

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

PABLO FERNANDO SANCHEZ

ANÁLISE DE VIBRAÇÕES, POROPRESSÕES E POTENCIAIS DE LIQUEFAÇÃO
INDUZIDOS POR AÇÕES DINÂMICAS DE EQUIPAMENTOS DE CONSTRUÇÃO
EM REJEITOS DE MINERAÇÃO

CURITIBA

2024

PABLO FERNANDO SANCHEZ

ANÁLISE DE VIBRAÇÕES, POROPRESSÕES E POTENCIAIS DE LIQUEFAÇÃO
INDUZIDOS POR AÇÕES DINÂMICAS DE EQUIPAMENTOS DE CONSTRUÇÃO
EM REJEITOS DE MINERAÇÃO

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Civil - PPGEC, Setor de Tecnologia,
Universidade Federal do Paraná, como requisito à
parcial a obtenção do título de Doutor em
Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Vitor Pereira Faro

Coorientador: Prof. Dr. Wagner Bonat

CURITIBA

2024

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO (CIP)
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SISTEMA DE BIBLIOTECAS – BIBLIOTECA DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA

Sanchez, Pablo Fernando

Análise de vibrações, poropressões e potenciais de liquefação induzidos por ações dinâmicas de equipamentos de construção em rejeitos de mineração / Pablo Fernando Sanchez. – Curitiba, 2024.

1 recurso on-line : PDF.

Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

Orientador: Vitor Pereira Faro

Coorientador: Wagner Bonat

1. Barragens de rejeitos. 2. Liquefação do solo. 3. Vibração. 4. Poropressão. 5. Construção civil - Equipamentos. I. Universidade Federal do Paraná. II. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. III. Faro, Vitor Pereira. IV. Bonat, Wagner. V. Título.

Bibliotecário: Elias Barbosa da Silva CRB-9/1894

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação ENGENHARIA CIVIL da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da tese de Doutorado de **PABLO FERNANDO SANCHEZ** intitulada: **ANÁLISE DE VIBRAÇÕES, POROPRESSÕES E POTENCIAIS DE LIQUEFAÇÃO INDUZIDOS POR AÇÕES DINÂMICAS DE EQUIPAMENTOS DE CONSTRUÇÃO EM REJEITOS DE MINERAÇÃO**, sob orientação do Prof. Dr. VITOR PEREIRA FARO, que após terem inquirido o aluno e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de doutor está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 09 de Outubro de 2024.

Assinatura Eletrônica
09/10/2024 12:53:15.0
VITOR PEREIRA FARO
Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica
28/11/2024 10:27:47.0
PAULO ROBERTO COSTA CELLA
Avaliador Externo (BVP ENGENHARIA)

Assinatura Eletrônica
17/10/2024 10:11:13.0
ANTONIO THOMÉ
Avaliador Externo (UNIVERSIDADE DE PASSO FUNDO)

Assinatura Eletrônica
21/10/2024 17:51:16.0
SIDNEI HELDER CARDOSO TEIXEIRA
Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, pelo constante apoio e incentivo aos meus estudos, desde a base.

À minha esposa, Bruna, pelo incondicional apoio, incentivo e, principalmente, pela paciência diante da minha ausência e do estresse frequente durante o desenvolvimento deste trabalho.

Ao professor orientador, Vitor Faro, pela valiosa orientação, parceria e pelos ensinamentos compartilhados durante o desenvolvimento deste trabalho.

Ao professor coorientador, Wagner Bonat, pelos ensinamentos em estatística, que enriqueceram significativamente a qualidade das análises realizadas e do trabalho como um todo.

À empresa BVP Geotecnia e Hidrotecnia, pelo constante incentivo, pela flexibilidade em permitir a conciliação entre trabalho e estudos, e pela disponibilização dos dados fundamentais ao desenvolvimento deste trabalho.

Ao Paulo Cella, pelas importantes sugestões de temas de pesquisa e pelos ensinamentos enriquecedores sobre o tema de estudo, que acompanharam cada etapa do trabalho, do início à sua conclusão.

Ao Washington Pirete, pelos ensinamentos e explicações sobre os testes de campo realizados, que serviram como base para este trabalho.

Aos colegas de trabalho, Pedro Henrique Silva e Cristiano Cruz, pela constante disponibilidade ao longo do desenvolvimento deste trabalho, respondendo dúvidas e fornecendo informações sobre os testes, que foram essenciais para o entendimento do contexto.

À empresa Solver Tecnologias, pela disponibilização dos dados para o desenvolvimento deste trabalho e pelas informações sobre o programa de instrumentação.

Aos amigos Charles e Luna, pela parceria no desenvolvimento do artigo, que foi requisito para a inscrição no programa de doutorado, e pelo incentivo durante todo o percurso. Deixo aqui uma pequena ressalva pela ausência nos ritos comemorativos.

A todos os amigos próximos que dividiram as dificuldades e ansiedades, e pelo apoio de sempre.

“Uma jornada de mil milhas começa com um único passo”
(Lao Tzu, sec.VI a.C.)

RESUMO

Barragens de rejeito alteadas pelo método de montante, com disposição hidráulica desses materiais, tem a sua estabilidade dependente da resistência dos próprios rejeitos, sendo vulneráveis ao fenômeno da liquefação, que ocorre devido ao acréscimo elevado de poropressões e a redução significativa das tensões efetivas em materiais fofos ou moles. Os carregamentos ou gatilhos relacionados a liquefação dos materiais podem ser estáticos ou dinâmicos, sendo os dinâmicos relacionados com vibrações, que podem ter origem em eventos sísmicos naturais, a detonação de explosivos e, também, podem ter origem no tráfego de equipamentos de construção, que geram vibrações em diferentes níveis para cada tipo e porte de equipamento. Já se dispõem na literatura de estudos dos efeitos das vibrações em rejeitos propiciadas por sismos ou detonações de explosivos, como os apresentados por Veyera (1985), Matasovic e Kavazanjian Jr (2006), Charlie et. al (2013), Larson-Robl (2016), Ishimwe, Coffman e Rollins (2020), entre outros, porém poucos ou nenhum tratam especificamente da avaliação dos efeitos provenientes das vibrações geradas pelo tráfego de equipamentos, sendo este um assunto recente e necessário devido a obrigatoriedade da descaracterização das barragens de rejeito alteadas a montante, em atendimento às legislações (ANM 13/2017 e 95/22), após as rupturas ocorridas nos últimos anos. A descaracterização pode envolver o reforço ou a remoção das estruturas, sendo inevitável a geração de vibrações com os equipamentos de construção. Neste contexto, este trabalho apresenta uma análise das vibrações, poropressões e potenciais de liquefação em rejeitos de mineração devido ao tráfego de equipamentos, com base em testes de campo instrumentados realizados no reservatório de uma barragem de rejeitos, onde trafegaram diferentes tipos de equipamentos, com elevação gradual de pistas experimentais. Foram observadas os comportamentos específicos das vibrações e poropressões de cada equipamento, as correlações entre eles, com elaboração de matrizes, modelos e equações que correlacionam as duas grandezas e as demais variáveis envolvidas. Dado o comportamento distinto de cada equipamento, foram propostos modelos de correlação individualizados da variação da poropressão (Δu ou du) e razão de poropressão (PPR ou r_u) com a velocidade de vibração de partícula de pico (PPV). Também foi proposta uma equação empírica geral, para todos os equipamentos, da razão de poropressão (PPR ou r_u) com PPV, tensão efetiva (σ'_{v0}) e peso do equipamento (P), que se mostraram influentes nas análises realizadas. Esta equação foi comparada com os testes e modelos idealizados pra detonações de explosivos, de forma geral, e para cada equipamento em específico, mostrando melhor convergência e adaptabilidade ao fenômeno analisado, destacando-se as diferenças ou erros que podem ser gerados na adoção de modelos para outras finalidades. Analisou-se, também, o potencial de liquefação dos rejeitos para os testes realizados, onde verificou-se que com 1,0m de altura de pista experimental ou lastro de conquista, se afastam os riscos desse processo. Considera-se que o estudo apresentado contribui para o entendimento do fenômeno analisado e pode ser utilizado para orientar e prever condições seguras de trabalhos de campo em obras com tipos de materiais e equipamentos semelhantes, sempre com instrumentação e monitoramento adequados. Ressalta-se, por fim, a necessidade de aprofundamento com mais testes em diferentes materiais de fundação para generalizar sua aplicação.

Palavras-chave: Barragens de rejeito. Liquefação. Vibrações. Poropressões. Equipamentos de Construção.

ABSTRACT

Upstream-raised tailings dams, with hydraulic deposition of these materials, have their stability dependent on the strength of the tailings themselves, making them vulnerable to the phenomenon of liquefaction. This occurs due to a significant increase in pore pressures and a substantial reduction in effective stresses in loose or soft materials. The loads or triggers related to the liquefaction of the materials can be static or dynamic, with dynamic loads associated with vibrations that may originate from natural seismic events, explosive detonations, or from construction equipment traffic, which generates vibrations at varying levels depending on the type and size of the equipment. The literature already contains studies on the effects of vibrations in tailings caused by seismic events or explosive detonations, such as those presented by Veyera (1985), Matasovic and Kavazanjian Jr. (2006), Charlie et al. (2013), Larson-Robl (2016), Ishimwe, Coffman, and Rollins (2020), among others. However, few or none specifically address the evaluation of the effects from vibrations generated by equipment traffic, which is a recent and necessary subject due to the mandatory decharacterization of upstream-raised tailings dams, in compliance with regulations (ANM 13/2017 and 95/22), following the ruptures that have occurred in recent years. Decharacterization may involve either reinforcement or removal of the structures, making the generation of vibrations by construction equipment inevitable. In this context, this study presents an analysis of vibrations, pore pressures, and liquefaction potential in mining tailings due to equipment traffic, based on instrumented field tests conducted in the reservoir of a tailings dam, where different types of equipment operated on gradually elevated experimental tracks. The specific behaviors of vibrations and pore pressures generated by each piece of equipment were observed, along with correlations between them. Matrices, models, and equations were developed to correlate these two variables with other involved factors. Given the distinct behavior of each piece of equipment, individualized correlation models were proposed for the variation of pore pressure (Δu or du) and pore pressure ratio (PPR or r_u) with peak particle velocity (PPV). Additionally, a general empirical equation was proposed for all equipment, correlating the pore pressure ratio (PPR or r_u) with PPV, effective stress (σ'_{v0}), and equipment weight (P), which were shown to be influential in the analyses conducted. This equation was compared with tests and models designed for explosive detonations, both in general and for each specific piece of equipment, demonstrating better convergence and adaptability to the phenomenon under study, highlighting the differences or errors that can arise when adopting models designed for other purposes. The liquefaction potential of the tailings was also analyzed for the tests conducted, where it was found that with a 1.0-meter height of the experimental track or foundation fill, the risks of this process are mitigated. It is considered that the presented study contributes to the understanding of the analyzed phenomenon and can be used to guide and predict safe working conditions in field operations involving similar materials and equipment, always with appropriate instrumentation and monitoring. Lastly, the need for further research with more tests on different foundation materials is emphasized to generalize its application.

Keywords: Tailings dams. Liquefaction. Vibrations. Pore pressures. Construction Equipment.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1 - FLUXOGRAMA BÁSICO DO PROCESSO DE MINERAÇÃO.	37
FIGURA 2.2 - MÉTODOS DE DESCARGA DE REJEITOS – (a) PONTOS MÚLTIPLOS E (b) DESCARGA PONTUAL	39
FIGURA 2.3 - ZONAS DE DIFERENTES PERMEABILIDADES CAUSADAS POR SEGREGAÇÃO HIDRÁULICA.	40
FIGURA 2.4 - COMPARATIVO DE BARRAGENS DE CONTENÇÃO DE REJEITOS COM ALTEAMENTOS SUCESSIVOS. MÉTODOS: (a) MONTANTE, (b) JUSANTE E (c) LINHA DE CENTRO.	41
FIGURA 2.5 - COMPORTAMENTO ESQUEMÁTICO NÃO DRENADO DE UM SOLO ARENOSO CONTRÁTIL E SATURADO.....	45
FIGURA 2.6 – POTENCIAL DE LIQUEFAÇÃO BASEADO NA COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA DOS MATERIAIS.	49
FIGURA 2.7 - RELAÇÕES ENTRE A RAZÃO DA RESISTÊNCIA AO CISLHAMENTO LIQUEFEITO E O NÚMERO DE GOLPES NORMALIZADO DO SPT E A RESISTÊNCIA DE PONTA NORMALIZADA DO CPT.....	50
FIGURA 2.8 - ÁBACO DE CLASSIFICAÇÃO DO SISTEMA SBT - <i>SOIL BEHAVIOUR TYPE</i> (TIPO DE COMPORTAMENTO DO SOLO).	51
FIGURA 2.9 - EXEMPLO DE UM GEOFONE DE PERFURAÇÃO E UM MEDIDOR DE VIBRAÇÃO (UNIDADE DE PROCESSAMENTO)	52
FIGURA 2.10 - EXEMPLO DE LEITURAS DE UM SISMÓGRAFO DE ENGENHARIA.	53
FIGURA 2.11 - PIEZÔMETRO ELÉTRICO DE CORDA VIBRANTE – MODELO 4500S GEOKON.	54
FIGURA 2.12 - MODELOS DE PIEZÔMETROS ELÉTRICOS – GEOKON.....	54
FIGURA 2.13 - REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DOS LIMITES DE VELOCIDADE DE VIBRAÇÃO DE PARTÍCULA DE PICO POR FAIXAS DE FREQUÊNCIA.....	58
FIGURA 2.14 - REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DOS VALORES GUIA ESPECIFICADOS COMO LIMITES PARA VELOCIDADES DE VIBRAÇÕES DE PARTÍCULAS EM ESTRUTURAS.	59

FIGURA 2.15 - MOVIMENTOS DE PARTÍCULA PRODUZIDOS POR DIFERENTES TIPOS DE ONDA.	61
FIGURA 2.16 - MODELO DE GERAÇÃO DE EXCESSO DE POROPRESSÃO PARA TESTES CÍCLICOS COM TENSÕES CONTROLADAS.	63
FIGURA 2.17 - MODELO DE GERAÇÃO DE EXCESSO DE POROPRESSÃO PARA ENSAIOS TRIAXIAIS CÍCLICOS DE DEFORMAÇÕES CONTROLADAS.	64
FIGURA 2.18 - CURVAS DE GERAÇÃO DE EXCESSO DE POROPRESSÃO EM TESTES DE CAMPO.	65
FIGURA 2.19 - COMPARATIVO DAS PREDIÇÕES DOS MODELOS DE GERAÇÃO DE EXCESSO DE POROPRESSÃO COM TESTES DE CAMPO.	65
FIGURA 2.20 - FORMA DA ONDA RESULTANTE DA GERAÇÃO DE EXCESSO DE POROPRESSÃO TRANSIENTE DE UM TESTE COM USO DE EXPLOSIVOS.	66
FIGURA 2.21 - FORMA DA ONDA RESULTANTE DA GERAÇÃO DE EXCESSO DE POROPRESSÃO RESIDUAL DE UM TESTE COM USO DE EXPLOSIVOS.	67
FIGURA 2.22 - CARREGADEIRA 992K DA CATERPILLAR.	68
FIGURA 2.23 - ACELEROGRAMA DAS ONDAS CAUDAS PELO TRÁFEGO DE VEÍCULOS E MÁQUINAS PESADAS.	69
FIGURA 2.24 - ESPECTRO DE FOURIER DAS ONDAS CAUDAS PELO TRÁFEGO DE VEÍCULOS E MÁQUINAS PESADAS.	69
FIGURA 2.25 - TRATOR DE ESTEIRAS E COMPACTADOR DE SOLO VIBRATÓRIO.	70
FIGURA 2.26 - PROTÓTIPO EM ESCALA PARA TESTES DE LABORATÓRIO DE DETONAÇÕES COM INSTRUMENTAÇÃO.,	76
FIGURA 2.27 - MEDIDAS DE POROPRESSÃO (TRANSIENTE E RESIDUAL) COMO TEMPO, MOSTRANDO A OCORRÊNCIA DE POROPRESSÃO TRANSIENTE (PICO) ATÉ A DISTÂNCIA DE 20,25 POLEGADAS (~51,4 CM).	77
FIGURA 2.28 - PREDIÇÃO DE RAZÃO DE POROPRESSÃO EM FUNÇÃO DA PROFUNDIDADE CONSIDERANDO AS EQUAÇÕES EMPÍRICAS EXISTENTES E, EM (a) COM COMPARAÇÃO COM MEDIDAS DE CAMPO COM PIEZÔMETROS E 0,91 KG DE EXPLOSIVOS POR	

PERFURAÇÃO, E (b) COM COMPARAÇÃO COM A EQUAÇÃO PROPOSTA E 3,77 KG DE EXPLOSIVOS POR PERFURAÇÃO.	78
FIGURA 2.29 - LAYOUT ESQUEMÁTICO DO TESTE DE LIQUEFAÇÃO <i>IN SITU</i>	79
FIGURA 2.30 - GERAÇÃO DE EXCESSO DE POROPRESSÃO PARA BAIXOS NÍVEIS DE DEFORMAÇÃO NO SENSOR 3.	80
FIGURA 2.31 - GERAÇÃO DE EXCESSO DE POROPRESSÃO PARA ELEVADOS NÍVEIS DE DEFORMAÇÃO	80
FIGURA 2.32 - GERAÇÃO DE EXCESSO DE POROPRESSÃO PARA ELEVADOS E BAIXOS NÍVEIS DE DEFORMAÇÃO	81
FIGURA 2.33 - PROPRIEDADES FÍSICAS DE MATERIAIS GRANULARES FINOS USADOS NO ESTUDO.....	82
FIGURA 2.34 - DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DE MATERIAIS GRANULARES FINOS USADOS NO ESTUDO.	82
FIGURA 2.35 - INCREMENTO DA RAZÃO DE EXCESSO DE POROPRESSÃO VS NÚMERO EXCESSIVO DE CICLOS N.....	83
FIGURA 2.36 - RAZÃO DE EXCESSO DE POROPRESSÃO VS DEFORMAÇÃO AXIAL CÍCLICA DAS AMOSTRAS DE REJEITOS E AREIA FERROVIÁRIA.....	84
FIGURA 2.37 – RAZÃO DE POROPRESSÃO MÁXIMA RU_{MAX} VS DEFORMAÇÃO CISALHANTE CÍCLICA - REPRESENTAÇÃO EM CAMPO E LABORATÓRIO	85
FIGURA 2.38 - RELAÇÃO ENTRE O FATOR DE SEGURANÇA CONTRA LIQUEFAÇÃO E A RAZÃO DE EXCESSO DE POROPRESSÃO RESIDUAL SÍSMICA.....	86
FIGURA 2.39 – RAZÃO DE EXCESSO DE POROPRESSÃO DE ENSAIOS CÍCLICOS CONDUZIDOS NO ESTUDO DO MORGENSTERN ET AL. (2016).....	87
FIGURA 3.1 - Estruturas pré-selecionadas A, B e C.....	89
FIGURA 3.2 - VISTA SUPERIOR DA ESTRUTURA DO CASO C.....	91
FIGURA 3.3 - PLANTA DE LOCALIZAÇÃO DOS ATERROS EXPERIMENTAIS 1 E 2 DO CASO DE ESTUDO.....	92
FIGURA 3.4 - PLANTA ESPECÍFICA DO ATERRO 1.	92
FIGURA 3.5 - PLANTA ESPECÍFICA DO ATERRO 2.	93

FIGURA 3.6 - PLANTA DE INSTRUMENTAÇÃO E INVESTIGAÇÃO DO ATERRO 1.	94
FIGURA 3.7 – SEÇÕES DE INSTRUMENTAÇÃO DO EXPERIMENTAL ATERRO 1 – SEÇÕES TRANSVERSAL E LONGITUDINAL	95
FIGURA 3.8 - PLANTA DE INSTRUMENTAÇÃO E INVESTIGAÇÃO DO ATERRO 2.	96
FIGURA 3.9 - SEÇÕES DE INSTRUMENTAÇÃO DO ATERRO EXPERIMENTAL 2.	97
FIGURA 3.10 – RESULTADOS DIRETOS DO ENSAIO CPTU-1B – ATERRO 1.....	99
FIGURA 3.11 - RESULTADOS DIRETOS DO ENSAIO CPTU-07 – ATERRO 2.	99
FIGURA 3.12 – RESULTADOS INTERPRETADOS DO CPTU-01B DO ATERRO 1 E ESTRATIGRAFIA DA FUNDAÇÃO.....	100
FIGURA 3.13 - RESULTADOS INTERPRETADOS DO CPTU-07 DO ATERRO 1 E ESTRATIGRAFIA DA FUNDAÇÃO.....	101
FIGURA 3.14 – PIEZÔMETRO ELÉTRICO UTILIZADO NOS TESTES DE CAMPO;	103
FIGURA 3.15 – SENSOR MULTIFUNCIONAL / SISMÓGRAFO DE ENGENHARIA UTILIZADO NOS TESTES DE CAMPO.....	104
FIGURA 3.16 – CAMINHÃO BASCULANTE – CATÁLOGO E FOTO DO EQUIPAMENTO DURANTE OS TESTES.	105
FIGURA 3.17 – ESCAVADEIRA – CATÁLOGO E FOTO DO EQUIPAMENTO DURANTE OS TESTES.....	105
FIGURA 3.18 – PATROL - MOTONIVELADORA – CATÁLOGO E FOTO DO EQUIPAMENTO DURANTE OS TESTES.	106
FIGURA 3.19 - CARREGADEIRA – CATÁLOGO E FOTO DO EQUIPAMENTO DURANTE OS TESTES.....	107
FIGURA 3.20 – ROLO LISO – CATÁLOGO E FOTO DO EQUIPAMENTO DURANTE OS TESTES.	107
FIGURA 3.21 – TRATOR DE ESTEIRAS – CATÁLOGO E FOTO DO EQUIPAMENTO DURANTE OS TESTES.	108
FIGURA 3.22 – ROLO LISO A/V + TRATOR DE ESTEIRAS – EXEMPLOS DE TESTES EM COMBINAÇÃO.	109
FIGURA 3.23 - ÁBACO DE CLASSIFICAÇÃO DO SISTEMA SBT - <i>SOIL BEHAVIOUR TYPE</i> (TIPO DE COMPORTAMENTO DO SOLO). ...	113

FIGURA 4.1 – SEÇÃO TRANSVERSAL ESQUEMÁTICA DO ATERRO 1	124
FIGURA 4.2 – RESULTADOS DAS CLASSIFICAÇÕES SBT DOS MATERIAIS DO ATERRO 1 – TODO O ENSAIO/CAMADAS E ATERRO/LASTRO.	124
FIGURA 4.3 - RESULTADOS DAS CLASSIFICAÇÕES SBT DOS MATERIAIS DO ATERRO 1 – REJEITO LAMOSO E REJEITO TRANSICIONAL.	125
FIGURA 4.4 – LEGENDA PARA CLASSIFICAÇÃO SBT.....	125
FIGURA 4.5 – SEÇÃO TRANSVERSAL ESQUEMÁTICA DO ATERRO 2	127
FIGURA 4.6 - RESULTADOS DAS CLASSIFICAÇÕES SBT DOS MATERIAIS DO ATERRO 2 – TODO O ENSAIO/CAMADAS E ATERRO/LASTRO.	127
FIGURA 4.7 - RESULTADOS DAS CLASSIFICAÇÕES SBT DOS MATERIAIS DO ATERRO 2 – REJEITO LAMOSO 1 E REJEITO TRANSICIONAL.	128
FIGURA 4.8 - RESULTADOS DAS CLASSIFICAÇÕES SBT DOS MATERIAIS DO ATERRO 2 – REJEITO LAMOSO 2.....	128
FIGURA 4.9 – LEGENDA PARA CLASSIFICAÇÃO SBT.....	129
FIGURA 4.10 – EXEMPLOS DOS ELEMENTOS DE UM DIAGRAMA DE CAIXA OU <i>BOXPLOT</i>	137
FIGURA 4.11 – INSTRUMENTAÇÃO DO ATERRO 1.....	138
FIGURA 4.12 – ATERRO 1 – VELOCIDADE DE VIBRAÇÃO DE PARTÍCULA PARA AS ALTURAS DE ATERRO.....	138
FIGURA 4.13 - ATERRO 1 – VELOCIDADES DE VIBRAÇÃO DE PARTÍCULA PARA OS EQUIPAMENTOS DE COMPACTAÇÃO, POR SISMÓGRAFO.....	139
FIGURA 4.14 - ATERRO 1 – VELOCIDADES DE VIBRAÇÃO DE PARTÍCULA PARA OS EQUIPAMENTOS DE COMPACTAÇÃO - GERAIS.....	140
FIGURA 4.15 – VELOCIDADE DE VIBRAÇÃO DE PARTÍCULA DE PICO (PPV) POR DISTÂNCIA HORIZONTAL – ATERRO 1.	141
FIGURA 4.16 – DISTÂNCIA VERTICAL POR VELOCIDADE DE VIBRAÇÃO DE PARTÍCULA DE PICO (PPV) – ATERRO 1	141
FIGURA 4.17 - INSTRUMENTAÇÃO DO ATERRO 2.....	142
FIGURA 4.18 - ATERRO 2 – VELOCIDADE DE VIBRAÇÃO DE PARTÍCULA PARA AS ALTURAS DE ATERRO.....	143
FIGURA 4.19 - ATERRO 2 – VELOCIDADES DE VIBRAÇÃO DE PARTÍCULA PARA OS EQUIPAMENTOS DE COMPACTAÇÃO, POR SISMÓGRAFO	144
FIGURA 4.20 - ATERRO 1 – VELOCIDADES DE VIBRAÇÃO DE PARTÍCULA PARA OS EQUIPAMENTOS DE COMPACTAÇÃO – GERAIS.....	144

FIGURA 4.21 – VELOCIDADE DE VIBRAÇÃO DE PARTÍCULA DE PICO (PPV) POR DISTÂNCIA HORIZONTAL – ATERRO 2.	146
FIGURA 4.22 – DISTÂNCIA VERTICAL POR VELOCIDADE DE VIBRAÇÃO DE PARTÍCULA DE PICO (PPV) – ATERRO 2.	146
FIGURA 4.23 – TRATAMENTO DE DADOS PARA OS PIEZÔMETROS – MÉDIA MÓVEL.....	150
FIGURA 4.24 - TRATAMENTO DE DADOS PARA OS PIEZÔMETROS – DETERMINAÇÃO DOS VALORES INICIAL, MÁXIMO E DE VARIAÇÃO.....	150
FIGURA 4.25 – ATERRO 1 - POROPRESSÕES TOTAIS POR ALTURA DE ATERRO(1 a 4m) E PIEZÔMETRO (PE06 a PE09).	151
FIGURA 4.26 - ATERRO 1 - POROPRESSÕES TOTAIS POR TIPO DE EQUIPAMENTO E PIEZÔMETRO (PE06 a PE09).	152
FIGURA 4.27 - ATERRO 1 - POROPRESSÕES TOTAIS POR EQUIPAMENTO E CONSIDERANDO TODOS OS TESTES E PIEZÔMETROS.	152
FIGURA 4.28 – ATERRO 1 - VARIAÇÃO DE PORPRESSÃO POR ALTURA DE ATERRO (1 a 4 m) E PIEZÔMETRO (PE07A A PE09).	154
FIGURA 4.29 – ATERRO 1 – VARIAÇÕES DE POROPRESSÕES POR EQUIPAMENTO E PIEZÔMETRO.....	154
FIGURA 4.30 – ATERRO 1 – VARIAÇÕES DE PORPRESSÕES POR EQUIPAMENTO – PARA TODOS OS TESTES E PIEZÔMETROS.	155
FIGURA 4.31 - ATERRO 2 - POROPRESSÕES TOTAIS POR ALTURA DE ATERRO (0 A 4m) E PIEZÔMETRO (PE01 A PE05).	156
FIGURA 4.32 - ATERRO 2 - POROPRESSÕES TOTAIS POR TIPO DE EQUIPAMENTO E PIEZÔMETRO (PE01 a PE05).	157
FIGURA 4.33 - ATERRO 2 - POROPRESSÕES TOTAIS POR EQUIPAMENTO E CONSIDERANDO TODOS OS TESTES E PIEZÔMETROS.	157
FIGURA 4.34 - ATERRO 2 - VARIAÇÃO DE PORPRESSÃO POR ALTURA DE ATERRO E PIEZÔMETRO.	159
FIGURA 4.35 - ATERRO 2 – VARIAÇÕES DE POROPRESSÕES POR EQUIPAMENTO E PIEZÔMETRO.....	159

FIGURA 4.36 - ATERRO 2 – VARIAÇÕES DE PORPRESSÕES POR EQUIPAMENTO – PARA TODOS OS TESTES E PIEZÔMETROS.	160
FIGURA 4.37 – SEÇÃO ESQUEMÁTICA DO ATERRO EXPERIMENTAL 1, COM PIEZÔMETROS E SISMÓGRAFOS CORRESPONDENTES.....	163
FIGURA 4.38 – VARIAÇÃO DE POROPRESSÃO (Δu ou du) E VELOCIDADE DE VIBRAÇÃO DE PARTÍCULA DE PICO (PPV) – TODOS OS DADOS.	165
FIGURA 4.39 - VARIAÇÃO DE POROPRESSÃO (Δu ou du) E VELOCIDADE DE VIBRAÇÃO DE PARTÍCULA DE PICO (PPV) – SEPARADOS POR PIEZÔMETRO.	165
FIGURA 4.40 - VARIAÇÃO DE POROPRESSÃO (Δu ou du) E VELOCIDADE DE VIBRAÇÃO DE PARTÍCULA DE PICO (PPV) – SEPARADOS POR ALTURA DO ATERRO EXPERIMENTAL (PISTA).....	166
FIGURA 4.41 - RAZÃO DE POROPRESSÃO (PPR) E VELOCIDADE DE VIBRAÇÃO DE PARTÍCULA DE PICO (PPV) – TODOS OS DADOS.	166
FIGURA 4.42 - RAZÃO DE POROPRESSÃO (PPR) E VELOCIDADE DE VIBRAÇÃO DE PARTÍCULA DE PICO (PPV) – SEPARADOS POR PIEZÔMETRO.	167
FIGURA 4.43 - RAZÃO DE POROPRESSÃO (PPR) E VELOCIDADE DE VIBRAÇÃO DE PARTÍCULA DE PICO (PPV) – SEPARADOS POR ALTURA DO ATERRO EXPERIMENTAL (PISTA).....	167
FIGURA 4.44 - MATRIZ DE CORRELAÇÃO – TODOS OS DADOS – ATERRO 1m A 3m.	170
FIGURA 4.45 – MATRIZ DE CORRELAÇÃO – ATERRO 1m A 3m E SEM O PE09-SV07B.	171
FIGURA 4.46 - MATRIZ DE CORRELAÇÃO – ATERRO 1m.....	172
FIGURA 4.47 - MATRIZ DE CORRELAÇÃO – ATERRO 1m E SEM O PE09-SV07B	173
FIGURA 4.48 - MATRIZ DE CORRELAÇÃO – ATERRO 1m E 2m.	174
FIGURA 4.49 - MATRIZ DE CORRELAÇÃO – ATERRO 1m E 2m E SEM O PE09-SV07B.....	175

FIGURA 4.50 – GRÁFICOS DE “du” POR “PPV” SEPARADOS POR ALTURA DE ATERRO.....	182
FIGURA 4.51 - GRÁFICOS DE “du” POR “PPV” SEPARADOS POR EQUIPAMENTO.....	183
FIGURA 4.52 - GRÁFICOS DE “PPR” POR “PPV” SEPARADOS POR ALTURA DE ATERRO.....	183
FIGURA 4.53 - GRÁFICOS DE “PPR” POR “PPV” SEPARADOS POR EQUIPAMENTO.....	184
FIGURA 4.54 – EQUAÇÃO DE CORREÇÃO “du x PPV” - GERAL.....	185
FIGURA 4.55 - EQUAÇÃO DE CORREÇÃO “du x PPV” – CAMINHÃO CARREGADO	186
FIGURA 4.56 - EQUAÇÃO DE CORREÇÃO “du x PPV” – CAMINHÃO VAZIO – TODOS OS COMBOIOS – MODELO LINEAR.	187
FIGURA 4.57 - EQUAÇÃO DE CORREÇÃO “du x PPV” – CAMINHÃO VAZIO – TODOS OS COMBOIOS – MODELO EXPONENCIAL.....	187
FIGURA 4.58 - EQUAÇÃO DE CORREÇÃO “du x PPV” – CAMINHÃO VAZIO – SEPARADOS POR CARACTERÍSTICA DO TESTE/COMBOIO – MODELO LINEAR.....	188
FIGURA 4.59 - EQUAÇÃO DE CORREÇÃO “du x PPV” – CARREGADEIRA.	189
FIGURA 4.60 - EQUAÇÃO DE CORREÇÃO “du x PPV” – ESCAVADEIRA.....	189
FIGURA 4.61 - EQUAÇÃO DE CORREÇÃO “du x PPV” – PATROL.....	190
FIGURA 4.62 - EQUAÇÃO DE CORREÇÃO “du x PPV” – ROLO LISO A/V	190
FIGURA 4.63 - EQUAÇÃO DE CORREÇÃO “du x PPV” – ROLO LISO S/V	191
FIGURA 4.64 - EQUAÇÃO DE CORREÇÃO “du x PPV” – TRATOR DE ESTEIRAS.	191
FIGURA 4.65 - EQUAÇÃO DE CORREÇÃO “du x PPV” – ROLO LISO + TRATOR DE ESTEIRAS – TODOS OS COMBOIOS – MODELO LINEAR.....	192
FIGURA 4.66 - EQUAÇÃO DE CORREÇÃO “du x PPV” – ROLO LISO + TRATOR DE ESTEIRAS – TODOS OS COMBOIOS – MODELO EXPONENCIAL.....	192
FIGURA 4.67 - EQUAÇÃO DE CORREÇÃO “du x PPV” – ROLO LISO + TRATOR DE ESTEIRAS – SEPARADOS POR CARACTERÍSTICA DO TESTE – MODELO LINEAR.....	193
FIGURA 4.68 – EQUAÇÃO DE CORREÇÃO “PPR x PPV” - GERAL.....	194

FIGURA 4.69 - EQUAÇÃO DE CORREÇÃO “PPR x PPV” – CAMINHÃO CARREGADO	194
FIGURA 4.70 - EQUAÇÃO DE CORREÇÃO “PPR x PPV” – CAMINHÃO VAZIO – TODOS OS COMBOIOS.....	195
FIGURA 4.71 - EQUAÇÃO DE CORREÇÃO “PPR x PPV” – CAMINHÃO VAZIO – SEPARADOS POR CARACTERÍSTICA DO TESTE/COMBOIO.....	196
FIGURA 4.72 - EQUAÇÃO DE CORREÇÃO “PPR x PPV” – CARREGADEIRA. ...	197
FIGURA 4.73 - EQUAÇÃO DE CORREÇÃO “PPR x PPV” – ESCAVADEIRA.	197
FIGURA 4.74 - EQUAÇÃO DE CORREÇÃO “PPR x PPV” – PATROL	198
FIGURA 4.75 - EQUAÇÃO DE CORREÇÃO “PPR x PPV” – ROLO LISO A/V.....	198
FIGURA 4.76 - EQUAÇÃO DE CORREÇÃO “PPR x PPV” – ROLO LISO S/V.....	199
FIGURA 4.77 - EQUAÇÃO DE CORREÇÃO “PPR x PPV” – TRATOR DE ESTEIRAS.	199
FIGURA 4.78 - EQUAÇÃO DE CORREÇÃO “PPR x PPV” – ROLO LISO + TRATOR DE ESTEIRAS – TODOS OS COMBOIOS.....	200
FIGURA 4.79 - EQUAÇÃO DE CORREÇÃO “PPR x PPV” – ROLO LISO + TRATOR DE ESTEIRAS – SEPARADOS POR CARACTERÍSTICA DO TESTE.	200
FIGURA 4.80 - EQUAÇÃO DE CORREÇÃO “du x PPV” – CAMINHÃO CARREGADO – SOMENTE COM PE09-SV07B.....	204
FIGURA 4.81 - EQUAÇÃO DE CORREÇÃO “du x PPV” – CAMINHÃO VAZIO – SOMENTE COM PE09-SV07B.....	204
FIGURA 4.82 - EQUAÇÃO DE CORREÇÃO “du x PPV” – ROLO LISO A/V – SOMENTE COM PE09-SV07B.....	205
FIGURA 4.83 - EQUAÇÃO DE CORREÇÃO “du x PPV” – ROLO LISO S/V – SOMENTE COM PE09-SV07B.....	205
FIGURA 4.84 – ESPECTRO DE FREQUÊNCIA DE VIBRAÇÃO – CAMINHÃO CARREGADO.....	207
FIGURA 4.85 - ESPECTRO DE FREQUÊNCIA DE VIBRAÇÃO – CAMINHÃO VAZIO.	207
FIGURA 4.86 - ESPECTRO DE FREQUÊNCIA DE VIBRAÇÃO – CARREGADEIRA.	207
FIGURA 4.87 - ESPECTRO DE FREQUÊNCIA DE VIBRAÇÃO – ESCAVADEIRA.	208

FIGURA 4.88 - ESPECTRO DE FREQUÊNCIA DE VIBRAÇÃO – PATROL.	208
FIGURA 4.89 – ESPECTRO DE FREQUÊNCIA DE VIBRAÇÃO – ROLO LISO A/V.	208
FIGURA 4.90 - ESPECTRO DE FREQUÊNCIA DE VIBRAÇÃO – ROLO LISO S/V.	209
FIGURA 4.91 - ESPECTRO DE FREQUÊNCIA DE VIBRAÇÃO – TRATOR DE ESTEIRAS.	209
FIGURA 4.92 - ESPECTRO DE FREQUÊNCIA DE VIBRAÇÃO – ROLO LISO A/V + TRATOR DE ESTEIRAS.	209
FIGURA 4.93 – VELOCIDADE DE VIBRAÇÃO DE PARTÍCULA DE PÍCO MÁXIMA PELA PROFUNDIDADE.	211
FIGURA 4.94 - VELOCIDADE DE VIBRAÇÃO DE PARTÍCULA DE PÍCO MÁXIMA PELA DISTÂNCIA HORIZONTAL.	211
FIGURA 4.95 – FREQUÊNCIAS DE VIBRAÇÕES – GERAL, CAMINHÃO VAZIO, CARREGADEIRA E ESCAVADEIRA.	212
FIGURA 4.96 - FREQUÊNCIAS DE VIBRAÇÕES – CAMINHÃO CARREGADO, PATROL, ROLO LISO A/V E ROLO LISO S/V.	213
FIGURA 4.97 - FREQUÊNCIAS DE VIBRAÇÕES – ROLO LISO + TRATOR DE ESTEIRAS E TRATOR DE ESTEIRAS.	213
FIGURA 4.98 – EQUAÇÃO GERAL PARA VARIAÇÃO OU EXCESSO DE POROPRESSÃO “du” EM MODELO LINEAR	215
FIGURA 4.99 - EQUAÇÃO GERAL PARA VARIAÇÃO OU EXCESSO DE POROPRESSÃO “du” EM MODELO NÃO-LINEAR	216
FIGURA 4.100 - EQUAÇÃO GERAL PARA A RAZÃO DE POROPRESSÃO “PPR” EM MODELO LINEAR	216
FIGURA 4.101 - EQUAÇÃO GERAL PARA A RAZÃO DE POROPRESSÃO “PPR” EM MODELO NÃO-LINEAR	217
FIGURA 4.102 – VERIFICAÇÃO DOS MODELOS/EQUAÇÕES DE CORRELAÇÃO – CAMINHÃO CARREGADO.	220
FIGURA 4.103 - VERIFICAÇÃO DOS MODELOS/EQUAÇÕES DE CORRELAÇÃO – CAMINHÃO VAZIO.	221
FIGURA 4.104 - VERIFICAÇÃO DOS MODELOS/EQUAÇÕES DE CORRELAÇÃO – CARREGADEIRA.	221

FIGURA 4.105 - VERIFICAÇÃO DOS MODELOS/EQUAÇÕES DE CORRELAÇÃO – ESCAVADEIRA.....	222
FIGURA 4.106 - VERIFICAÇÃO DOS MODELOS/EQUAÇÕES DE CORRELAÇÃO – PATROL.....	222
FIGURA 4.107 - VERIFICAÇÃO DOS MODELOS/EQUAÇÕES DE CORRELAÇÃO – ROLO LISO A/V.	223
FIGURA 4.108 - VERIFICAÇÃO DOS MODELOS/EQUAÇÕES DE CORRELAÇÃO – ROLO LISO S/V.	223
FIGURA 4.109 - VERIFICAÇÃO DOS MODELOS/EQUAÇÕES DE CORRELAÇÃO – TRATOR DE ESTEIRAS.....	224
FIGURA 4.110 - VERIFICAÇÃO DOS MODELOS/EQUAÇÕES DE CORRELAÇÃO – ROLO LISO + TRATOR DE ESTEIRAS.	224
FIGURA 4.111 - VERIFICAÇÃO DOS MODELOS/EQUAÇÕES DE CORRELAÇÃO – TODOS OS EQUIPAMENTOS.	225
FIGURA 4.112 – GRÁFICO COMPARATIVO DOS TESTES DE CAMPO, EQUAÇÃO PROPOSTA E REFERÊNCIAS DA LITERATURA – TODOS OS EQUIPAMENTOS	227
FIGURA 4.113 - GRÁFICO COMPARATIVO DAS LINHAS DE TENDÊNCIA DOS TESTES DE CAMPO, EQUAÇÃO PROPOSTA E REFERÊNCIAS DA LITERATURA – TODOS OS EQUIPAMENTOS.	228
FIGURA 4.114 - GRÁFICO COMPARATIVO DOS TESTES DE CAMPO, EQUAÇÃO PROPOSTA E REFERÊNCIAS DA LITERATURA – CAMINHÃO CARREGADO.	229
FIGURA 4.115 - GRÁFICO COMPARATIVO DOS TESTES DE CAMPO, EQUAÇÃO PROPOSTA E REFERÊNCIAS DA LITERATURA – CAMINHÃO VAZIO.	229
FIGURA 4.116 - GRÁFICO COMPARATIVO DOS TESTES DE CAMPO, EQUAÇÃO PROPOSTA E REFERÊNCIAS DA LITERATURA – CARREGADEIRA.	230
FIGURA 4.117 - GRÁFICO COMPARATIVO DOS TESTES DE CAMPO, EQUAÇÃO PROPOSTA E REFERÊNCIAS DA LITERATURA – ESCAVADEIRA	230
FIGURA 4.118 - GRÁFICO COMPARATIVO DOS TESTES DE CAMPO, EQUAÇÃO PROPOSTA E REFERÊNCIAS DA LITERATURA – PATROL.	231

FIGURA 4.119 - GRÁFICO COMPARATIVO DOS TESTES DE CAMPO, EQUAÇÃO PROPOSTA E REFERÊNCIAS DA LITERATURA – ROLO LISO A/V.	231
FIGURA 4.120 - GRÁFICO COMPARATIVO DOS TESTES DE CAMPO, EQUAÇÃO PROPOSTA E REFERÊNCIAS DA LITERATURA – ROLO LISO S/V.	232
FIGURA 4.121 - GRÁFICO COMPARATIVO DOS TESTES DE CAMPO, EQUAÇÃO PROPOSTA E REFERÊNCIAS DA LITERATURA – TRATOR DE ESTEIRAS.	232
FIGURA 4.122 - GRÁFICO COMPARATIVO DOS TESTES DE CAMPO, EQUAÇÃO PROPOSTA E REFERÊNCIAS DA LITERATURA – ROLO LISO A/V + TRATOR DE ESTEIRAS.....	233
FIGURA 4.123 – ESTIMATIVA DO FATOR DE SEGURANÇA – FS=1,5 – TODOS OS EQUIPAMENTOS.	235
FIGURA 4.124 - ESTIMATIVA DO FATOR DE SEGURANÇA SÓ COM LINHAS DE TENDÊNCIA – FS=1,5 – TODOS OS EQUIPAMENTOS.	236
FIGURA 4.125 - GUIA DE VALORES DE VELOCIDADES DE VIBRAÇÃO (v_i ,máx.) PARA AVALIAÇÃO DOS EFEITOS DE VIBRAÇÕES DE CURTO PRAZO EM ESTRUTURAS.	240
FIGURA 4.126 - ESPECTRO DE FREQUÊNCIA DE VIBRAÇÃO COM LIMITES DA DIN-4150-3:2016 – CAMINHÃO CARREGADO, CAMINHÃO VAZIO, CARREGADEIRA E ESCAVADEIRA.....	241
FIGURA 4.127 - ESPECTRO DE FREQUÊNCIA DE VIBRAÇÃO COM LIMITES DA DIN-4150-3:2016 – PATROL, ROLO LISO A/V, ROLO LISO S/V E TRATOR DE ESTEIRAS.....	241
FIGURA 4.128 - ESPECTRO DE FREQUÊNCIA DE VIBRAÇÃO COM LIMITES DA DIN-4150-3:2016 – ROLO LISO A/V + TRATOR DE ESTEIRAS. ..	242

LISTA DE QUADROS

QUADRO 2.1 - LIMITES DE VELOCIDADE DE VIBRAÇÃO DE PARTÍCULA DE PICO POR FAIXAS DE FREQUÊNCIA.....	58
---	----

QUADRO 2.2 - GUIA DE VALORES DE VELOCIDADES DE VIBRAÇÃO ($v_{i,máx.}$) PARA AVALIAÇÃO DOS EFEITOS DE VIBRAÇÕES DE CURTO PRAZO EM ESTRUTURAS.	59
QUADRO 3.1 – RESUMOS DOS TESTES REALIZADOS	109
QUADRO 4.1 - ENSAIOS DO ATERRO/PISTA EXPERIMENTAL 1	126
QUADRO 4.2 - ENSAIOS DO ATERRO/PISTA EXPERIMENTAL 2.	129
QUADRO 4.3 - PROPRIEDADES ESPECÍFICAS DAS CAMADAS – ATERRO 1..	130
QUADRO 4.4 - PROPRIEDADES ESPECÍFICAS DOS MATERIAIS NAS COTAS DE INSTALAÇÃO DOS PIEZÔMETROS – ATERRO 1.....	131
QUADRO 4.5 - PROPRIEDADES ESPECÍFICAS DOS MATERIAIS NAS COTAS DE INSTALAÇÃO DOS SISMÓGRAFOS – ATERRO 1.	132
QUADRO 4.6 - PROPRIEDADES ESPECÍFICAS DAS CAMADAS – ATERRO 2..	133
QUADRO 4.7 - PROPRIEDADES ESPECÍFICAS DOS MATERIAIS NAS COTAS DE INSTALAÇÃO DOS PIEZÔMETROS – ATERRO 2.....	134
QUADRO 4.8 - PROPRIEDADES ESPECÍFICAS DOS MATERIAIS NAS COTAS DE INSTALAÇÃO DOS SISMÓGRAFOS – ATERRO 2.	135
QUADRO 4.9 - PIEZÔMETROS E SISMÓGRAFOS CORRESPONDENTES.	163
QUADRO 4.10 - MATRIZES DE CORRELAÇÃO – RESUMO DOS RESULTADOS COM ENFOQUE NAS VARIÁVEIS DE ESTUDO (d_u E PPR).	176
QUADRO 4.11 – MODELOS DE CORRELAÇÃO – d_u x PPV.	180
QUADRO 4.12 - MODELOS DE CORRELAÇÃO – PPR x PPV.	181
QUADRO 4.13 - – RESUMO DOS RESULTADOS DAS EQUAÇÕES DE CORRELAÇÃO.	201
QUADRO 4.14 – EQUIPAMENTOS, FREQUÊNCIAS E CORREÇÕES DE d_u E PPV.	210
QUADRO 4.15 - ANÁLISE DO POTENCIAL DE LIQUEFAÇÃO – RAZÃO DE POROPRESSÃO “PPR” E DEFORMAÇÃO CISALHANTE “ γ ”.....	244
QUADRO 0.1 – CATÁLOGOS TÉCNICOS DOS EQUIPAMENTOS DE CONSTRUÇÃO.....	258
QUADRO 0.2 – ENSAIOS CPTUS E SÍSMICOS UTILIZADOS NOS ESTUDOS. ...	258
QUADRO 0.3 – CATÁLOGO TÉCNICO DOS INSTRUMENTOS – PIEZÔMETROS E SISMÓGRAFOS.	259

LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1 - REGISTROS DE LIQUEFAÇÃO E EXCESSO DE POROPRESSÃO SIGNIFICATIVA ASSOCIADOS A VELOCIDADES DE VIBRAÇÃO E PARTÍCULA DE PICO – PPV.	60
TABELA 2.2 - TRABALHOS PUBLICADOS COM LIMITES DE DEFORMAÇÕES CISALHANTES PARA GERAÇÃO DE RAZÃO DE POROPRESSÃO E LIQUEFAÇÃO.	75

LISTA DE ABREVIATURAS OU SIGLAS

ANM	- Agência Nacional De Mineração.
APP	- Área de Preservação Permanente.
CPTU	- Ensaio De Piezocone Com Medida De Poropressão.
DIN	- Instituto Alemão para Normalização.
DPL	- Penetrômetro Dinâmico Leve.
FEAM	- Fundação Estadual de Meio Ambiente – MG.
ICOLD	- Comissão Internacional de Grandes Barragens.
MNA ou INA	- Medidor/Indicador de Nível de Água.
MS	- Marco Superficial.
NBR	- Norma Brasileira.
PAEBM	- Plano de Ação de Emergência para Barragens de Mineração.
PE ou PZE	- Piezômetro Elétrico.
PNSB	- Política Nacional de Segurança de Barragens.
PPR ou r_u	- Razão de Poropressão.
PPV	- Velocidade De Vibração De Partícula De Pico (em cada eixo).
PVS	- Velocidade De Vibração De Partícula de Pico Resultante (somatória dos três eixos).
PR	- Placa de Recalque.
PZ ou PZC	- Piezômetro Casagrande (Tubo Aberto - Convencional)
S-CPTU	- Ensaio De Piezocone Com Medida De Poropressão E Ensaio Sísmico.
SBT	- Classificação de Solos com Ensaio CPTU (<i>Soil Behaviour Type</i>).

