

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE ENGENHARIA
CÂMPUS DE ILHA SOLTEIRA**

GABRIEL RODRIGUES PUPIN

**ANÁLISE NUMÉRICA DO EFEITO DA COMPACTAÇÃO DOS SOLOS E DO RE-
VESTIMENTO ASFÁLTICO TIPO PMF NA DETECÇÃO VIBRO-ACÚSTICA DE VA-
ZAMENTOS DE ÁGUA SUBTERRÂNEOS**

**Ilha Solteira
2023**

GABRIEL RODRIGUES PUPIN

**ANÁLISE NUMÉRICA DO EFEITO DA COMPACTAÇÃO DOS SOLOS E DO RE-
VESTIMENTO ASFÁLTICO TIPO PMF NA DETECÇÃO VIBRO-ACÚSTICA DE VA-
ZAMENTOS DE ÁGUA SUBTERRÂNEOS**

Trabalho de conclusão de curso apre-
sentado à Faculdade de Engenharia de Ilha
Solteira – Unesp como parte dos requisitos
para obtenção do título de engenheiro mecâ-
nico.

Amarildo Tabone Paschoalini
Orientador

Matheus Silva Proença
Coorientador

Ilha Solteira
2023

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

Pupin, Gabriel Rodrigues.
P984a Análise numérica do efeito da compactação dos solos e do revestimento
asfáltico tipoPMF na detecção vibro-acústica de vazamentos de água
subterrâneos / Gabriel Rodrigues Pupin. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2023
71 f. : il.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Mecânica) -
Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2023

Orientador: Amarildo Tabone Paschoalini
Coorientador: Matheus Silva Proença
Inclui bibliografia

1. Detecção de vazamentos. 2. Kelvin-voigt. 3. Viscoelástico . 4. Solo.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO"

FACULDADE DE ENGENHARIA - CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA

CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

ATA DA DEFESA – TRABALHO DE GRADUAÇÃO

TÍTULO: Análise numérica do efeito da compactação dos solos e do revestimento asfáltico tipo PMF na detecção vibro-acústica de vazamentos subterrâneos de água.

ALUNO: Gabriel Rodrigues Pupin RA: 172055482

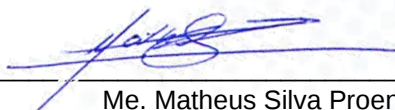
ORIENTADOR: Prof. Dr. Amarildo Tabone Paschoalini

Aprovado (X) - Reprovado () pela Comissão Examinadora

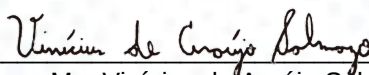
Comissão Examinadora:



Prof. Dr. Amarildo Tabone Paschoalini
Presidente (Orientador)



Me. Matheus Silva Proença



Me. Vinícius de Araújo Salmazo

Ilha Solteira(SP) 10 de julho de 2023.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus pela vida, cheia de oportunidades e todos os objetivos alcançados nessa minha trajetória.

Agradeço também a minha família, especialmente meus pais e minha irmã, Ana Luiza de Oliveira Rodrigues Pupin, Esmeraldo Pupin Junior e Leticia Rodrigues Pupin, por todo caráter e apoio tanto na vida pessoal quanto nos estudos, fazendo sempre o melhor por mim.

Gostaria de agradecer também ao meu orientador Amarildo Tabone Paschoalini pela oportunidade e confiança em mim depositada, me auxiliando nesta dissertação.

Por último, Matheus Silva Proença, por todo conhecimento e auxílio prestado por ele.

RESUMO

Atualmente, em média, 40% da água tratada no Brasil é perdida devido a vazamentos ao longo da linha de distribuição, perdas aparentes, roubos e erros de leituras. Em meio a este cenário, a presente pesquisa, através de análises numéricas vibro-acústicas, buscou melhor compreender a propagação do sinal gerado pelo vazamento em dois diferentes tipos de solos, arenosos e argilosos, com diferentes graus de compactação. Foram realizadas também simulações com diferentes valores de amortecimento buscando compreender melhor os efeitos desse parâmetro na atenuação do sinal. Visando validar as simulações realizadas, se comparou os resultados obtidos com valores experimentais colhidos por outro autor, para isso foi necessário se trabalhar o sinal obtido por ele. Além disso, deixando a situação mais próxima da realidade, simulou-se o comportamento do sinal para camadas de pavimento do tipo PMF, com e sem base do tipo BGS. Para as simulações, estudou-se as propriedades mecânicas das camadas de solo e das camadas do pavimento asfáltico e implementou-se o modelo reológico, unidimensional, de Kelvin-Voigt. Conclui-se que o intervalo promissor para a detecção de vazamentos varia entre 10-1700Hz, a depender do grau de compactação do solo e das camadas presentes.

Palavras chaves: Detecção de vazamentos. Viscoelasticidade. Kelvin-Voigt. Geomateriais.

ABSTRACT

On average, 40% of treated water in Brazil is lost due to leaks along the distribution line, apparent losses, theft and reading errors. Thus, this research sought to better understand the propagation of the signal generated by the leak in two different types of soils, sandy and clayey, with different degrees of compaction through vibro-acoustic numerical analyses. Simulations were also performed with different damping values, in order to better understand the effects of this parameter on signal attenuation. To validate the simulations performed, the results obtained were compared with experimental values collected another author. However, it was necessary to work on the signal obtained by him. In addition, in order to bring the situation closer to reality, the signal behavior was simulated for PMF-type pavement layers, with and without BGS-type base. For the simulations, the mechanical properties of the soil layers and asphalt pavement layers were studied, and the Kelvin-Voigt one-dimensional rheological model was implemented. It is concluded that the promising range for detecting leaks varies between 10-1700Hz, depending on the degree of soil compaction and the layers present.

Keywords: Leak detection. Viscoelasticity. Kelvin-Voigt. Geomaterials.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 -	Representação esquemática da instalação de tubos prediais de água fria.	15
Figura 2 -	Curva de compactação para diferentes solos brasileiros.	17
Figura 3 -	Rolo compactador.	18
Figura 4 -	Compactador de placa vibratória.	18
Figura 5 -	Sistema de classificação de partículas.	19
Figura 6 -	Sondagem de Simples reconhecimento.	22
Figura 7 -	Relação entre o fator de amortecimento e a deformação cisalhante em solos argilosos.	26
Figura 8 -	Relação entre o fator de amortecimento e a deformação cisalhante em solos argilosos de acordo com a plasticidade.	26
Figura 9 -	Camadas do pavimento.	28
Figura 10 -	Aplicação de PMF com vibro acabadora.	31
Figura 11 -	Esquema de componentes em uma mistura asfáltica.	33
Figura 12 -	Relação fator de amortecimento e deformação cisalhante em cascalho.	35
Figura 13 -	Ondas Compressionais.	36
Figura 14 -	Ondas Cisalhantes.	37
Figura 15 -	Associação mola-amortecedor.	38
Figura 16 -	Ilustração das análises iniciais.	39
Figura 17 -	Influência da compacidade no nível de energia do sinal que se propaga até a superfície no solo arenoso.	44
Figura 18 -	Influência da consistência no nível de energia do sinal que se propaga até a superfície no solo argiloso.	45
Figura 19 -	Influência da profundidade no nível de energia do sinal que se propaga até a superfície no solo arenoso com diferentes valores N_{spt} .	48
Figura 20 -	Influência da profundidade no nível de energia do sinal que se propaga até a superfície no solo argiloso com diferentes valores N_{spt} .	49

Figura 21 -	Influência do coeficiente de amortecimento no nível de energia do sinal que se propaga até a superfície no solo arenoso e argiloso.	50
Figura 22 -	Comparativo da influência do amortecimento entre solo arenoso e argiloso.	51
Figura 23 -	Transformada de Fourier do sinal de saída	53
Figura 24 -	Comparativo dos resultados simulados com o experimental para o solo arenoso.	54
Figura 25 -	Esquema em série Kelvin-Voigt.	56
Figura 26 -	Influência do revestimento asfáltico no sinal que chega à superfície.	57
Figura 27 -	Influência da camada de base tipo BGS no sinal que chega à superfície.	58
Figura 28 -	Comparação entre sinal que chega superfície passando pelo solo arenoso compactado, com e sem revestimento asfáltico.	59
Figura 29 -	Comparação entre sinal que chega superfície passando pelo solo argiloso compactado, com e sem revestimento asfáltico.	60
Figura 30 -	Comparação do sinal que chega à superfície, entre diferentes configurações de camadas.	61

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -	Classificação dos solos quanto ao seu estado de compactação.	23
Tabela 2 -	Estimativa dos parâmetros médios dos solos pelo ensaio SPT.	24
Tabela 3 -	Coeficiente de Poisson para diferentes tipos de solos.	25
Tabela 4 -	Faixa de granulometria para PMF.	30
Tabela 5 -	Valores de MR de acordo com o tipo de PMF e agregado.	32
Tabela 6 -	MR para diferentes tipos de base.	33
Tabela 7 -	Massa específica aparente para diferentes tipos de PMF.	34
Tabela 8 -	Fator de amortecimento para revestimento asfáltico.	35
Tabela 9 -	Arranjos utilizados nas implementações numéricas.	43

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
BGS	Brita Graduada Simples
CAP	Cimento asfáltico de petróleo
CBR	Índice de Suporte Califórnia
DER	Departamento de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
e	Índice de vazios
E	Modulo de elasticidade
G	Modulo de cisalhamento [Pa]
K1	Parâmetro físico relacionado a desfasagem
K2	Parâmetro físico relacionado a amplitude
MR	Modulo de resiliência [Pa]
Ms	Massa da parte solida [Kg]
Mw	Massa de água [Kg]
n	Porosidade
NBR	Norma Brasileira
Nspt	Índice de resistência a penetração
P	Carga cíclica [N]
PMF	Asfalto pré mistura a frio
PMSP	Prefeitura do Município de São Paulo
PVC	Policloreto de vinila
Sa	Grau de aeração [%]
SNIS	<i>Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento.</i>
SPT	Teste padrão de penetração
Sw	Grau de saturação [%]
t	Altura do corpo de prova [mm]
Vp	Velocidade de propagação da onda elástica de compressão [m/s]
vs	Volume da fase solida [m^3]
Vs	Velocidade de propagação da onda elástica de cisalhamento [m/s]
vt	Volume total do sistema [m^3]
vv	Volume de Vazios [m^3]

v_w	Volume ocupado pela água [m^3]
ε_z	Deformação no eixo Z [m/m]
ρ	Massa específica do solo [Kg/m^3]
ρ_a	Massa específica do ar [Kg/m^3]
ρ_s	Massa específica do particulado [Kg/m^3]
ρ_w	Massa específica da água [Kg/m^3]
u	Coeficiente de Poisson
ξ	Coeficiente de amortecimento
σ_z	Tensão normal [Pa]
$\sigma_{elastica}$	Tensão elástica [Pa]
$\sigma_{viscosa}$	Tensão viscosa [Pa]
ΔH	Deslocamento horizontal [mm]

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	111
2. OBJETIVOS	122
3. INTRODUÇÃO TEÓRICA	13
3.1 PROCESSO DE INSTALAÇÃO DOS DUTOS DA REDE DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA	133
3.2 PROCESSO DE COMPACTAÇÃO DOS SOLOS	15
3.3 PARÂMETROS FÍSICOS DOS SOLOS	199
3.4 PAVIMENTO ASFÁLTICO	277
3.4.1 Introdução aos pavimentos	277
3.4.2 Propriedades Mecânicas das camadas asfálticas	311
3.5 PROPAGAÇÃO DE ONDAS SÍSMICAS	366
3.6 MODELOS CONSTITUTIVOS	377
4. METODOLOGIA	399
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	431
5.1 ANÁLISE DE SOLOS ARENOSOS E ARGILOSOS COM DIFERENTES NÍVEIS DE COMPACTAÇÃO (SEM ASFALTO)	433
5.2 ANÁLISE COM VARIAÇÕES DA COMPACTAÇÃO E PROFUNDIDADE.	477
5.3 ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO AMORTECIMENTO	499
5.4 COMPARATIVO DAS SIMULAÇÕES REALIZADAS COM EXPERIMENTO PRÁTICO	52
5.5 ANÁLISE COM CAMADA DE ASFALTO BASE	55
6 CONCLUSÃO	631
REFERÊNCIAS	655

1. INTRODUÇÃO

A água é um recurso natural de extrema importância para o meio ambiente e para todos os seres vivos; sem ela, a vida e o desenvolvimento humano se tornam impraticáveis. Com toda essa importância, tal recurso, finito, deveria ser muito bem conservado e gerido por todos, no entanto, alguns cenários presentes mostram uma realidade oposta a essa.

No Brasil, por exemplo, há, ainda, uma perda média de quase 40% de toda a água tratada (SECRETARIA NACIONAL DE SANEAMENTO AMBIENTAL – SNIS, 2020), estes índices abrangem perdas reais - vazamentos ao longo do sistema de distribuição -, e perdas aparentes - roubos e erros de leitura. Apesar das perdas serem inerentes a qualquer sistema de abastecimento de água, os índices atuais são alarmantes, fazendo com que haja uma exploração demasiada do recurso e elevando o custo final do serviço prestado.

A fim de mitigar essas perdas, empresas de distribuição de água estão, cada vez mais, interessadas em detectar, com maior agilidade e precisão, possíveis vazamentos, já que uma redução de perdas para 20% seria o suficiente para se ter ganhos na casa de bilhões de reais (CORREIO BRAZILIENSE, 2020).

Tendo isto em vista, vem se intensificando o estudo de métodos para detecção e localização de vazamento de água em dutos subterrâneos. Dentre os métodos atualmente aplicados, os métodos acústicos têm se destacado (FUCHS, 1991). Tais métodos, basicamente, consistem em detectar o sinal vibro-acústico que é gerado pelo próprio vazamento e se propaga até a superfície do solo ou até pontos de acesso à tubulação. Todavia, sabe-se que a profundidade e o meio em que o sinal se propaga afeta diretamente o resultado obtido na superfície do solo (PROENÇA, 2019).

Desta forma, o presente trabalho pretende analisar, numericamente, a atenuação do sinal que se propaga do vazamento até a superfície do maciço, devido às propriedades viscoelásticas do solo circundante e das camadas de asfalto superficiais.

Na Seção 3 será abordado os procedimentos para a instalação de dutos, a compactação dos solos e seus parâmetros físicos, o pavimento asfáltico e sua estrutura, e, por fim, será apresentada uma revisão bibliográfica sobre a propagação de ondas e Modelos Constitutivos. Na Seção 4 será retratada a metodologia utilizada, e na Seção 5 os resultados do estudo. Por fim, na Seção 6, será feita as conclusões e considerações finais.

2. OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho é, visando os métodos acústicos de detecção de vazamentos, analisar, numericamente, o comportamento dinâmico de diferentes tipos de solos, com diferentes estados de compactação, profundidade, e em diferentes faixas de frequências, através do modelo visco-elástico, unidimensional, de Kelvin-Voigt. A influência dinâmica das camadas asfálticas superficiais, no conjunto, serão, também, investigadas, a partir de uma modelagem viscoelástica.

3. INTRODUÇÃO TEÓRICA

O solo no qual o tubo está inserido afeta, diretamente, a propagação do sinal do vazamento até a superfície (SCUSSEL *et al.*, 2019; PROENÇA, 2019). Buscando, assim, analisar e melhor compreender estes efeitos na detecção de vazamentos, o presente estudo abordará dois tipos diferentes de solos - os solos arenosos e solos argilosos (coesivos), e analisará como o resultado deles se diferenciam.

Para se ter uma simulação que se adeque, satisfatoriamente, à realidade, é necessário, primeiramente, compreender como é o processo de instalação dos dutos e quais as características físicas e as propriedades dos solos comumente utilizados, assim como, os tipos comuns de manta asfáltica empregada.

3.1 PROCESSO DE INSTALAÇÃO DOS DUTOS DA REDE DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA

A instalação dos dutos da rede de abastecimento de água deve ser feita com base nas normas técnicas vigentes, definidas pela Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. Algumas normas referentes ao assentamento de tubulações de água são a NBR 5626 - *Instalação predial de água fria* - (ABNT, 1998), e a NBR 17015 - *Execução de obras lineares para transporte de água bruta e tratada, esgoto sanitário e drenagem urbana, utilizando tubos rígidos, semirrígidos e flexíveis*. - (ABNT, 2022).

Segundo a norma NBR 17015, a instalação de tubos de PVC rígidos para o abastecimento de água é feita através de valas. A largura destas valas depende de sua profundidade; assim, para valas de até 2 m de profundidade, recomenda-se uma largura de 0,6 m mais o diâmetro externo do tubo. Para valores de profundidade entre 2 m e 4 m, recomenda-se uma largura de 0,8 m, mais o diâmetro externo do tubo (NBR 17015, ABNT 2022).

De acordo com algumas informações técnicas de empresas privadas de saneamento básico do interior de São Paulo, levantadas por Proença (2019), aproximadamente, 60% da rede de abastecimento é constituída por tubulações de material PVC rígido, com 50 mm de diâmetro. Os diâmetros das tubulações variam no intervalo de 0,5 a 16 polegadas. Já a profundidade de instalação dos dutos fica entre 0,6 a 2,5m (PROENÇA, 2019).

Para se ter um suporte adequado para os dutos, com recalques, os leitos das tubulações devem ser, cuidadosamente, verificados e preparados, antes da etapa de reaterro. Como exemplo, em instalações onde a base da vala for constituída por solo mole, sem condições mecânicas para fornecer apoio duradouro às tubulações, se faz necessário projetar um berço especial – uniforme e compactado – com, no mínimo, 0,1 m de espessura, constituído de solo tipo SW e SP. (NBR 17015, ABNT 2022).

Quanto a etapa de reaterro, segundo a Secretaria de Transportes, geralmente, se utiliza o próprio material retirado no momento da escavação. Porém, se o mesmo for de baixa qualidade – granulação grossa, apresentando pedras, entulhos e/ou material orgânico, deve-se, então, utilizar solos de jazidas – áreas de empréstimos previamente caracterizadas (NBR 17015, ABNT 2022).

As camadas de solo até 0,3 m acima da tubulação devem ser bem controladas e compactadas, já a partir desse ponto o reaterro pode ser realizado com o solo do local e em condições naturais (NBR 17015, ABNT 2022).

