspondente à razão entre a velocidade do trem e a velocidade das ondas S no solo $M_2=V/c_s$. Observa-se na Figura 13 que há uma concordância quase exata entre os resultados.

Os deslocamentos horizontais vibram e oscilam as partículas de solo lateralmente (afastando e aproximando um ponto do solo da pista ferroviária). Tais valores de deslocamento serão usados nesse trabalho, para medir as respostas e as sensibilidades de edifícios de múltiplos pavimentos, devido a passagem de trens.

Figura 13. Comparação entre a Equação (8) e Carvalho (2016) ($x, y, z = 0, 1, 1$)



Fonte: Autor

3.2 Legislação FTA (Velocidade)

Para um piso vibrante, o deslocamento é simplesmente a distância que um ponto no piso se move para longe de sua posição estática. A velocidade representa a velocidade instantânea do movimento do piso e a aceleração é a taxa de variação da velocidade. Embora o deslocamento seja mais fácil de entender do que a velocidade ou aceleração, raramente é usado para descrever as vibrações de elementos sólidos. Isso ocorre porque a maioria dos transdutores usados para medir essa vibração proporciona medidas de velocidade ou aceleração e, ainda mais importante, a resposta de humanos, edifícios e equipamentos à vibração é descrita com mais precisão usando velocidade ou aceleração (FRA, 2012).

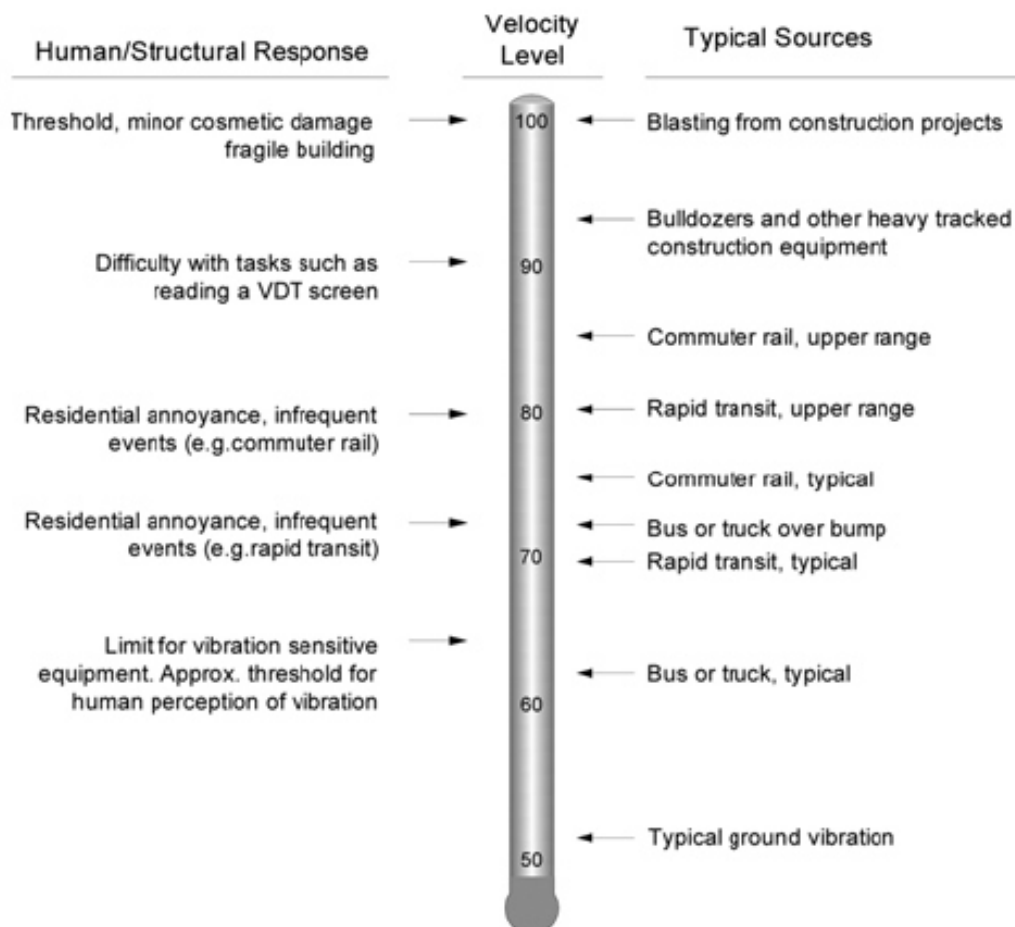
De acordo com FTA, a vibração induzida por trem consiste em movimentos flutuantes rapidamente com um movimento médio de zero. Existem vários métodos diferentes que são usados para quantificar o nível de vibração. A velocidade de pico de partículas (*Peak Particle Velocity* - PPV) é definida como o pico positivo ou negativo instantâneo máximo do sinal de vibração. O nível de velocidade de vibração, L_v , em decibéis é definido como:

$$L_V = 20 \log_{10} \left(\frac{v_t}{v_{ref}} \right). \quad (20)$$

Em que, v_t é a amplitude da velocidade do trem e v_{ref} é a faixa de velocidade de referência. Um valor de referência deve ser sempre especificado toda vez que uma quantidade é expressa em termos de decibéis. A FTA sugere que o valor de referência para a velocidade de vibração seja $2,54 \times 10^{-8}$ m/s.

Valores de vibração acima de 80 dB causam o máximo aborrecimento momentâneo para os usuários de edificações; acima de 90 dB, a vibração causa dificuldade de leitura e dificuldade de visão para qualquer pessoa submetida a esses níveis de vibração; a partir de 100 dB, a vibração já pode causar danos as estruturas e edificações, tais como o aparecimento de trincas e fissuras na fachada ou em ambientes internos, até o colapso progressivo da edificação caso a vibração atinja valores próximos da frequência natural da estrutura (Figura 14).

Figura 14. Legislação FTA



Fonte: FTA

4 ESTUDO DE CASO

Nesse estudo usa-se os dados obtidos de veículos ferroviários brasileiros, considerando a carga, velocidade e o tipo do trem movendo-se em um trilho sem irregularidades. As ondas vibracionais se propagam em um solo com características e propriedades específicas até um ponto de observação que contém a estrutura de um edifício, cujo comportamento é analisado variando-se os parâmetros acima mencionados. O eixo do trem é representado através de uma carga pontual que se distribui linearmente pela pista ferroviária.

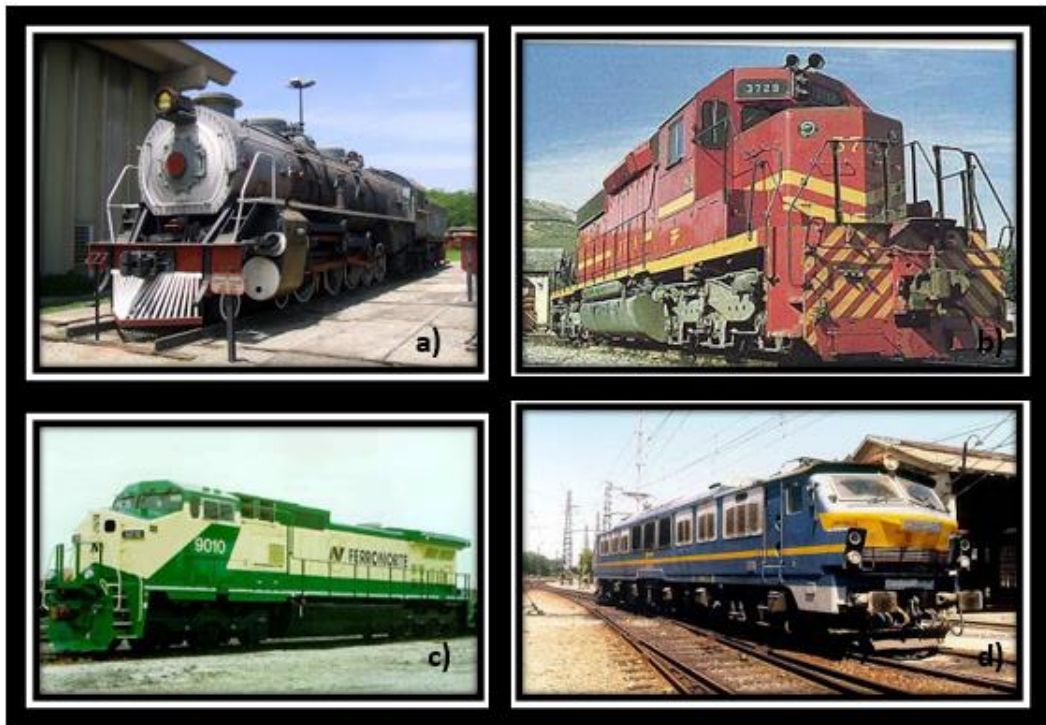
A propagação da vibração no solo é obtida considerando que a carga se move a uma velocidade inferior à velocidade das ondas Rayleigh em um semi-espaço homogêneo, elástico, isotrópico e linear, sendo a onda Rayleigh a principal a ser considerada, pois as ondas P e S tendem a se propagar para o interior do solo. Nas análises do presente trabalho, os valores de deslocamento, velocidade e aceleração serão sempre os valores máximos de cada análise pontual no interior do solo.

4.1 Dados do Problema

No Brasil existem quatro tipos de locomotivas, a saber: a locomotiva a vapor (a primeira a ser criada), a locomotiva a diesel (criada com o objetivo de tornar os trens mais rápidos), a locomotiva elétrica (criada com o objetivo de transformar o transporte urbano mais rápido, também conhecida como metrô) e, finalmente, a locomotiva a biodiesel (criada com o objetivo de emitir menos dióxido de carbono na atmosfera, ou seja, é mais ecológica).

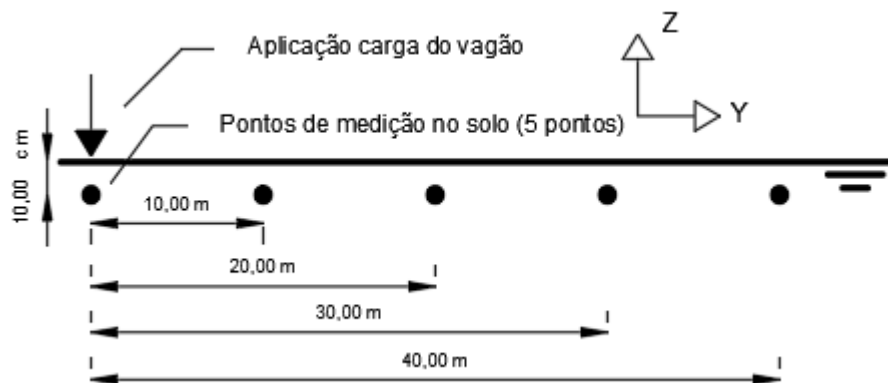
A velocidade média das ferrovias brasileiras varia de 23,40 km/h a 31,07 km/h. Dependendo da potência da locomotiva e do número de vagões engatados, os trens podem chegar a uma velocidade máxima de 60 km/h, de acordo com uma série de fiscalizações feitas pela Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT) em 2015. Para o presente estudo, são consideradas quatro tipos de velocidades: 20 km/h, 30 km/h, 40 km/h, 50 km/h e 60 km/h. A análise é feita a uma distância de até 40 metros da pista, no eixo de deslocamento z e y a uma profundidade de 10 cm da superfície solo, assim como está descrito na Figura 15.

Figura 15. Tipos de locomotivas: a) Locomotiva a vapor; b) Locomotiva a diesel; c) Locomotiva a biodiesel; d) Locomotiva elétrica



Fonte: Autor

Figura 16. Pontos de observação e medição no interior do solo



Fonte: Autor

O transporte ferroviário é diversificado e, dentre os tipos de vagões e locomotivas de veículos utilizados no Brasil, destacam-se principalmente (Figura 17): vagão aberto (gôndola) que não precisa de proteção climática, vagão fechado para produtos que necessitam de proteção precisa contra o clima, Hopper (vagão adaptado com funil para facilitar o descarregamento), vagão tanque para transporte de fluidos, vagão plataforma e vagão carro usado para o transporte doméstico de passageiros. O peso da tara da maioria dos vagões varia entre 25.000 kg e 36.000 kg e o peso bruto máximo carregado para a maioria dos vagões é de 130.000 kg. Para os fins deste estudo, são utilizados os valores de 80.000 kg, 100.000 kg e

130.000 kg.

Figura 17. Tipos de vagões: a) Vagão aberto; b) Vagão Carro; c) Gôndola; d) Vagão Tanque; e) Vagão fechado; f) Vagão Plataforma



Fonte: Autor

Os seguintes tipos de trilhos são ou foram utilizados principalmente no Brasil: TR-37, TR-45, TR-57 e UIC-60 (Figura 18). O uso de cada tipo de trilho depende do tipo de tráfego que cada linha usa. Para trens de minério pesado, com tráfego intenso, são utilizados trilhos TR-57 e UIC-60. Para uma linha de trens de carga geral, transportados em contêineres e vagões especializados, o uso dos trilhos TR-45 é comum. Para linhas secundárias, ramificações e desvios, é normal usar trilhos usados. Os trilhos mais leves, abaixo do TR-45, são usados em minas, interiores de indústrias e pontes rolantes. Para este estudo em questão, serão analisadas as faixas TR-57 e UIC-60, cujos valores de α (5) são respectivamente 0,77 e 0,79.

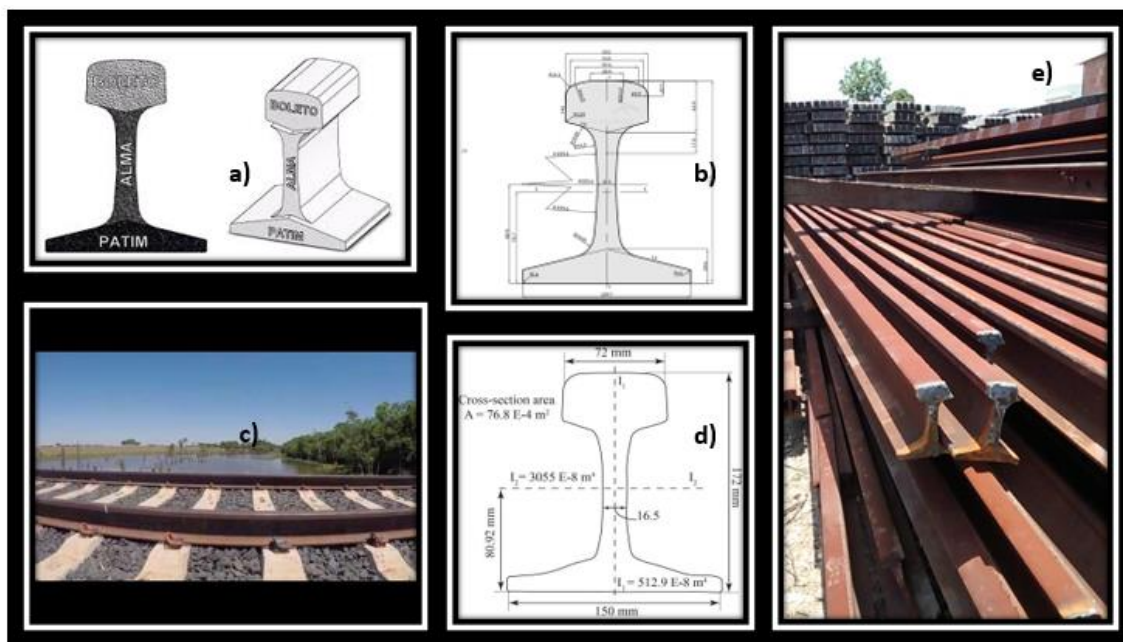
As ferrovias existentes no Brasil passam pelos mais diversos tipos de solo. Com o objetivo de avaliar a influência do tipo de solo na resposta final da velocidade, é realizada uma análise paramétrica variando-se as propriedades para os quatro tipos de solo (Tabela 1). As propriedades das argilas 1 e 2 foram extraídas de Ortigão (2007), as do solo argiloso arenoso macio foi retirado de Hesami *et al.* (2015), e a areia média grossa foi tirada de Zou *et al.* (2015).

4.2 Análise dos Solos

Para todos os tipos de solos, foram analisadas três situações de peso, a primeira com uma carga de vagão de 80 toneladas, a segunda com a carga de 100 toneladas e a terceira com 130 toneladas, e duas situações de trilho uma com o trilho TR-57 e outra com UIC-60. Para cada parâmetro variado, um gráfico velocidade por tempo é traçado, sendo o máximo valor

obtido pela análise convertido para seu respectivo valor em decibéis pela Equação (20), para que possa ser feita a avaliação da curva de tendência do nível velocidade em relação a distância da pista, carga do trem, tipo de trilho e tipo de solo.

Figura 18. Tipos de trilhos: a) Características dos trilhos; b) Dimensões Trilho UIC-60; c) Trilho UIC-60; d) Dimensões Trilho TR-57; e) Trilho TR-57



Fonte: Autor

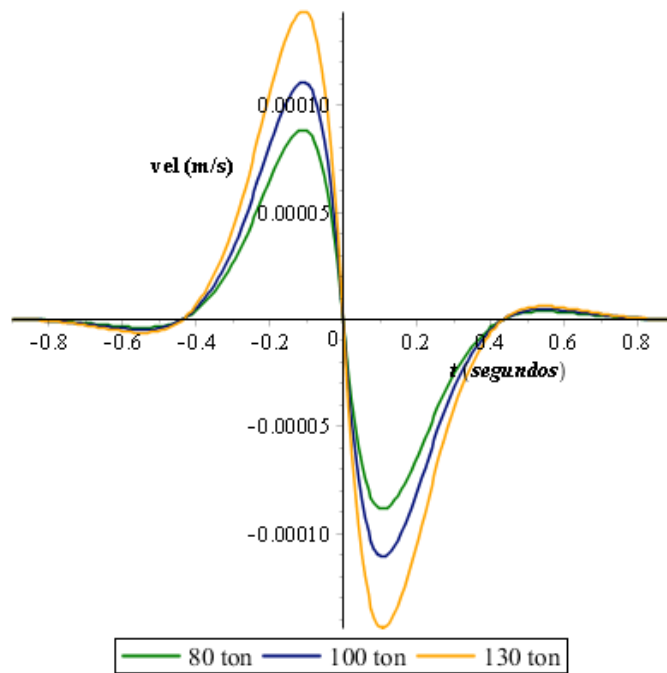
Tabela 1. Características dos solos para o estudo de caso

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)
Argila 1	92,00	100,00	173,20	0,25	2000,00	50×10^6	20×10^6
Argila 2	142,50	150,00	1071,21	0,49	2000,00	$134,1 \times 10^6$	45×10^6
Argila arenosa macia	90,09	98,82	161,37	0,20	1600,00	$37,488 \times 10^6$	$15,62 \times 10^6$
Areia Média Grossa	220,98	240,20	416,00	0,25	1960,00	$282,71 \times 10^6$	$113,08 \times 10^6$

Fonte: Autor

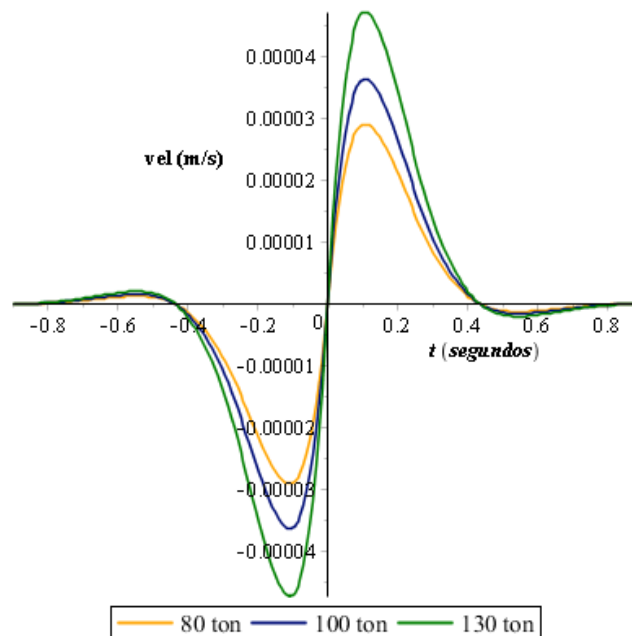
A Figura 19 e a Figura 20 mostram as curvas velocidade x tempo nos eixos z e y, respectivamente, para a argila 1, considerando uma distância de 20 metros da pista cujo trem move-se a uma velocidade de 20 km/h com trilho TR-57. Verifica-se que a velocidade de propagação no solo aumenta com o aumento da carga do trem, nas duas direções.

Figura 19. Velocidade eixo Z (m/s) vs. tempo (s) para a argila 1 ($V_t = 20$ km/h, TR-57, 20 metros da pista)



Fonte: Autor

Figura 20. Velocidade eixo Y (m/s) vs. tempo (s) para a argila 1 ($V_t = 20$ Km/h, TR-57, 20 metros da pista)



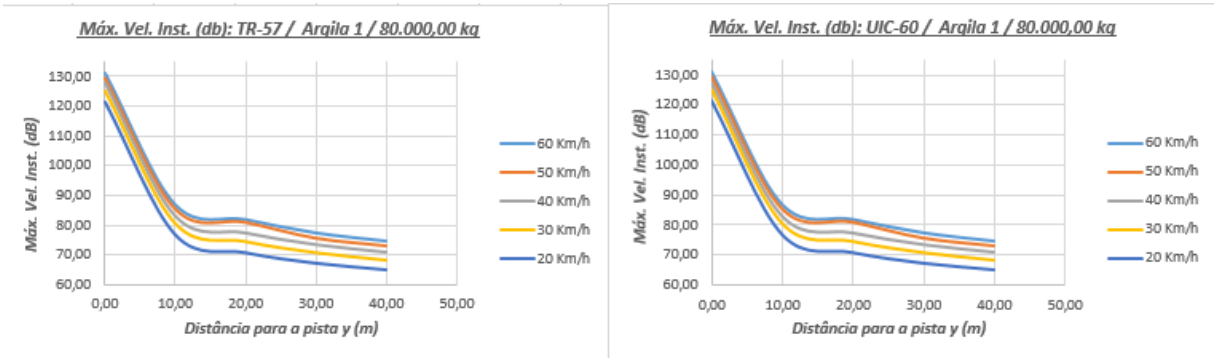
Fonte: Autor

4.2.1 Direção do Eixo Z

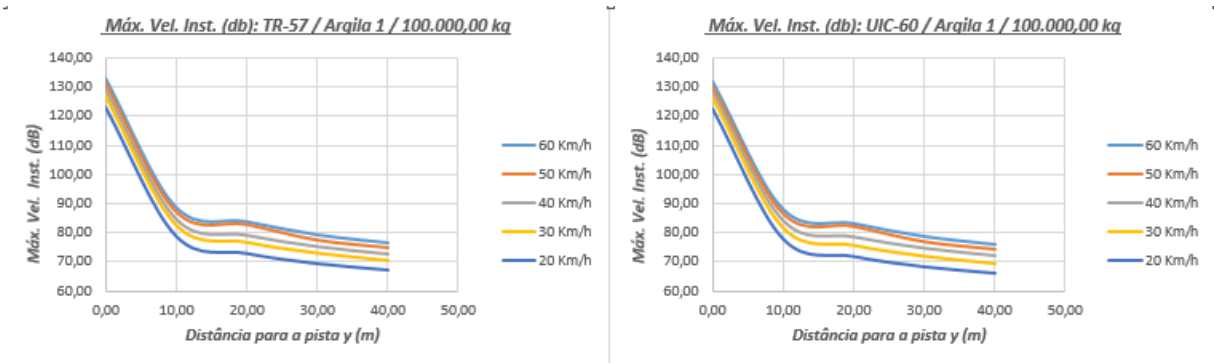
Para a argila 1, considerando a primeira situação com o vagão de 80 toneladas, para todas as velocidades de trem analisadas, observa-se que para distâncias superior a cinco metros, o nível de vibração é inferior a 100 dB que é o valor limite em que é passível de acontecer danos humanos e estruturais a construções e benfeitorias; para distâncias superiores a 20 metros da pista ferroviária, o nível de vibração atinge valores menores do que 80 dB que, de acordo com o manual do FTA, é o limite que se ultrapassado causa aborrecimento e perturbações aos usuários de edifícios. Portanto, para vagões de 80 toneladas, as regiões que estão além de 20 metros podem ser consideradas seguras. Já para a segunda situação, cuja carga de vagão é maior, para todas as velocidades de trem, observa-se que numa faixa de até 10 metros da pista, todas as velocidades de vibração são superiores a 80 dB, sendo que a maioria é superior a 100 dB, podendo chegar até 130 dB exatamente ao lado da pista. De acordo com a análise da segunda situação, só existe um nível seguro para o uso humano e estrutural que é para uma distância além de 30 metros da linha do trem. Para a terceira situação com o valor da carga do trem de 130 toneladas, os valores dos níveis de vibração são maiores que 135 dB ao lado da pista, e apenas a uma distância superior a 40 metros que o nível de vibração fica menor que 80 dB. Assim para a terceira situação os valores de nível de vibração são em torno de 3 dB maiores que a segunda situação e 5 dB maiores que a primeira. Não foi observado uma diferença significativa entre os dois tipos de trilhos analisados para as três situações.