SE	- Sismógrafo de Engenharia.
SEMAD	- Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável.
SP	- Sondagem a Percussão.
SNISB	- Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens.
ST	- Sondagem a Trado.
VT	- Ensaio de Palheta ou <i>Vane Test</i> .

LISTA DE SÍMBOLOS

B_q	- Parâmetro de poropressão do ensaio de cone.
D_r	- Densidade relativa.
Δu ou du	- Excesso de poropressão.
$\Delta u_{\text{máx}}$	- Excesso de poropressão máximo.
E	- Módulo de deformabilidade do solo.
g	- Aceleração da gravidade.
γ_n	- peso específico natural do solo.
γ	- Deformação cisalhante.
$\gamma_{\text{máx}}$	- Deformação cisalhante máxima.
γ_{pico}	- Deformação cisalhante de pico.
F_r	- Razão de atrito do cone normalizada pela tensão efetiva.
G	- Módulo cisalhante do solo.
$G_{\text{máx}}$	- módulo cisalhante máximo do solo.
f_s	- Atrito lateral do ensaio de cone;
N	- Número de ciclos de carregamento.
N_l	- Número de ciclos de tensões uniformes que causam liquefação.
σ'_0	- Tensão efetiva inicial.
σ'_{v0}	- Tensão vertical efetiva inicial.
σ'_v	- Tensão vertical efetiva.
σ_{v0}	- Tensão total.
q_t	- Resistência de ponta do cone corrigida pelos efeitos poropressão;
q_c	- Resistência de ponta do ensaio de cone;
Q_{tn}	- Resistência de ponta do cone normalizada pela tensão efetiva.

R_f – Razão de atrito do ensaio de cone;

r_u - Razão de poropressão (mesmo que PPR).

$s_{u(yield)}$ ou $s_{u(pico)}$ - Resistência ao cisalhamento não-drenada de pico.

$s_{u(liq)}$ - Resistência ao cisalhamento não-drenada liquefeita.

u - Poropressão

u_g - Excesso de poropressão gerado.

u_2 - Poropressão devido a penetração do cone (imediatamente atrás da ponta do cone;

V_c ou c - Velocidade da onda de compressão.

V_s ou s - Velocidade da onda cisalhante.

ψ – Parâmetro de estado.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	28
1.1 OBJETIVOS	31
1.1.1 Objetivo geral	31
1.1.2 Objetivos específicos.....	31
1.2 JUSTIFICATIVA	32
1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO	36
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	37
2.1 REJEITOS DE MINERAÇÃO	37
2.1.1 Disposição de Rejeitos	38
2.1.2 Barragens de contenção de rejeitos	41
2.2 LIQUEFAÇÃO DE REJEITOS	43
2.2.1 Liquefação dinâmica (sísmica)	47
2.2.2 Análise da suscetibilidade à liquefação	48
2.3 INSTRUMENTAÇÃO PARA MONITORAMENTO DE VIBRAÇÕES E POROPRESSÕES	51
2.3.1 Sismógrafos de Engenharia	51
2.3.2 Piezômetros Elétricos (Corda Vibrante)	53
2.4 AÇÕES DINÂMICAS – VIBRAÇÕES	55
2.4.1 Frequências naturais de vibração de solos	56
2.4.2 Critérios de segurança (limites) para vibrações	57
2.4.3 Geração de excessos de poropressão induzidos por vibrações	61
2.4.4 Vibrações induzidas por equipamentos de construção	67
2.5 DESCARACTERIZAÇÃO DE BARRAGENS.....	70
2.6 TRABALHOS CORRELATOS	73
3 MATERIAIS E MÉTODOS	88
3.1 MATERIAIS	88
3.1.1 Caso de estudo – Aterro de regularização em um reservatório de rejeitos.....	90
3.1.1.1 Investigações de campo	98
3.1.1.2 Alturas de aterro dos testes	102
3.1.2 Instrumentação utilizada.....	102
3.1.2.1 Piezômetros elétricos	102
3.1.2.2 Sismógrafos de Engenharia.....	103

3.1.3 Equipamentos de construção	104
3.1.3.1 Caminhão Basculante.....	104
3.1.3.2 Escavadeira	105
3.1.3.3 Patrol - Motoniveladora.....	106
3.1.3.4 Carregadeira.....	106
3.1.3.5 Rolo Liso A/V e S/V	107
3.1.3.6 Trator de esteiras.....	108
3.1.3.7 Combinação de Rolo Liso A/V com Trator de esteiras	108
3.1.4 Testes de campo	109
3.2 MÉTODOS	111
3.2.1 Propriedades dos materiais.....	112
3.2.1.1 Caracterização dos materiais	112
3.2.1.2 Propriedades específicas dos materiais	114
3.2.2 Vibrações dos equipamentos de construção	116
3.2.2.1 Análise da propagação das vibrações	117
3.2.3 Poropressões induzidas pelas vibrações	117
3.2.4 Correlações entre vibrações e poropressões	118
3.2.4.1 Correlações gerais.....	119
3.2.4.2 Matrizes de correlação	119
3.2.4.3 Modelos de correlação	120
3.2.4.4 Equações de correlação	121
3.2.5 Análises de potenciais de liquefação.....	121
4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	123
4.1 PROPRIEDADES DOS MATERIAIS – SOLOS E REJEITOS.....	123
4.1.1 Caracterização – Classificação dos Materiais	123
4.1.1.1 Aterro 1	123
4.1.1.2 Aterro 2.....	126
4.1.2 Propriedades específicas	129
4.1.2.1 Aterro 1	130
4.1.2.2 Aterro 2.....	133
4.2 VIBRAÇÕES – SISMÓGRAFOS DE ENGENHARIA	136
4.2.1 Aterro 1.....	137
4.2.2 Aterro 2.....	142
4.2.3 Análise dos resultados das vibrações	147

4.3 POROPRESSÕES – PIEZÔMETROS	149
4.3.1 Aterro 1.....	151
4.3.1.1 Aterro 1 – Dados totais (u).....	151
4.3.1.2 Aterro 1 – Variações de poropressões (Δu ou du).....	153
4.3.2 Aterro 2.....	155
4.3.2.1 Aterro 2 – Dados totais (u).....	156
4.3.2.2 Aterro 2 – Variações de poropressões (Δu ou du).....	158
4.3.3 Análise dos resultados das vibrações	160
4.4 CORRELAÇÕES ENTRE VIBRAÇÕES E POROPRESSÕES	162
4.4.1 Correlações gerais	164
4.4.2 Matrizes de correlação	168
4.4.3 Modelos de correlação	178
4.4.3.1 Modelos gerais de variação de poropressão “ du ”	179
4.4.3.2 Modelos gerais de razão de poropressão “PPR”	181
4.4.3.3 Modelos específicos de “ du ” e “PPR”	182
4.4.4 Equações de correlação.....	185
4.4.4.1 Equações de correlação com a variação da poropressão “ du ”	185
4.4.4.2 Equações de correlação com a razão da poropressão “PPR”	193
4.4.4.3 Resumo e análise dos resultados das equações de correlação	201
4.4.4.4 Análises das frequências de vibração	206
4.4.5 Proposta de equação de correlação geral	214
4.4.5.1 Equação empírica geral proposta	218
4.4.5.2 Verificação da equação geral proposta	220
4.4.6 Considerações sobre os resultados dos estudos de correlação	236
4.5 ANÁLISES DOS POTENCIAIS DE LIQUEFAÇÃO.....	239
4.5.1 Valores limites de referências normativas	239
4.5.2 Análises para a razão de poropressão “PPR” e deformação cisalhante “ γ ”	243
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	248
5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	251
REFERÊNCIAS.....	253
ANEXOS	258
ANEXO 1 - CATÁLOGOS DOS EQUIPAMENTOS DE CONSTRUÇÃO.....	258
ANEXO 2 - ENSAIOS CPTUS DOS TESTES	258
ANEXO 3 - CATÁLOGO TÉCNICO DOS INSTRUMENTOS	259

1 INTRODUÇÃO

Em instalações de armazenamento de rejeitos, era prática comum depositar os rejeitos hidráulicamente com alteamento a montante para os barramentos, onde a estabilidade da estrutura depende da resistência dos próprios rejeitos. Devido ao seu método de deposição, as barragens de rejeitos alteadas a montante são vulneráveis ao fenômeno da liquefação (LEDESMA *et. al.*, 2022).

O fenômeno da liquefação de rejeitos pode ser entendido como a ação que leva qualquer substância do seu estado natural para o estado fluido. Especificamente no caso dos rejeitos de mineração, a liquefação está associada a perda repentina de sua resistência em pequenas deformações, levando o material para a resistência residual, muito inferior à resistência inicial (PEREIRA, 2005).

A perda de resistência do material ocorre com o acréscimo elevado de poropressões e redução significativa das tensões efetivas. Materiais fofos ou moles, que apresentam contração quando sujeitos a carregamentos, são os susceptíveis ao fenômeno da liquefação, justamente por propiciarem o acréscimo de poropressão, e a consequente redução das tensões efetivas. Materiais com estas características apresentam comportamento denominado de “*strain softening*” ou amolecimento sob carregamento não-drenado (OLSON, 2003).

Os gatilhos para a liquefação dos materiais, embora possam estar relacionados a carregamentos estáticos, muitas vezes ocorrem sob carregamentos dinâmicos, como a ação de vibrações, que podem ter origem em eventos sísmicos e detonações de explosivos em minas (LARSON-ROBL, 2016).

A liquefação também pode ser induzida por deformações (*deformation induced flow*), sem que haja um carregamento adicional. Neste caso, a liquefação ocorre devido à redistribuição das tensões internas em resposta a deformações, como aquelas causadas por recalques, deslizamentos internos, movimentos sísmicos (vibrações) secundários não carregantes ou movimentações do material sob tensões iniciais (ROBERTSON, 2009; JEFFERIES e BEEN, 2016).

A suscetibilidade a liquefação dos rejeitos está relacionada ao índice de fragilidade do material (*material brittleness index*), que reflete a diferença entre a resistência ao cisalhamento de pico e residual, sendo um indicativo de sua vulnerabilidade ao colapso estrutural (OLSON e STARK, 2002).

Neste contexto, o tráfego de equipamentos de construção em obras de engenharia sobre rejeitos também pode ser considerado um possível gatilho, por gerarem vibrações durante as operações, que podem causar deformações e acréscimos de poropressões nos materiais.

Já se dispõem na literatura de estudos dos efeitos das vibrações em rejeitos propiciadas por sismos ou detonações de explosivos, como os apresentados por Veyera (1985), Matasovic e Kavazanjian Jr (2006), Charlie *et. al.* (2013), Larson-Robl (2016), Ishimwe, Coffman e Rollins (2020), entre outros, porém poucos tratam especificamente da avaliação dos efeitos provenientes das vibrações geradas pelo tráfego de equipamentos de construção.

Alguns estudos realizaram a simulação de ações dinâmicas de equipamentos e de sismos naturais em laboratório, com ensaios triaxiais cíclicos, modelos de grande escala e centrífugas, como os trabalhos de Dobry e Abdo. (2015), Do *et. al.* (2023) e Tokimatsu e Yoshimi (1983), Marcuson *et al.* (1990) e Morgenstern *et al.* (2016) *apud* Stark *et. al.* (2022), porém sem a realização de testes diretos de campo com equipamentos de construção.

Apesar de se tratarem de ações dinâmicas, as formas, propagações e efeitos podem ser bastante distintos. Ações de detonações de explosivos, por exemplo, geram um pulso de vibrações elevado em regiões próximas à detonação, porém em um curto período de tempo, e só podem apresentar efeitos de sobreposição de ondas no caso de um maior número de detonações próximas e consecutivas (CHARLIE, *et. al.*, 2013). Já as ações do tráfego de equipamentos, se caracterizam pela menor intensidade, porém de longa duração, enquanto o equipamento estiver operando. Além disso, a proximidade de mais equipamentos, o que é comum em obras de engenharia, podem gerar o efeito de sobreposição das vibrações.

Outra característica importante no estudo das vibrações é o horizonte ou distância de propagação dos efeitos, que podem estar diretamente associados às frequências das vibrações das partículas, que tendem a se dissipar em pequenas distâncias se forem muito superiores às frequências naturais das estruturas, que tendem a ser baixas, por não sofrerem o efeito de ressonância. Por outro lado, podem gerar a propagações em maiores distâncias para vibrações com frequência mais baixas, o que interfere diretamente nas análises e limites destes tipos de ações (TRIPATHY E SHIRKE, 2010).

O estudo das vibrações em rejeitos devidas ao tráfego de equipamentos tem aumentado nos últimos anos com a necessidade da descaracterização das barragens de rejeito alteadas a montante, em atendimento à resolução ANM 13/2017, e mais recentemente com a consolidação dos atos normativos de segurança de barragens de mineração, com as resoluções ANM 95/2022 e 130/2023. O processo de descaracterização de barragens e diques envolve, muitas vezes, a remoção ou o reforço da estrutura, que estará sujeita ao tráfego de equipamentos em ambos os casos, portanto necessitará da avaliação das vibrações com o estabelecimento de limites ou controles para evitar ou impedir possíveis liquefações localizadas ou até globais dos rejeitos e outros materiais fofos presentes.

As avaliações de vibrações e poropressões em rejeitos podem ser realizadas através de instrumentação de campo, com sismógrafos de engenharia e piezômetros elétricos, para o monitoramento das velocidades de vibrações de partículas e das poropressões associadas em materiais muitas vezes investigados e caracterizados com ensaios de cone, com medidas de poropressão e ensaios sísmicos (S-CPTU). Porém, para um estudo ou avaliação prévia, antes dos trabalhos efetivos de campo, pouco se tem disponível na literatura de estudos relacionados aos efeitos das vibrações em rejeitos, menos ainda para as particularidades de cada tipo de rejeito. Por outro lado, os testes experimentais e obras têm sido realizados e propiciam um banco de dados para iniciar estudos relacionados e preditivos.

O monitoramento atual das obras de engenharia com tráfego de equipamentos em rejeitos de mineração tem sido realizado com base em referências normativas que não estão associadas a este tipo de obra, como a norma brasileira NBR 9653:2018 (Guia para avaliação dos efeitos provocados pelo uso de explosivos nas minerações em áreas urbanas) ou, como exemplo, a norma alemã DIN-4150-3:2016 (*Vibrations in Buildings – Part 3: Effects on structures*), que são relacionadas a obras urbanas e estruturas. Ou ainda, com base em referências que não relacionam as vibrações com as poropressões, como Tripathy e Shirke (2010). Com isso, pode-se estar trabalhando com critérios conservadores ou em condições inseguras. O real entendimento do fenômeno associado pode ser melhor entendido com estudos específicos que relacionem as vibrações e as poropressões, e os efeitos nos rejeitos de mineração relacionados a liquefação, o que até então não se dispõe na literatura técnica de forma direta e é o que se propõe no presente trabalho.

Neste contexto, verifica-se a necessidade de um maior entendimento ou de um critério que relacione diretamente as vibrações e as poropressões e os seus efeitos nos rejeitos de mineração, no contexto de obras de engenharia e do tráfego de equipamentos, como forma de se prever ou estabelecer limites para essas ações dinâmicas em estruturas relacionadas. Para isto, podem ser analisados dados de piezômetros e sismógrafos de engenharia obtidos em testes experimentais de campo e dados de monitoramento em obras de engenharia em mineração, como reforço ou remoção de barragens e diques, considerando-se também as características dos rejeitos obtidos com ensaios de campo e laboratório.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

O objetivo geral desse trabalho é analisar as ações dinâmicas oriundas do tráfego de equipamentos de construção em rejeitos de mineração, as suas implicações e efeitos na geração e propagação de vibrações e excessos de poropressões em rejeitos de mineração. Objetiva-se, também, correlacionar e identificar padrões de comportamento, de modo a prever ou orientar condições seguras de trabalhos de campo e evitar possíveis processos de liquefação nos rejeitos de mineração.

1.1.2 Objetivos específicos

Para cumprir o objetivo geral, os seguintes objetivos específicos foram estabelecidos:

- Elaborar uma fundamentação teórica acerca dos conceitos envolvidos na geração das ações dinâmicas ou vibrações em rejeitos de mineração, do fenômeno de liquefação em rejeitos, dos métodos de avaliação de vibrações e poropressões, instrumentação geotécnica, investigações geotécnicas, descaracterização de barragens de mineração e uma revisão bibliográfica com os estudos relacionados e disponíveis na literatura técnica.

- Analisar e organizar os dados existentes de monitoramento em testes experimentais e em obras de reforço ou descaracterização de barragens e diques, bem como os dados de caracterização dos rejeitos e dos equipamentos de construção utilizados e ensaiados nos testes e monitoramentos.
- Correlacionar e estabelecer padrões entre a geração e propagação das vibrações e excessos de poropressões associadas aos diferentes tipos de equipamentos de construção e demais variáveis envolvidas no processo.
- Propor formas de previsão do comportamento dos rejeitos relacionados a geração de excessos de poropressão quando sujeitos a vibrações devidas ao tráfego de equipamentos de construção, para incorporação das análises e avaliações dessas ações na metodologia corrente de projetos e de execução de obras de mineração.
- Verificar as possíveis implicações ou suscetibilidades das ações dinâmicas devidas ao tráfego de equipamentos para o fenômeno da liquefação de rejeitos.

1.2 JUSTIFICATIVA

O presente estudo, que objetiva analisar as relações entre ações dinâmicas de tráfegos de equipamentos e as gerações de excessos de poropressão, de modo a evitar processos de liquefação, sejam localizados ou globais, apresenta justificativas em todos os âmbitos (técnico, econômico, ambiental e social), dadas as enormes consequências da ruptura de uma barragem de rejeito. Nos parágrafos que se seguem serão apresentadas informações disponíveis na literatura técnica, que motivam e justificam a realização deste estudo.

Existem muitas barragens no Brasil na área da mineração que foram construídas pelo método de alteamento a montante, isto se deu pelo seu baixo custo relativo, a não necessidade de material de empréstimo, redução de volume de materiais de construção, e também pela rapidez e velocidade construtiva. Porém, este método apresenta uma desvantagem significativa, que é a suscetibilidade à

liquefação, pois os alteamentos são realizados sob o próprio rejeito, com curto período de deposição, estando o rejeito inconsolidado e no estado fofo ou mole, podendo ocorrer a liquefação do material quando submetido a carregamentos dinâmicos ou estáticos (RUSSO, 2007).

Os grandes acidentes com barragens de rejeitos ocorridos no Brasil nos últimos anos foram em estruturas construídas pelo método a montante, e que resultaram na proibição desse tipo de método construtivo. Além da exigência do descomissionamento e a descaracterização das estruturas existentes, com prazos estabelecidos (Resolução ANM nº 13/2019). Essas e outras falhas causaram fatalidades significativas e impactos ambientais.

De forma geral, e relacionado ao fenômeno da liquefação em barragens de rejeitos, de acordo com o Comitê Mundial de Barragens (ICOLD), desde o início do século XX, foram registrados mais de 200 casos de acidentes com barragens de rejeitos, e a maioria delas relacionados a eventos dinâmicos (sísmicos), dada a propensão a liquefação dos rejeitos saturados com as ações sísmicas, levando ao rompimento da barragem local. Estes e outros fatores levaram o estudo do potencial de liquefação e a previsão de possíveis danos para os tópicos mais importantes da atualidade na engenharia geotécnica sísmica (JIN, *et. al.*, 2022). Além disso, após a falha de Brumadinho-MG em 2019, que ainda não foi comprovada a causa de sua ruptura, a prática de projetos e avaliações de estabilidade de rejeitos é assumir que todos os materiais suscetíveis a liquefação serão liquefeitos em algum momento, sendo necessária sua consideração nas análises e projetos correntes (LEDESMA *et. al.*, 2022).

Com relação às ações dinâmicas como gatilhos de liquefação de barragens de rejeito, Ferdosi *et. al.* (2015) e Jin *et. al.* (2022) citam os carregamentos sísmicos como principais problemas para garantir a estabilidade de uma bacia de rejeitos. Isto devido a agitação ou o comportamento pós-sísmico dos rejeitos, no que se refere à dissipação do excesso poropressão que foi gerada durante a ação dinâmica.

Sobre os impactos da ruptura de uma barragem de rejeitos, abaixo são citados os casos dos acidentes no estado de Minas Gerais, em Mariana em 2015 e em Brumadinho em 2019, com as catastróficas consequências, como é de conhecimento geral. Em ambos os casos, o rompimento foi ocasionado pela liquefação dos rejeitos das estruturas, que foram construídas pelo método de montante.

- Mariana 2015: A Barragem de Fundão, rompeu em 5 de novembro de 2015, resultando na perda de 19 vidas humanas e na liberação de 43,7 milhões de metros cúbicos de rejeitos de mineração no Rio Doce (Samarco, 2016). Segundo a SEMAD/MG, Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento sustentável (meioambiente.mg.gov.br):

“O barramento, classificado como de alto potencial de dano ambiental, era destinado a receber e armazenar o rejeito gerado pela atividade de beneficiamento de minério de ferro. O rompimento causou efeito em cadeia, com o extravasamento da Barragem Santarém a jusante, de acumulação de água, e retenção de sedimentos, localizada também na área da empresa (Samarco). Os danos ao meio ambiente foram inevitáveis. A lama de rejeitos devastou o Distrito de Bento Rodrigues, situado a cerca de 5 km abaixo da barragem, foi carregada até o Rio Gualaxo do Norte, a 55 km, desaguando no Rio do Carmo, atingindo em seguida o Rio Doce, afetando também o litoral do estado do Espírito Santo. No distrito de regência, situado no município de Linhares, localizado no Estado do Espírito Santo, os danos às Áreas de Preservação Permanente (APP) nas margens destes cursos d’água são incalculáveis, além dos prejuízos sociais econômicos a diversos proprietários rurais, povos indígenas e à população dos municípios mineiros e capixabas afetados pelo comprometimento da qualidade das águas e deposição de rejeitos.”

- Brumadinho 2019: Segundo o Governo do Estado de Minas Gerais (mg.gov.br):

“A Barragem B1, localizada em Brumadinho-MG, rompeu em 25 de janeiro de 2019, acarretando no rompimento em sequência das barragens B-IV e B-IVA-A, localizadas na Mina Córrego do Feijão, de propriedade da Vale S.A., e resultou na perda de 272 vidas humanas. Foi realizada uma operação de salvamento de grandes proporções, a maior já realizada no Brasil e América Latina. No total 26 municípios foram atingidos, com a liberação de 12 milhões de metros cúbicos de rejeitos. Desses, uma parte permaneceu na área da antiga B-I, cerca de 2 Mm³. Na calha do ribeirão Ferro-Carvão até sua confluência com o rio Paraopeba, ficaram depositados 7,8 Mm³ e a parte restante (2,2 Mm³) atingiu a calha do rio Paraopeba, propagando-se até o remanso da Usina Hidrelétrica (UHE) de Retiro Baixo, entre os municípios mineiros de Curvelo e Pompéu. Além das perdas humanas, o desastre também causou impactos e prejuízos ambientais e socioeconômicos. A vegetação, a fauna e outros rios foram atingidos ao longo de centenas de quilômetros, atravessando o território de mais de 20 municípios e causando um dos maiores desastres socioambientais da história do país. Os impactos negativos na economia não se restringiram aos municípios da bacia do Rio Paraopeba, mas tiveram reflexos na Região Metropolitana de Belo Horizonte e no estado de Minas Gerais como um todo.”

As ações ou carregamentos dinâmicos, que podem ser causadores da liquefação, podem ter diferentes origens, além dos sismos naturais, como as

detonações de explosivos e o tráfego de máquinas pesadas, que também podem afetar as estruturas geotécnicas (CASTILHO, 2017).

O estudo da liquefação induzidos por detonações de explosivos tem recebido atenção significativa, conforme citado por (Liew *et. al.*, 2020). Charlie *et. al.* (2013) listou diversos casos de liquefação induzida por explosivos relatados na literatura da época. Além destes, Veyera, (1985), Tripathy e Shirke (2010), Larson-Robl, 2016, e Ishimwe *et. al.* (2020), apresentam estudos relacionados ao mesmo tema.

Estudos específicos de liquefação ou geração de excessos de poropressão devido ao tráfego de equipamentos pesados não são encontrados na literatura. Ungar e Zapfe (2011), comentam sobre a inevitável geração de vibrações no solo com a construção de novas obras, com impactos no próprio canteiro e em construções vizinhas, sendo necessária a atenção especial em estruturas sensíveis a vibrações. Castilho (2017) apresenta análises relacionadas às vibrações devidas ao tráfego de equipamentos, porém sem relação com as possíveis poropressões geradas. E Chang *et. al.*, (2007) apresenta um estudo com simulação de vibrações com o uso de um caminhão vibratório estacionado, sem relação com o seu tráfego, ou com as diferentes vibrações e frequências de cada tipo de equipamento.

Os critérios de segurança disponíveis devido às vibrações no solo são essencialmente para áreas urbanas e estruturas de concreto, e podem não ser adequados para estruturas geotécnicas como barragens, devido ao fenômeno da liquefação (TRIPATHY E SHIRKE, 2010). No Brasil, a norma NBR 9653:2018 apresenta limites de vibrações em áreas e construções urbanas devido aos efeitos provocados por explosivos em minerações. Uma referência internacional que tem sido utilizada como análise preliminar e é um pouco mais restritiva é a norma alemã DIN-4150-3:2016, que apresenta limites de velocidades de vibração para estruturas convencionais, porém também para estruturas que não se classificam como construções comerciais ou residenciais, e são sensíveis aos efeitos das vibrações, porém sem especificar o tipo de estrutura (como barragens, etc.). Tanto a norma brasileira como a alemã, dentro dos seus contextos próprios, apresentam limites de velocidade de vibração de partícula associados às suas frequências de vibração.

Em se tratando das medidas de estabilização para a descaracterização de barragens alteadas a montante, que são obrigatórias e com prazo legal para os seus projetos e execuções, estas podem ser realizadas com a construção de reforços, como bermas de equilíbrio, porém também pode ser considerada a remoção da

estrutura, entre outras atividades relacionadas. Em qualquer das opções de descaracterização da estrutura, são necessárias intervenções com o inevitável tráfego de equipamentos de construção na região da obra que, além de conter rejeito, pode também ter sua fundação constituída em rejeito de mineração, para o caso de diques internos aos reservatórios das barragens. Nessas obras, é comum transitar equipamentos de um lado para o outro, com operações contínuas e de mais de um equipamento, podendo causar um aumento expressivo de vibração e poropressão por sobreposição das ações.

Sendo, então, necessária a avaliação e o monitoramento constante durante obra para a geração de excessos de poropressão também devidas ao tráfego de equipamentos de construção, com desejável análise preliminar dos seus possíveis efeitos na geração de excessos de poropressões e possíveis gatilhos para liquefações locais ou globais.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho está dividido em cinco capítulos. No primeiro capítulo, apresenta-se a introdução, os objetivos e as justificativas para o estudo.

No capítulo 2 apresenta-se a fundamentação teórica e a revisão bibliográfica, relacionadas ao tema de estudo, como rejeitos de mineração, liquefação de rejeitos, instrumentação geotécnica, ações dinâmicas e vibrações e descaracterização de barragens.

O capítulo 3 é relacionado aos materiais e métodos do estudo, com as descrições dos casos analisados e os dados disponíveis de cada caso, assim como da metodologia proposta para as análises e correlações de vibrações, poropressões e potenciais de liquefação.

Os capítulos 4 apresenta e analisa todos os resultados obtidos, desde análises específicas de vibrações e poropressões, análises gerais e estudos de correlação, com proposições de equações de correção. Por fim, apresenta, também, possíveis potenciais de liquefação associados.

No capítulo 5 são apresentadas as considerações finais do estudo e as sugestões para trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo apresenta-se a fundamentação teórica e a revisão bibliográfica relacionadas ao tema de estudo, como rejeitos de mineração, liquefação de rejeitos, instrumentação geotécnica, ações dinâmicas e vibrações, descaracterização de barragens e trabalhos correlatos.

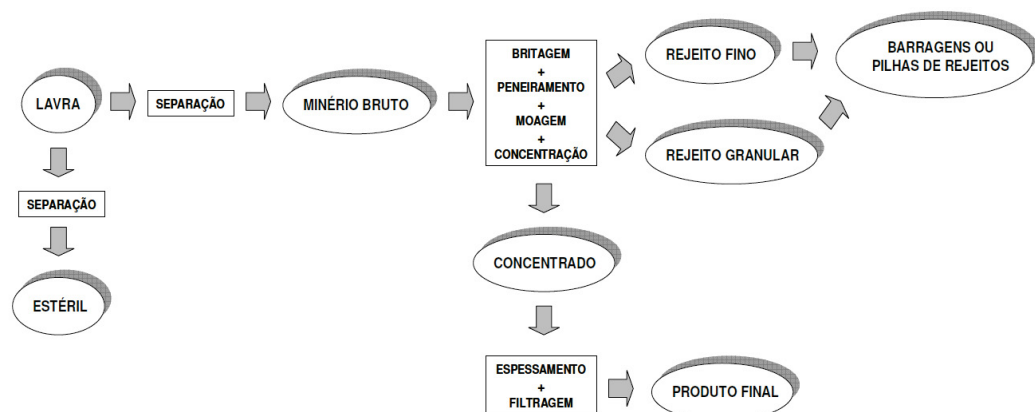
2.1 REJEITOS DE MINERAÇÃO

Segundo Chammas (1989), um conjunto de atividades relacionadas à extração econômica de bens minerais da crosta terrestre, que geram modificações no meio ambiente devido às atividades de lavra e de beneficiamento de minerais, denomina-se mineração. O processo da mineração gera dois tipos de resíduos, o estéril e o rejeito, que possuem características distintas.

Os resíduos da mineração são materiais de baixo valor comercial, sendo o ‘estéril’, aquele material gerado a partir da extração do minério na jazida, e o ‘rejeito’, o material gerado após o processo de beneficiamento e concentração dos produtos nas usinas de tratamento (PIRETE, 2010).

Na FIGURA 2.1 apresenta-se um fluxograma básico do processo de mineração, onde o escopo das operações envolvidas pode apresentar mudanças, de acordo com as características do minério a ser lavrado. Em alguns casos, utilizam-se mecanismos de concentração por densidade, separação magnética, separação eletrostática, ciclonagem, aglomeração, flotação e pirólise (RUSSO, 2007).

FIGURA 2.1 - FLUXOGRAMA BÁSICO DO PROCESSO DE MINERAÇÃO.



FONTE: Russo (2007).

O rejeito difere do estéril por não ser encontrado na natureza no seu estado final. O rejeito é fruto do beneficiamento do minério, sendo a parcela do mineral bruto que foi levado à instalação do beneficiamento e após o tratamento, foi rejeitado como material de valor comercial (RUSSO, 2007).

- O rejeito em forma de polpa passa por três etapas de comportamento, de acordo com Chammas (1989):
- Comportamento de lâmina líquida, com floculação das partículas de menor tamanho.
- Em processo de sedimentação, apresentando comportamento semilíquido e semi-viscoso.
- Em processo de adensamento, comportando-se como um solo.

É importante mencionar que o rejeito não é propriamente um solo, mas para fins geotécnicos seu comportamento é considerado equivalente ao de um solo com características de baixa resistência ao cisalhamento. (MATURANO RAFAEL, 2012).

As características do rejeito dependem do tipo de minério bruto a ser extraído, como o ferro, a bauxita, o ouro, etc., e do processo de beneficiamento industrial (PEREIRA, 2005). Podem ser formados por materiais não plásticos e apresentar granulometria mais grossa, sendo denominados de rejeitos granulares (areias), ou podem ser finos e muito finos, compostos de siltes e argilas, depositados sob forma de lama (ESPÓSITO, 2000).

Os rejeitos granulares são altamente permeáveis e com melhores propriedades de resistência, se comparados aos rejeitos de granulometria fina (lamas), que apresentam alta plasticidade, alta compressibilidade e são de difícil sedimentação (MATURANO RAFAEL, 2012).

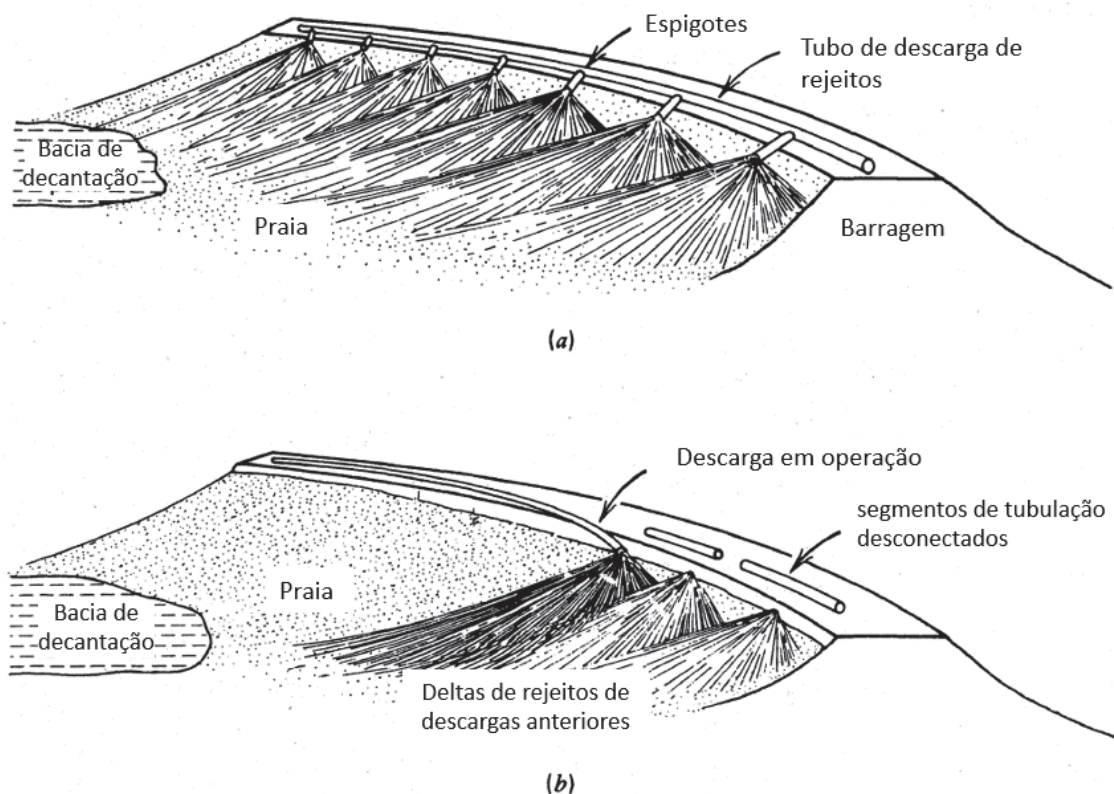
2.1.1 Disposição de Rejeitos

Em geral, os rejeitos são dispostos por via úmida através de barramentos construídos com ou sem a utilização dos próprios rejeitos (barragens de contenção) ou por via seca mediante as chamadas pilhas de rejeito que, ao contrário das barragens, não têm o objetivo de reter líquidos conjuntamente com a matéria sólida descartada (PEREIRA, 2005).

Os rejeitos podem ser transportados em forma de polpa, sendo algumas tanto por gravidade como através de canais ou por meio de tubulações, com ou sem sistemas de bombeamento, a depender das elevações relativas entre o local de beneficiamento e o local onde será descartado. A polpa de rejeitos é geralmente abrasiva e de elevada viscosidade, sua densidade é definida como a razão entre o peso de sólidos pelo peso da polpa correspondente, variando no entre 0,15 a 0,55. (MATURANO RAFAEL, 2012).

No local de descarte dos rejeitos, a sua disposição em uma praia de rejeitos pode ser efetuada em um ou em vários pontos de descarga, conforme apresenta-se na FIGURA 2.2 (VICK, 1990). O lançamento dos rejeitos é geralmente realizado com a utilização de hidrociclones ou canhões. No caso de canhões o processo de separação granulométrica ocorre na própria praia em função da velocidade de descarga, da concentração e das características mineralógicas do rejeito, enquanto que no caso de hidrociclones uma primeira classificação granulométrica é feita antes do lançamento (MATURANO RAFAEL, 2012).

FIGURA 2.2 - MÉTODOS DE DESCARGA DE REJEITOS – (a) PONTOS MÚLTIPLOS E (b) DESCARGA PONTUAL

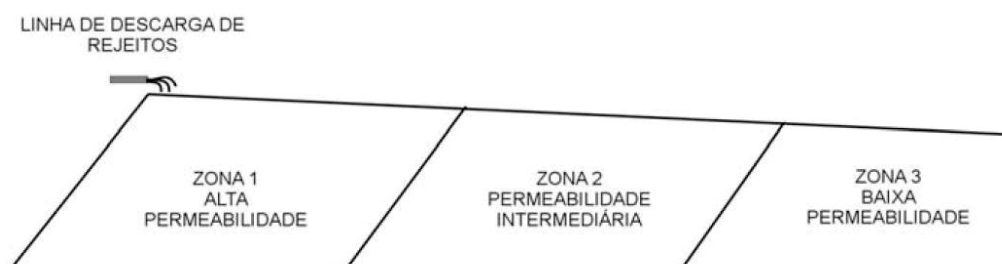


FONTE: Adaptado de Vick (1990).

Em uma disposição hidráulica de rejeitos, as frações grossas do material tendem a se depositar mais rapidamente, enquanto as partículas finas tendem a migrar com o fluxo de água em maiores distâncias, a depender das condições de fluxo. Com isso, podem se formar os depósitos heterogêneos de rejeitos, com partículas arenosas mais próximas aos pontos de lançamento e partículas finas em regiões mais afastadas. O mesmo pode ocorrer em profundidade, com partículas arenosas depositando-se mais rapidamente e ocupando as maiores profundidades, e as partículas finas depositando-se posteriormente e nas regiões mais elevadas. A este processo ou fenômeno denomina-se de segregação de rejeitos (DALCÉ *et. al.*, 2019).

Na FIGURA 2.3 apresenta-se um esquema de zonas de diferentes permeabilidades causadas por segregação hidráulica.

FIGURA 2.3 - ZONAS DE DIFERENTES PERMEABILIDADES CAUSADAS POR SEGREGAÇÃO HIDRÁULICA.



FONTE: Adaptado de Vick (1990).

O rejeito bruto ou total é geralmente composto de parcelas de material que variam de partículas com diâmetros granulares a finos, ao sair da planta de beneficiamento. Por este motivo, realiza-se a separação das duas parcelas, que possuem características geotécnicas distintas e, por consequência, formas diferenciadas de deposição. Para este procedimento, pode-se utilizar os hidrociclones, que funcionam utilizando o princípio da força centrífuga, separando o rejeito bruto ou total em duas frações distintas. Em funcionamento, o equipamento faz com que as partículas de maior massa tenham movimento descendente e as de menor massa movimento ascendente, sendo estas as duas parcelas denominadas respectivamente de “*underflow*” e “*overflow*”, com o primeiro com características arenosas e o segundo argilosas, em geral (RUSSO, 2007).

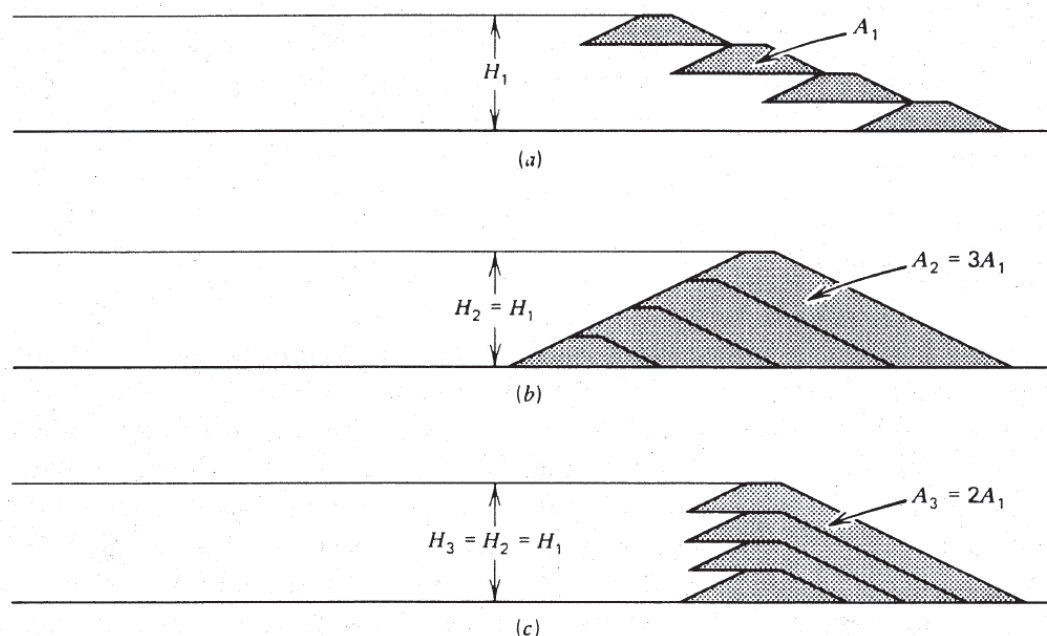
2.1.2 Barragens de contenção de rejeitos

Os rejeitos em forma de polpa são dispostos em reservatórios contidos por barragens. Estas estruturas geralmente são construídas a partir de um dique inicial ou dique de partida de aterro compactado ou enrocamento, a partir do qual são executados sucessivos diques de alteamentos, que podem ser executados com os próprios rejeitos, com materiais de empréstimos ou com estéril proveniente da mina (PIRETE, 2010).

Os métodos construtivos de barragens de rejeito por alteamentos sucessivos se resumem a três formas clássicas, sendo elas: o método de montante, o de jusante e o de linha de centro. Cada um com características, requisitos, vantagens e riscos próprios (ESPÓSITO, 2000).

Na FIGURA 2.4 são apresentadas as três formas clássicas de contenção de rejeitos.

FIGURA 2.4 - COMPARATIVO DE BARRAGENS DE CONTENÇÃO DE REJEITOS COM ALTEAMENTOS SUCESSIVOS. MÉTODOS: (a) MONTANTE, (b) JUSANTE E (c) LINHA DE CENTRO.



FONTE: Vick (1990).

Abaixo são descritas as características básicas de cada método de alteamento, segundo Pereira (2005):

- O método de alteamento a montante consiste na construção inicial de um dique de partida, geralmente construído com materiais de boa capacidade de resistência, como enrocamento ou solo compactado, sendo que os seus respectivos alteamentos são executados à montante do dique anterior. A execução dos alteamentos é condicionada à formação da praia de rejeitos que, pela característica granular, será responsável pelo empréstimo de materiais e constituirá a base para a construção próximo do alteamento.
- O método de jusante é o que exige maiores volumes de materiais de construção, pois os alteamentos subsequentes são executados à jusante, a partir do dique de partida, necessitando também de grandes áreas externas para a sua evolução construtiva.
- O método de linha de centro é uma variação do método de jusante. A diferença, no entanto, está na verticalização do alteamento da crista. Neste caso, o processo executivo pode ocorrer de forma muito rápida, com a utilização do “*underflow*”, quando se faz necessária a ciclonagem do rejeito.

O método de montante apresenta algumas vantagens, como baixo custo relativo, não necessidade de material de empréstimo, menor volume de material de construção, uma vez que o novo barramento é construído sobre o próprio rejeito, apresenta também rapidez e simplicidade na execução dos alteamentos. Porém, a principal desvantagem está na susceptibilidade à liquefação, uma vez que os alteamentos são realizados sob o próprio rejeito, que devido ao seu curto período de deposição, se encontra pouco consolidado e no estado fofo, podendo ocorrer a liquefação do material quando submetido a carregamentos cíclicos ou estáticos (RUSSO, 2007).

Os grandes acidentes com barragens de rejeitos ocorridos no Brasil nos últimos anos, foram em estruturas construídas pelo método a montante, e motivaram a proibição desse método construtivo, por meio da Resolução ANM nº 4/2019, substituída pela Resolução ANM nº 13/2019. Além de proibir a construção de novas barragens a montante, visando minimizar o risco de rompimento, especialmente por liquefação, o Art. 8º do referido normativo exigiu o descomissionamento e a descaracterização das estruturas já existentes construídas por tal método, assim

como estabeleceu os prazos para elaboração e conclusão dos projetos de descaracterização.

2.2 LIQUEFAÇÃO DE REJEITOS

Segundo Castro (1969) *apud* Pereira (2005), a primeira explanação sobre o fenômeno da liquefação foi feita por Terzaghi em seu livro clássico publicado em Viena em 1925. Porém, foi Arthur Casagrande quem deu fundamentação teórica ao problema em 1936, em uma exposição de Engenheiros Civis em Boston.

Com o avanço dos estudos e das tecnologias de ensaios, principalmente do ensaios não-drenados e da medição de poropressão, o tema foi sendo aprofundado por Bishop e Henkel (1956), Bjerrum *et. al.* (1961), Poulos *et. al.* (1985), Sladen *et. al.* (1985) e Robertson e Campanella (1985), entre outros. Com o conceito geral da liquefação podendo ser basicamente entendido como sendo: “A ação de levar qualquer substância de seu estado natural ao estado fluido e, no caso dos solos, do estado sólido para o estado liquefeito. Para tal, impõe-se um dado acréscimo da poropressão em concomitância com a redução das tensões efetivas. Esta transformação decorre da brusca aplicação de uma determinada carga, que pode ter origem estática ou dinâmica”.