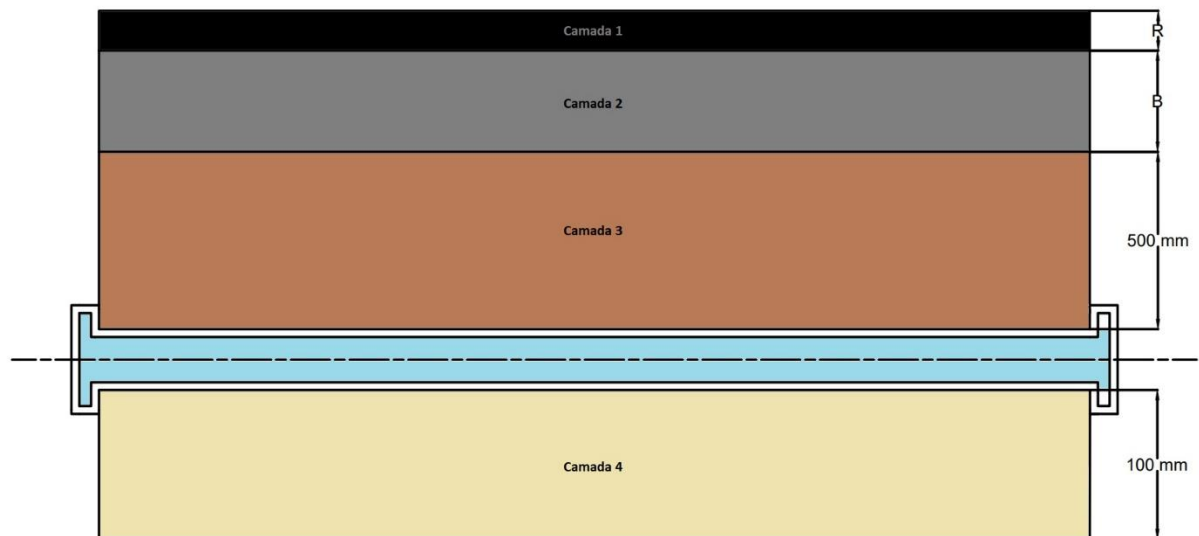
O solo retirado para a abertura das valas ou o solo transportado de jazidas encontram-se, em um primeiro momento, em um estado fofo e heterogêneo, com altos índices de vazios, o que os torna pouco resistentes e muito deformáveis. Estas características não são desejadas para a aplicação, pois, como afirma El Debs (2003), sem um apoio eficiente, desencadeia-se concentrações de tensão e momentos fletores nos tubos enterrados.

Devido a isso é indiscutível a importância do processo de compactação ainda na etapa de reaterro, pois este proporciona um rearranjo das partículas do solo, diminuindo os espaços vazios existentes, e, conseqüentemente, melhorando suas propriedades mecânicas, como rigidez e resistência, e homogeneizando as camadas. Na próxima Seção, será apresentado com maiores detalhes as etapas e diretrizes do processo de compactação.

Por fim, para o recapeamento asfáltico, em áreas urbanas asfaltadas, são introduzidas, após o preenchimento das valas, mais duas camadas: um material de base – que consiste em uma camada de 0,10 a 0,20 m de brita graduada compactada, ET-DE-P00/014 (DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM - DER/SP, 2006) – e, posteriormente a emulsão asfáltica, uma camada de 50 mm de massa asfáltica do tipo Pré Misturado a Frio (PMF) ET-DE-P00/025 (DER/SP, 2006).

Na Figura 1 encontra-se uma representação esquemática da instalação dos tubos prediais de água fria.

Figura 1 – Representação esquemática da instalação de tubos prediais de água fria.



Camada 1: Revestimento asfáltico; **Camada 2:** Base; **Camada 3:** Solo compactado; **Camada 4:** Berço.

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Todas as camadas e materiais citados nesta seção serão inseridos nas simulações numéricas realizadas.

3.2 PROCESSO DE COMPACTAÇÃO DOS SOLOS

O processo de compactação é normalmente realizado em camadas e o equipamento utilizado varia de acordo com a ocasião. A espessura de cada camada costuma ser de 0,3 m, sendo definida de acordo o material e o tipo da tubulação utilizada (ABNT, 2012).

Com o aumento da compactação, vemos um aumento da massa específica do solo, devido ao rearranjo de suas partículas, diminuindo os espaços vazios devido a eliminação do ar que ali estava anteriormente contido.

No processo de compactação, a umidade do solo é um dos parâmetros cruciais. Proctor (1933) notou que, em solos secos, com baixa umidade, há uma grande dissipação da energia de compactação devido ao atrito entre as partículas sólidas do geomaterial, fazendo, assim, com que os vazios não sejam reduzidos de forma satisfatória (PROCTOR, 1933). Em contrapartida, com umidades mais altas, este atrito se

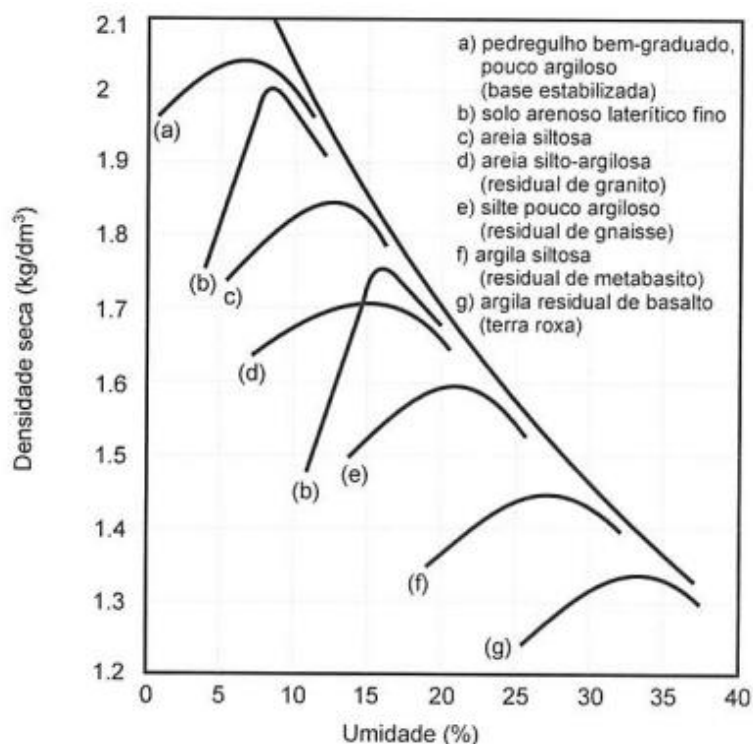
reduz e a saída de ar, do solo, é facilitada, ocasionando maiores valores de densidade para solos mais úmidos.

Por outro lado, para umidades muito elevadas, o ar presente nos vazios é envolvido pelas partículas de água, que o impede de sair, portanto o processo de compactação não consegue mais expulsar o ar presente no solo. Assim, para uma dada energia aplicada, há uma massa específica seca máxima, que está ocorrendo na umidade seca máxima.

A norma NBR 7182, que disserta sobre o controle de compactação, permite uma variação de -2% a +1% da umidade ótima do solo, e com grau de compactação de 95% em relação à massa da específica seca.

Os solos arenosos finos lateríticos (SAFL) são predominantes em pavimentação de baixo custo, já que possuem boas propriedades mecânicas, baixa umidade ótima e altos valores de densidade seca, levando a uma boa compactação. Enquanto os solos argilosos apresentam altas umidades ótimas e geralmente baixa densidade seca (PINTO, 2006). A Figura 2 apresenta a curva de compactação para diferentes tipos de solos brasileiros.

Figura 2 - Curva de compactação para diferentes solos brasileiros.



Fonte: Pinto (2006).

Na Figura 2, vemos diferentes tipos de solos variando a densidade seca de acordo com o percentual de umidade. Observa-se que a densidade aumenta até certo ponto e depois decai. O ponto de maior densidade é o ponto de umidade ótima.

Quando a compactação é mal realizada, ocorrerá não só um prejuízo no apoio mecânico da tubulação enterrada, mas também na detecção do sinal do vazamento, na superfície, tornando o processo mais custoso, como será evidenciado ao longo do presente trabalho.

Quando o valor de umidade for inferior à de umidade ótima, o solo, quando recebe uma aplicação com valores altos de energia de compactação, aumenta a densidade seca, porém quando os valores de umidade são superiores ao ótimo, quase não há aumento na densidade.

Normalmente, a escolha do compactador a se utilizar é feita avaliando o tipo de solo e a área a ser compactada. Rolos de carneiros, por exemplo, são utilizados para solos argilosos por evitar a formação de placa superficial e reduzir a ação do equipamento em profundidade. Já os rolos pneumáticos abrangem uma grande variedade de solos, tendo seu peso e pressão ajustados de acordo com a ocasião. Para solos granulares normalmente se utilizam plataformas vibratórias (PINTO, 2006).

Figura 3 - Rolo compactador.



Fonte: BERNUCCI *et al.*, 2008.

Figura 4 - Placa vibratória.

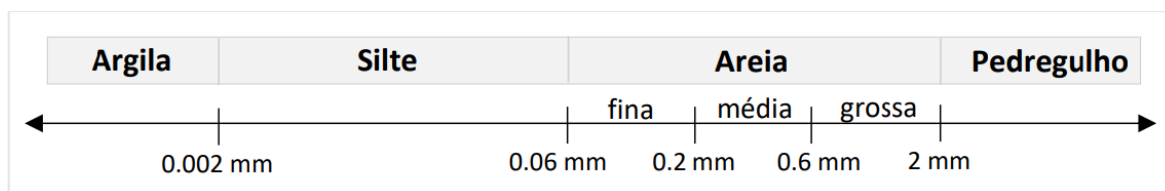


Fonte: União Locadora (2022)

3.3 PARÂMETROS FÍSICOS DOS SOLOS

No Brasil, devido a sua vasta extensão territorial, com variações climáticas, diversidade de relevo e intemperismo, encontramos diversos tipos de solo de acordo com o ambiente (PINTO, 2006). Como apresenta a NBR 6502, uma das maneiras de diferenciar os solos é de acordo com a sua granulometria, sendo ela dá menor para a maior, respectivamente: argila, siltes, areia (fina, média, grossa), cascalhos e pedregulhos (ABNT, 1995).

Figura 5 - Sistema de classificação de partículas.



Fonte: PROENÇA, 2019.

O formato dos grãos irá, também, influenciar no comportamento mecânico do solo. Nas argilas, por exemplo, as partículas são majoritariamente lamelares, apresentando então compressibilidade e plasticidade (CAPUTO, 1996).

Ademais, como se sabe, os solos não são formados apenas por partículas sólidas. Quando não saturados, os solos irão apresentar três fases: a fase sólida já citada, a fase gasosa, e a fase líquida, que ocupam os espaços vazios entre as partículas (PROCTOR, 1933). A proporção entre estas fases afeta diretamente as características e, consequentemente, o comportamento mecânico dos solos.

A massa específica, ρ , de um solo pode, então, ser calculada relacionando a proporção volumétrica de cada uma das três fases, como se segue (PINTO, 2006):

$$\rho = n \cdot S_w \cdot \rho_w + n \cdot S_a \cdot \rho_a + (1 - n) \rho_s \quad (1)$$

sendo n a porosidade, S_w o grau de saturação, ρ_w a massa específica da água, S_a o grau de aeração, ρ_a a massa específica do ar e ρ_s a massa específica do particulado.

Como apresentado, a massa específica do meio trifásico pode ser aproximada utilizando o conhecimento prévio de índices como: quantidade volumétrica de cada

fase, porosidade, índice de vazios, grau de saturação e teor de umidade, além das relações necessárias.

A porosidade visa quantificar a porcentagem de vazios em uma amostra de solo e pode ser definida como a razão volumétrica das fases, ou em função dos índices de vazios, como se segue:

$$n = \frac{V_v}{V_t} = \frac{e}{1 + e}; \text{ sendo } e = \frac{V_v}{V_s} \quad (2)$$

sendo, V_v é o volume de vazios no meio, V_t é o volume total do sistema sólido-fluido e V_s o volume da fase sólida. A heterogeneidade e a compactação do meio levam a uma ampla variedade de valores de porosidade. Porém, na mecânica dos sólidos, para fins de cálculo, normalmente se utiliza o valor médio.

Para solos parcialmente saturados, o volume da fase fluida é obtido através do S_w , grau de saturação, e S_a , grau de aeração.

$$S_w = \frac{V_w}{V_v} 100; \quad (3)$$

$$S_w + S_a = 1; \quad (4)$$

A definição de umidade em um meio poroso é dada pela razão entre o peso da água e o peso da parte sólida seca presentes em um determinado volume. Comumente é expresso em porcentagem, podendo ser relacionado ao grau de saturação.

$$w = \frac{M_w}{M_s} 100 = \frac{V_w \rho_w}{V_s \rho_s} 100 = e \left(\frac{\rho_w}{\rho_s} \right) S_w \quad (5)$$

sendo, w a umidade, M_w massa de água, M_s massa da parte sólida, V_w o volume de água.

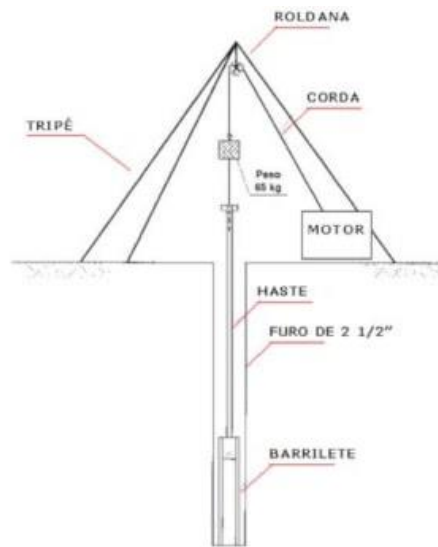
Então, a massa específica de um solo pode ser definida como apresentado pela Equação 1.

Quando se compara um solo saturado, com grande quantidade de água retida em seus vazios, com um solo não saturado, com grande quantidade de ar retida nos vazios, observa-se comportamentos distintos – o solo não saturado é muito mais compressível pela grande presença de ar. Quando os íons positivos, H^+ , da água entram em contato com os íons negativos do solo, se cria uma forte atração, formando uma película de água adsorvida, que devido à grande pressão gerada pelas forças eletrostáticas, se comporta como um semi-sólido, quase incompressível (CAPUTO, 1996).

Conhecer o solo e as suas características é de extrema importância para prever seu comportamento. Para que as simulações numéricas do presente trabalho representem, satisfatoriamente, a realidade é necessário, então, ter conhecimento sobre algumas propriedades do solo a ser simulado.

Uma das maneiras de obter isso é por meio do levantamento de dados experimentais. Um ensaio simples, barato e amplamente utilizado é o SPT, *Standard Penetration Test*, baseado na resistência à penetração. Este teste consiste, basicamente, em contabilizar o número de golpes necessários para fincar um amostrador padronizado em uma camada de 0,15 m, sendo desprezados os 0,15 m iniciais, ou seja, perfurar da profundidade 0,15 m até 0,30 m (PINTO, 2006). Na Figura 6 tem-se uma representação esquemática do ensaio citado.

Figura 6 - Sondagem de Simples reconhecimento



Fonte: PEREIRA, 2018.

No Brasil, algumas normas trazem as diretrizes dos procedimentos para realização adequada dos ensaios de sondagem, como por exemplo a norma NBR 6484 - Solo - Sondagens de simples reconhecimento com SPT - Método de ensaio (ABNT, 2001) e a norma NBR 8036 - Programação de sondagens de simples reconhecimento dos solos para fundações de edifícios (ABNT, 1983).

A NBR 6484, classifica os solos de acordo com o seu estado de compactação e os relaciona com o número de golpes obtidos no ensaio SPT, chamados de N_{SPT} .

Tabela 1. Classificação dos solos quanto ao seu estado de compactação.

Tipo de solo		Classificação	Nº de golpes N_{SPT}
Areias e solos arenosos	Compacidade	Fofa	< 4
		Pouco compacta	4-10
		Medianamente compacta	10-30
		Compacta	30-50
		Muito compacta	>50
Argilas e solos argilosos	Consistência	Muito mole	<2
		Mole	2-4
		Média	4-8
		Rija	8-15
		Dura	15-30
		Muito Dura	>30

Fonte: ABNT, 2001, *apud* PROENÇA, 2019.

Alguns pesquisadores, como Joppert (2007), correlacionaram o número de golpes obtidos com o ensaio SPT, com algumas propriedades médias dos solos (PROENÇA, 2019). Na Tabela 2 estão apresentadas algumas relações empíricas obtidas pelo pesquisador.

Tabela 2. Estimativa dos parâmetros médios dos solos pelo ensaio SPT.

Tipo de solo	Faixa do SPT N_{SPT}	Módulo de Elasticidade [MPa]	Peso específico		Ângulo de atrito efetivo [°]	Coesão efetiva [kPa]
			Natural [kN/m ³]	Saturado [kN/m ³]		
Areia pouco siltosa/ pouco argilosa	0 – 4	20 - 50	17	18	25	-
	5 – 8	40 - 80	18	19	30	-
	9 – 18	50 - 100	19	20	32	-
	19 - 41	80 - 150	20	21	35	-
	≥ 41	160 - 200	20	21	38	-
Areia média e fina muito argilosa	0 – 4	20	17	18	25	0
	5 – 8	40	18	19	28	5
	9 – 18	50	19	20	30	7.5
	19 - 41	100	20	21	32	10
Argila porosa vermelha e amarela	0 – 2	2 - 5	15	17	20	7.5
	3 – 5	5 - 10	19	17	23	15
	6 – 10	10 - 20	17	18	25	30
	≥ 10	20 - 30	18	19	25	30 – 70
Argila siltosa pouco arenosa	0 – 2	1	17	18	20	7.5
	3 – 5	1 - 2.5	18	19	23	15
	6 – 10	2.5 - 5	19	19	24	20
	11 - 19	5 - 10	19	19	24	30
	20 - 30	30 - 100	20	20	25	40
	≥ 30	100 - 150	20	20	25	50
Argila arenosa pouco siltosa	0 – 2	5	15	17	15	10
	3 – 5	5 - 15	17	18	15	20
	6 – 10	15 - 20	18	19	18	35
	11 - 19	20 - 35	19	19	20	50
	≥ 20	35 - 50	20	20	25	65
Turfa/ argila orgânica	0 – 1	0.4 - 1	11	11	15	5
	2 – 5	1 - 1.5	12	12	15	10
Silte arenoso pouco argiloso	5 – 8	80	18	19	25	15
	9 – 18	100	19	20	26	20
	19 – 41	150	20	20	27	30
	≥ 41	200	21	21	28	50

Fonte: Joppert Junior (2007), *apud* PROENÇA, 2019.

Os pesquisadores Ohsaki e Iwasaki (1973), através de um conjunto representativo de dados experimentais, relacionaram, também, os valores obtidos para o módulo de cisalhamento dinâmico com os valores de N_{SPT} . Com o trabalho, concluiu-se que, para pequenas deformações cisalhantes ($10^{-5} < \varepsilon < 10^{-4}$), uma boa correlação empírica, entre os parâmetros, pode ser obtida conforme as Equações 6 e 7.

$$\text{Solos arenosos:} \quad G = 650 \cdot N_{SPT}^{0.94} \text{ ton/m}^2 \quad (6)$$

$$\text{Solos argilosos:} \quad G = 1400 \cdot N_{SPT}^{0.71} \text{ ton/m}^2 \quad (7)$$

A comissão de normalização técnica da Petrobras propõe, também, correlação semelhante em sua norma N-1848 (2008).

$$G = 1200 \cdot N_{SPT}^{0.8} kPa \quad (8)$$

O coeficiente de Poisson, ν , será outro fator de grande importância para o estudo. Nos solos seu valor varia entre 0,3 e 0,5 (Petrobras N-1848, 2008). A Petrobras através da norma N-1848 (2008), relaciona o coeficiente de Poisson para diferentes tipos de solos.