Figura 21 Velocidade máxima (dB) vs. distância da pista (m) para a argila 1 – Eixo Z

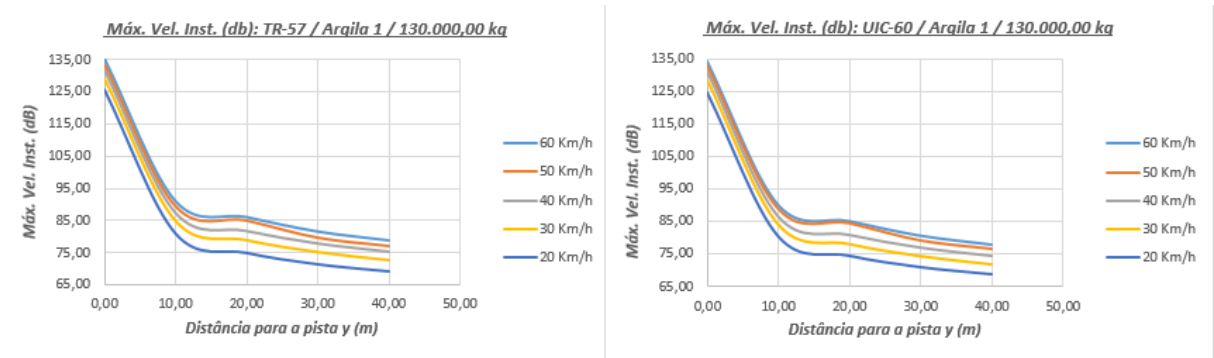
1ª Situação (80 toneladas)



2ª Situação (100 toneladas)



3ª Situação (130 toneladas)



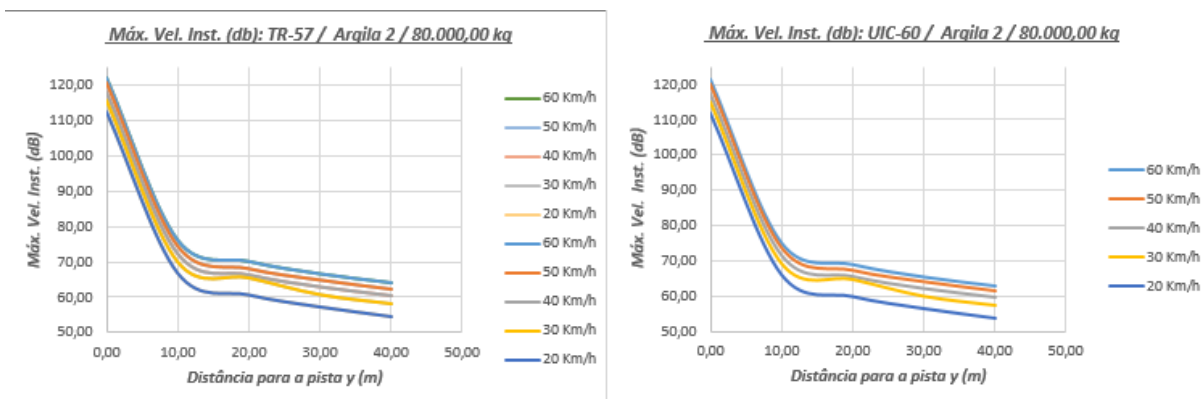
Fonte: Autor

Para a argila 2, considerando a primeira situação com o vagão de 80 toneladas, para todas as velocidades de trem analisadas, observa-se que, para a maioria das distâncias da pista ferroviária, o impacto de vibração é inferior a 100 dB, sendo o único efeito sentido pelos usuários de habitações é um moderado desconforto a parti de uma faixa de 5 metros da linha do trem. Já na segunda situação, tem-se valores de velocidade de vibração ligeiramente superiores a primeira situação, porém a mesma só ultrapassa o valor de 100 dB na faixa imediatamente ao lado da pista (até 5 metros), sendo que o valor máximo pode chegar até 125 dB. A argila 2 tem

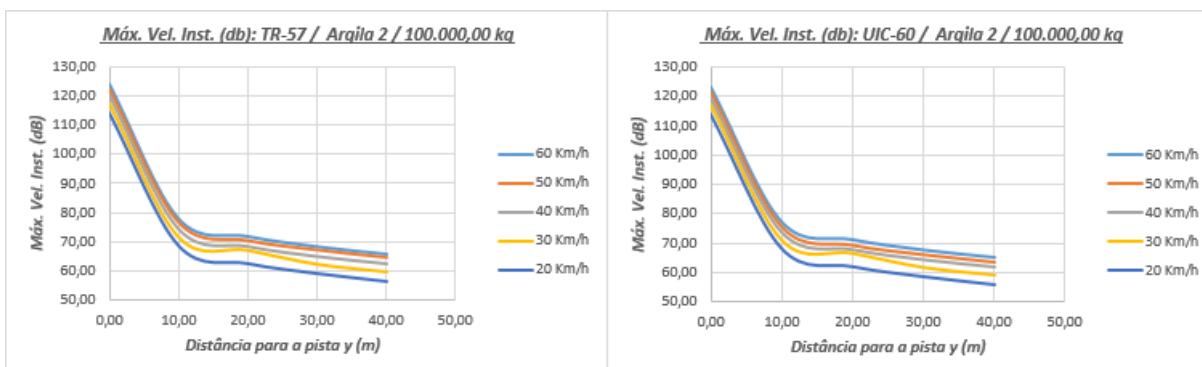
tanto um módulo de elasticidade longitudinal quanto o transversal é maior do que os da argila 1, o que torna o solo mais coeso e, conseqüentemente, menos suscetível a vibrações, esse efeito foi também observado por Feng *et al.* por fim para a argila 2 para a situação com trens de 100 toneladas as distâncias acima dos 10 metros da pista ferroviária são livres de danos estruturais e aborrecimento e incômodo humano. Para a terceira situação com o valor da carga do trem de 130 toneladas, os valores dos níveis de vibração são maiores que 125 dB ao lado da pista, e apenas a uma distância superior a 10 metros que o nível de vibração fica menor que 80 dB. Assim para a terceira situação os valores de nível de vibração são em torno de 3 dB maiores que a segunda situação e 5 dB maiores que a primeira. Não foi observado uma diferença entre os dois tipos de trilhos.

Figura 22 Velocidade máxima (dB) vs. distância da pista (m) para a argila 2 – Eixo Z

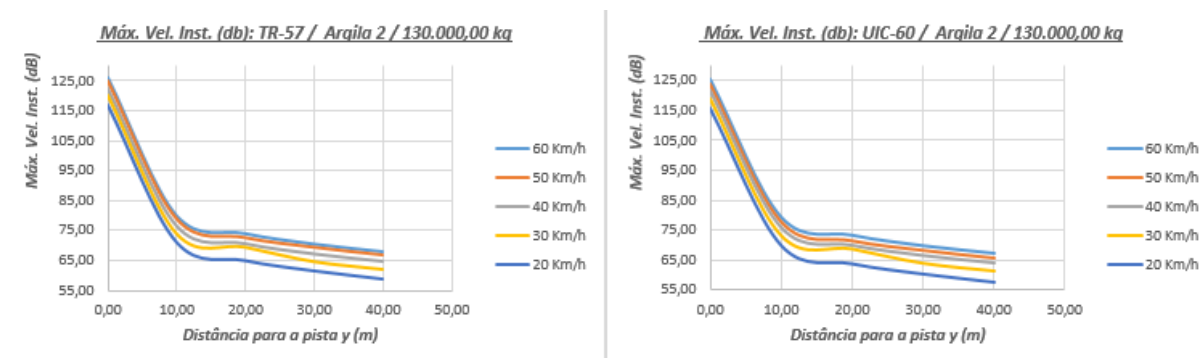
1ª Situação (80 toneladas)



2ª Situação (100 toneladas)



3ª Situação (130 toneladas)



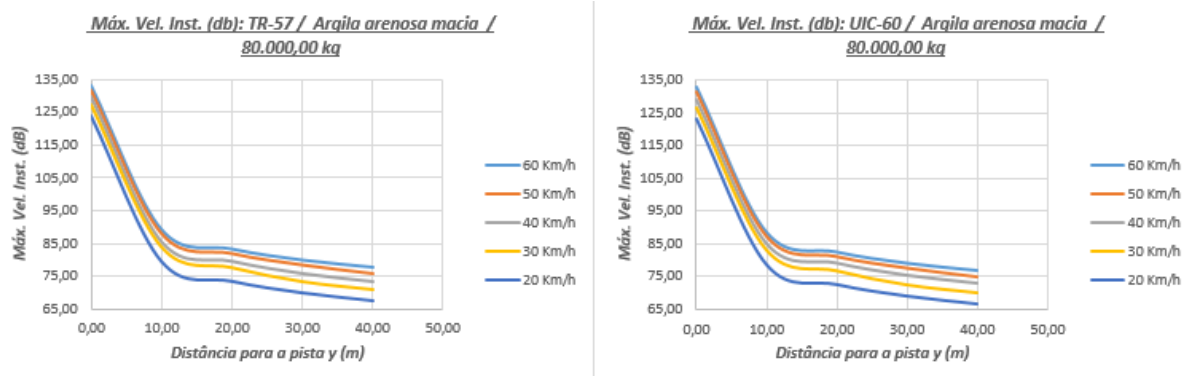
Fonte: Autor

Para o terceiro solo, que é a argila arenosa macia, na primeira situação, para quaisquer velocidades de trem analisadas, observa-se que, para distâncias superiores a oito metros, o nível de vibração é inferior a 100 dB, assim como observado para a argila 1; para uma faixa superior a 25 metros da pista ferroviária, o nível de vibração fica menor a 80 dB que, de acordo com a FTA, é a faixa segura para usuários de edifícios. Já para a segunda situação, para todas as velocidades de trem, observa-se que, numa faixa de até 10 metros da pista,

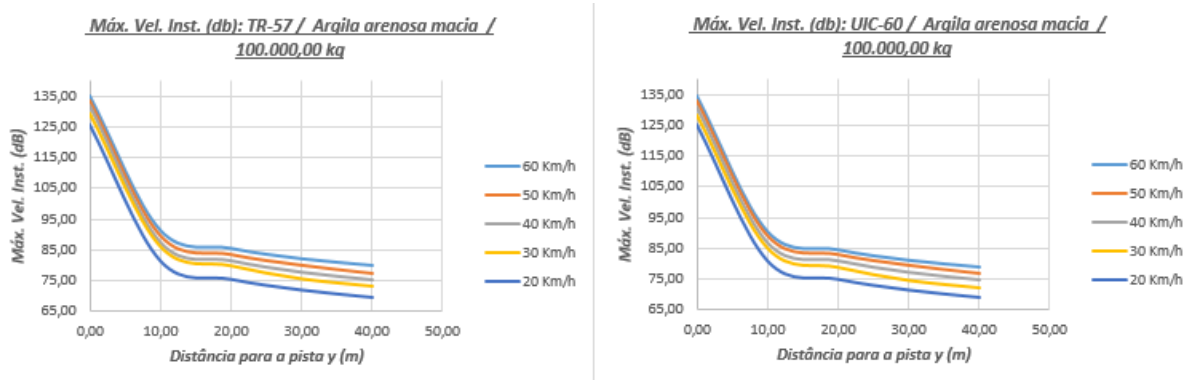
velocidades de vibração são superiores a 80 dB, sendo que grande parte é superior a 100 dB, podendo chegar até 135 dB exatamente ao lado da pista. De acordo com a análise da segunda situação, só existe um nível seguro para o uso humano e estrutural que é para uma distância além de 30 metros da linha do trem. Para a terceira situação com o valor da carga do trem de 130 toneladas, os valores dos níveis de vibração atingem no máximo 137 dB ao lado da pista, e em praticamente nenhuma distância analisada nível de vibração fica menor que 80 dB. Na terceira situação os valores de nível de vibração são em torno de 3 dB maiores que a segunda situação e 5 dB maiores que a primeira. Não foi observado uma diferença significativa entre os dois tipos de trilhos estudados.

Figura 23. Velocidade máxima (dB) vs. distância da pista (m) para a argila arenosa macia – Eixo Z

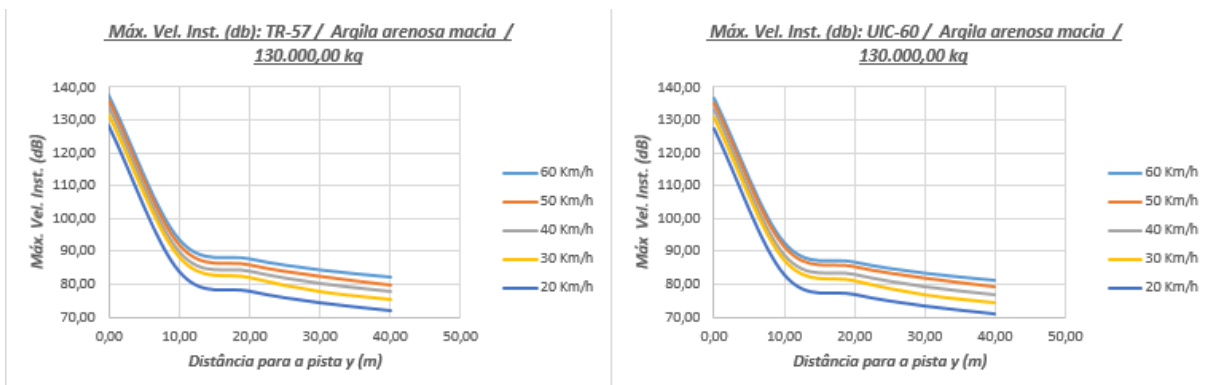
1ª Situação (80 toneladas)



2ª Situação (100 toneladas)



3ª Situação (130 toneladas)



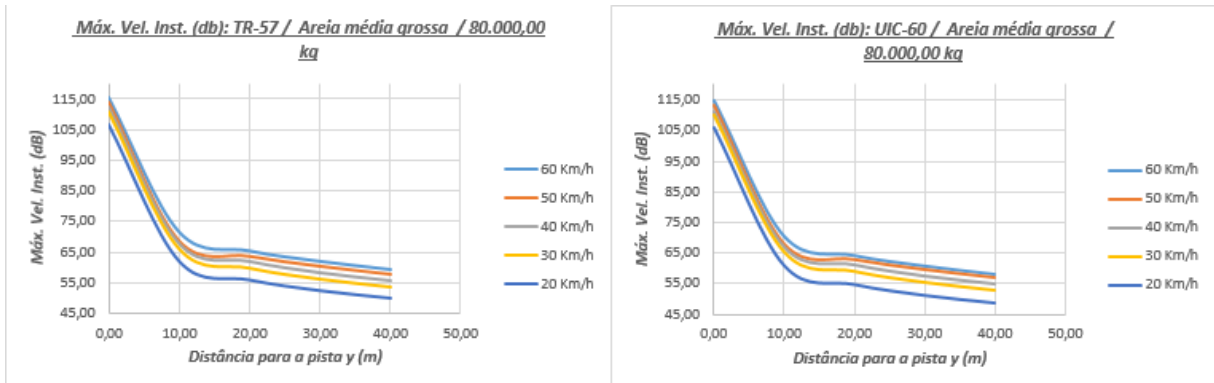
Fonte: Autor

Para o quarto solo, que é a areia média grossa, na primeira situação com a carga de vagão mínima, todos os valores de vibração ficam abaixo do valor de 80 dB para todas as faixas de velocidade a partir de 5 metros da pista. Para a carga de 100 toneladas correspondente a segunda situação a partir de 5 metros da pista para todos os valores de velocidade de trem tem valores de vibração abaixo de 90 dB que no máximo causam aborrecimento dos ocupantes das

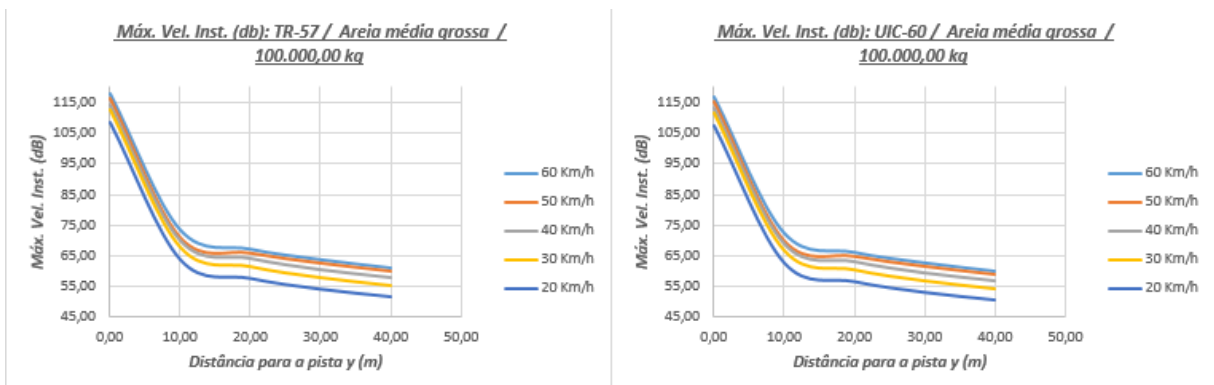
edificações e os valores ficam acima de 100 dB para uma distância da pista menor que 5 metros para todas as velocidades de trem. Para a terceira situação com o valor da carga do trem de 130 toneladas, os valores dos níveis de vibração ficam em torno de 120 dB ao lado da pista, e o nível de vibração fica menor que 100 dB a partir de 5 metros da pista e menor que 80 dB a partir de 10 metros da pista. Assim para a terceira situação a partir de 10 metros da pista para qualquer uma das velocidades os níveis de vibração no solo são seguros para uso humano e estrutural, sendo o solo com menores valores de vibração de toda a análise para o eixo Z. Não foi observado uma diferença significativa entre os dois tipos de trilhos analisados para as três situações.

Figura 24. Velocidade máxima (dB) vs. distância da pista (m) para a areia média grossa – Eixo Z

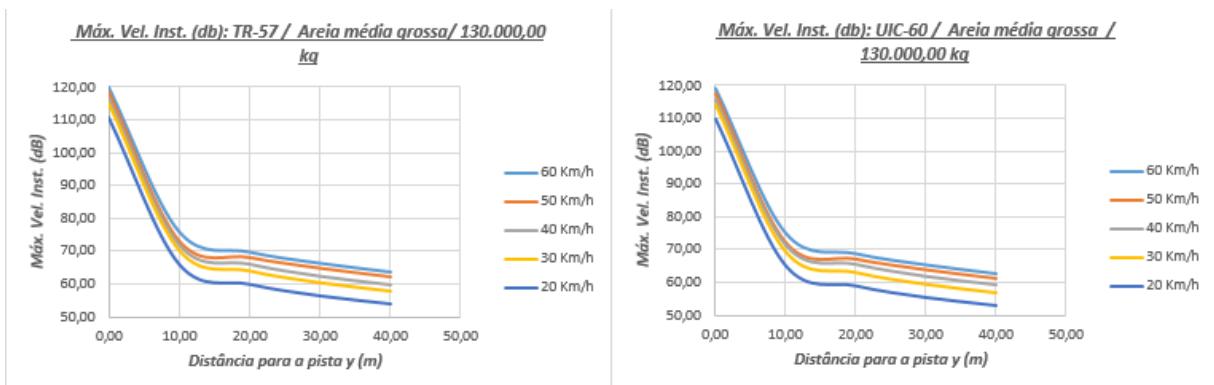
1ª Situação (80 toneladas)



2ª Situação (100 toneladas)



3ª Situação (130 toneladas)



Fonte: Autor

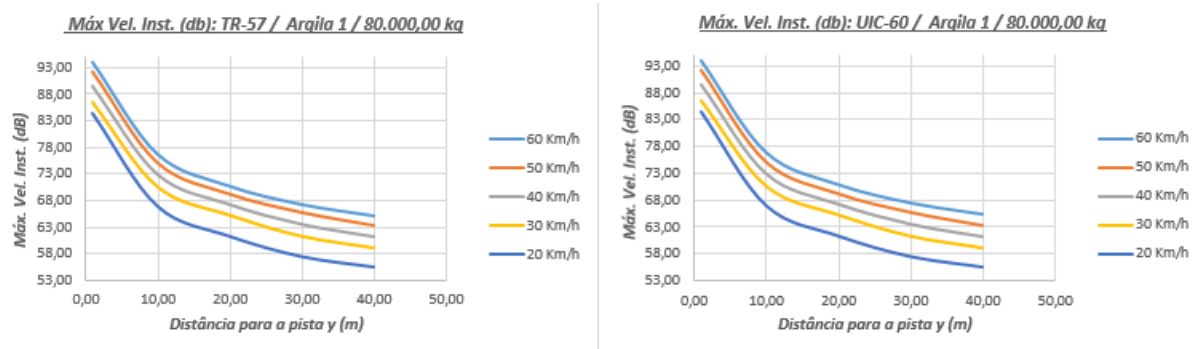
Para todos os solos da análise do nível de velocidade de vibração do eixo z é observado uma queda brusca nos valores de velocidade medida nos primeiros quinze metros da pista ferroviária, seguindo além desse valor de distância, uma queda mais suavizada e menos brusca. Também é observada uma modesta zona de amplificação a uma distância de 20 metros da pista ferroviária.

4.2.2 Direção do Eixo Y

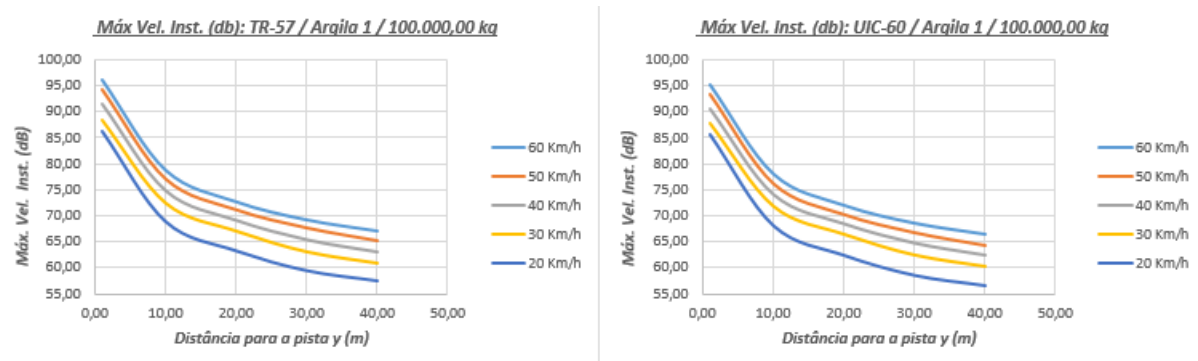
Para todos os tipos de solos, foram analisadas três situações de peso, uma com a carga de vagão de 80 toneladas, uma com a carga de 100 toneladas e outra com 130 toneladas, duas situações de trilho uma com o trilho TR-57 e outra com UIC-60, para uma faixa de solo de 1 a 40 metros da pista. Para a argila 1, considerando a primeira situação, para todas as velocidades de trem analisadas, observa-se que para distâncias superiores a 8 metros da pista, o nível de vibração é inferior a 80 dB que de acordo com o manual do FTA, é o valor que causa aborrecimento e perturbações aos usuários de edifícios. Já para a segunda situação, cuja carga de vagão é maior, para todas as velocidades de trem, observa-se que numa faixa de até 10 metros da pista, todas as velocidades de vibração são superiores a 80 dB, podendo chegar no máximo a 95 dB adjacente a linha ferroviária. Para a terceira situação com o valor da carga do trem de 130 toneladas, os valores dos níveis de vibração atingem no máximo 99 dB ao lado da pista, e apenas a uma distância superior a 30 metros que o nível de vibração fica menor que 70 dB. Não foi observado uma diferença significativa entre os dois tipos de trilhos analisados para as três situações.

Figura 25. Velocidade máxima (dB) vs. distância da pista (m) para a argila 1 – Eixo Y

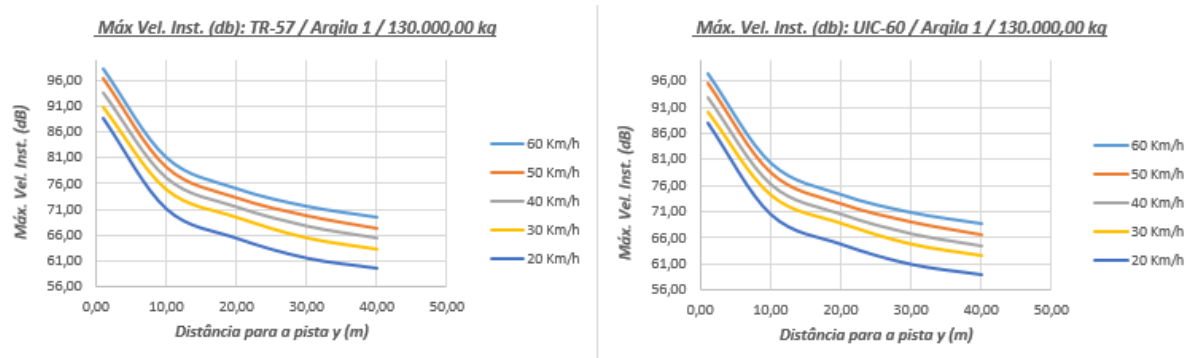
1ª Situação (80 toneladas)



2ª Situação (100 toneladas)



3ª Situação (130 toneladas)



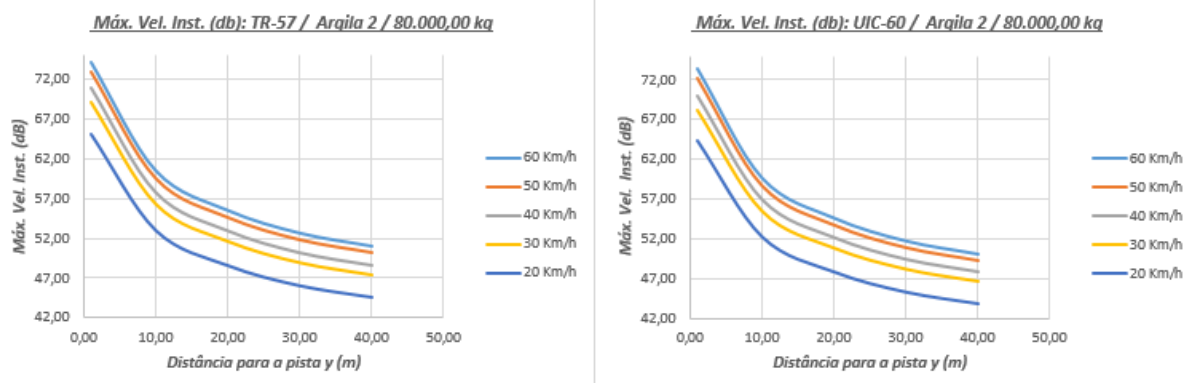
Fonte: Autor

Para a argila 2, considerando a primeira situação, para todas as velocidades de trem analisadas, observa-se que para todas as distâncias e velocidades de trem, o nível de vibração é inferior a 80 dB, sendo esse valor a transição para se causar aborrecimento e perturbações aos usuários de edifícios. Já para a segunda situação, cuja carga de vagão é maior, para todas as velocidades de trem, o nível máximo de vibração pode chegar a 75 dB no máximo ao lado da linha ferroviária. Para a terceira situação com o valor da carga do trem de 130 toneladas, os valores dos níveis de vibração são menores que 80 dB para todas as distâncias da pista, e apenas

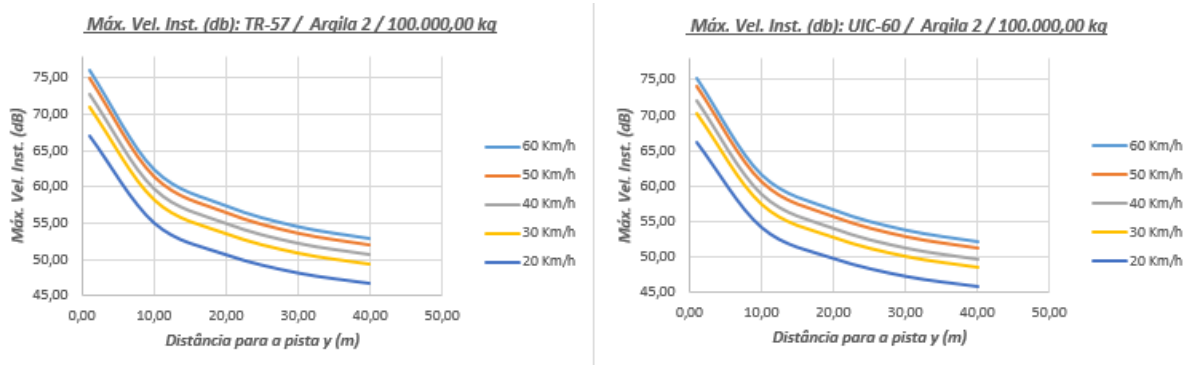
a uma distância superior a 15 metros que o nível de vibração fica menor que 60 dB para todas as velocidades de trem analisadas, que é o limite de vibração para a percepção humana. Não foi observado uma diferença significativa entre os dois tipos de trilhos analisados.