Morgenstern *et. al.* (2016), apresenta uma definição de solos dilatantes e contráteis, e os possíveis comportamentos e consequências quando são submetidos a carregamentos, ou tensões de cisalhamento, sendo um dos possíveis comportamentos a perda repentina de resistência ou a liquefação:

Solos dilatantes: Solos chamados dilatantes são aqueles que apresentam suas partículas em um arranjo fortemente unido, como em areias densas e argilas rijas. Durante o cisalhamento, as partículas de solo devem primeiro se separar para então se moverem entre si, e isto produz um aumento de volume na massa de solo (dilatância). Em termos gerais, solos dilatantes tendem a ser resistentes e não sujeitos a liquefação, por tenderem a dissipar os excessos de poropressão, gerando acréscimos de tensão efetiva. Por isso, a compactação mecânica é empregada nas obras de engenharia para atingir tal condição.

Solos contráteis: Solos são chamados contráteis quando o oposto ocorre, com um arranjo fofo de partículas, como em areias fofas e argilas moles. Durante o cisalhamento, as partículas se movem juntas e a massa de solo se comprime, com

redução de volume (contração). Solos dispostos hidraulicamente (aterros hidráulicos) e materiais não compactados, como depósitos de rejeitos, são frequentemente contráteis, susceptíveis a fenômenos como o da liquefação, por gerarem excessos de poropressão positivas durante os carregamentos em condições saturadas, com a consequente redução de tensão efetiva e da sua resistência.

Especificamente para solos contráteis, conforme comentado anteriormente, a suscetibilidade à liquefação se dá pela possibilidade de geração de poropressão durante um carregamento. E esta situação pode ocorrer quando a massa de solo está saturada, com os vazios preenchidos por água. Com o solo contrátil, durante um cisalhamento a água pode inibir o movimento conjunto das partículas, com a água suportando parte do carregamento, e isto produz pressão na água (poropressão). Como a água não tem resistência, a resistência da massa de solo pode ser reduzida. Se isso ocorre ou não, depende se a água escapa ou não dos vazios. E isso, por sua vez, depende de outra condição para a ruptura ou deslizamento contínuo, a taxa de cisalhamento ou de carregamento. (MORGENSTERN *et. al.*, 2016).

Cisalhar um solo saturado e contrátil lentamente o suficiente para que a poropressão se dissipe tão rápido quando é gerada produz uma condição drenada. A poropressão não se desenvolve e o solo mantém a sua resistência. Por outro lado, se o cisalhamento ocorre muito rapidamente para que a poropressão se dissipe, diz-se que ocorre o cisalhamento em condição não-drenada, com geração de excesso de poropressão. (MORGENSTERN *et. al.*, 2016).

Olson e Stark (2003) apresentaram um procedimento de análise da liquefação para um solo submetido a uma tensão de cisalhamento, como em encostas, aterros ou fundações de estruturas. Segundo o autor, essa análise consiste geralmente em três tarefas principais: (1) Análise da susceptibilidade; (2) Análise do gatilho; e (3) Análises de estabilidade pós gatilho ou pós-liquefação.

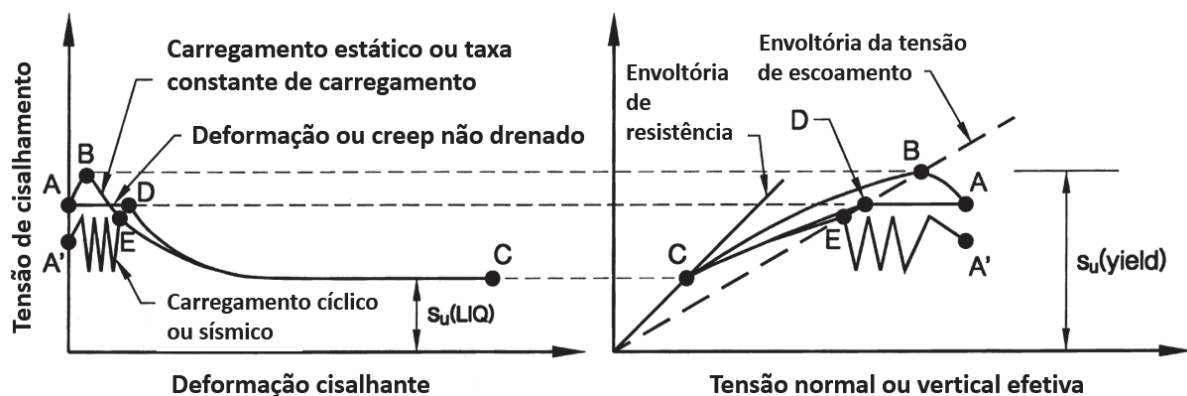
(1) Análise de susceptibilidade: determina se um dado depósito de solo está em um estado contrátil, isto é, suscetível a um comportamento não drenado de amolecimento (*strain softening*) e a possível liquefação.

(2) Análise do gatilho: determina as condições que levam o solo a perda de sua estrutura e sua resistência, iniciando a liquefação. As condições ou rupturas podem estar relacionadas a carregamentos estáticos, deformações e sismicidade (ações dinâmicas).

(3) Análises de estabilidade pós gatilho ou pós-liquefação: determina as condições de segurança de uma determinada estrutura após a perda de resistência e a liquefação do material (resistência liquefeita ou residual).

Com relação aos gatilhos de liquefação, Olson (2001) examinou 33 casos históricos de rupturas por liquefação disponíveis na literatura da época, e dividiu em três categorias: (1) falhas induzidas por carregamentos estáticos; (2) falhas induzidas por deformações; e (3) falhas induzidas por sismicidade. E a FIGURA 2.5 ilustra esquematicamente esse conceito, considerando um elemento dentro de um depósito de solo arenoso fofo e saturado, subjacente a um aterro durante a construção e sendo submetido a um carregamento em condição não drenada.

FIGURA 2.5 - COMPORTAMENTO ESQUEMÁTICO NÃO DRENADO DE UM SOLO ARENOSO CONTRÁTIL E SATURADO.



FONTE: Adaptado de Olson (2003).

Analisando a figura acima, a resistência ao cisalhamento de pico ($s_{u(yield)}$ ou $s_{u(pico)}$) é definida como a máxima resistência disponível durante um carregamento não drenado. O comportamento de amolecimento não drenado (*strain softening*) pode ser provocado tanto por carregamentos estáticos ou dinâmicos, como por deformação sob uma tensão de cisalhamento estática maior que a resistência ao cisalhamento liquefeita ($s_{u(liq)}$). A envoltória de resistência ao cisalhamento (*yield strength envelope*) define os estados de tensão onde a resistência ao cisalhamento de pico é mobilizada (OLSON e STARK, 2003).

O mesmo autor apresenta os exemplos para as três falhas induzidas (gatilhos) que levam a liquefação:

(1) Falhas induzidas por carregamentos estáticos: O ponto “A” representa o estado de tensões e deformações iniciais do elemento, que pode ter se originado de carregamentos drenados, parcialmente drenados ou completamente não drenados durante a construção do aterro. Durante o próximo alteamento do aterro, o elemento pode se mover do “Ponto A” para o “Ponto B”, que está localizado na envoltória de resistência. Esta etapa assume que as condições de permeabilidade e drenagem do elemento resultam em uma condição não drenada temporária. O “Ponto B” representa a resistência máxima ao cisalhamento que o elemento de solo pode mobilizar sob condições não drenadas. Quando a tensão de cisalhamento no elemento é induzida pelo aterro a exceder o “Ponto B” (a resistência ao cisalhamento de pico), a estrutura fofa do solo colapsa, e a liquefação é iniciada (gatilho). E o elemento então se move do “Ponto B” para o “Ponto C”, que é resistência ao cisalhamento liquefeita (pós liquefação).

(2) Falhas induzidas por deformações: Novamente considera-se um elemento de solo com os estados de tensões representados pelo “Ponto A” na mesma figura. Neste caso, a tensão de cisalhamento estática resulta de um aterro de grandes dimensões e suficiente para iniciar uma deformação cisalhante lenta, de rastejo (ou creep), ou outro mecanismo de deformação no aterro ou em sua fundação. Se a deformação cisalhante é grande o suficiente e o elemento “A” está em uma condição não drenada, o elemento se move horizontalmente do “Ponto A” para o “Ponto D”, que é localizado na envoltória de resistência. No “Ponto D”, a liquefação é iniciada (gatilho), e o elemento se move do “Ponto D” para o “Ponto C”, a resistência residual ou liquefeita.

(3) Falhas induzidas por sismicidade: Liquefações induzidas por carregamentos sísmicos geralmente não representam o estado de tensões correspondentes a resistência ao cisalhamento ou razão de resistência. Para exemplificar, considere o elemento de solo com o estado de tensões e deformações representados pelo “ Ponto A’ ”, na mesma FIGURA 2.5. O elemento é então submetido a um sismo ou carregamento dinâmico. Se a duração e intensidade do sismo ou carregamento dinâmico é suficiente para causar um aumento na poropressão que move o elemento do “ Ponto A’ ” para o “Ponto E”, a liquefação também é iniciada (gatilho), e o elemento se move do “Ponto E” para o “Ponto C”.

Sendo a liquefação uma perda repentina de resistência devido ao rápido aumento da pressão da água nos poros sob deformação não-drenada, o modelo

constitutivo usado para avaliar o comportamento pré e pós-pico e o início da liquefação é, portanto, um aspecto crítico da análise. (LEDESMA *et. al.*, 2022).

Tratando-se do fenômeno da liquefação em barragens de rejeitos, de acordo com análises estatísticas do Comitê Mundial de Barragens (ICOLD), desde o início do século XX, foram registrados mais de 200 casos de acidentes com barragens de rejeitos, e a maioria delas relacionados a eventos sísmicos, uma vez que os rejeitos saturados são propensos a liquefação devido às ações sísmicas, o que leva ao rompimento da barragem local. Com isso, o estudo do potencial de liquefação e a previsão de possíveis danos estão entre os tópicos de pesquisa mais importantes da engenharia geotécnica sísmica (JIN *et. al.*, 2022).

Em instalações de armazenamento de rejeitos, é prática comum depositar os rejeitos hidráulicamente com alteamento a montante, onde a estabilidade da estrutura depende da resistência dos próprios rejeitos. Devido ao método de deposição, as barragens de rejeitos alteadas a montante são vulneráveis ao fenômeno da liquefação (LEDESMA *et. al.*, 2022). As falhas ocorridas em Merriespruit (África do Sul) em 1994 (FOURIE *et. al.*, 2001), Fundão (Brasil) em 2015 (MORGENSTERN *et. al.*, 2016), Cadia Valley (Austrália) em 2018 (MORGENSTERN *et. al.*, 2019) e Brumadinho (Brasil) em 2019 (ROBERTSON *et. al.*, 2019) mostraram a ocorrência do fenômeno de liquefação. Essas e outras falhas causaram fatalidades significativas e impactos ambientais.

Como resultado da falha de Brumadinho em 2019, a prática atual de avaliação de estabilidade de barragens de rejeitos é assumir que todos os materiais suscetíveis à liquefação serão liquefeitos em algum momento, sendo necessária sua consideração em análises e projetos (LEDESMA *et. al.*, 2022).

2.2.1 Liquefação dinâmica (sísmica)

Tratando-se especificamente da liquefação causada por ações dinâmicas ou sísmicas, neste item são apresentados alguns exemplos de rupturas de barragens e suas consequências com esse tipo de gatilho de liquefação.

Segundo Jin *et. al.* (2022), a liquefação em barragens de rejeitos causados por carregamentos sísmicos é o principal problema para garantir a estabilidade de uma bacia de rejeitos. A liquefação pode causar uma ruptura descontrolada do corpo

de uma barragem, causando danos consideráveis à vida, à propriedade e ao meio ambiente das pessoas nas regiões afetadas.

Várias barragens de rejeitos sofreram rupturas como resultado de sismos nas últimas décadas. A maioria dessas rupturas foi devida ao carregamento sísmico direto, liquefação de rejeitos durante a agitação ou o comportamento pós-sísmico dos rejeitos, no que se refere à dissipação do excesso de pressão da água intersticial (poropressão) que foi gerada durante a ação dinâmica. (Ferdosi *et. al.* 2015).

A agitação do solo é uma das principais causas de falhas em barragens de rejeitos. Como exemplo, do total de 221 registros de casos coletados pelo ICOLD (2001), 35 deles (cerca de 16%) são devidos a fortes movimentos do solo. Recentemente, além da liquefação induzida por terremotos, a liquefação induzida por explosão recebeu atenção significativa (Liew *et. al.*, 2020). Charlie *et. al.* (2013) listou diversos casos de liquefação induzida por explosivos relatados na literatura.

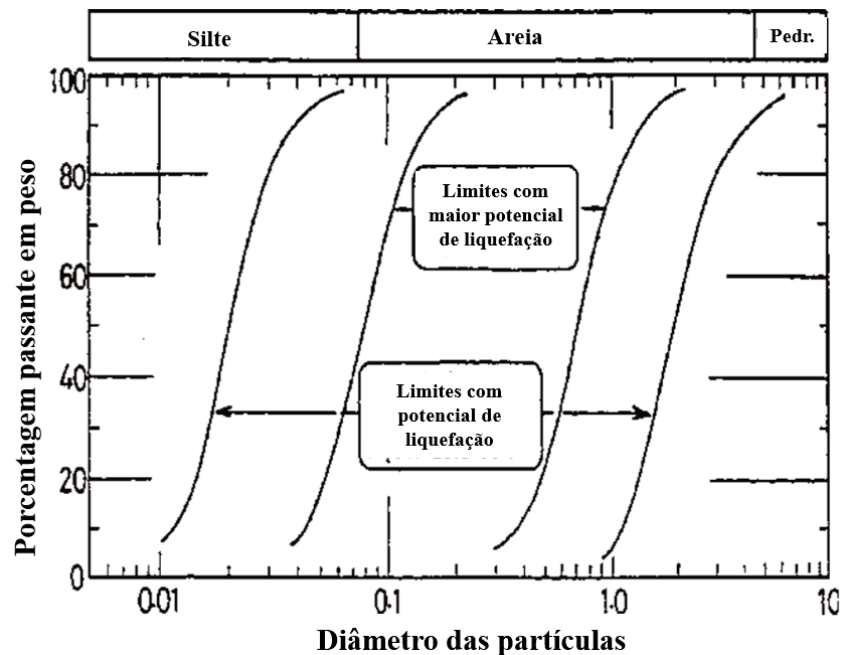
A Barragem de Fundão (MG) rompeu em 5 de novembro de 2015, resultando na perda de 19 vidas humanas e na liberação de 43,7 milhões de metros cúbicos de rejeitos de mineração no Rio Doce (Samarco, 2016). Um painel de especialistas realizou uma investigação forense para avaliar as causas técnicas da falha. O painel concluiu que a falha do deslizamento começou na ombreira esquerda, onde a barragem havia recuado de seu antigo alinhamento. A falha foi devido à liquefação dos rejeitos de areia saturada armazenados. Essa liquefação foi desencadeada pela deformação de uma camada subjacente e siltosa – rejeitos muito finos – que foi intensificada pela ocorrência de um pequeno terremoto. (LEDESMA *et. al.*, 2022).

2.2.2 Análise da suscetibilidade à liquefação

Existem diferentes metodologias para analisar a suscetibilidade à liquefação de solos, com ensaios de laboratório e de campo, a depender das informações solicitadas e disponíveis para avaliação.

Tsuchida (1970) apresenta uma metodologia de análise baseada na composição ou características granulométricas dos materiais identificando faixas de granulometria que aumentam ou diminuem a suscetibilidade à liquefação, conforme apresentado na FIGURA 2.6.

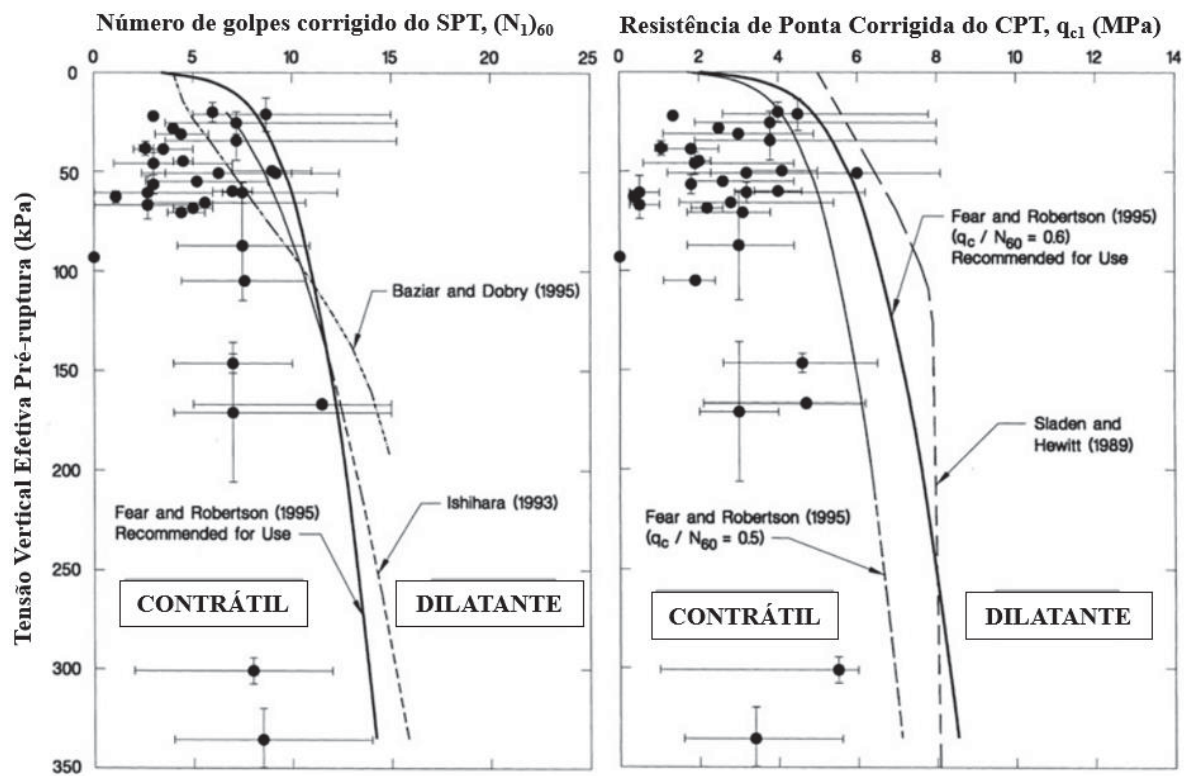
FIGURA 2.6 – POTENCIAL DE LIQUEFAÇÃO BASEADO NA COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA DOS MATERIAIS.



FONTE: Adaptado de Tsuchida (1970).

Fear e Robertson (1995) abordam a avaliação do potencial de liquefação de solos utilizando dados obtidos a partir do CPT e SPT. O trabalho correlaciona as leituras do ensaio CPT, como a resistência de ponta do cone e a poropressão, com a suscetibilidade à liquefação. O estudo também considera a análise do potencial de liquefação utilizando o ensaio SPT. Discute-se a correlação entre os resultados do SPT, como o valor N (número de golpes), e a suscetibilidade à liquefação dos solos, em conjunto com as análises feitas com o ensaio (CPT). Olson e Stark (2003) apresentam a metodologia de Fear e Robertson (1995), também comparada com outras, conforme FIGURA 2.7.

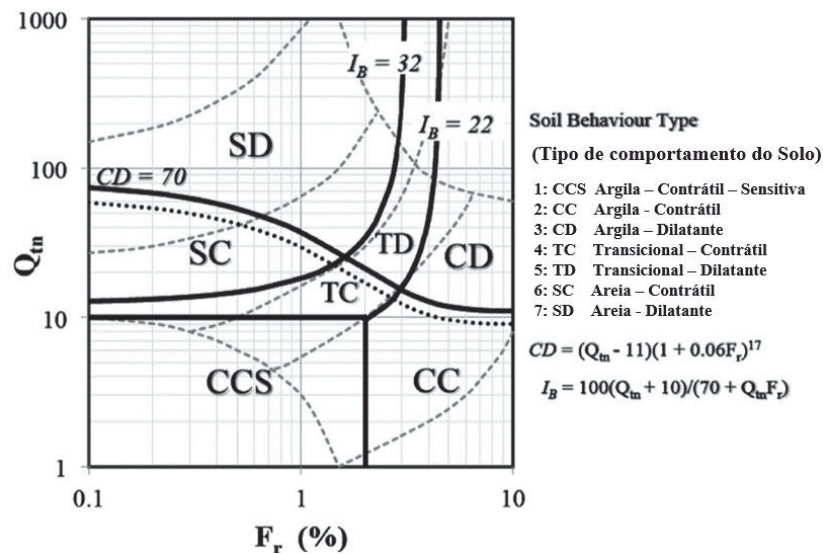
FIGURA 2.7 - RELAÇÕES ENTRE A RAZÃO DA RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO LIQUEFEITO E O NÚMERO DE GOLPES NORMALIZADO DO SPT E A RESISTÊNCIA DE PONTA NORMALIZADA DO CPT.



FONTE: Adaptado de Olson e Stark (2003).

Robertson (2016) apresentam uma metodologia também baseada no ensaio de campo CPTU, que classifica os solos ou rejeitos pelo seu tipo de comportamento durante a cravação do cone do ensaio, denominada classificação SBT (*Soil Behaviour Type* – Tipo de comportamento do solo). A classificação é realizada com interpretações ou normalizações dos resultados diretos ensaio, separando-se os materiais pelos seus tipos, se argilosos (C), arenosos (S) e transicionais (T), e pelo seu comportamento, se contráteis (C) ou Dilatantes (D). Para os materiais com comportamento argiloso, também classifica o material de acordo com sua sensibilidade (S). A junção das letras dos tipos e comportamentos dos materiais é o resultado da classificação SBT, conforme ábaco apresentado na FIGURA 2.8.

FIGURA 2.8 - ÁBACO DE CLASSIFICAÇÃO DO SISTEMA SBT - SOIL BEHAVIOUR TYPE (TIPO DE COMPORTAMENTO DO SOLO).



FONTE: Adaptado de ROBERTSON (2016).

2.3 INSTRUMENTAÇÃO PARA MONITORAMENTO DE VIBRAÇÕES E POROPRESSÕES

Para as análises dos efeitos das ações dinâmicas (sismos, vibrações, etc.) na geração de excessos de poropressão, como se verá adiante, são utilizados instrumentos como os sismógrafos de engenharia e piezômetros elétricos. Neste item, são apresentadas as descrições e características desses equipamentos, para posterior entendimento dos estudos e análises dinâmicas que utilizam tais instrumentos.

2.3.1 Sismógrafos de Engenharia

Os sismógrafos de engenharia são instrumentos para o monitoramento de vibrações (ações dinâmicas). Normalmente este tipo de equipamento é utilizado em trabalhos de construção, mineração, detonação, demolição ou outros trabalhos onde as vibrações não podem ser totalmente evitadas. Para avaliação de qualquer dano ou risco, é necessária a medição e análises dessas vibrações. As magnitudes que podem ser medidas são: velocidade, aceleração e pressão. (VIBRAQUIPO, 2022).

Sismógrafos digitais são os sistemas de monitoramento mais comuns utilizados para avaliações de conformidades das vibrações com os critérios para

prevenção de danos existentes (exemplos: DIN 4150:2016, NBR 9653:2018, etc.). São compostos por três sensores (geofones) orientados ortogonalmente em uma caixa metálica e conectados a uma unidade de processamento e registro. A resposta do sismógrafo (com os geofones e a unidade de processamento) ao movimento do solo é descrita pela resposta de frequência complexa ou por seu equivalente matemático (SEGARRA *et. al.*, 2017).

Na FIGURA 2.9 apresenta-se um exemplo de geofones de perfuração e o medidor de vibração (unidade de processamento).

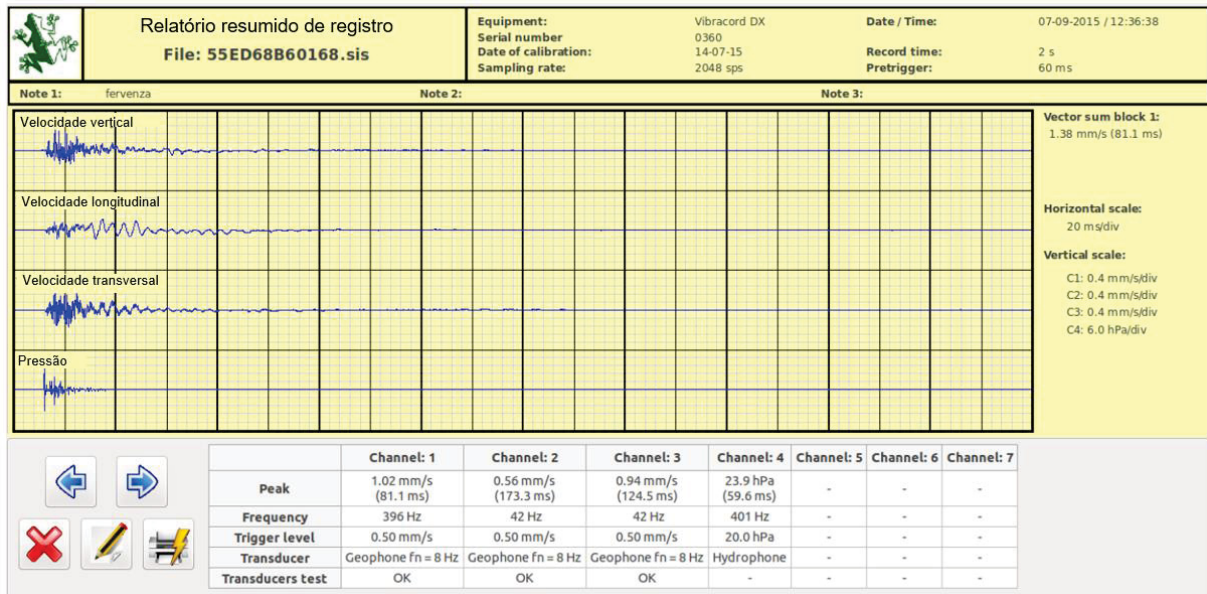
FIGURA 2.9 - EXEMPLO DE UM GEOFONE DE PERFURAÇÃO E UM MEDIDOR DE VIBRAÇÃO (UNIDADE DE PROCESSAMENTO)



FONTE: Vibraquipo (2022).

Para medidas de velocidade de vibração de partículas e as frequências correspondentes, na FIGURA 2.10, abaixo, segue um exemplo de interpretação e resultado, com leituras de velocidade de vibração de partícula (vertical, longitudinal e transversal) e pressão, vinculadas as suas frequências.

FIGURA 2.10 - EXEMPLO DE LEITURAS DE UM SISMÓGRAFO DE ENGENHARIA.



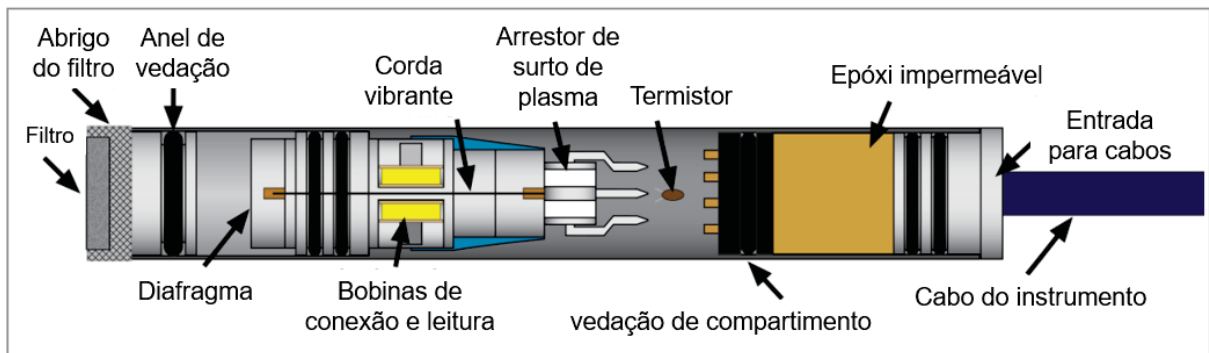
FONTE: Adaptado de Vibraquipo (2022).

2.3.2 Piezômetros Elétricos (Corda Vibrante)

Os piezômetros elétricos de corda vibrante têm como objetivo as medições a longo prazo das poropressões em estruturas geotécnicas e suas fundações. Existem vários modelos disponíveis para cada aplicação geotécnica. Estes instrumentos utilizam um diafragma, geralmente de aço inoxidável, ao qual o componente de corda vibrante é conectado. Durante sua utilização, mudanças na pressão do diafragma causam deflexões. Essas deflexões são medidas como mudanças nas tensões e nas frequências de vibração do componente vibrante da corda, o qual é proporcional à pressão aplicada no diafragma. Filtros são utilizados para impedir a entrada de partículas sólidas e danos ao sensor (diafragma sensível) (GEKON, 2021).

Na FIGURA 2.11 apresenta-se um esquema interno de um modelo de piezômetro elétrico de corda vibrante, e na FIGURA 2.12 são apresentados alguns tipos/modelos de piezômetros elétricos.

FIGURA 2.11 - PIEZÔMETRO ELÉTRICO DE CORDA VIBRANTE – MODELO 4500S GEOKON.



FONTE: Geokon (2021).

FIGURA 2.12 - MODELOS DE PIEZÔMETROS ELÉTRICOS – GEOKON.



FONTE: Geokon (2021).

O sensor piezométrico elétrico de corda vibrante é inserido em um furo de sondagem pré-perfurado por meio de uma estrutura de suporte, ou até mesmo, em determinadas ocasiões, cravados diretamente em solo mole. O sensor pode ou não ser envolto em areia, por onde o fluxo da água subterrânea percola até atuar também no sensor, que por sua vez é submetido a uma determinada poropressão (CERQUEIRA, 2017).

Para o registro dos sinais e leituras do instrumento, são utilizadas unidades de leitura, que podem ser portáteis. Outros sistemas de registro de dados também permitem a coleta remota e autônoma de informações de vários sensores (GEKON, 2021).

Este instrumento apresenta algumas vantagens em relação ao piezômetro convencional (Tubo aberto – Casagrande), como o menor tempo de resposta e não

requer o acesso direto do operador ao instrumento para sua leitura (CERQUEIRA, 2017).

Outra importante funcionalidade dos piezômetros elétricos em relação aos convencionais, especificamente para o monitoramento de poropressões induzidas por vibrações em detonações de explosivos, é apontada por Larson-Robl (2016), que comenta que os piezômetros padrões têm sido normalmente usados para medir o excesso de poropressão, mas como eles têm uma taxa de amostragem muito menor, eles não podem medir as poropressões transitórias de um evento de carga dinâmica, onde a onda de choque ocorre em milissegundos, sendo necessária a utilização de instrumentos com tempos de respostas curtos, associados aos efeitos que serão medidos, como os piezômetros elétricos.

2.4 AÇÕES DINÂMICAS – VIBRAÇÕES

Vibrações são oscilações mecânicas de corpos sólidos com potencial de causar desconfortos para pessoas ou danos em estruturas. Em solos, as vibrações podem causar recalques, deslocamentos de elementos de fundação e também a liquefação, este último no caso de solos arenosos e siltosos abaixo do nível de água (saturados) com perda repentina de sua capacidade de suporte (resistência) como o resultado dos efeitos dinâmicos da vibração (DIN 4150-3:2016).

Os carregamentos dinâmicos são divididos em dois diferentes tipos: (1) carga cíclica dinâmica e (2) carga de onda de choque dinâmica. (1) Carga cíclica dinâmica refere-se a uma carga que é periódica ou oscilatória, por exemplo, sismos ou terremotos. (2) A carga de onda de choque dinâmica refere-se à carga típica de uma detonação explosiva a curta distância. Em distâncias maiores, o carregamento de uma detonação explosiva se assemelha ao de um evento de carregamento cíclico dinâmico (LARSON-ROBL, 2016).

A velocidade de vibração de partícula de pico e suas frequências associadas são comumente usadas para correlacionar o dano estrutural devido às vibrações do solo induzidas por carregamentos dinâmicos (explosivos, sismos, etc.) (TRIPATHY E SHIRKE, 2010).

Para entendimento dos conceitos relacionados, abaixo seguem as definições principais de velocidade de vibração de partícula e frequências associadas, de acordo com a NBR 9653:2018:

Velocidade de vibração de partícula: velocidade com que uma determinada partícula oscila em torno de seu ponto de repouso devido à passagem de uma onda sísmica. Este movimento pode ser definido em termos de três componentes mutuamente perpendiculares (vertical, transversal e longitudinal ou radial)”.

Frequência de vibração de partícula: número de oscilações por segundo em que o meio físico vibra conforme a onda sísmica criada passa por um ponto determinado, obtido a partir da análise do registro de velocidade de vibração de partícula de cada componente ortogonal.

Outros dois conceitos relacionados a velocidades de vibrações são também utilizados nas análises dos efeitos das vibrações, que são: (1) Velocidade de vibração de partícula de pico (ou no termo em inglês *Peak Particle Velocity* – PPV); e (2) Velocidade de vibração de partícula resultante de pico, com as seguintes definições (NBR 9653:2018):

(1) Velocidade de vibração de partícula de pico (*Peak Particle Velocity* – PPV): máximo valor instantâneo da velocidade de vibração de uma partícula em um ponto, durante um determinado intervalo de tempo, considerado como sendo o maior valor dentre os valores de pico das três componentes de velocidade de vibração de partícula para o mesmo intervalo de tempo.

(2) Velocidade de vibração de partícula resultante de pico (PVS): máximo valor obtido pela soma vetorial das três componentes ortogonais simultâneas de velocidade de vibração de partícula, considerado ao longo de um determinado intervalo de tempo.

2.4.1 Frequências naturais de vibração de solos

Segundo Kramer (1996), os diferentes tipos de solos possuem faixas típicas de frequências naturais de vibração, que dependem de suas propriedades físicas, como densidade, rigidez e condições de saturação. Essas frequências são importantes para avaliar a resposta do solo a vibrações induzidas por fontes externas, como equipamentos ou terremotos. O autor apresenta também faixas típicas para os tipos de solo, conforma abaixo:

- Solos arenosos: geralmente têm frequências naturais mais altas devido à sua maior rigidez em comparação com solos argilosos. Faixa típica:

10 a 30 Hz, podendo variar dependendo da compactação e do teor de umidade.

- Solos argilosos: apresentam frequências mais baixas devido à sua menor rigidez e maior capacidade de amortecimento. Faixa típica: 1 a 10 Hz, variando com o teor de umidade e grau de consolidação.
- Solos silto-arenosos ou mistos: Têm propriedades intermediárias e frequências que variam dependendo da composição e do estado de compactação. Faixa típica: 5 a 20 Hz.
- Rochas intemperizadas ou solos compactados: Por serem mais rígidos, possuem frequências mais altas. Faixa típica: 20 a 50 Hz, podendo ser maior para materiais extremamente densos.

Ainda segundo Kramer (1996), influências adicionais interferem nas frequências naturais dos materiais, como:

- Saturação: Solos saturados geralmente têm frequências naturais menores devido à interação entre os grãos sólidos e o fluido.
- Profundidade: A frequência natural de um perfil de solo também depende da espessura da camada analisada, já que perfis mais profundos geralmente têm frequências menores.
- Estado de compactação: Solos mais densos ou compactados têm frequências naturais mais altas.

2.4.2 Critérios de segurança (limites) para vibrações

A maioria dos critérios de segurança disponíveis para correlacionar danos estruturais devido às vibrações no solo são para estruturas residenciais e podem não ser adequados para estruturas de engenharia como barragens de terra. As barragens de terra podem ser danificadas devido à liquefação, fenômeno que ocorre em solos saturados devido às vibrações excessivas do solo, conforme já comentado (TRIPATHY E SHIRKE, 2010)

Especificações normativas brasileiras se restringem a NBR 9653:2018 – “Guia para avaliação dos efeitos provocados pelo uso de explosivos nas minerações em áreas urbanas” – com sua abrangência restrita a áreas urbanas e efeitos provocados

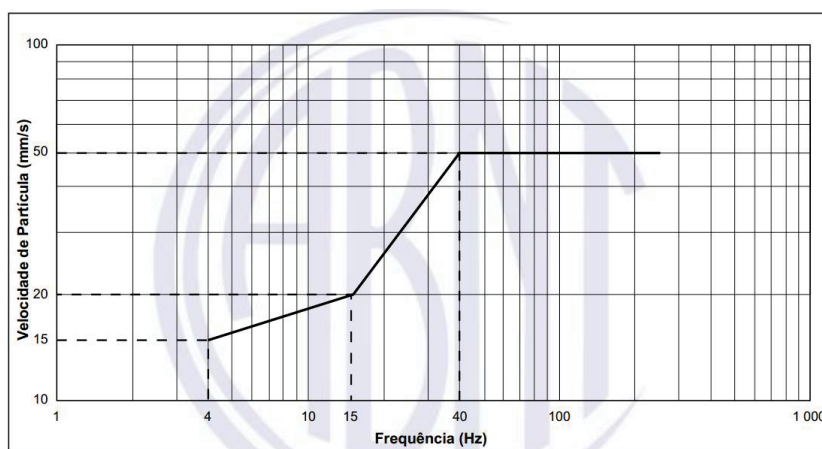
por explosivos nas minerações, como seu próprio título resume. Na mesma norma, apresenta-se uma recomendação de limites de velocidades de vibrações de partículas de pico por faixas de frequência, de modo a evitar danos em construções urbanas, conforme QUADRO 2.1 e FIGURA 2.13.

QUADRO 2.1 - LIMITES DE VELOCIDADE DE VIBRAÇÃO DE PARTÍCULA DE PICO POR FAIXAS DE FREQUÊNCIA.

Faixa de frequência ^a	Limite de velocidade de vibração de partícula de pico
4 Hz a 15 Hz	Iniciando em 15 mm/s, aumenta linearmente até 20 mm/s
15 Hz a 40 Hz	Acima de 20 mm/s, aumenta linearmente até 50 mm/s
Acima de 40 Hz	50 mm/s
^a Para valores de frequência abaixo de 4 Hz, deve ser utilizado como limite o critério de deslocamento de partícula de pico de no máximo 0,6 mm (de zero a pico). NOTA 1 Hz corresponde a uma oscilação por segundo.	

FONTE: ABNT NBR 9653:2018.

FIGURA 2.13 - REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DOS LIMITES DE VELOCIDADE DE VIBRAÇÃO DE PARTÍCULA DE PICO POR FAIXAS DE FREQUÊNCIA.



FONTE: ABNT NBR 9653:2018.

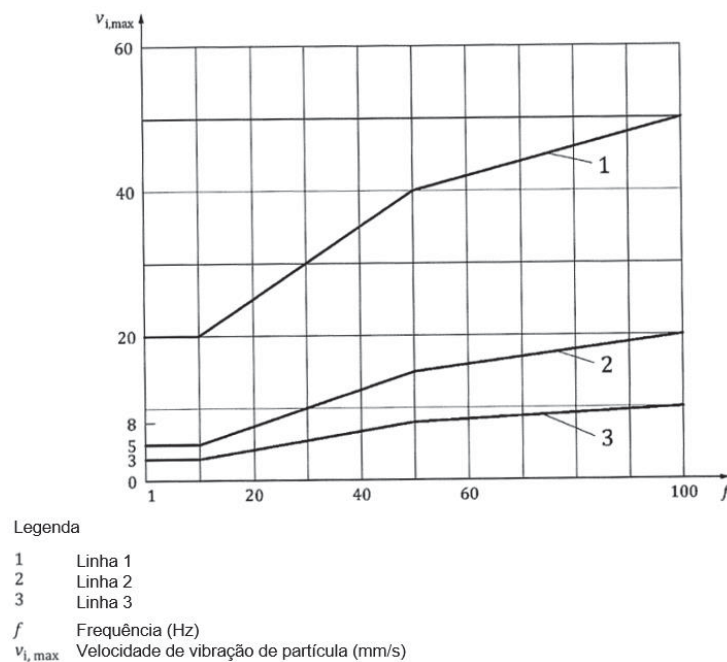
Uma referência normativa internacional, que apesar de objetivar a os efeitos das vibrações em estruturas convencionais, é um pouco mais restritiva e apresenta limites de velocidades de vibração para estruturas que não se classificam como construções comerciais ou residenciais, e são sensíveis aos efeitos das vibrações, porém sem especificar o tipo de estrutura, como barragens, por exemplo. Trata-se da norma alemã DIN-4150-3:2016 – *Vibrations in Buildings – Part 3: Effects on structures*. Os valores limites para velocidades de vibrações de partículas associadas as suas frequências de vibração são apresentados no QUADRO 2.2 e FIGURA 2.14.

QUADRO 2.2 - GUIA DE VALORES DE VELOCIDADES DE VIBRAÇÃO ($v_{i,max}$) PARA AVALIAÇÃO DOS EFEITOS DE VIBRAÇÕES DE CURTO PRAZO EM ESTRUTURAS.

	Tipo de estrutura	Valores de referência para $v_{i,max}$ em mm/s				
		Fundação, em todas as direções, $i = x, y, z$, a uma frequência de			Último andar, direção horizontal, $i = x, y$	Revestimentos de piso, direção vertical, $i = z$
		1 Hz to 10 Hz	10 Hz to 50 Hz	50 Hz to 100 Hz ^a	Todas as frequências	Todas as frequências
Coluna Linha	1	2	3	4	5	6
1	Edifícios comerciais, industriais e com design semelhante	20	20 to 40	40 to 50	40	20
2	Edifícios residenciais e de design e/ou ocupação semelhantes	5	5 to 15	15 to 20	15	20
3	Estruturas que, devido à sua sensibilidade particular à vibração, não podem ser classificadas sob as linhas 1 e 2 e possuem grande valor intrínseco (por exemplo, edifícios tombados)	3	3 to 8	8 to 10	8	20 ^b
Nota: Mesmo que os valores de referência, conforme a linha 1, colunas 2 a 5, sejam atendidos, danos menores não podem ser excluídos.						
^a Em frequências acima de 100 Hz, os valores de referência para 100 Hz podem ser aplicados como valores mínimos.						
^b O parágrafo 2 de 5.1.2 deverá ser observado						

FONTE: Adaptado de DIN-4150-3:2016.

FIGURA 2.14 - REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DOS VALORES GUIA ESPECIFICADOS COMO LIMITES PARA VELOCIDADES DE VIBRAÇÕES DE PARTÍCULAS EM ESTRUTURAS.



FONTE: Adaptado de DIN-4150-3:2016.

A importância de se analisar as frequências de vibração associadas as suas velocidades estão na resposta do solo ou estrutura as vibrações impostas, uma vez que as estruturas tendem a responder mais às vibrações com frequências próximas a sua frequência natural, pelo efeito da ressonância. (TRIPATHY E SHIRKE, 2010). Isto explica as maiores restrições de velocidades de vibração de partículas para baixas frequências, conforme limites normativos da NBR 9653:2018 e da DIN-4150-3:2016, sendo também baixas as frequências naturais das estruturas.

Especificamente em análises do efeito de vibrações em barragens e estruturas de mineração, alguns trabalhos também apresentam condições limites de velocidades e frequências devidos ao uso de explosivos, como Tripathy e Shirke (2010), que sugere um limite entre 5 e 15mm/s para PPV, e Charlie et. al. (2013), que lista diversos registros de outros trabalhos tanto de liquefação como de geração de poropressão significativa associadas a velocidade de vibração de partícula de pico (PPV) e a diferentes solos, compacidades e consistências, conforme TABELA 2.1

TABELA 2.1 - REGISTROS DE LIQUEFAÇÃO E EXCESSO DE POROPRESSÃO SIGNIFICATIVA ASSOCIADOS A VELOCIDADES DE VIBRAÇÃO E PARTÍCULA DE PICO – PPV.

PPV (m/s)	Densidade	Referência
Liquefação (testes de explosivos em campo)		
>0,49	fofa	Charlie et. al. (2013)
>0,71	muito compacta	Charlie et. al. (2013)
>0,52	compacta	Charlie et. al. (2013)
>0,49	fofa	Charlie et. al. (2013)
>0,6	fofa	Al-Qassimi et. al. (2005) ^a
>0,8±	fofa	Pathirage (2000) ^a
>0,16	compacta	Charlie et. al. (1992)
>0,08	muito fofa	Puchkov (1962)
>0,11	muito fofa	Lyakhov (1961)
Liquefação (testes de choque unidimensionais em laboratório)		
>0,1	fofa	Hubert (1986)
>0,4	fofa	Veyera (1985)
Poropressão residual significativa: PPR>0,1 (testes de explosivos em campo)		
>0,07	fofa-compacta	Charlie et. al. (2013)
>0,07	fofa-compacta	Charlie et. al. (2013)
>0,01	fofa	Al-Qassimi et. al. (2005) ^a
>0,03	compacta	Charlie et. al. (1992)
>0,05	fofa	Long et. al. (1992)
>0,02	rejeitos dispostos hidráulicamente	Obermeyer (1980)
Poropressão residual significativa: PPR>0,1 (testes de choque unidim. em laboratório)		
>0,08		Veyera (1985) e Hubert (1986)

Nota: Todos os valores são para detonações únicas, a menos que indicado de outra forma.

^aDetonações múltiplas com atraso de milissegundos.

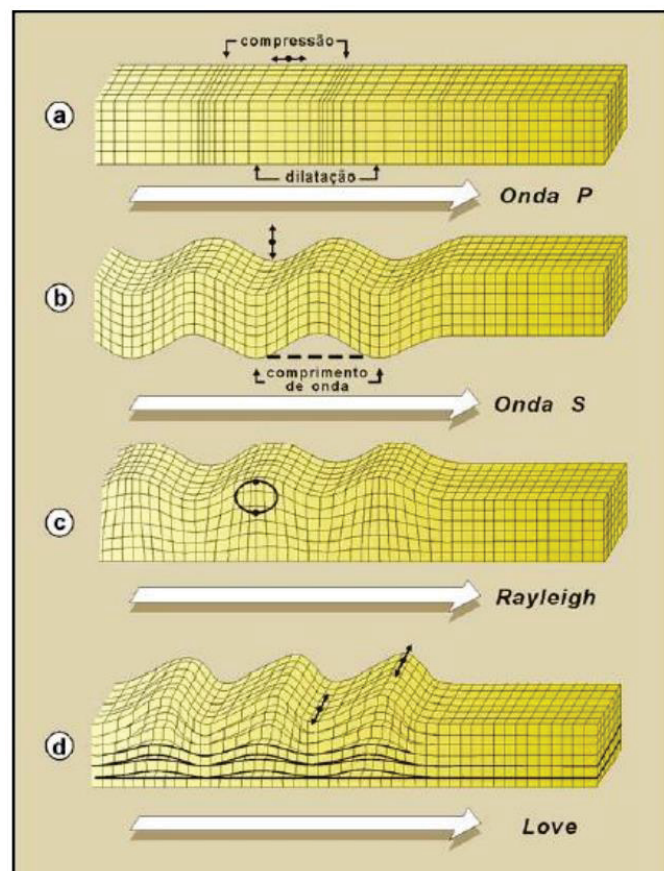
FONTE: Adaptado de Charlie et. al. (2013).

2.4.3 Geração de excessos de poropressão induzidos por vibrações

Conforme já mencionado, as ações dinâmicas ou vibrações podem induzir a geração de excesso de poropressão positiva em solos saturados e contráteis. E este excesso de poropressão ocorre quando o fluido de saturação da massa de solo se deforma elasticamente, enquanto a estrutura do solo se deforma plasticamente (contração) (CHARLIE *et. al.*, 2001).

A geração de excesso de poropressão sob condições sísmicas é induzida pela propagação de ondas de tensão (cisalhamento, compressão e ondas de superfície). Geralmente, as ondas de cisalhamento (ondas S) causam distorção (cisalhamento) do solo, as ondas de compressão (ondas P) comprimem o solo e as ondas de superfície (Rayleigh e Love) cisalham e comprimem o solo (CHANG *et. al.*, 2007). Na FIGURA 2.15 apresenta-se um esquema típico para cada tipo de onda.

FIGURA 2.15 - MOVIMENTOS DE PARTÍCULA PRODUZIDOS POR DIFERENTES TIPOS DE ONDA.