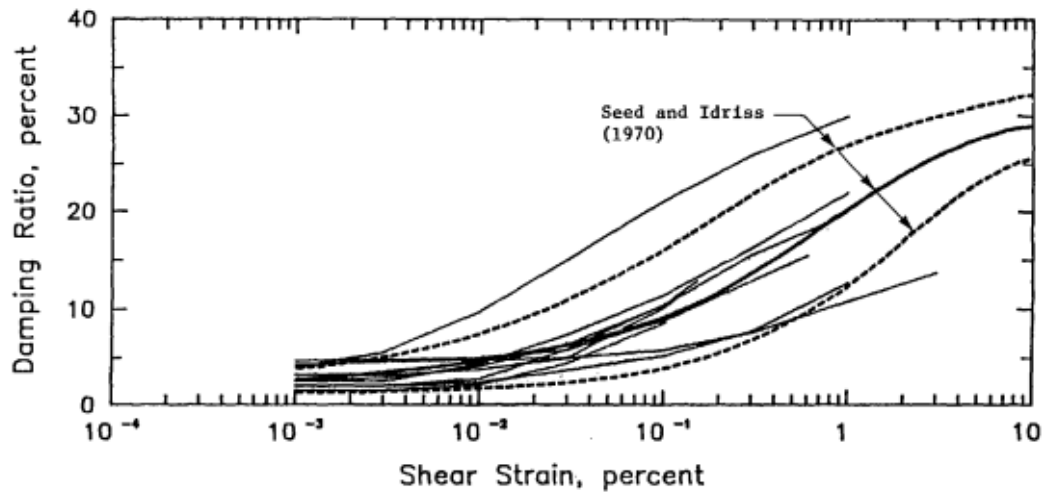
Tabela 3. Coeficiente de Poisson para diferentes tipos de solos.

Tipo de solo	Coeficiente de Poisson (ν)
Argila saturada	0.45 - 0.50
Argila parcialmente saturada	0.35 - 0.45
Areia densa ou pedregulho	0.40 - 0.50
Areia medianamente densa	0.30 - 0.40
Silte	0.30 - 0.40

Fonte: PETROBRAS – N-1848 (2008), *apud* PROENÇA, 2019.

Por fim, quanto ao fator de amortecimento (ζ), de acordo com os resultados experimentais obtidos pelos pesquisadores Sun, Golesorkhi e Seed (1988), pode-se variar, de acordo com as amplitudes de deformação, em um intervalo de 0.01 a 0.32, conforme mostra a Figura 7, a seguir.

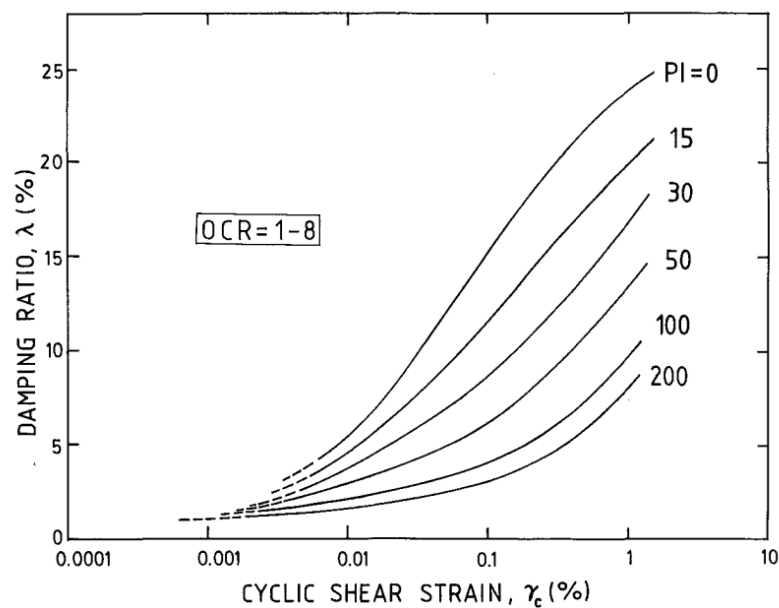
Figura 7 - Relação entre o fator de amortecimento e a deformação cisalhante em solos argilosos.



Fonte: Sun, Golesorkhi e Seed (1988).

Posteriormente, Vucetic e Dobry (1991), realizaram novos experimentos para obtenção do fator de amortecimento para o solo argiloso, agora variando os valores da plasticidade do solo. Os resultados encontrados ficam entre 0.01 a 0.25, conforme mostrado na Figura 8.

Figura 8 - Relação entre o fator de amortecimento e a deformação cisalhante em solos argilosos de acordo com a plasticidade.



Fonte: Vucetic e Dobry (1991)

Estes valores de referência apresentados para a densidade, os Módulos de Elasticidade e de cisalhamento dinâmicos, o coeficiente de Poisson e o fator de amortecimento, para os solos arenosos e argilosos, serão utilizados para se realizar as simulações propostas neste trabalho.

3.4 PAVIMENTO ASFÁLTICO

3.4.1 Introdução aos pavimentos

Assim como o solo, o asfalto segue algumas normas de instalação e composição. O pavimento é uma estrutura que pode apresentar múltiplas camadas de espessuras finitas, sendo construído sobre um solo preparado por meio da terraplanagem, a fim de melhorar as propriedades mecânicas de forma econômica, proporcionando boas condições de rodagem para os usuários. (BERNUCCI *et al.*, 2008)

No caso deste estudo, o foco será em asfaltos do tipo do pré-misturado a frio, PMF. A norma DER ET-DE-P00/025-2006 SP define o asfalto do tipo PMF como uma mistura que é executada à temperatura ambiente, espalhada e compactada a frio, dentro de uma usina apropriada. A mistura é composta por: Agregado mineral e ligante asfáltico. O PMF pode ser empregado para o nivelamento e regularização da camada, podendo também ser aplicado na camada intermediária, binder ou base. (DER, 2006)

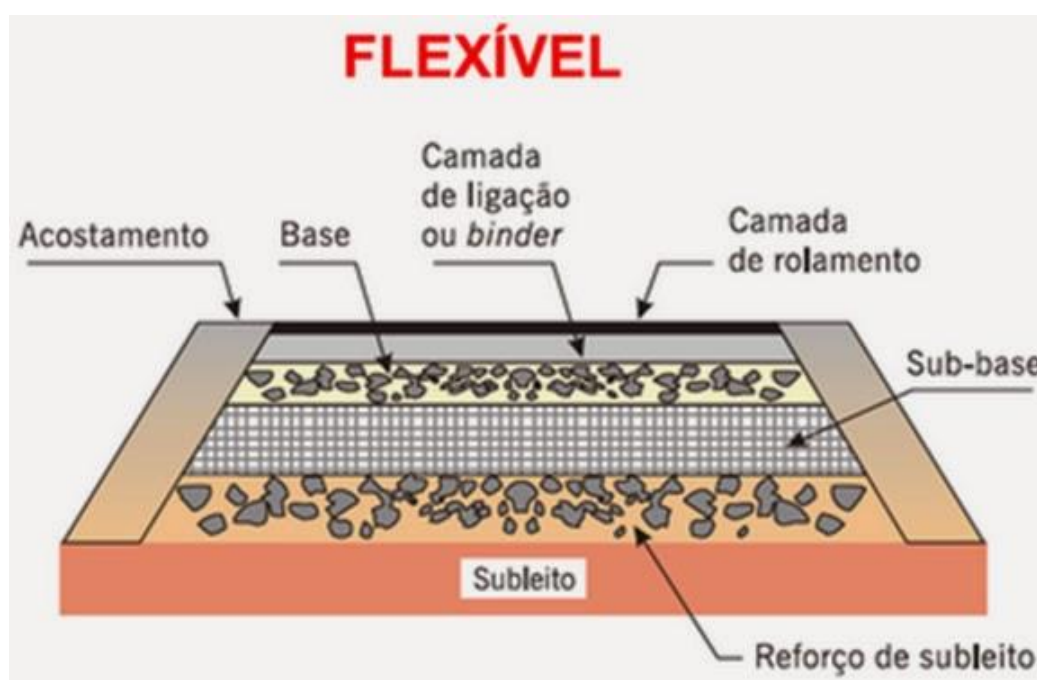
O PMF pode ser utilizado como camada de revestimento, ou ainda como camada intermediária com concreto asfáltico sobreposto, sendo utilizado em camadas entre 30 a 70 mm de espessura, compactada, variando com a granulometria e o tipo de serviço (ABEDA, 2001).

Os agregados da mistura podem ser graúdos ou miúdos. O graúdo é definido, pela norma NBR 7211, como grãos que passam pela peneira com abertura de malha de 75 mm e ficam retidos na peneira de 4,75 mm (ABNT NBR 7211). Este deve ser constituído de pedra britada ou seixo rolado britado, apresentando partículas limpas e duráveis (DER). Já o agregado miúdo é aquele que passa pela peneira de abertura de 4,75 mm e fica retido na peneira de 150 µm, podendo ser constituído de areia, pó-de-pedra ou mistura de ambos. O agregado miúdo deve apresentar pelo menos 55% de areia (ABNT NBR 12052).

Em síntese, se espera que os agregados deem a mistura a resistência necessária para suportar as tensões impostas na superfície e no interior do pavimento (BERNUCCI *et al.*, 2008)

Pavimentos flexíveis como o PMF, normalmente, contam com quatro camadas principais: revestimento, base, sub-base e reforço do subleito. Algumas camadas podem ser retiradas de acordo com o carregamento e fluxo de veículos no local. (BERNUCCI *et al.*, 2008). Como mostrado na Figura 9.

Figura 9 - Camadas do pavimento.



Fonte: BERNUCCI *et al.*, 2008.

O reforço do subleito é executado sobre o subleito, se tornando necessário quando o subleito apresenta baixa capacidade de suporte, assim reduzindo a camada de sub-base. O aumento da capacidade de suporte ocorre através da compactação. O subleito é considerado não apto para uso quando apresenta Índice de Suporte Califórnia, em inglês, *California Bearing Ratio* (CBR), maior ou igual a 2% (DNIT 137/2010).

Já a sub-base é a camada complementar à base, podendo ou não estar presente de acordo com as circunstâncias técnicas e econômicas. A sub-base deve apresentar características superiores à do reforço do subleito e ser devidamente compactada e

regularizada. A sua utilização busca reduzir a camada de base e, assim, diminuir custos. Esta camada é constituída por solos, misturas de solos e materiais britados (DNIT 139/2010).

A base, por sua vez, tem por finalidade oferecer o suporte estrutural para o pavimento, dissipando, também, a carga das camadas inferiores. A base é a principal camada, e caso seja mal executada pode comprometer todo o pavimento. Sua composição pode ser de brita, cascalho, escória, misturados ou não com cal, asfalto ou cimento. Para pavimentos flexíveis, caso do PMF, são estabilizadas por macadame hidráulico e betuminoso (DNIT 141/2010).

As bases granulares simples (BGS) são comumente aplicadas em pavimentos flexíveis, como PMF, e são usadas há muito tempo, tendo sido utilizadas em estradas do império romano (LAY, 1992). Atualmente a base granular ainda é muito utilizada em camadas de base e sub-base. Tanto para a base quanto para a sub-base os valores de espessura devem estar entre 0,10 m a 0,20 m (DER, 2006 ET-DE-P00/014).

O revestimento asfáltico é a camada superior, suas funções são: resistir às ações do tráfego, atenuar os esforços para camadas inferiores, impermeabilização e ainda garantir maior conforto e segurança (BERNUCCI *et al.*, 2008).

Os ligantes asfálticos a serem empregados devem ser do tipo emulsão asfáltica catiônica de ruptura média tipos RM-1C e RM-2C ou emulsão asfáltica catiônica de ruptura lenta, tipo RL-1C. (DER ET-DE-P00/025-2006 SP). Também podem ser empregados ligantes asfálticos emulsionados quando indicado no projeto, são eles do tipo: LA, LA-C e LA-E. (DER ET-DE-P00/025-2006 SP).

O revestimento asfáltico tipo PMF pode ser separado em 3 tipos: PMFA – pré misturado a frio aberto; PMFSD – pré misturado a frio semi aberto ou semi denso e PMFD – pré misturado a frio denso (DER/SP, 2006), sendo a diferença entre eles o número de vazios - os valores são respectivamente: maior que 20%, entre 10% e 20% e volume de vazios inferior a 10%. A composição da mistura deve seguir a Tabela abaixo:

Tabela 4 - Faixa de granulometria para PMF.

Peneira de Malha Quadrada		Designação							Tolerâncias
		% em Massa, Passando							
ASTM	mm	I	II	III	IV	V	VI	VII	
1½"	37,5	100	-	-	100	-	-		
1"	25,0	75 - 100	100	-	95 - 100	100	-		± 7%
¾"	19,0	50 - 80	75 - 100	100	70 - 90	95 - 100	100	100	± 7%
½"	12,5	-	-	75 - 100	-	-	95 - 100	85 - 100	± 7%
3/8"	9,5	25 - 50	30 - 60	35 - 70	35 - 60	35 - 70	45 - 80	70 - 90	± 7%
Nº 4	4,75	5 - 20	10 - 35	20 - 40	18 - 35	25 - 40	25 - 45	30 - 60	± 5%
Nº 10	2,0	0 - 10	5 - 20	10 - 20	10 - 20	10 - 20	15 - 20	20 - 45	± 5%
Nº 200	0,075	0 - 2	0 - 2	0 - 2	0 - 5	0 - 5	0 - 5	2 - 6	± 2%
Tipo de PMF		PMF Aberto			PMF Semi-denso			PMF Denso	

Fonte: (DER SP, 2006 ET-DE-P00/025).

Para que o revestimento asfáltico mostre bom desempenho é necessário a utilização de procedimentos corretos, mas, neste caso, o foco será direcionado para a aplicação do asfalto no solo, sua distribuição e compactação.

A mistura asfáltica, normalmente, é levada ao local de aplicação por meio de caminhões. O início da distribuição da mistura asfáltica deve ser precedido por um planejamento, contando com detalhes importantes como: Tipos de compactadores necessários, continuidade e sequência de aplicação, controle de tráfego, condições climáticas e de temperatura, entre outras.

Na distribuição deve ser utilizado vibro-acabadoras, para o melhor espalhamento e conformação da mistura no alinhamento, cotas e abaulamento definido. O equipamento recomendado para o espalhamento da mistura é a motoniveladora, que tem por finalidade nivelar e regularizar a camada. Para buracos e pequenos segmentos descontínuos é possível realizar o espalhamento manualmente.

A compactação da mistura asfáltica de revestimento busca diminuir o número de vazios, aumentar a estabilidade, suavizar e aumentar a vida útil do revestimento.

Figura 10 - Aplicação de PMF com vibro-acabadora.



Fonte: ABEDA, 2010.

3.4.2 Propriedades Mecânicas das camadas asfálticas

Assim como do solo, é necessário conhecer as propriedades mecânicas do revestimento asfáltico e das demais camadas, para que as simulações se aproximem satisfatoriamente da realidade.

As misturas asfálticas normalmente têm seu comportamento mecânico definido pelo Módulo de Resiliência, logo sendo importante para as estimativas de tensão e deformação no pavimento (CUNTO, 1998). O Módulo de Resiliência (MR) é semelhante ao Módulo de Elasticidade, expressando a relação entre as deformações recuperáveis e as tensões. A diferença entre o MR e o Módulo de Elasticidade está no tipo de aplicação de carga, sendo o seu valor obtido de carregamentos repetidos (CUNTO, 1998).

O ensaio para obtenção do Módulo de Resiliência é padronizado pela norma DNIT 135/2018 – ME, e deve ser realizado a uma temperatura de 25°C (DER,2018). O ensaio é realizado aplicando-se uma carga repetidamente, em seguida, medindo o deslocamento recuperável. Os corpos de prova devem apresentar diâmetro de 101,6 mm $\pm$ 3,8 mm e altura entre 35 mm e 70 mm.

Além do Módulo de Resiliência, o ensaio também determina valores para o módulo instantâneo, módulo total e o coeficiente de Poisson.

Para corpos de prova com diâmetro de 101,6 mm o valor do MR é dado por:

$$MR = \frac{P}{|\Delta H|t} (0,2692 + 0,9976v) \quad (9)$$

sendo, P a carga cíclica em Newtons, ΔH o deslocamento horizontal, t a altura do corpo de prova e v o coeficiente de Poisson.

O grupo OHL, Autopista Fernão Dias, realizou um estudo com o revestimento PMF com seus três tipos, avaliando o Módulo de Resiliência com o período de cura e variando o material do agregado entre Granito e Basalto (GRUPO OHL, 2011). Os valores obtidos estão dispostos na Tabela 5. Os valores da Tabela, são referentes ao tempo de cura de 28 dias.

Tabela 5 - Valores de MR de acordo com o tipo de PMF e agregado.

Agregado	MR Granito (MPa)	MR Basalto (MPa)
PMF Aberto	1500	1250
PMF Semi denso	1800	1800
PMF Denso	2000	2000

Fonte: GRUPO OHL

Os valores para a base podem ser encontrados na instrução de projeto, IP-08/2004, nela temos valores aproximados para o MR da base de três tipos distintos, sendo eles: Granular, Betuminosa e Cimentada (PMSP, 2004). Os valores são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 - MR para diferentes tipos de base

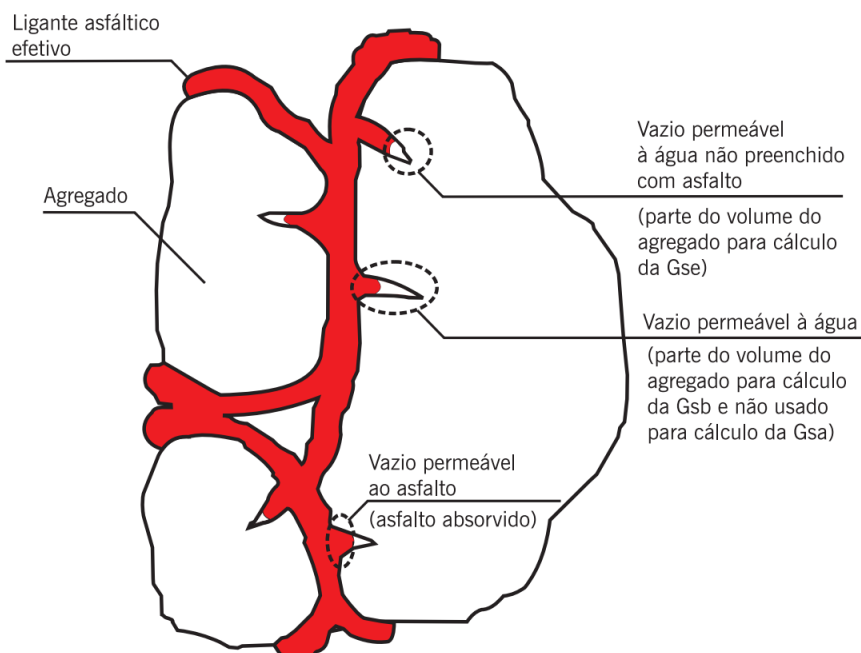
Tipo de Base	Módulo de resiliência (MPa)
Granular	100 a 500
Betuminosa	800 a 1000
Cimentada	5000 a 15000

Fonte: PMSP,2004

A base de menor valor MR é a granular, que não apresenta nenhum agente ligante. Já a base betuminosa e cimentada, apresentam elementos ligantes.