Figura 26. Velocidade máxima (dB) vs. distância da pista (m) para a argila 2 – Eixo Y

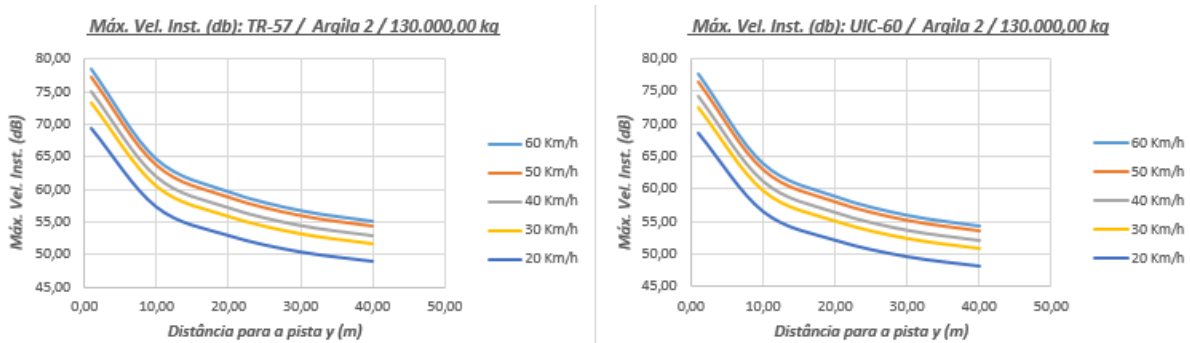
1ª Situação (80 toneladas)



2ª Situação (100 toneladas)



3ª Situação (130 toneladas)



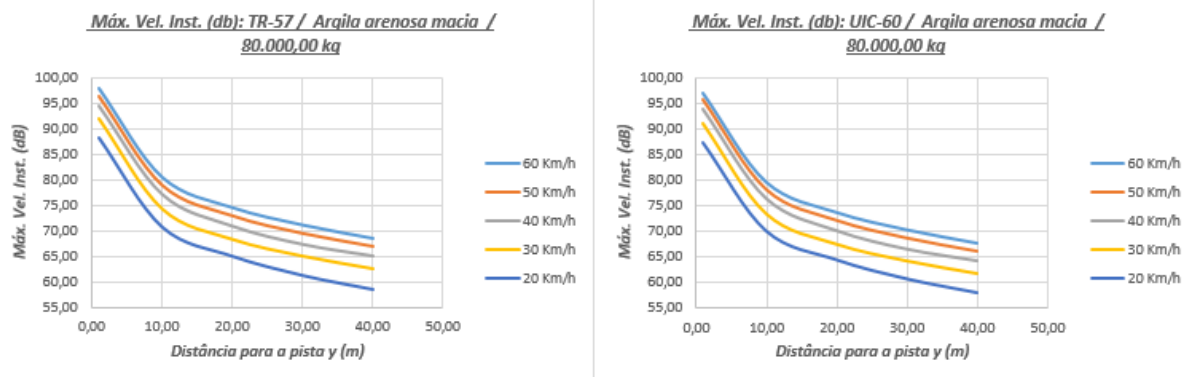
Fonte: Autor

Para o terceiro solo que é a argila arenosa macia, considerando a primeira situação, para todas as velocidades de trem analisadas, observa-se que para distâncias superiores a 10 metros da pista, o nível de vibração é inferior a 80 dB. Já para a segunda situação, cuja carga

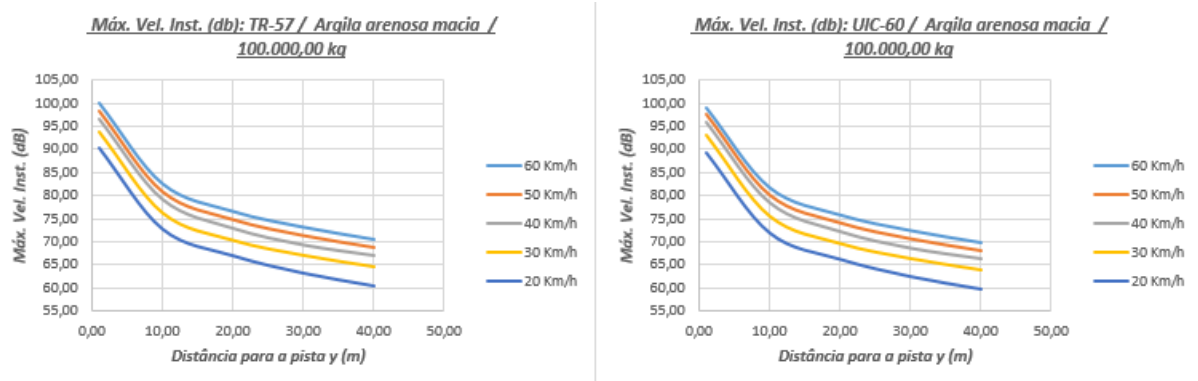
de vagão é maior, para todas as velocidades de trem, observa-se que numa faixa de até 10 metros da pista, todas as velocidades de vibração são superiores a 80 dB para velocidade de trem superiores a 40 Km/h, podendo chegar a 100 dB nas proximidades da linha ferroviária. Para a terceira situação com o valor da carga do trem de 130 toneladas, os valores dos níveis de vibração são maiores que 100 dB ao lado da pista, e apenas a uma distância superior a 15 metros que o nível de vibração fica menor que 80 dB. Não foi observado uma diferença entre os dois tipos de trilhos analisados para as três situações.

Figura 27. Velocidade máxima (dB) vs. distância da pista (m) para a argila arenosa macia – Eixo Y

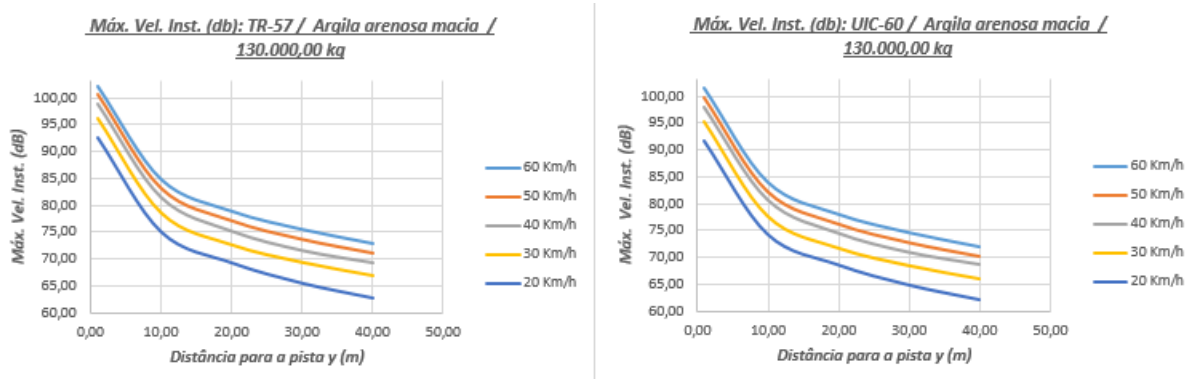
1ª Situação (80 toneladas)



2ª Situação (100 toneladas)



3ª Situação (130 toneladas)



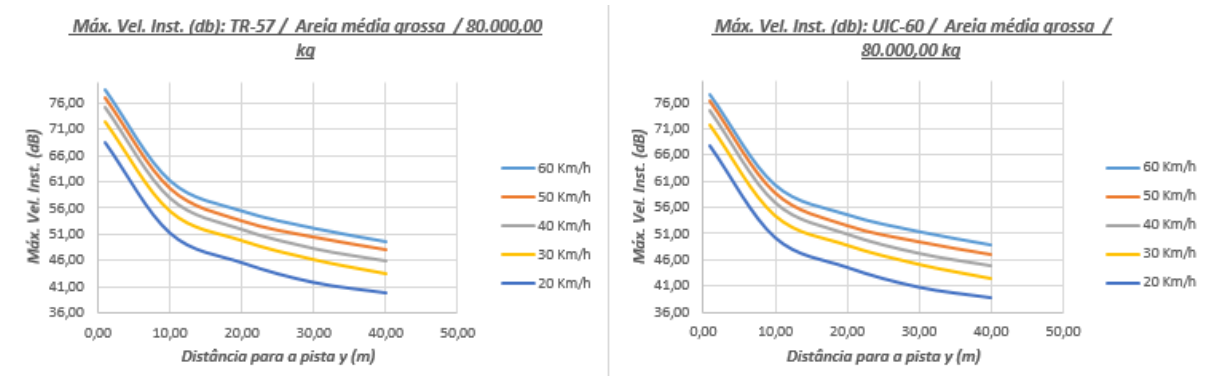
Fonte: Autor

Para o quarto solo que é a areia média grossa, considerando a primeira situação, para todas as velocidades de trem analisadas, observa-se que para todas as distâncias analisadas para todas as velocidades de trem, o nível de vibração é inferior a 77 dB que pela FTA, não causara aborrecimento e perturbações aos usuários de edifícios. Já para a segunda situação, cuja carga de vagão é maior, para as velocidades de trem superiores a 40 Km/h, numa faixa de até

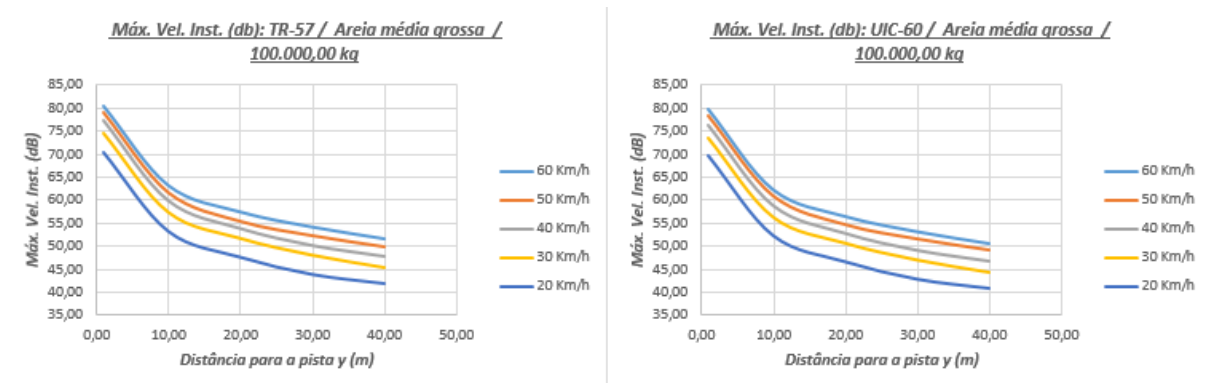
10 metros da pista, as velocidades de vibração são superiores a 60 dB, podendo chegar a 80 dB apenas nas proximidades da linha ferroviária. Para a terceira situação com o valor da carga do trem de 130 toneladas, os valores dos níveis de vibração são maiores que 80 dB ao lado da pista, e apenas a uma distância superior a 20 metros que o nível de vibração fica menor que 60 dB, que de acordo com a FTA é o limite para a percepção humana. Não foi observado uma diferença significativa entre os dois tipos de trilhos analisados.

Figura 28. Velocidade máxima (dB) vs. distância da pista (m) para a areia média grossa – Eixo Y

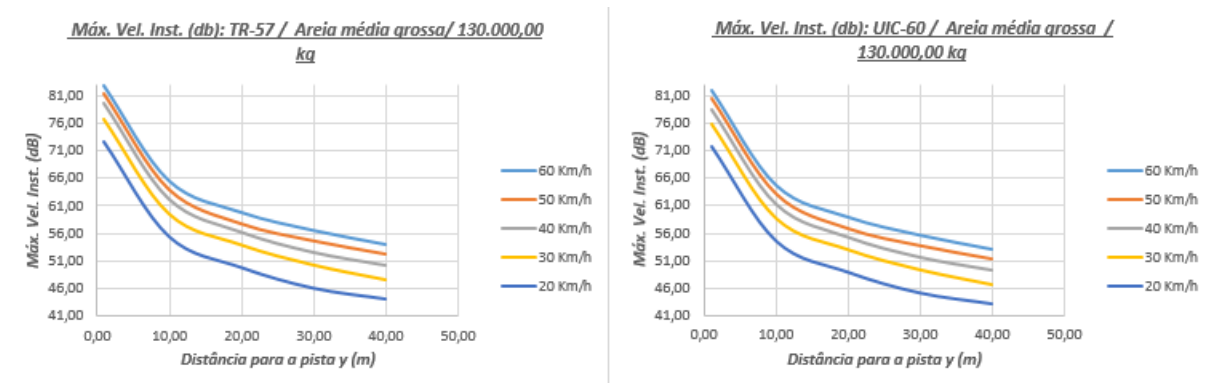
1ª Situação (80 toneladas)



2ª Situação (100 toneladas)



3ª Situação (130 toneladas)



Fonte: Autor

Para o eixo y é observado apenas duas regiões distintas, a primeira a 15 metros da pista em que se observa um moderado decaimento nos valores de vibração, e a outra entre 15 e 40 metros em que se tem um decaimento modesto na velocidade de vibração. Tanto para o eixo z quanto para o eixo y, é observado uma relação inversa entre o módulo de elasticidade e os valores das amplitudes máximas das vibrações em solo. No caso da análise em questão, o solo

com maior valor de vibração para as duas direções é a argila arenosa macia e o solo com menor vibração foi a areia média grossa. Tratam-se respectivamente dos solos com menor e maior módulo de Young de toda a observação.

4.3 Avaliação das Acelerações

Como já mencionado anteriormente, embora os deslocamentos sejam parâmetros mais fáceis de serem extraídos em análises numéricas e analíticas, velocidades e acelerações são melhores como dado comparativo para avaliações de vibrações no solo. Nesse tópico é debatido a parte da aceleração e a sua influência na percepção humana e no dano estrutural.

Assim como no estudo da velocidade é traçado um gráfico de aceleração para cada situação de velocidade do trem, solo e afastamento da pista. A partir da análise do gráfico a aceleração de pico de partículas é definida como o pico positivo ou negativo instantâneo máximo do sinal de vibração. O nível de velocidade de vibração, G , em decibéis é extraído no trabalho de Xia *et al.* (2005), e é definido como:

$$G = 20 \log_{10} a + 60 \quad (21)$$

Em que, a é a aceleração do solo em valores absolutos, sendo essa medida em cm/s^2 . A escala Mercalli, hoje em desuso, é utilizada apenas como uma classificação qualitativa, pois é obtida através da observação visual dos efeitos do terremoto na população e nas estruturas. Na Figura é apresentando a escala, que possui uma variação de I a XII, onde g é o valor da aceleração da gravidade na superfície da Terra no valor de $9,81 \text{ m/s}^2$. A escala será usada para análise e interpretação dos níveis de vibração das regiões nas proximidades de linhas ferroviárias.

Figura 29. Escala Mercalli

Grau	Descrição dos efeitos	Aceleração (g)
I	Não é sentido. Leves efeitos de período longo de terremotos grandes e distantes.	
II	Sentido por poucas pessoas paradas, em andares superiores ou em locais favoráveis.	<0,003
III	Sentido dentro de casa. Alguns objetos pendurados oscilam. Vibração parecida à passagem de um caminhão leve. Algumas pessoas sentem quantos segundos durou o tremor. Pode não ser reconhecido como um abalo sísmico.	0,004 – 0,008
IV	Objetos suspensos oscilam. Vibração parecida à de um caminhão pesado. Janelas, louças e portas fazem barulho. Paredes e estruturas de madeira rangem.	0,008 – 0,015
V	Sentido fora de casa; algumas pessoas percebem de onde vêm as vibrações. Pessoas acordam. Líquido em recipiente é perturbado. Objetos pequenos e instáveis são deslocados. Portas oscilam, fecham e abrem.	0,015 – 0,04
VI	Sentido por todos. Muitos se assustam e saem às ruas. Pessoas andam sem firmeza. Janelas e louças são quebradas. Objetos e livros caem das prateleiras. Reboco fraco e construção de má qualidade racham.	0,04 – 0,08
VII	Difícil manter-se em pé. Objetos suspensos vibram. Móveis quebram. Danos em construção de má qualidade, e formam-se algumas trincas em construção normal. Queda de reboco, ladrilhos ou tijolos mal assentados e telhas. Ondas em piscinas. Pequenos escorregamentos de barrancos arenosos.	0,08 – 0,15
VIII	Danos em construções normais com colapso parcial. Algum dano em construções reforçadas. Queda de estuque e alguns muros de alvenaria. Queda de chaminés, monumentos, torres e caixas-d'água. Galhos das árvores quebram-se. Trincas aparecem no chão.	0,15 – 0,3
IX	Pânico geral. Construções comuns são bastante danificadas, às vezes ocorre colapso total. Danos em construções reforçadas. Tubulação subterrânea é quebrada. Rachaduras visíveis no solo.	0,3 – 0,6
X	A maioria das construções é destruída até as fundações. Danos sérios a barragens e diques. Grandes escorregamentos de terra. Água é lançada nas margens de rios e canais. Trilhos são levemente entortados.	0,60 – 1
XI	Trilhos são bastante entortados. Tubulações subterrâneas são completamente destruídas.	~1 – 2
XII	Destruição quase total. Grandes blocos de rocha são deslocados. Topografia e níveis são alterados. Objetos são lançados ao ar.	~ 2

Fonte: Autor

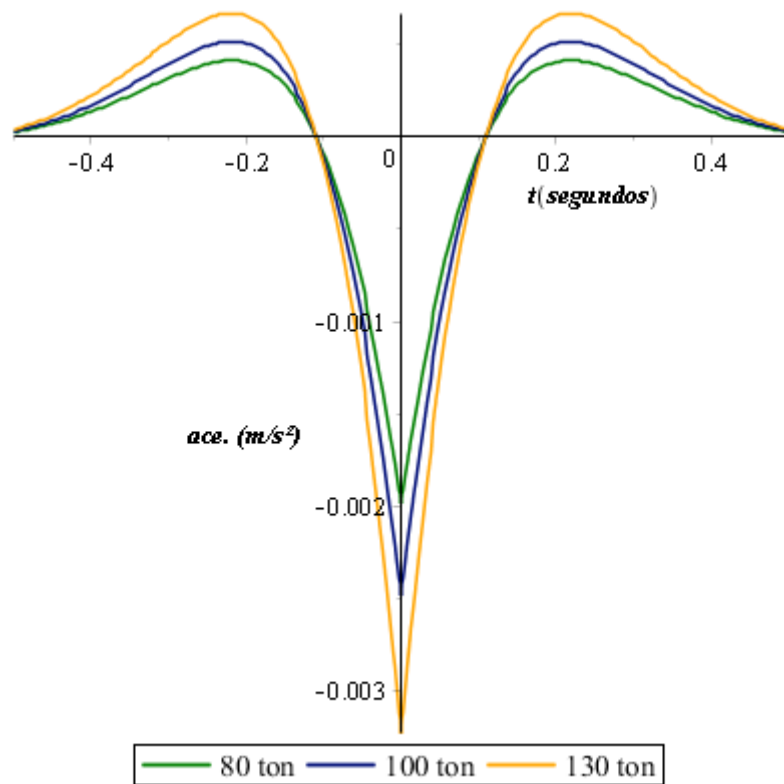
Valores de vibração de aceleração acima de 70 dB, é a faixa limite em que começa a ser percebida pelo ser humano, acima de 85 dB, a vibração causa desconforto de se manter em pé e vários objetos suspensos e apoiados são deslocados, a partir de 100 dB, a aceleração já pode causar danos as estruturas e edificações, tais como o aparecimento de trincas e fissuras na fachada ou em ambientes internos, até o colapso progressivo da edificação caso a vibração atinja valores próximos da frequência natural da estrutura. Se o nível de aceleração chegar a 115 dB pode ocorrer um colapso parcial em estruturas bem projetadas e executadas.

4.3.1 Aceleração - Eixo Z

Para todos os tipos de solos, foram analisadas três situações de peso, uma com a carga de vagão de 80 toneladas, uma com a carga de 100 toneladas e outra com 130 toneladas, e duas situações de trilho uma com o trilho TR-57 e outra com UIC-60. Para cada parâmetro variado um gráfico tempo por aceleração é traçado, sendo o máximo valor obtido pela análise convertido para seu respectivo valor em decibéis pela Equação (21), para que possa ser feita a

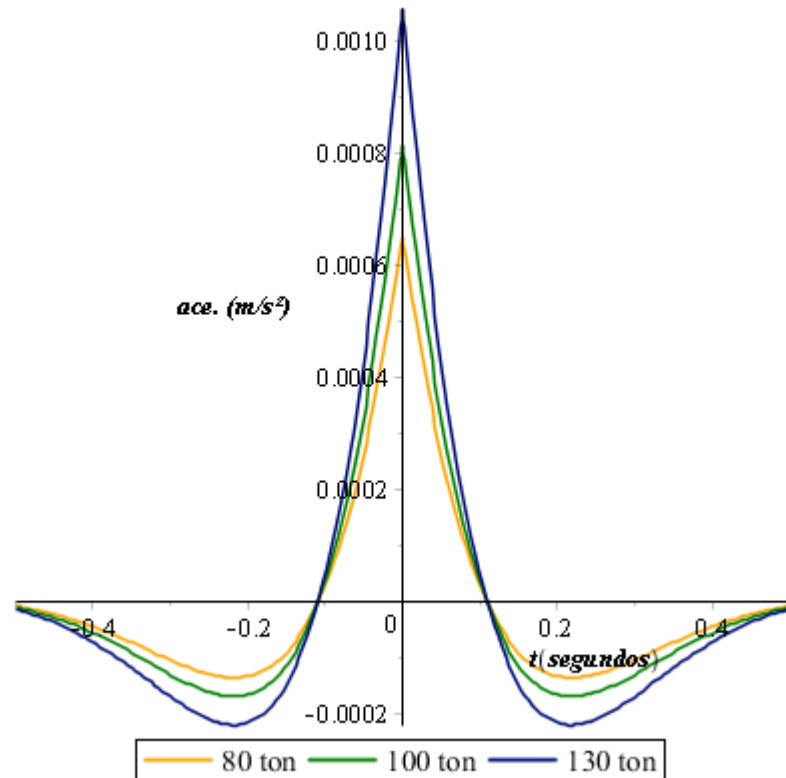
avaliação da tendência do nível aceleração em relação a distância da pista, carga do trem, tipo de trilho e tipo de solo. Abaixo está o exemplo da curva tempo aceleração analisada para uma distância de 20 metros da pista na argila 1 para um trem com 20 Km/h com trilho TR-57.

Figura 30. Aceleração eixo Z (m/s^2) vs. tempo (s) para a argila 1. ($V_t = 20$ Km/h, TR-57, 20 metros da pista)



Fonte: Autor

Figura 31. Aceleração Eixo Y (m/s^2) vs. Tempo (s) para a argila 1. ($V_t = 20$ Km/h, TR-57, 20 metros da pista)

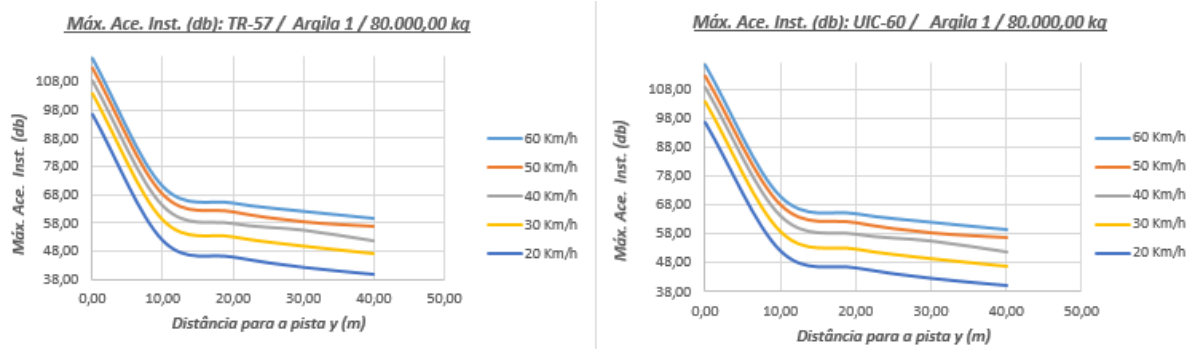


Fonte: Autor

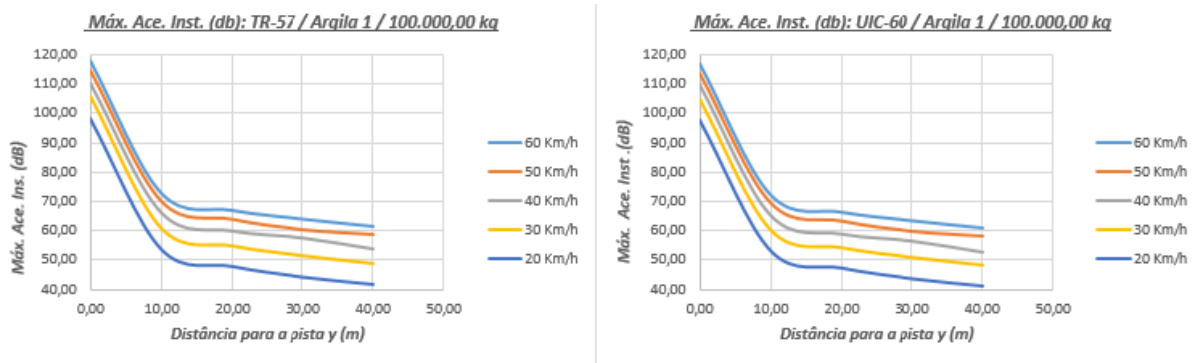
Para a argila 1, considerando a primeira situação, para todas as velocidades de trem analisadas, observa-se que para distâncias inferiores a cinco metros, o nível de aceleração é superior a 75 dB que é o valor limite em que é passível de ser percebida; podendo chegar a 114 dB ao lado da pista. Já para a segunda situação, cuja carga de vagão é maior, para a maioria das velocidades de trem analisadas, observa-se que numa faixa de até 10 metros da pista, a maioria das acelerações de vibração são superiores a 70 dB, sendo que a maioria é superior a 80 dB, podendo chegar a próximo de 120 dB exatamente ao lado da pista. Para a terceira situação com o valor da carga do trem de 130 toneladas, os valores dos níveis de aceleração de vibração são maiores que 124 dB ao lado da pista, e apenas a uma distância superior a 10 metros que o nível de vibração fica menor que 70 dB. Assim para a terceira situação os valores de nível de vibração são em torno de 3 dB maiores que a segunda situação e 5 dB maiores que a primeira. Não foi observado uma diferença significativa entre os dois tipos de trilhos analisados para as três situações.