FONTE: Castilho (2007).

As tensões de cisalhamento das ondas S induzem deformações de cisalhamento e causam um rearranjo das partículas do solo que leva a um excesso de poropressão permanente ou residual. As ondas P, por outro lado, aumentam a tensão média no solo, o que leva ao excesso de poropressão, mas esse excesso de poropressão desaparece após a passagem da onda P. Assim, esse excesso de poropressão é elástico, ou recuperável, e oscila em fase com as ondas P que passam. Esta componente da geração de excesso de poropressão é chamado de excesso de poropressão hidrodinâmica, enquanto a poropressão permanente induzida por cisalhamento é chamada de excesso de poropressão residual. Convencionalmente, os pesquisadores estão mais interessados no excesso de poropressão residual porque está diretamente relacionado à liquefação e à redução da rigidez do solo (CHANG *et. al.*, 2007).

Como consequência do excesso de poropressão, tem-se a redução da tensão efetiva e da resistência do material (CHARLIE *et. al.*, 2013). De acordo com o mesmo autor, diversas relações tem sido empregadas para prever esse incremento do excesso de poropressão e suas consequências, porém oriundas de detonações de explosivos em atividades de mineração. Essas relações geralmente analisam a relação com a Razão de Poropressão (ou *Pore Pressure Ratio* – PPR), que é definida como o máximo excesso de poropressão ($\Delta u_{m\acute{a}x}$) logo após a passagem da onda (ou carregamento cíclico dinâmico, como sismo), dividido pela tensão efetiva inicial (σ'_{v0}), antes do efeito da vibração, conforme equação abaixo:

$$PPR = \Delta u_{m\acute{a}x} / \sigma'_{v0}$$

Quando a razão de poropressão (PPR) excede ou iguala a um, ocorre a liquefação. Sabe-se também que, à medida que a densidade relativa e a tensão efetiva do solo aumentam, a vibração necessária para induzir a liquefação também aumentam (LARSON-ROBL, 2016).

Alguns modelos simples foram propostos para prever o desenvolvimento de excesso de poropressão durante um carregamento cíclico. Esses modelos usam a relação entre o excesso de poropressão, o número de ciclos de carregamento e o carregamento sísmico no solo, normalmente expressos em termos de tensões ou deformações cisalhantes induzidas (WEN-JONG *et. al.*, 2007).

Seed *et. al.* (1975), utilizando dados de ensaios cíclicos não-drenados de tensões controladas, definiu uma função de geração de poropressão representando a relação entre a razão de poropressão (PPR, também expressa pelo símbolo “ r_u ”) e uma razão de ciclo de carregamento (N/N_l), através da equação abaixo e o gráfico da FIGURA 2.16. Este modelo foi bastante utilizado na prática por sua simplicidade.

$$r_u = \frac{u_g}{\sigma'_0} = \frac{2}{\pi} \cdot \text{sen}^{-1} \left(\frac{N}{N_l} \right)^{1/2 \cdot \theta}$$

Onde:

u_g = excesso de poropressão gerado;

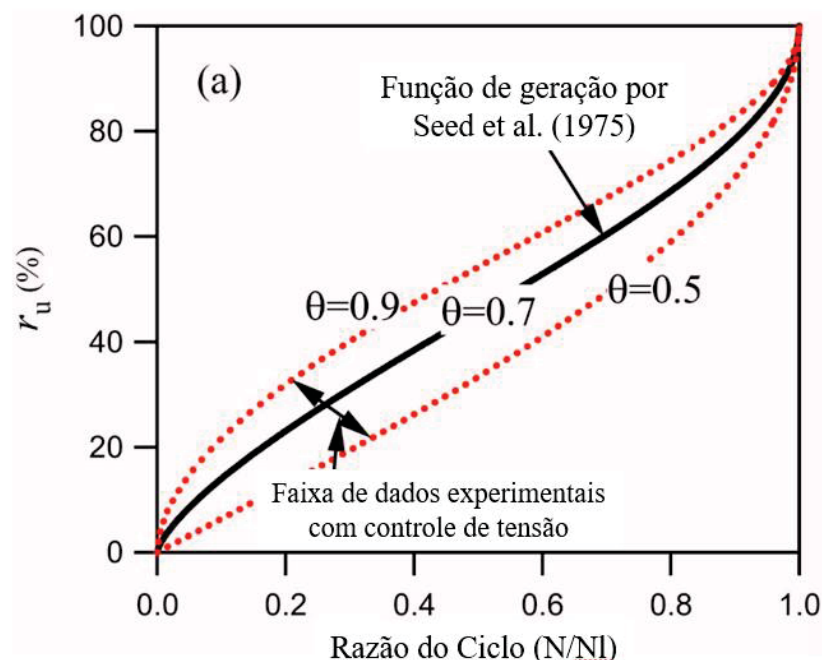
σ'_0 = tensão efetiva inicial em condições triaxiais;

N = número de ciclos de carregamento;

N_l = número de ciclos de tensões uniformes que causam liquefação;

θ = constante empírica variando de 0,5 a 0,9, com valor médio de 0,7.

FIGURA 2.16 - MODELO DE GERAÇÃO DE EXCESSO DE POROPRESSÃO PARA TESTES CÍCLICOS COM TENSÕES CONTROLADAS.

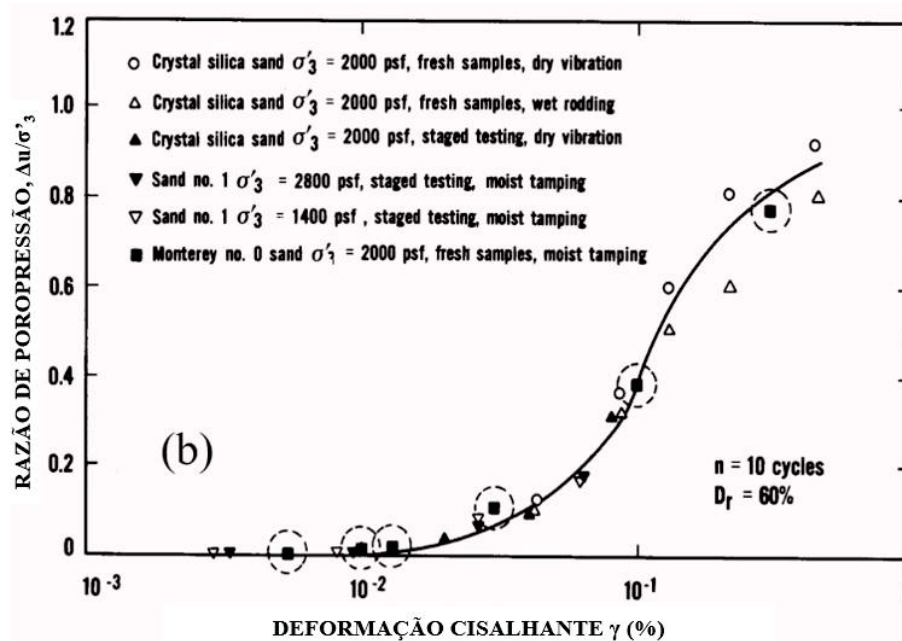


FONTE: Adaptado de Seed *et. al.* (1975) *apud* Wen-Jong *et. al.* (2007).

Dobry *et. al.*, (1982) utilizou deformações cisalhantes para quantificar o estado de perturbação do solo para prever a geração do excesso de poropressão, baseado em ensaios triaxiais cíclicos, não drenados e de deformações controladas. Este

modelo desenvolveu uma relação entre o excesso de poropressão (expresso pela razão de poropressão – PPR ou ru), a amplitude da deformação cisalhante cíclica (γ) e o número de ciclos de carregamento. Um dos principais resultados desse modelo foi o nível de deformação cisalhante acima do qual o excesso de poropressão começa a ser gerado ($\gamma \approx 1 \times 10^{-2} \%$), conforme FIGURA 2.17.

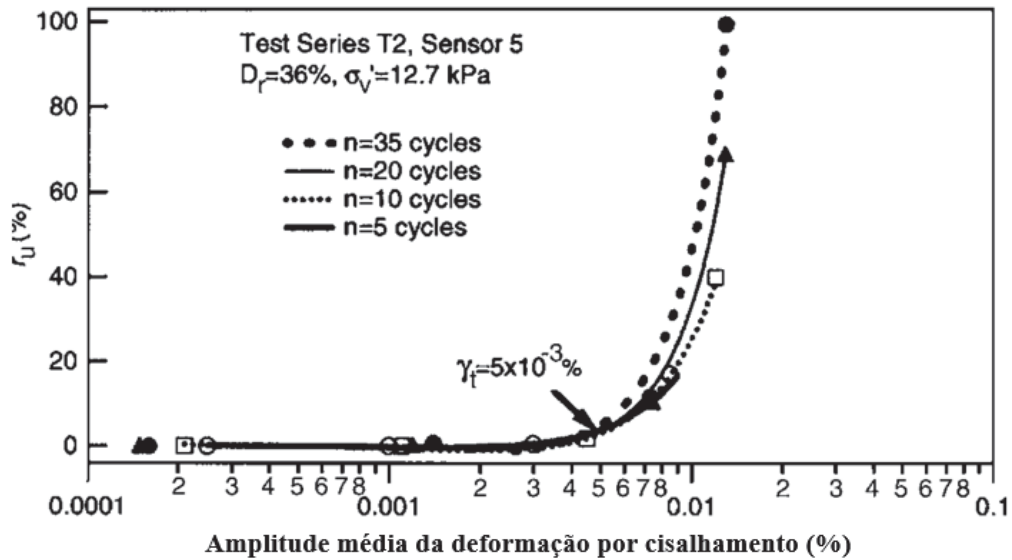
FIGURA 2.17 - MODELO DE GERAÇÃO DE EXCESSO DE POROPRESSÃO PARA ENSAIOS TRIAXIAIS CÍCLICOS DE DEFORMAÇÕES CONTROLADAS.



FONTE: Adaptado de Dobry *et. al.* (1982) apud Wen-Jong *et. al.* (2007).

Wen-Jong *et. al.* (2007), para suprir as limitações dos modelos de previsão anteriores, principalmente relacionados a representatividade de ensaios de laboratório para as condições reais em campo, apresentou uma técnica de teste de campo para medir diretamente as respostas de geração de excesso de poropressão com deformações cisalhantes induzidas. O resultado é apresentado na FIGURA 2.18.

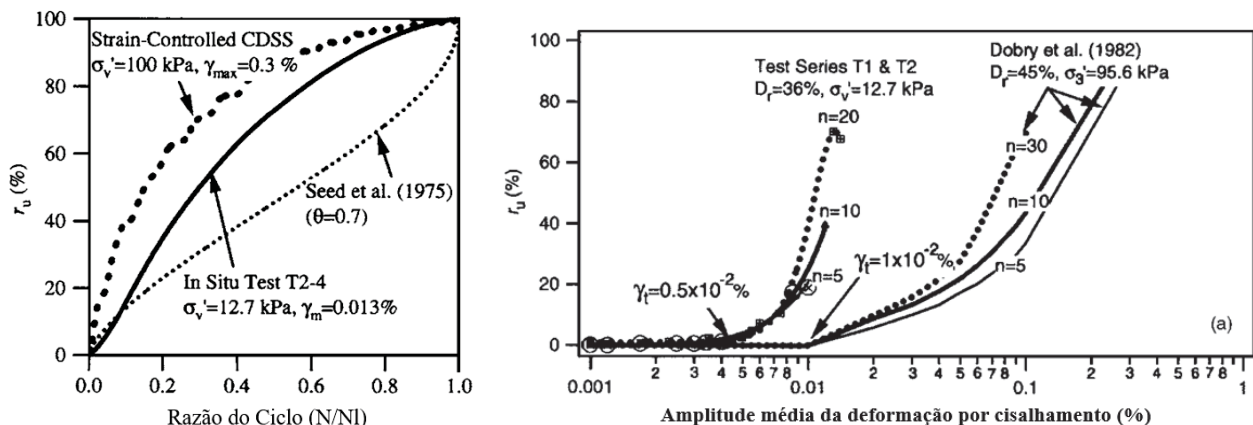
FIGURA 2.18 - CURVAS DE GERAÇÃO DE EXCESSO DE POROPRESSÃO EM TESTES DE CAMPO.



FONTE: Adaptado de Wen-Jong *et. al.* (2007).

Os testes de Wen-Jong *et. al.* (2007) demonstraram diferenças nos resultados dos modelos de laboratório de Seed *et. al.* (1975) e Dobry *et. al.*, (1982), conforme FIGURA 2.19, com maior geração de poropressão se comparado a Seed *et. al.* (1975), e início de geração de excesso de poropressão com menores deformações se comparado a Dobry *et. al.*, (1982), com $\gamma \approx 0,5 \times 10^{-2} \%$.

FIGURA 2.19 - COMPARATIVO DAS PREDIÇÕES DOS MODELOS DE GERAÇÃO DE EXCESSO DE POROPRESSÃO COM TESTES DE CAMPO.

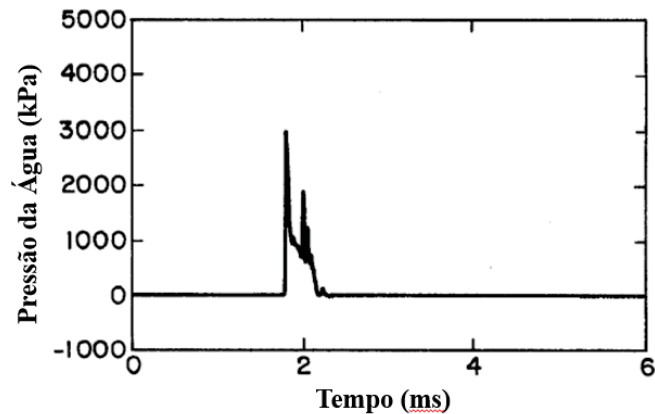


FONTE: Adaptado de Wen-Jong *et. al.* (2007).

Com relação a geração de poropressão em rejeitos de mineração e devido as vibrações geradas pelo uso de explosivos em detonações, Charlie *et. al.* (2001) apresentou a medição de poropressão inicial (chamada também de poropressão

transiente) devida a onda de compressão inicial produzida pela explosão, com seu pico e dissipação de poropressão ocorrendo quase que instantaneamente (milésimos de segundo) após a detonação, em um ponto de medição também muito próximo da explosão (2,7m), conforme FIGURA 2.20.

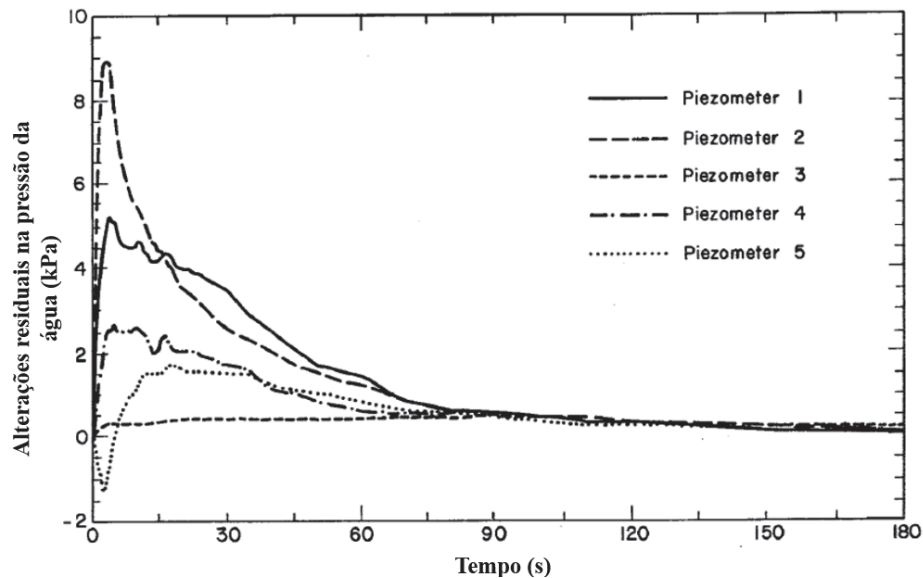
FIGURA 2.20 - FORMA DA ONDA RESULTANTE DA GERAÇÃO DE EXCESSO DE POROPRESSÃO TRANSIENTE DE UM TESTE COM USO DE EXPLOSIVOS.



FONTE: Adaptado de Charlie *et. al.* (2001).

Em maiores distâncias do ponto de denotação dos explosivos, a geração de excesso de poropressão se assemelha a de uma carga cíclica, devido a forma de ação dinâmica (vibração) que ocorre nessas distâncias. Neste sentido, Charlie *et. al.* (2013), apresentou as medições realizadas com piezômetros distantes de 5m a 9m do ponto de detonação ou, em distância escalada, comum na área de detonações (distância da fonte dividido pela raiz cúbica da massa de explosivos – $m/kg^{1/3}$), de 6,9 a 12,2 $kg^{1/3}$, de uma fonte com 0,43kg de explosivos. Os resultados das medições são apresentados na FIGURA 2.21.

FIGURA 2.21 - FORMA DA ONDA RESULTANTE DA GERAÇÃO DE EXCESSO DE POROPRESSÃO RESIDUAL DE UM TESTE COM USO DE EXPLOSIVOS.



FONTE: Adaptado de Charlie *et. al.* (2001).

Nos dois últimos trabalhos citados, verifica-se a diferença de valores de excesso de poropressão gerados, assim como o tempo de dissipação, com picos elevados de poropressões transientes, porém com geração e dissipação quase que instantâneos, e menores picos de poropressões residuais e maiores tempos de dissipação. Esta última, pelo maior tempo de dissipação, pode se sobrepor a outras ações, como detonações próximas e simultâneas.

2.4.4 Vibrações induzidas por equipamentos de construção

As vibrações ou carregamentos dinâmicos podem ser originadas por sismos naturais, detonações de explosivos e, também, por carregamentos por máquinas pesadas, que podem afetar as estruturas geotécnicas (CASTILHO, 2017).

Um subproduto inevitável da construção de novas obras é a geração de vibrações no solo que podem se propagar do canteiro de obras para construções ou edifícios próximos. Atenção especial deve ser despendida para obras mais sensíveis a vibrações, como obras antigas, hospitais e instalações modernas com equipamentos sensíveis. Para avaliações dos possíveis impactos das vibrações, é desejável que sejam realizadas medições de vibrações utilizando equipamentos de construção representativos e no mesmo tipo de solo da obra, permitindo a determinação e avaliação em situações reais. Geralmente, esses testes são realizados nos

equipamentos onde se esperam as vibrações mais significativas, como bate-estacas, compactadores vibratórios, detonadores e escavadeiras. (UNGAR E ZAPFE, 2011).

Registros de vibrações oriundas do tráfego de equipamentos de construção são apresentados por Castilho (2017), onde, por cinco meses (novembro de 2015 a março de 2016), foram monitoradas as acelerações sísmicas com sismógrafos na região da Barragem de Germano-MG. Os registros são referentes de diferentes equipamentos, sendo o maior deles uma carregadeira de rodas 992k da Caterpillar (FIGURA 2.22), que possui peso operacional de 99.275 kg e desenvolve velocidades de até 22,4 km/h. Em algumas situações, duas dessas máquinas, idênticas, trabalhavam concomitantemente no pé da estrutura.

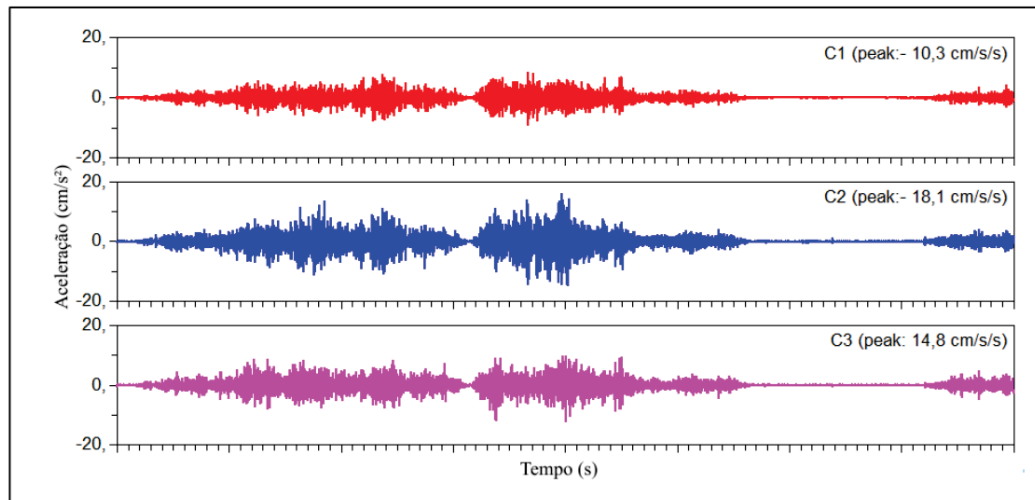
FIGURA 2.22 - CARREGADEIRA 992K DA CATERPILLAR.



FONTE: Caterpillar.

As acelerações captadas no período chegaram a $18,1\text{cm/s}^2$ (1,8% de “g” – aceleração da gravidade). A FIGURA 2.23 mostra o acelerograma das ondas causadas pelo tráfego de equipamentos pesados.

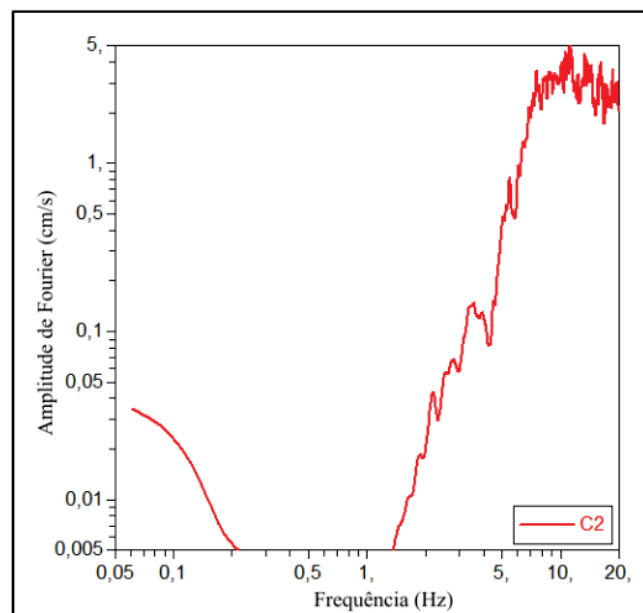
FIGURA 2.23 - ACELEROGRAMA DAS ONDAS CAUDAS PELO TRÁFEGO DE VEÍCULOS E MÁQUINAS PESADAS.



FONTE: Castilho (2017).

Outro resultado apresentado foi o espectro de Fourier (FIGURA 2.24), que mostra que a amplitude máxima da onda causada pelo tráfego de equipamentos foi de 4,99cm/s, correspondente a frequência de 11,2 Hz. Verifica-se que as vibrações ocorrem as maiores frequências ocorrem, aproximadamente, a partir de 5Hz até 20Hz.

FIGURA 2.24 - ESPECTRO DE FOURIER DAS ONDAS CAUDAS PELO TRÁFEGO DE VEÍCULOS E MÁQUINAS PESADAS.



FONTE: Castilho (2017).

O trabalho citado não apresenta análises específicas dos efeitos das vibrações na geração de poropressão pelo tráfego de equipamentos. Além disso, sabe-se que equipamentos com pneus tendem a atenuar as vibrações transmitidas ao solo, sendo recomendados analisar equipamentos como o trator de esteiras e rolos vibratórios (FIGURA 2.25).

FIGURA 2.25 - TRATOR DE ESTEIRAS E COMPACTADOR DE SOLO VIBRATÓRIO.



FONTE: Caterpillar.

2.5 DESCARACTERIZAÇÃO DE BARRAGENS

A regulamentação das barragens de rejeito teve alterações importantes com o tempo, até a última norma da Agência Nacional de Mineração (ANM) de fevereiro de 2022, que consolida os atos normativos sobre a segurança de barragens de rejeito, a resolução ANM nº 95, com aspectos relacionados à descaracterização de barragens na mineração. A linha do tempo das regulamentações, estaduais e federais, é apresentada a seguir:

- Lei Federal 12.334/2010: Estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens - PNSB e a criação do Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens – SNISB.
- Portaria ANM nº 70.389/2017: Cria o Cadastro Nacional de Barragens de Mineração, o Sistema Integrado de Gestão em Segurança de Barragens de Mineração e estabelece a periodicidade de execução ou atualização, a qualificação dos responsáveis técnicos, o conteúdo mínimo e o nível de detalhamento do Plano de Segurança da Barragem, das Inspeções de Segurança Regular e Especial, da

Revisão Periódica de Segurança de Barragem e do Plano de Ação de Emergência para Barragens de Mineração.

- Revisão da ABNT NBR 13.028:2017: Mineração – Elaboração e apresentação de projeto de barragens para disposição de rejeitos, contenção de sedimentos e reservação de água – Requisitos.
- Resolução conjunta SEMAD/FEAM Termo de Referência nº 2.784/2019: Estabelece os requisitos mínimos de um Projeto para a Descaracterização de Barragens alteadas pelo método de montante no Estado de Minas Gerais a ser apresentado à Fundação Estadual de Meio Ambiente, conforme previsto na Lei 23.291, de 25 de fevereiro de 2019, que institui a Política Estadual de Segurança de Barragem. Este TR foi construído por um comitê de especialistas instituído pela Resolução Conjunta SEMAD/FEAM nº 2.784 de 21 de março de 2019.
- Resolução ANM nº 13/2019: Estabelece a atualização das medidas regulatórias cautelares objetivando assegurar a estabilidade de barragens de mineração, notadamente aquelas construídas ou alteadas pelo método denominado "a montante" ou por método declarado como desconhecido. Revoga a "Resolução 4 / 2019 - ANM".
- Resolução ANM nº 32: Altera o artigo 7º da Portaria 70.389 de maio de 2017.
- Resolução ANM nº 51/2020: Cria e estabelece a periodicidade de execução ou atualização, a qualificação dos responsáveis técnicos, o conteúdo mínimo e o nível de detalhamento da Avaliação de Conformidade e Operacionalidade do PAEBM- ACO, que compreende o Relatório de Conformidade e Operacionalidade do PAEBM- RCO e a Declaração de Conformidade e Operacionalidade do PAEBM - DCO.
- Resolução ANM nº 56/2021: Altera dispositions da Resolução ANM Nº 51.
- Resolução ANM nº 95/2022: Consolida os atos normativos que dispõem sobre segurança de barragens de mineração (fevereiro de 2022).

Segundo a resolução ANM nº 95/2022, uma barragem descaracterizada é:

“Uma estrutura que não recebe, permanentemente, aporte de rejeitos e/ou sedimentos oriundos de sua atividade fim, a qual deixa de possuir características ou de exercer função de barragem, de acordo com projeto técnico, compreendendo, mas não se limitando, às seguintes etapas concluídas:

- a) Descomissionamento: encerramento das operações com a remoção das infraestruturas associadas, tais como, mas não se limitando: a espigotes e tubulações, exceto aquelas destinadas à garantia da segurança da estrutura;*
- b) Controle hidrológico e hidrogeológico: adoção de medidas efetivas para reduzir ou eliminar o aporte de águas superficiais e subterrâneas para o reservatório, bem como a redução controlada da linha freática no interior do reservatório;*
- c) Estabilização: execução de medidas tomadas para garantir a estabilidade física e química de longo prazo das estruturas que permanecerem no local;*
- d) Monitoramento: acompanhamento pelo período mínimo de 2 (dois) anos após a conclusão das obras de descaracterização, objetivando assegurar a eficácia das medidas de estabilização.”*

A mesma resolução (ANM nº 95/2022) define os prazos legais para concluir a descaracterização das barragens alteadas pelo método de montante, sendo o prazo já vencido de 25 de fevereiro de 2022. Porém, podendo ser prorrogado pela ANM mediante apresentação de justificativa técnica. Abaixo segue o texto específico da resolução:

“Art. 58. Com vistas a minimizar o risco de rompimento, em especial por liquefação, das barragens alteadas pelo método a montante ou por método declarado como desconhecido, o empreendedor deverá:

- I - Possuir projeto técnico executivo de descaracterização da estrutura, o qual deverá contemplar, também, sistemas de estabilização da barragem existente ou a construção de nova estrutura de contenção situada à jusante, ambos conforme definição técnica do projetista, com vistas a minimizar o risco de rompimento por liquefação ou reduzir o dano potencial associado, tendo como balizador a segurança e obedecendo a todos os critérios de segurança descritos nesta Resolução e na norma ABNT NBR 13.028 e ou normativos que venham a sucedê-las;*
- II - Executar as obras do sistema de estabilização da barragem existente ou a construção de nova estrutura de contenção situada a jusante, conforme definição técnica do projetista;*
- III - Concluir a descaracterização da barragem até 25 de fevereiro de 2022, conforme prazo determinado no § 2º, art. 2-A da Lei nº 12.334, de 2010, podendo ser prorrogado pela ANM mediante apresentação de justificativa técnica e desde que seja referendada pela autoridade licenciadora do Sisnama.”*

Segundo Massignan e Sánchez (2022), segundo a bibliografia técnica internacional, as ações para descaracterização de barragens relacionam-se com atividades de desativação, reabilitação, recuperação, remediação e fechamento da estrutura. Com essas ações geralmente visam à estabilização física e química de uma

estrutura de contenção de rejeitos. Segundo o mesmo autor, entre os artigos analisados, alguns abordam a remoção dos rejeitos para reprocessamento ou redistribuição do material, como atividade para descaracterização da estrutura.

2.6 TRABALHOS CORRELATOS

Neste item são apresentados estudos encontrados na literatura e relacionados com o tema de estudo (revisão bibliográfica), sendo a maioria relacionados a vibrações oriundas da detonação de explosivos na mineração (VEYERA, 1985, TRIPATHY E SHIRKE 2010, CHARLIE *et. al.*, 2013, LARSON-ROBL, 2016, E ISHIMWE *et. al.*, 2020), um deles relacionado a simulação de vibração com uso de um caminhão vibratório (CHANG *et. al.*, 2007), e outros relacionados a simulações de vibrações em laboratório com ensaios triaxiais cíclicos (TOKIMATSU E YOSHIMI (1983), MARCUSON *et al.* (1990) E MORGENSTERN ET AL. (2016) e em modelos de grande escala e centrífugas (Dobry e Abdo. (2015).

Veyera (1985), analisou os incrementos de poropressões em solos arenosos e saturados induzidos por explosivos. Com testes de grande escala em laboratório, tensões efetivas variando de 86 a 690 kPa e densidades relativas de 20 a 80%, produziu a seguinte equação para a estimativa da razão de poropressão, através de análises de regressões multivariadas:

$$PPR = 6,67. (PPV)^{0,33}. (\sigma'_0)^{-0,31}. (D_r)^{-0,179}$$

Onde:

PPR: Razão de poropressão;

PPV: Velocidade de vibração de partícula de pico (em m/s);

σ'_0 : Tensão efetiva inicial (em kPa);

Dr: Densidade relativa (em porcentagem).

Neste mesmo trabalho, o autor analisou a influência da tensão efetiva inicial, densidade relativa e magnitude das tensões compressivas aplicadas para o início do desenvolvimento de poropressão e liquefação do solo arenoso, com resultados

bastante distintos. Também identificou um limite de deformação cisalhante (γ) abaixo do qual nenhum excesso de poropressão significativo é gerado ($\gamma = 0,5 \times 10^{-2} \%$).

Tripathy e Shirke (2010) apresentam uma avaliação da segurança de barragens de terra contra vibrações no solo devidas a explosões para mineração. O trabalho analisa dados de testes e monitoramentos em duas barragens na Índia (Mina de Rampura Agucha e Barragem de Salandi), com aproximadamente 500 registros de vibrações de detonações. Comenta-se no trabalho sobre os limites recomendados na literatura para as vibrações, que são para estruturas residenciais, com diferenças importantes para barragens de terra, como o fenômeno da liquefação, além de se esperar uma vida útil bastante prolongada para as barragens. O autor também evidencia a necessidade de avaliação das frequências relacionadas as vibrações geradas e as frequências naturais das estruturas, com danos potenciais em frequências próximas, que são baixas, devidas ao efeito de ressonância. Por fim, após apresentação de uma revisão abrangente sobre o potencial de liquefação, recomenda-se uma faixa de valores limites para velocidades de vibrações de partículas entre 5 e 15 mm/s para este tipo de estrutura (barragens) e para vibrações oriundas de detonações de explosivos.

Charlie et. al. (2013) apresentam, além de estudos específicos, que remontam desde 1985 até a data publicação do estudo de referência, diversos outros trabalhos que analisaram as condições para geração de excesso de poropressão significativo e liquefação em diferentes solos, compacidade e consistências. Na TABELA 2.2 apresenta-se um exemplo desses resumos dos trabalhos relacionados a picos de deformações cisalhantes (γ_{pico}), além da já apresentada TABELA 2.1, com relação a velocidades de vibrações de partículas (PPV). O autor também apresenta equações específicas para estimativas de geração de excesso de poropressão relacionadas com velocidades de vibrações de partículas, densidades relativas, estados de tensões e distâncias escaladas das fontes de detonações, para as condições testadas. Na equação abaixo apresenta-se um exemplo de equação definida no estudo.

$$PPR = 134. (100.PPV/c)^{1,2}. (\sigma'_0)^{-0,15}. (D_r)^{-0,08}$$

Onde:

c: velocidade da onda de compressão (m/s).

PPR: Razão de poropressão;

PPV: Velocidade de vibração de partícula de pico (m/s);

σ'_0 : Tensão efetiva inicial (kPa);

D_r : Densidade relativa (em porcentagem).

TABELA 2.2 - TRABALHOS PUBLICADOS COM LIMITES DE DEFORMAÇÕES CISALHANTES PARA GERAÇÃO DE RAZÃO DE POROPRESSÃO E LIQUEFAÇÃO.

Deformação de pico (%) ^b	Densidade	Referência
Liquefação (testes de explosivos em campo)		
>-0,09 ^c	fofa	Charlie et. al. (2013)
>0,04	muito compacta	Charlie et. al. (2013)
>0,03	compacta	Charlie et. al. (2013)
>0,03	fofa	Charlie et. al. (2013)
>0,04	fofa	Al-Qassimi et. al. (2005) ^a
>0,06 ^c	fofa	Pathirage (2000) ^a
>0,01	compacta	Charlie et. al. (1992)
Liquefação (testes de choque unidimensionais em laboratório)		
>0,01	fofa	Hubert (1986)
>0,03	fofa	Veyera (1985)
Poropressão residual significativa: PPR>0,1 (testes de explosivos em campo)		
>-0,01 ^c	fofa-compacta	Charlie et. al. (2013)
>0,004	fofa-compacta	Charlie et. al. (2013)
>0,001	fofa	Al-Qassimi et. al. (2005) ^a
>0,02 ^d	fofa	Gohl et. al. (2001)
>0,01 ^d	fofa	Pathirage (2000) ^a
>0,002	compacta	Charlie et. al. (1992)
Poropressão residual significativa: PPR>0,1 (testes de choque unidim. em laboratório)		
>0,005		Veyera (1985) e Hubert (1986)

Nota: Todos os valores são para detonações únicas, a menos que indicado de outra forma.

^aDetonações múltiplas com atraso de milissegundos.

^bDeformação compressiva radial máxima na tensão de pico (ϵ_{peak}).

^cDeformação tangencial máxima de tração no deslocamento máximo (ϵ_{peakd}).

^dDeformação cisalhante de pico (γ_{peak}).

FONTE: Adaptado de Charlie et. al. (2013).

Larson-Robl (2016) apresenta avaliações realizadas sobre medidas de instrumentação de poropressão (piezômetros elétricos) e vibrações (sismógrafos de engenharia – geofones) como respostas a detonações de explosivos em simulações em escala em laboratório, com um protótipo de dimensões de um container, com aproximadamente 6m de comprimento por 2m de altura, conforme FIGURA 2.26. O

protótipo foi preenchido com areia, em condições saturada e não saturada, e a instrumentação foi posicionada em diferentes distâncias do ponto de detonação.

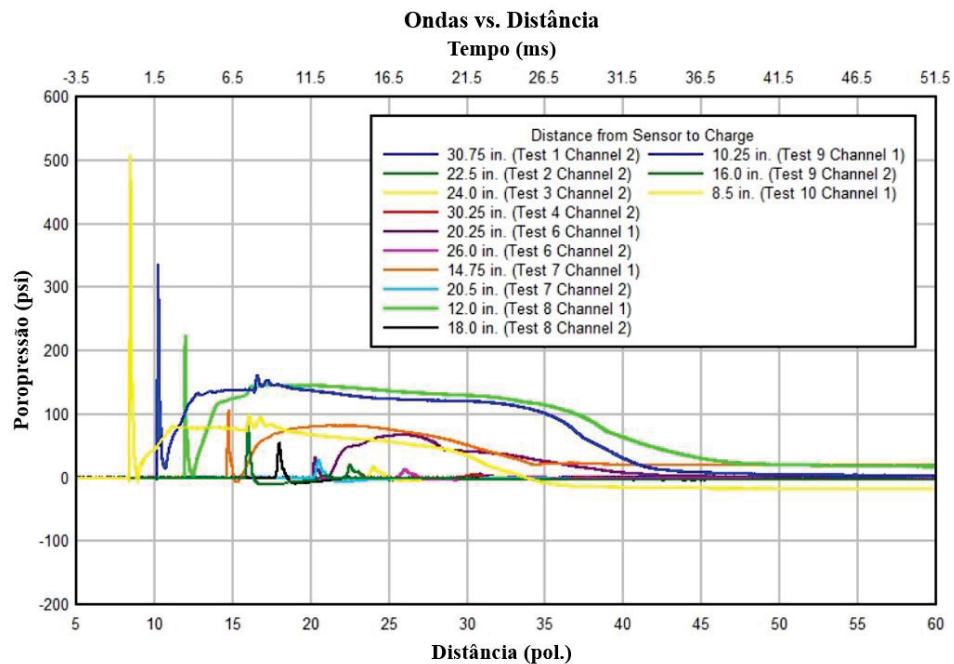
FIGURA 2.26 - PROTÓTIPO EM ESCALA PARA TESTES DE LABORATÓRIO DE DETONAÇÕES COM INSTRUMENTAÇÃO.,



FONTE: Larson-Robl (2016).

Como resultados, foi possível identificar os dois tipos de poropressão geradas por este tipo de evento (detonações), a poropressão transiente e a residual, onde em pequenas distâncias os dois tipos foram identificados, e em maiores distâncias somente a poropressão residual é identificada. Também se verificou a rápida dissipação para a poropressão transiente, e a dissipação mais lenta para a poropressão residual. Na FIGURA 2.27 apresenta-se um resumo de um dos resultados do estudo. Por fim, comenta-se sobre as diferenças entre os tipos de onda para as detonações (compressão e cíclica) e a dificuldade de correlacionar os seus efeitos

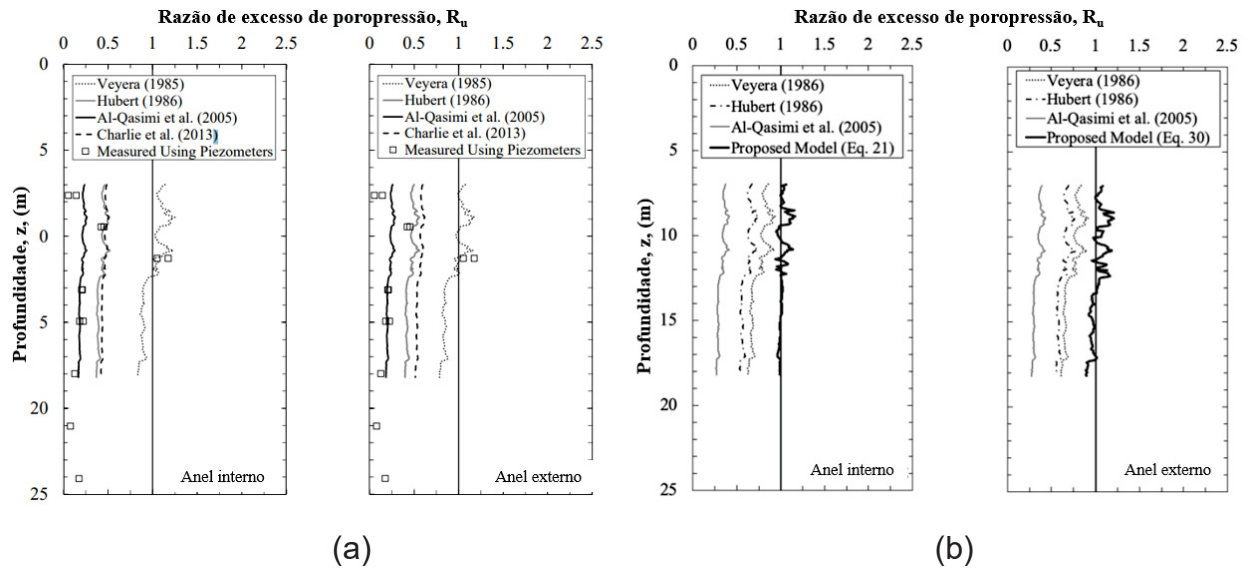
FIGURA 2.27 - MEDIDAS DE POROPRESSÃO (TRANSIENTE E RESIDUAL) COMO TEMPO, MOSTRANDO A OCORRÊNCIA DE POROPRESSÃO TRANSIENTE (PICO) ATÉ A DISTÂNCIA DE 20,25 POLEGADAS (~51,4 CM).



FONTE: Adaptado de Larson-Robl (2016).

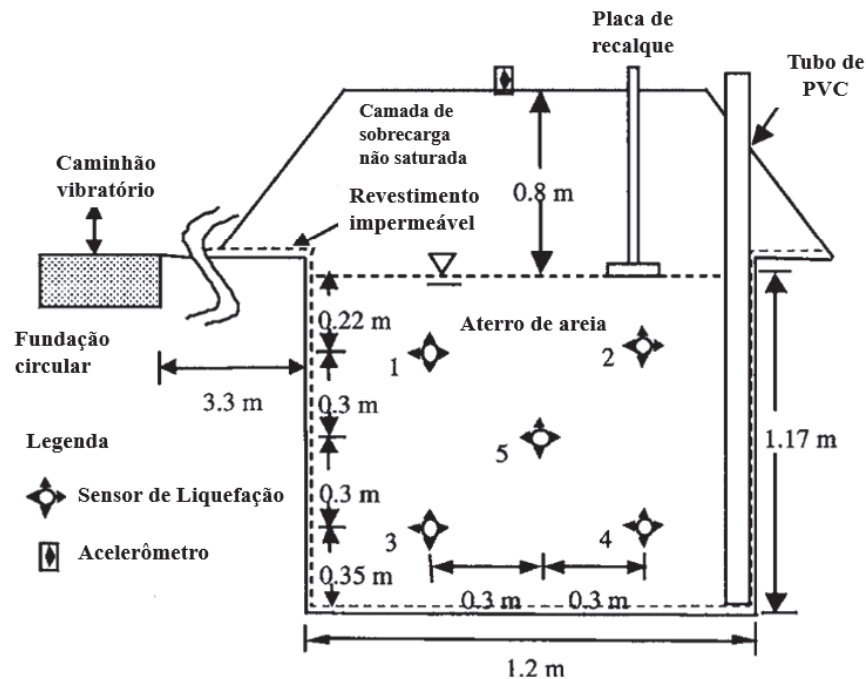
Ishimwe, *et. al.* (2020) com testes em campo, propõe uma equação empírica para a estimativa da razão de poropressão (PPR ou r_u) e compara com as demais disponíveis na literatura, como Veyera (1986), Hubert (1986), Al-Qasimi *et. al.* (2005), com diferenças significativas, uma vez que as demais equações também são empíricas, e foram testadas para diferentes materiais, compacidades, estados de tensões, permeabilidades e energias de detonação (distância escalada). Os resultados e os comparativos são apresentados na FIGURA 2.28.

FIGURA 2.28 - PREDIÇÃO DE RAZÃO DE POROPRESSÃO EM FUNÇÃO DA PROFUNDIDADE CONSIDERANDO AS EQUAÇÕES EMPÍRICAS EXISTENTES E, EM (a) COM COMPARAÇÃO COM MEDIDAS DE CAMPO COM PIEZÔMETROS E 0,91 KG DE EXPLOSIVOS POR PERFURAÇÃO, E (b) COM COMPARAÇÃO COM A EQUAÇÃO PROPOSTA E 3,77 KG DE EXPLOSIVOS POR PERFURAÇÃO.



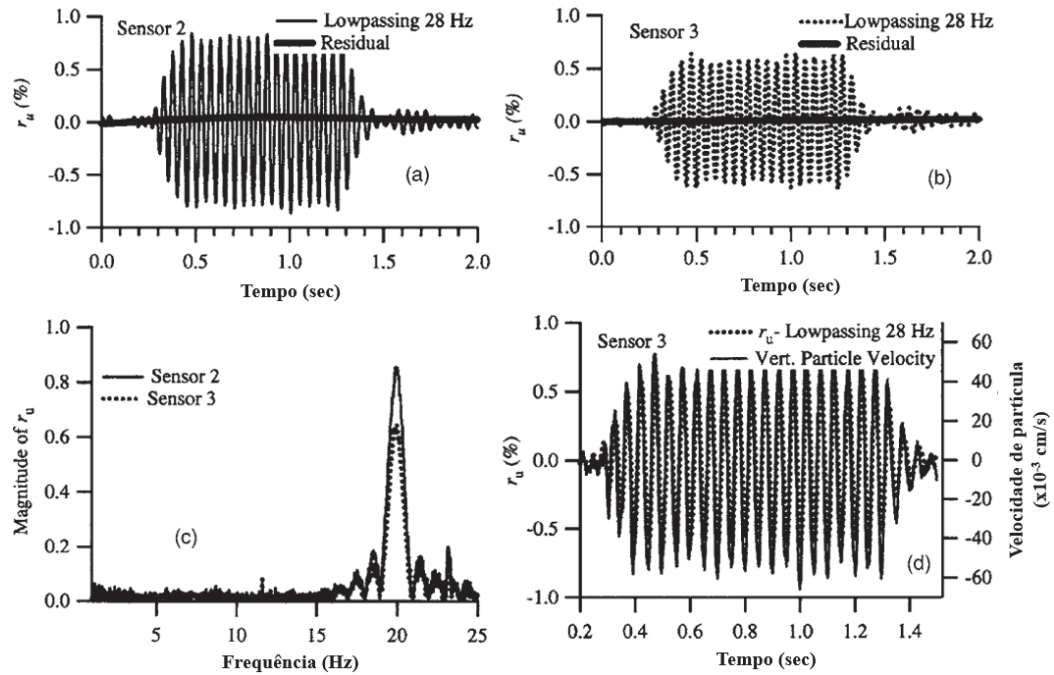
FONTE: Adaptado de Ishimwe *et. al.* (2020).

Chang *et. al.* (2007) analisaram as repostas para testes in situ com geração de vibração de um vibrador sísmico montado em um caminhão, conforme esquema da FIGURA 2.29. Os autores também compararam os resultados com modelos de predição de poropressão e deformação cisalhante.

FIGURA 2.29 - LAYOUT ESQUEMÁTICO DO TESTE DE LIQUEFAÇÃO *IN SITU*.FONTE: Adaptado de Chang *et. al.* (2007).