A massa específica do pavimento é outro fator muito importante para os estudos. Buscando entender melhor como é calculada para misturas asfálticas, na Figura 11 está demonstrado um esquema de mistura asfáltica.

Figura 11 - Esquema de componentes em uma mistura asfáltica



Fonte: (BERNUCCI *et al.*, 2008).

Como pode ser observado, a mistura asfáltica apresenta diversos vazios não preenchidos no seu interior, que influenciam diretamente na sua densidade.

Atualmente, a norma DNIT XXX/2020-ME define como deve ser realizado o ensaio para determinar a massa específica aparente de corpos de provas

compactadas e a densidade relativa aparente. Sendo elas os seguintes casos: corpos de prova com volumes de vazios menores ou igual a 7% e com absorção de água menor ou igual a 2%; corpo de prova com vazio menor ou igual a 7% e com absorção de água maior a 2%; corpo de provas apresenta vazios superiores a 7%.

A Tabela 7 apresenta valores de densidade para revestimento tipo PMF presentes no manual básico de emulsões asfálticas (ABEDA, 2010).

Tabela 7 - Massa específica aparente para diferentes tipos de PMF

Tipo de PMF	Massa específica (Kg/m³)
Aberto	1,90
Semi Denso	2,10
Denso	2,20

Fonte: ABEDA.

Já para a BGS, o ensaio utilizado para definir sua densidade aparente é o Índice de Suporte Califórnia, em inglês - *California Bearing Ratio* (CBR). Esse ensaio é aplicado para amostras de solos não trabalhadas (DNIT 172,2016).

De acordo com o fornecedor de BGS, Ideal Terra Plenagem, a brita graduada simples apresenta densidade média a seco de 1,65 kg/m³.

Os valores para o fator de amortecimento para o revestimento asfáltico do tipo PMF não foram encontrados na literatura, por isso optou-se, neste trabalho, por utilizar os valores conhecidos do asfalto tipo CAP.

Um estudo realizado, obteve a curva mestra do Módulo dinâmico com uso do ensaio de ressonância por impacto em misturas asfálticas (FREITAS, 2017) e levantou os valores para o fator de amortecimento de acordo com a temperatura. Para o corpo de prova utilizado, foi selecionado o ligante asfáltico tipo CAP 30/45 (FREITAS, 2017). Os valores obtidos estão dispostos na Tabela 8:

Tabela 8 - Fator de amortecimento para revestimento asfáltico

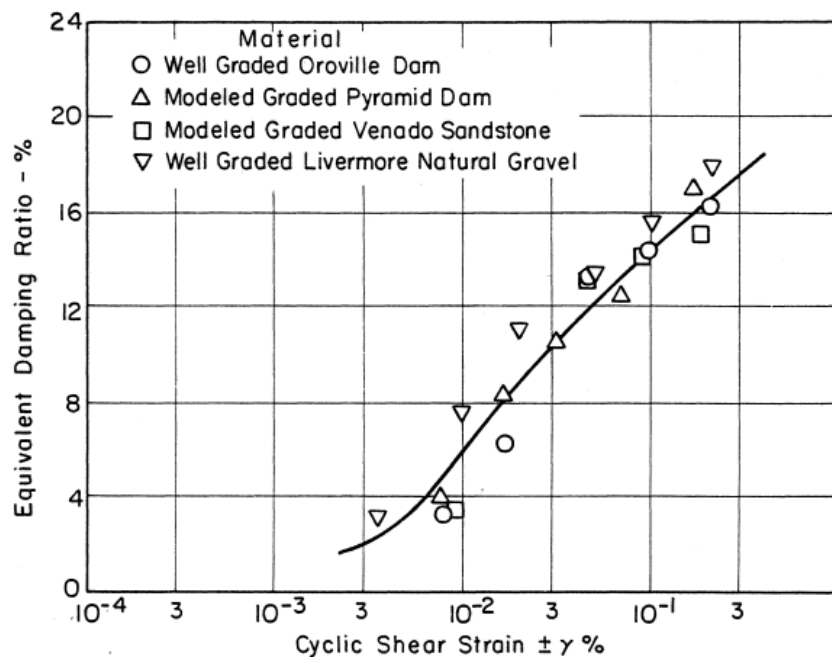
Temperatura	Modo 1-1	Modo 1-2
20°C	0,039	0,032
30°C	0,080	0,065

Fonte: Freitas, 2017

Devido a discrepância entre os métodos utilizados, e por esse estudo adotar a temperatura ambiente, 25° C, realizou-se o cálculo do valor médio entre os valores obtidos, chegando a um fator de amortecimento igual a 0,054.

Novamente o caso se repete para britas graduadas simples, então, se optou por utilizar valores obtidos para cascalho. A Figura 12 representa os resultados obtidos.

Figura 12 - Relação fator de amortecimento e deformação cisalhante em cascalho.



Fonte: Seed *et al.*, 1984.

Como pode ser visto, os valores para o fator de amortecimento de um solo composto por cascalho variam de 0.02 a 0.18.

Enfim, tem-se um intervalo de valores referência para as propriedades mecânicas dos materiais que serão simulados no presente trabalho. Antes de se estabelecer o Modelo Constitutivo que será empregado nas simulações dos materiais, na

Seção seguinte será discutido brevemente alguns conceitos sobre a propagação de ondas sísmicas

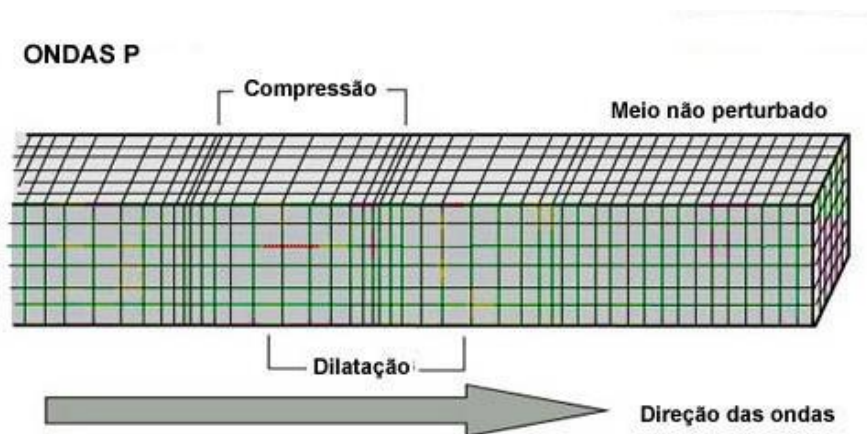
3.5 PROPAGAÇÃO DE ONDAS SÍSMICAS

As ondas sísmicas são ondas que se propagam devido a excitações geradas internamente ou na superfície do maciço, elas são de natureza mecânica e dependem das propriedades elásticas do solo (HUNTER; CROW, 2012).

As ondas que se propagam internamente no maciço são conhecidas como ondas de corpo ou de volume, e as de propagação superficial, como ondas de superfície.

Dentro do grupo das ondas de corpo, temos as ondas P, primárias ou longitudinais, e as ondas S, secundárias ou transversais. Nas ondas P a vibração ocorre paralelamente ao deslocamento da onda, e a sua propagação ocorre devido a sucessivas compressões e expansões do meio (FAJARDO, 2014), como mostra a Figura 13.

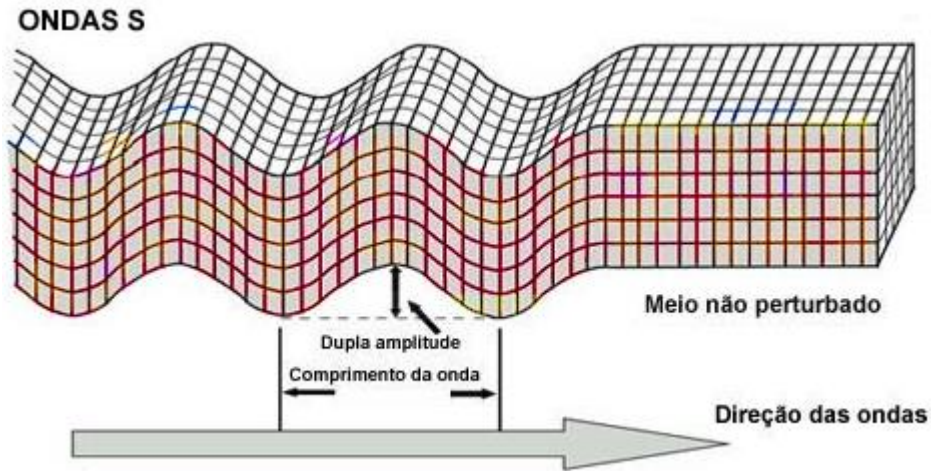
Figura 13 - Ondas Compressionais.



Fonte: BARTOLO, 2021.

Já nas ondas S, a vibração ocorre perpendicularmente a sua propagação e se propagam devido ao cisalhamento do corpo, como mostra a Figura 14.

Figura 14 - Ondas Cisalhantes.



Fonte: BARTOLO, 2021.

No contexto deste trabalho, parte da excitação gerada pelo vazamento de água no subsolo se propaga ao longo do maciço por meio destas ondas de corpo, até, então, chegar à superfície e ser detectada. A velocidade de propagação destas ondas depende, como pode ser visto na Equação 10, das propriedades do solo percorrido (GIACHETI, 2006).

$$V_p = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad ; \quad V_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (10)$$

Conforme as ondas de corpo se propagam, mecanismos de amortecimento, no solo, irão atuar sobre elas, dissipando parte da energia do sinal (PROENÇA, 2019). O presente trabalho utilizou um mecanismo viscoso (histerético) para representar este efeito de dissipação citado. Como será visto na Seção seguinte, utilizou-se nas simulações, um modelo reológico, viscoelástico de Kelvin-Voigt.

3.6 MODELOS CONSTITUTIVOS

Nesta seção será apresentado o Modelo Constitutivo utilizado na caracterização dos meios geológicos e das camadas superficiais de pavimentação, sobre o efeito de vibrações de baixa amplitude, como as excitações geradas por pequenos vazamentos.

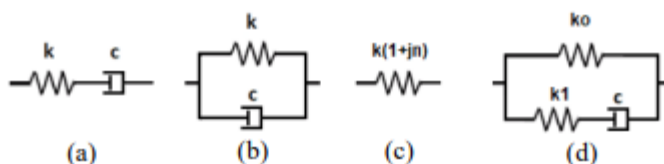
Como já visto, os solos são meios trifásicos, e o seu comportamento depende tanto da sua natureza, como de sua granulometria, umidade, densidade, e de fatores externos, como amplitude das solicitações, taxa de variação, duração e padrão de carregamento (PINTO, 2006).

Em 1997, Di Benedetto e Tatsuoka classificaram o solo em quatro domínios diferentes, conforme a amplitude da deformação. No caso da pesquisa proposta, é de interesse abordar apenas as pequenas amplitudes - que são as geradas pelos vazamentos. Assim, para o primeiro domínio, com intervalos de deformação na ordem de 10^{-5} , o comportamento dos solos pode ser considerado quase elástico linear, no entanto, a presença de forças não conservativas no problema real abordado é presumível (PROENÇA, 2019).

A dependência do comportamento dinâmico dos solos com a frequência de excitação, a amplitude e a taxa de deformação, o teor de água e os índices de vazios, sugere, para uma modelagem mais legítima, características visco-elásticas para o problema (MERIBOUT, 2008, *apud* PROENÇA, 2019). Assim, para a simulação dos solos e da camada superficial de pavimentação será utilizado um modelo visco-elástico clássico, que busca atender as propriedades viscosas presentes nos líquidos e as propriedades elásticas do sólido.

Na literatura temos alguns modelos reológicos para descrever o material visco-elástico. Os modelos clássicos, normalmente, podem ser caracterizados por simples elementos mecânicos, como molas e amortecedores associados de diferentes formas (NAVARRO, 2017). A Figura 15 mostra alguns exemplos de associações:

Figura 15 - Associação mola-amortecedor



Fonte: PROENÇA, 2019

O Modelo de Maxwell consiste em uma associação em série de uma mola e um amortecedor, como pode ser visto na Figura 15(a). Já o modelo de Kelvin-Voigt é composto por uma mola e um amortecedor em paralelo, sendo um modelo considerado simples, assim como o de Maxwell. Porém, diferente do modelo anterior, ele é

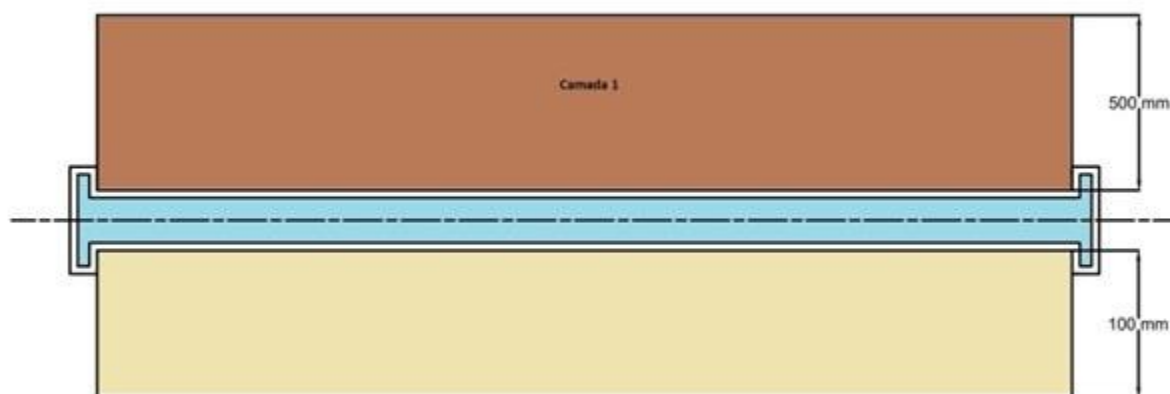
válido para baixas frequências. Como a vibração gerada por um vazamento é de baixa frequência, o modelo mais simples que melhor se encaixa ao problema é o modelo de Kelvin-Voigt (PROENÇA, 2019).

Na literatura podemos encontrar algumas pesquisas, que modelam o solo, utilizando o modelo Voigt, por exemplo, um estudo de casos de compressibilidade e assentamento (DAS,1993), e de cálculo da propagação de ondas dinâmicas no solo e sua dissipação de energia (BANKS; HU; KENZ,2010).

4. METODOLOGIA

As simulações numéricas realizadas neste trabalho procederam de uma análise unidimensional, com movimentos relativos apenas no eixo z. As fronteiras laterais das camadas de solo foram idealizadas com extensão infinita e sem influência na resposta do meio. A Figura 16 ilustra o arranjo adotado.

Figura 16 - Ilustração das análises iniciais sem asfalto.



Camada 1: Solo compactado;

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

O solo foi modelado como um sólido de Voigt - um Modelo Constitutivo linear viscoelástico. As vibrações transmitidas para o meio são geradas por vazamentos na base do maciço, e consistem, essencialmente, de ondas compressoriais (P) - deslocamentos verticais, com sucessivas compressões e expansões do solo. Este sinal

acústico gerado se propaga, então, da base até a superfície, e é, enfim, medido pelos sensores.

A Equação Constitutiva do solo caracterizada por Voigt é:

$$\sigma_z(z, t) = \sigma^{elástica} + \sigma^{viscosa} \rightarrow \sigma_z(z, t) = E \cdot \varepsilon_z + \eta \frac{\partial \varepsilon_z}{\partial t} \quad (11)$$

na qual, σ_z é a tensão normal no eixo z, E é o módulo de elasticidade dinâmico, η a viscosidade longitudinal, e ε_z a deformação existente.

A Equação de compatibilidade, que relaciona a deformação elástica com o deslocamento das partículas do meio, é expressa como:

$$\varepsilon_z = \frac{\partial w}{\partial z} \quad (12)$$

Sabe-se que a equação de propagação da onda deve satisfazer o equilíbrio de forças internas. Desta forma, tem-se:

$$\rho \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} \quad (13)$$

Desenvolvendo as equações anteriormente relacionadas, chegamos, finalmente, na equação do movimento vibratório unidimensional do sólido visco-elástico de Voigt. Pode-se observar que a equação obtida é uma equação diferencial parcial de terceira ordem no espaço-tempo.

$$\rho \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} - E \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} - \eta \frac{\partial^3 w}{\partial z^2 \partial t} = 0 \quad (14)$$

Solucionando, para uma onda harmônica, a equação diferencial ordinária de terceira ordem no domínio da frequência, temos:

$$w(z, t) = W(z, \omega) \cdot e^{i\omega t} = w_0 \cdot e^{[-k_2 z + i(\omega t - k_1 z)]} \quad (15)$$

Esta solução foi encontrada e discutida por Kolsky (1964) e Kramer (1996). Sendo K_1 e K_2 parâmetros relacionados a defasagem e amplitude do sinal, respectivamente. Na solução proposta pelos pesquisadores, K_1 e K_2 assumem a seguinte relação:

$$k_1 = \left[\frac{\rho \omega^2}{2E(1 + 4\xi^2)} (\sqrt{1 + 4\xi^2} + 1) \right]^{0,5} \quad (16)$$

$$k_2 = \left[\frac{\rho \omega^2}{2E(1 + 4\xi^2)} (\sqrt{1 + 4\xi^2} - 1) \right]^{0,5} \quad (17)$$

sendo ρ a densidade do solo, ξ o fator de amortecimento e ω a frequência.

Como discutido por Kramer, o valor de K_1 deve ser estritamente positivo, enquanto o de K_2 negativo, para que, assim, a equação tenha sentido físico. O termo K_2 é responsável pela atenuação da exponencial, enquanto o K_1 controla o atraso do sinal.

Sabe-se que a compactação dos solos afeta diretamente a rigidez e, conseqüentemente, a resposta dinâmica do meio, assim como altera a velocidade de propagação das ondas no mesmo, vide Equação 9.

Para cada grau de compactação praticado nas simulações, teremos diferentes valores para as propriedades elásticas e viscosas. Como discutido na Seção 3.3, os pesquisadores Ohsaki e Iwasaki (1973), com uma base massiva de dados experimentais, relacionaram, de maneira empírica, o módulo de cisalhamento (G) com o Índice de Resistência à Penetração (N_{SPT}) de diversos solos trabalhados.

Conhecido, então, o coeficiente de Poisson, é possível relacionar, de forma aproximada, também, o Módulo de Elasticidade (E) com o N_{SPT} , sabendo que:

$$E = 2G(1 + \nu) \quad (18)$$

Utilizando um coeficiente de Poisson médio igual a 0,3, chega-se às seguintes expressões para os solos arenosos e argilosos:

$$\begin{aligned}\text{Solos arenosos: } E &= 16,573.10^6 N_{spt}^{0,94} [Pa] \\ \text{Solos argilosos: } E &= 35,696.10^6 N_{spt}^{0,71} [Pa]\end{aligned}\tag{19}$$

Estas expressões foram também propostas por Proença (2020).