Figura 32. Aceleração máxima (dB) vs. distância da pista (m) para a argila 1 – Eixo Z

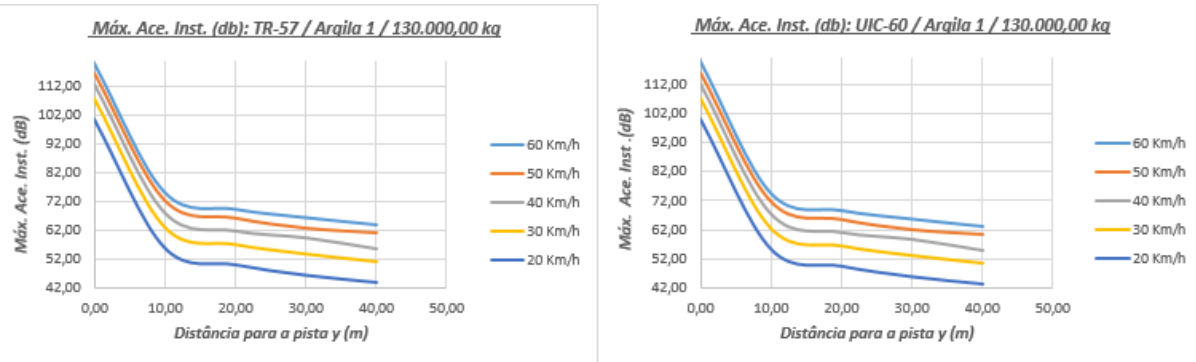
1ª Situação (80 toneladas)



2ª Situação (100 toneladas)



3ª Situação (130 toneladas)



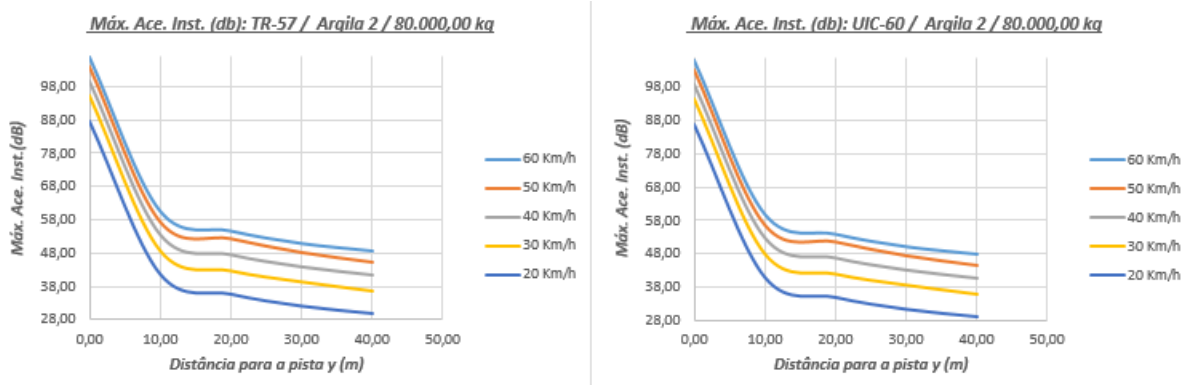
Fonte: Autor

Para a argila 2, considerando a primeira situação, para todas as velocidades de trem analisadas, observa-se apenas ao lado da pista que o nível de aceleração é superior a 75 dB que é o valor limite em que é passível de ser percebida; podendo chegar a 102 dB ao máximo. Já para a segunda situação, cuja carga de vagão é maior, o nível de aceleração pode chegar a próximo de 107 dB exatamente ao lado da pista, decaindo rapidamente a medida que se afasta da pista sendo além de 10 m todos os valores de nível de aceleração são menores que 60 dB.

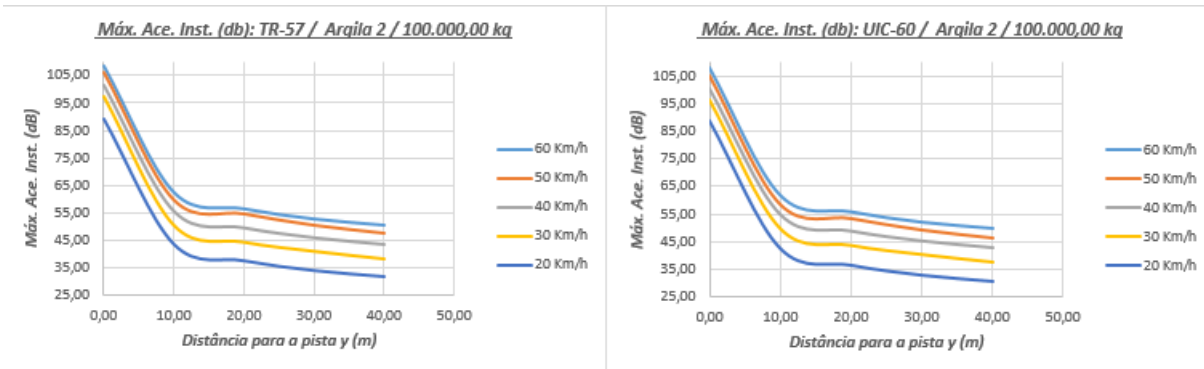
Para a terceira situação com o valor da carga do trem de 130 toneladas, os valores dos níveis de aceleração de vibração são maiores que 112 dB ao lado da pista, e apenas a uma distância superior a 10 metros que o nível de vibração fica menor que 62 dB, sendo o nível de aceleração considerado seguro para uso humano e estrutural. Assim para a terceira situação os valores de nível de vibração são em torno de 3 dB maiores que a segunda situação e 5 dB maiores que a primeira. Para as três situações analisadas tem-se valores menores que a análise da argila 1. Não foi observado uma diferença entre os dois tipos de trilhos analisados.

Figura 33. Aceleração máxima (dB) vs. distância da pista (m) para a argila 2 – Eixo Z

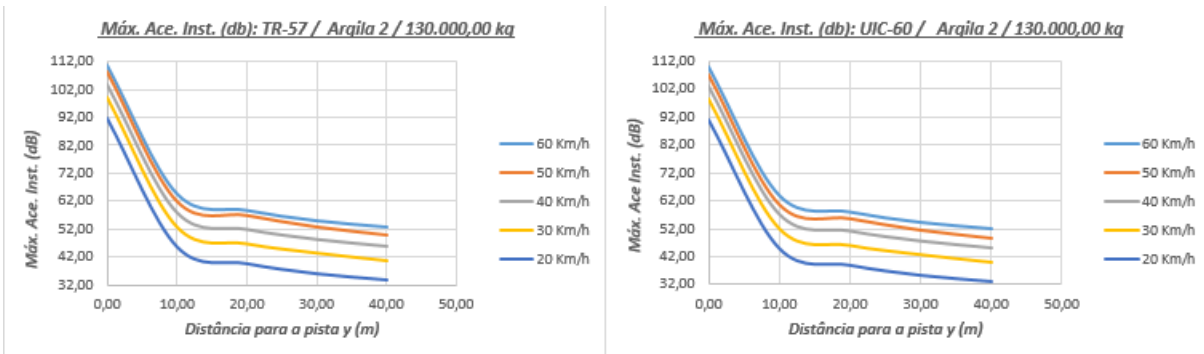
1ª Situação (80 toneladas)



2ª Situação (100 toneladas)



3ª Situação (130 toneladas)



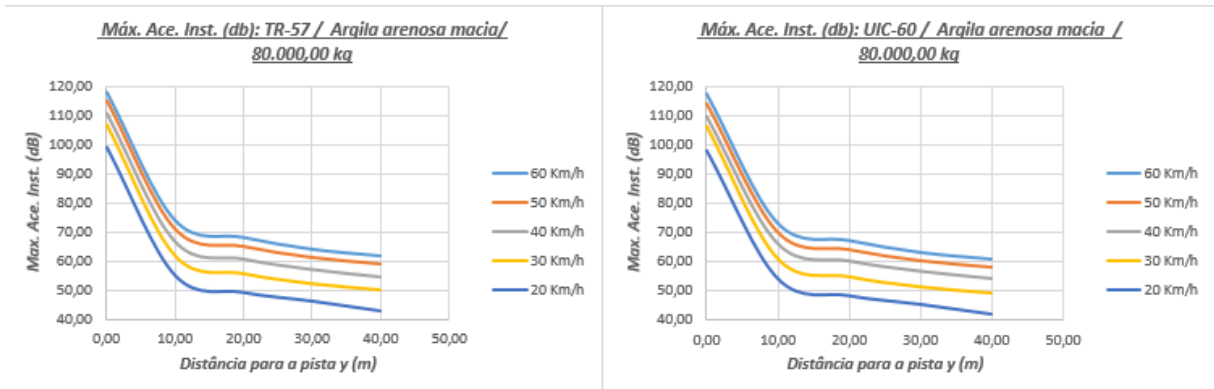
Fonte: Autor

Para a argila arenosa macia, considerando a primeira situação, para todas as velocidades de trem analisadas, observa-se que para distâncias menores a cinco metros, o nível de aceleração é superior a 75 dB que é o valor limite em que é passível de ser percebida; podendo chegar a 117 dB ao lado da pista. Já para a segunda situação com 100 toneladas, cuja carga de vagão é maior, para a maioria das velocidades de trem analisadas, observa-se que numa faixa de até 10 metros da pista, a maioria das acelerações de vibração são superiores a 75 dB,

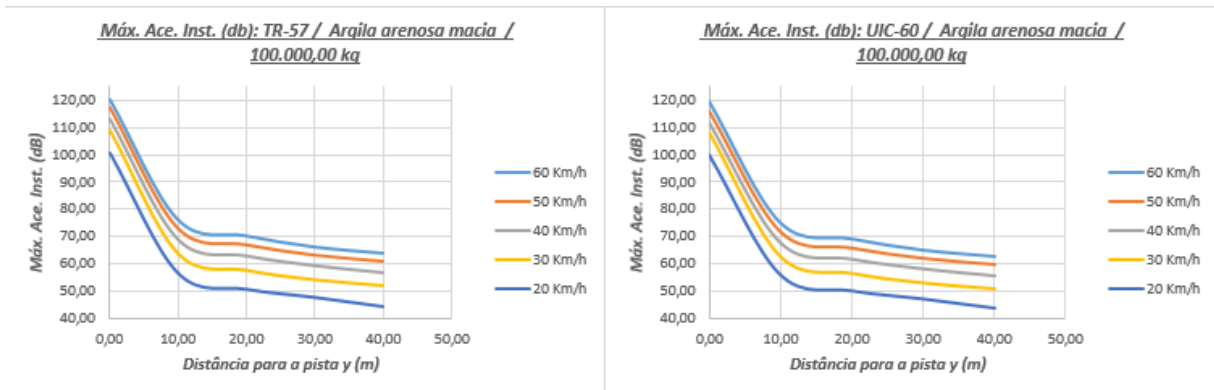
chegando no máximo a 120 dB exatamente ao lado da pista. Para a terceira situação com o valor da carga do trem maior que da primeira e segunda situação, os valores dos níveis de aceleração de vibração são próximos de 125 dB ao lado da pista, e apenas a uma distância superior a 10 metros que o nível de vibração fica menor que 75 dB. Assim para a terceira situação os valores de nível de vibração são em torno de 3 dB maiores que a segunda situação e 5 dB maiores que a primeira, A argila arenosa macia tem características semelhantes às características da análise da argila 1. Não foi observado uma diferença significativa entre os dois tipos de trilhos analisados para as três situações.

Figura 34. Aceleração máxima (dB) vs. distância da pista (m) para a argila arenosa macia – Eixo Z

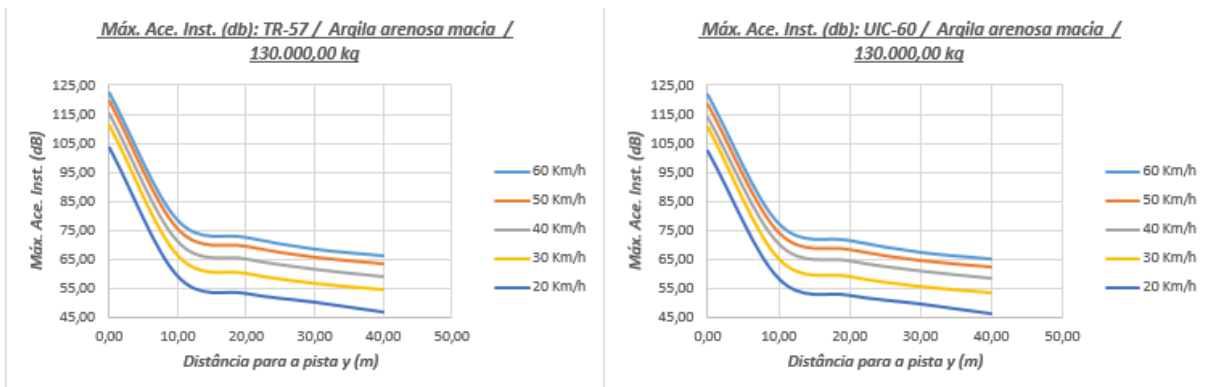
1ª Situação (80 toneladas)



2ª Situação (100 toneladas)



3ª Situação (130 toneladas)



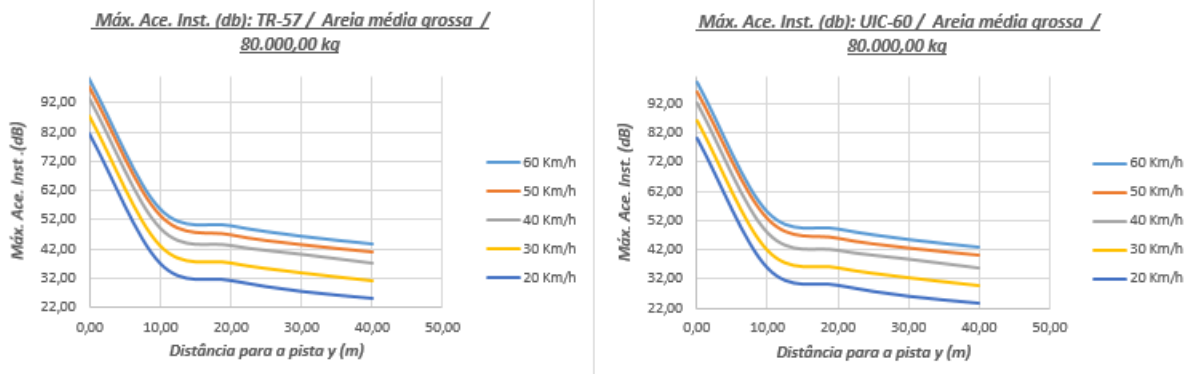
Fonte: Autor

Para a areia media grossa, considerando a primeira situação, para todas as velocidades de trem analisadas, observa-se que apenas ao lado da pista, o nível de aceleração é superior a 75 dB que é o valor limite em que é passível de ser percebida; podendo chegar no máximo a 95 dB. Já para a segunda situação, cuja carga de vagão é maior, para a maioria das velocidades de trem analisadas, observa-se que numa faixa de até 2,5 metros da pista, todas as

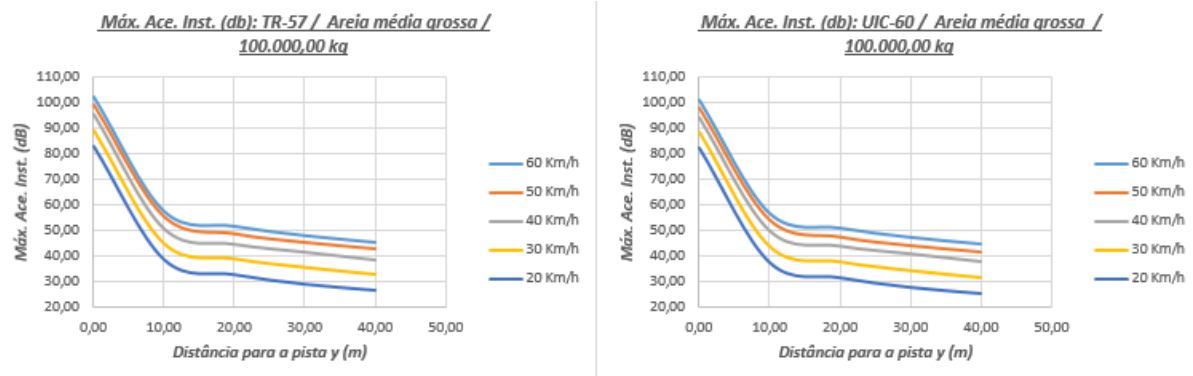
acelerações de vibração são superiores a 75 dB, podendo chegar a próximo de 100 dB exatamente ao lado da pista. Para a terceira situação com o valor da carga do trem de 130 toneladas, os valores dos níveis de aceleração de vibração são próximos de 105 dB ao lado da pista, e apenas a uma distância superior a 10 metros que o nível de vibração fica menor que 55 dB. Assim para a terceira situação os valores de nível de vibração são em torno de 3 dB maiores que a segunda situação e 5 dB maiores que a primeira, A areia média grossa foi o material com valores de nível de vibração mais conservadores, ou seja, menores de toda a análise para o eixo Z. Não foi observado uma diferença significativa entre os dois tipos de trilhos analisados para as três situações.

Figura 35. Aceleração máxima (dB) vs. distância da pista (m) para a areia média grossa – Eixo Z

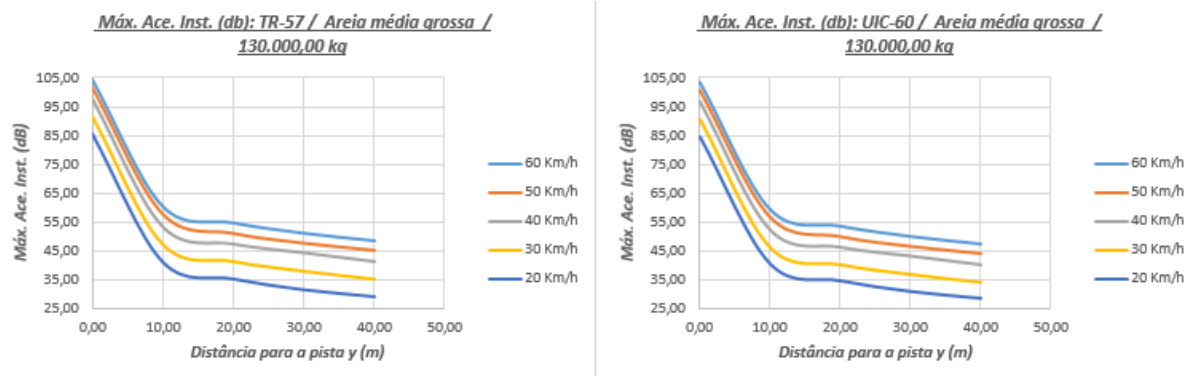
1ª Situação (80 toneladas)



2ª Situação (100 toneladas)



3ª Situação (130 toneladas)

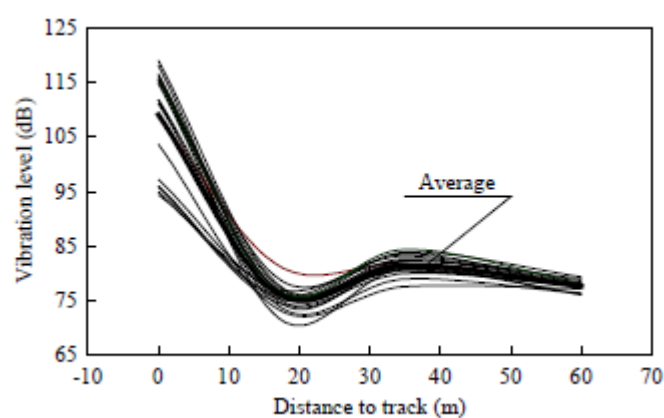


Fonte: Autor

Para todos os solos da análise do nível de aceleração do eixo z é observado uma queda brusca nos níveis de aceleração nos primeiros quinze metros da pista ferroviária, seguindo além desse valor de distância, o decaimento se torna mais suavizado e menos brusco. A mesma observação quanto ao formato topológico da curva aceleração máxima por distância da pista é feita no trabalho desenvolvido Xia *et al.* (2005) que através de experimentos in loco, em duas regiões na China, uma em campo aberto e outra numa região urbanizada com

edificações nas proximidades de linhas ferroviárias, como esta descrito na figura 37. Para os experimentos de Xia, foram usados trens com uma locomotiva de 23 toneladas por eixo e vagões de 20 toneladas por eixo. Foram usados para a obtenção dos dados acelerômetros e amplificadores, instalados em locais específicos e estratégicos para cada situação. Os resultados do trabalho de Xia (2005), mostraram que os níveis de vibração do solo e dos pavimentos das edificações aumentam com a velocidade do trem, enquanto é atenuado com a distância das linhas ferroviárias. Ou seja, foi possível constatar que tanto a velocidade do trem quanto a distância da pista ferroviária, têm uma relação direta e inversa, respectivamente, com os níveis de vibrações provocados pelo meio em que estas ondas se propagam. Um importante efeito observado no estudo foi o aparecimento da zona de amplificação, que é uma região em que os efeitos vibracionais são relativamente elevados quando se está a uma certa distância da fonte de vibração. Tal fenômeno foi observado para diferentes velocidades, cargas e frequências de veículos ferroviários, sendo constatado tanto para a situação em que a vibração se propaga em campo aberto como para a situação em que se propaga em locais com edificações.

Figura 36. Vibração do solo (eixo Z) versus distância da linha do trem



Fonte: Xia *et al.* (2005)

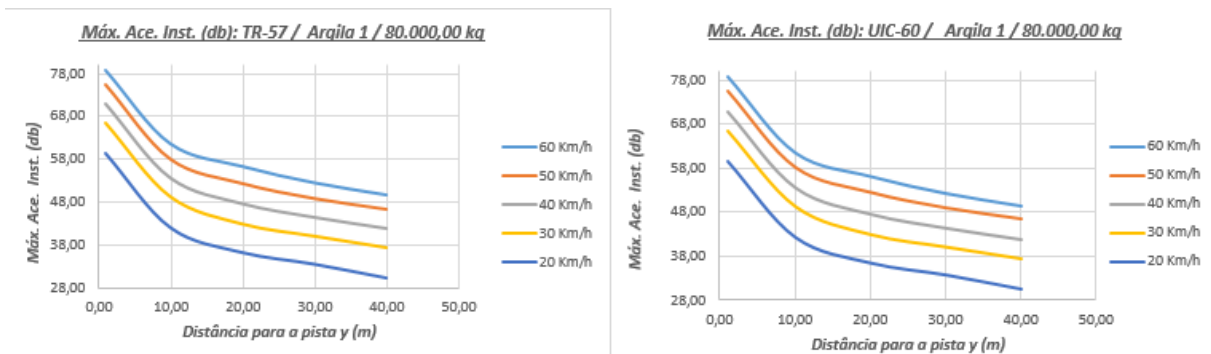
4.3.2 Aceleração - Eixo Y

Para a aceleração do Eixo Y foram analisadas as mesmas variáveis da análise do Eixo Z, ou seja, uma com a carga de vagão de 80 toneladas, uma com a carga de 100 toneladas e outra com 130 toneladas, duas situações de trilho uma com o trilho TR-57 e outra com UIC-60, para uma faixa de solo de 1 a 40 metros da pista. Para a argila 1, considerando a primeira situação, para todas as velocidades de trem analisadas e para praticamente todas as distâncias até a pista, observa-se que, nível de aceleração é inferior a 75 dB que é o valor limite em que é passível de ser percebida; podendo chegar a 78 dB apenas diretamente ao lado da pista. Já para

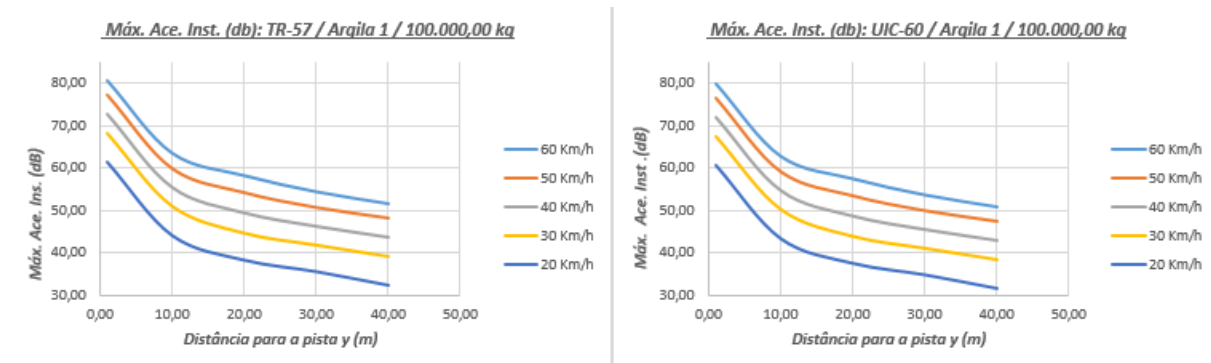
a segunda situação, cuja carga de vagão é maior, para a maioria das velocidades de trem analisadas, observa-se que apenas a menos de 2 metros da pista o nível de aceleração de vibração é superior a 75 dB para velocidades de trem superiores a 40 Km/h, podendo chegar a 80 dB no máximo. Para a terceira situação com o valor da carga do trem de 130 toneladas, os valores dos níveis de aceleração de vibração são maiores que 75 dB a menos de 5 metros da pista para velocidades de trem superiores a 40 Km/h, e a uma distância superior a 15 metros que o nível de vibração fica menor que 62 dB. Assim para a terceira situação os valores de nível de vibração são em torno de 3 dB maiores que a segunda situação e 5 dB maiores que a primeira. Não foi observado uma diferença significativa entre os dois tipos de trilhos analisados para as três situações. O nível de aceleração para a análise do Eixo Y são menores que para o eixo Z. E tem um decaimento suave, em toda as distâncias analisadas, principalmente a distâncias superiores a 15 metros.