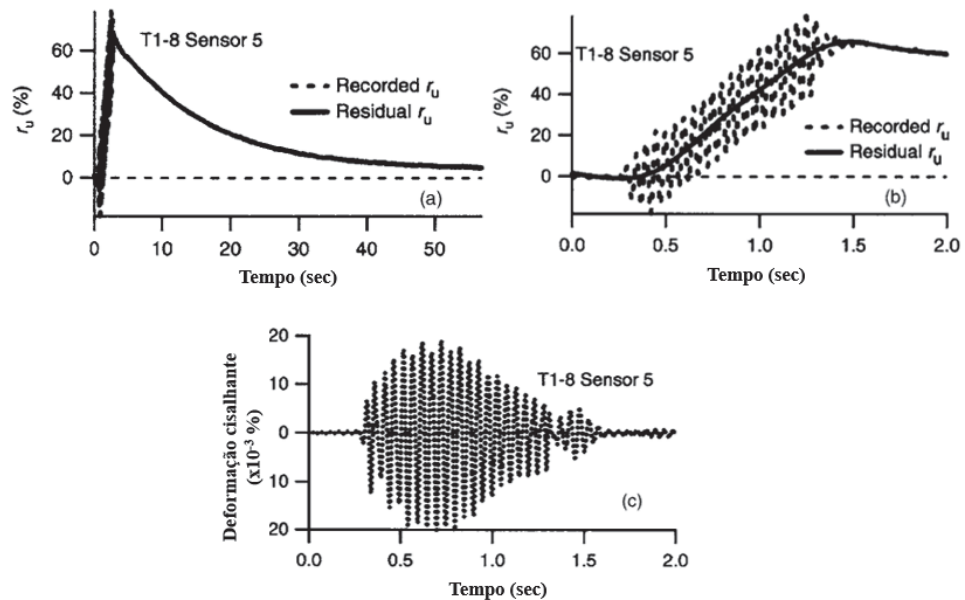
Os carregamentos sísmicos foram sendo incrementados gradualmente, com variação no número de ciclos de carregamento (20 a 50 ciclos) e com frequência de vibração de 20 Hz. Os resultados dos testes são apresentados nas figuras abaixo, com a FIGURA 2.30 para baixos níveis de deformação, a FIGURA 2.31 para elevados níveis de deformação, e a FIGURA 2.32 para níveis variáveis de deformação (elevada e baixa). Como resultados, verifica-se a diferença da geração de excesso de poropressão instantâneo (recuperável, poropressão hidrodinâmica ou transiente) com a residual (maiores tempos de dissipação), sendo as poropressões residuais que refletem as deformações plásticas acumuladas no solo e são responsáveis pela sua redução de rigidez e possível liquefação.

FIGURA 2.30 - GERAÇÃO DE EXCESSO DE POROPRESSÃO PARA BAIXOS NÍVEIS DE DEFORMAÇÃO NO SENSOR 3.



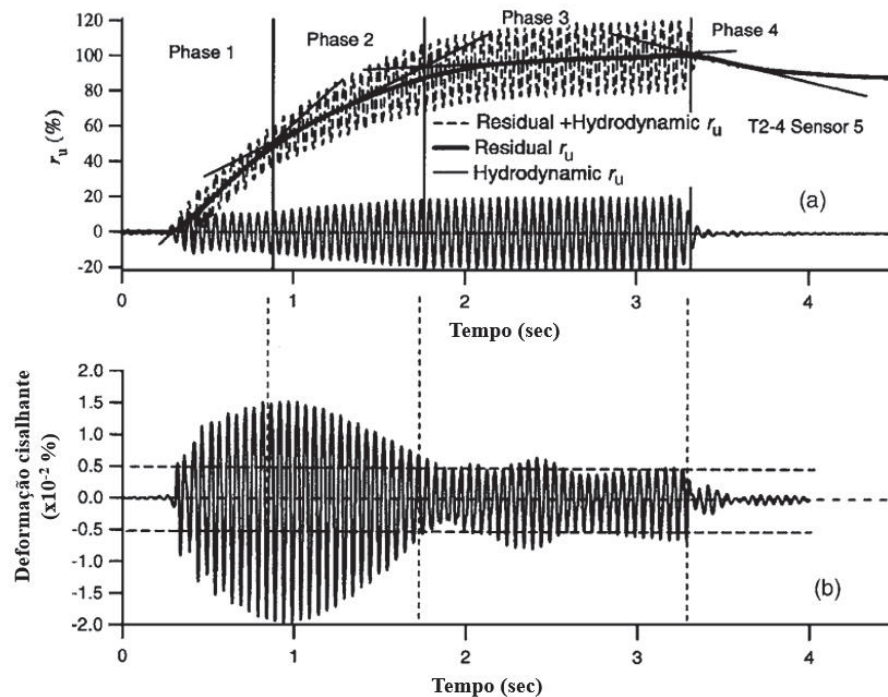
FONTE: Adaptado de Chang *et. al.* (2007).

FIGURA 2.31 - GERAÇÃO DE EXCESSO DE POROPRESSÃO PARA ELEVADOS NÍVEIS DE DEFORMAÇÃO



FONTE: Adaptado de Chang *et. al.* (2007).

FIGURA 2.32 - GERAÇÃO DE EXCESSO DE POROPRESSÃO PARA ELEVADOS E BAIXOS NÍVEIS DE DEFORMAÇÃO



FONTE: Adaptado de Chang *et. al.* (2007).

Do *et. al.* (2023) apresentou um estudo com objetivos semelhantes ao presente trabalho, de avaliação de geração de excesso de poropressão devida ao tráfego de equipamentos, porém realizou o estudo em laboratório e com ensaios triaxiais cíclicos não drenados. Esses ensaios cíclicos foram realizados com frequências baixas, de 1 ciclo de carregamento por segundo, ou 1Hz, abaixo das frequências observadas em tráfego de equipamentos e sismos naturais. Foram testados materiais com características areno-siltosos ou silte-arenosos (areia ferroviária e rejeito de uma barragem), para fins de avaliação de materiais utilizados em subleitos de pavimentos. Sendo a geração de excesso de poropressão em uma camada de solo de subleito, segundo o autor, um dos principais parâmetros que afetam o comportamento e o desempenho a longo prazo de qualquer subestrutura (ferroviária ou pavimentação) sujeita a carregamento cíclico de tráfego. O estudo mostrou que a quantidade excessiva de ciclos associados ao estado de densificação e tipo de material podem gerar elevadas razões de excesso de poropressão “ r_u ” (ou PPR), podendo chegar próximo de 1,0, resultando em perdas significativas de tensão efetiva nos materiais, e conseqüentemente, deformações que impactam na resistência do material, levando a uma condição de falha. As propriedades físicas dos materiais

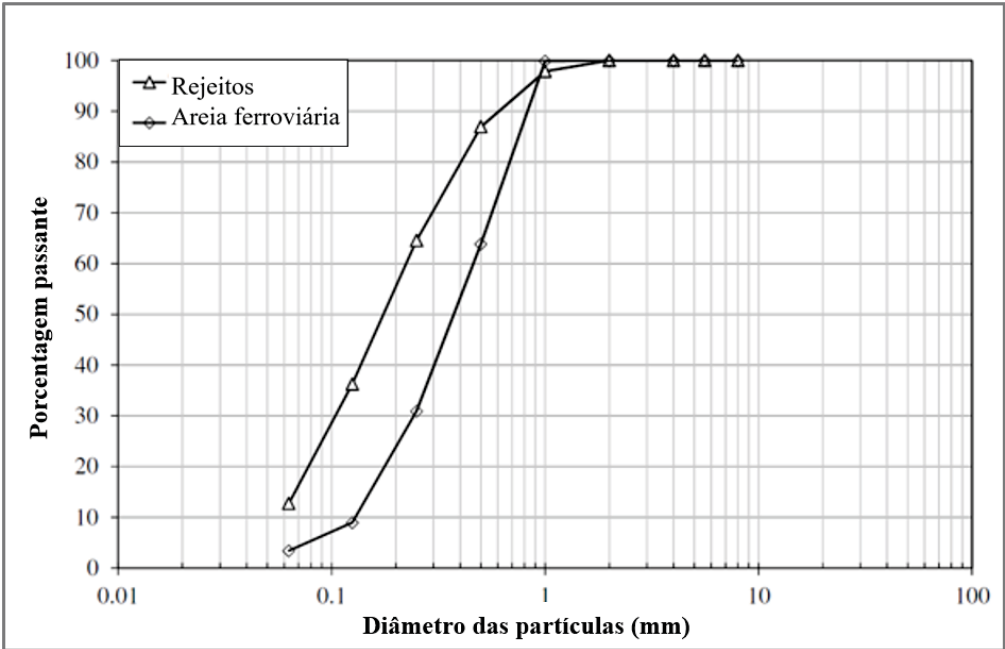
analisados são apresentadas na FIGURA 2.33, as distribuições granulométricas na FIGURA 2.34 e o estudo do aumento da razão do excesso de poropressão por aumento de ciclos, simulando uma superposição de ondas por vários equipamentos ou duração excessiva das atividades dos equipamentos sobre uma mesma área, é apresentado na FIGURA 2.35.

FIGURA 2.33 - PROPRIEDADES FÍSICAS DE MATERIAIS GRANULARES FINOS USADOS NO ESTUDO.

Propriedades	Rejeitos	Areia ferroviária
Densidade seca máxima (kg/m³)	2015	1788
Teor de umidade ótimo (%)	10,94	9,74
Índice de vazios máximo, $e_{\max}$	1,05	0,83
Índice de vazios mínimo, $e_{\min}$	0,49	0,48
Massa específica relativa, G	3,01	2,65
D50	0,187	0,395
Cor	Verde Escuro	Marrom claro

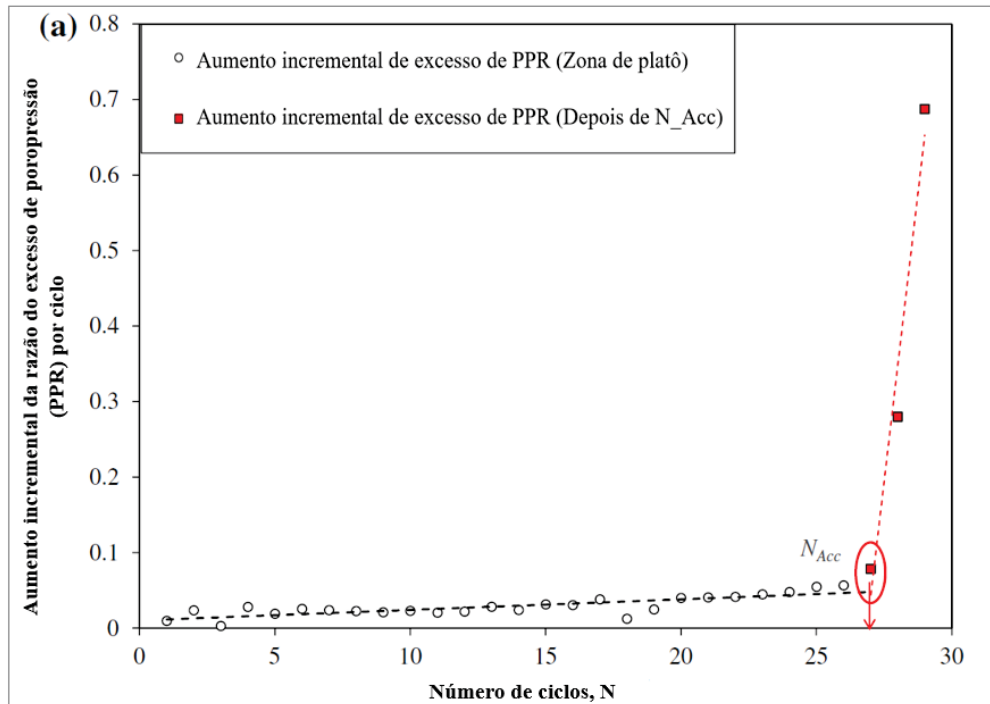
FONTE: Adaptado de Do *et. al.* (2023).

FIGURA 2.34 - DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DE MATERIAIS GRANULARES FINOS USADOS NO ESTUDO.



FONTE: Adaptado de Do *et. al.* (2023).

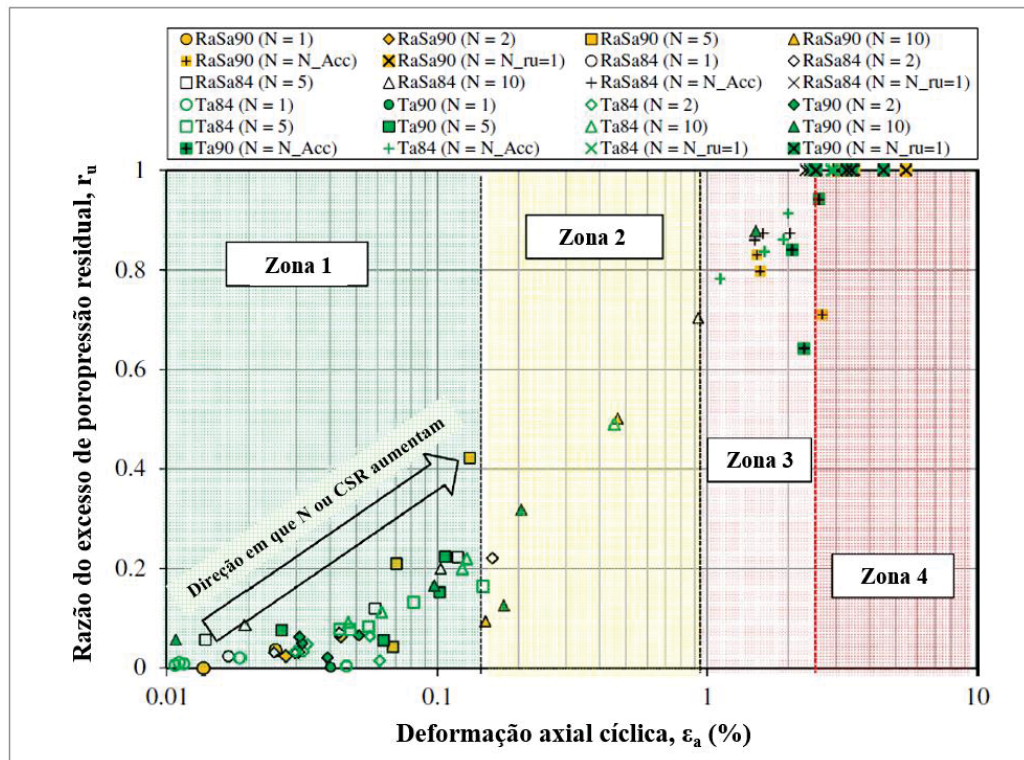
FIGURA 2.35 - INCREMENTO DA RAZÃO DE EXCESSO DE POROPRESSÃO VS NÚMERO EXCESSIVO DE CICLOS N.



FONTE: Adaptado de Do *et. al.* (2023).

Por fim, Do *et. al.* (2023), apresenta uma proposta de relação entre a razão de poropressão (r_u ou PPR) e a deformação axial cíclica (ϵ_a) para os materiais testados, em quatro estágios de comportamento (estável, metaestável, instável e de falha), conforme apresentado na FIGURA 2.36.

FIGURA 2.36 - RAZÃO DE EXCESSO DE POROPRESSÃO VS DEFORMAÇÃO AXIAL CÍCLICA DAS AMOSTRAS DE REJEITOS E AREIA FERROVIÁRIA.

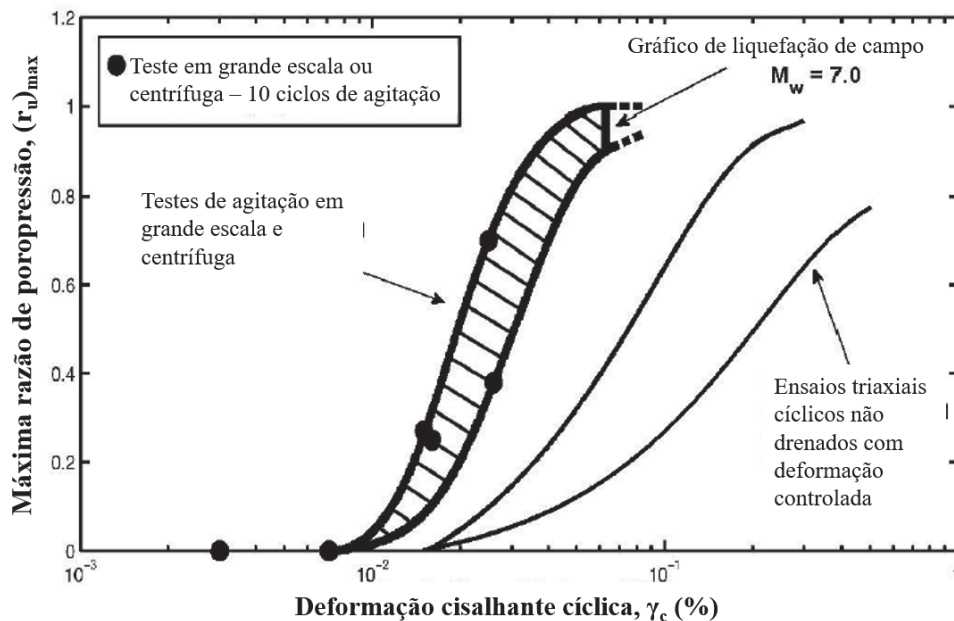


FONTE: Adaptado de Do *et.al.* (2023).

Dobry e Abdo. (2015) avaliaram a deformação cisalhante cíclica necessária para desencadear o processo de liquefação em materiais arenosos e areno-siltosos durante sismos, com avaliação em laboratório com ensaios cíclicos não drenados, bem como experimentos de agitação em modelos em grande escala (*truck-mounted shaker*" ou agitador montado em caminhão) e centrífuga, com comparação entre os resultados e mostrando grande discrepância entre eles. Os dados de calibração na escala de campo resultam de sismos associados equivalentes a cerca do dobro de ciclos utilizados nos ensaios de laboratório. Nos ensaios de laboratório em areias normalmente adensadas, submetidos a 10 ciclos, a deformação cisalhante cíclica que engatilha a liquefação varia de aproximadamente 0,4% a 3%, enquanto que deformação cíclica necessária para causar liquefação do solo nos testes de calibração de campo e na centrífuga, o limiar de deformação cíclica de cisalhamento sofreu redução da ordem de 10 vezes. Os autores argumentam que os fatores responsáveis por essas discrepâncias são a maior duração do carregamento no campo, a propagação unidimensional de ondas sísmicas em laboratório e o incremento da poropressão com fluxo ascendente de água no campo atingindo níveis de menor

confinamento (superficiais). Com base nisso, propõem que o ajuste necessário para equivalência ao número de ciclos em laboratório, levando a valores de deformação cisalhante cíclica entre 0,06% a 0,12% como gatilho para a liquefação. Na FIGURA 2.37 apresenta-se o resultado dos testes de campo e laboratório realizados, com as razões de poropressões e deformações cisalhantes correspondentes.

FIGURA 2.37 – RAZÃO DE POROPRESSÃO MÁXIMA RU_{MAX} VS DEFORMAÇÃO CISALHANTE CÍCLICA - REPRESENTAÇÃO EM CAMPO E LABORATÓRIO



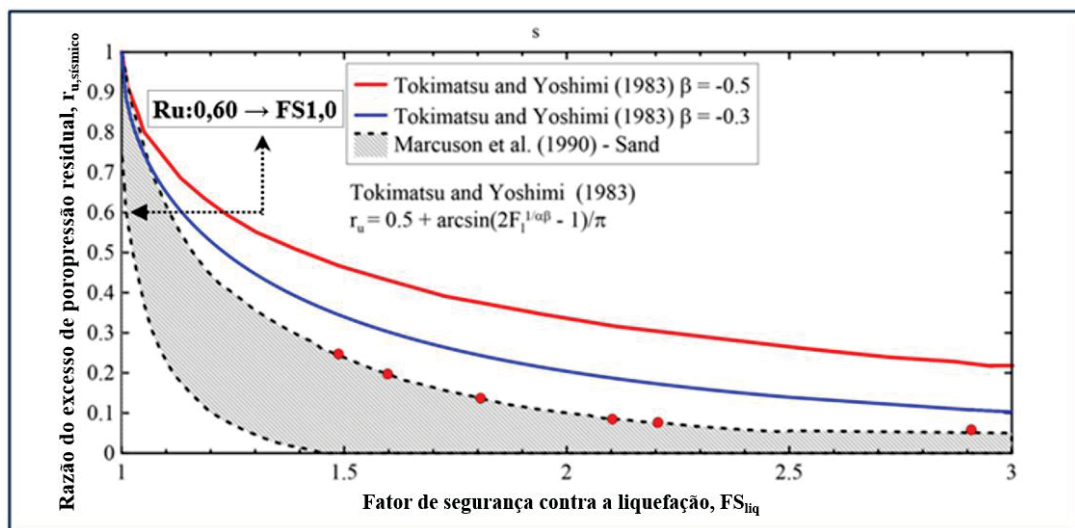
FONTE: Adaptado de Dobry e Abdo, (2015).

Stark *et al.* (2022) em seu trabalho sobre a avaliação da estabilidade dinâmica da Barragem de Rejeitos de Fundão, que colapsou em novembro de 2015, apresentou uma avaliação do excesso de poropressão gerado durante uma sequência de sismos ocorridos próximos à barragem, com a indicação, também, de outros trabalhos e referências sobre correlações de razão do excesso de poropressão e suscetibilidade a ruptura e liquefação de materiais. Destacam-se os trabalhos de Tokimatsu e Yoshimi (1983), Marcuson *et al.* (1990) e Morgenstern *et al.* (2016).

Tokimatsu e Yoshimi (1983) e Marcuson *et al.* (1990) *apud* Stark *et al.* (2022) abordam as correlações entre razão de excesso de poropressão versus fator de segurança contra liquefação de um conjunto de dados de casos históricos de barragens de rejeitos areno-siltoso, semelhantes a Barragem Fundão, onde indica-se uma razão de excesso de poropressão a partir de 0,60 para o início de instabilidade

de um rejeito areno-siltoso, com fator de segurança igual a 1,0, conforme FIGURA 2.38. Importante citar que o fator de segurança deste trabalho foi calculado em função da razão de resistência cíclica (CSR) e em uma abordagem de tensões médias envolvidas nos casos analisados, o que pode ter reduzido a razão de poropressão próxima da unidade, que causa a liquefação, para valores menores (0,6), dada a condição de confinamento e rigidez em maiores profundidades.

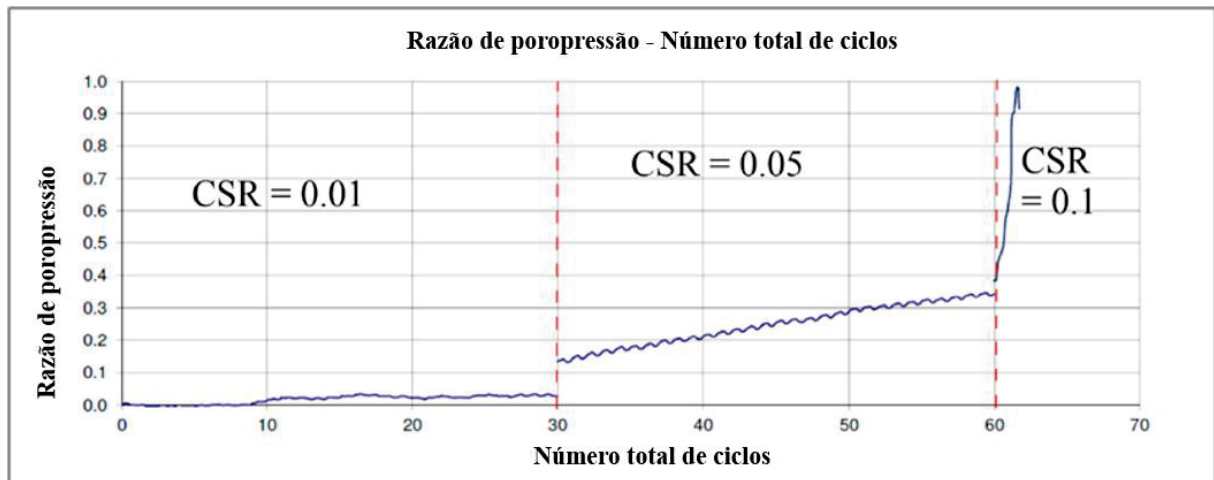
FIGURA 2.38 - RELAÇÃO ENTRE O FATOR DE SEGURANÇA CONTRA LIQUEFAÇÃO E A RAZÃO DE EXCESSO DE POROPRESSÃO RESIDUAL SÍSMICA.



FONTE: Adaptado de Tokimatsu and Toshimi (1983) *apud Stark et. al.* (2022).

Do trabalho de Morgenstern et al. (2016) *apud Stark et. al.* (2022), apresenta-se uma série de ensaios de cisalhamento direto cíclicos em laboratório de amostras de rejeitos arenosos com diferentes índices de vazios, tensões de confinamento e níveis de carregamentos cíclicos. Os ensaios tinham como objetivo avaliar o excesso de poropressão gerados em níveis baixos de carregamento cíclico, buscando representar o excesso de poropressão induzidos pela sequência de sismos ocorridos próximo da Barragem de Fundão. Observou-se no estudo uma baixa geração de excesso de poropressão para valores inferiores a 30 ciclos de carregamento, um incremento para 60 ciclos de carregamento atingindo-se uma razão de excesso de poropressão “ru” de 0,35, sendo, por fim, observada o aumento significativo de excesso de poropressão e ruptura dos materiais para ciclos superiores a 60. A FIGURA 2.39 apresenta os resultados da razão de excesso de poropressão dos ensaios cíclicos conduzidos neste estudo.

FIGURA 2.39 – RAZÃO DE EXCESSO DE POROPRESSÃO DE ENSAIOS CÍCLICOS CONDUZIDOS NO ESTUDO DO MORGENSTERN ET AL. (2016).



FONTE: Adaptado de Morgenstern *et. al* (2016) apud Stark *et. al.* (2022)

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são apresentados os materiais e os métodos empregados no desenvolvimento do presente estudo. Inicialmente são apresentados os materiais utilizados, que são referentes aos dados dos casos analisados, com informações sobre vibrações e poropressões, caracterização dos materiais envolvidos e os equipamentos de construção testados, sendo todos os casos localizados na região do quadrilátero ferrífero de Minas Gerais. Na sequência são descritas as metodologias empregadas para a análise das vibrações, poropressões, correlações entre vibrações e poropressões e análises dos potenciais de liquefação, considerando as propriedades dos rejeitos analisados, assim como as demais características que podem influenciar no comportamento dos materiais perante as solicitações dinâmicas dos equipamentos de construção.

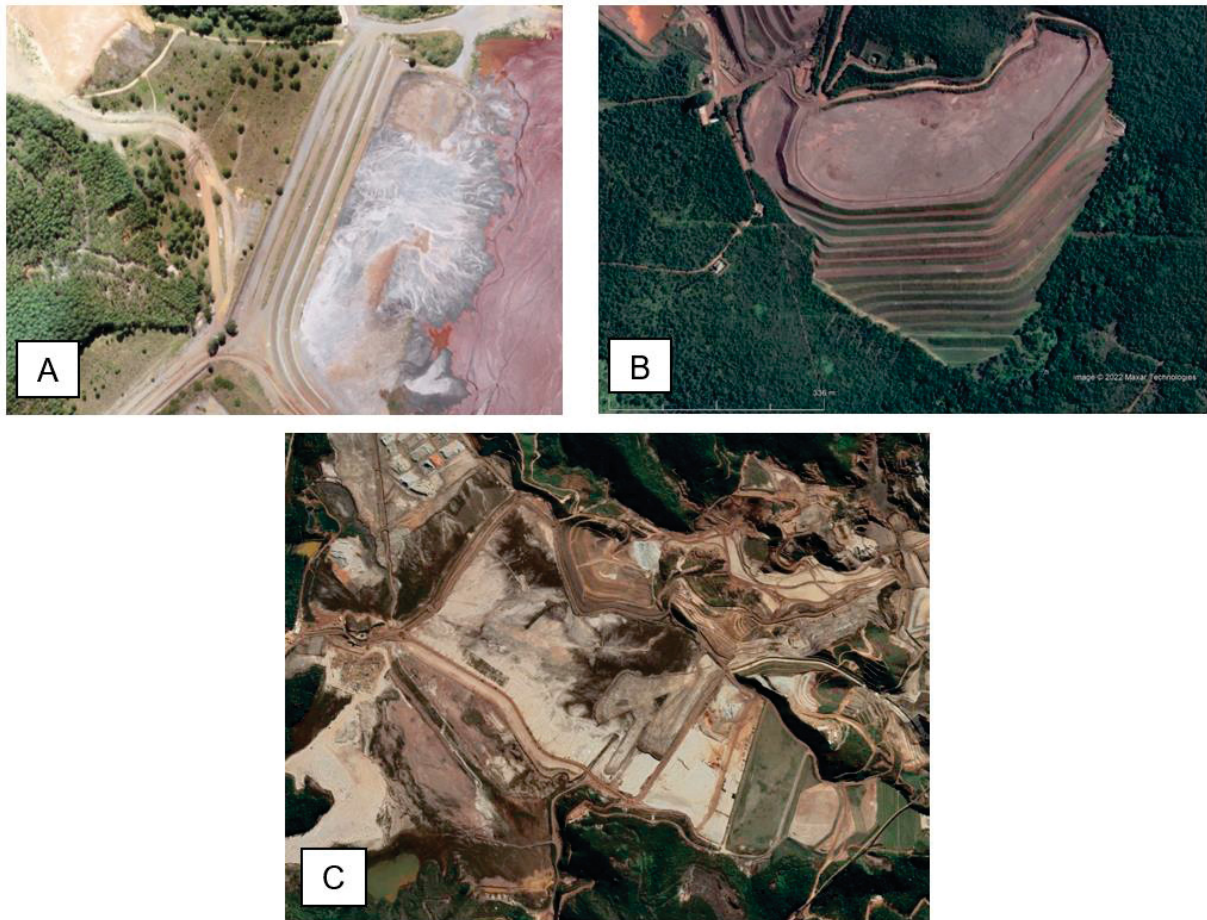
Nos itens seguintes, apresenta-se o detalhamento dos materiais e de cada etapa metodológica deste estudo.

3.1 MATERIAIS

Para a definição dos materiais e casos de estudo para o desenvolvimento do presente trabalho, buscou-se informações disponíveis de testes de campo envolvendo o tráfego de equipamentos de construção e o monitoramento de vibrações e poropressões. Essa busca se deu em empresas projetistas e mineradoras, sendo obtidos, inicialmente, três potenciais casos de estudo, todos localizados na região do quadrilátero ferrífero, pertencentes a diferentes empresas que atuam no ramo da mineração.

Os casos pré-selecionados são referentes a aterros experimentais ou testes prévios para obras de descaracterização, e também para testes realizados nas próprias estruturas que estão sendo ou serão descaracterizadas futuramente. Para não divulgar os nomes das estruturas, as mesmas são aqui nomeadas de estruturas A, B e C. Na FIGURA 3.1, abaixo, apresentam-se vistas gerais das estruturas.

FIGURA 3.1 - Estruturas pré-selecionadas A, B e C.



FONTE: Google Earth (2022).

O caso A é referente a um Dique interno a um reservatório de rejeitos de outra barragem principal, construído pelo método de alteamento a montante e fundada sobre rejeitos. E os casos ou estruturas B e C tratam-se de barragens de rejeitos construídas pelo método de alteamento a montante, e fundadas em terreno natural. Todas as estruturas estão passando por projetos ou por obras de descaracterização, seguindo as diretrizes e legislações vigentes.

Entretanto, após análises das informações disponibilizadas de cada caso, dois deles (casos A e B) não apresentaram as informações necessárias para o desenvolvimento do estudo, ou por falta de controle adequado dos testes realizados ou indisponibilidade dos dados dos testes de campo, que foram realizados em todos os casos. Ressalta-se que esses testes foram idealizados para os projetos e estudos próprios de descaracterização destas estruturas, e não são vinculados a este trabalho de pesquisa, que buscou fontes de informações de dados compatíveis com o objetivo do estudo proposto.

Com isso, considerou-se para o desenvolvimento deste trabalho o caso C, onde foram realizados testes de campo com instrumentação para obtenção de respostas com sismógrafos de engenharia e piezômetros elétricos para o tráfego de equipamentos de construção sobre rejeitos inconsolidados de mineração, com controle adequado dos testes e informações disponíveis.

Na sequência, apresentam-se as informações referentes a este caso.

3.1.1 Caso de estudo – Aterro de regularização em um reservatório de rejeitos.

O caso de estudo selecionado, que é referente a uma barragem de rejeitos alteada a montante, está em processo de descaracterização, com o projeto e testes de campo finalizados, e com as obras de descaracterização em andamento. O projeto compreende a execução de canais de drenagem superficial na região do reservatório da barragem, de modo a não ocorrer a reservação de água pela barragem e o trânsito de cheias, que é uma das premissas para a descaracterização desse tipo de estrutura.

Para a execução desses canais de drenagem, está previsto em projeto a execução de aterros de reconformação, com dois objetivos: o primeiro é para regularização da superfície e direcionamento das águas superficiais para os canais; e o segundo é referente a necessidade da implantação desses canais em aterro, e fora dos rejeitos inconsolidados reservados na barragem, devido a instabilidades das escavações e segurança das construções e operações.

Previamente a execução desse aterro para o sistema de drenagem, foi previsto um programa robusto de campo, com investigações geotécnicas, instrumentação e testes de campo com equipamentos de construção em dois aterros experimentais na região do reservatório da barragem, de modo a simular previamente as condições reais de trabalho que ocorrerão durante as obras para a descaracterização da estrutura. Estes aterros experimentais serão nomeados para este trabalho de Aterro 1 e Aterro 2.

Na FIGURA 3.2 apresenta-se uma vista geral mais atualizada da estrutura do caso de estudo, de maio de 2024, já com as obras de descaracterização em andamento, e com a indicação aproximada dos dois aterros para os testes experimentais.

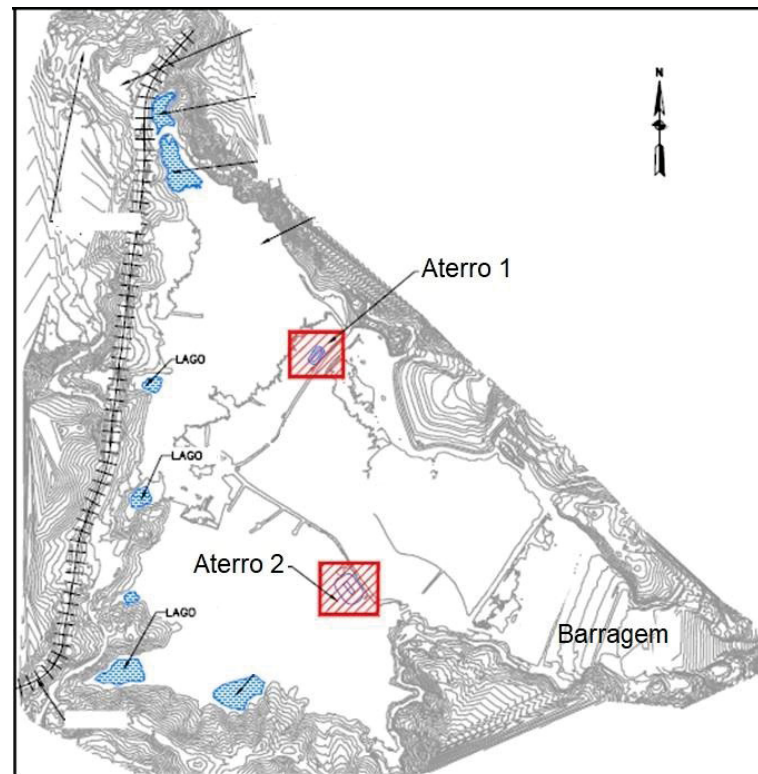
FIGURA 3.2 - VISTA SUPERIOR DA ESTRUTURA DO CASO C.



FONTE: Adaptado de Google Earth (2024).

Na FIGURA 3.3 apresenta-se a planta com a localização dos aterros experimentais, que atualmente encontram-se removidos da região com as obras de descaracterização em andamento. O Aterro 1 está localizado mais ao Norte da barragem e o Aterro 2 mais a Leste, e são próximos a acessos internos pré-existentes na região do reservatório da barragem principal.

FIGURA 3.3 - PLANTA DE LOCALIZAÇÃO DOS ATERROS EXPERIMENTAIS 1 E 2 DO CASO DE ESTUDO.



Nas figuras seguintes, FIGURA 3.4 e FIGURA 3.5, apresentam-se, respectivamente, as plantas específicas do Aterro 1 e do Aterro 2, que foram projetados especificamente para os testes de campo.

FIGURA 3.4 - PLANTA ESPECÍFICA DO ATERRO 1.

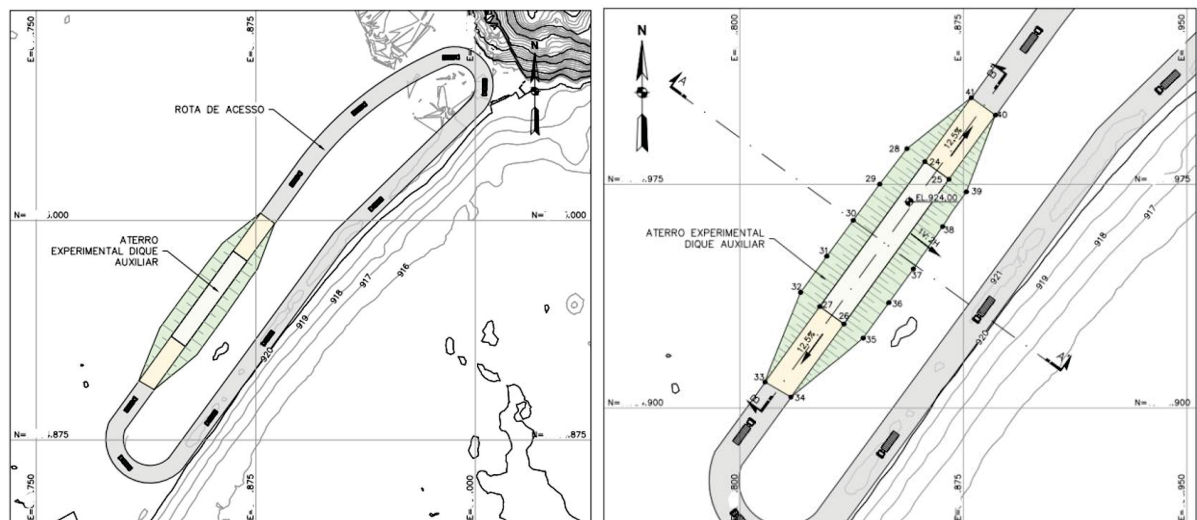
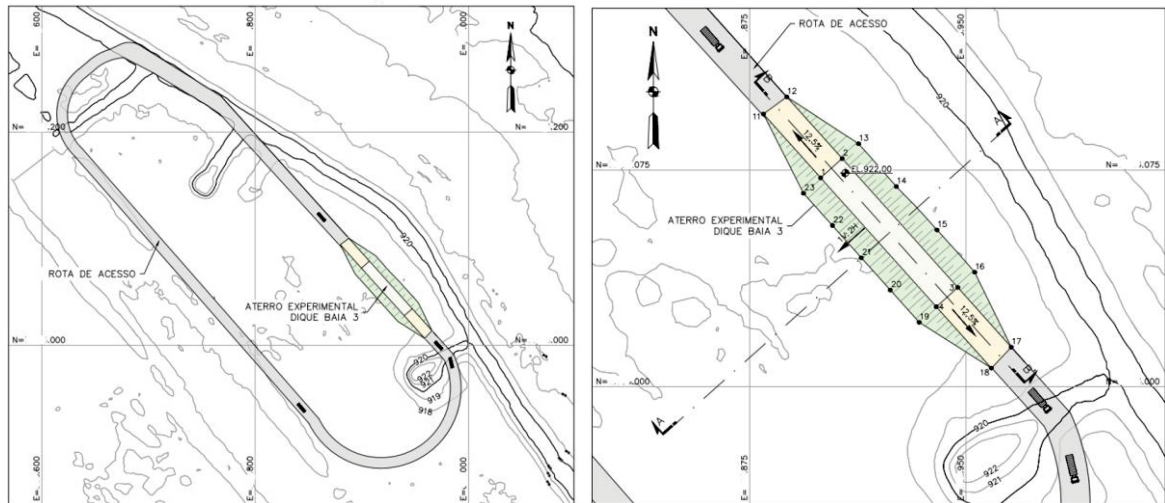


FIGURA 3.5 - PLANTA ESPECÍFICA DO ATERRO 2.



Nestes aterros, foram realizadas medições das vibrações impostas pelos equipamentos de construção, das gerações e dissipações das poropressões na fundação e, também, medidas de deformação da fundação. Nas pistas experimentais, foram efetuados os seguintes testes e ensaios:

- Ensaios de campo nas fundações;
- Ensaios de laboratório nos aterros;
- Testes de vibração proveniente de diferentes equipamentos de construção;
- Testes de frota (comboios) e combinações de equipamentos;
- Resposta dos instrumentos instalados nas áreas de teste;

Com relação ao plano de instrumentação, para o Aterro 1 foram instalados 12 Marcos Superficiais (MS), 10 Sismógrafos de Engenharia (SV), 6 Piezômetros Elétricos (PE), e 9 Placas de Recalque (PR). A planta com a distribuição dos piezômetros e sismógrafos de engenharia na área do Aterro 1 e o ensaio CPTU é apresentada na FIGURA 3.6, com as seções transversal (A-A') e longitudinal (B-B') na FIGURA 3.7.

Para o plano de instrumentação do Aterro 2, foram instaladas a mesma quantidade de instrumentos do Aterro 1, com 12 Marcos Superficiais (MS), 10 Sismógrafos de Engenharia (SV), 6 Piezômetros Elétricos (PE), e 9 Placas de Recalque (PR). A planta com a distribuição dos piezômetros e sismógrafos de

engenharia na área do Aterro 2 e o ensaio CPTU é apresentada na FIGURA 3.8, com as seções transversal (A-A') e longitudinal (B-B') na FIGURA 3.9.

FIGURA 3.6 - PLANTA DE INSTRUMENTAÇÃO E INVESTIGAÇÃO DO ATERRO 1.

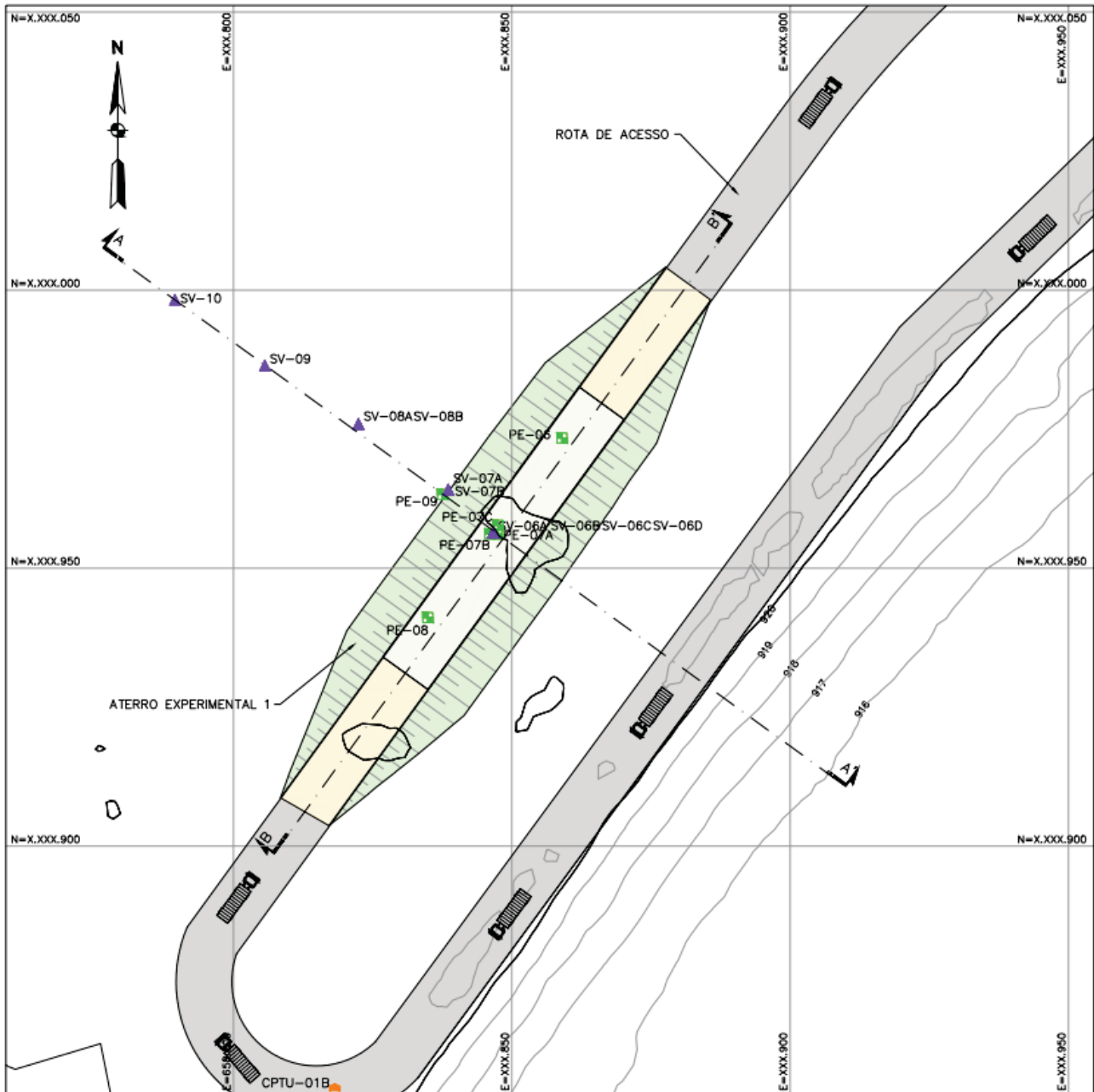


FIGURA 3.7 – SEÇÕES DE INSTRUMENTAÇÃO ATERRO 1 – SEÇÕES TRANSVERSAL E LONGITUDINAL

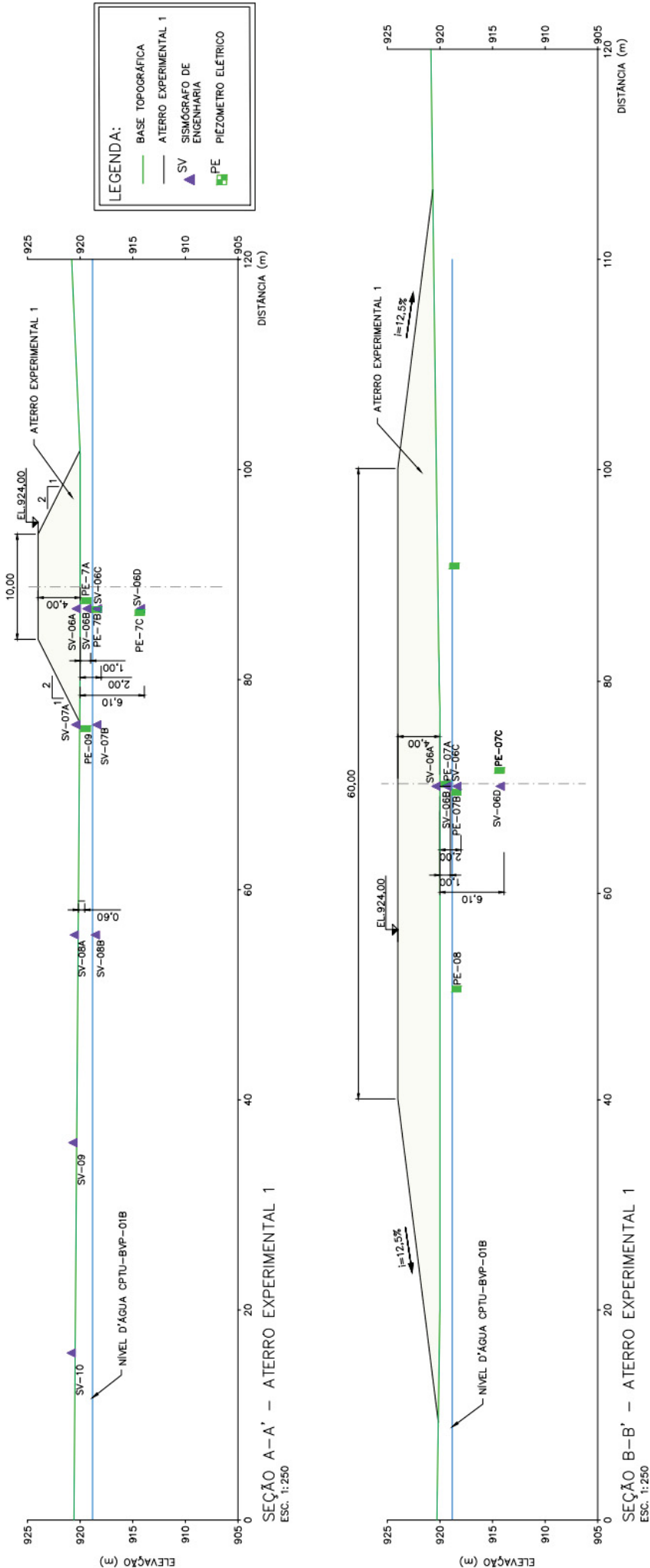


FIGURA 3.8 - PLANTA DE INSTRUMENTAÇÃO E INVESTIGAÇÃO DO ATERRO 2.