As variações na quantidade relativa de cada fase do meio - sólida, líquida e gasosa -, assim como na granulometria das partículas sólidas, também provocam mudanças expressivas na resposta dinâmica dos solos.

Ao mensurar e relacionar as quantidades volumétricas das fases existentes, é possível obter diversos índices físicos, como: porosidade (n), grau de saturação (S_w), grau de aeração (S_a) e teor de umidade (w). Assim, conhecido estes índices é possível calcular a massa específica final do geomaterial, como apresentado na Equação 1.

Um outro importante parâmetro na dinâmica dos materiais é o parâmetro relacionado ao mecanismo de amortecimento. O fator de amortecimento, ζ , está ligado à dissipação viscosa do solo e exerce grande influência no processo de atenuação da amplitude da onda propagada.

Como já estudado na Seção 3.3, de acordo com os resultados experimentais obtidos pelos pesquisadores Sun, Goleorkhi e Seed (1988), o fator de amortecimento pode variar em um intervalo de 0.01 a 0.32.

Nas simulações numéricas realizadas no presente trabalho, investigou-se a influência da compactação sobre a energia do sinal do vazamento, na superfície, em dois tipos de solos: solos arenosos e solos argilosos. Os estados de compactação e consistência estudados foram selecionados segundo os índices de resistência à penetração, N_{SPT} , apresentados no anexo A da Norma NBR 6484. A profundidade das valas de instalação dos dutos variou de 0.5 m a 2.5 m. O sinal do vazamento foi simulado, inicialmente, com um sinal chirp de 10 - 2000 Hz.

Nas primeiras simulações as camadas asfálticas foram omitidas, e, em um segundo momento, aplicadas como camadas adicionais a camada de solo. O asfalto foi também implementado como um material viscoelástico de Kelvin-Voigt, e as suas propriedades seguiram os intervalos de confiança tratados na Seção 3.4.2.

Na seção seguinte é apresentado e discutido os resultados das investigações numéricas realizadas. Todas as implementações foram feitas no *Software* MATLAB.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 ANÁLISE DE SOLOS ARENOSOS E ARGILOSOS COM DIFERENTES NÍVEIS DE COMPACTAÇÃO (SEM ASFALTO)

Para a análise dos efeitos da compactação sobre a energia do sinal do vazamento que se propaga até a superfície, utilizou-se dois tipos de solos: solos arenosos e solos argilosos, para uma vala com profundidade de 0,5 m, inicialmente. Além disso, utilizou-se um fator de amortecimento constante com valor de 0,3.

Foram, então, simulados, a partir dos intervalos do ensaio SPT referenciados na Norma ABNT NBR 6484 - anexo A, cinco diferentes estados de compactação, para cada solo. Nas simulações, relacionou-se os valores de N_{SPT} com o Módulo de Elasticidade e a densidade dos geomateriais. Na Tabela 9 constam os arranjos utilizados nas simulações.

Tabela 9 - Arranjos utilizados nas implementações numéricas.

Continua

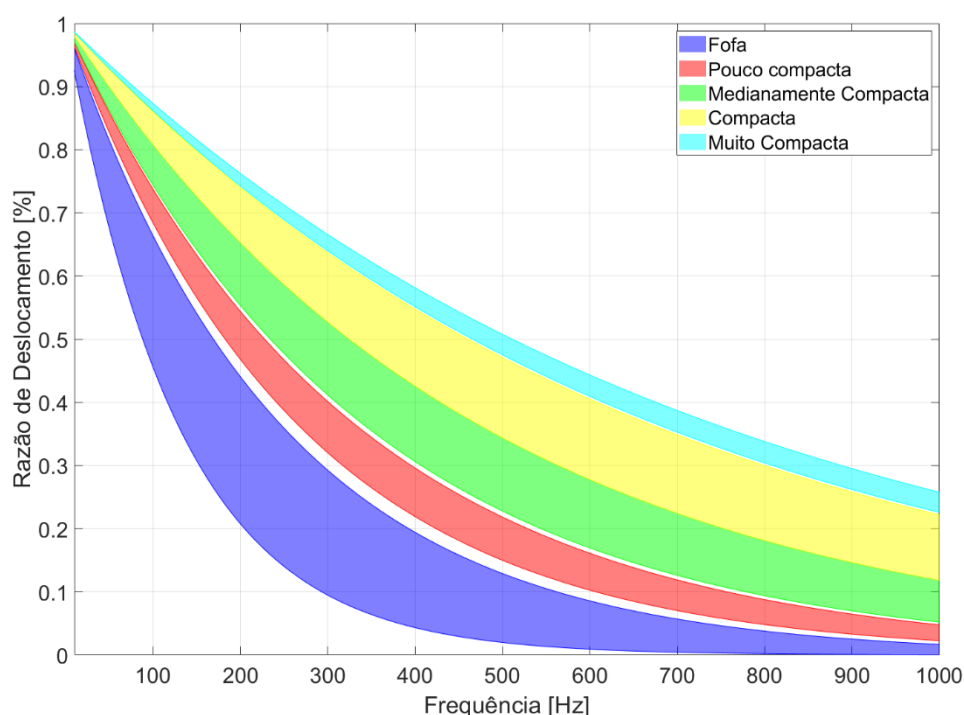
Solo	Designação	Intervalo do índice de resistência à penetração [N_{spt}]	Densidade [kg/m^3]
Arenoso	Fofa	1 - 4	1700
	Pouco compactada	5 - 8	1800
	Medianamente compacta	9 - 18	1900
	Compacta	19 - 40	2000
	Muito compacta	41 - 50	2000
Argiloso	Muito mole	1 - 2	1700
	Mole	3 - 5	1800
	Média	6 - 10	1900

Continuação			
Argiloso	Rija	11 - 19	1900
	Dura	20 - 30	2000
Conclusão			
Fonte: Elaborado pelo próprio autor.			

Na Figura 17 encontram-se os resultados obtidos para o solo arenoso. Esses valores se referem à porcentagem do sinal inserido, na base, que, realmente, chega à superfície.

Como a designação de cada estado de compactação acontece dentro de um intervalo de N_{SPT} , os gráficos foram plotados em bandas, o que representa todo o intervalo de uma dada designação.

Figura 17 - Influência da compacidade no nível de energia do sinal que se propaga até a superfície no solo arenoso.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Já com os primeiros resultados é possível notar a grande influência que a compacidade tem sobre a energia do vazamento que chega à superfície.

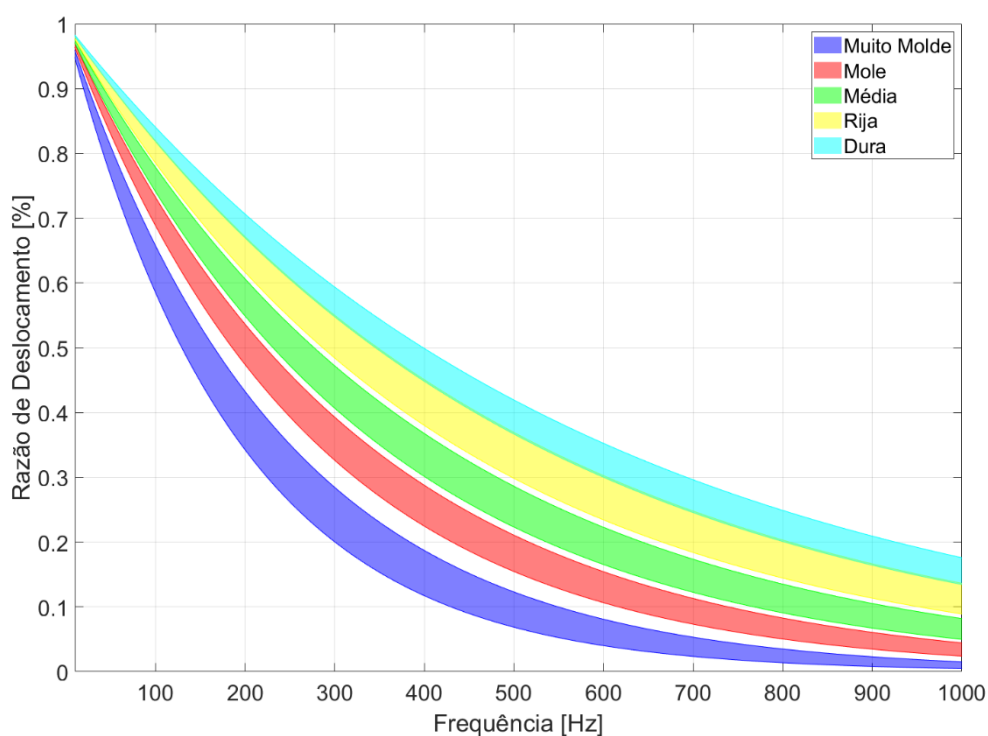
Selecionando, como referência, a frequência de 400 Hz, os pontos de máximos e mínimos de cada banda, partindo da azul, apresentaram uma diferença de 351%, 35%, 39%, 30% e 5%, respectivamente no sinal que chega à superfície.

Analisando os valores, vemos na última faixa que o aumento da compactação quase não afeta o percentual que chega à superfície, já nas demais vemos uma diferença significativa.

Assim, observa-se que, o aumento do grau de compactação do solo resulta em uma menor perda do sinal. Nota-se que o crescimento do percentual de energia na superfície não é linear com o aumento do N_{SPT} .

Na Figura 18 encontram-se os resultados obtidos para os solos argilosos.

Figura 18 - Influência da consistência no nível de energia do sinal que se propaga até a superfície no solo argiloso.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Selecionando, novamente, a frequência de 400 Hz como referência, e comparando os pontos máximos e mínimos de cada banda de N_{spt} do solo, iniciando da faixa em azul escuro até a azul clara, vemos uma diferença de 60%, 28%, 22%, 18% e 11%, respectivamente na energia do sinal que chega à superfície.

Novamente percebemos que para valores de N_{SPT} alto, onde o solo está bem compactado, a diferença entre os percentuais não é tão discrepante quanto para baixos valores de N_{SPT} (solos sem compactação ou levemente compactados).

Para os dois tipos de solos trabalhados é evidente que o estado de compactação assume grande importância para propagação do sinal até a superfície. Além disso, vemos que o solo se comporta como um filtro passa-baixa, com uma atenuação exponencial das altas frequências. Por isso as investigações vibro-acústicas devem ser realizadas com enfoque nas baixas frequências.

Na comparação entre os solos, observa-se que ambos apresentam características semelhantes, mudando apenas a taxa do decaimento do sinal, e os percentuais do sinal que chega à superfície de acordo com N_{SPT} , ou seja, os resultados indicam que o tipo de solo tem impacto na intensidade da frequência transmitida para a superfície.

Para os extremos do solo arenoso, a amplitude do sinal tem uma diferença de 13,5 vezes o menor percentual, já para os extremos do solo argiloso essa diferença é de 4,3 vezes o menor percentual. Logo, uma boa compactação do solo arenoso gera maiores diferenças que no solo argiloso, porém em casos em que o solo não é compactado o solo argiloso apresenta melhores resultados. Em outras palavras, o solo arenoso sofre uma maior influência da compactação quando comparado com o coesivo. Isto pode estar relacionado a maior densidade seca do solo arenoso e uma menor umidade ótima, permitindo uma melhor compactação.

Essa conclusão está em concordância com o trabalho de Hennigar (2013), que destacou que solos com predominância de areia conduzem melhor o som em comparação com solos argilosos (Hennigar, 2013).

Fica, então, evidente, já com estas primeiras simulações, que a etapa de compactação na atividade de reaterro é de fundamental importância para diminuição de custos futuros, seja para facilitar a localização de vazamentos, ou para o apoio adequado das tubulações. De acordo com El Debs (2003) uma boa compactação dos aterros laterais é essencial para o apoio da tubulação, diminuindo as concentrações de tensão e consequentemente o momento fletor no tubo.

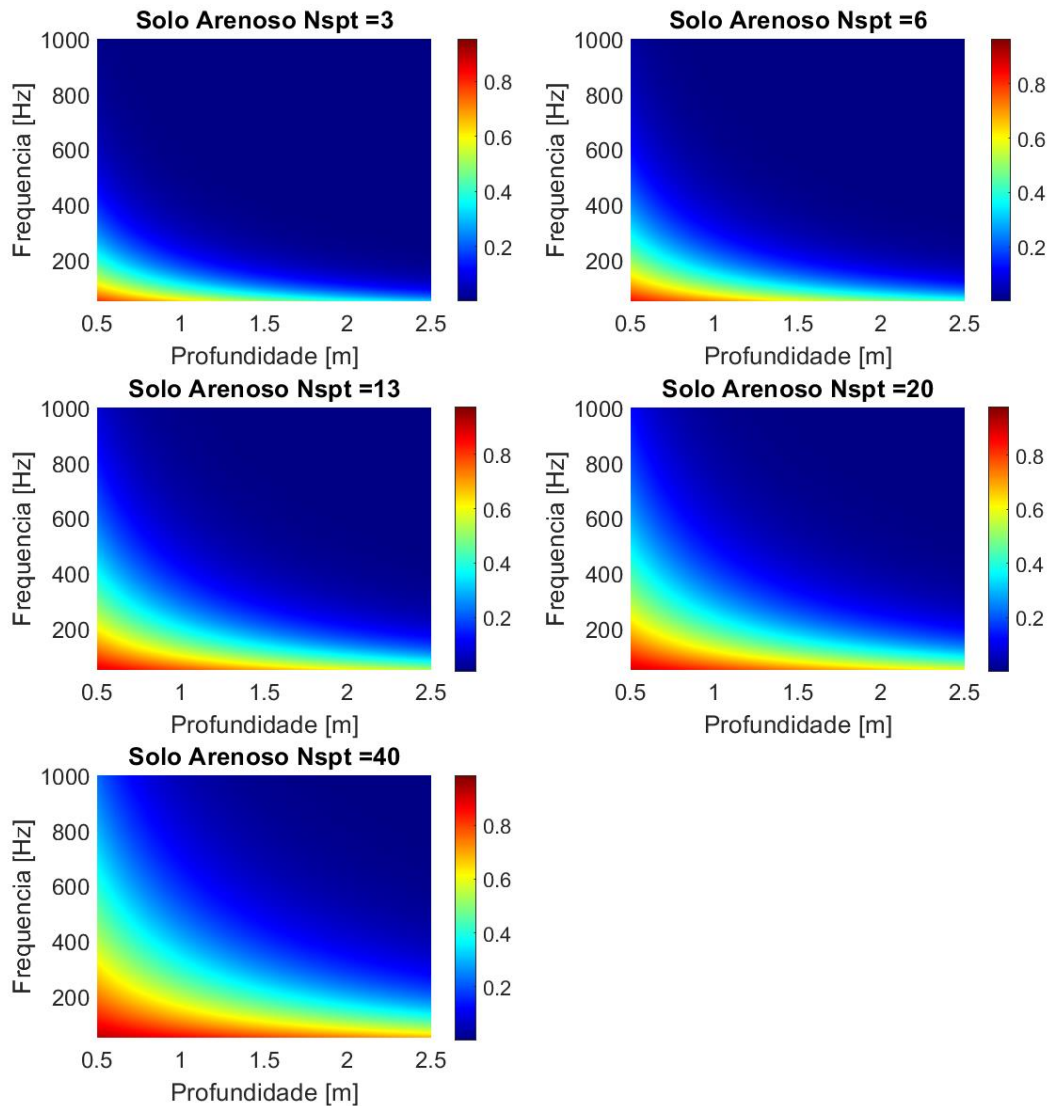
5.2 ANÁLISE COM VARIAÇÕES DA COMPACTAÇÃO E PROFUNDIDADE.

Diferente do primeiro caso no qual o valor da profundidade da tubulação era fixo, nesta segunda etapa, variou-se o parâmetro em um intervalo de 0 a 2,5 m, juntamente com a frequência para um dado valor de N_{SPT} . Para estas simulações utilizou-se, novamente, o fator de amortecimento constante e igual a 0,3.

De acordo com o valor médio de cada intervalo da designação apresentado na NBR 6484, foram implementados cinco casos de compactação, para o solo arenoso e o argiloso. O objetivo dessa simulação é verificar, também, os efeitos da profundidade do tubo na amplitude do sinal que chega até a superfície.

A Figura 19 representa o solo arenoso com diferentes valores de N_{SPT} . Por ser um gráfico tridimensional, diferente dos gráficos anteriores, o percentual do sinal que chega à superfície é retratado com uma escala de cores.

Figura 19 - Influência da profundidade no nível de energia do sinal que se propaga até a superfície no solo arenoso com diferentes valores N_{SPT} .



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

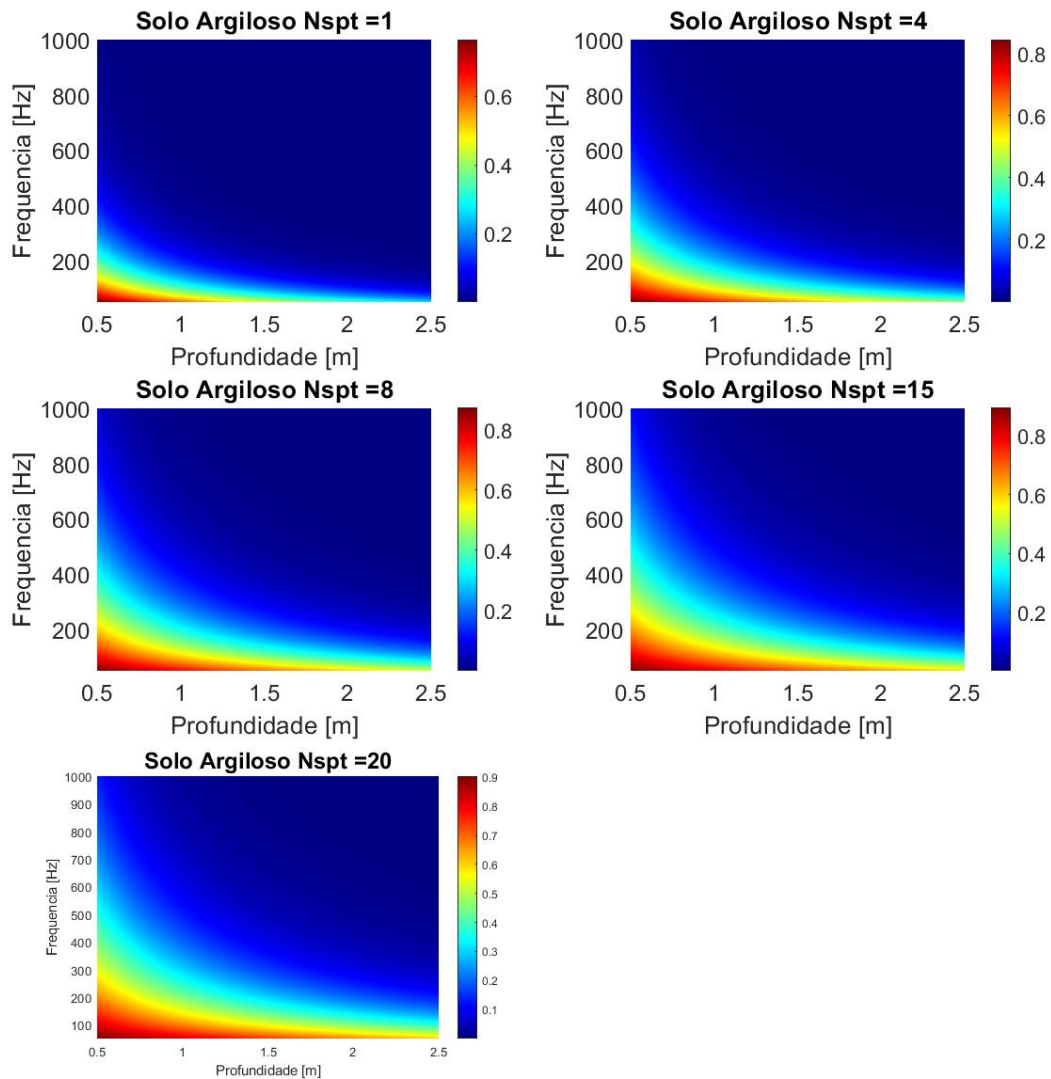
Basicamente, quanto mais profundo for a tubulação menor o percentual do sinal que chega à superfície. A redução do sinal é dada pela exponencial de K_2 pela profundidade, ou seja, a taxa de redução ocorre de acordo com K_2 e a profundidade.