Figura 37. Aceleração máxima (dB) vs. distância da pista (m) para a argila 1 – Eixo Y

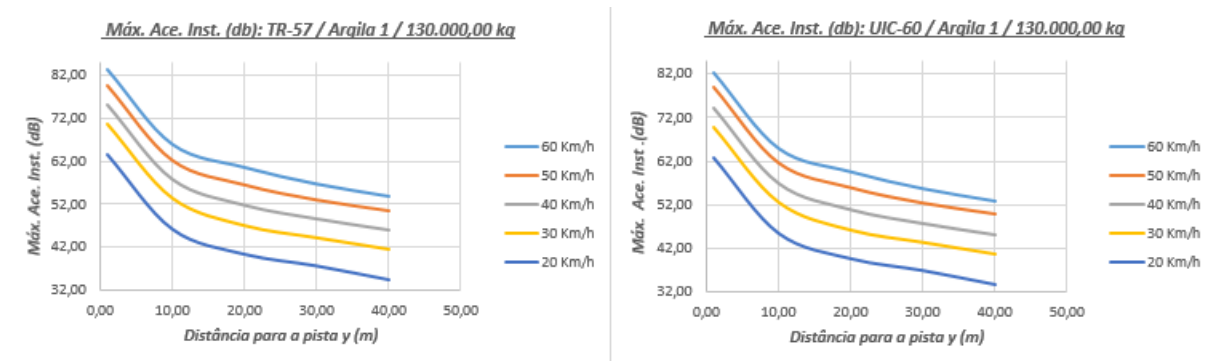
1ª Situação (80 toneladas)



2ª Situação (100 toneladas)



3ª Situação (130 toneladas)



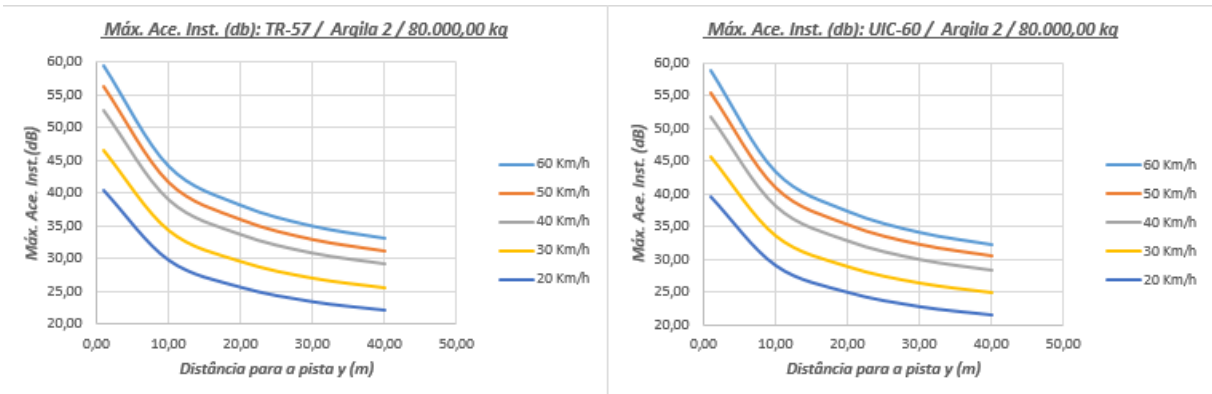
Fonte: Autor

Para a argila 2, considerando a primeira situação, para todas as velocidades de trem analisadas, para todas as distâncias da pista analisadas o nível de aceleração é inferior a 75 dB que é o valor limite de percepção, podendo chegar no máximo a 58 dB ao máximo. Já para a segunda situação, cuja carga de vagão é maior, o nível de aceleração pode chegar a próximo de 60 dB exatamente ao lado da pista, decaindo suavemente a medida que se afasta da pista, para além de 10 m todos os valores de nível de aceleração são menores que 45 dB. Para a terceira

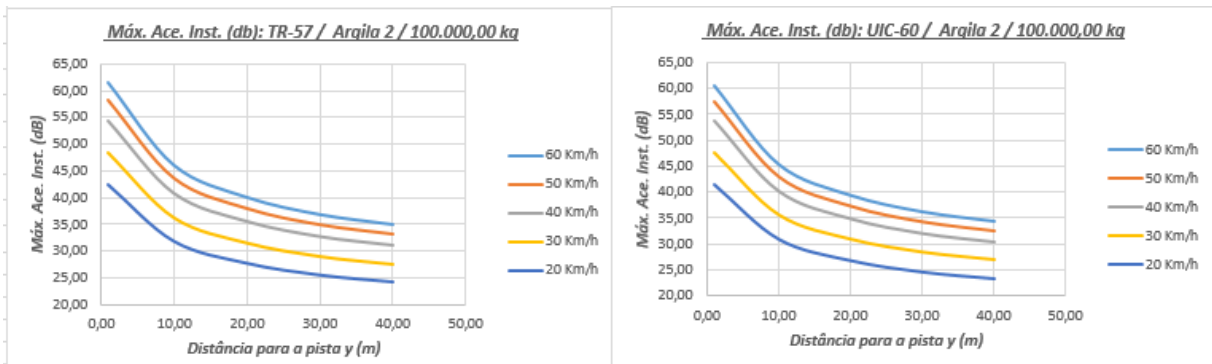
situação com o valor da carga do trem de 130 toneladas, os valores dos níveis de aceleração de vibração para todas as velocidades e distância da pista ficam sempre são menores que 75 dB, e a uma distância superior a 10 metros que o nível de vibração fica menor que 50 dB. Assim para a terceira situação os valores de nível de vibração são em torno de 3 dB maiores que a segunda situação e 5 dB maiores que a primeira. Logo para a argila 2 considerando a aceleração no eixo Y, todos os valores de nível de vibração estão abaixo do limite considerado seguro para uso humano e estrutural. Para as três situações analisadas tem-se valores mais conservadores e menores que a argila 1. Não foi observado uma diferença significativa entre os dois tipos de trilhos analisados para as três situações. É observado também que os valores de níveis de aceleração no eixo Y são consideravelmente inferiores aos níveis medidos no eixo Z para as mesmas situações.

Figura 38. Aceleração máxima (dB) vs. distância da pista (m) para a argila 2 – Eixo Y

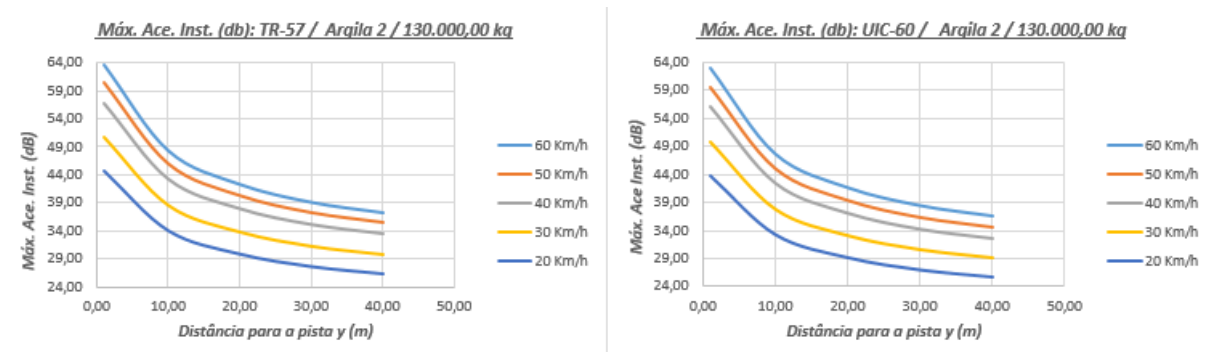
1ª Situação (80 toneladas)



2ª Situação (100 toneladas)



3ª Situação (130 toneladas)



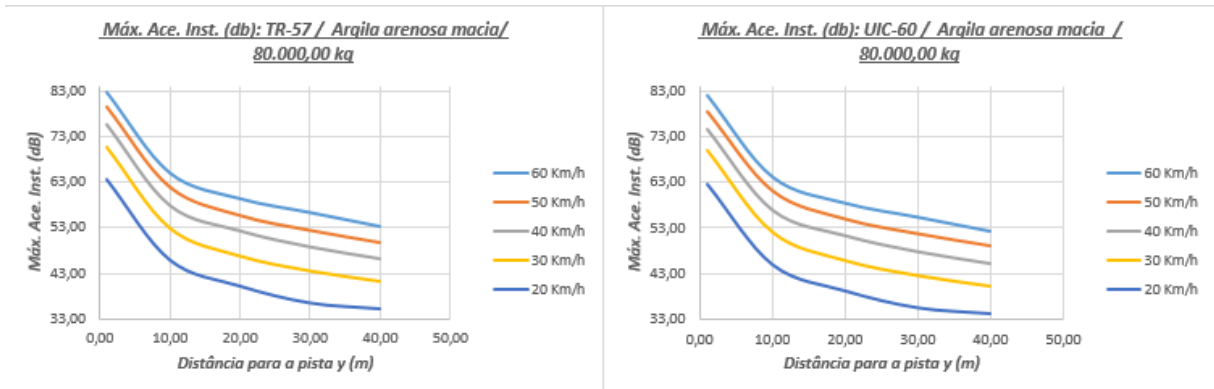
Fonte: Autor

Para a argila arenosa macia, considerando a primeira situação, para todas as velocidades de trem analisadas, observa-se que apenas para distâncias menores a três metros da pista, para velocidades de trem superiores a 40 Km/h, o nível de aceleração é superior a 75 dB que é o valor limite em que é passível de ser percebida; podendo chegar no máximo a 82 dB. Já para a segunda situação, cuja carga de vagão é maior, o nível máximo de aceleração é de 84 dB, observa-se que numa faixa de até 10 metros da pista, todas as acelerações de vibração são

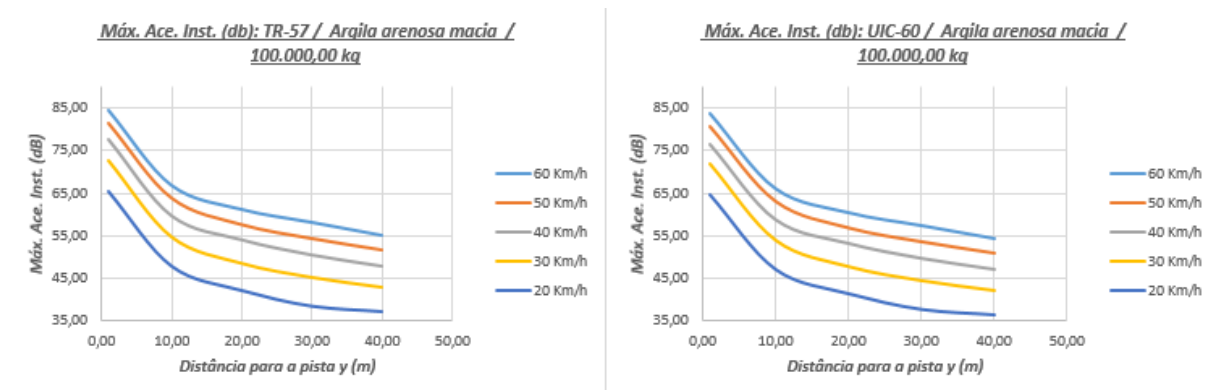
inferiores a 65 dB. Para a terceira situação com o valor da carga do trem de 130 toneladas, os valores dos níveis de aceleração de vibração são maiores a 85 dB ao lado da pista, e apenas a uma distância superior a 10 metros que o nível de vibração fica menor que 70 dB para todas as velocidades de trem analisadas. Assim para a terceira situação os valores de nível de vibração são em torno de 3 dB maiores que a segunda situação e 5 dB maiores que a primeira. A argila arenosa macia assim como argila 1 tem o seu decaimento do nível de aceleração no eixo Y mais suave (menos expressivo) do que o decaimento da aceleração no eixo Z, principalmente para a faixa dos primeiros 15 metros, para os mesmos solos com as mesmas situações de análise. Não foi observado uma diferença significativa entre os dois tipos de trilhos analisados para as três situações.

Figura 39. Aceleração máxima (dB) vs. distância da pista (m) para a argila arenosa macia – Eixo Y

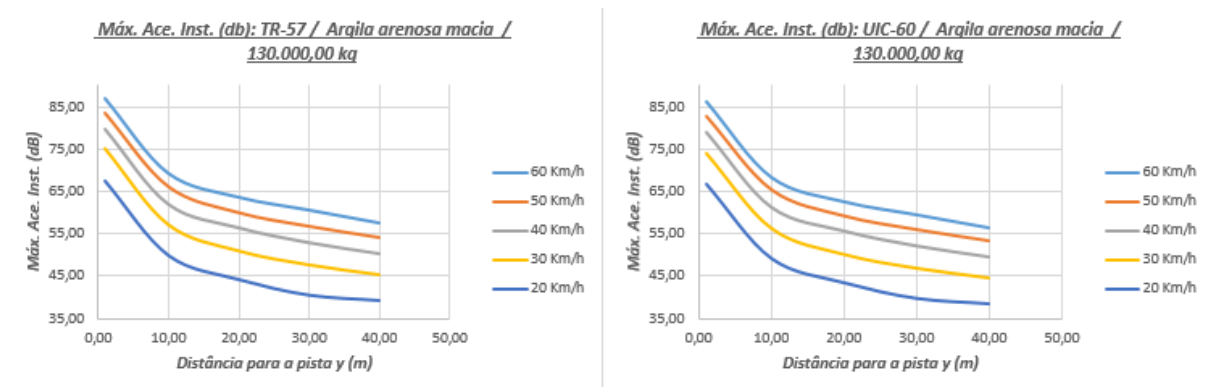
1ª Situação (80 toneladas)



2ª Situação (100 toneladas)



3ª Situação (130 toneladas)



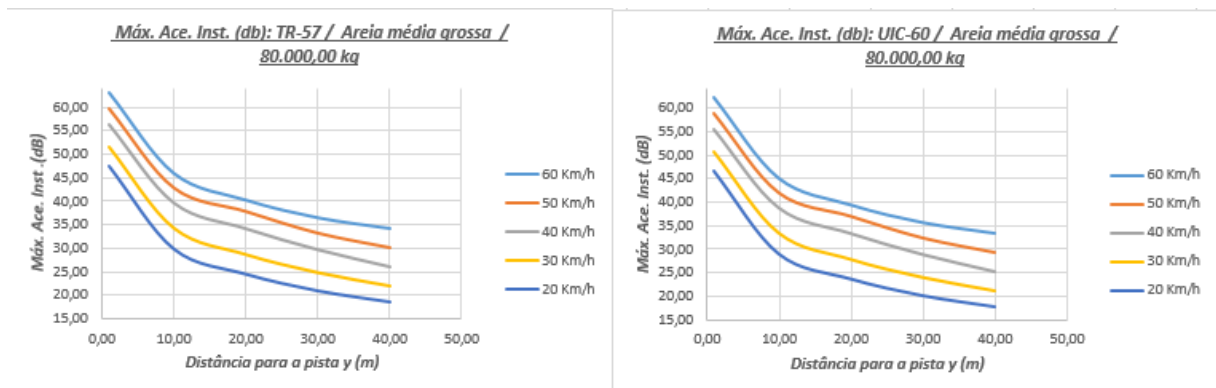
Fonte: Autor

Para a areia media grossa, considerando a primeira situação, para todas as velocidades de trem analisadas, observa-se que para todas as distâncias da pista analisadas, o nível de aceleração é inferior a 75 dB que é o valor limite em que é passível de ser percebida; podendo chegar no máximo a 63 dB. Já para a segunda situação, cuja carga de vagão é maior, para todas as velocidades de trem analisadas e todas as distâncias analisadas o máximo valor

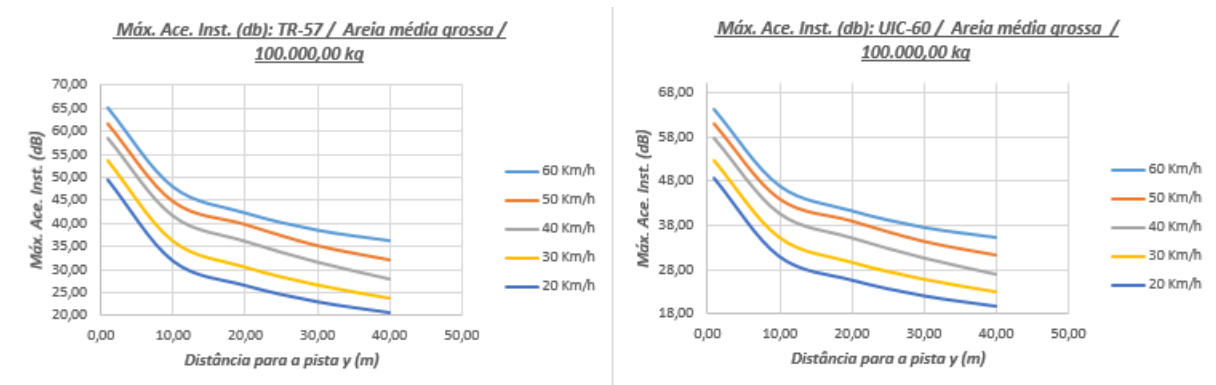
atingido é de 65 dB decaindo rapidamente a medida que se distância da pista, chegando a valores menores que 35 dB a 40 metros da pista, que não são perceptivos. Para a terceira situação com o valor da carga do trem de 130 toneladas, os valores dos níveis de aceleração de vibração chegam no máximo a 67 dB ao lado da pista, e a uma distância superior a 10 metros que o nível de vibração fica menor que 50 dB. Assim para a terceira situação os valores de nível de vibração são em torno de 3 dB maiores que a segunda situação e 5 dB maiores que a primeira. Assim como a análise do eixo Z, a areia média grossa foi o material com valores de nível de vibração mais baixos da análise do eixo Y. Não foi observado uma diferença significativa entre os dois tipos de trilhos. É observado para a areia média grossa assim para como os outros solos, que os valores de níveis de aceleração no eixo Y são consideravelmente inferiores aos níveis medidos no eixo Z para as mesmas situações.

Figura 40. Aceleração máxima (dB) vs. distância da pista (m) para a areia média grossa – Eixo Y

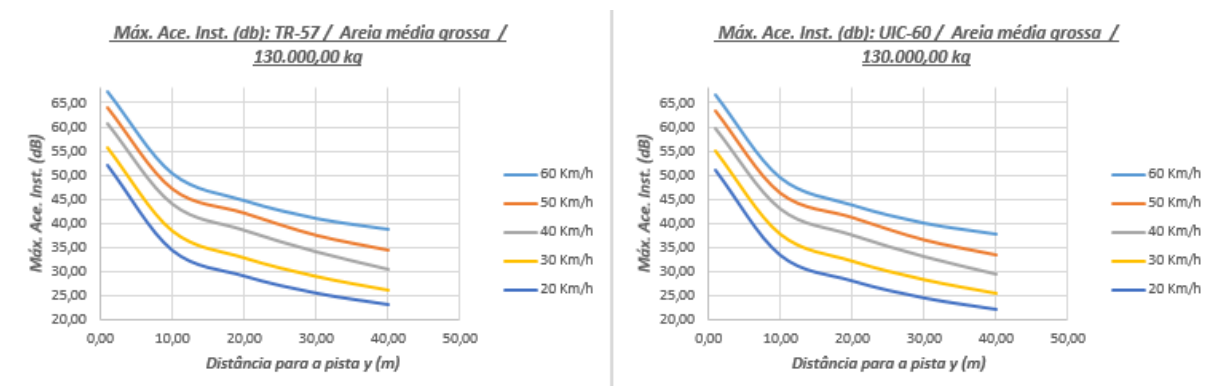
1ª Situação (80 toneladas)



2ª Situação (100 toneladas)



3ª Situação (130 toneladas)



Fonte: Autor

São identificadas três zonas distintas em relação a velocidade e aceleração no eixo z. A primeira, para todas as situações, fica compreendida entre a pista ferroviária até quinze metros, obtendo-se o máximo valor de vibração que fica sempre ao lado da pista, além de um rápido e expressivo decaimento dos valores de vibração, à medida que se afasta da pista; a segunda é a zona de amplificação e a terceira está compreendida entre quinze até quarenta

metros da pista, tem-se um decaimento bem lento e pouco expressivo em comparação com a primeira zona, a vibração diminui a uma taxa pequena, sendo essa parte do gráfico quase paralela ao eixo das abcissas. Essas zonas são observadas para todos os tipos de solo, carga, velocidade de trem e trilho, sendo que essas mesmas características e padrões no gráfico foram também observadas no trabalho experimental desenvolvido por Xia *et al.* (2005).

Para os gráficos da velocidade e aceleração no eixo y, são observadas apenas duas zonas distintas, a primeira é localizada entre a pista ferroviária até quinze metros da mesma, cujo valor máximo de vibração é alcançado e está localizada ao lado da pista, é observado um moderado decaimento dos valores de vibração, decaimento esse que embora tenha certa inclinação é menos expressivo do que a observada no eixo z, a medida que se afasta da pista, na segunda zona que está compreendida de quinze metros até quarenta metros da pista (que é a máxima distância do estudo em questão), tem-se um decaimento mais lento e suave em comparação com a primeira zona para o eixo y, porém é mais inclinada e decai um pouco mais rápido do que a mesma zona para o eixo z.

Podemos observa analisando detalhadamente todos os gráficos, que para o caso para a velocidade de vibração, os valores no eixo z são 35 a 50 % maiores que no eixo y, e para a aceleração, o eixo z fica maior que o y em valores entre 40% a 50%.

É percebido tanto para o eixo z quanto para o eixo y que as equações analíticas usadas no presente trabalho são mais sensíveis a velocidade do trem quando se analisa a aceleração do solo do que quando se analisa a velocidade solo. Na perspectiva da aceleração de vibração do solo, quando maior a velocidade do veículo ferroviário maior o aumento e a elevação da curva da máxima aceleração do solo em relação ao distanciamento da pista (os gráficos da aceleração se afastam mais entre-se quando se varia a velocidade do trem), quando comparada com a mesma análise feita para a máxima velocidade do solo. Tal constatação foi feita para todos os tipos de solos analisados para qualquer eixo de orientação.

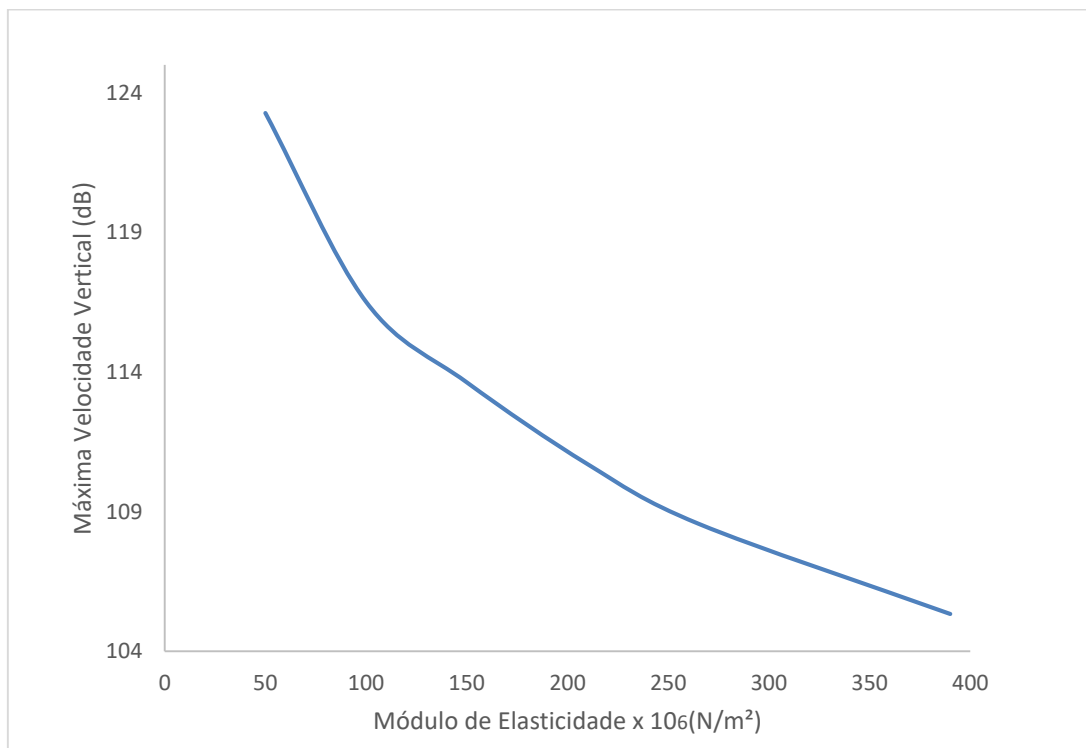
4.4 Variação dos parâmetros geotécnicos

Nesse tópico é analisado a influência de parâmetros geotécnicos no impacto da velocidade e aceleração de vibração. Foi feita a análise considerando uma carga de vagão de 100 toneladas, o trilho usado para a análise será o TR-57 e o ponto escolhido para a reprodução

dos resultados é 10 cm abaixo da linha ferroviária. Avalia-se a influência na propagação da vibração no interior do solo em questão, com a variação do módulo de elasticidade para as velocidades de trem de 20, 40 e 60 Km/h.

Na Figura 41 é analisado a influência do módulo de elasticidade do solo na máxima velocidade vertical atingida no eixo Z. Os parâmetros de velocidade do trem, carga do vagão, tipo de trilho, densidade do solo e coeficiente de Poisson são fixos e valem respectivamente 20 Km/h, 100 toneladas, TR-57, 2000 Kg/m³ e 0,25. Nesse caso, foi mantido todos os parâmetros anteriores constantes, variando-se o módulo de elasticidade e, para cada valor, é traçado uma curva que relaciona a velocidade em metros por segundo e o tempo. O máximo valor absoluto atingido é extraído da curva e convertido para decibéis pela Equação (19). É observado que com o aumento do valor do módulo de elasticidade o solo vai se tornando mais rígido e menos susceptível a transferência de vibrações. Assim os máximos valores de velocidade de vibração vão diminuindo. É observado também que na primeira faixa que de 50×10^6 N/m² até 150×10^6 N/m² a queda no valor da velocidade vertical é bastante expressiva, decaindo em mais de 9 decibéis, a parti desse ponto o decaimento no valor da velocidade vertical é menor, chegando ao valor mínimo de 105,34 dB, para um valor de 390×10^6 N/m².

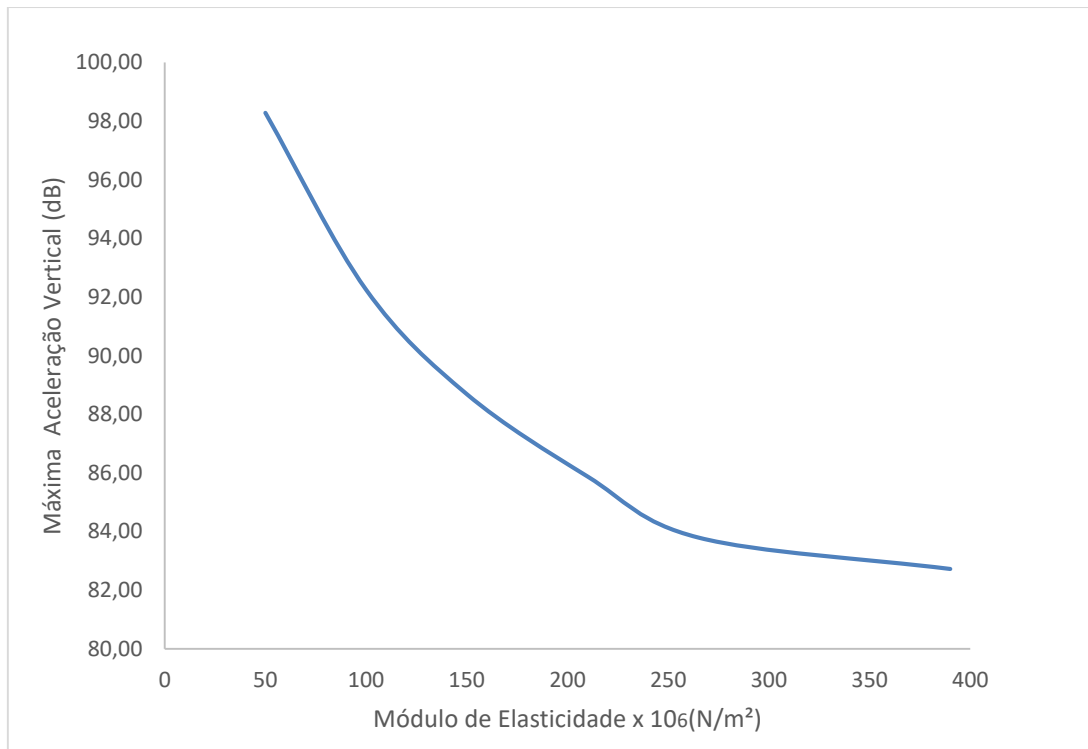
Figura 41. Velocidade máxima eixo Z (dB) vs. Módulo de Elasticidade ($\times 10^6$ N/m²) ($V_t = 20$ Km/h, 100 ton, TR-57, $\rho=2000$ kg/m³, $\nu=0,25$, ponto de medição a 10 cm abaixo da pista ferroviária.)