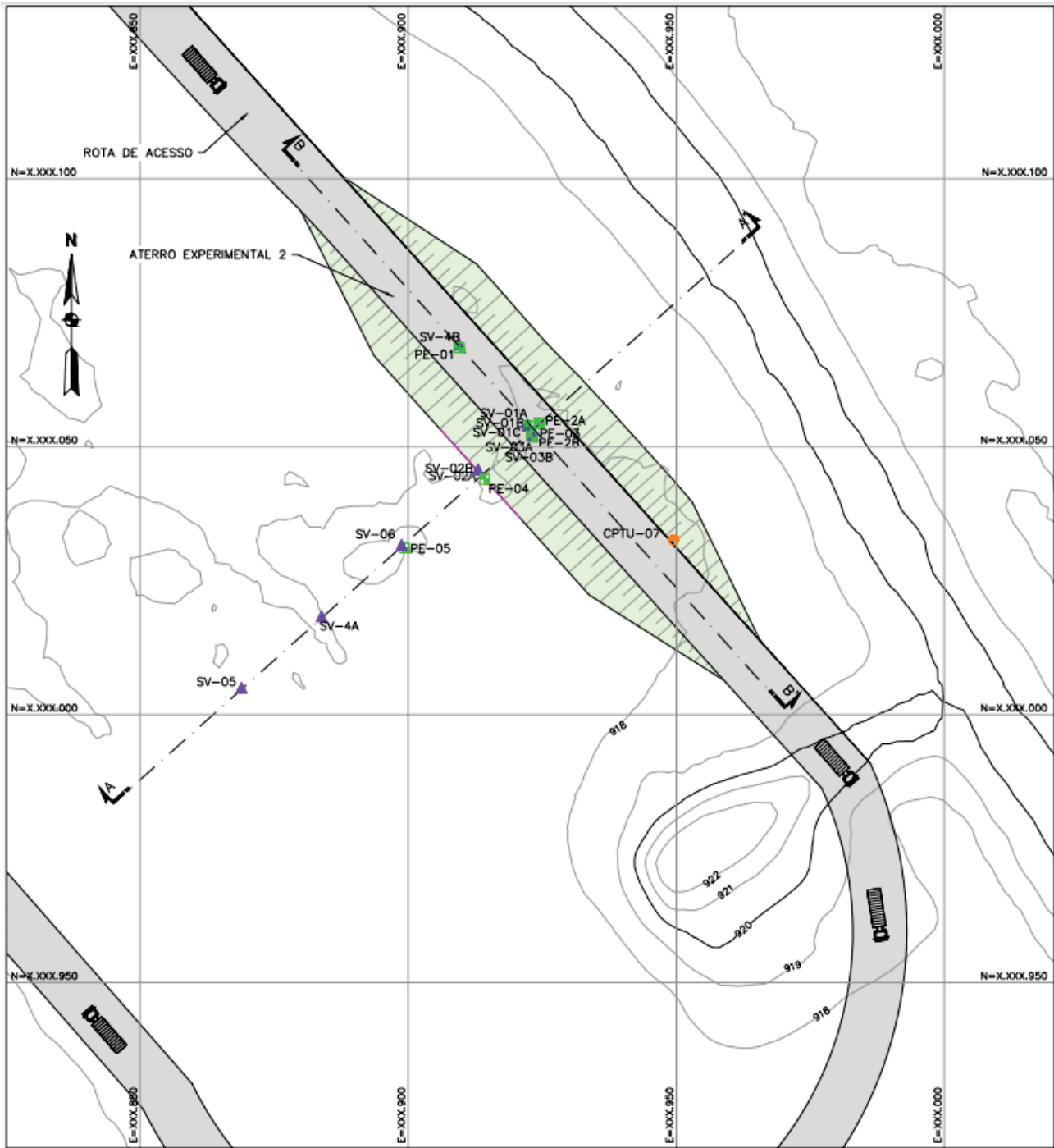
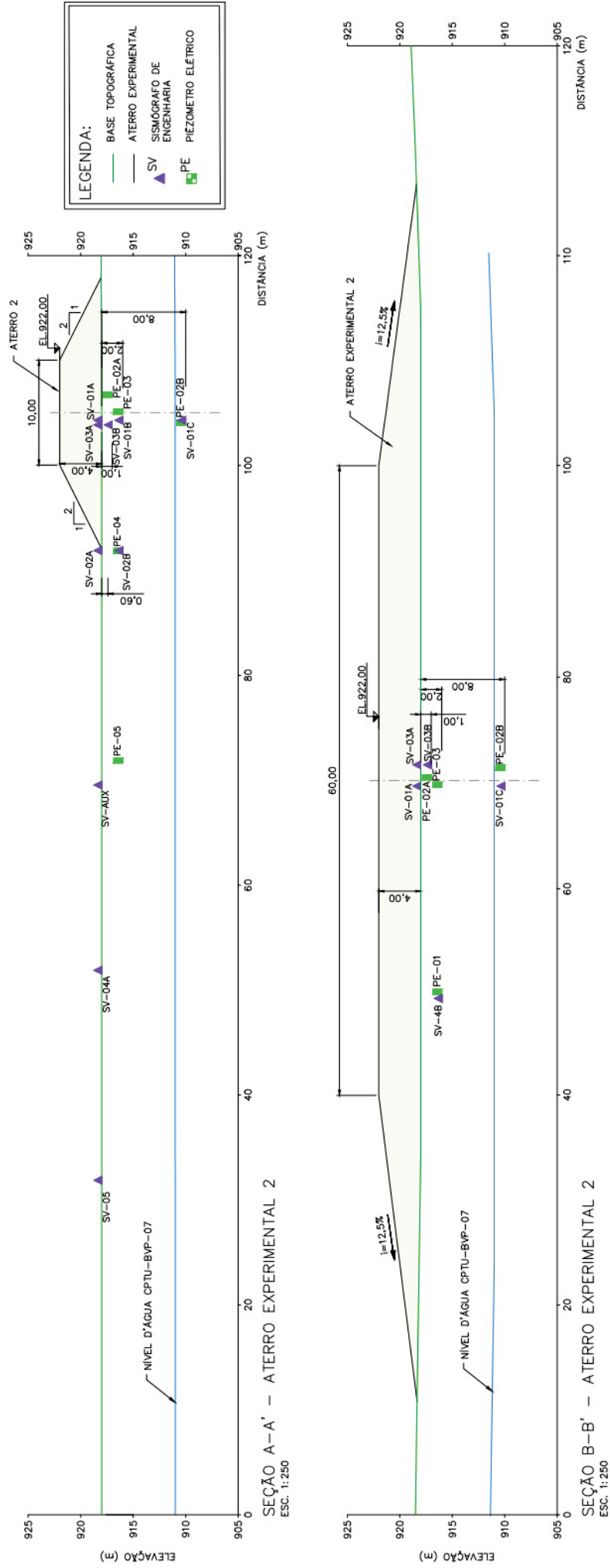


FIGURA 3.9 - SEÇÕES DE INSTRUMENTAÇÃO DO ATERRO EXPERIMENTAL 2.



3.1.1.1 Investigações de campo

Com relação as investigações de campo para caracterização dos materiais e das propriedades específicas, a região do reservatório da barragem contempla uma grande quantidade de ensaios CPTUs e ensaios Vane Test, onde, para este estudo, foram selecionadas as investigações próximas dos aterros experimentais, que são restritos a ensaios CPTU's.

Para o Aterro 1, considerou-se o ensaio CPTU-01B, localizado próximo ao final da pista do aterro experimental, e distante 103,7m do centro do ponto central do aterro. Os resultados diretos do ensaio, com resistência de ponta, atrito lateral e poropressão são apresentados na FIGURA 3.10. Os resultados já com interpretações, dados normalizados, parâmetro de estado, índice de comportamento e classificação são apresentados na FIGURA 3.12.

E para o Aterro 2, considerou-se o ensaio CPTU-07, localizado próximo ao centro da pista do aterro experimental, distante 33,3m do centro. Os resultados diretos do ensaio, com resistência de ponta, atrito lateral e poropressão são apresentados na FIGURA 3.11. Da mesma forma, os resultados com interpretações, dados normalizados, parâmetro de estado, índice de comportamento e classificação são apresentados na FIGURA 3.13.

Para o Aterro 1, verifica-se a proximidade do N.A. com a superfície, com 1m de profundidade, a presença de fina camada de aterro pré-existente na superfície, com 1m de espessura, e apoiado sobre os rejeitos lamosos e inconsolidados (contráteis) do reservatório da barragem.

E para o Aterro 2, verifica-se maior distanciamento do N.A. com a superfície, com 7m de profundidade, a presença de camada mais espessa de aterro pré-existente na superfície, com aproximadamente 2m de espessura, e sobre os rejeitos lamosos e inconsolidados (contráteis) do reservatório da barragem, porém não saturados até a profundidade do nível de água.

FIGURA 3.10 – RESULTADOS DIRETOS DO ENSAIO CPTU-1B – ATERRO 1.

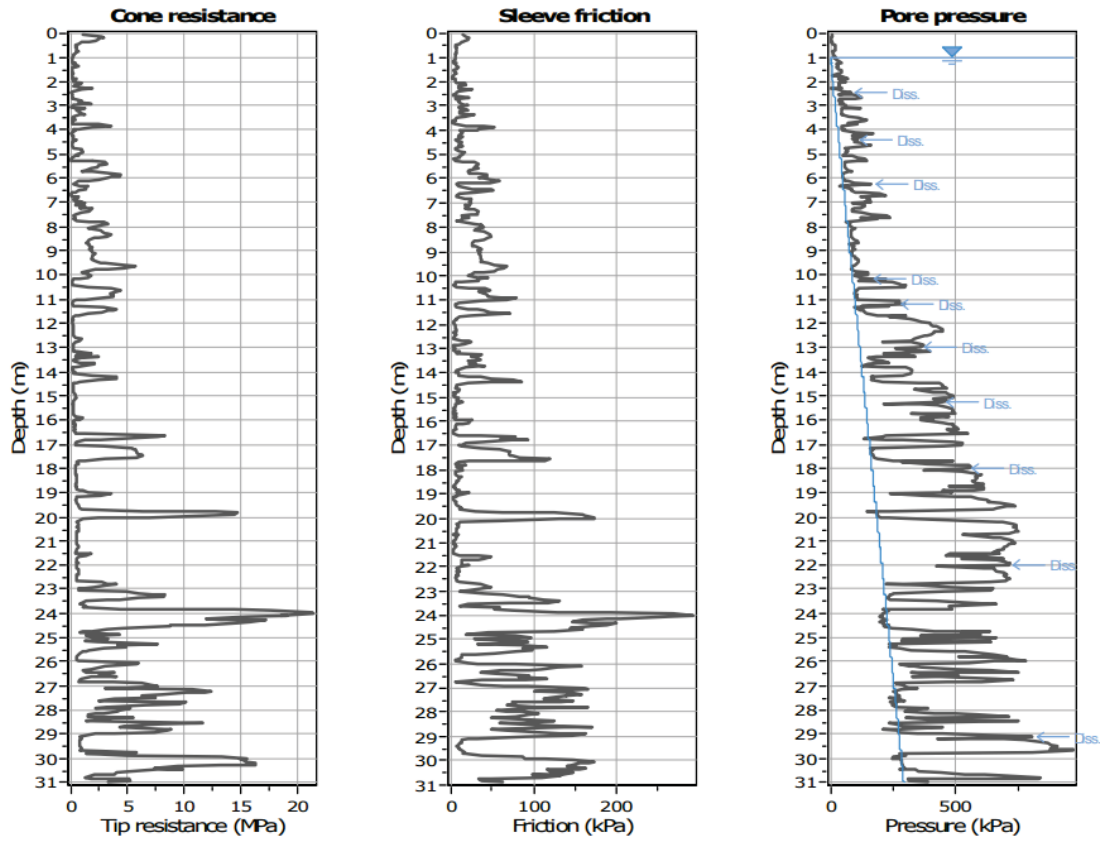


FIGURA 3.11 - RESULTADOS DIRETOS DO ENSAIO CPTU-07 – ATERRO 2.

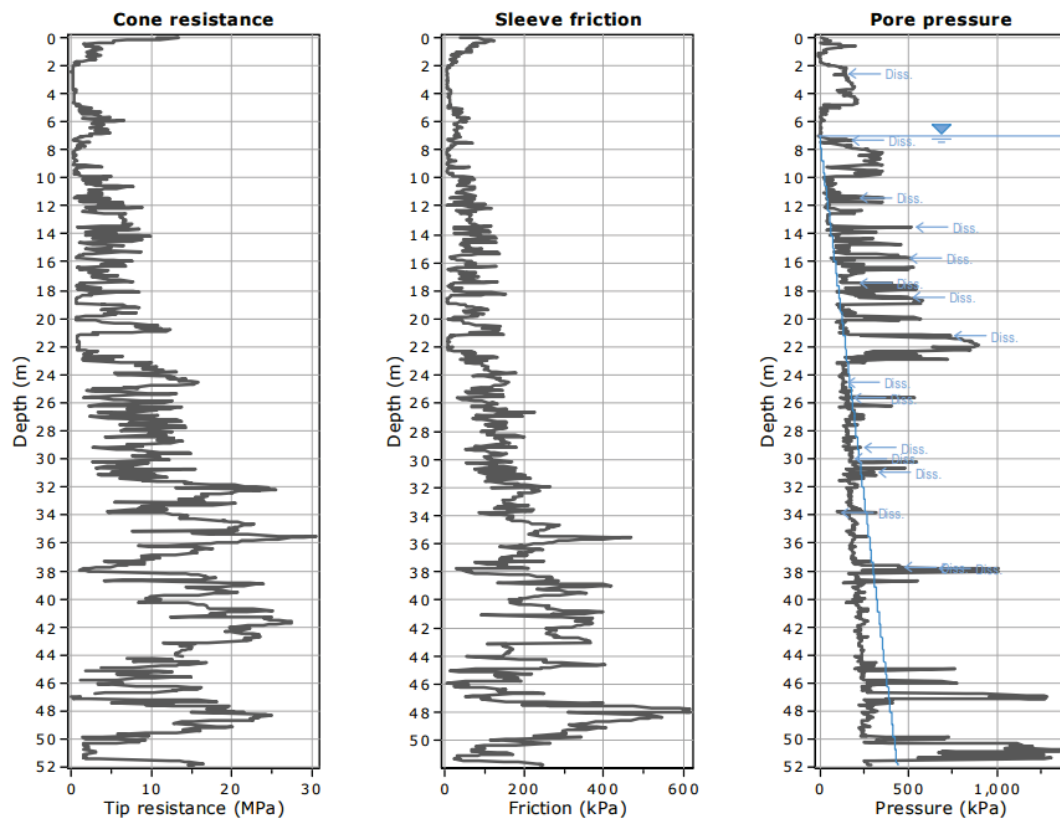


FIGURA 3.12 – RESULTADOS INTERPRETADOS DO CPTU-01B DO ATERRO 1 E ESTRATIGRAFIA DA FUNDAÇÃO.

ESTRATIGRAFIA ÁREA ATERRO 1

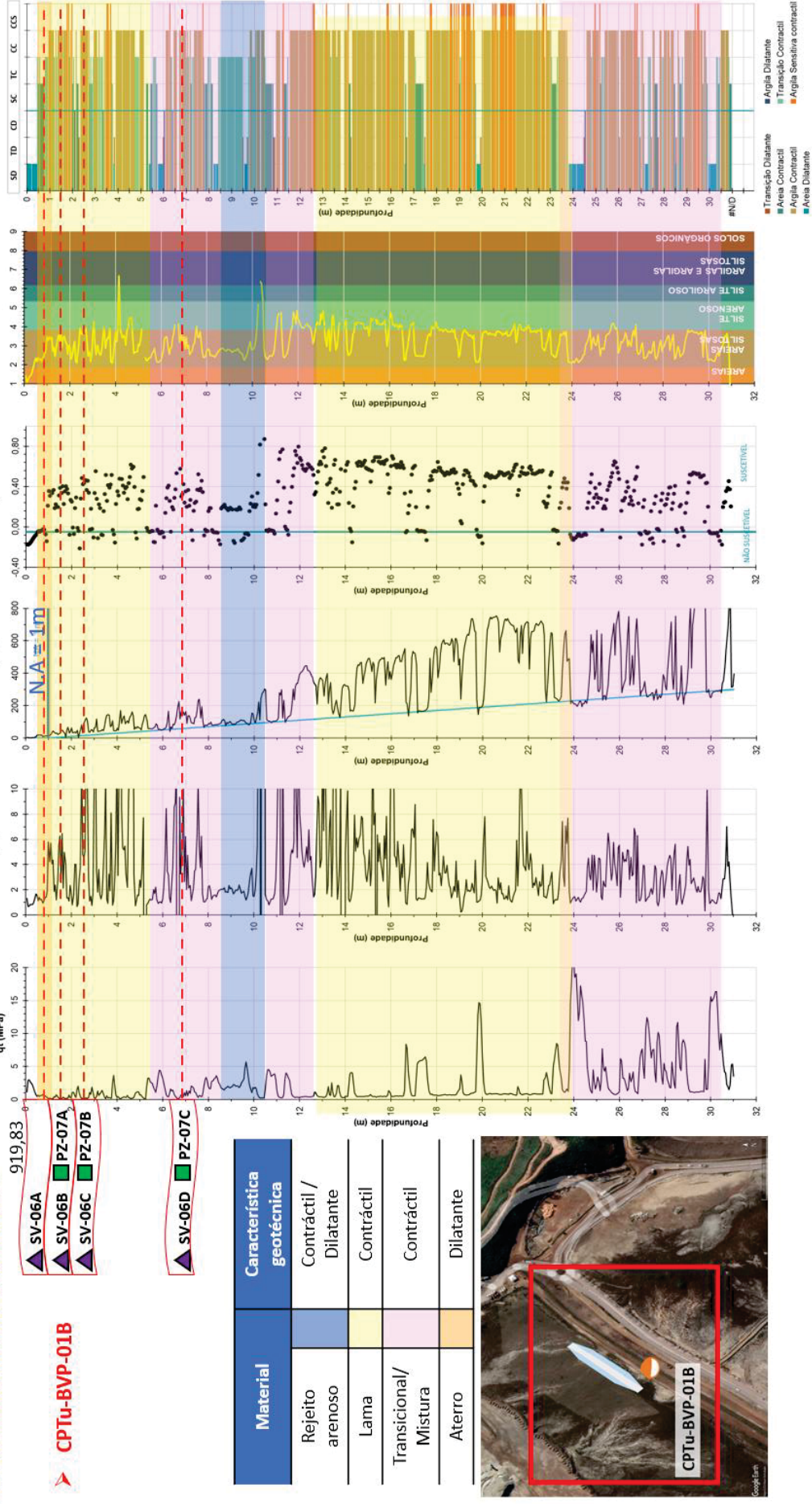
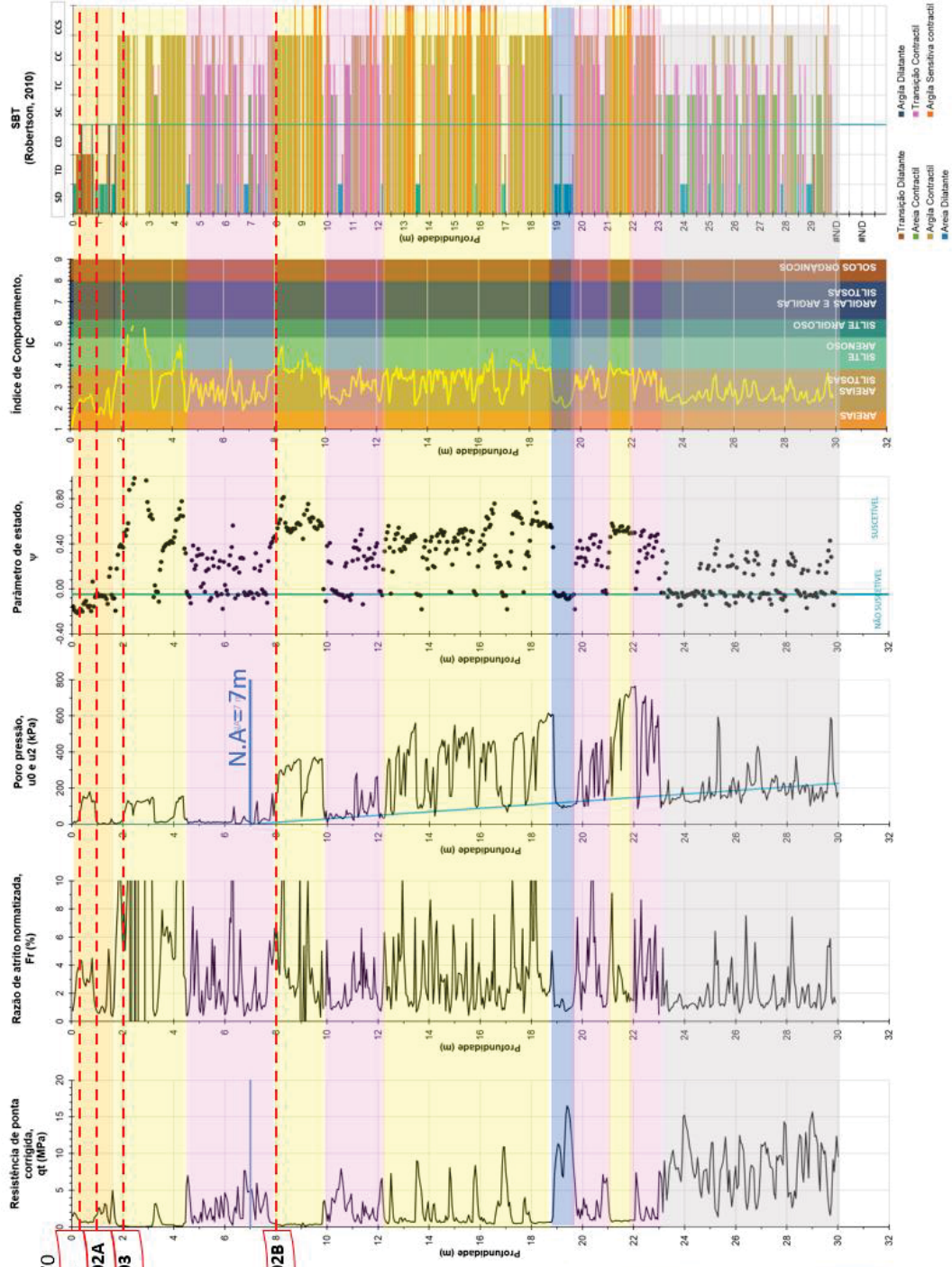


FIGURA 3.13 - RESULTADOS INTERPRETADOS DO CPTU-07 DO ATERRO 1 E ESTRATIGRAFIA DA FUNDAÇÃO.

ESTRATIGRAFIA ÁREA ATERRO 2

CPTu-BVP-07



Material	Característica geotécnica
Rejeito arenoso	Contrátil / Dilatante
Lama	Contrátil
Transicional/ Mistura	Contrátil
Aterro	Dilatante



3.1.1.2 Alturas de aterro dos testes

Os testes de campo foram realizados com variação da altura dos aterros experimentais, até atingir o máximo de 4m de altura para os dois aterros.

Para o Aterro 1, os testes iniciaram com altura de 1m, passando para 2m e 3m, até atingir a altura final de 4m. Foi necessário iniciar com 1m de altura de aterro devido a característica inconsolidada da fundação, com impossibilidade de transitar equipamentos sem o lançamento prévio de um lastro de conquista com 1m de espessura.

Para o Aterro 2, que apresentava camada superficial com aterro pré-existente mais espessa e maior distanciamento do N.A. da fundação, foi possível iniciar os testes sem o lançamento prévio de lastros de conquista. Com isso, foram realizados testes com: 0m, 0,3m, 1m, 2m e 4m de altura de aterro.

3.1.2 Instrumentação utilizada

Neste item apresentam-se as características dos piezômetros elétricos e sismógrafos de engenharia utilizados no estudo. Os demais instrumentos, marcos superficiais e placas de recalque, não foram utilizados por não estarem vinculados ao objetivo do trabalho, mas podem fazer parte de pesquisas futuras. O catálogo técnico dos instrumentos consta no Anexo 3.

3.1.2.1 Piezômetros elétricos

Os piezômetros elétricos utilizados nos testes de campo (FIGURA 3.14) apresentam as seguintes características:

- Tipo: Piezômetro elétrico de alta precisão;
- Acurácia: $\pm 0,1\%$;
- Diâmetro da sonda: 10 mm;
- Escala: 2 a 100 m.c.a;
 - Testes de campo com escalas de 7, 10-15, 20 e 25 m.c.a. – ou de 70 a 250 kPa;
 - Acurácia de 0,07 a 0,25 kPa.

- Interface de comunicação: LoranWan (Long Range Wide Area Network - comunicação de longa distância com baixo consumo de energia);
- Range de temperatura: -10 a 60 °C.
- Fabricante/Marca: Solver Tecnologias.

FIGURA 3.14 – PIEZÔMETRO ELÉTRICO UTILIZADO NOS TESTES DE CAMPO;



FONTE: SOLVER Tecnologias (2021).

3.1.2.2 Sismógrafos de Engenharia

Para os sismógrafos de engenharia utilizados dos testes de campo, foram utilizados sensores multifuncionais e autônomos, que realizam leituras de rotação, vibração, tiltmetria e temperatura, sendo considerados os dados de vibração (aceleração, velocidade e frequência de vibração de partícula). Estes instrumentos apresentam as seguintes características:

- Tipo: Sensor multifuncional e autônomo.
- Range de frequência: 1,5 a 4500 Hz;
- Velocidade de partículas: 0,30 a 30 mm/s;
- Frequência de pico: 1,5 a 2,0 kHz;
- Temperatura: -5 a 80 °C;
- Interface de comunicação: LoranWan (Long Range Wide Area Network - comunicação de longa distância com baixo consumo de energia);
- Fabricante/Marca: Solver Tecnologias.

FIGURA 3.15 – SENSOR MULTIFUNCIONAL / SISMÓGRAFO DE ENGENHARIA UTILIZADO NOS TESTES DE CAMPO.



FONTE: SOLVER Tecnologias (2021).

3.1.3 Equipamentos de construção

Neste item são apresentadas as características dos equipamentos de construção testados nos aterros experimentais. Essas informações foram obtidas com o catálogo técnico dos fabricantes e também com aferições de campo (no caso do peso do caminhão basculante). Os catálogos completos dos equipamentos constam no Anexo 1.

3.1.3.1 Caminhão Basculante

Os caminhões basculantes utilizados foram do tipo Mercedes-Axor 3131. Foram testados os caminhões vazios e carregados, com pesos aferidos em campo de 16,0 t vazio e 43,5 t carregado. Na FIGURA 3.16 apresenta-se um trecho do catálogo e uma foto do equipamento durante os testes de campo.

Os caminhões transitaram sobre os aterros experimentais separadamente e em comboios (frota). Foram realizados os seguintes tipos de testes e combinações:

- Um caminhão carregado transitando separadamente;
- Um caminhão vazio transitando separadamente
- Dois caminhões vazios transitando em mão dupla – sentido contrário.
- Quatro caminhões vazios transitando em sentido único e separados por distâncias constantes entre eles de 50m, 100m, 150, 200m e 300m.

FIGURA 3.16 – CAMINHÃO BASCULANTE – CATÁLOGO E FOTO DO EQUIPAMENTO DURANTE OS TESTES.



3.1.3.2 Escavadeira

A escavadeira utilizada foi do tipo Caterpillar CAT-336, com peso operacional médio obtido do catálogo de 37,25 t. Na FIGURA 3.17 apresenta-se um trecho do catálogo e uma foto do equipamento durante os testes de campo.

A escavadeira realizou os seguintes tipos de testes :

- Somente transitando, sem realizar atividades;
- Transitando e realizando atividades de escavação.

FIGURA 3.17 – ESCAVADEIRA – CATÁLOGO E FOTO DO EQUIPAMENTO DURANTE OS TESTES.



3.1.3.3 Patrol - Motoniveladora

A Patrol - Motoniveladora utilizada foi do tipo Caterpillar 140K, com peso operacional médio obtido do catálogo de 14,75 t. Na FIGURA 3.18 apresenta-se um trecho do catálogo e uma foto do equipamento durante os testes de campo.

A motoniveladora realizou o seguinte tipo de teste:

- Transitando e realizando atividades de escarificação.

FIGURA 3.18 – PATROL - MOTONIVELADORA – CATÁLOGO E FOTO DO EQUIPAMENTO DURANTE OS TESTES.



Motoniveladoras
140K

CONSULTAR PREÇO

ENCONTRAR REVENDEDOR

ESPECIFICAÇÕES GERAIS
Motor: Caterpillar 3406E, 12.8L, 128 kW
Velocidade Máxima: 3,7 m/h
Modelo do Motor: CAT C7

Pesos

Peso Bruto do Veículo - Com Equipamento Típico - Eixo Traseiro	12335 kg
Peso Bruto do Veículo - Com Equipamento Típico - Eixo Frontal	4936 kg
Peso Bruto do Veículo - Base - Total	14750 kg
Peso Bruto do Veículo - Base - Eixo Traseiro	10491 kg
Peso Bruto do Veículo - Base - Eixo Frontal	4259 kg
Peso Bruto do Veículo - Com Equipamento Típico - Total	17271 kg
Peso Bruto do Veículo - Com Equipamento Típico	17271 kg



22 de set de 2022 13:54:45
23K 658864 7764961
Estrada sem nome
Aterro Experimental Aux

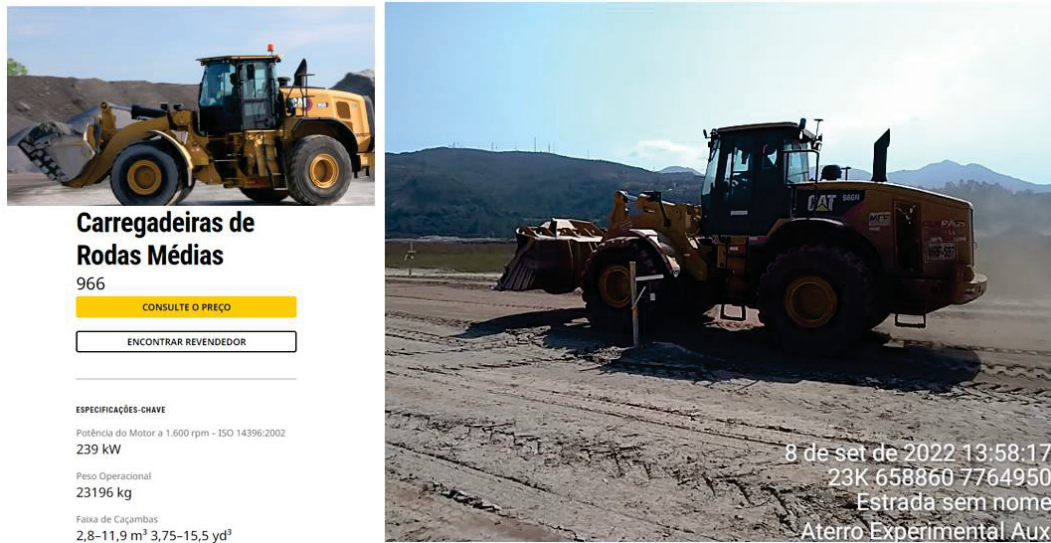
3.1.3.4 Carregadeira

A Carregadeira utilizada foi do tipo Caterpillar CAT-336, com peso operacional médio obtido do catálogo de 37,2 t. Na FIGURA 3.19 apresenta-se um trecho do catálogo e uma foto do equipamento durante os testes de campo.

A carregadeira realizou o seguinte tipo de teste:

- Somente transitando, sem realizar atividades adicionais.

FIGURA 3.19 - CARREGADEIRA – CATÁLOGO E FOTO DO EQUIPAMENTO DURANTE OS TESTES.



3.1.3.5 Rolo Liso A/V e S/V

O Rolo Liso utilizado foi do tipo Dynapac CA250D, com peso operacional médio obtido do catálogo de 11,2 t. Na FIGURA 3.20 apresenta-se um trecho do catálogo e uma foto do equipamento durante os testes de campo.

O Rolo Liso realizou os seguintes tipos de teste:

- Transitando e com alta vibração do rolo compactador – Rolo Liso A/V;
- Transitando e sem vibração do rolo compactador – Rolo Liso S/V;

FIGURA 3.20 – ROLO LISO – CATÁLOGO E FOTO DO EQUIPAMENTO DURANTE OS TESTES.



3.1.3.6 Trator de esteiras

O Trator de Esteiras utilizado foi do tipo Komatsu D61, com peso operacional médio obtido do catálogo de 19,8 t. Na FIGURA 3.21 apresenta-se um trecho do catálogo e uma foto do equipamento durante os testes de campo.

O trator de esteiras realizou o seguinte tipo de teste:

- Somente transitando, sem segunda marcha e sem realizar atividades.

FIGURA 3.21 – TRATOR DE ESTEIRAS – CATÁLOGO E FOTO DO EQUIPAMENTO DURANTE OS TESTES.



3.1.3.7 Combinação de Rolo Liso A/V com Trator de esteiras

Foram realizados testes adicionais com os equipamentos Rolo Liso com Alta Vibração (A/V) transitando juntamente com o Trator de Esteiras. Os equipamentos transitaram em linha/comboio e lado a lado, com os seguintes tipos de teste:

- Lado a lado e no mesmo sentido de tráfego;
- Em linha/comboio, em testes com separação por tempo, com intervalos de 60s, 120s, 240s e 300s.

Na FIGURA 3.22 apresentam-se dois exemplos dos testes em combinação, com os equipamentos lado a lado e em linha/comboio.

FIGURA 3.22 – ROLO LISO A/V + TRATOR DE ESTEIRAS – EXEMPLOS DE TESTES EM COMBINAÇÃO.



3.1.4 Testes de campo

Todos os testes foram iniciados em março de 2022, e se desenvolveram até a outubro de 2022, com controle, quantidade e tipos de dados disponibilizados para as análises propostas neste estudo.

No QUADRO 3.1, abaixo, apresenta-se um resumo dos testes realizados, com os tipos de equipamentos, peso dos equipamentos, tipos de testes, combinações, atividades e alturas de aterro.

QUADRO 3.1 – RESUMOS DOS TESTES REALIZADOS

Resumo dos Testes de Campo					
Equipamento	Peso (kN)	Teste isolado ou comboio?	Atividade realizada	Alturas do Aterro 1	Alturas do Aterro 2
Caminhão Carregado	435	Isolado	Trânsito	1, 2, 3 e 4m	0, 0,3, 1, 2 e 4m
Caminhão Vazio	160	Em comboios espaçados por distâncias (50, 100, 150, 200 e 300m) e em mão dupla.	Trânsito		
Carregadeira	232	Isolado	Trânsito		
Escavadeira	372,5	Isolado	Trânsito e escavação		
Patrol	147,5	Isolado	Trânsito e escarificação		

Resumo dos Testes de Campo					
Equipamento	Peso (kN)	Teste isolado ou comboio?	Atividade realizada	Alturas do Aterro 1	Alturas do Aterro 2
Rolo Liso A/V	112	Isolado	Trânsito		
Rolo Liso S/V	112	Isolado	Trânsito		
Trator de Esteiras	198	Isolado	Trânsito		
Rolo Liso A/V + Trator de Esteiras	310	Em comboios espaçados por tempo (60, 120, 240 e 300 s)	Trânsito		

A quantidade de testes e dados de sismógrafos e piezômetros analisados neste trabalho, considerando os dados dos dois aterros experimentais e todos os testes de todos os equipamentos, foi a seguinte:

- Foram realizados 77 testes no Aterro 1 e 85 no Aterro 2, totalizando 162 testes de campo.
- Para os piezômetros, com leituras registradas a cada 1 segundo, foram analisados:
 - 332.640 dados/leituras no Aterro 1.
 - 357.120 dados/leituras no Aterro 2.
 - Totalizando 684.760 dados/leituras piezométricas analisadas.
- Para os sismógrafos de engenharia, com leituras registradas a cada 0,1 segundo, foram analisados:
 - 3.132.020 dados/leituras no Aterro 1.
 - 3.007.950 dados/leituras no Aterro 2.
 - Totalizando 6.139.970 dados/leituras de sismógrafos analisados.
- Somando-se os dados dos piezômetros e sismógrafos, foram analisados:
 - 3.464.660 dados/leituras do Aterro 1;
 - 3.365.070 dados/leituras do Aterro 2;
 - **Com total final de 6.829.790 dados/leituras analisadas.**

Além dos dados das investigações de campo e as propriedades dos materiais.

No item seguinte apresenta-se a metodologia aplicada para o desenvolvimento do estudo, buscando-se o cumprimento do objetivo proposto.

3.2 MÉTODOS

Neste item são apresentados os métodos empregados para obtenção dos resultados esperados, de acordo com o objetivo do trabalho. Inicialmente, apresenta-se um resumo dos passos metodológicos, para o posterior detalhamento em subitens específicos.

Inicia-se o desenvolvimento do estudo com a especificação dos instrumentos de campo utilizados, piezômetros elétricos e sismógrafos de engenharia, e com a caracterização dos equipamentos de construção testados, como o tipo, dimensões, peso operacional e atividades realizadas nos testes (já apresentados nos itens 3.1.2 e 3.1.3).

Prossegue-se com a caracterização dos materiais e obtenção das propriedades que podem influenciar no comportamento de geração de excesso de poropressão induzidas por vibrações. Essas propriedades foram obtidas diretamente dos ensaios de campo CPTU's convencionais e com ensaios sísmicos (S-CPTU's) das fundações, ou por meio de correlações aplicáveis aos tipos de materiais analisados. Foram obtidas informações como: classificação dos materiais, estado de tensões, condição de saturação (saturado ou não saturado), estado (contrátil – dilatante), resultados diretos do ensaio de cone (resistência de ponta, atrito lateral, etc.), peso específico natural, densidade relativa, módulo de deformabilidade, velocidade de propagação de ondas cisalhantes (ondas S, obtidas dos ensaios S-CPTUs), permeabilidade, entre outras. Estas informações dos materiais são definidas para os materiais envolvidos de forma geral (média das camadas), e para as regiões específicas onde se localizam os instrumentos de auscultação (na profundidade de instalação dos instrumentos).

Posteriormente, os dados da instrumentação com piezômetros (poropressões) e sismógrafos de engenharia (velocidade de vibração de partícula) são analisados separadamente, obtendo-se as conclusões iniciais dos efeitos gerados pelos equipamentos de construção em cada aterro experimental.

Na sequência, são analisadas as correlações entre as vibrações e poropressões, com os instrumentos analisados sempre em pares, com os piezômetros

e sismógrafos de engenharia localizados lado a lado, com todos os equipamentos de construção e separadamente para cada equipamento. Estas análises de correlações são realizadas por meio de formulações e métodos estatísticos, como modelos de correlação entre variáveis, matrizes de correlações, regressões únicas e múltiplas, com fundamentação e interpretação no contexto geotécnico dos materiais, na tentativa de identificar padrões de geração de excessos de poropressão associados às vibrações dos equipamentos, para cada tipo e características dos materiais, dos equipamentos, para cada aterro experimental e em todas as alturas avaliadas. São propostos modelos e equações que representem cada situação ou conjunto de situações, com a obtenção do padrão de comportamento esperado para o fenômeno avaliado, com o menor erro ou maior convergência possível.

Por fim, e de posse dos resultados de campo e análises, pode-se comparar os dados de campo com condições limites disponíveis na literatura, como a razão de poropressão (PPR) ou deformação cisalhante (γ), para análise do possível início/gatilho do fenômeno da liquefação, ou do potencial de liquefação associado ao tipo de atividade - tráfego de equipamentos de construção em obras em rejeitos inconsolidados de mineração.

3.2.1 Propriedades dos materiais

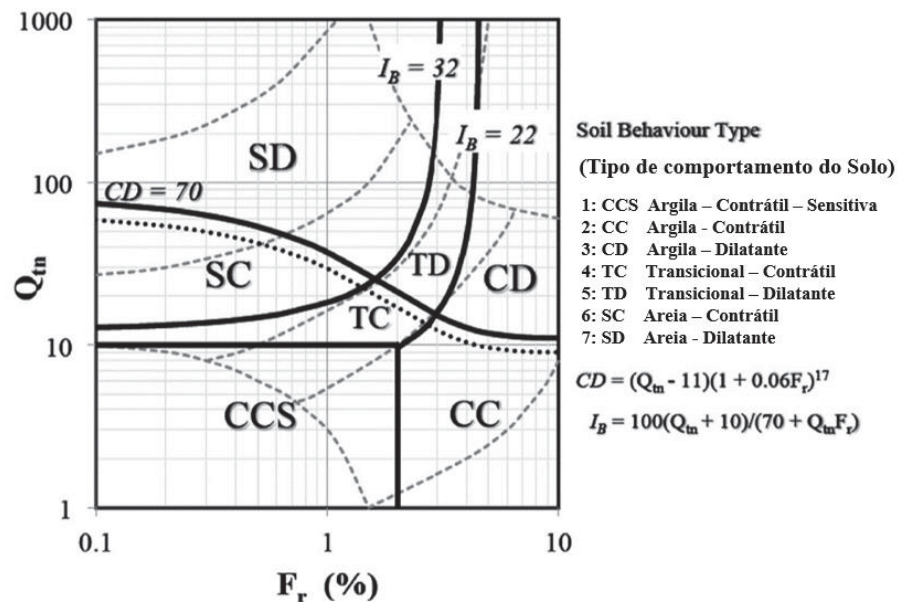
Para obtenção das propriedades dos materiais analisados, foram empregados métodos disponíveis na literatura técnica de mecânica dos solos, de acordo com os ensaios realizados e disponibilizados, que são CPTU's com ensaios sísmicos (S-CPTU's) para os rejeitos de fundação, e ensaios de laboratório para os aterros das pistas experimentais.

3.2.1.1 Caracterização dos materiais

A caracterização e classificação dos solos e rejeitos de fundação foi realizada com a metodologia proposta por Robertson (2016), que é a classificação SBT (*Soil Behaviour Type* – Tipo de comportamento do solo), apresentada no item 2.2.2. A classificação é obtida a partir dos resultados dos ensaios CPTU's, com a resistência de ponta normalizada (Q_{tn}) e a razão de atrito normalizada (F_r), com a classificação dos materiais de acordo com seus tipos: argilosos (C), arenosos (S) e transicionais

(T), de acordo com seus comportamentos perante carregamentos: contráteis (C) ou dilatantes (D), e, também, sensitivos (S) para o caso das argilas. A junção das letras dos tipos e comportamentos dos materiais é o resultado da classificação SBT. O ábaco do sistema é apresentado na FIGURA 3.23, com as equações da resistência de ponta e razão de atrito normalizadas apresentadas na sequência.

FIGURA 3.23 - ÁBACO DE CLASSIFICAÇÃO DO SISTEMA SBT - *SOIL BEHAVIOUR TYPE* (TIPO DE COMPORTAMENTO DO SOLO).



FONTE: Adaptado de ROBERTSON (2016).

Com:

$$Q_t = (q_t - \sigma_{v0})/\sigma'_{v0}$$

$$F_r = [f_s/(q_t - \sigma_{v0})] \cdot 100\%$$

$$q_t = q_c + u_2 \cdot (1 - a)$$

Onde:

Q_{tn} : resistência de ponta normalizada pela tensão efetiva.

F_r : razão de atrito normalizada pela tensão efetiva.

q_t : resistência de ponta do cone corrigida pelos efeitos poropressão;

q_c : resistência de ponta do ensaio de cone;

f_s : atrito lateral do ensaio de cone;

u_2 : poropressão devido a penetração do cone (imediatamente atrás da ponta do cone);

a : razão de área do cone (geralmente próximo de 0,8).

σ_{v0} e σ'_{v0} : tensões totais e efetivas *in situ*.

Para os materiais da pista experimental (aterro), foram realizados ensaios de laboratório de caracterização, compactação, umidade natural, peso específico real dos grãos, granulometria, limites de consistência e permeabilidade a carga variável.

3.2.1.2 Propriedades específicas dos materiais

As demais propriedades dos materiais, as específicas, são apresentadas abaixo, juntamente com as suas formas de obtenção.

- Tipo de Material/Rejeito: Se arenoso, lamoso (fino) ou transicional, ou ainda o aterro pré-existente, com os resultados dos ensaios CPTU's e classificação SBT.
- Condição de saturação: posição relativa com o nível de água identificado no ensaio de campo e com os registros de poropressão do ensaio CPTU e dos piezômetros elétricos.
- Resultados diretos do ensaio CPTU: resistência de ponta (q_c), atrito lateral (f_s), excesso de poropressão na cravação do cone (u_2) e razão de atrito (R_f), obtidos do ensaio CPTU.
- Estado de tensões: tensões totais (σ), poropressões (u_0) e tensões efetivas (σ'_0), determinadas como iniciais (antes da realização dos testes com equipamentos), com os pesos específicos dos materiais, obtidos com ensaios com cilindro biselado, e poropressões medidas nos ensaios CPTUs e piezômetros elétricos antes dos acréscimos gerados pelos equipamentos e testes.
- Densidade relativa (D_r): obtida por meio de correlação com a resistência de ponta normalizada pela tensão efetiva (Q_{tn}) do ensaio CPTU, conforme equação abaixo, proposta por Kulhawy and Mayne (1990) apud Robertson e Cabal (2015).

$$Dr^2 = Q_{tn}/300$$

- Módulo de deformabilidade (E): obtida por meio de correlação com a resistência de ponta do cone corrigida pelos efeitos poropressão (q_t), a tensão total inicial (σ_{v0}) e o índice do tipo de comportamento (I_c), todos obtidos com os resultados do ensaio CPTU, conforme equações abaixo, propostas por Robertson e Cabal (2015).

$$E = \alpha_E \cdot (q_t - \sigma_{v0})$$

$$\alpha_E = 0,015 \cdot [10^{(0,55 \cdot I_c + 1,68)}]$$

- Velocidade de propagação de ondas cisalhantes (Ondas S – sigla Vs): informação obtida diretamente dos ensaios sísmicos realizados nos ensaios S-CPTU's.
- Velocidade de propagação de ondas de compressão (Ondas C – sigla Vc): informação obtida diretamente dos ensaios sísmicos realizados nos ensaios S-CPTU's.
- Coeficiente de permeabilidade (k): Informação obtida diretamente dos ensaios de dissipação da poropressão realizados durante os ensaios CPTU's, através da correlação com o coeficiente de adensamento radial ou horizontal.
- Propriedades secundárias: Outras informações e propriedades dos materiais foram determinadas e utilizadas para conhecimento e interpretação do comportamento dos materiais, como: resistência de ponta corrigida (q_t), razão de atrito normalizada (F_r), parâmetro de poropressão (B_q) e parâmetro de estado (ψ), obtidas por meio de correlações com o ensaio CPTU, e módulos cisalhantes (G e G_{max}), obtidos pelos ensaios sísmicos, conforme equações abaixo, propostas por Robertson e Cabal (2015), com as equações dos parâmetros q_t e F_r já apresentadas no item 3.2.1.1:

$$B_q = \frac{(u_2 - u_0)}{(q_t - \sigma_{v0})}$$

$$\psi = 0,56 - 0,33 \cdot \log_{Q_{tn,cs}}$$

$$Q_{tn,cs} = K_c \cdot Q_{tn}$$

$$G_{max} = \rho \cdot V_s^2$$

$$G = \frac{G_{m\acute{a}x}}{3}$$

Onde:

u_2 : poropressão devido a penetração do cone (imediatamente atrás da ponta do cone);

u_0 : poropressão inicial ou hidrostática (antes da cravação do cone);

ρ : massa específica do material;

$Q_{tn,cs}$: resistência de ponta normalizada pela tensão efetiva e equivalente para uma areia limpa.