Porém, como dito anteriormente, quanto mais compactado o solo, menor a perda de sinal, o que leva a percentuais maiores para mesma profundidade e frequência. Além disso, as curvas de cores seguem perfis exponenciais com a variação dos parâmetros investigados.

Já o solo argiloso apresenta maiores valores de Módulo de Elasticidade para o mesmo N_{SPT} , com isso, ele obtém maiores valores percentuais do sinal que chega à

superfície. A equação empírica aplicada mostra que o solo argiloso é mais facilmente compactado do que o solo arenoso. A Figura 20 apresenta os resultados para o solo argiloso com diferentes valores de N_{SPT} .

Figura 20 - Influência da profundidade no nível de energia do sinal que se propaga até a superfície no solo argiloso com diferentes valores N_{spt} .



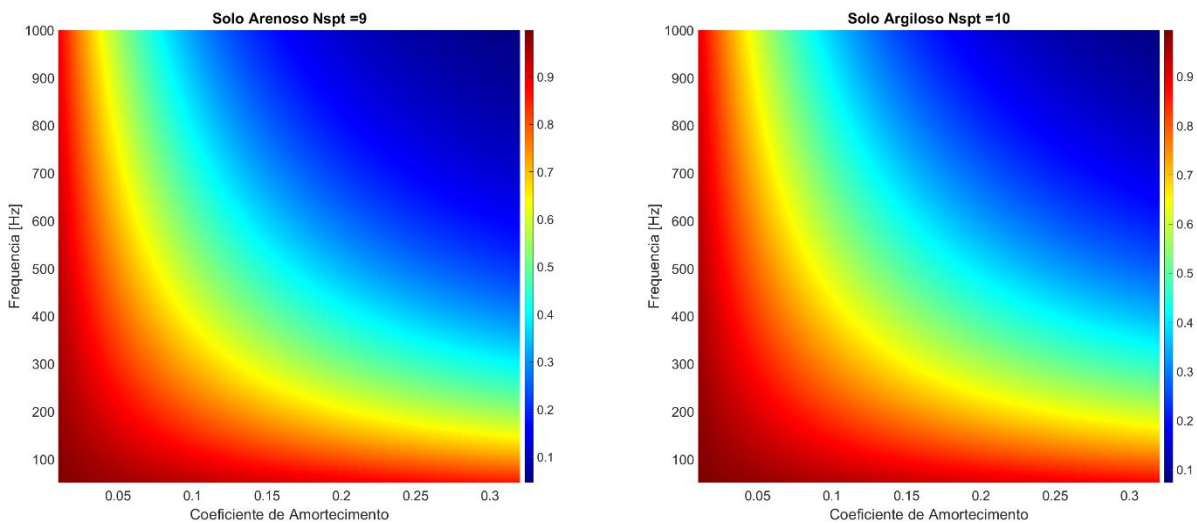
Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

5.3 ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO AMORTECIMENTO

Nesta subseção, focou-se na influência do amortecimento sobre a razão da amplitude do sinal do vazamento que chega à superfície para ser detectada. Para as investigações, fixou-se os valores de profundidade, o N_{SPT} e a densidade do solo, variando, apenas, a frequência de excitação e o amortecimento.

Para os solos estudados por Sun, Goleorkhi e Seed (1988), o amortecimento variou na faixa de 0,01 a 0,32. Portanto, adotou-se este mesmo intervalo para as simulações do presente trabalho. A profundidade utilizada foi de 0.5 m, a densidade $\rho = 1900 \text{ kg/m}^3$ e, o $N_{\text{SPT}} = 9$ para o solo arenoso e $N_{\text{SPT}} = 10$ para o solo argiloso. A Figura 21 apresenta a distribuição dos resultados obtidos.

Figura 21 - Influência do coeficiente de amortecimento no nível de energia do sinal que se propaga até a superfície no solo arenoso e argiloso.



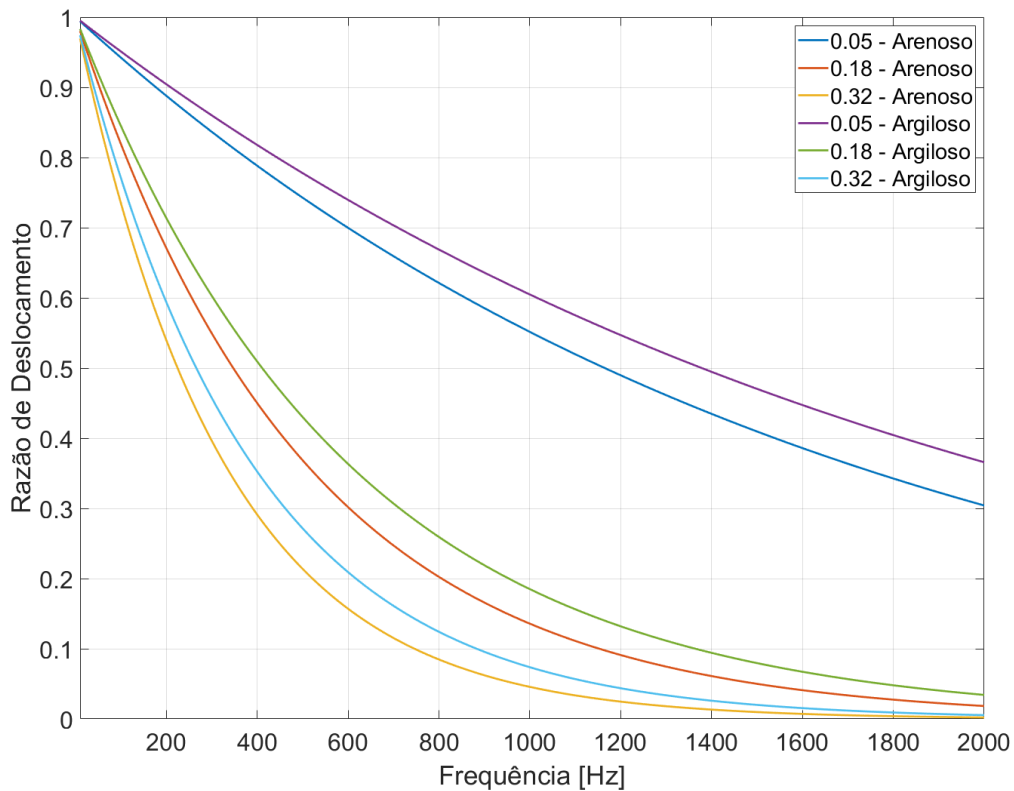
Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Observa-se que a tendência de ambos os gráficos é semelhante, ou seja, o amortecimento afeta da mesma forma ambos os solos. Além disso, nota-se que o amortecimento atenua o sinal de forma muito mais agressiva, em comparação com os demais parâmetros investigados anteriormente. Com um pequeno aumento absoluto do seu valor, o percentual de sinal que chega à superfície reduz drasticamente. Comparando a Figura 21 com as Figuras 19 e 20, vemos que o crescimento da atenuação sofreu mais influência com o aumento do coeficiente de amortecimento do que com o aumento da profundidade da vala.

Portanto, nos solos com valores elevados de amortecimento, a identificação do vazamento fica prejudicada, enquanto baixos valores facilitariam na detecção.

Para três níveis de amortecimento: baixo ($\zeta=0.05$), médio ($\zeta=0.18$) e alto ($\zeta=0.32$), comparou-se o comportamento dos solos arenosos e argilosos, como apresentado na Figura 22.

Figura 22 - Comparativo da influência do amortecimento entre solo arenoso e argiloso.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Comparando o percentual do sinal que chega à superfície, na frequência de 400Hz, para o amortecimento $\zeta=0.05$, houve uma variação de 4 % do solo argiloso para o arenoso; para $\zeta=0.18$, uma variação de 12%, enquanto para $\zeta=0.32$, uma variação de 17%.

Apesar da diferença percentual aumentar conforme o aumento do amortecimento, ao observar-se o gráfico fica claro que as curvas para um dado amortecimento para os dois solos têm comportamento semelhante, logo pode-se dizer que a diferença percentual entre os sinais ocorre devido as demais propriedades do solo.

Entretanto, em campo, haverá uma variação entre os mecanismos de amortecimento do solo arenoso em relação ao solo argiloso. E um dos fatores responsáveis, como mencionado por Caputo (1996), será a diferença de granulometria existente. Enquanto nos pedregulhos, solos arenosos e siltsos predominam partículas arredondadas, com forma poliédrica, nos solos argilosos, há um domínio de partículas lamelares, que proporcionam maior compressibilidade e a plasticidade a eles (CAPUTO, 1996). Assim, o atrito sólido será diferente.

Também podemos notar que, para valores de amortecimento baixos, a curva do sinal que chega à superfície, em relação a frequência, tende a se tornar uma reta, devido ao aumento de K_2 com o aumento do amortecimento.

5.4 Comparativo das simulações realizadas com experimento prático.

Por fim, com interesse de investigar a precisão do modelo numérico proposto e a validade de suas simplificações adotadas, comparou-se os resultados previamente obtidos com um teste experimental, realizado em um ambiente controlado.

A bancada de testes utilizada foi desenvolvida por Proença (2019) e consiste em uma caixa de madeira compensada, com dimensões 0,6m x 0,6m x 1,0m, preenchida com areia mediantemente compactada, peneirada e seca ao ar, por 24 horas.

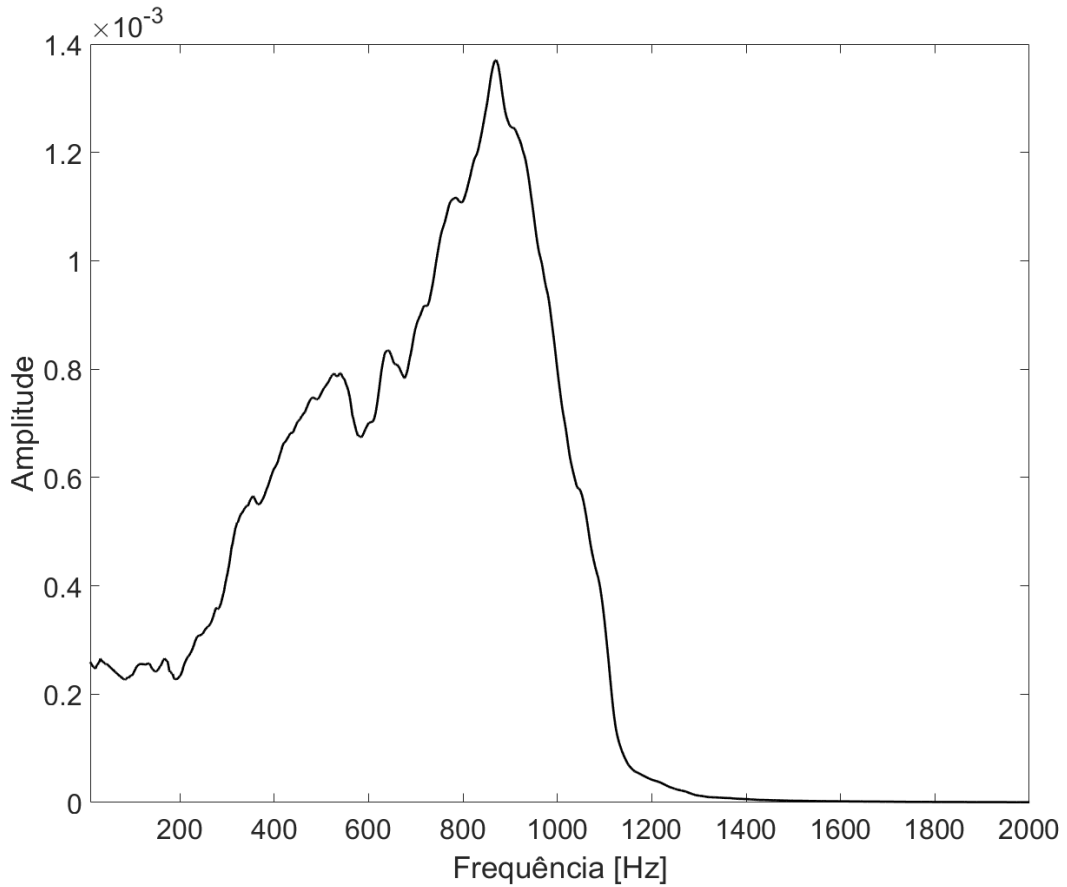
A excitação do vazamento foi simulada por um transdutor de força instalado a uma profundidade de 0,4 m. O sistema foi simplesmente instrumentado por dois acelerômetros piezoelétricos, um colocado na superfície do solo, acima do vazamento, para a medição do sinal que se propaga até a superfície, e outro acoplado ao transdutor para monitorar o sinal gerado por ele. A Figura 23 apresenta a bancada utilizada.

Os dados experimentais coletados foram previamente filtrados por um filtro passa-banda, com frequência de corte inferior 100Hz e a superior 1000Hz. A comparação dos dados numérico e experimentais foram feitos no domínio da frequência. Para isso calculou-se a FFT dos dados experimentais de entrada e saída, como mostra a Equação 20. Todo o processamento de sinais foi realizado no *software* MATLAB.

$$F(k) = \sum_{n=0}^{N-1} f(n) \cdot e^{-i\left(\frac{2\pi}{N}\right) \cdot k \cdot n} \quad (20)$$

Após normalizou-se as FFT, pois assim possamos comparar as amplitudes entre dois sinais diferentes, visto que agora eles refletem a energia contida em cada componente da frequência, removendo a interferências externas.

Figura 23 – FFT do sinal de saída



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Um filtro de média móvel também foi aplicado em ambos os sinais experimentais processados para se reduzir o efeito de eventos intermitentes coletados.

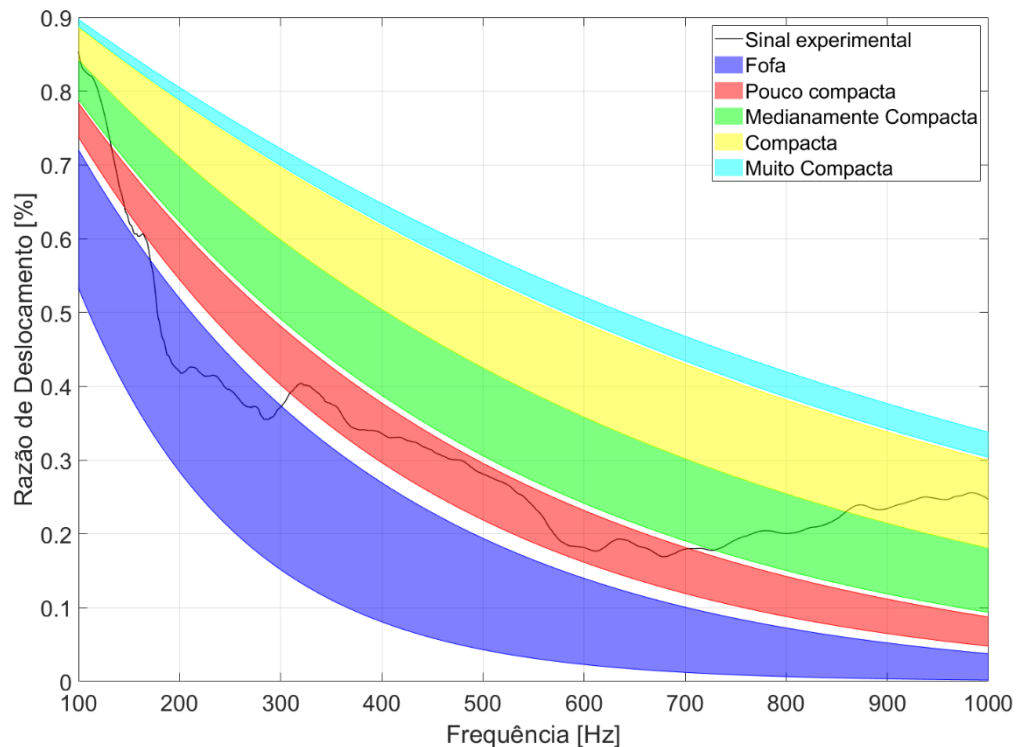
A Equação 21 o cálculo da Função de Resposta em Frequência (FRF) experimental, sendo $Y(\omega)$ é a transformada rápida de Fourier do sinal captado pelo sensor e $X(\omega)$ transformada rápida de Fourier do sinal de entrada. Por meio da FRF calculou-se a razão de amplitudes experimental.

$$H_{xy}(\omega) = \frac{Y(\omega)}{X(\omega)} \quad (21)$$

A FRF consiste evidenciar os ganhos ou defasagem de um dado sinal ou sistema em numa certa faixa de frequência.

Enfim, a Figura 24 compara o gráfico da razão de deslocamento pela frequência com as bandas de acordo com os graus de compactação do solo arenoso, com a curva da razão de amplitudes obtida, experimentalmente, para a areia trabalhada.

Figura 24 - Comparativo dos resultados simulados com o experimental para o solo arenoso.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

É possível observar na Figura 23 que a curva experimental está, por boa parte, dentro das faixas inferiores de compactação – banda azul e vermelha –, como era desejado. Porém, para frequências acima de 700Hz, a curva para de seguir a mesma tendência do modelo numérico.

Por se tratar de uma areia medianamente compactada, pode-se dizer que os resultados das simulações numéricas foram satisfatórios, uma vez que os dados experimentais se encontram dentro das bandas inferiores, e apresentando tendências semelhantes.

É importante lembrar que algumas diferenças eram esperadas, pois as equações empíricas que deram base ao modelo referenciavam solos arenosos, contendo uma pequena porcentagem de silte e argila em sua constituição.

Logo, as simulações realizadas até aqui se demonstram eficientes na descrição do perfil de atenuação e na quantificação do sinal, em função da frequência, que chega até superfície. Supondo que não se conhecesse o grau de compactação do solo, e nem a sua composição, poderíamos dizer, por meio destes resultados, que o

solo se encontra mediamente compactado, e esta seria uma descrição satisfatória do estado real do maciço.