Fonte: Autor

Na Figura2 é analisado a influência do módulo de elasticidade do solo na máxima aceleração vertical no eixo z. Os parâmetros de velocidade do trem, carga do vagão, tipo de trilho, densidade do solo e coeficiente de Poisson são fixos e valem respectivamente 20 Km/h, 100 toneladas, TR-57, 2000 Kg/m³ e 0,25. Da mesma forma que o anterior, foi mantido todos os parâmetros citados constantes e variando o módulo de elasticidade. Os valores de aceleração são extraídos em metros por segundo ao quadrado e o tempo. O máximo valor absoluto atingido na curva é obtido e convertido para decibéis pela Equação (20). É observado que com o aumento do valor do módulo de elasticidade o solo vai se tornando mais resistente ao trânsito de vibrações. Assim os máximos valores de aceleração vibração vão diminuindo. Além disso, observa-se que na primeira faixa que de 50×10^6 N/m² até 150×10^6 N/m² a queda no valor da aceleração vertical é bastante expressiva, caindo em mais de 10 decibéis, a partir desse ponto o decaimento no valor da aceleração vertical é atenuado, chegando ao valor mínimo de 83,57 dB, para um valor de módulo de elasticidade de 390×10^6 N/m². Com a análise das duas figuras que representam a velocidade e aceleração, respectivamente, é possível perceber que a aceleração de vibração tem a sensibilidade parecida com a sensibilidade da velocidade de vibração, quando o módulo de elasticidade aumenta. Observa-se também que o parâmetro da aceleração tem o decaimento reduzido na faixa de valor acima de 200×10^6 N/m².

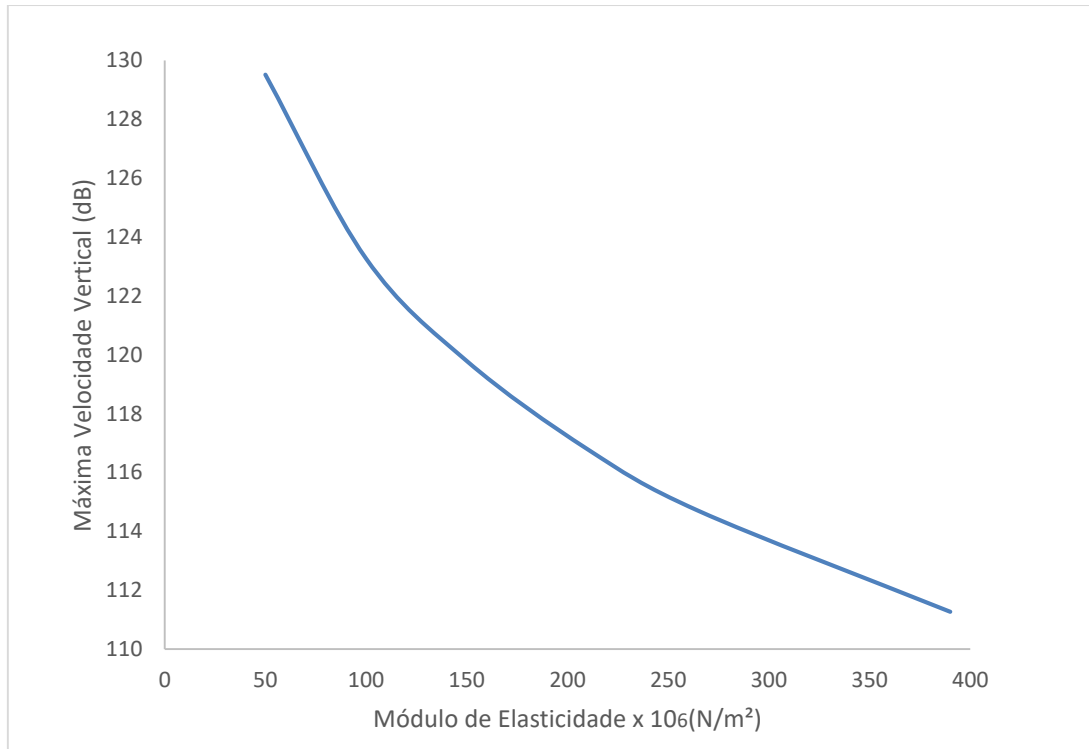
Figura 42. Aceleração máxima eixo Z (dB) vs. Módulo de Elasticidade ($\times 10^6$ N/m²) ($V_t = 20$ Km/h, 100 ton, TR-57, $\rho=2000$ kg/m³, $\nu=0,25$, ponto de medição a 10 cm abaixo da pista ferroviária.)



Fonte: Autor

Na Figura43, a análise é feita para a extração dos dados da velocidade vertical no eixo z. Os parâmetros de velocidade do trem, carga do vagão, tipo de trilho, densidade do solo e coeficiente de Poisson são fixos e valem respectivamente 40 Km/h, 100 toneladas, TR-57, 2000 Kg/m³ e 0,25. Seguindo a mesma metodologia usada nas análises anteriores, também é observado que com o aumento do valor do módulo de elasticidade do solo, as vibrações diminuem. É observado também que na primeira faixa que de 50×10^6 N/m² até 150×10^6 N/m² a queda no valor da velocidade vertical é elevada, a parti desse ponto o decaimento no valor da velocidade vertical sofre uma atenuação, chegando ao valor mínimo de 111,27 dB, para um valor de 390×10^6 N/m².

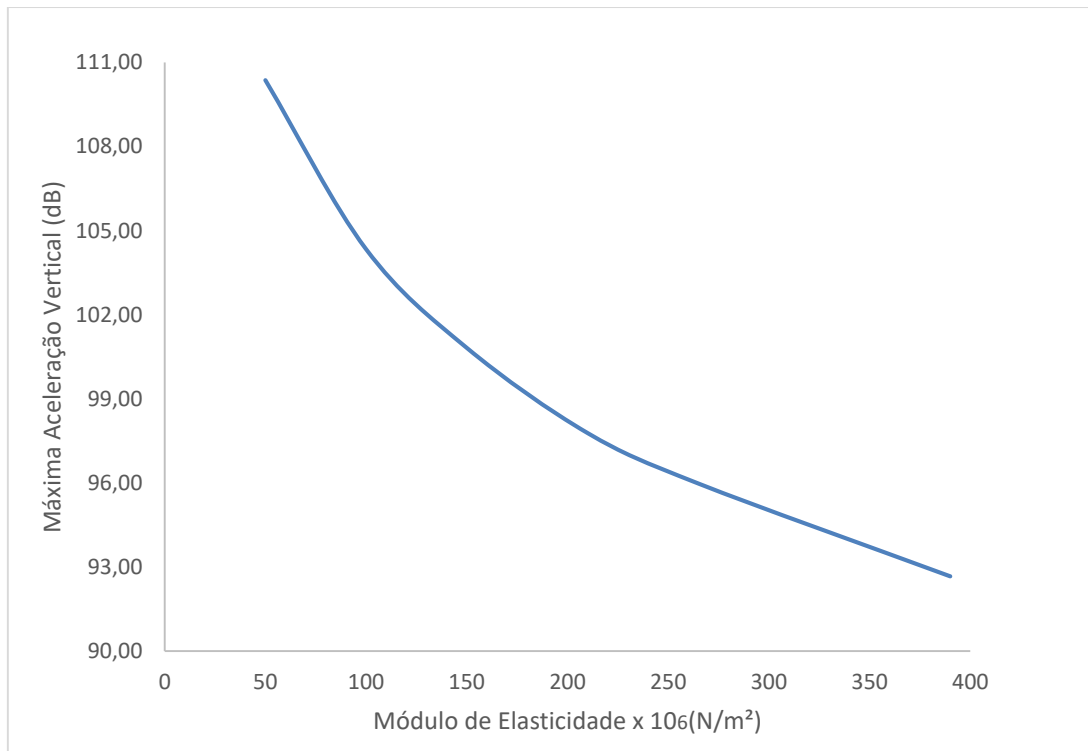
Figura 43. Velocidade máxima eixo Z (dB) vs. Módulo de Elasticidade ($\times 10^6 \text{ N/m}^2$). ($V_t = 40 \text{ Km/h}$, 100 ton, TR-57, $\rho=2000 \text{ kg/m}^3$, $\nu=0,25$, ponto de medição a 10 cm abaixo da pista ferroviária.)



Fonte: Autor

Na Figura44, a análise é feita para a extração dos dados da aceleração vertical no eixo z. Os parâmetros de velocidade do trem, carga do vagão, tipo de trilho, densidade do solo e coeficiente de Poisson são fixos e valem respectivamente 40 Km/h, 100 toneladas, TR-57, 2000 Kg/m³ e 0,25. Verifica-se que com o aumento do valor do módulo de elasticidade o solo vai se tornando mais rígido a transferência de vibrações. Assim os máximos valores de aceleração de vibração vão diminuindo. É observado também que na primeira faixa que de 50 x 10⁶ N/m² até 150 x 10⁶ N/m² a queda no valor da aceleração é bastante expressiva, decaindo em mais de 10 decibéis, a partir desse ponto o decaimento no valor da aceleração vertical é atenuado, chegando ao valor mínimo de 92,67 dB, para um valor de 390 x 10⁶ N/m². O padrão de comportamento da velocidade e aceleração no solo para um trem com 40 Km/h é semelhante ao observado a análise do trem com 20 Km/h, e ambos os parâmetros têm sensibilidade semelhante, ao aumento do módulo de elasticidade, fazendo suas curvas de vibração serem reduzidas.

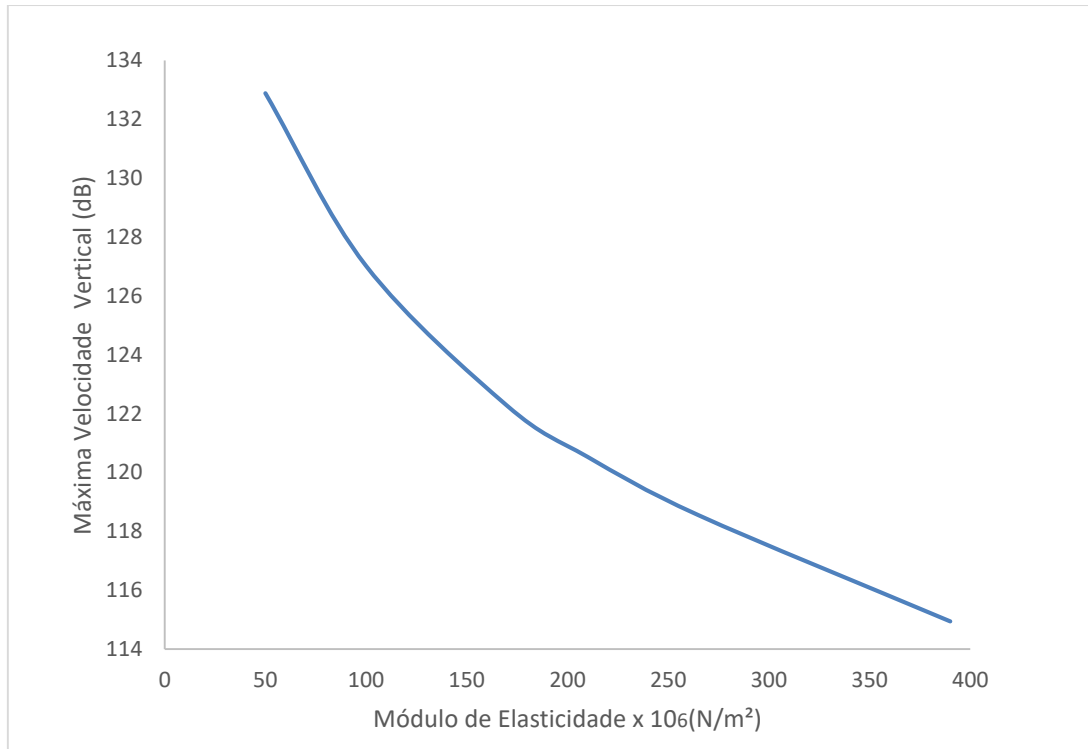
Figura 44. Aceleração máxima eixo Z (dB) vs. Módulo de Elasticidade ($\times 10^6 \text{ N/m}^2$). ($V_t = 40 \text{ Km/h}$, 100 ton, TR-57, $\rho=2000 \text{ kg/m}^3$, $\nu=0,25$, ponto de medição a 10 cm abaixo da pista ferroviária.)



Fonte: Autor

Na Figura 45, é analisado para uma velocidade de trem de 60 Km/h a velocidade vertical no eixo z. Os parâmetros de carga do vagão, tipo de trilho, densidade do solo e coeficiente de Poisson são fixos e valem respectivamente 60 Km/h, 100 toneladas, TR-57, 2000 Kg/m^3 e 0,25. Assim como nas análises anteriores é observado que com o aumento do valor do módulo de elasticidade o solo vai se tornando mais resistente a passagens de vibrações no solo. E, conseqüente, os máximos valores de velocidade de vibração vão reduzindo. É observado também que na primeira faixa que de $50 \times 10^6 \text{ N/m}^2$ até $150 \times 10^6 \text{ N/m}^2$ a queda no valor da velocidade vertical é bastante significativa, decaindo em torno de 9 decibéis, a parti desse ponto o decaimento no valor da velocidade vertical é atenuado, chegando ao valor mínimo de 114,94 dB, para um valor de $390 \times 10^6 \text{ N/m}^2$.

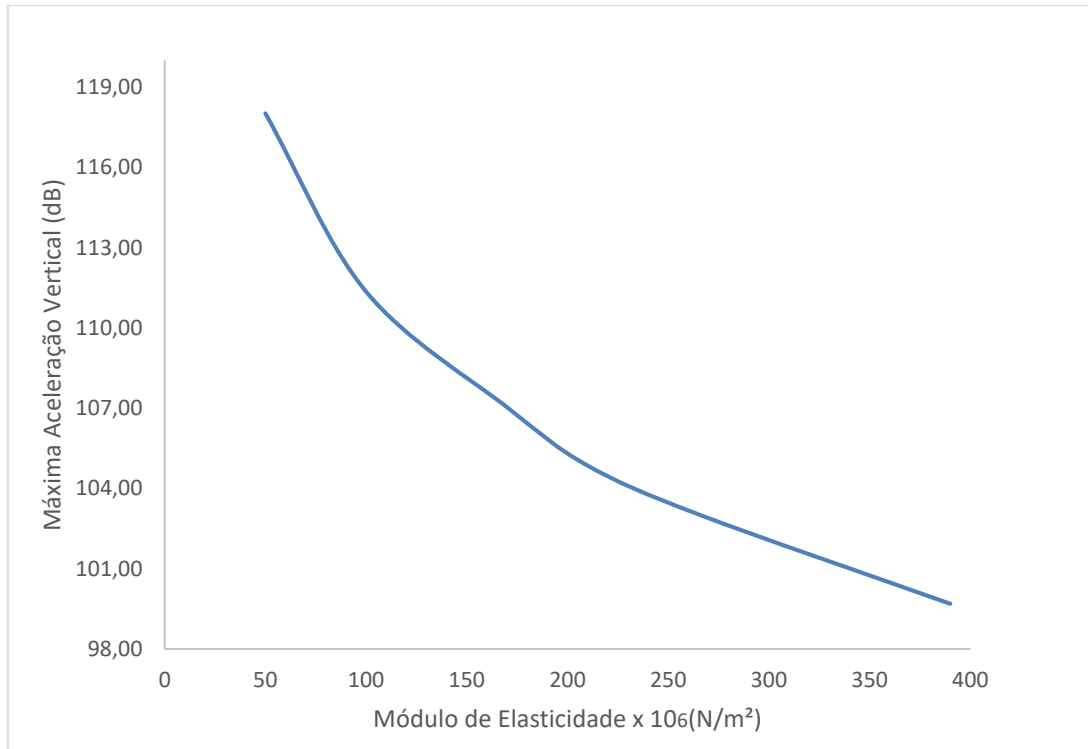
Figura 45. Velocidade máxima eixo Z (dB) vs. Módulo de Elasticidade ($\times 10^6 \text{ N/m}^2$) ($V_t = 60 \text{ Km/h}$, 100 ton, TR-57, $\rho=2000 \text{ kg/m}^3$, $\nu=0,25$, ponto de medição a 10 cm abaixo da pista ferroviária.)



Fonte: Autor

Na Figura 46, é analisado a da aceleração vertical no eixo z. Os parâmetros de velocidade do trem, carga do vagão, tipo de trilho, densidade do solo e coeficiente de Poisson são fixos e valem respectivamente 60 Km/h, 100 toneladas, TR-57, 2000 Kg/m³ e 0,25. É observado também que na primeira faixa que de $50 \times 10^6 \text{ N/m}^2$ até $150 \times 10^6 \text{ N/m}^2$ a queda no valor da aceleração vertical a uma queda em mais de 10 decibéis, a partir desse ponto o decaimento no valor da velocidade vertical é suavizado, chegando ao valor mínimo de 99,70 dB, para um valor de $390 \times 10^6 \text{ N/m}^2$. Assim como nas outras situações de análise para velocidade de trem de 20 e 40 Km/h, para a velocidade de 60 Km/h é observado a mesma tendência de decaimento para a aceleração e a velocidade.

Figura 46. Aceleração máxima eixo Z (dB) vs. Módulo de Elasticidade ($\times 10^6 \text{ N/m}^2$) ($V_t = 60 \text{ Km/h}$, 100 ton, TR-57, $\rho=2000 \text{ kg/m}^3$, $\nu=0,25$, ponto de medição a 10 cm abaixo da pista ferroviária.)



Fonte: Autor

Para todas as análises acima, é observado uma expressiva redução nos valores de velocidade e aceleração de vibração com a elevação do valor do módulo de elasticidade, tal constatação também foi observada no trabalho de Hesami *et al.* (2016). Os valores máximos de velocidade e aceleração são resumidos na Tabela 2.

Tabela 2. Resumo dos valores de velocidade e aceleração pelo módulo de elasticidade.

Velocidade do Trem	Parâmetros	Módulo de Elasticidade $\times 10^6 \text{ (N/m}^2)$					
		50	100	150	210	265	390
20 Km/h	Vel. (dB)	123,27	116,51	113,63	110,7	108,57	105,34
20 Km/h	Ace. (dB)	98,28	92,25	88,69	85,88	83,80	82,73
40 Km/h	Vel. (dB)	129,52	123,27	119,79	116,79	114,7	111,27
40 Km/h	Ace. (dB)	110,37	104,34	100,82	97,78	95,98	92,67
60 Km/h	Vel. (dB)	132,89	127,02	122,98	120,53	118,55	114,94
60 Km/h	Ace. (dB)	118,02	111,36	108,02	104,86	103,04	99,70

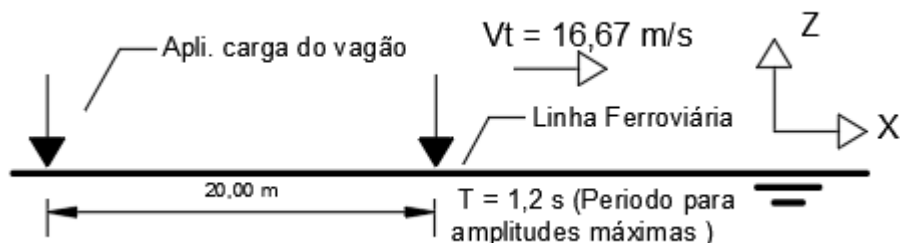
Fonte: Autor

5 AVALIAÇÃO DE EDIFÍCIOS DE CONCRETO

Como foi visto pela análise do solo, os maiores deslocamentos, velocidades e acelerações de vibração ocorrem a uma distância menor que 15 metros, e nessa faixa, geralmente, não existem edificações nem benfeitorias. Então para fins de análise é feita a previsão da resposta mecânica induzida pelos deslocamentos provocados pela vibração ferroviária para três situações: a primeira consiste na análise de uma edificação térrea, ou seja, de um andar; a segunda para um edifício de concreto armado de dois andares engastado no solo; e a terceira também tem um edifício de concreto armado com dois andares, porém considerasse a interação solo-estrutura na fundação. Todas as edificações e situações estão situadas a 20 metros da linha ferroviária e estão submetidas as mesmas situações de excitação de solo, para o tipo de solo mais desfavorável (argila arenosa macia) e com a maior carga por vagão de trem (130 toneladas).

Para as duas primeiras situações, os pilares são considerados engastados no solo (que é excitado harmonicamente pela passagem do trem, ficando no regime elástico linear por todo o período da análise). A pista ferroviária considerada nestas análises tem trilho TR-57, com trem de 130 toneladas por vagão movendo-se a 60 km/h (considerando 17 vagões de 20 metros incluindo a locomotiva, sendo 20.4 segundos o tempo para que toda a extensão do veículo passe pela edificação) em um solo do tipo argila arenosa macia. A carga concentrada de um vagão é espaçada 20 metros uma das outras, sendo que o tempo de intervalo da aplicação das cargas dos vagões é 1,2 segundos (Figura 47). Para as três situações a vibração é forçada nos primeiros 20.4 segundos, após esse instante a vibração se torna livre, sem a influência de forças externas.

Figura 47. Espaçamento da aplicação da carga dos Vagões ($V_t=60$ Km/h)

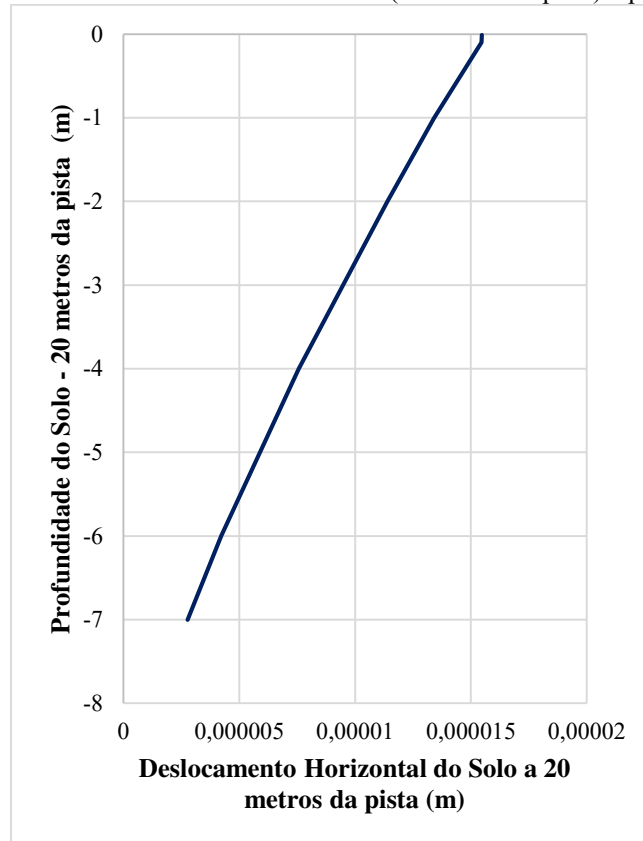


Fonte: Autor

A velocidade de vibração e a aceleração de vibração no eixo Y induzidos no solo a uma distância de 20 metros da pista correspondem, respectivamente, a 78,79 dB e 63,50 dB. O

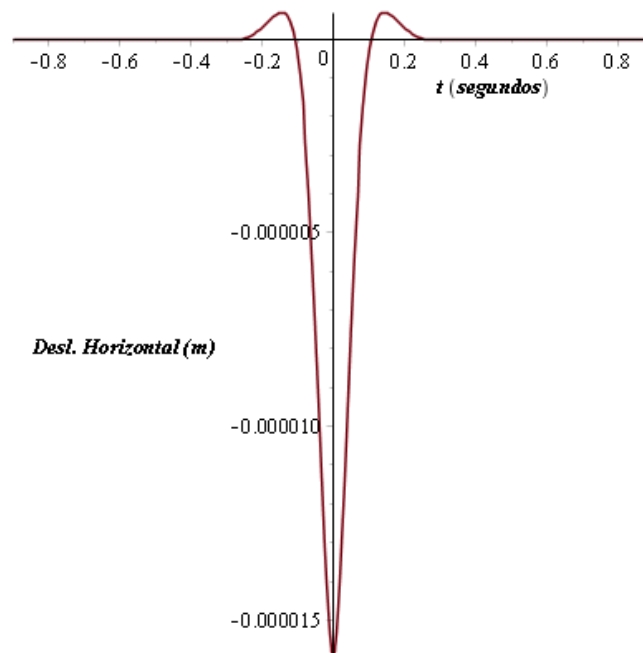
deslocamento horizontal máximo nesse mesmo ponto do solo equivale a 0,01546 mm (Figura / $u_o = -0,00001546m$), quando o deslocamento chega ao valor máximo ele converge rapidamente para zero em menos de 0,3 segundos, como pode ser observado na Figura49.

Figura 48. Deslocamento horizontal do solo – Eixo Y (20 metros da pista) x profundidade do solo



Fonte: Autor

Figura 49. Deslocamento Horizontais Eixo Y (20 m da pista / 10 cm de profundidade) x tempo – Carga de um vagão

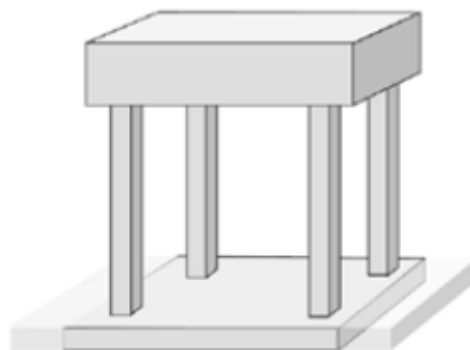


Fonte: Autor

5.1 Primeira Situação: Edifício Térreo

O edifício térreo (Figura 50) é considerado com quatro pilares de concreto tendo três metros de altura com seção transversal 15 x 15 cm, que estão localizados nos cantos de uma área de 100 m² de laje. A laje da edificação considerada é de concreto armado (2500 kg/m³) com 15 cm de espessura e 250 kg de sobrecarga, totalizando um peso total do pavimento de 62.500,00 kg.