K_c : parâmetro função do índice do tipo de comportamento (I_c): $K_c = 6 \cdot 10^{-7} \cdot (I_c)^{16,76}$

3.2.2 Vibrações dos equipamentos de construção

Os parâmetros relacionados às vibrações geradas pelos diferentes equipamentos de construção foram obtidos diretamente da instrumentação de campo, com os sismógrafos de engenharia ou sensores multifuncionais. Foram obtidos os dados de aceleração (mm/s^2), velocidade (mm/s) e frequência (Hz) de vibração de partículas ao longo do tempo. Esses três tipos de dados foram disponibilizados como os dados brutos do estudo, com variação temporal de 0,1s.

Para os estudos de correlação entre velocidade de vibração de partícula e poropressão, foram considerados os valores máximos de velocidade (pico), de cada teste como sendo o valor representativo do evento, obtendo-se uma velocidade de vibração de partícula de pico (PPV) por teste.

Para a análise das frequências associadas às vibrações e velocidades, foi aplicada a Transformada de Fourier, que permite que um sinal possua representação tanto no tempo como na frequência. Esta formulação associa as velocidades de vibrações às suas frequências, permitindo a análise da influência da frequência na propagação das vibrações no entorno da instrumentação, uma vez que o possível

efeito de ressonância com as vibrações naturais das estruturas pode influenciar na propagação dessas vibrações em maiores distâncias, maximizando possíveis efeitos adversos.

3.2.2.1 Análise da propagação das vibrações

Conforme apresentado no item 3.1, cada caso analisado apresenta diferentes composições de sismógrafos, instalados em diferentes distâncias verticais e horizontais das fontes de vibração (equipamentos), com os equipamentos também trafegando em trajetos mais afastados e mais próximos desses sismógrafos, além da variação da distância vertical com a construção ou avanço dos aterros experimentais. Também, com os ensaios S-CPTU's realizados, e as respectivas caracterizações e classificações dos materiais envolvidos, foi possível analisar a propagação das vibrações em cada situação, com as distâncias horizontais e verticais, os materiais onde estão instalados os sensores, e os materiais que ondas de vibração atravessaram até serem captados pelos sensores.

Busca-se, com essa análise, a verificação de distâncias seguras entre equipamentos, de modo a evitar a sobreposição dos efeitos das vibrações entre equipamentos próximos, e os comportamentos para os diferentes materiais submetidos aos efeitos dessas vibrações.

3.2.3 Poropressões induzidas pelas vibrações

Os dados referentes aos excessos de poropressão induzidos pelas vibrações foram obtidos diretamente das leituras dos piezômetros elétricos instalados nos experimentos realizados. Sendo a poropressão (u) o valor total da poropressão medida, que considera a poropressão hidrostática inicial presente (u_0) e o acréscimo gerado durante as passagens dos equipamentos dos testes. Este acréscimo ou variação da poropressão é denominado de " Δu " ou " du ".

$$\Delta u \text{ ou } du = u - u_0$$

Os dados de poropressão foram analisados, assim como os dados dos sismógrafos, para cada teste ou equipamento, com as distâncias horizontais e

verticais da fonte de geração das vibrações, e para os materiais onde estão instalados os sensores.

Para as análises de correlações entre vibrações e poropressões, conforme será apresentado no item seguinte, de modo de evitar erros ou variações de leituras devidas a variação e precisão do próprio piezômetro, trabalhou-se com a média móvel dos dados, que melhor se ajustasse as variações apresentadas nas leituras, sem perder sua representatividade.

3.2.4 Correlações entre vibrações e poropressões

Com as análises específicas das vibrações e poropressões, foram verificadas as possíveis correlações entre as duas grandezas, na tentativa de prever o comportamento dos rejeitos de mineração na geração de excessos de poropressões quando submetidos às vibrações dos equipamentos de construção em obras no contexto da mineração, como reforço e descaracterização de barragens de rejeito.

Foram realizadas as seguintes etapas metodológicas:

- Elaboração de gráficos com os dados gerais de vibrações (velocidade de vibração de partícula de pico – PPV) e poropressões (variações de poropressões Δu ou du e razão de poropressão PPR), para entendimento inicial das possíveis correlações e convergências;
- Elaboração de matrizes de correlação entre vibrações (PPV), poropressões (Δu ou du e PPR), e todas as demais características dos testes, equipamentos e materiais;
- Elaboração de modelos de correlação entre as grandezas principais (du , PPR e PPV), juntamente com as variáveis que indicaram influência nos comportamentos e resultados das matrizes de correlação;
- Determinação de equações de correlação entre as variáveis principais de vibração e poropressão, por equipamento e combinações de equipamentos;
- Determinação de uma equação geral que represente o fenômeno analisado, generalizando o comportamento para os rejeitos testados, com o melhor ajuste possível, dada a variabilidade e incertezas associadas para as condições de campo.

- Comparação das equações de correlação obtidas com outras já realizadas, principalmente para detonações de explosivos de mineração, com avaliação de suas aplicabilidades.

Todas as análises citadas foram realizadas com auxílio do software estatístico R, que é um ambiente livre e voltado para a computação estatística e gráficos, desenvolvido inicialmente por Robert Gentleman e Ross Ihaka na Universidade de Auckland, Nova Zelândia. É amplamente utilizado por estatísticos e analistas de dados para desenvolver softwares estatísticos e realizar análises de dados. Algumas análises também foram realizadas com auxílio do software Excel.

Na sequência apresentam-se as descrições com maiores detalhes dos estudos de correlação.

3.2.4.1 Correlações gerais

Conforme comentado, e com objetivo de entendimento inicial do fenômeno analisado, foram elaborados gráficos gerais considerando todos os equipamentos para a variação ou excesso de poropressão (Δu ou du) e razão de poropressão (PPR) pela velocidade de vibração de partícula (PPV). Foram considerados os resultados de todos os pares de instrumentos em conjunto, e para cada par de instrumento de forma separada e, também, para cada altura de aterro e com todas as alturas em conjunto, buscando o entendimento dos comportamentos e possíveis particularidades e influências dos pares de instrumentos e das alturas de aterro no fenômeno em estudo, para posterior prosseguimento com as matrizes de correlação.

3.2.4.2 Matrizes de correlação

Com objetivo de aprofundar o entendimento do fenômeno e as variáveis envolvidas, foram elaboradas as matrizes de correlação, que são tabelas que mostram os coeficientes de correlação entre várias variáveis analisadas. As matrizes de correlação são usadas para quantificar a direção e a força do relacionamento linear entre variáveis numéricas em um conjunto de dados.

Para este estudo, foram consideradas todas as variáveis numéricas envolvidas, aplicando-se filtros nos dados com relação à altura dos aterros

experimentais dos testes realizados e conjuntos de pares de instrumentos (sismógrafos e piezômetros). Estas matrizes buscaram as correlações entre todas as variáveis com os dados finais de variação ou excesso de poropressão “du” e razão de poropressão “PPR”.

Foram consideradas as seguintes variáveis numéricas no estudo:

- Poropressão;
- Velocidade de vibração de partícula;
- Frequência de vibração;
- Distâncias vertical e horizontal do instrumento (piezômetro) em relação a base e topo do aterro experimental;
- Tensão total e efetiva na cota de instalação do instrumento;
- Resultados do ensaio CPTU na cota de instalação de cada sensor;
- Velocidade de propagação de ondas do ensaio CPTU sísmico;
- Densidade relativa e Módulo de deformabilidade do material onde o sensor do instrumento está instalado.

3.2.4.3 Modelos de correlação

De posse dos resultados das matrizes de correlação entre todas as variáveis numéricas, e com objetivo de analisar e quantificar a relação entre as demais variáveis envolvidas, agora numéricas ou não, foram propostos modelos de correlação entre variação de poropressão “du” e razão de poropressão “PPR” com a velocidade de vibração de vibrações “PPV” e demais variáveis e informações dos testes.

Para a verificação da representatividade de cada modelo, foram determinados os coeficientes de correlação R^2 , que mede a qualidade do ajuste do modelo de regressão dos dados.

Os modelos foram propostos com as variáveis numéricas que apresentaram influência nos estudos das matrizes de correlação, e foram complementados com as variáveis não numéricas, como o tipo de equipamento, característica ou atividade realizada pelo equipamento e tipo/classificação do material de instalação do sensor.

Foram testados modelos essencialmente lineares, com alguns testes exponenciais. As informações foram sendo incrementadas em cada modelo, e foram testadas outras combinações de variáveis, baseadas nos estudos correlatos apresentados na fundamentação teórica.

3.2.4.4 Equações de correlação

Posteriormente, com o conhecimento das correlações envolvidas entre as variáveis analisadas, foram determinadas equações de correlação entre “du” e “PPR” com PPV, diretamente, e também com o incremento de variáveis que apresentaram maior relacionamento com o fenômeno analisado, em acordo com as matrizes e modelos de correlação, e que sejam facilmente determinadas em projetos e análises de engenharia.

Foram determinadas equações específicas para cada tipo de equipamento e foi proposta uma equação geral, buscando-se representar e prever a geração de poropressão “du” e razão de poropressão “PPR” dentro da representatividade do estudo, para os materiais e equipamentos testados, com a maior convergência possível.

E para verificar as equações propostas, geral e específicas, com os dados dos testes de campo, foram comparados os valores previstos pelas equações com os dados de campo, analisando-se a representatividade das equações em cada situação. Comparou-se, também, com as equações disponíveis na literatura técnica, que são relacionadas a testes de detonações de explosivos, para avaliar a sua aplicação para as vibrações devidas ao tráfego de equipamentos de construção.

3.2.5 Análises de potenciais de liquefação

De posse dos dados de vibrações e excessos de poropressões associados, e todos os demais estudos realizados ao longo do trabalho, estes foram comparados com limites disponíveis em referências normativas e literatura técnica, como limites de velocidades de vibração de partícula, razão de poropressão (PPR) e deformações cisalhantes (γ).

As verificações dos limites de velocidade foram obtidas comparando-se diretamente as velocidades de vibração de partículas de pico (PPV) e suas frequências associadas, com os limites da norma brasileira (NBR 9653:2018) e alemã (DIN 4150-3:2016), assim como demais referências técnicas.

As verificações com as razões de poropressões (PPR) foram realizadas com as determinações dessas razões para cada caso ($PPR = \Delta u / \sigma'_{vo}$), comparando-se com

os limites aceitáveis disponíveis na literatura técnica, apresentados na fundamentação teórica do trabalho.

Por fim, foram determinadas as deformações cisalhantes de pico (γ_{pico}) resultante das vibrações, conforme equação abaixo (USBR, 1985), e também comparadas com os limites disponíveis na literatura técnica.

$$\gamma_{pico} = \frac{PPV}{V_s} (100\%)$$

Sendo:

PPV: Velocidade de vibração de partícula de pico – obtida com os sismógrafos;

Vs: velocidades de propagação de ondas cisalhantes – obtida com os ensaios S-CPTU's.

As verificações foram realizadas para os valores máximos de PPR, PPV e γ_{pico} obtidos nos testes de campo para cada altura de aterro/pista experimental, com objetivo de verificar a segurança do tráfego de equipamentos em cada nível de proteção gerada pela altura de aterro.

4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste item são apresentados todos os resultados do estudo para o caso analisado, em acordo os objetivos e metodologia declarados, desde os ensaios de campo e laboratório para a definição das propriedades dos materiais/rejeitos envolvidos, os dados da instrumentação de vibração e poropressão, os estudos das correlações e padrões de comportamento dos rejeitos, e análises dos potenciais gatilhos de liquefação.

4.1 PROPRIEDADES DOS MATERIAIS – SOLOS E REJEITOS

As propriedades dos materiais envolvidos em cada caso foram obtidas com os ensaios CPTU's e S-CPTU's realizados (rejeitos - fundação) e ensaios de laboratório (aterro - pista experimental). Na sequência serão apresentadas as caracterizações e classificações dos materiais, e as demais propriedades específicas.

4.1.1 Caracterização – Classificação dos Materiais

Os resultados das classificações segundo metodologia SBT (*Soil Behavior Type* ou Tipo de Comportamento do Solo), para os Aterros 1 e 2 são apresentados a seguir, para cada camada dos rejeitos onde estão instalados os instrumentos analisados.

4.1.1.1 Aterro 1

Na FIGURA 4.1, abaixo, apresenta-se a seção transversal esquemática do Aterro 1, com os instrumentos e materiais presentes na fundação da pista experimental, com as profundidades das camadas inferidas pelo resultado do ensaio CPTU-1B. E nas figuras seguintes, apresentam-se os resultados das classificações SBT de cada um dos materiais da fundação: todo ensaio CPTU e Aterro/Lastro (FIGURA 4.2), Rejeito-Lama e Rejeito-Transicional (FIGURA 4.3). Por fim, na FIGURA 4.4 apresenta-se a legenda das siglas do sistema de classificação.

FIGURA 4.1 – SEÇÃO TRANSVERSAL ESQUEMÁTICA DO ATERRO 1

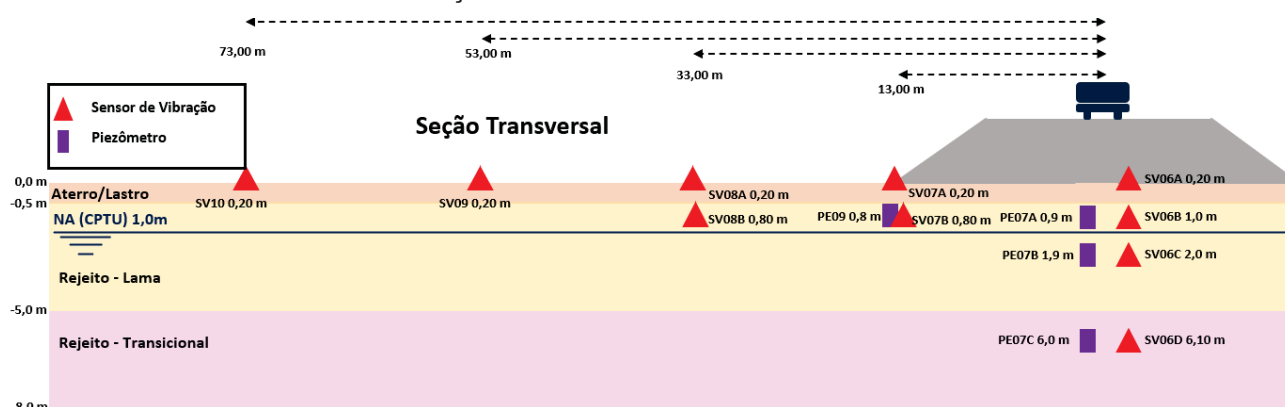


FIGURA 4.2 – RESULTADOS DAS CLASSIFICAÇÕES SBT DOS MATERIAIS DO ATERRO 1 – TODO O ENSAIO/CAMADAS E ATERRO/LASTRO.

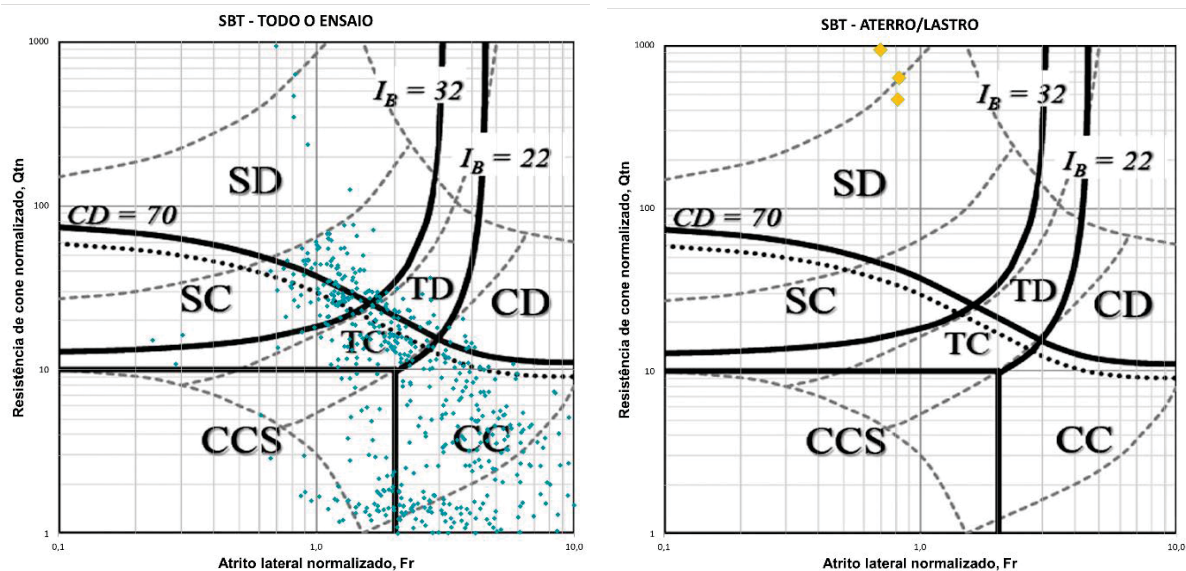


FIGURA 4.3 - RESULTADOS DAS CLASSIFICAÇÕES SBT DOS MATERIAIS DO ATERRO 1 – REJEITO LAMOSO E REJEITO TRANSICIONAL.

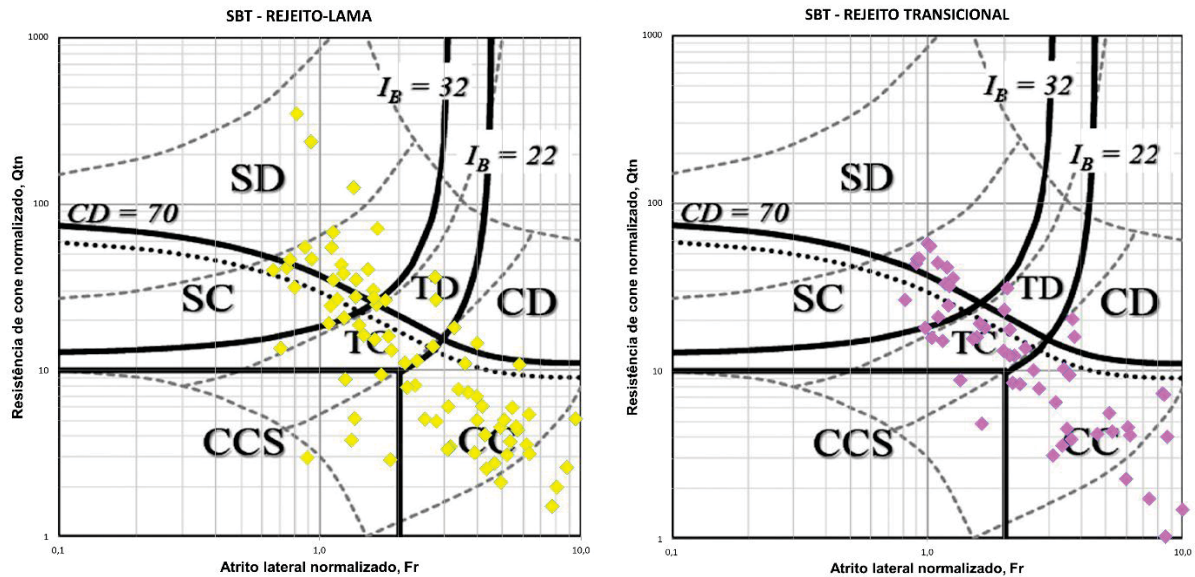


FIGURA 4.4 – LEGENDA PARA CLASSIFICAÇÃO SBT.

SOIL BEHAVIOR TYPE (SBT)

CCS: Clay-like - Contractive - Sensitive
 CC: Clay-like - Contractive - Sensitive
 CD: Clay-like - Dilative
 TC: Transitional - Contractive
 TD: Transitional - Dilative
 SC: Sand-like - Contractive
 SD: Sand-like - Dilative

TIPO DE COMPORTAMENTO DO SOLO

CCS: Argila - Contractil - Sensitiva
 CC: Argila - Contractive
 CD: Argila - Dilatante
 TC: Transição - Contractil
 TD: Transição - Dilatante
 SC: Areia - Contractil
 SD: Areia - Dilatante

Na classificação de todo o ensaio CPTU são encontradas resultados variados, que representam as diferentes camadas de rejeito ao longo da fundação. O Aterro/Lastro pré-existente, com poucos resultados devido à baixa espessura, apresenta classificação SD (Areia Dilatante). O rejeito lamoso apresenta certa variação nos resultados, com trechos de classificação arenosa e transicional, porém com predominância da classificação argilosa e contrátil (CC), sendo assim considerada no estudo. E o rejeito transicional, também apresentam essa variação, porém sem concentração específica, por isso sendo classificado como transicional e contrátil (TC). Apesar da classificação resultante ser diferente para o rejeito lama e transicional, existem intercalações de camadas de materiais arenosos e argilosos nas duas camadas.

Para o aterro da pista experimental 1, foram realizados ensaios de caracterização, compactação, umidade natural, peso específico real dos grãos, granulometria, limites de consistência e permeabilidade a carga variável, com os resultados apresentados no QUADRO 4.1, com material classificado como um Silte Areno-Argiloso, com baixa permeabilidade, não plástico, e demais propriedades apresentadas na tabela.

QUADRO 4.1 - ENSAIOS DO ATERRO/PISTA EXPERIMENTAL 1

Ensaio	Umidade Natural (%)	Umidade ótima (%)	Peso esp. seco máximo (gf/cm³)	Peso esp. real dos grãos (gf/cm³)	Granulometria				Limites de Consistência		Permeabilidade e Carga Variável k_{20} (cm/s)
					% Argila	% Silte	% Areia	% Pedr.	LL (%)	LP (%)	
1	19,17	15,40	1,81	3,06	3,10	61,40	35,50	0,00	NL	NP	2,69E-05
2	23,73	16,20	1,85	2,81	3,60	72,70	23,80	0,00	NL	NP	8,26E-06
3	31,37	15,20	1,92	3,28	4,70	80,90	14,50	0,00	NL	NP	1,48E-05
Média	24,76	15,60	1,86	3,05	3,80	71,67	24,60	0,00	NL	NP	1,67E-05

4.1.1.2 Aterro 2

Na FIGURA 4.11, abaixo, apresenta-se a seção transversal esquemática do Aterro 2, com os instrumentos e materiais presentes na fundação da pista experimental, com as profundidades das camadas inferidas pelo resultado do ensaio CPTU-07. E nas figuras seguintes, apresentam-se os resultados das classificações SBT de cada um dos materiais da fundação: Todo o ensaio CPTU e Aterro/Lastro (FIGURA 4.6), Rejeito-Lama 1 e Rejeito-Transicional (FIGURA 4.7) e Rejeito-Lama 2 (FIGURA 4.8). Por fim, na FIGURA 4.9 apresenta-se a legenda das siglas do sistema de classificação.

FIGURA 4.5 – SEÇÃO TRANSVERSAL ESQUEMÁTICA DO ATERRO 2

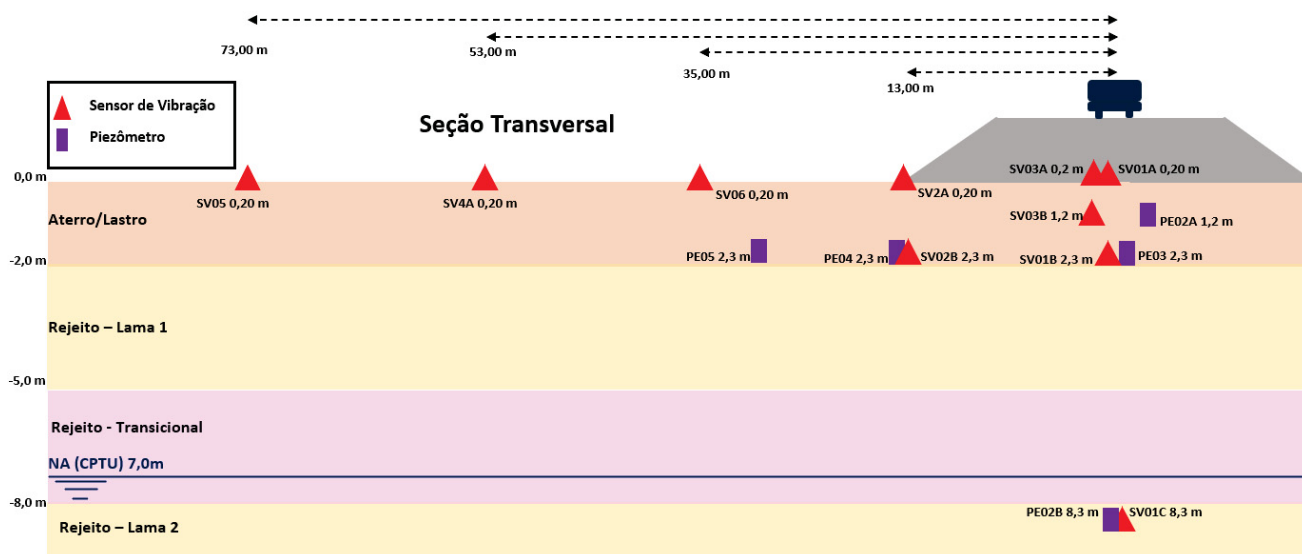


FIGURA 4.6 - RESULTADOS DAS CLASSIFICAÇÕES SBT DOS MATERIAIS DO ATERRO 2 – TODO O ENSAIO/CAMADAS E ATERRO/LASTRO.

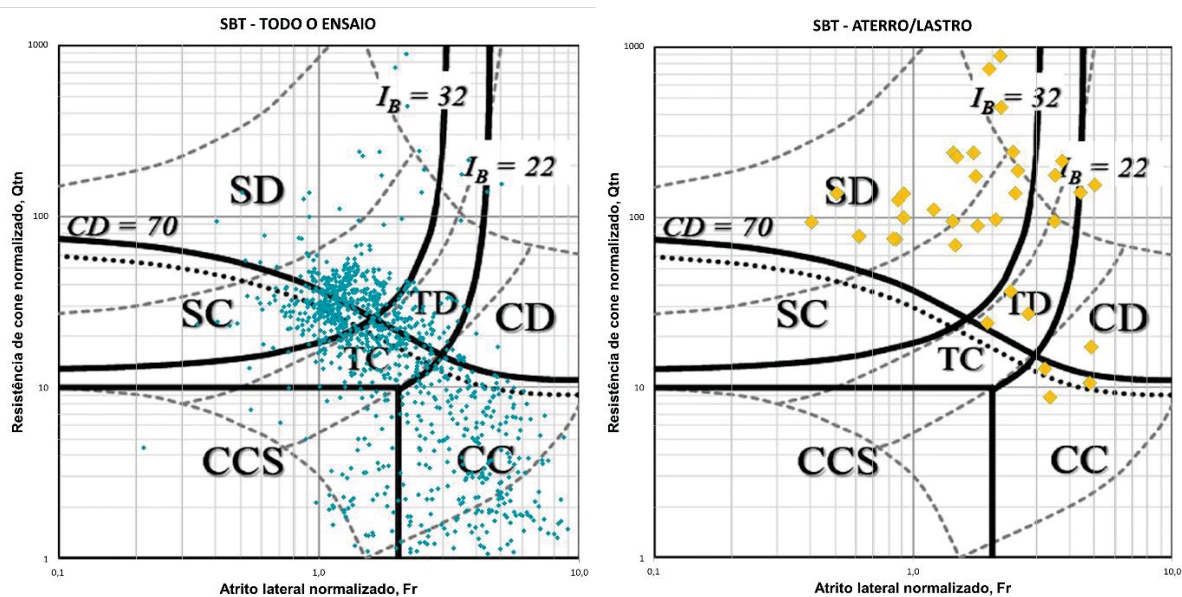


FIGURA 4.7 - RESULTADOS DAS CLASSIFICAÇÕES SBT DOS MATERIAIS DO ATERRO 2 – REJEITO LAMOSO 1 E REJEITO TRANSICIONAL.

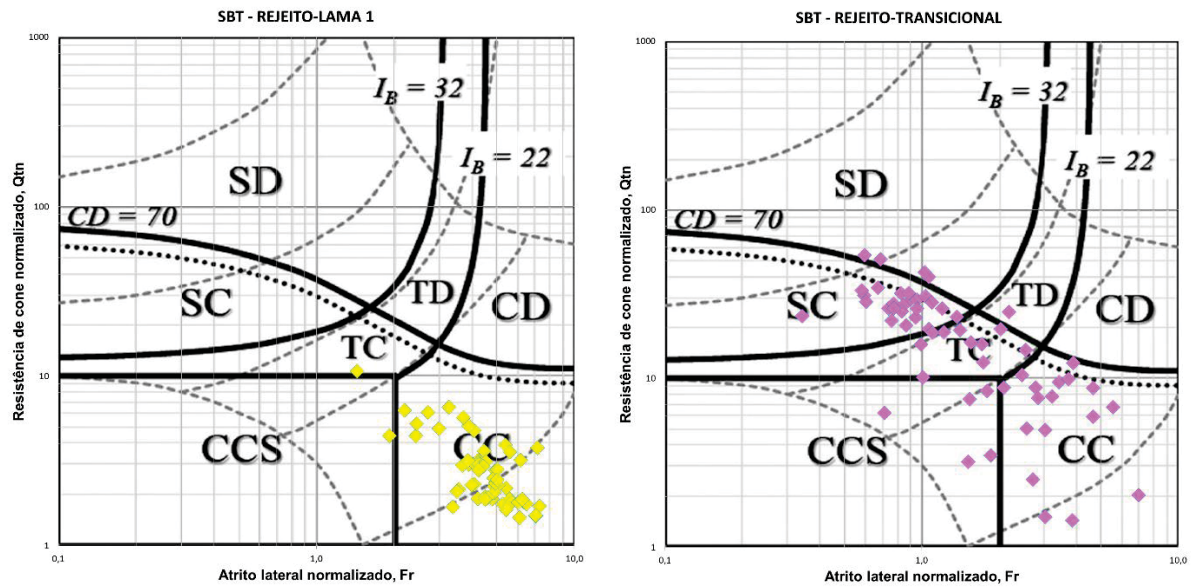


FIGURA 4.8 - RESULTADOS DAS CLASSIFICAÇÕES SBT DOS MATERIAIS DO ATERRO 2 – REJEITO LAMOSO 2.

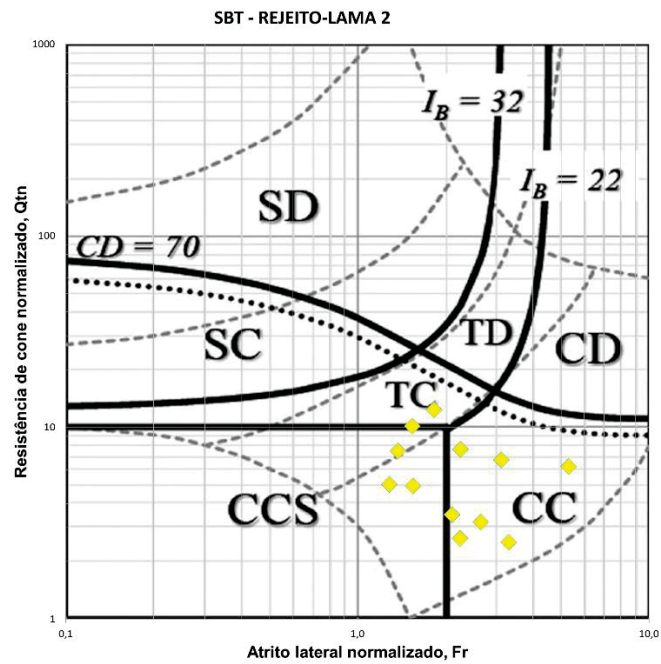


FIGURA 4.9 – LEGENDA PARA CLASSIFICAÇÃO SBT.

SOIL BEHAVIOR TYPE (SBT)	TIPO DE COMPORTAMENTO DO SOLO
CCS: Clay-like - Contractive - Sensitive	CCS: Argila - Contractil - Sensitiva
CC: Clay-like - Contractive - Sensitive	CC: Argila - Contractive
CD: Clay-like - Dilative	CD: Argila - Dilatante
TC: Transitional - Contractive	TC: Transição - Contractil
TD: Transitional - Dilative	TD: Transição - Dilatante
SC: Sand-like - Contractive	SC: Areia - Contractil
SD: Sand-like - Dilative	SD: Areia - Dilatante

Na classificação de todo o ensaio CPTU, são encontradas resultados variados, que representam as diferentes camadas de rejeito ao longo da fundação. O Aterro/Lastro pré-existente apresenta trechos de classificação transicional, porém predominantemente arenosa e dilatante (SD). O rejeito lamoso 1 apresenta classificação argilosa e contrátil (CC), sem variações. O rejeito transicional apresenta variação de classificação arenosa, transicional e argilosa, porém sem concentração específica, por isso sendo classificado como transicional e contrátil (TC). E o rejeito lamoso 2 também apresenta classificação predominante argilosa e contrátil (CC).

Para o aterro da pista experimental 2, foram realizados ensaios de caracterização, compactação, umidade natural, peso específico real dos grãos, peso específico in situ e granulometria, com os resultados apresentados no QUADRO 4.2, com material classificado como um Silte Argilo-Arenoso, não plástico, com peso específico natural (in situ) inferior ao máximo, e demais propriedades apresentadas na tabela.

QUADRO 4.2 - ENSAIOS DO ATERRO/PISTA EXPERIMENTAL 2.

Ensaio	Umidade Natural (%)	Umidade ótima (%)	Peso esp. seco máximo (gf/cm³)	Peso esp. real dos grãos (gf/cm³)	Peso Esp. In Situ (gf/cm³)	Granulometria				Limites de Consistência		Permeabilidade e Carga Variável k_{20} (cm/s)
						% Argila	% Silte	% Areia	% Pedr.	LL (%)	LP (%)	
1	26,30	13,00	2,24	3,11	2,24	24,50	60,10	15,50	0,00	-	-	-

4.1.2 Propriedades específicas

Neste item são apresentadas as propriedades específicas dos materiais de fundação da pista experimental, obtidos com os ensaios CPTU's, ensaios sísmicos e correlações, conforme apresentado na metodologia do trabalho. São apresentados os resultados médios para as camadas identificadas de rejeitos e lastros/aterros de

conquista e, também, as propriedades obtidas para as profundidades específicas onde foram instalados os instrumentos.

Apresenta-se, também, os instrumentos que foram considerados como correspondentes entre si, por estarem instalados lado a lado ou muito próximos, sendo assim considerados para os estudos de correlação apresentados ao longo do trabalho.

4.1.2.1 Aterro 1

Os resultados para as camadas de fundação do Aterro 1 são apresentados no QUADRO 4.3, as específicas para as profundidades dos piezômetros são apresentadas no QUADRO 4.4 e para os sismógrafos no QUADRO 4.5.

QUADRO 4.3 - PROPRIEDADES ESPECÍFICAS DAS CAMADAS – ATERRO 1

RESULTADOS MÉDIOS DAS CAMADAS – ATERRO 1			
MATERIAL - CAMADA	Aterro / Lastro	Rejeito - Lama	Rejeito - Transicional
Resistência de ponta - q_c (MPa)	1,96	0,55	1,42
Atrito lateral - f_s (kPa)	17,23	11,30	24,72
Razão de atrito - R_f (%)	0,01	0,03	0,03
Poropressão na cravação do cone - u_2 (kPa)	3,34	59,96	104,06
Parâmetro de poropressão - B_q	0,00	0,58	-0,36
Parâmetro de estado - ψ	-0,13	0,22	0,16
Peso específico úmido - γ_n (kN/m ³)	21,07	21,07	20,54
Estado	Dilatante	Contrátil	Contrátil
Classificação SBT médio	SD	CC	TC
Velocidade de onda cisalhante - V_s - ensaio (m/s)	-	203,92	203,56
Densidade Relativa - D_r (%)	1,28	0,19	0,22
E (MPa)	8,72	11,90	26,31
Coefficiente de permeabilidade - k (m/s)	-	1,8E-05	-

QUADRO 4.4 - PROPRIEDADES ESPECÍFICAS DOS MATERIAIS NAS COTAS DE INSTALAÇÃO DOS PIEZÔMETROS – ATERRO 1.

PROPRIEDADES NAS COTAS DE INSTALALAÇÃO DOS PIEZÔMETROS – ATERRO 1						
PIEZÔMETRO	PE06	PE07A	PE07B	PE07C	PE08	PE09
Sismógrafo correspondente	-	SV06B	SV06C	SV06D	-	SV07B
Material	LAMA	LAMA	LAMA	TRANSICIONAL	LAMA	LAMA
Materiais atravessados	AT - CC	AT - CC	AT - CC	AT - CC - TC	AT - CC	AT - CC
Tensão Total - σ (kPa)	38,03	18,65	40,50	122,90	40,33	18,06
Poropressão hidrostática - μ_0 (kPa)	6,23	0,00	7,38	47,24	7,30	0,00
Tensão Efetiva - σ' (kPa)	31,80	18,65	33,12	75,67	33,03	18,06
Resistência de ponta - q_c (MPa)	0,34	0,57	0,13	3,57	0,13	0,57
Atrito lateral - f_s (kPa)	6,67	6,91	3,71	31,57	3,71	6,91
Razão de atrito - R_f (%)	1,91	1,20	2,82	0,88	2,82	1,20
Poropressão na cravação do cone - u_z (kPa)	37,21	18,06	6,14	52,80	6,14	18,06
Resistência de ponta corrigida - q_t (MPa) (camada)	0,56	0,56	0,56	1,44	0,56	0,56
Razão de atrito normalizada - F_r (%) (camada)	7,27	7,27	7,27	0,11	7,27	7,27
Parâmetro de poropressão - B_q (camada)	0,58	0,58	0,58	-0,36	0,58	0,58
Parâmetro de estado - ψ (camada)	0,22	0,22	0,22	0,16	0,22	0,22
Peso específico úmido - γ_n (kN/m ³) (camada)	21,07	21,07	21,07	20,54	21,07	21,07
Estado (camada)	Contrátil	Contrátil	Contrátil	Contrátil	Contrátil	Contrátil
Classificação SBT (camada)	CC	CC	CC	TC	CC	CC
Velocidade de onda cisalhante - V_s - ensaio (m/s) (camada)	203,92	203,92	203,92	203,56	203,92	203,92
Velocidade de onda cisalhante - V_s - correlação (m/s) (camada)	132,23	132,23	132,23	176,24	132,23	132,23
Módulo cisalhante máximo - $G_{m\acute{a}x}$ - ensaio (MPa) (camada)	89,65	89,65	89,65	86,77	89,65	89,65
Módulo cisalhante máximo - $G_{m\acute{a}x}$ - correlação (MPa) (camada)	21,58	21,58	21,58	66,49	21,58	21,58
Módulo cisalhante - G - ensaio (MPa) (camada)	29,88	29,88	29,88	28,93	29,88	29,88
Módulo cisalhante - G - correlação (MPa) (camada)	7,19	7,19	7,19	22,16	7,19	7,19

PROPRIEDADES NAS COTAS DE INSTALAÇÃO DOS PIEZÔMETROS – ATERRO 1						
PIEZÔMETRO	PE06	PE07A	PE07B	PE07C	PE08	PE09
Densidade Relativa - Dr (%)	0,19	0,19	0,19	0,22	0,19	0,19
Módulo de Deformabilidade - E (MPa) (camada)	11,90	11,90	11,90	26,31	11,90	11,90
Coefficiente de permeabilidade – k (m/s) (camada)	1,8E-05	1,8E-05	1,8E-05	-	1,8E-05	1,8E-05

QUADRO 4.5 - PROPRIEDADES ESPECÍFICAS DOS MATERIAIS NAS COTAS DE INSTALAÇÃO DOS SISMÓGRAFOS – ATERRO 1.

PROPRIEDADES NAS COTAS DE INSTALAÇÃO DOS SISMÓGRAFOS – ATERRO 1										
SISMÓGRAFO	SV06A	SV06B	SV06C	SV06D	SV07A	SV07B	SV08A	SV08B	SV09	SV10
Piezômetro correspondente	-	PE07A	PE07B	PE07C	-	PE09	-	-	-	-
Material	ATER-RO	LAMA	LAMA	TRANSI-CIONAL	ATER-RO	LAMA	ATER-RO	LAMA	ATER-RO	ATER-RO
Materiais atravessados (SBT)	AT	AT - CC	AT - CC	AT - CC - TC	AT	AT - CC	AT	AT - CC	AT	AT
Tensão Total - σ (kPa)	0,76	17,61	38,68	121,90	0,00	16,56	0,00	15,91	0,00	0,00
Poropressão hidrostática - μ_0 (kPa)	0,00	0,00	6,53	46,75	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Tensão Efetiva - σ' (kPa)	0,76	17,61	32,15	75,14	0,00	16,56	0,00	15,91	0,00	0,00
Resistência de ponta - q_c (MPa)	1,10	0,60	0,34	1,92	1,10	0,45	1,10	0,45	1,10	1,10
Atrito lateral - f_s (kPa)	14,34	7,17	6,67	22,07	14,34	6,10	14,34	6,10	14,34	14,34
Razão de atrito - R_f (%)	1,30	1,20	1,91	1,14	1,30	1,34	1,30	1,34	1,30	1,30
Poropressão na cravação do cone - u_2 (kPa)	3,21	18,61	37,21	78,63	3,21	18,52	3,21	18,52	3,21	3,21
Resistência de ponta corrigida - q_t (MPa) (camada)	1,97	0,56	0,56	1,44	1,97	0,56	1,97	0,56	1,97	1,97
Razão de atrito normalizada - F_r (%) (camada)	1,01	7,26	7,26	0,11	1,01	7,26	1,01	7,26	1,01	1,01
Parâmetro de poropressão - B_q (camada)	0,00	0,58	0,58	-0,36	0,00	0,58	0,00	0,58	0,00	0,00
Parâmetro de estado - ψ (camada)	-0,13	0,22	0,22	0,16	-0,13	0,22	-0,13	0,22	-0,13	-0,13
Peso específico úmido - γ_n (kN/m ³) (camada)	21,07	21,07	21,07	20,54	21,07	21,07	21,07	21,07	21,07	21,07
Estado (camada)	DILATANTE	CONTRÁTIL	CONTRÁTIL	CONTRÁTIL	CONTRÁTIL	CONTRÁTIL	DILATANTE	CONTRÁTIL	DILATANTE	DILATANTE
Classificação SBT (camada)	SD	CC	CC	TC	SD	CC	SD	CC	SD	SD
Velocidade de onda cisalhante - V_s - ensaio (m/s) (camada)	NA	203,92	203,92	203,56	NA	203,92	NA	203,92	NA	NA

PROPRIEDADES NAS COTAS DE INSTALAÇÃO DOS SISMÓGRAFOS – ATERRO 1										
SISMÓGRAFO	SV06A	SV06B	SV06C	SV06D	SV07A	SV07B	SV08A	SV08B	SV09	SV10
Velocidade de onda cisalhante - Vs - correlação (m/s) (camada)	69,88	132,23	132,23	176,24	69,88	132,23	69,88	132,23	69,88	69,88
Módulo cisalhante máximo – G _{máx} – ensaio (MPa) (camada)	-	89,65	89,65	86,78	-	89,65	-	89,65	-	-
Módulo cisalhante máximo – G _{máx} – correlação (MPa) (camada)	92,35	21,58	21,58	66,48	92,35	21,58	92,35	21,58	92,35	92,35
Módulo cisalhante – G - ensaio (MPa) (camada)	-	29,88	29,88	28,93	-	29,88	-	29,88	-	-
Módulo cisalhante – G - correlação (MPa) (camada)	30,78	7,19	7,19	22,16	30,78	7,19	30,78	7,19	30,78	30,78
Densidade Relativa - Dr (%)	1,28	0,19	0,19	0,22	1,28	0,19	1,28	0,19	1,28	1,28
Módulo de Deformabilidade - E (MPa) (camada)	8,72	11,90	11,90	26,31	8,72	11,90	8,72	11,90	8,72	8,72
Coefficiente de permeabilidade – k (m/s) (camada)	-	1,8E-05	1,8E-05	-	-	1,8E-05	-	1,8E-05	-	-

4.1.2.2 Aterro 2

Os resultados para as camadas de fundação do Aterro 2 são apresentadas no QUADRO 4.6, as específicas para as profundidades dos piezômetros são apresentadas no QUADRO 4.7 e para os sismógrafos no QUADRO 4.8.

QUADRO 4.6 - PROPRIEDADES ESPECÍFICAS DAS CAMADAS – ATERRO 2.

RESULTADOS MÉDIOS DAS CAMADAS – ATERRO 2				
MATERIAL - CAMADA	ATERRO	LAMA 1	TRANSI-CIONAL	LAMA 2
Resistência de ponta - q_c (MPa)	3,30	0,27	3,19	0,73
Atrito lateral - f_s (kPa)	51,03	9,13	32,73	16,72
Razão de atrito - R_f (%)	2,05%	3,28%	1,26%	2,01%
Poropressão na cravação do cone - u_2 (kPa)	37,31	155,92	12,05	207,81
Parâmetro de poropressão - B_q	0,02	0,97	0,01	0,70
Parâmetro de estado - ψ	-0,13	0,42	0,00	0,41
Peso específico úmido - γ_n (kN/m ³)	20,00	21,07	20,00	21,07
Estado	Dilatante	Contrátil	Contrátil	Contrátil
Classificação SBT médio	SD	CC	SC	CC

RESULTADOS MÉDIOS DAS CAMADAS – ATERRO 2				
MATERIAL - CAMADA	ATERRO	LAMA 1	TRANSI- CIONAL	LAMA 2
Velocidade de onda cisalhante - Vs - ensaio (m/s)	-	-	-	-
Densidade Relativa - Dr (%)	1,04	0,10	0,28	0,11
E (MPa)	23,08	13,23	46,22	26,90
Coefficiente de permeabilidade – k (m/s)	-	7,7E-07	1,84E-06	-

QUADRO 4.7 - PROPRIEDADES ESPECÍFICAS DOS MATERIAIS NAS COTAS DE INSTALAÇÃO DOS PIEZÔMETROS – ATERRO 2.