5.5 ANÁLISE COM CAMADA DE ASFALTO E BASE

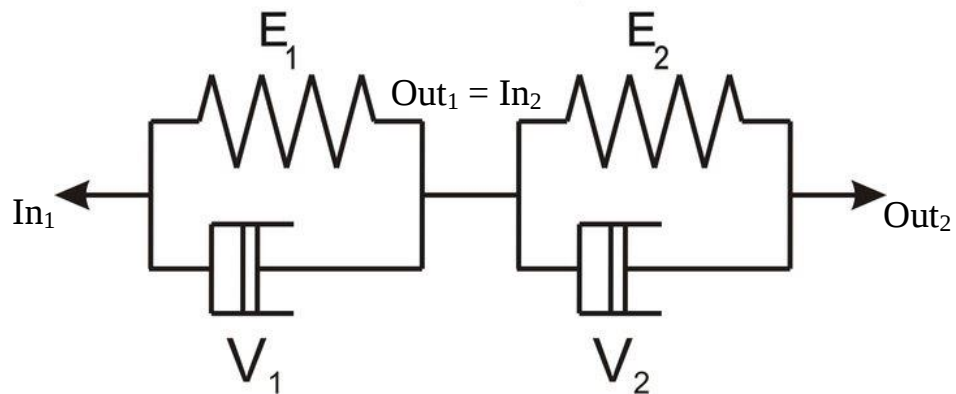
Nessa seção serão adicionadas as camadas de pavimento sobre o solo arenoso e argiloso, buscando obter uma simulação mais próxima do real, visto que em cidades, normalmente, a tubulação de distribuição de água está abaixo de um solo com asfalto.

Para isso, considerou-se as seguintes camadas: Revestimento, base e subleito. O subleito nesse caso é o solo compactado que abriga a tubulação, seguindo os dados apresentados em seções anteriores. A base foi considerada uma camada de solo granular do tipo BGS, sem a presença de concreto ou agentes ligantes. Os valores utilizados para os cálculos foram: $E = 300$ MPa (o valor médio do intervalo para BGS), densidade $\rho = 1,5$ g/cm³ e amortecimento $\xi = 0,05$.

O revestimento asfáltico, por sua vez, foi considerado do tipo PMF, utilizando valores médios de suas propriedades mecânicas obtidas em outros trabalhos, os quais foram: $E = 1500$ Mpa, densidade $\rho = 2,34$ g/cm³ e amortecimento $\xi = 0,056$. O PMF conta com camadas que variam de 30 a 70 mm de espessura, compactada, sendo, então, utilizado o valor médio do intervalo, 50 mm. Ele é válido para o Módulo de Resiliência e fator de amortecimento.

Para a utilização de mais de uma camada no sistema, optou-se por realizar uma associação, em série, do modelo de Kelvin-Voigt, sendo cada modelo composto por uma mola e um amortecedor conectados em paralelo. Nessa associação, a entrada do sistema é conectada à camada superior do primeiro modelo, e a saída do primeiro modelo é conectada à camada superior do segundo modelo. A figura 25 demonstra a associação.

Figura 25 - Associação de dois modelos de Kelvin-Voigt em série.

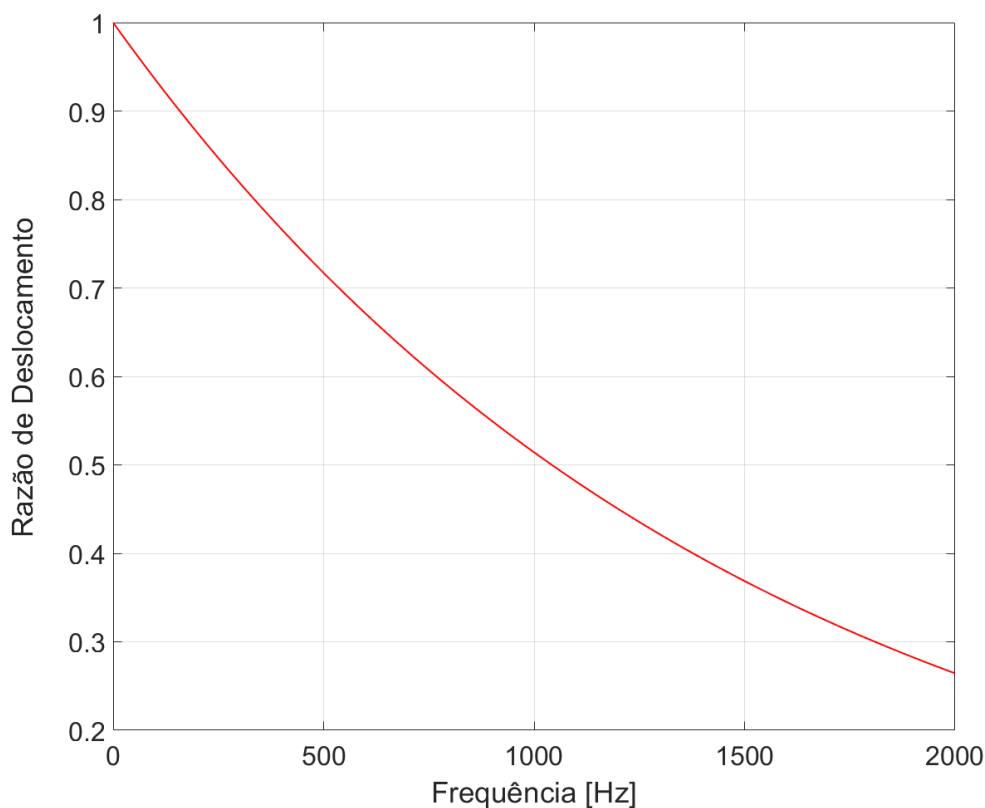


Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Primeiramente, simulou-se a camada de revestimento sem a presença da base e do subleito, para analisarmos seu comportamento isolado, verificando assim o percentual de sinal que chega à superfície, caso o vazamento fosse logo abaixo da camada de asfalto. Nessa situação o resultado obtido é o representado pela Figura 26.

Diferente dos demais gráficos apresentados, este apresenta apenas uma linha que descreve o percentual do sinal que chega à superfície de acordo com a frequência.

Figura 26 - Influência do revestimento asfáltico, tipo PMF, no sinal que chega a superfície.



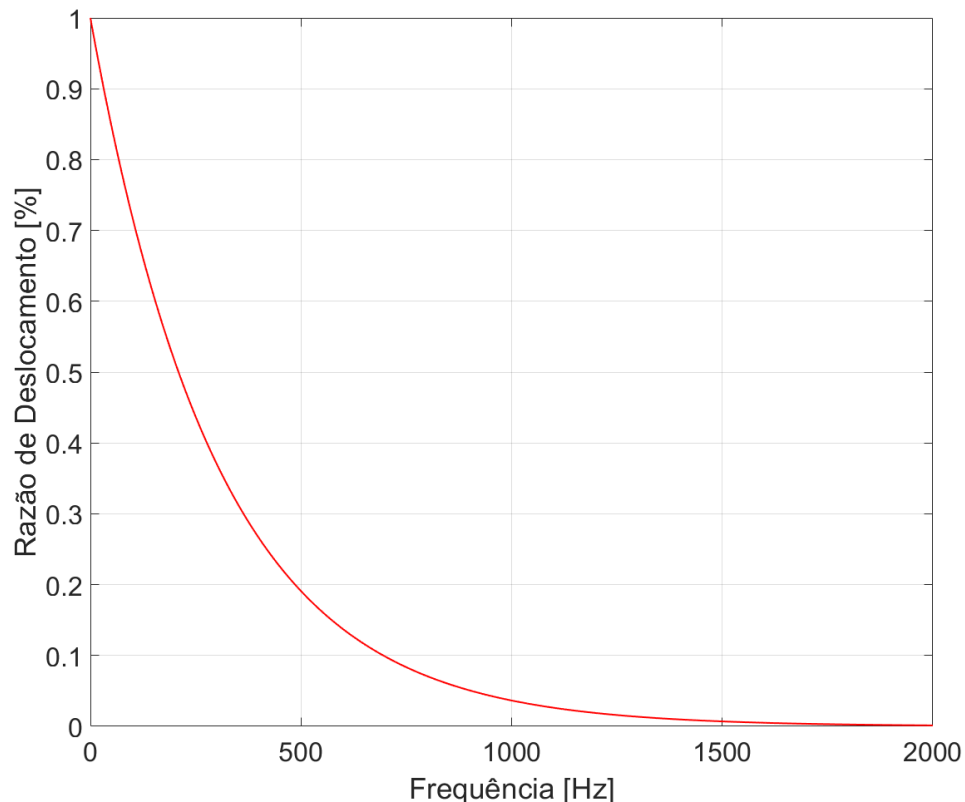
Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Analisando os resultados, vê-se que, em frequências baixas, como 400Hz, o percentual do sinal que chega à superfície é de 76% e, mesmo em frequências altas, como 1400Hz, o percentual do sinal é de cerca de 38%.

Estes valores quando comparados aos valores do solo arenoso e argiloso são consideravelmente altos. Isso ocorre devido aos altos valores do Módulo Resiliência e a um fator de amortecimento baixo, afetando diretamente os valores de K_2 . O asfalto é muito mais rígido do que os solos. Combinado com isso, o revestimento asfáltico ainda conta com uma pequena espessura, que também afeta o percentual final.

Partindo agora para simulação apenas da base granular simples, que está representada na Figura 27, tem-se.

Figura 27 - Influência da camada de base tipo BGS no sinal que chega à superfície.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

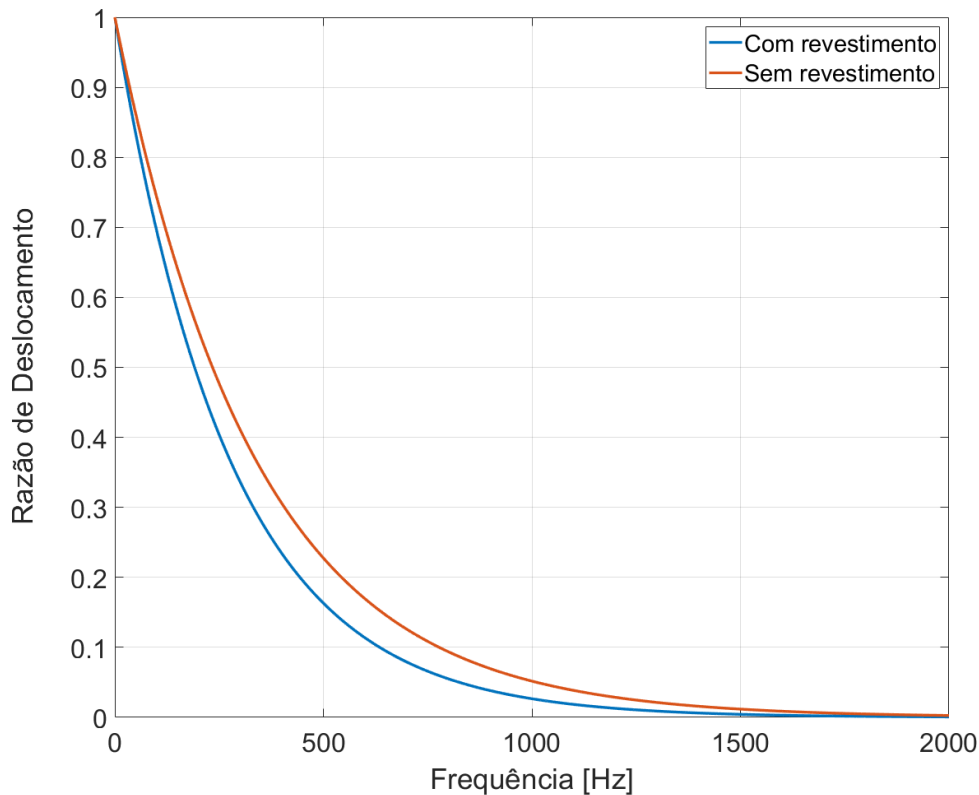
Observando os resultados, nota-se que, diferente da camada asfáltica, na base tem-se uma grande perda de sinal. Para comparação, o percentual do sinal que chega à superfície na frequência de 400 Hz é de 27%, e para 1400 Hz o valor é de apenas 1%.

Diferente do observado no revestimento, a base apresenta perdas mais acentuadas, isso ocorre, pois esta apresenta baixos valores de Módulo de Resiliência, além de apresentar uma espessura superior à do revestimento, apesar de baixos valores de densidade e amortecimento, que causam uma redução no valor de K_2 e que contribuiriam para o aumento do percentual do sinal que chega à superfície.

Posteriormente, analisou-se o primeiro caso composto por mais de uma camada, revestimento asfáltico junto com o solo compactado. Começaremos pelo solo arenoso, o qual, utilizou-se os seguintes valores: Densidade igual a 1900 kg/m^3 e $N_{\text{SPT}} = 9$.

A Figura 28 apresenta duas curvas, sendo elas, o sinal que chega à superfície para o solo arenoso sem revestimento asfáltico e com revestimento.

Figura 28 - Comparação entre sinal que chega superfície passando pelo solo arenoso compactado, com e sem revestimento asfáltico

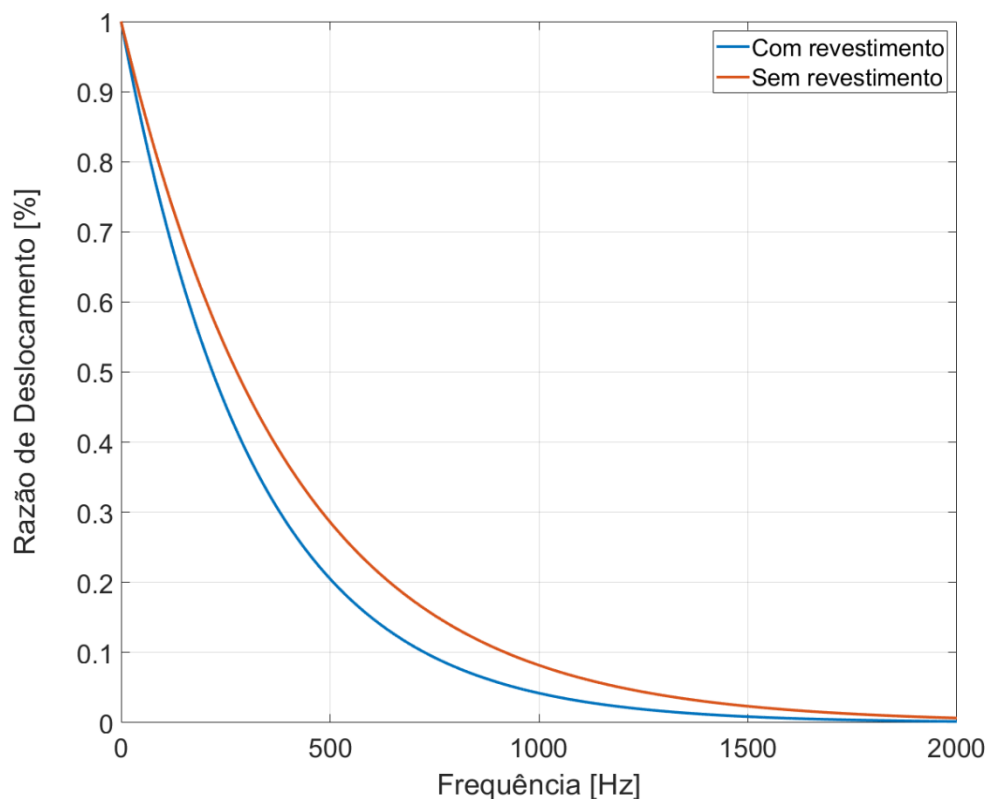


Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Como esperado a junção do solo arenoso mais a camada asfáltica resultou em uma maior perda de percentual que chega à superfície, quando comparado ao solo arenoso isolado, isso ocorre para todas as bandas. Na faixa de 400 Hz, o sinal que chega à superfície para a simulação sem revestimento é de 30%, já quando há uma camada asfáltica sobre o solo arenoso, o valor cai para 23%, uma redução de, aproximadamente, 23%. Para frequência de 1000Hz, sem o revestimento o valor é de 5,18%, já com a presença dele o valor cai para 2,67%, uma perda de, aproximadamente, 48% do sinal, devido a adição do revestimento. No entanto, a partir de 1400 Hz, aproximadamente, quase não há diferenças entre os dois arranjos. Para valores inferiores a 100 Hz, se observa que a adição da camada de revestimento pouco afeta a atenuação do sinal.

Em sequência, foi simulado o solo argiloso com a presença da camada asfáltica. A Figura 29 mostra as curvas para o solo argiloso com e sem revestimento asfálticos, para densidade $\rho = 1900 \text{ kg/m}^3$ e $N_{\text{SPT}} = 10$.

Figura 29 - Comparação entre sinal que chega superfície passando pelo solo argiloso compactado, com e sem revestimento asfáltico.



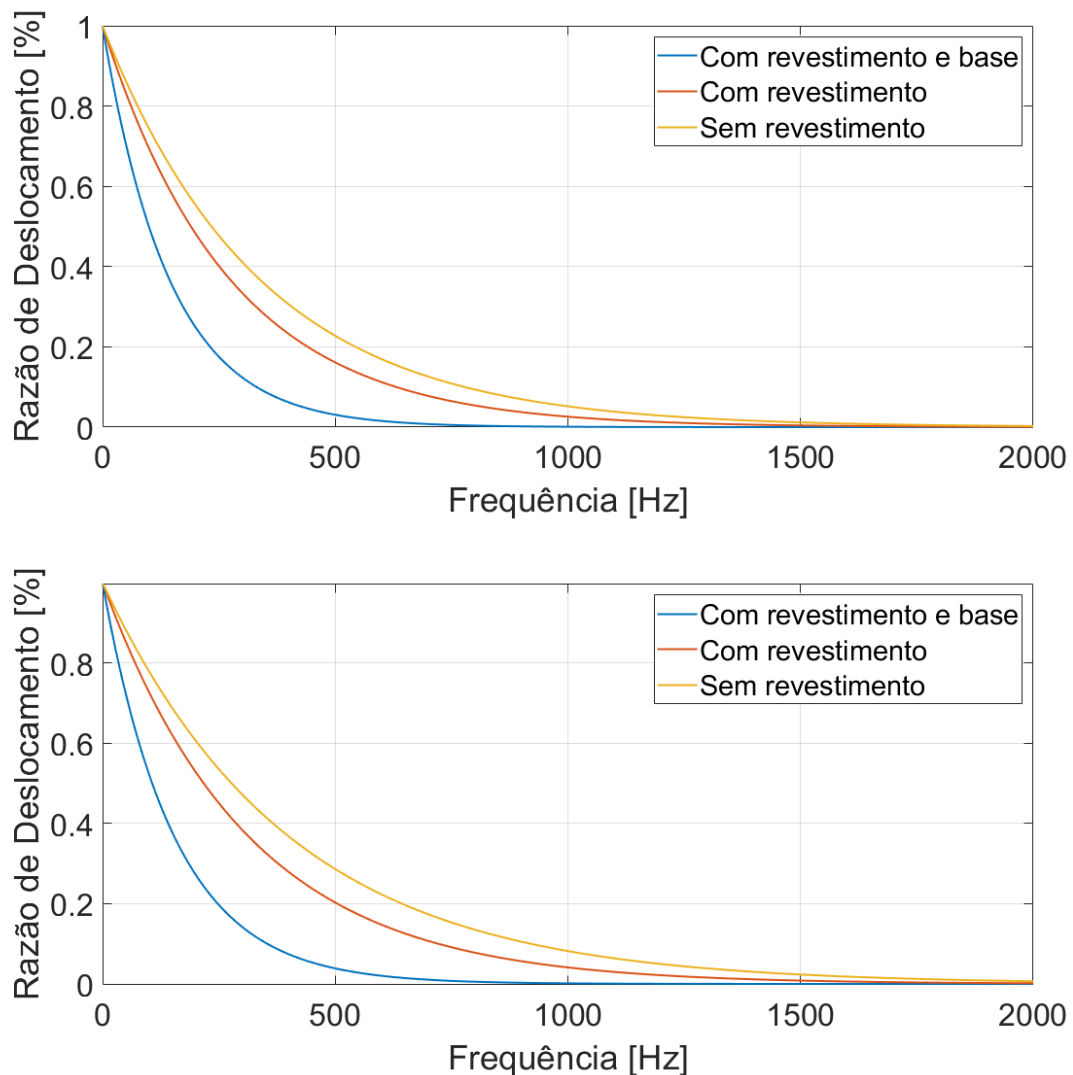
Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Assim, como no exemplo com solo arenoso, a presença do revestimento gerou uma maior perda do percentual de energia que chega à superfície. Comparando os valores na faixa de 400 Hz, temos que, sem revestimento o valor é de 37%, já com a adição do revestimento esse valor passa a ser 28%, uma redução de aproximadamente 24%. Enquanto que para a frequência de 1000 Hz, os valores sem revestimento e com revestimento são respectivamente, 8,2% e 4,2%, uma redução de aproximadamente 48%.