Figura 50. Edifício térreo



Fonte: Autor

A resistência característica a compressão (f_{ck}) do concreto aos 28 dias é 15 MPa. O

módulo de elasticidade tangente (E_t - MPa) da estrutura portante é calculado usando a Equação (22), cujo valor nominal do f_{ck} é MPa.

$$E_t = 5600 \cdot \sqrt{f_{ck}} \quad (22)$$

O edifício é modelado como um sistema de um grau de liberdade (S1GL), engastado na base dos pilares, tendo a massa da laje e das vigas concentradas no topo do pilar equivalente. A rigidez de um pilar, k , (engastado entre pavimentos) considerando um grau de liberdade para deslocamentos horizontais é dado pela Equação (23), em que I é o momento de inércia e L é a altura do pilar. Assim, a rigidez equivalente, k_{eq} , é obtida pela Equação (24).

$$k = \frac{12E_t I}{L^3} \quad (23)$$

$$k_{eq} = \frac{48E_t I}{L^3} \quad (24)$$

A frequência natural circular do sistema (w_o), o coeficiente de amortecimento crítico (c_{cr}) e o fator de amortecimento (ζ) são calculados, respectivamente, pelas equações (25), (26) e (27). A frequência natural do sistema é 5,10 rad/s, o que dá 0,81 Hz.

$$w_o = \sqrt{\frac{k_{eq}}{m}} \quad (25)$$

$$c_{cr} = 2 \cdot m \cdot w_o \quad (26)$$

$$\zeta = \frac{c}{c_{cr}} \quad (27)$$

A equação geral de movimento do S1GL, excitado na base, é dada por:

$$\ddot{x} + 2\zeta\omega_o\dot{x} + \omega_o^2x = F(t) \quad (28)$$

Em que \ddot{x} , \dot{x} e x são, respectivamente, a aceleração, a velocidade e o deslocamento horizontal da massa e $F(t)$ é a carga de excitação. O deslocamento do solo no tempo, $u(t)$, é

expresso como uma onda senoidal, dado por:

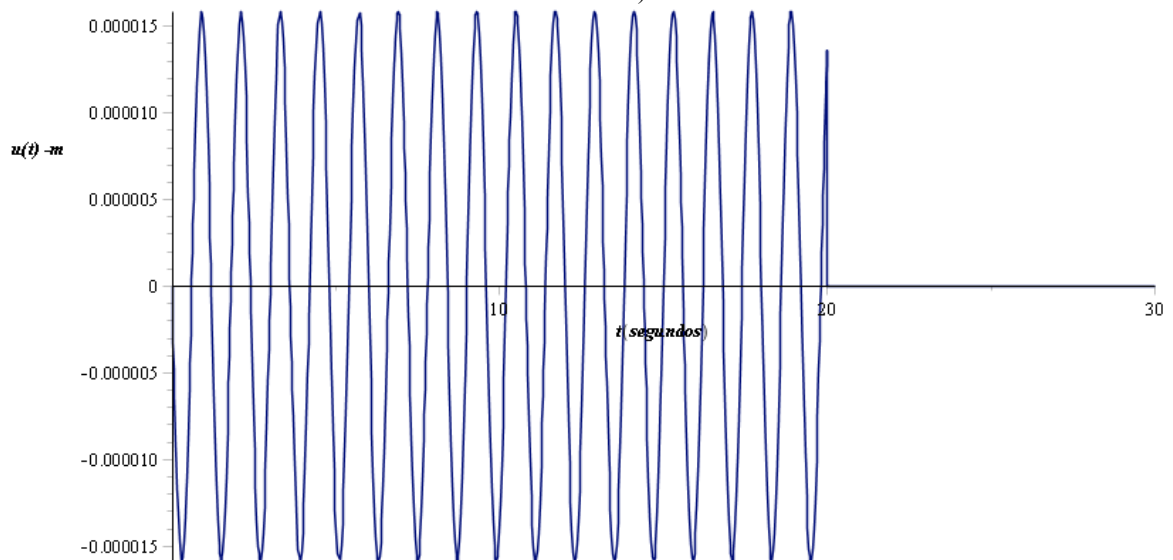
$$u(t) = u_o \cdot \sin(5.23 \cdot t); \quad u_o = -0,00001546m \quad (29)$$

Então, a carga de excitação é dada pela seguinte expressão (1ª e 2ª Situação):

$$F(t) = k_{eq} \cdot (u_o \cdot \sin(w \cdot t)) \quad (30)$$

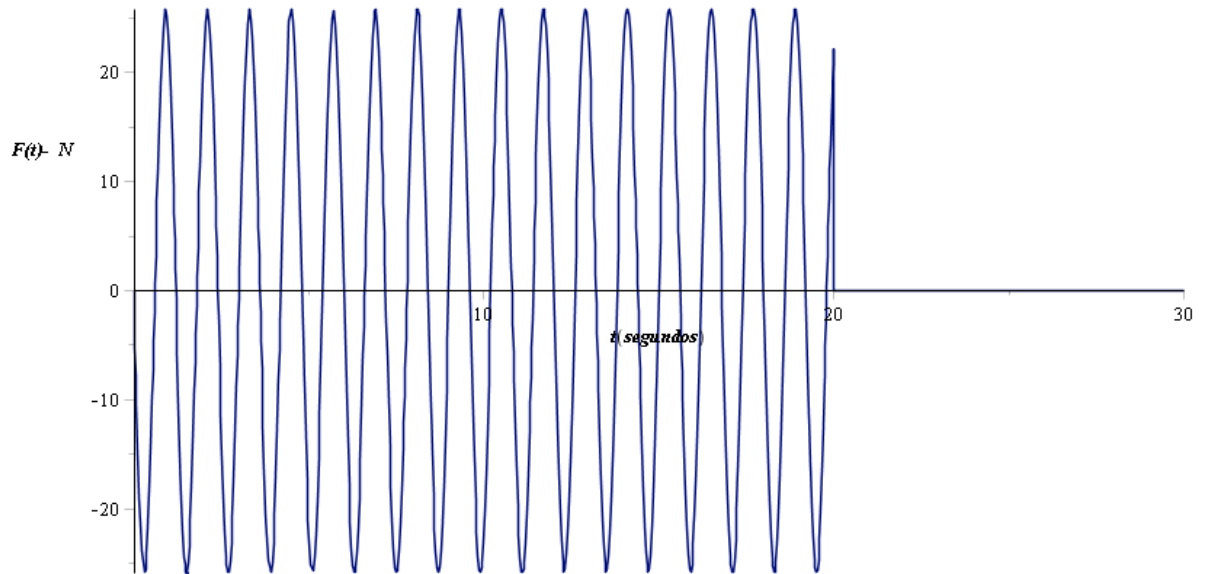
A frequência de excitação (w) é 5,23 rad/s (0,833 Hz). As equações (29) e (30) são mostradas graficamente na Figura51 e na Figura52, respectivamente.

Figura 51. Deslocamento Horizontal (Eixo Y) em módulo no solo da base na edificação (20 metros da linha ferroviária)



Fonte: Autor

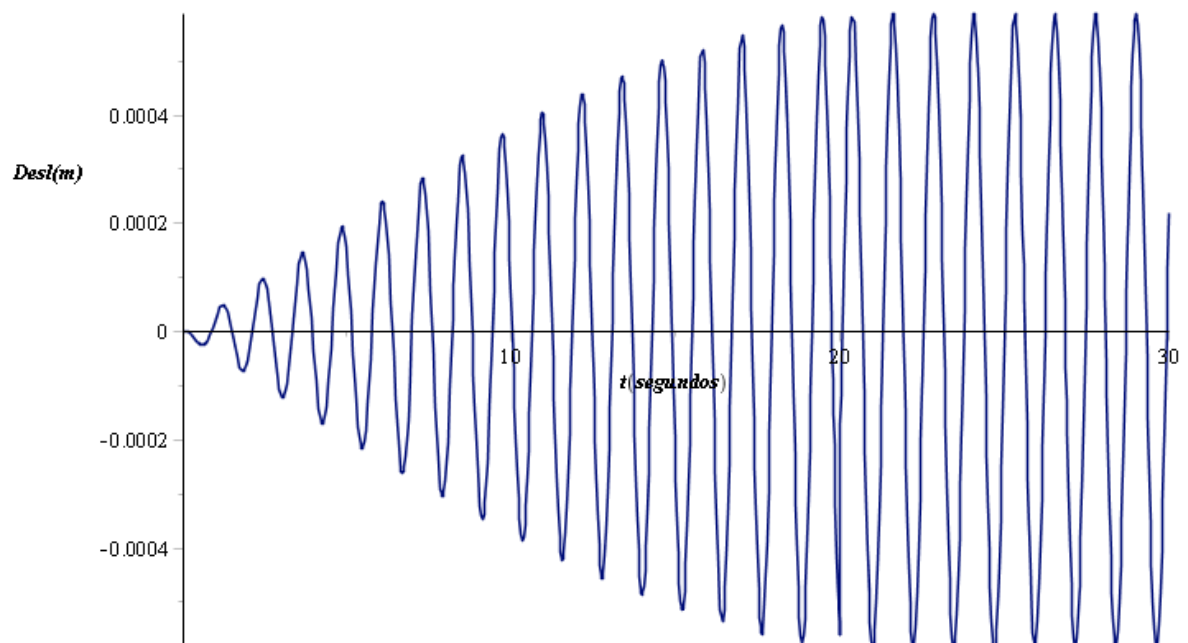
Figura 52. Força horizontal em módulo no solo da base da edificação (20 metros da linha ferroviária)



Fonte: Autor

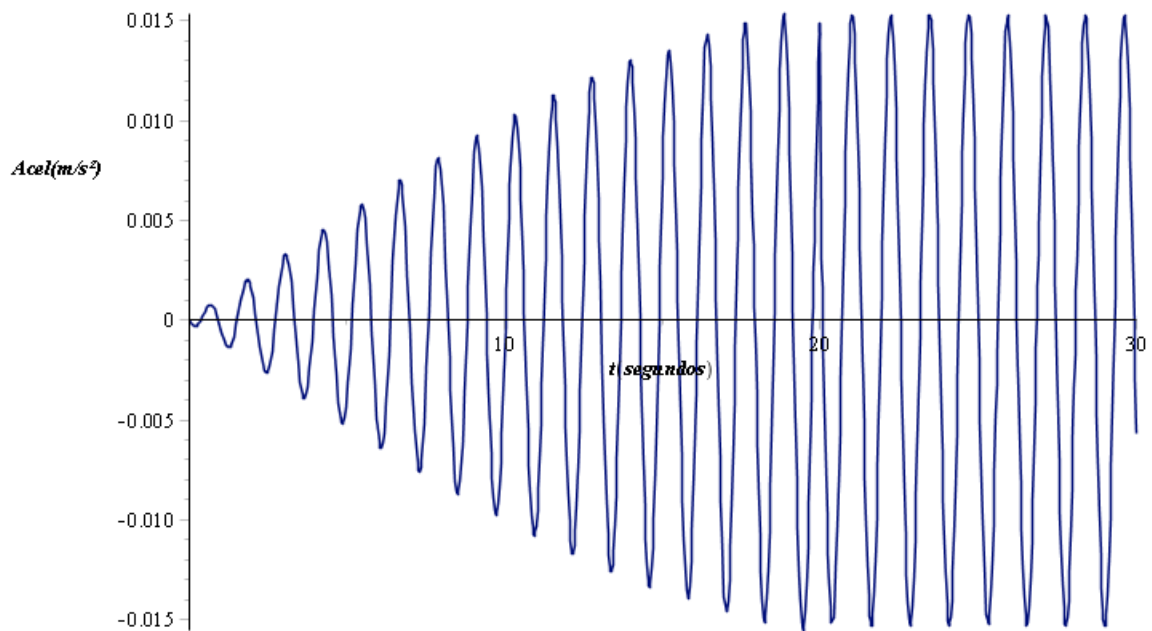
Resolvendo a Equação (28) que é solução exata, é calculado o valor do deslocamento e aceleração do topo do pavimento para uma situação com e sem amortecimento. Nas situações com amortecimento o valor do mesmo é considerado com 2% do valor do amortecimento crítico que é o valor usual para estruturas de concreto armado.

Figura 53. Deslocamento topo do pavimento (m) x tempo (s) - (Sem Amortecimento)



Fonte: Autor

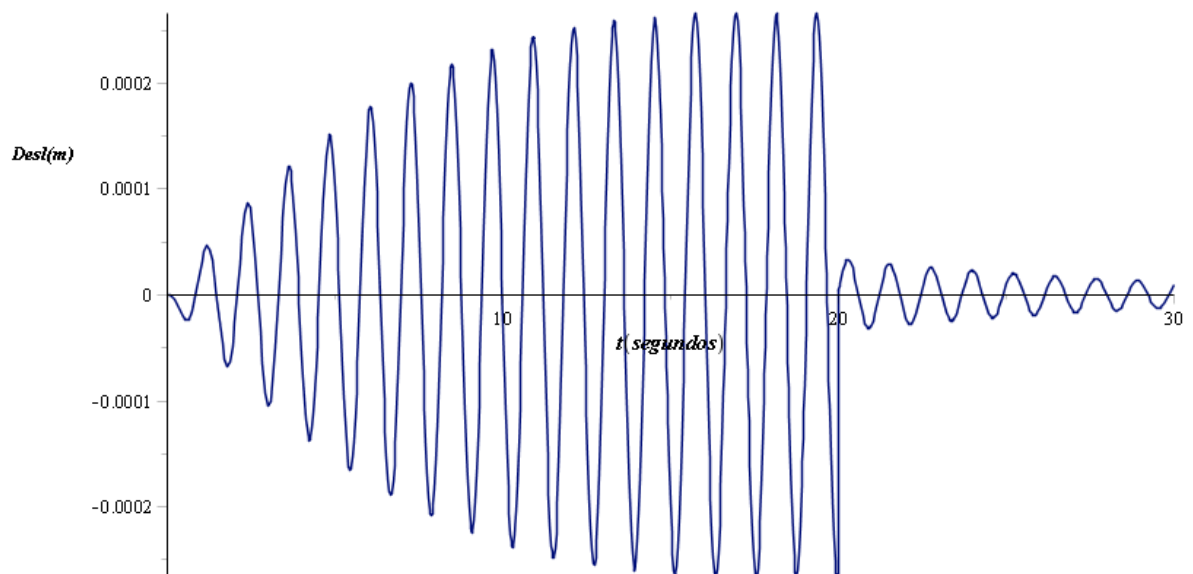
Figura 54. Aceleração topo do Pavimento (m) x tempo (s) - (Sem Amortecimento)



Fonte: Autor

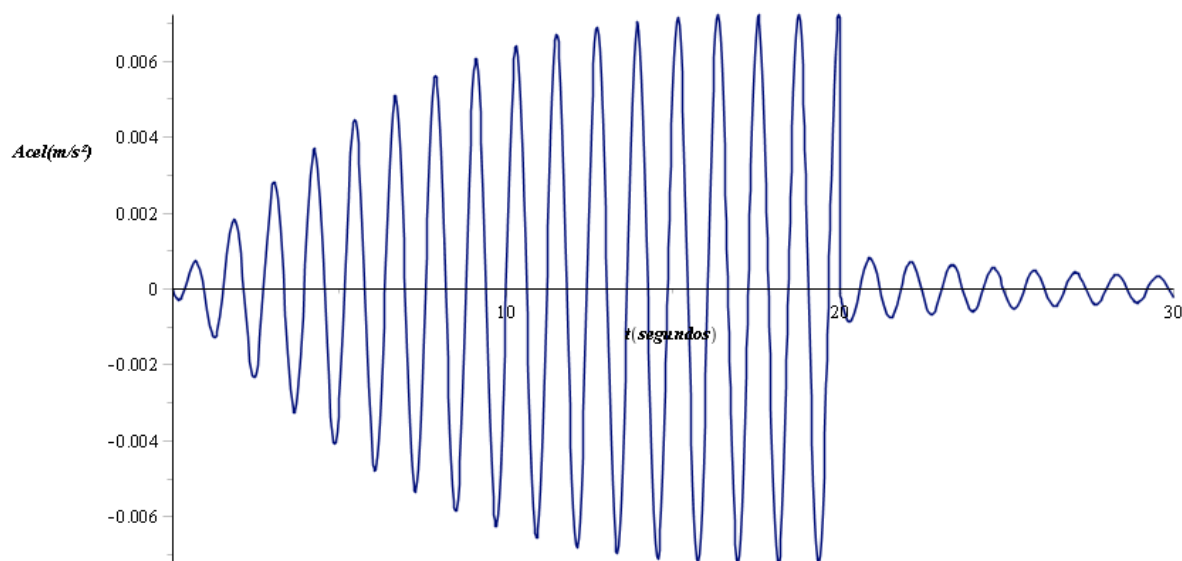
Para a situação sem amortecimento tem-se o fenômeno da ressonância, por que a frequência de excitação é quase coincidente com a frequência natural do sistema, então a uma rápida amplificação dos deslocamentos até o instante de 20.4 segundos, depois a vibração se torna livre não amortecida conservando o movimento até o fim da análise.

Figura 55. Deslocamento topo do pavimento (m) x tempo (s) - (Com Amortecimento)



Fonte: Autor

Figura 56. Aceleração topo do pavimento (m) x tempo (s) - (Com Amortecimento)



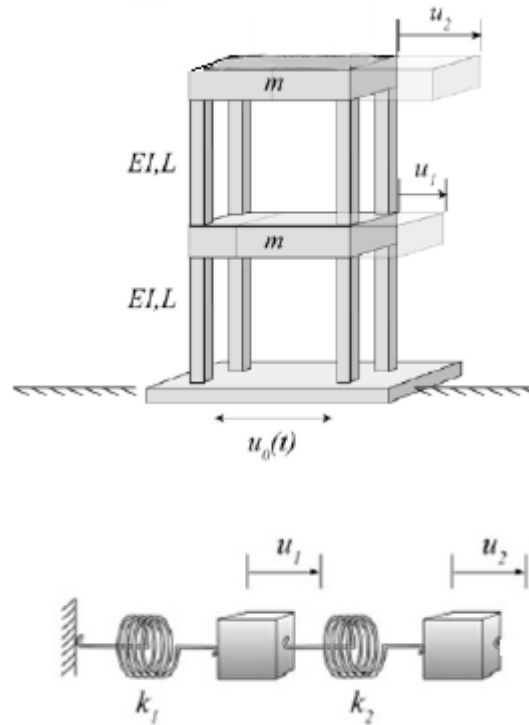
Fonte: Autor

Para a situação com amortecimento depois de 20.4 segundos de amplificação dos deslocamentos devido a ressonância, a amplitude para pôr um rápido decaimento tendendo a valores próximos a zero, devido ao valor de amortecimento estimado para o sistema.

5.2 Segunda Situação: Edifício 2 Pavimentos

Existem vários métodos para aproximar um sistema contínuo em um sistema com vários graus de liberdade. O método mais simples consiste em substituir a massa ou a inércia distribuída do sistema em um sistema de massas discretas (RAO, 2008). Assim, o sistema em questão tem dois graus de liberdade (S2GL), obtendo-se duas equações de movimento que descrevem os deslocamentos horizontais para cada pavimento (Figura57), sendo k_1 e k_2 os coeficientes de rigidez equivalente de cada pavimento (formado por 4 pilares de 3 metros cada).

Figura 57. Edifício de 2 pavimentos – S2GL



Fonte: Autor

A equação de movimento que governa o S2GL é (Das, 1993):

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{u}} + \mathbf{K}\mathbf{u} = \vec{F}(t) \quad (31)$$

Em que \mathbf{M} , \mathbf{C} e \mathbf{K} são, respectivamente, as matrizes de massa, amortecimento e de rigidez do sistema, $\ddot{\mathbf{u}}$, $\dot{\mathbf{u}}$ e \mathbf{u} são os vetores de aceleração, velocidade e deslocamentos horizontais no tempo, respectivamente, e $\vec{F}(t)$ é o vetor de forças no tempo t , expresso segundo a Equação 30. Nesse caso, os pilares têm f_{ck} igual a 15 MPa e seção transversal 15 x 15 cm, com 62500 kg de massa para cada pavimento. Assim, a rigidez equivalente para cada pavimento é 1.626.655 N/m (Equação 24). Considerando que não há amortecimento ($\mathbf{C} = \mathbf{0}$), as matrizes de massa e rigidez são dadas por:

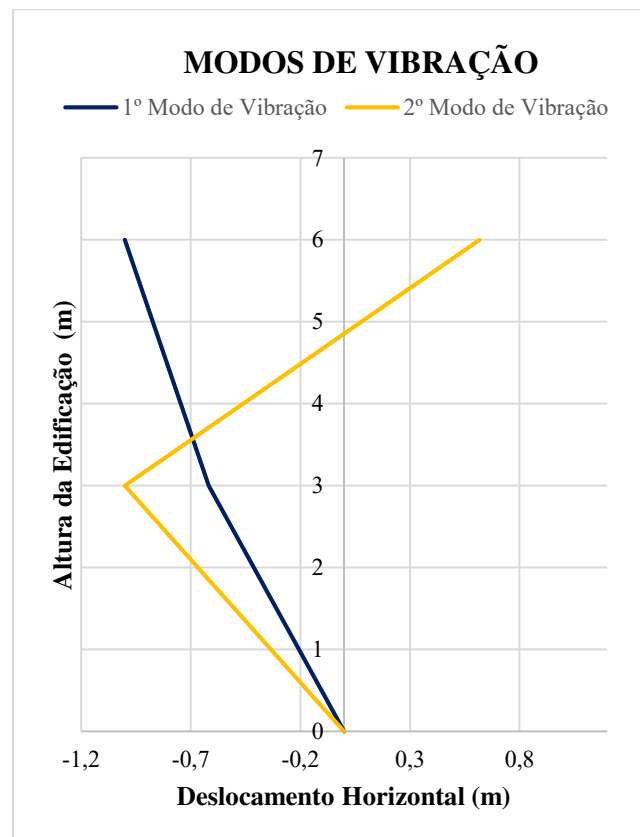
$$\begin{pmatrix} m & 0 \\ 0 & m \end{pmatrix} \xrightarrow{\mathbf{M}} \begin{pmatrix} 62500 & 0 \\ 0 & 62500 \end{pmatrix} \quad (32)$$

$$\begin{pmatrix} 2k_{eq} & -k_{eq} \\ -k_{eq} & k_{eq} \end{pmatrix} \xrightarrow{\mathbf{K}} \begin{pmatrix} 3253306 & -1626653 \\ -1626653 & 1626653 \end{pmatrix} \quad (33)$$

Como o sistema tem dois graus de liberdade, o mesmo terá duas frequências naturais e dois modos de vibração. As frequências naturais (w_1 e w_2) e as formas modais (X_1 e X_2) são calculadas a partir de um problema de autovalor e autovetor aplicando a relação $[\mathbf{K} - \omega^2 \mathbf{M}] \vec{X} = \vec{0}$, com w sendo o valor das frequências naturais. As frequências naturais são as raízes em ordem gradativa e ascendente dos autovalores (Equação 34). O menor valor é denominado frequência fundamental ou primeira frequência natural. Os modos de vibração do sistema, que são os autovetores, são mostrados na Figura 58.

$$\begin{aligned} w_1 &= 3,15 \text{ rad/s (0,50 Hz)} \\ w_2 &= 8,25 \text{ rad/s (1,31 Hz)} \end{aligned} \quad (34)$$

Figura 58. Modos de Vibração



Fonte: Autor

Para efetuar a análise modal é necessário calcular as matrizes generalizadas de rigidez, massa e carregamento (força) para cada modo. Além disso, a resposta dinâmica de uma

estrutura pode ser decomposta em termos das contribuições modais de cada modo de vibração, para cada pavimento.

Segundo RAO (2008), pode-se representar a resposta dinâmica ($\vec{u}(t)$) de uma estrutura combinando-se os modos de vibração ortogonalmente normalizados (Φ) com coordenadas generalizadas dependentes do tempo ($\vec{q}(t)$), conforme a Equação 35.

$$\vec{u}(t) = \Phi \vec{q}(t) \quad (35)$$

Onde:

$$\Phi = [X_1 \quad X_2] \quad \vec{q}(t) = \begin{Bmatrix} q_1(t) \\ q_2(t) \end{Bmatrix} \quad (36)$$

Como Φ não é função do tempo, a Equação (35) pode ser reescrita como:

$$\vec{u}(t) = \Phi \vec{q}(t) \quad (37)$$

Substituindo as equações 35 e 33 na equação do movimento (Equação 31) e pré-multiplicando por Φ^T obtém-se:

$$\Phi^T \mathbf{M} \Phi \ddot{\vec{q}}(t) + \Phi^T \mathbf{K} \Phi \vec{q}(t) = \Phi^T \vec{F}(t) \quad (38)$$

Onde:

$$\Phi^T \mathbf{M} \Phi = \mathbf{I} \quad \Phi^T \mathbf{K} \Phi = \begin{bmatrix} \nearrow & \omega^2 & \searrow \end{bmatrix} \quad \vec{Q}(t) = \Phi^T \vec{F}(t) \quad (39)$$

$\vec{Q}(t)$ é o vetor de forças generalizadas. A Equação (38) resulta em duas equações de movimento desacopladas nas coordenadas generalizadas, equivalentes a um S1GL. Essas equações podem ser escritas como:

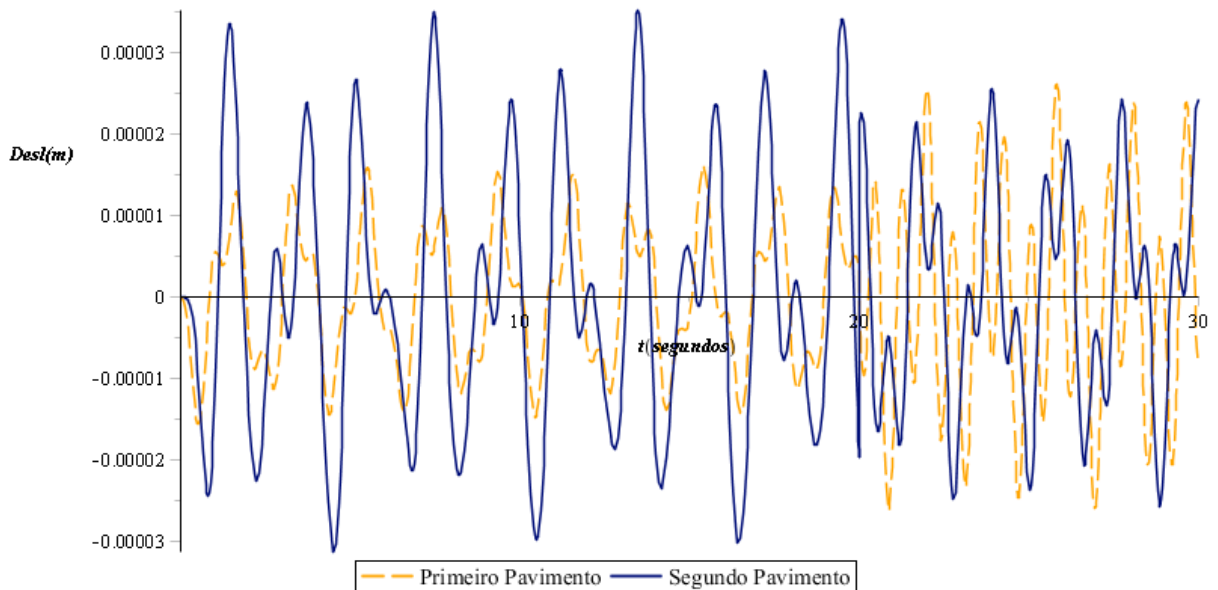
$$\ddot{q}_i(t) + \omega_i^2 q_i(t) = Q_i(t) \quad i = 1, 2 \quad (40)$$

Para a resolução da EDO com as coordenadas generalizadas, as condições iniciais destas coordenadas devem ser consideradas a partir das condições iniciais físicas do problema, que são dadas por:

$$\begin{aligned}\vec{q}(t=0) &= \mathbf{\Phi}^T \mathbf{M}\vec{u}(t=0) \\ \vec{\dot{q}}(t=0) &= \mathbf{\Phi}^T \mathbf{M}\vec{\dot{u}}(t=0)\end{aligned}\quad (41)$$

Por fim, encontra-se a solução da Equação (40), cujos resultados são substituídos na Equação (35) para obter os valores dos deslocamentos físicos para o topo de cada pavimento (Figura59).

Figura 59. Deslocamentos Horizontais Pavimentos

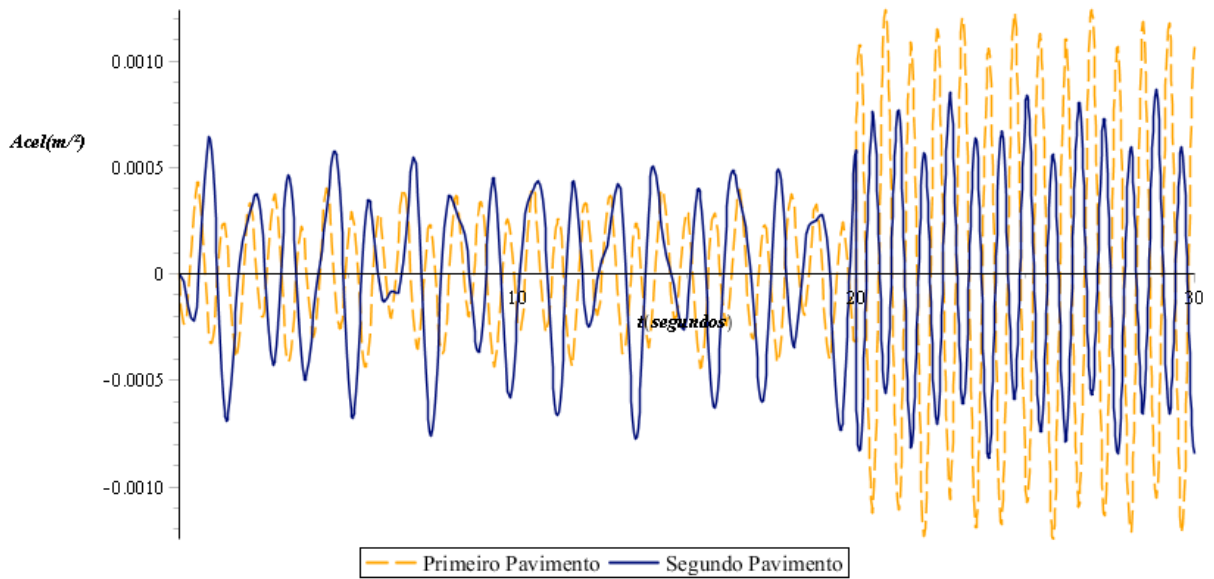


Fonte: Autor

O segundo pavimento tem deslocamentos superiores ao primeiro pavimento, o que era de se esperar. O primeiro pavimento atinge o máximo deslocamento horizontal dois segundos após o início da vibração, chegando a um valor de 0,000025 m (0,025 mm) para parte que a vibração é livre (20.4s-30s), enquanto o segundo pavimento alcança a amplitude máxima também a dois segundos do início do processo, atingindo um valor de 0,000035 m (0,035 mm). Embora os valores sejam relativamente pequenos quando comparados com as dimensões da edificação, durante uma exposição prolongada e repetitiva ao longo dos anos, tensões e deformações cíclicas podem exceder os limites estruturais que culminam em microfissuras, havendo a possibilidade de danos progressivos a estrutura.

Aplicando a equação 35 para as coordenadas generalizadas obtemos as acelerações físicas para cada pavimento.

Figura 60. Acelerações Horizontais Pavimentos



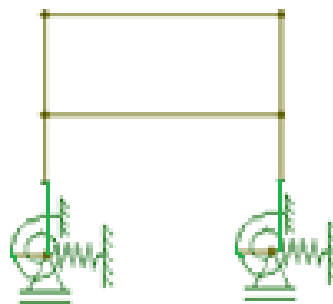
Fonte: Autor

Em relação as acelerações, o valor máximo da aceleração horizontal do primeiro pavimento é $0,0012 \text{ m/s}^2$ (41,58 dB) e o segundo pavimento tem aceleração máxima $0,0009 \text{ m/s}^2$ (39,09 dB). De acordo com a escala Mercalli (Figura), os valores de aceleração nesses pavimentos não são percebidos pelos usuários da edificação.

5.3 Terceira Situação: Edifício 2 Pavimentos (Interação Solo-Estrutura)

Nesse estudo procura-se representar a interação solo-estrutura substituindo a fundação por uma massa e uma mola. Essa interação é realizada no S2GL do item anterior (sob os mesmos aspectos de deslocamento horizontal de solo), resultando, portanto, num S3GL. A frequência natural fundamental do sistema é $3,08 \text{ rad/s}$, o que dá $0,49 \text{ Hz}$.

Figura 61. Edifício de 2 pavimentos – S3GL (Interação Solo-Estrutura)



Fonte: Autor

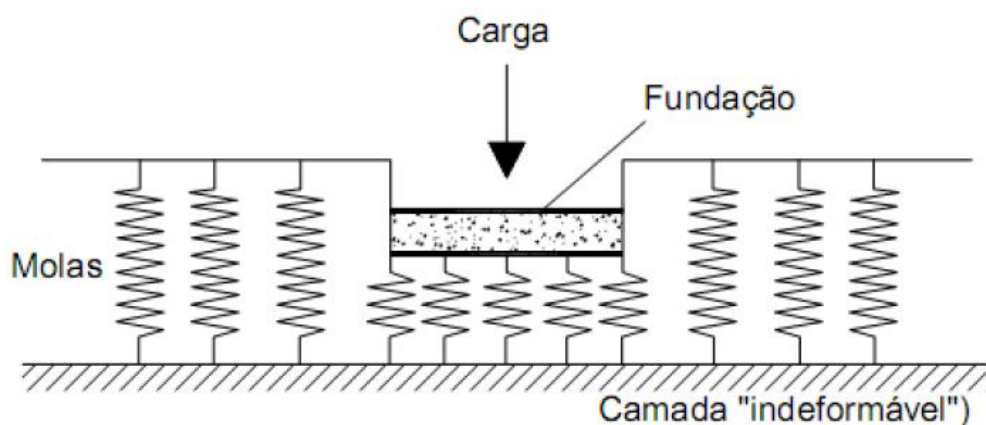
A massa de cada pavimento é 62.500,00 kg e a massa da fundação é 1225 kg (com área horizontal de 0,70 m² e inercia de rotação 0,0408 m⁴). A rigidez do solo em contato com a fundação é considerada, a qual depende das condições geotécnicas do solo e das características geométricas da fundação. Para isso, é necessário obter o coeficiente de reação vertical (k_v), que nada mais é do que a relação entre a pressão aplicada no solo (σ) e o respectivo recalque (ρ) (ANTONIAZZI, 2011).

$$k_v = \frac{\sigma}{\rho} \quad (42)$$

Embora menos precisa, uma maneira mais simplificada para considerar os efeitos da deformabilidade dos solos, relatada por Scarlat (1993), é empregar uma série de molas discretas sob a base da fundação (Figura), as quais são representadas pelo coeficiente de apoio horizontal, denominado k_{mh} , o qual é diretamente proporcional ao módulo de reação k_v e inversamente proporcional a área carregada da fundação A_f (como os deslocamentos medidos são horizontais a área da fundação considerada será a área horizontal da fundação), o k_{mr} , é a rigidez a rotação da fundação o qual é diretamente proporcional ao módulo de reação k_v e o momento de inercia em torno do eixo da fundação conforme Equação (43).

$$k_v = \frac{k_{mh}}{A_f} \rightarrow k_v = \frac{k_{mr}}{I_{eixoY}} \quad (43)$$

Figura 62. Hipótese de Winkler: deformação do solo através de molas discretas



Fonte: Winkler

O módulo de reação horizontal da mola não é uma propriedade do solo, mas um

conjunto de diversos fatores atrelados como características geotécnicas do solo, tipo e forma da fundação. Para o cálculo do coeficiente de reação usasse a Equação (44), onde E é o módulo de elasticidade do solo, B é o menor lado da fundação, ν é o coeficiente de fundação e I_p é o fator de influência de fundação, que é retirado da Figura. Essa tabela foi elaborada por Cintra *et al.* (2003).

$$k_v = \frac{E}{(1-\nu^2) \cdot B \cdot I_p} \quad (44)$$

Figura 63. Fator de Influência I_p

Sapata Flexível				Rígida
Forma	Centro	Canto	Médio	
Circular	1,00	0,64*	0,85	0,79
Quadrada	1,12	0,56	0,95	0,99
$L/B = 1,5$	1,36	0,67	1,15	
2	1,52	0,76	1,30	
3	1,78	0,88	1,52	
5	2,10	1,05	1,83	
10	2,53	1,26	2,25	
100	4,00	2,00	3,70	

Fonte: Cintra *et al.* (2003)

Considerando o módulo de elasticidade do solo em questão (argila arenosa macia) com 37,49 MPa, coeficiente de Poisson 0,2, fator de influência 1,12 (sapata quadrada flexível) e o menor lado da fundação é 0,54 m. O valor do módulo de reação k_v equivale a 34.866.071,43 N/m³ (Equação 43). Considerando a sapata quadrada na lateral, com cada lado medindo 0,83 m temos k_{mh} medindo 34.866.071,43 N/m que será o valor da rigidez na interação solo estrutura para a lateral da sapata, interação que irá receber as deformações provocadas pelos veículos ferroviários.

A equação de movimento do sistema é dada pela Equação (31), cujas matrizes de massa e rigidez e vetor força (3ª Situação) são (sem amortecimento):

$$\begin{pmatrix} m_f & 0 & 0 \\ 0 & m & 0 \\ 0 & 0 & m \end{pmatrix} \xrightarrow{\mathbf{M}} \begin{pmatrix} 1225 & 0 & 0 \\ 0 & 62500 & 0 \\ 0 & 0 & 62500 \end{pmatrix} \quad (45)$$

$$\begin{bmatrix} k_{eq} + k_{mh} + k_{mr} & -k_{eq} & 0 \\ -k_{eq} & 2k_{eq} & -k_{eq} \\ 0 & -k_{eq} & k_{eq} \end{bmatrix} \xrightarrow{\mathbf{K}} \begin{bmatrix} 27456600 & -1626653 & 0 \\ -1626653 & 3253306 & -1626653 \\ 0 & -1626653 & 1626653 \end{bmatrix} \quad (46)$$

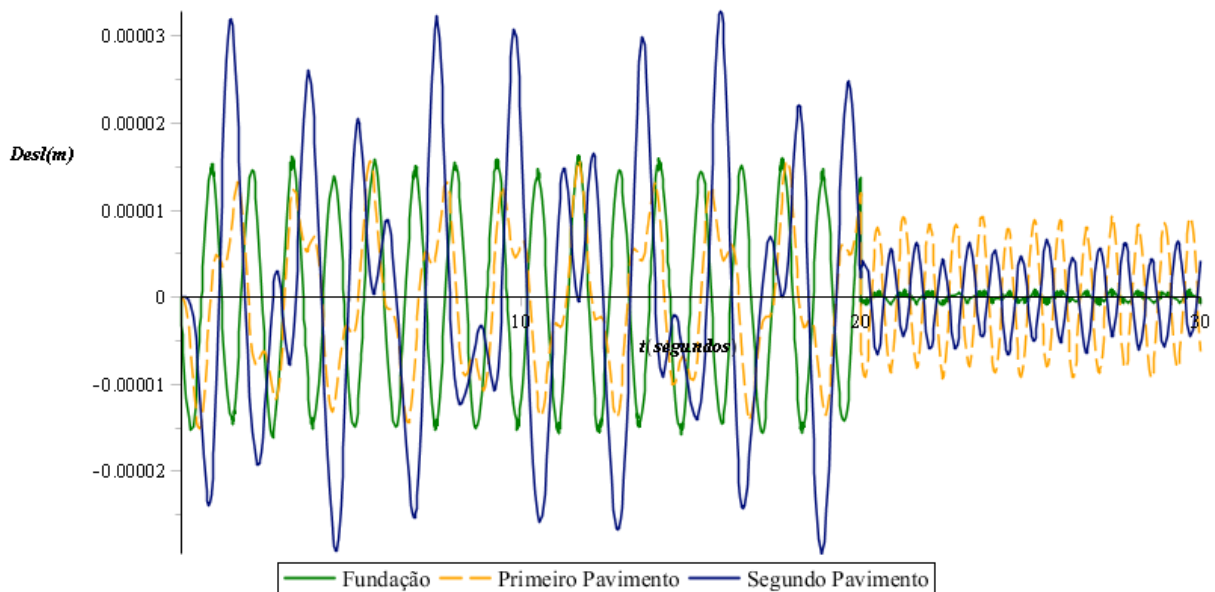
$$\vec{F}(t) = \begin{Bmatrix} F_{\text{vibração do solo}} \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \rightarrow F_{\text{vibração do solo}} = (k_{mh} + k_{mr}) \cdot u(t) \quad (47)$$

A equação de movimento nas coordenadas generalizadas desacopladas é dada por:

$$\ddot{q}_i(t) + \omega_i^2 q_i(t) = Q_i(t) \quad i = 1, 2, 3 \quad (48)$$

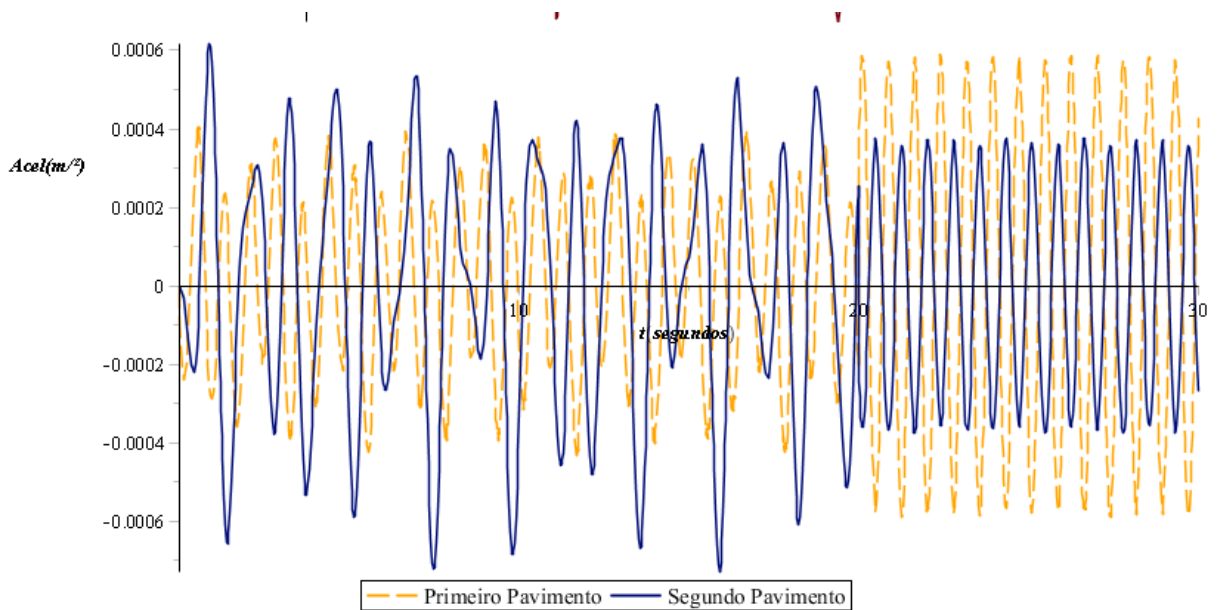
Para a resolução da EDO com as coordenadas generalizadas, as condições iniciais destas coordenadas devem ser consideradas a partir das condições iniciais físicas do problema, condições essas que foram usadas na segunda situação e estão descritas na (Equação 41). Por fim, encontra-se a solução da final da análise obtendo os valores dos deslocamentos e acelerações físicas para o topo de cada pavimento.

Figura 64. Deslocamento Horizontal dos Pavimentos considerando interação Solo-Estrutura



Fonte: Autor

Figura 65. Aceleração Horizontal Pavimentos Considerando interação Solo-Estrutura



Fonte: Autor

Considerando a interação solo-estrutura na massa da fundação da edificação de dois pavimentos da terceira situação, obtemos valores de deslocamento e acelerações semelhantes a situação dois, em que não se considerava a interação. Porém na terceira situação ocorre uma atenuação moderada nos valores dos deslocamentos e das acelerações após 20.4 segundos em comparação com a segunda situação.

6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

O cenário com edifícios próximos ou sobre trilhos são uma realidade, e o controle da vibração e do ruído deve ser avaliado na fase inicial e posterior a sua construção. Esse estudo serve para o melhor aproveitamento dos espaços, perto das ferrovias e para aumentar o conhecimento e acervo publicado na devida literatura acerca da propagação das vibrações e seus efeitos. Com os resultados que foram apresentados na dissertação é possível estabelecer e ampliar os critérios e normatizações já existentes sobre o tema através da metodologia utilizada para as previsões das vibrações nas benfeitorias próximas as ferrovias.

Quanto aos estudos de caso nos tipos de solos e edificações, pode-se obter as seguintes conclusões:

(a) quanto maior o módulo de elasticidade do solo, menores serão os valores absolutos de vibração do solo. O mesmo efeito foi observado no estudo numérico desenvolvido por Feng *et al.* (2017), pois tal efeito ocorre devido a maior coesão do solo e da maior rigidez aos deslocamentos provocados pelas vibrações;

(b) quanto maior a velocidade das ondas P, S e R no solo, menor é a velocidade de vibração no solo;

(c) em torno de 20 metros de distância da pista, observa-se um leve aumento na velocidade e aceleração de vibração, o que caracteriza a zona de amplificação, segundo Xia *et al.* (2005);

(d) quando a velocidade e a carga dos vagões aumentam, a velocidade e aceleração de vibração também aumentam;

(e) A partir da análise das equações tanto para o deslocamento, velocidade e aceleração, observa-se que seus valores absolutos variam linearmente e diretamente em relação a carga dos vagões, considerando os valores no SI;

(f) Não foi observado uma diferença significativa entre o uso dos trilhos ferroviários TR-57 e UI-60, porém foi observado para todas as análises de velocidade e aceleração independente do eixo de medição, z ou y, que o trilho UI-60 apresenta valores levemente menores. Tal constatação também foi observada no trabalho desenvolvido por Carvalho (2016);

(g) Para todos os solos, independente dos parâmetros geotécnicos, as vibrações, sejam medidas em velocidade sejam em aceleração, são maiores no eixo z do que no eixo y. Tal observação também é encontrada nos trabalhos desenvolvidos por Carvalho (2016) e Feng *et al.* (2017).

(h) Para a maioria dos solos e situações a parti de 20 metros da pista ferroviária os valores de velocidade de vibração são menores do que 80 dB, e os valores de aceleração de vibração são menores do que 70 dB;

(i) A aceleração de vibração do solo é mais sensível do que a velocidade de vibração do solo, quando a um aumento na velocidade do trem;

(j) Uma edificação com um pavimento fica submetido a deslocamentos superiores quando comparado com um edifício de dois pavimentos com a mesma área horizontal (pavimento tipo), devido as condições de excitação da base que fazem com que a primeira situação entre em ressonância;

(j) O segundo pavimento das edificações sofre deslocamentos e acelerações superiores ao primeiro pavimento, para o sistema com dois graus de liberdade (com e sem interação solo estrutura);

(k) A consideração da interação solo-estrutura na edificação com dois pavimentos permite que a análise se torne mais próxima a realidade principalmente na parte em que a vibração é livre (depois que o trem passa pela edificação);

(l) O edifício de dois pavimentos tem deslocamentos menores do que a edificação de um pavimento devido ao fato de a primeira frequência natural do sistema com dois graus de liberdade está mais distante da frequência de excitação da base do solo. Se as frequências forem iguais tem-se o fenômeno da ressonância, situação em que os deslocamentos atingiriam uma amplitude maior a cada ciclo.

Esse estudo terá utilidade nos planos e projetos de medidas de redução e do entendimento do comportamento da vibração quanto a passagem de veículos ferroviários, sendo que teoricamente as expressões abordadas aqui podem servir para a estimativa de vibração de qualquer veículo se deslocando por uma determinada faixa retilínea.

Como sugestão para trabalhos futuros sugere-se a possibilidade de análise numérica mais diversificada do solo e das estruturas pelo método dos elementos finitos e do

comportamento das vibrações com relação a outros aspectos geotécnicos e externos.

REFERÊNCIAS

ADAM, M.; VON ESTORFF, O. Reduction of train-induced building vibrations by using open and filled trenches. **Computers & Structures**, v. 83, n. 1, p. 11-24, 2005.

ANTONIAZZI, Juliana Pippi. **Interação Solo-Estrutura de Edifícios com Fundações Superficiais**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Santa Maria, Rio Grande do Sul, 2011.

BRASIL. Ministério da Infraestrutura. Transportes. Brasília, DF, 2018.

CARVALHO, Ana Flávia Paulino de. **Análise paramétrica da vibração do solo induzida pelo tráfego ferroviário**. 2016. 109 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil - Geotecnia, Estruturas e Construção Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2016.

CINTRA, J.C.A., AOKI, N. E ALBIERTO, J. H. **Tensão admissível em fundações diretas**. Editora Rima. São Carlos, 142p, 2003.

CNI – Conselho Nacional da Indústria. Transporte ferroviário: Colocando a competitividade nos trilhos. Confederação Nacional da Indústria. – Brasília: CNI, 2018. 42 p.: il. – (Propostas da indústria - eleições 2018; v. 23).

CONNOLLY, David P. *et al.* Benchmarking railway vibrations - Track, vehicle, ground and building effects. **Construction and Building Materials**, v. 92, p. 64-81, 2015.

CONNOLLY, David P. *et al.* The growth of railway ground vibration problems - a review. **Science of the Total Environment**, v. 568, p. 1276-1282, 2016.

DE 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.

Das, B. M. (1993). Principles of soil dynamics, PWS-KENT.

DINEST, S. Vibrações Mecânicas. 2ª Foz do Iguaçu, 2009

DOMÉNECH, Alejandro *et al.* On the basic phenomenon of soil-structure interaction on the free vibration response of beams: Application to railway bridges. **Engineering structures**, v. 125, p. 254-265, 2016.

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.

FENG, Shi-Jin *et al.* Simulation and mitigation analysis of ground vibrations induced by high-speed train with three dimensional FEM. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, v. 94, p. 204-214, 2017.

FRÝBA, Ladislav. **Vibration of solids and structures under moving loads**. Springer Science & Business Media, 2013.

FTA (Federal Transit Administration). **Transit noise and vibration impact assessment**. Department of Transportation, United State of America, 2006.

FEDERAL RAILROAD ADMINISTRATION. **High-Speed Ground Transportation Noise and Vibration Impact Assessment**. Washington, D C, 2012, 248 p.

HESAMI, S.; AHMADI, S.; GHALESARI A. T. Numerical Modeling of Train-induced Vibration of Nearby Multi-story Building: A Case Study. **KSCE Journal of Civil Engineering** 20(5), p. 1701-1713, 2016.

H. XIA, Characteristics of traffic induced vibrations and their effects on environments, in: H. Xia, G. De Roeck (Eds.), **Traffic Induced Vibrations & Controls**, NJTU Press, Beijing, 2001, pp. 83–90.

KRYLOV, V. V.; FERGUSON, C. Calculation of low-frequency ground vibrations from railway trains. **Applied Acoustics**, Nottingham, v. 42, p. 199-213, 1994.

KRYLOV, V. V. Effects of Track Properties on Ground Vibrations Generated by High-Speed Trains. **ACUSTICA – acta acustica**, v. 84, p. 78-90, 1998.

KOUROUSSIS, Georges; PARYS, L. Van; CONTI, C.; VERLINDEN, O. Using three-dimensional finite element analysis in time domain to model railway-induced ground vibrations. **Advances in Engineering Software**, v. 70, p. 63-76, 2014a.

KOUROUSSIS, Georges; CONNOLLY, David P.; VERLINDEN, Olivier. Railway-induced ground vibrations—a review of vehicle effects. **International Journal of Rail Transportation**, v. 2, n. 2, p. 69-110, 2014b.

KOUROUSSIS, Georges; VERLINDEN, Olivier. Numerical and experimental assessment of railway-induced ground vibrations generated by IC/IR trains in Brussels. In: **MATEC Web of Conferences**. EDP Sciences, v. 20, p. 02001, 2015.

KOUROUSSIS, Georges; CONNOLLY, David P.; ALEXANDROU, Georgios; VOGIATZIS, Konstantinos. The effect of railway local irregularities on ground vibration. **Transportation Research Part D**, v. 39, p. 17–30, 2015.

LOPES, Patricia *et al.* Numerical modeling of vibrations induced by railway traffic in tunnels: From the source to the nearby buildings. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, v. 61, p. 269-285, 2014.

LYSMER, J., KUHLEMEYER, R.L. Finite dynamic model for infinite media. **Journal of Engineering Mechanics**, v. 95 (EM4), p. 859–877, 1969.

METRIKINE, A.V., VROUWENVELDER, A.C.W.M. Surface ground vibration due to a moving train in a tunnel: two-dimensional model. **Journal of Sound and vibration**, v. 234, n. 1, p. 43–66, 2000.

NEJATI, Hamid Reza, AHMADI, Morteza, HASHEMOLHOSSEINI, Hamid. Numerical analysis of ground surface vibration induced by underground train movement. **Tunnelling and Underground Space Technology**, v. 29, p. 1-9, 2012.

PEREIRA, Thiago Felipe Medeiros. **Modelagem computacional para análise de forças de contato na interação roda-trilho**. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

PERSSON, Nils. **Predicting railway-induced ground vibrations**. 2016. 76 f. Dissertação (Mestrado em Mecânica Estrutural). Department of Construction Sciences, Lund University, Suécia, 2016.

RAO, S. **Vibrações Mecânicas**. 4ª. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2009.

SADD, M. H. **Elasticity: Theory, applications, and numerics**. 1. ed. Oxford: Elsevier Butterworth Heinemann, 2005. 474 p.

SHENG, Xiaozhen. A review on modelling ground vibrations generated by underground trains. **International Journal of Rail Transportation**, DOI: 10.1080/23248378.2019.1591312, 2019.

WINKLER, E. **Die lehre von der Elastizität und Festigkeit**. Domicius. Prag, 1867.

XIA, He; ZHANG, Nan; 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. A 2.5D finite/infinite element approach for modelling viscoelastic bodies subjected to moving loads. **International Journal for Numerical Methods in Engineering**, v 51, p. 1317-1336, 2001.

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.

ZHANG, Zhihua *et al.* Dynamic characteristics of track-ballast-silty clay with irregular vibration levels generated by high-speed train based on DEM. **Construction and Building Materials**, v. 125, p. 564-573, 2016.

ZOU, Chao *et al.* Measurement of ground and nearby building vibration and noise induced by trains in a metro depot. **Science of the Total Environment**, v. 536, p. 761-773, 2015.

ZOU, Chao *et al.* Train-induced field vibration measurements of ground and over-track buildings. **Science of the Total Environment**, v. 575, p. 1339-1351, 2017.

ZOU, Chao *et al.* Impedance model for estimating train-induced building vibrations. **Engineering Structures**, v. 172, p. 739-750, 2018.