Por fim, simulou-se o sistema com as três camadas juntas: subleito, base e revestimento. Os valores para de densidade e N_{SPT} , seguem os mesmos dos utilizados nos exemplos anteriores desta Seção.

A Figura 30, representa a simulação do percentual de sinal que chega à superfície, para o caso com somente o subleito, subleito mais revestimento e para as três camadas, sendo o gráfico superior para o solo do tipo arenoso e o inferior para o argiloso.

Figura 30 - Comparação do sinal que chega à superfície, entre diferentes configurações de camadas.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Analisando as três curvas presentes, fica claro que a adição da camada de base gerou ainda mais perdas no sinal, o que já era esperado. Isso ocorre pois, cada vez o vazamento está ficando mais distante da superfície, passando por diferentes camadas, as quais apresentam diferentes comportamentos, será gerado uma maior redução do sinal que a chega à superfície.

Em um cenário real haverá a presença de reflexões de onda durante a propagação do sinal, implicando em uma redução do percentual do sinal que chega à superfície devido a isso. Ela ocorre normalmente na mudança de solos, devido a uma

diferente velocidade de propagação entre eles, sendo que de um solo mais mole para um mais rígido há mais reflexão do que quando ocorre o inverso.

Essa diferença nas reduções se deve às diferentes propriedades mecânicas que cada camada tem. Comparando os valores na faixa de 400 Hz, para o solo arenoso, dada as três curvas, sendo elas com revestimento e base; com revestimento; e sem revestimento, os valores são respectivamente 6,2%, 23% e 30%. Do primeiro arranjando para o segundo, observa-se um decaimento de 24% do sinal, ou seja, o mesmo valor de perda do sinal para uma simulação de apenas a base. Agora, comparando o terceiro arranjo com o primeiro, há uma variação de quase 80%, sendo esse o valor perdido pela junção das duas camadas superiores ao subleito, no caso o revestimento e a base.

Para o solo argiloso os valores do sinal que chegam à superfície para os casos de sem revestimento, com revestimento e com revestimento e base são, respectivamente: 37%, 28% e 7,5%. Os valores das perdas comparando os valores do arranjo com revestimento e com revestimento e base, e com revestimento e base com o valor de sem revestimento, são respectivamente: 24% e 80%.

Na faixa de 800 Hz, a atenuação é tanta, que para o solo argiloso, a amplitude do sinal é de apenas 0,55% do original, enquanto para o solo arenoso esse valor é 0,38%.

Para valores considerados nesse estudo, observa-se que a base atenua mais o sinal do que o revestimento. Isso ocorre devido às propriedades mecânicas dessas camadas, onde a base apresenta menores valores de Módulo de Resiliência e uma camada mais espessa do que o revestimento. Os valores do Módulo de Resiliência e do fator de amortecimento influenciam consideravelmente os valores de K_1 e K_2 . Já a espessura da camada impacta diretamente na parcela exponencial da Equação 15.

O valor de K_2 , age na exponencial, assim como a espessura da camada, logo os valores de amortecimento e Módulo de Resiliência geram alterações nos valores de K_2 , para então agirem no valor do sinal que chega à superfície.

A mudança da profundidade quando comparada com a mudança de frequência gera menos impacto no sinal. Escolhendo uma frequência fixa, fica claro que o decaimento do sinal com o aumento da profundidade ocorre de forma mais lenta, do que se fixando a profundidade e variando a frequência. Isso fica evidente nas Figuras 19 e 20, nele se observa que a graduação de cores se altera de forma mais rápida quando se varia a frequência.

Conforme demonstrado pelos resultados, o tipo de superfície do local é um fator de grande influência na transmissão de um sinal vibro-acústico de vazamento. Devido à sua elevada rigidez, as superfícies de asfalto e concreto atuam como caixas de ressonância, proporcionando, assim, uma boa ressonância e uma superfície uniforme para o contato dos sensores.

Para a detecção de um vazamento na ausência da camada asfáltica, o intervalo de frequência recomendado é de 10 a 1700 Hz. Quando há a presença de asfalto, a frequência máxima para detecção é de 700 Hz. Já para a detecção de um vazamento na presença de revestimento e camada de base, a faixa de frequência é significativamente reduzida, passando para 10 a 350 Hz. O valor de referência utilizado para detectar um vazamento é quando o sinal que chega à superfície ainda possui até 10% da amplitude original.

6 CONCLUSÃO

Através das análises realizadas neste estudo, fica claro a importância de um bom controle sobre os procedimentos de instalação de tubulações, já que, quando mal realizada, dificilmente será coletado o sinal do vazamento, na superfície. Além disso, é de extrema importância conhecer as propriedades da camada asfáltica, de suas camadas estruturais e dos solos, pois o sinal é diretamente afetado por todos eles.

Para ambos os solos estudados, arenoso e argiloso, o grau de compactação influenciou fortemente o sinal que chegou à superfície.

Em relação ao grau de compactação, pode-se dizer que quanto mais compactado estiver o solo, menor será a atenuação do sinal que chega à superfície. O aumento da compactação do solo, gera um rearranjo das partículas do meio e, consequentemente, uma melhora na sua rigidez, um aumento nos valores do Módulo de Elasticidade e da densidade.

Com os achados também se observou que, assim como a densidade, o aumento do fator de amortecimento causa uma redução do percentual do sinal que chega à superfície. Este parâmetro se mostrou muito influente sobre o sinal estudado, já a profundidade nem tanto.

Quando comparado com a frequência e o fator de amortecimento, a profundidade afeta o sinal de forma menos agressiva, gerando um decaimento do sinal mais lento com seu aumento.

Nas implementações observou-se também o efeito da adição de demais camadas no sistema. Estas irão afetar o sinal de acordo com as suas características e espessuras. A espessura das camadas asfálticas age de forma semelhante a profundidade do tubo, já que a soma das espessuras de todas as camadas, será a profundidade da origem do sinal, ela atua sobre a exponencial da equação.

Os resultados evidenciam que as camadas de solo agem como um filtro passa baixa, já que atenuam de forma mais eficiente altas frequências. Ou seja, vibrações de baixa frequência serão menos atenuadas do que as de alta frequência.

No caso do primeiro cenário estudado, que envolve apenas uma camada de solo compactado sobre a tubulação, foram identificados os intervalos de frequência apropriados para a detecção de vazamentos, levando em consideração o grau de compactação do solo. Para solos arenosos e fofos, o intervalo adequado é de 10 a 580Hz; para solos pouco compactados, 10 a 750Hz; para solos medianamente compactados, 10 a 1100Hz; para solos compactados, 10 a 1580Hz; e para solos muito compactados, 10 a 1700Hz.

Para solos argilosos, o intervalo adequado é de 10 a 550Hz para solos muito moles, 10 a 730Hz para solos moles, 10 a 930Hz para solos de média rigidez, 10 a 1150Hz para solos rijos, e 10 a 1350Hz para solos duros.

Para o segundo cenário, onde há presença da camada de asfalto sobre o solo medianamente compactado, o intervalo de frequência adequado para detecção de vazamento é de 10 Hz a 700 Hz. Quando se adiciona entre a camada de asfalto e solo, a camada de base tipo BGS, o intervalo adequado para a detecção de vazamento passa para 10 a 350 Hz.

Na comparação entre os resultados numéricos, para os solos arenosos, com dados previamente obtidos em um teste experimental, realizado em um ambiente controlado, o modelo numérico proposto mostrou uma precisão satisfatória para a descrição do sinal na superfície, logo acima do vazamento.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 8036:** Programação de sondagens de simples reconhecimento dos solos para fundações de edifícios. Rio de Janeiro, 1983. 3 p. (Publicada confirmação: 11/2018)

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 6502:** Rochas e solos. Rio de Janeiro, 1995. 18 p. (Publicada confirmação: 11/2018)

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 5626:** Instalação predial de água fria. Rio de Janeiro, 1998. 41 p. (Publicada confirmação: 10/2017)

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 6484:** Solo – sondagens de simples reconhecimento com SPT – método de ensaio. Rio de Janeiro, 2001. 17 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 17015:** Execução de obras lineares para transporte de água bruta e tratada, esgoto sanitário e drenagem urbana, utilizando tubos rígidos, semirrígidos e flexíveis. Rio de Janeiro, 2022. 121 p. (Publicada confirmação: 08/2022)

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 7182:** Solo - Ensaio de compactação. Rio de Janeiro, 2016. 9 p. (Publicada confirmação: 09/2016)

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 7211:** Agregados para concreto – Especificação. Rio de Janeiro, 2005. 11 p. (Publicada confirmação: 10/2022)

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 12052:** Solo ou agregado miúdo – Determinação do equivalente de areia. Rio de Janeiro, 1992. 10 p. (Publicada confirmação: 04/1992)

AUTOPISTA FERNÃO DIAS. **AVALIAÇÃO DE MISTURAS A FRIO COMO SOLUÇÃO PARA CAMADAS DE REVESTIMENTO.** São Paulo, 2011.

BANKS, H. T.; HU, S.; KENZ, Z. R. A brief review of elasticity and viscoelasticity. **Advances in Applied Mathematics and Mechanics**, v. 3, n. 1, p. 1-51, 2011.

Bartolo, L. D. Propagação de ondas aplicadas ao mapeamento geológico: formulação acústica. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, São Paulo, v. 43.

BERNUCCI, L. L. B. *et al.* **Pavimentação asfáltica: Formação básica para engenheiros**. Rio de Janeiro: Petrobrás, 2008.

BRASIL. SECRETARIA NACIONAL DE SANEAMENTO AMBIENTAL – SNIS. **Diagnóstico dos serviços de água e esgotos - 2020**. Brasília, DF: Ministério das Cidades, 2020.

CAPUTO, H. P. **Mecânica dos solos e suas aplicações**. 6. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora - LTC, 1996. v. 1.

CAVALCANTE, E. H.; GIACHETI, H. L.; DANZIGER, F. A. B; COUTINHO, R. Q. Workshop Campos Experimentais Brasileiros. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA – COBRAMSEG, 13., Curitiba. **Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica**. Curitiba: ABMS, 2006. p. 91.

CUNTO, F. J. C. **Determinação do módulo de resiliência através de ensaios triaxiais dinâmicos e a sua estimativa a partir de ensaios de compressão simples**: estudo de três solos do nordeste brasileiro. 1998. Dissertação (Mestrado em Transportes) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1998.

DAS, B. **Principles of geotechnical engineering**. 3rd ed. Boston: PWS Publishing, 1993.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM (DER/SP). **ET-DE-P00/014**. Sub-base ou base estabilizada granulometricamente – Especificação técnica. São Paulo, 2006.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM (DER/SP). **ET-DE-P00/025**. Pré-misturado a frio – Especificação técnica. São Paulo, 2006.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 135/2010 – ME**. Pavimentação asfáltica – Misturas asfálticas Determinação do modulo de resiliência – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2018.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 137/2010 – ES**. Pavimentação – Regularização do subleito – Especificação de serviço. Rio de Janeiro, 2010.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 139/2010 – ES**. Pavimentação – Sub-base estabilizada granulometricamente – Especificação de serviço. Rio de Janeiro, 2010.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 141/2010 – ES**. Pavimentação – Base estabilizada granulometricamente – Especificação de serviço. Rio de Janeiro, 2010.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT XXX/2020 – ME**. Pavimentação – Misturas asfálticas – Determinação da densidade relativa máxima medida e da massa específica máxima medida em amostras não compactadas – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2020.

DI BENEDETTO, H.; TATSUOKA, F. Small strains behavior of geomaterials modelling of strain rate effects. **Soils and Foundations**, Tokyo, v. 37, n. 2, p. 127-138, 1997.

EI DEBS, M. K. **Projeto estrutural de tubos circulares de concreto**. 1ed., São Paulo: IBTS, 2003.

FAJARDO, R. I. C. **Previsão numérica do comportamento dinâmico da barragem de Breapampa no Peru**. 2014. 152 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.

FUCHS, H. V.; RIEHLE, R. Ten years of experience with leak detection by acoustic signal analysis. **Applied Acoustics**, Oxford, v. 33, n. 1, p. 1-19, 1991.

FREITAS, E. L. F. M. **OBTENÇÃO DA CURVA MESTRA DO MÓDULO DINÂMICO COM USO DO ENSAIO DE RESSONÂNCIA POR IMPACTO EM MISTURAS ASFÁLTICAS**. Relatório final de projeto – Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2017.

HENNIGAR, P.; COLLURA, J. Water leakage control and sonic detection. **Canadian Water Resources Journal**, Ottawa, v. 29, n. 3, p. 231-244, 2004.

HUNTER, J. A.; CROW, H. L. **Shear wave velocity measurement guidelines for canadian seismic site characterization in soil and rock**. Canadá: Geological Survey of Canada, 2012. p. 227.

JOPPERT J. I. **Fundações e contenções de edifícios: qualidade total na gestão do projeto e Execução**. São Paulo: PINI, 2007.

KOLSKY, H. Stress waves in solids. **Journal of Sound and Vibration** (United Kingdom), v.1, n.1, p.88-110, 1964.

KRAMER, S. L. **Geotechnical earthquake engineering**. New Jersey: Prentice-Hall, 1996. 653 p.

MERIBOUT, F. **Analyse de la transmission au sol des vibrations a partir d'une structure vibrante**. 2008. 110 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Faculté des sciences de l'ingénieur - Université Mentouri Constantine, Constantine, 2008.

NAVARRO, R. F. Modelos viscoelásticos aplicáveis a materiais reais: uma revisão. **Revista Eletrônica de Materiais e Processos**, Campina Grande, v. 12, n. 1, p. 1-20, 2017.

OHSAKI, Y.; IWASAKI, R. On dynamic shear moduli and Poisson's ratio of soil deposits, **Soil and Foundations**, Tokyo, v. 13, n. 4, p. 59-73, 1973.

PETROBRAS - COMISSÃO DE NORMALIZAÇÃO TÉCNICA – CONTEC. **N - 1848**: projeto de fundações de máquinas, Rio de Janeiro, 2008. p. 51.

PEREIRA, Caio. **Sondagem SPT**: O que é e como é feito esse ensaio. Escola Engenharia, 2018. Disponível em: <https://www.escolaengenharia.com.br/sondagem-spt/>. Acesso em: 20 de jun de 2022.

PINTO, C. **Curso básico de mecânica dos solos**. 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

PROCTOR, R. R. Fundamentals Principles of Soil Compaction. **Engineering News Record**, New York, v. 11, n. 9, p. 148-156, 1933.

PROENÇA, M.S.; PASCHOALINI, A.T.; SOUZA, A., **O efeito da compactação dos solos na detecção de vazamentos pelo método vibro-acústico**. In: 31º Congresso Nacional de Saneamento e Meio ambiente, Encontro Técnico AESABESP, São Paulo, 2020.

PROENÇA, M.S. **Aplicação do modelo constitutivo viscoelástico de Kelvin-Voigt e do método dos elementos finitos para a determinação da influência das propriedades do solo na detecção de vazamentos de água em redes de distribuição subterrâneas**. Ilha Solteira, 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia -Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” - UNESP, 2019.

SCUSSEL, O.; BRENNAN, M.J.; MUGGLETON, J.M.; ALMEIDA, F.C.L.; PASCHOALINI, A.T. Estimation of the bulk and shear moduli of soil surrounding a plastic water

pipe using measurements of the predominantly fluid wave in the pipe. **Journal of Applied Geophysics**, Amsterdã, v. 164, p. 237-246.

SECRETARIA MUNICIPAL DE INFRAESTRUTURA URBANA E OBRAS/ PREFEITURA MUNICIPAL DE SÃO PAULO – SIURB/PMSP. **IP - 08/2004: ANÁLISE MECANICISTA À FADIGA DE ESTRUTURAS DE PAVIMENTO**. São Paulo, 2004.

SEED, H. B. *et al.* Moduli and damping factors for dynamic analyses of cohesionless soils. **Journal of geotechnical engineering**, West Lafayette, v. 112, n. 11, p. 1016-1032, 1986.

SUN, J. I.; GOLESORKHI, R.; SEED, H.B. **Dynamic moduli and damping ratios for cohesive soils**. Berkeley: University of California at Berkely, Earthquake Engineering Research Center, 1988.

UNIÃO LOCADORA. **Compactador**. Disponível em:< <http://www.uniaolocadora.com.br/aluguel-placa-vibratoria.php>> Acesso em: 12 ago. 2022.

Vucetic, M.; Dobry, R. Effect of Soil Plasticity on Cyclic Response. **Journal of Geotechnical Engineering**, v. 117, p. 89-107, 1991

Wanzeller, M. **Brasil tem 38,45% de perda de água potável no sistema de distribuição**. Correio Braziliense, 2020. Disponível em:<<https://www.correiobraziliense.com.br/app/noticia/brasil/2020/06/05/interna-brasil,861515/brasil-tem-38-45-de-perda-de-agua-potavel-no-sistema-de-distribuicao.shtml>>. Acesso em: 15 jun. 2022.

WOLFF, M. et al. Two-mechanism approach in thermo-viscoelasticity with internal variables. **Technische Mechanik-European Journal of Engineering Mechanics**, v. 32, n. 2-5, p. 608-621, 2012.