PROPRIEDADES NAS COTAS DE INSTALALAÇÃO DOS PIEZÔMETROS – ATERRO 2						
PIEZÔMETRO	PE01	PE02A	PE02B	PE03	PE04	PE05
Sismógrafo correspondente	SV04B	SV03B	SV01C	SV01B	SV02B	SV06
Material	LAMA 1	ATERRO	LAMA 2	LAMA 1	LAMA 1	LAMA 1
Materiais atravessados	AT	AT	AT - LA1 - TC1 - LA2	AT	AT	AT
Tensão Total - σ (kPa)	84,35	103,24	188,02	85,03	30,91	31,05
Poropressão hidrostática - μ_0 (kPa)	0,00	0,00	9,03	0,00	0,00	0,00
Tensão Efetiva - σ' (kPa)	84,35	103,24	178,99	85,03	30,91	31,05
Resistência de ponta - q_c (MPa)	0,64	3,83	1,07	1,01	0,43	0,43
Atrito lateral - f_s (kPa)	29,53	56,55	6,85	27,22	18,99	18,99
Razão de atrito - R_f (%)	0,05	0,01	0,01	0,03	0,04	0,04
Poropressão na cravação do cone - u_2 (kPa)	3,27	40,93	198,91	9,18	4,60	4,60
Resistência de ponta corrigida – q_t (MPa) (camada)	0,30	3,31	0,79	0,30	0,30	0,30
Razão de atrito normalizada – F_r (%) (camada)	4,61	2,09	2,89	4,61	4,61	4,61
Parâmetro de poropressão - B_q (camada)	0,97	0,02	0,70	0,97	0,97	0,97
Parâmetro de estado - ψ (camada)	0,42	-0,13	0,41	0,42	0,42	0,42
Peso específico úmido - γ_n (kN/m ³) (camada)	21,07	20,00	21,07	21,07	21,07	21,07
Estado (camada)	Contrátil	Dilatante	Contrátil	Contrátil	Contrátil	Contrátil
Classificação SBT (camada)	CC	SD	CC	CC	CC	CC

PROPRIEDADES NAS COTAS DE INSTALAÇÃO DOS PIEZÔMETROS – ATERRO 2						
PIEZÔMETRO	PE01	PE02A	PE02B	PE03	PE04	PE05
Velocidade de onda cisalhante - Vs - ensaio (m/s) (camada)	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Velocidade de onda cisalhante - Vs - correlação (m/s) (camada)	116,67	104,13	158,86	116,67	116,67	116,67
Módulo cisalhante máximo – G _{máx} – ensaio (MPa) (camada)	-	-	-	-	-	-
Módulo cisalhante máximo – G _{máx} – correlação (MPa) (camada)	10,56	22,19	29,09	10,56	10,56	10,56
Módulo cisalhante – G - ensaio (MPa) (camada)	-	-	-	-	-	-
Módulo cisalhante – G - correlação (MPa) (camada)	3,52	7,40	9,70	3,52	3,52	3,52
Densidade Relativa - Dr (%)	0,10	1,04	0,11	0,10	0,10	0,10
Módulo de Deformabilidade - E (MPa) (camada)	13,23	23,08	26,90	13,23	13,23	13,23
Coefficiente de permeabilidade – k (m/s) (camada)	7,7E-7	-	-	7,7E-7	7,7E-7	7,7E-7

QUADRO 4.8 - PROPRIEDADES ESPECÍFICAS DOS MATERIAIS NAS COTAS DE INSTALAÇÃO DOS SISMÓGRAFOS – ATERRO 2.

PROPRIEDADES NAS COTAS DE INSTALAÇÃO DOS SISMÓGRAFOS – ATERRO 2											
SISMÓGRAFO	SV01A	SV01B	SV01C	SV02A	SV02B	SV03A	SV03B	SV04A	SV04B	SV05	SV06
Piezômetro correspondente	-	PE03	PE02B	-	PE04	-	PE02A	-	PE01	-	PE05
Material	ATERRO	LAMA 1	LAMA 2	ATERRO	LAMA 1	ATERRO	ATERRO	ATERRO	LAMA 1	ATERRO	ATERRO
Materiais atravessados	AT	AT	AT - LA1 - TC1 - LA2	AT	AT	AT	AT	AT	AT	AT	AT
Tensão Total - σ (kPa)	7,84	31,60	126,67	7,64	31,46	6,46	24,10	0,00	29,40	0,00	6,46
Poropressão hidrostática - μ_0 (kPa)	0,00	0,00	8,83	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Tensão Efetiva - σ' (kPa)	7,84	31,60	117,84	7,64	31,46	6,46	24,10	0,00	29,40	0,00	6,46
Resistência de ponta - q_c (MPa)	10,64	0,52	1,07	10,64	0,52	10,64	3,83	10,64	0,64	10,64	10,64
Atrito lateral - f_s (kPa)	40,06	15,87	6,85	40,06	15,87	40,06	56,55	40,06	29,53	40,06	40,06
Razão de atrito - R_f (%)	0,38	3,00	0,61	0,38	3,00	0,38	1,47	0,38	4,61	0,38	0,38
Poropressão na cravação do cone - u_2 (kPa)	15,91	38,52	198,91	15,91	38,52	15,91	40,93	15,91	3,27	15,91	15,91

PROPRIEDADES NAS COTAS DE INSTALAÇÃO DOS SISMÓGRAFOS – ATERRO 2											
SISMÓGRAFO	SV01A	SV01B	SV01C	SV02A	SV02B	SV03A	SV03B	SV04A	SV04B	SV05	SV06
Resistência de ponta corrigida – q_t (MPa) (camada)	3,31	0,30	0,79	3,31	0,30	3,31	3,31	3,31	0,30	3,31	3,31
Razão de atrito normalizada – F_r (%) (camada)	2,09	4,61	2,89	2,09	4,61	2,09	2,09	2,09	4,61	2,09	2,09
Parâmetro de poropressão – B_q (camada)	0,02	0,97	0,70	0,02	0,97	0,02	0,02	0,02	0,97	0,02	0,02
Parâmetro de estado – ψ (camada)	-0,13	0,42	0,41	-0,13	0,42	-0,13	-0,13	-0,13	0,42	-0,13	-0,13
Peso específico úmido – γ_n (kN/m ³) (camada)	20,00	21,07	21,07	20,00	21,07	20,00	20,00	20,00	21,07	20,00	20,00
Estado (camada)	Dilatante	Contrátil	Contrátil	Dilatante	Contrátil	Dilatante	Dilatante	Dilatante	Contrátil	Dilatante	Dilatante
Classificação SBT (camada)	SD	CC	CC	SD	CC	SD	SD	SD	CC	SD	SD
Velocidade de onda cisalhante – V_s - ensaio (m/s) (camada)	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Velocidade de onda cisalhante – V_s - correlação (m/s) (camada)	104,13	116,67	158,86	104,13	116,67	104,13	104,13	104,13	116,67	104,13	104,13
Módulo cisalhante máximo – $G_{máx}$ - ensaio (MPa) (camada)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Módulo cisalhante máximo – $G_{máx}$ - correlação (MPa) (camada)	22,19	10,56	29,09	22,19	10,56	22,19	22,19	22,19	10,56	22,19	22,19
Módulo cisalhante – G - ensaio (MPa) (camada)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Módulo cisalhante – G - correlação (MPa) (camada)	7,40	3,52	9,70	7,40	3,52	7,40	7,40	7,40	3,52	7,40	7,40
Densidade Relativa – D_r (%)	1,04	0,10	0,11	1,04	0,10	1,04	1,04	1,04	0,10	1,04	1,04
Módulo de Deformabilidade – E (MPa) (camada)	23,08	13,23	26,90	23,08	13,23	23,08	23,08	23,08	13,23	23,08	23,08
Coefficiente de permeabilidade – k (m/s) (camada)	-	7,7E-7	-	-	7,7E-7	-	-	-	7,7E-7	-	-

4.2 VIBRAÇÕES – SISMÓGRAFOS DE ENGENHARIA

Neste item são apresentados os resultados individualizados dos sismógrafos de engenharia, com os dados de velocidade de vibração de partículas obtidas nos

testes de campo. Os resultados são apresentados para cada aterro experimental (Aterro 1 e 2), para as diferentes alturas de aterro e equipamentos testados.

Nesta interpretação inicial, são apresentados os dados completos obtidos nos testes de campo, sem aplicação de nenhum filtro ou tratamento nos dados.

Os resultados são apresentados como diagrama de caixa ou gráfico de caixa (*boxplot*), que fornece uma melhor visualização da variabilidade dos dados e possíveis valores atípicos. Trata-se de uma representação gráfica que exhibe a distribuição de um conjunto de dados baseado em um resumo estatístico de cinco números: mínimo ou limite inferior, primeiro quartil (Q1), mediana (Q2), terceiro quartil (Q3) e máximo ou limite superior. Os valores fora dos limites inferior e superior considerados *outliers* ou valores discrepantes. Porém, no presente trabalho, os picos de vibração e poropressão são isolados e podem aparecer nos resultados como valores discrepantes, porém neste caso não são. Na FIGURA 4.10, apresenta-se um exemplo qualquer de gráfico de caixa com a representação de seus elementos.

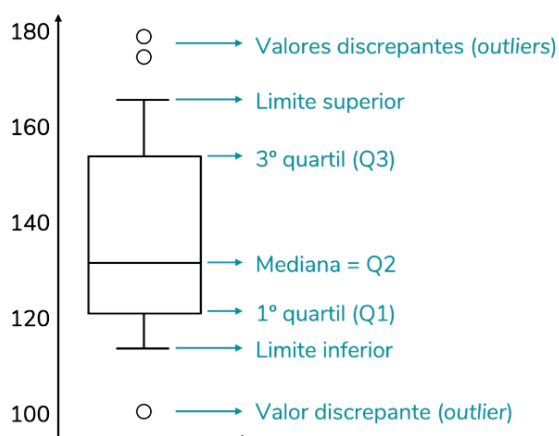
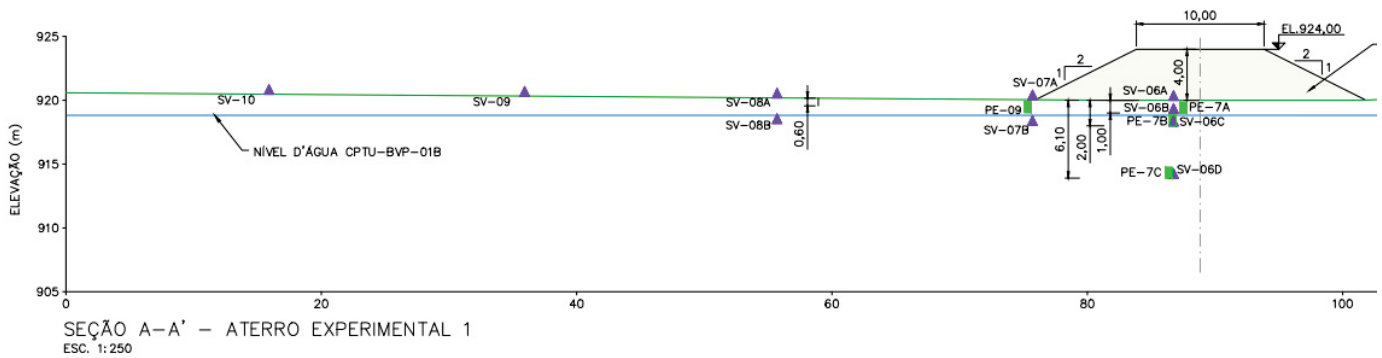


FIGURA 4.10 – EXEMPLOS DOS ELEMENTOS DE UM DIAGRAMA DE CAIXA OU *BOXPLOT*.

4.2.1 Aterro 1

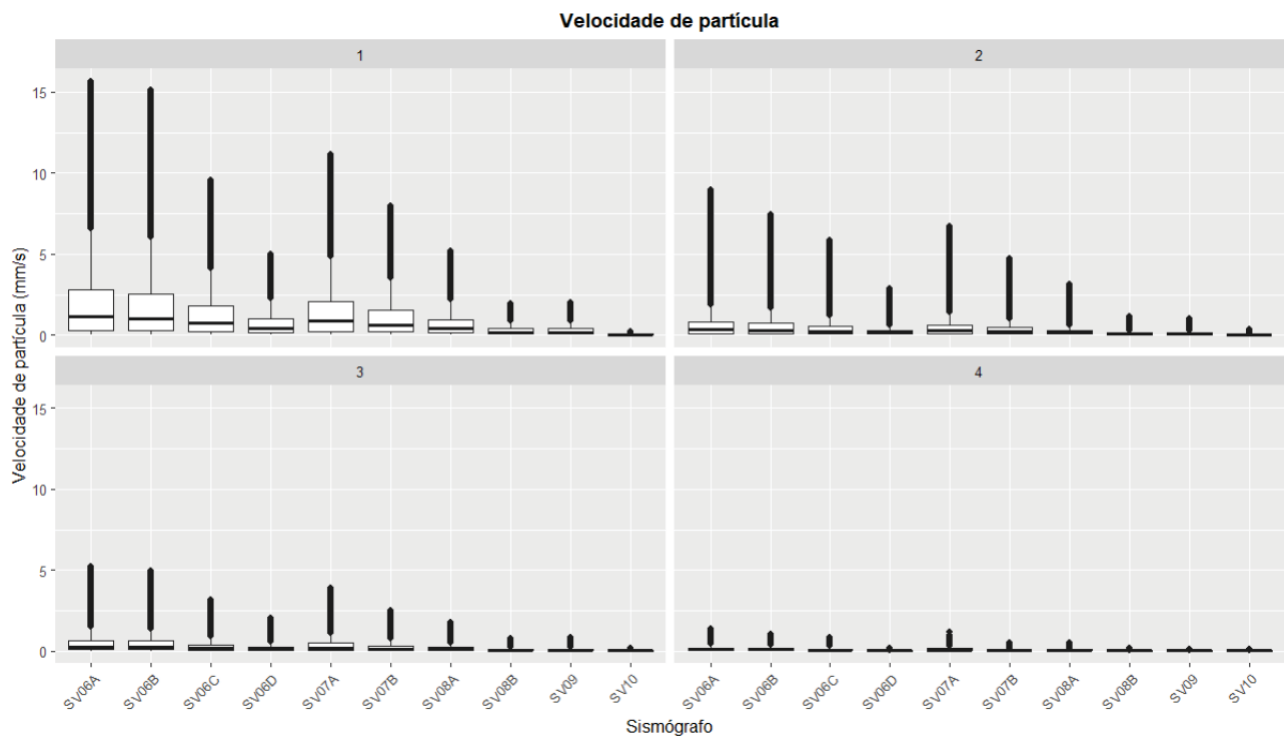
Na FIGURA 4.11 reapresenta-se a seção de instrumentação do Aterro 1, com os leituras dos instrumentos e interpretações na sequência.

FIGURA 4.11 – INSTRUMENTAÇÃO DO ATERRO 1.



Na FIGURA 4.12 apresenta-se os resultados completos das velocidades de vibração de partículas obtidas em todos os testes do Aterro 1, para cada sismógrafo de engenharia e para cada altura de aterro (indicadas pelos números 1, 2, 3 e 4 no topo de cada gráfico).

FIGURA 4.12 – ATERRO 1 – VELOCIDADE DE VIBRAÇÃO DE PARTÍCULA PARA AS ALTURAS DE ATERRO.



É possível verificar a atenuação das vibrações tanto em distância horizontal como vertical (profundidade). Para a análise da atenuação horizontal, observam-se os instrumentos SV-06A, SV-07A, SV-08A, SV-09 e SV-10, com valores decrescentes

com o distanciamento. Para atenuação vertical, verificam-se os instrumentos instalados em um mesmo furo, variando-se a profundidade, como os conjuntos (SV-06A, SV06B, SV-06C e SV06D), (SV-07A e SV-07B) e (SV-08A e SV-08B). É possível observar também, conforme esperado, a redução das velocidades de vibração com o aumento da altura do aterro experimental, onde não se observam velocidades significativas para o aterro de 4m.

Na FIGURA 4.13, apresentam-se os resultados das velocidades de vibração para os diferentes equipamentos de construção, por sismógrafo e para todas as alturas de aterro testadas (1 a 4m, sem distinção). E na FIGURA 4.14, apresentam-se os resumos totais por equipamento.

FIGURA 4.13 - ATERRO 1 – VELOCIDADES DE VIBRAÇÃO DE PARTÍCULA PARA OS EQUIPAMENTOS DE COMPACTAÇÃO, POR SISMÓGRAFO.

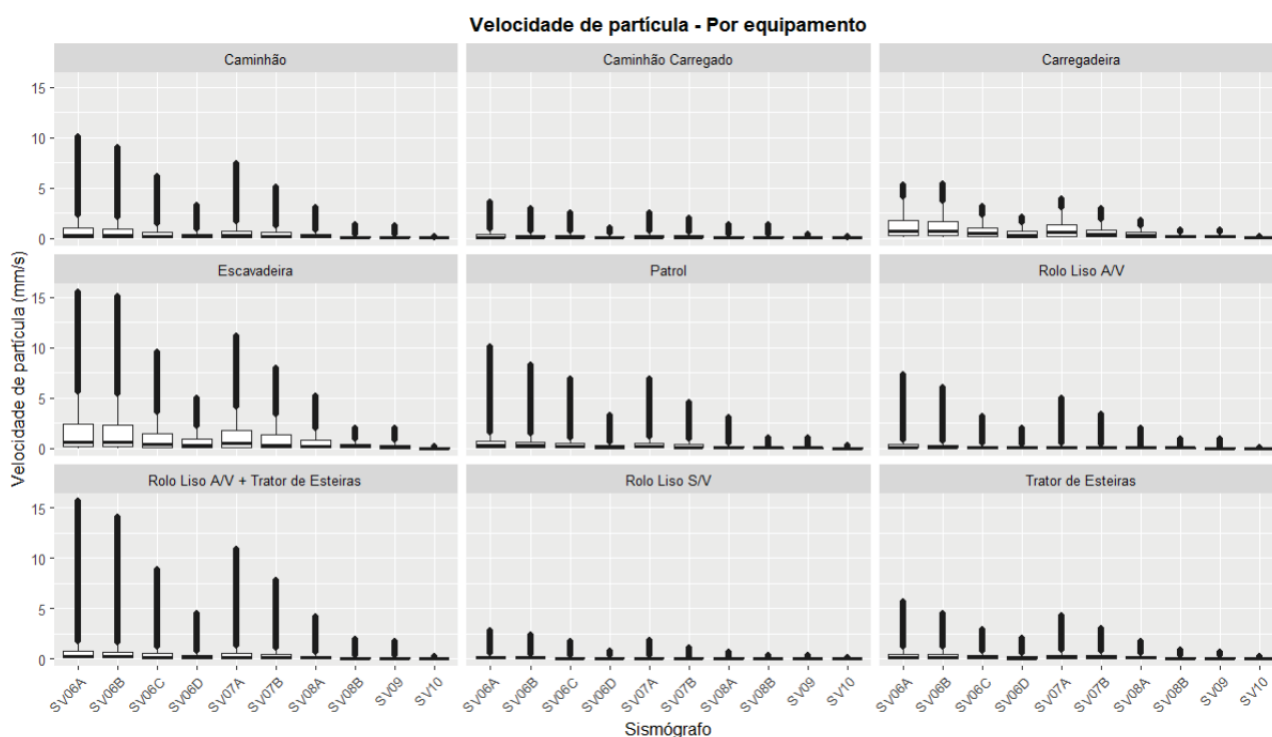
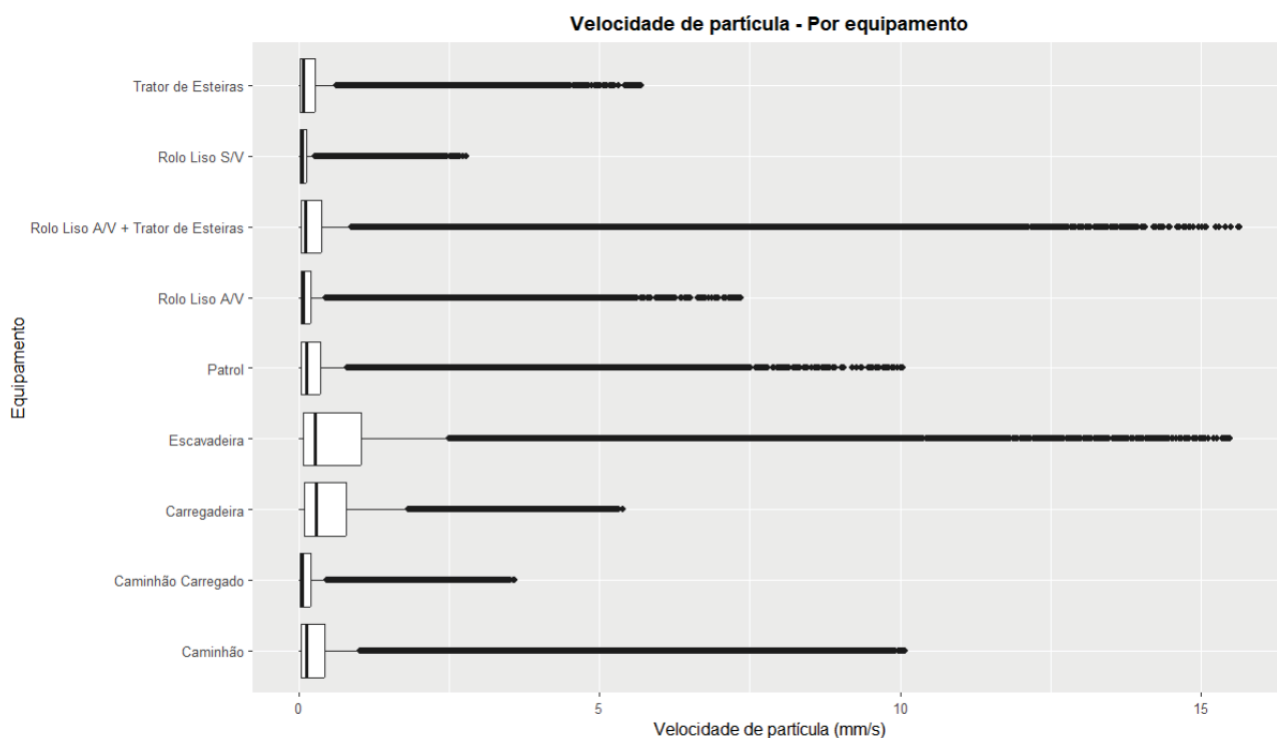


FIGURA 4.14 - ATERRO 1 – VELOCIDADES DE VIBRAÇÃO DE PARTÍCULA PARA OS EQUIPAMENTOS DE COMPACTAÇÃO - GERAIS.



Para equipamentos isolados, os maiores valores são observados para a Escavadeira, com picos próximos de 15 mm/s, e os menores valores são observados para o Rolo Liso Sem Vibração (S/V), com picos pouco acima de 2,5 mm/s. A combinação dos equipamentos Rolo Liso de Alta Vibração (A/V) com trator de esteiras também apresenta valores próximos aos máximos observados, acima de 15 mm/s.

Com relação as atenuações, verifica-se a mesma observação das atenuações com o distanciamento horizontal e vertical, com os maiores valores observados para o sismógrafo SV-06A, localizado próximo a superfície e no centro do aterro, os menores valores observados nos instrumentos mais afastados, com redução gradual.

Para a análise de distanciamentos seguros de operação de campo, buscando-se evitar sobreposições de feitos de vibrações, apresenta-se na FIGURA 4.15, os resultados dos dados de velocidade de vibração de pico (PPV) por distanciamento horizontal, para os sismógrafos de superfície. E para verificação da atenuação das vibrações ao longo da profundidade, apresenta-se na FIGURA 4.16, os resultados dados de velocidade de vibração de pico (PPV) por distanciamento vertical (com eixos invertidos, para facilitar o entendimento), para os sismógrafos em profundidade ao longo do eixo central da pista experimental. Os resultados são referentes a todos os equipamentos e para a altura de aterro experimental de 1m, que apresenta maior

proximidade com a fundação e, conseqüentemente, maiores registros de velocidades de vibração.

FIGURA 4.15 – VELOCIDADE DE VIBRAÇÃO DE PARTÍCULA DE PICO (PPV) POR DISTÂNCIA HORIZONTAL – ATERRO 1.

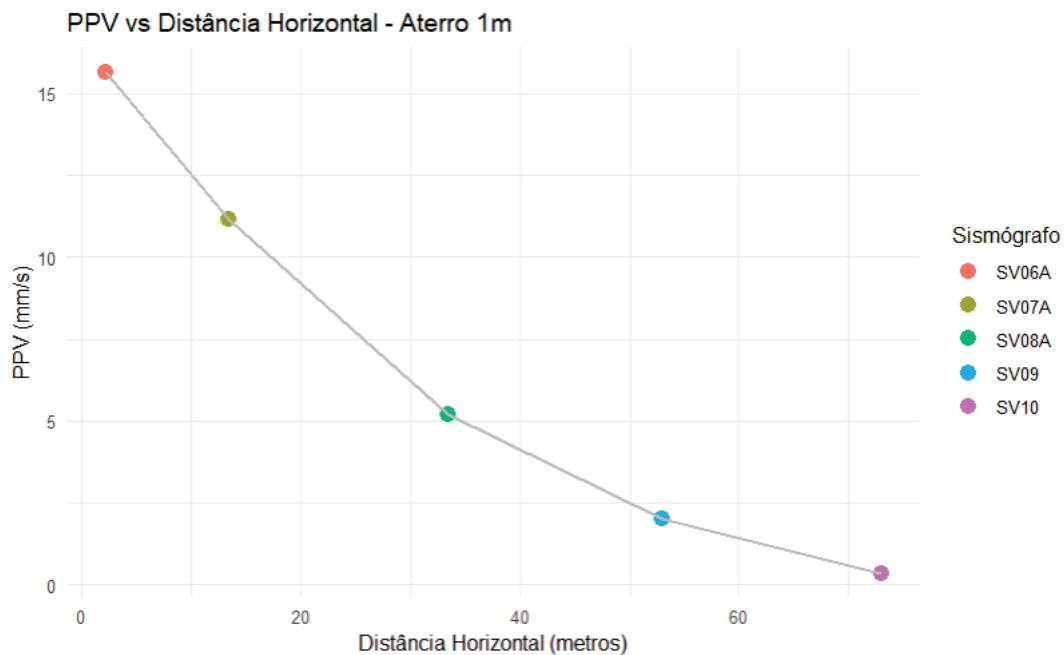
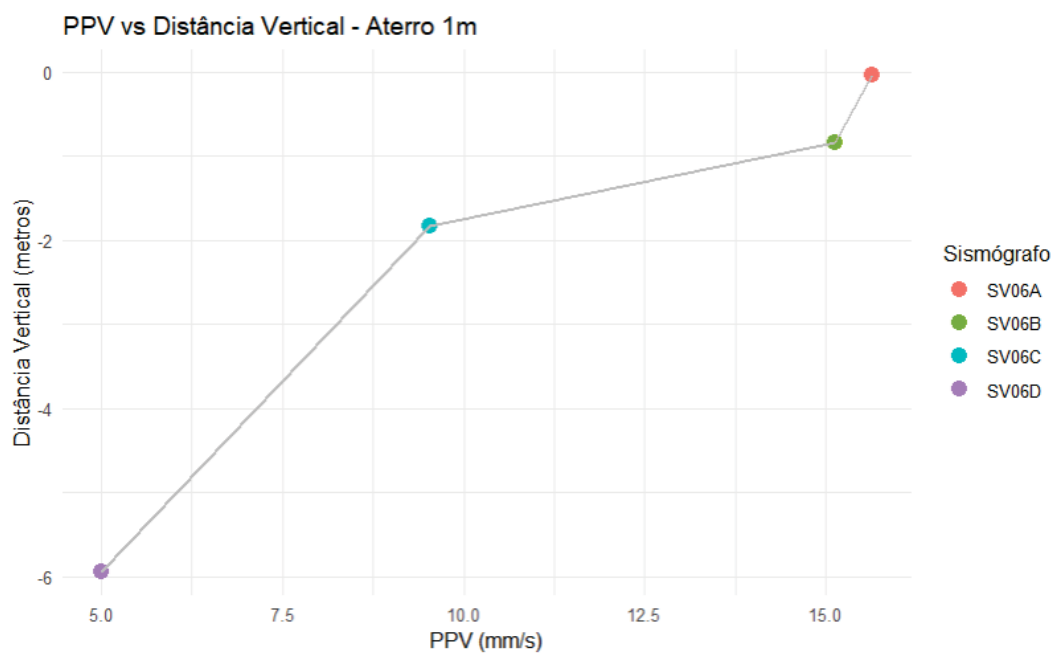


FIGURA 4.16 – DISTÂNCIA VERTICAL POR VELOCIDADE DE VIBRAÇÃO DE PARTÍCULA DE PICO (PPV) – ATERRO 1



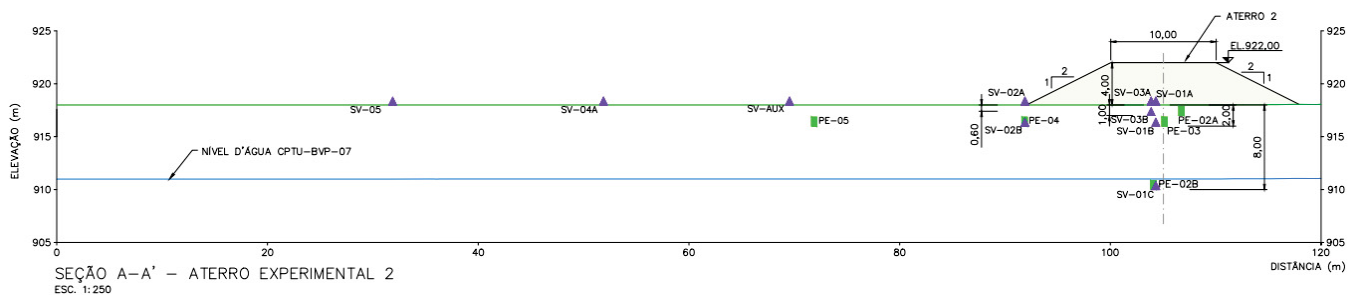
De acordo com o teste realizados, e para aterro/pista experimental de 1m de altura, somente com distanciamentos horizontais próximos a 35 m são registrados valores inferiores a 5mm/s, que é um valor de referência inicial. O mesmo ocorre para o distanciamento vertical para 6,0m de profundidade. Essa é somente uma análise inicial, a ser explorada no desenvolvimento do trabalho.

4.2.2 Aterro 2

Na FIGURA 4.17 reapresenta-se a seção de instrumentação do Aterro 2, com os leituras dos instrumentos e interpretações na sequência.

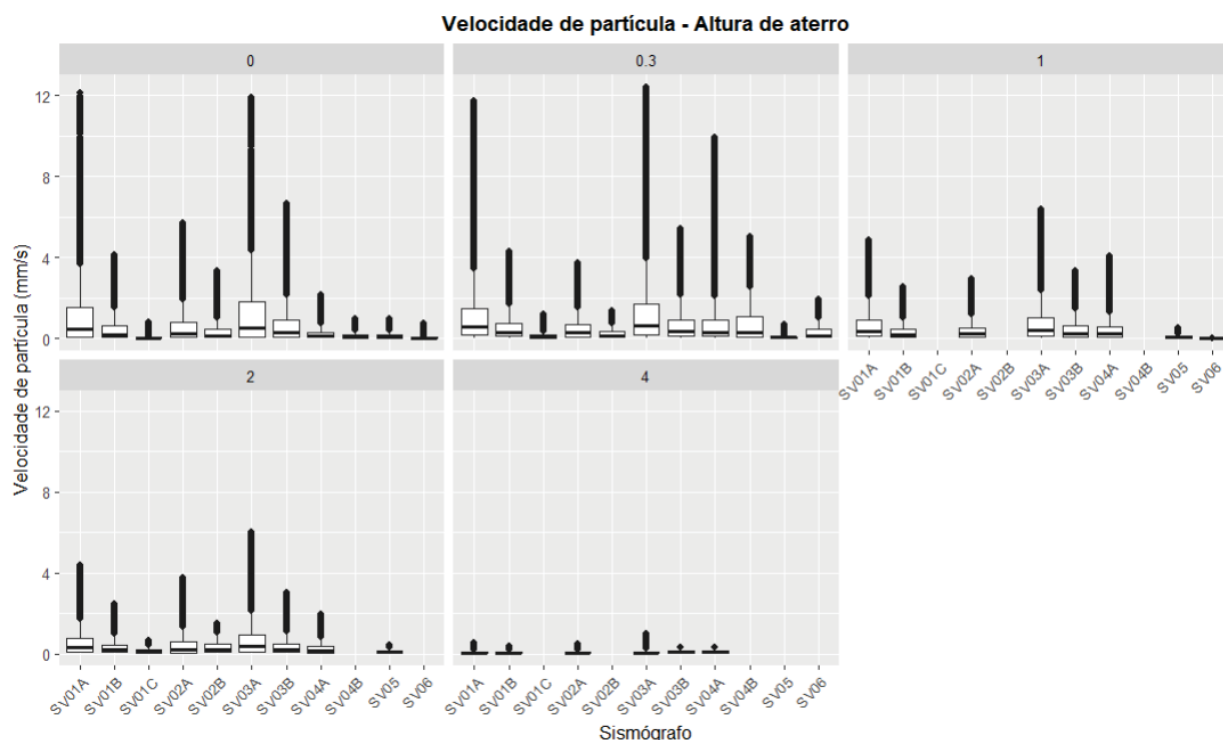
Para o Aterro 2, alguns sensores foram danificados ou perderam a funcionalidade durante os testes e, por isso, aparecem sem informações em alguns resultados.

FIGURA 4.17 - INSTRUMENTAÇÃO DO ATERRO 2.



Na FIGURA 4.18 apresenta-se os resultados completos das velocidades de vibração de partículas obtidas em todos os testes do Aterro 2, para cada sismógrafo de engenharia.

FIGURA 4.18 - ATERRO 2 – VELOCIDADE DE VIBRAÇÃO DE PARTÍCULA PARA AS ALTURAS DE ATERRO.



É possível verificar a atenuação das vibrações tanto em distância horizontal como vertical (profundidade). Para a análise da atenuação horizontal, observam-se os instrumentos SV-01A, SV-03A, SV-02A, SV-06, SV-04A e SV-05, com valores decrescentes com o distanciamento. Para atenuação vertical, verificam-se os instrumentos instalados em um mesmo furo, variando-se a profundidade, como os conjuntos (SV-01A, SV01B, SV-01C), (SV-03A e SV-03B) e (SV-02A e SV-02B). Ressalta-se as delimitações destes testes pela ausência de leituras de alguns instrumentos. É possível observar, também, conforme esperado, a redução das velocidades de vibração com o aumento da altura do aterro experimental, onde também não se observam velocidades significativas para o aterro de 4m.

Na FIGURA 4.19 apresentam-se os resultados das velocidades de vibração para os diferentes equipamentos de construção, por sismógrafo e para todas as alturas de aterro testadas (0 a 4m). E na FIGURA 4.20, apresentam-se os resumos totais por equipamento.

FIGURA 4.19 - ATERRO 2 – VELOCIDADES DE VIBRAÇÃO DE PARTÍCULA PARA OS EQUIPAMENTOS DE COMPACTAÇÃO, POR SISMÓGRAFO

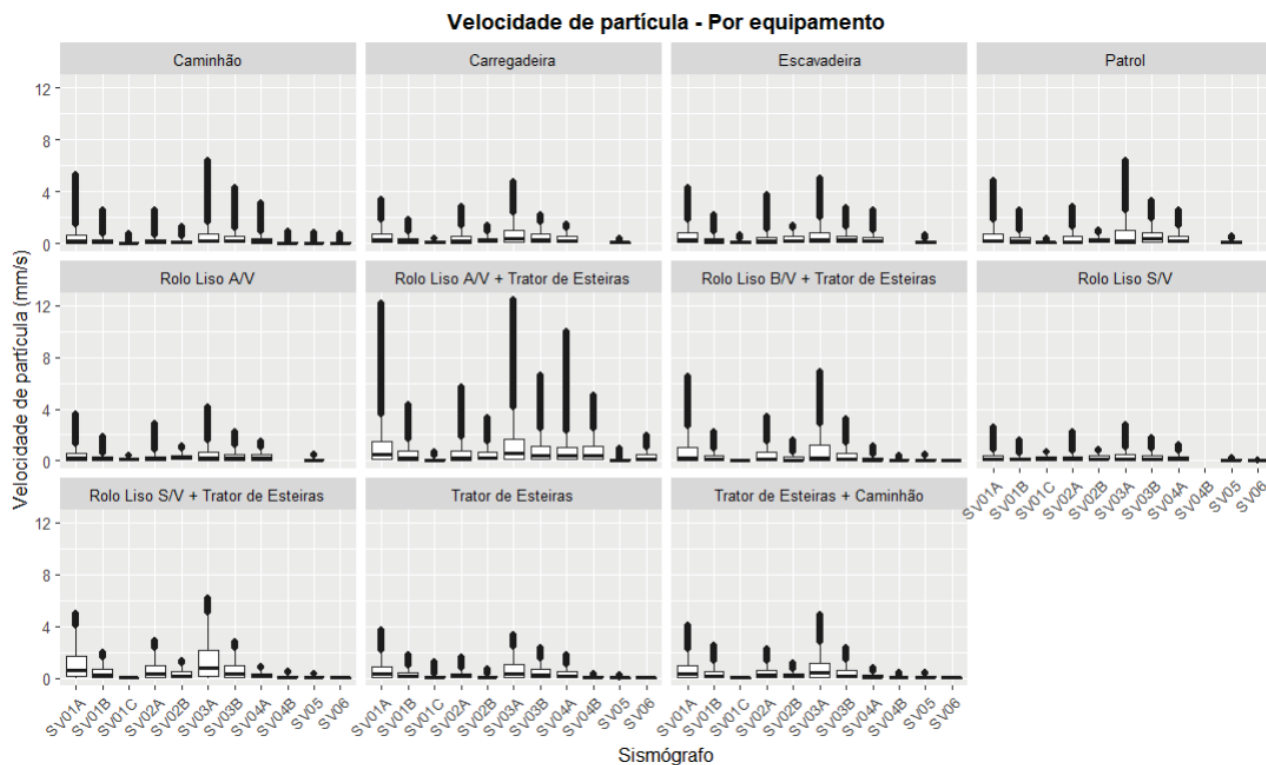
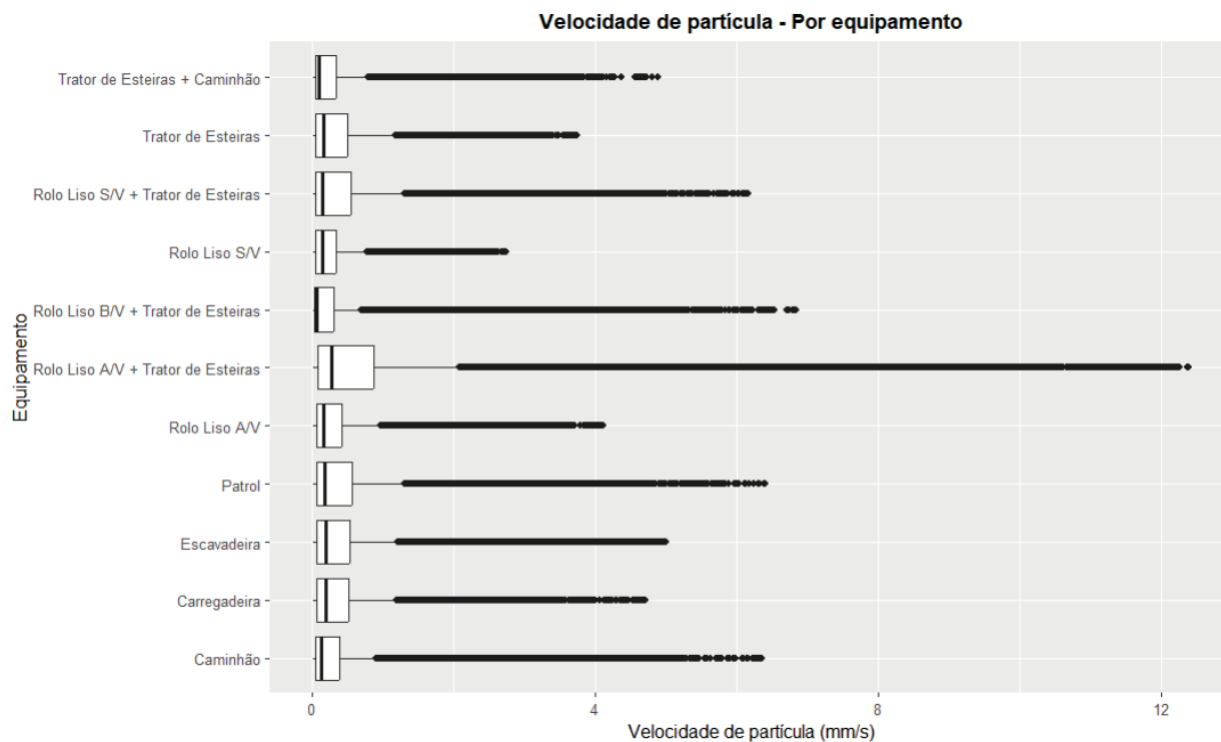


FIGURA 4.20 - ATERRO 1 – VELOCIDADES DE VIBRAÇÃO DE PARTÍCULA PARA OS EQUIPAMENTOS DE COMPACTAÇÃO – GERAIS.



Para equipamentos isolados, os maiores valores são observados para a Patrol e o Caminhão, com picos próximos e acima de 6 mm/s, e os menores valores são observados para o Rolo Liso Sem Vibração (S/V), com picos pouco acima de 2,5 mm/s. A combinação dos equipamentos Rolo Liso de Alta Vibração (A/V) com Trator de Esteiras apresenta os maiores valores observados, acima de 12 mm/s.

Com relação as atenuações, verifica-se a mesma observação das atenuações com o distanciamento horizontal e vertical, com os maiores valores observados para os sismógrafos SV-01A e SV-03A, localizado próximo a superfície e no centro do aterro, os menores valores observados nos instrumentos mais afastados, com redução gradual.

Para o Aterro 2, foram observados valores de velocidades de vibração de partículas inferiores aos observados para o Aterro 1, isto pode estar relacionado com a maior espessura de aterro pré-existente e maior distanciamento do nível de água em relação ao Aterro 1.

Para a análise de distanciamentos seguros de operação de campo, buscando-se evitar sobreposições de fechos de vibrações, apresenta-se na FIGURA 4.21, os resultados dos dados de velocidade de vibração de pico (PPV) por distanciamento horizontal, para os sismógrafos de superfície. E para verificação da atenuação das vibrações ao longo da profundidade, apresenta-se na FIGURA 4.22, os resultados dados de velocidade de vibração de pico (PPV) por distanciamento vertical (com eixos invertidos, para facilitar o entendimento), para os sismógrafos em profundidade ao longo do eixo central da pista experimental. Os resultados são referentes a todos os equipamentos e para a altura de aterro experimental de 1m, que apresenta maior proximidade com a fundação e, conseqüentemente, maiores registros de velocidades de vibração.

FIGURA 4.21 – VELOCIDADE DE VIBRAÇÃO DE PARTÍCULA DE PICO (PPV) POR DISTÂNCIA HORIZONTAL – ATERRO 2.

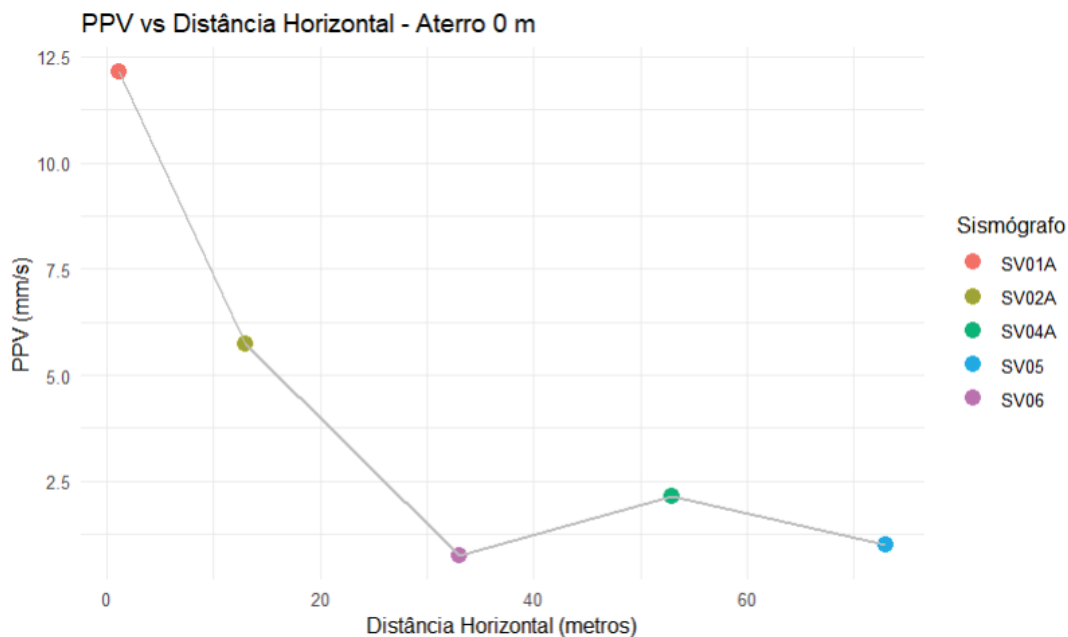
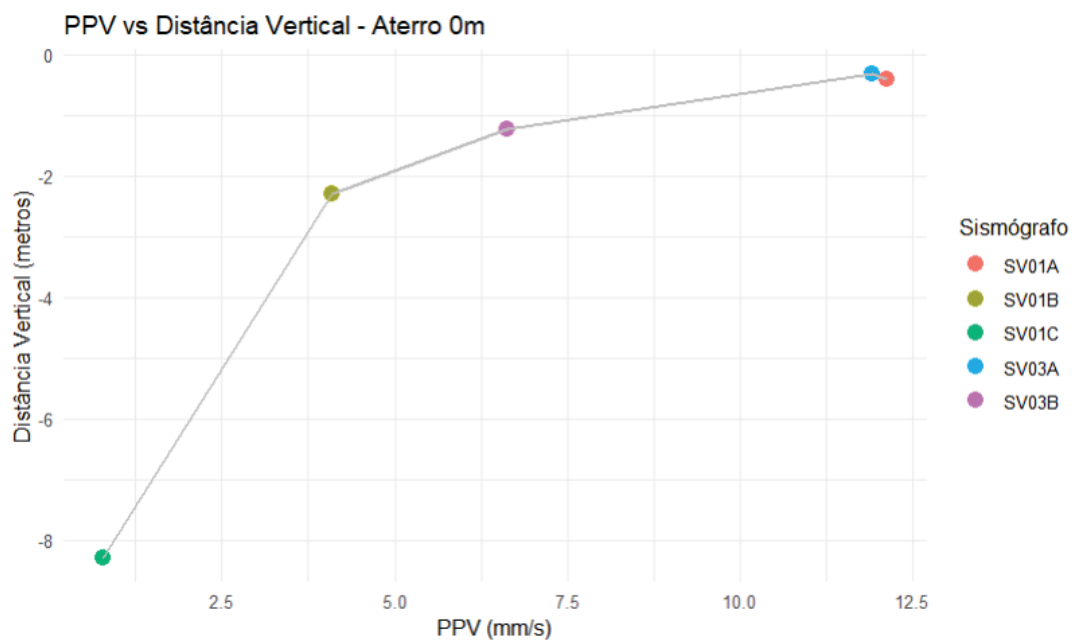


FIGURA 4.22 – DISTÂNCIA VERTICAL POR VELOCIDADE DE VIBRAÇÃO DE PARTÍCULA DE PICO (PPV) – ATERRO 2.



De acordo com o teste realizados, e para aterro/pista experimental de 0m (ou seja, sem pista), com distanciamentos horizontais próximos a 20 m são registrados valores inferiores a 5mm/s, que é um valor de referência inicial. O mesmo ocorre para

o distanciamento vertical para 2,0m de profundidade. Também é somente uma análise inicial, a ser explorada no desenvolvimento do trabalho.

4.2.3 Análise dos resultados das vibrações

A respeito dos resultados específicos dos sismógrafos de engenharia, com os dados de velocidade de vibração de partículas, algumas observações iniciais podem ser realizadas, que são:

- Comparando-se o Aterro 1 e o Aterro 2, foram observados valores inferiores de velocidades para o Aterro 2, onde mesmo com combinações de equipamentos não foram medidos valores próximos aos máximos observados no Aterro 1, sendo o Aterro 2 testado desde a superfície, sem a necessidade de lançamento prévio de lastro de conquista. Isto pode ser devido a estratigrafia das fundação do Aterro 2, com maior espessura de aterro pré-existente, como se fosse um aterro de maior espessura, e maior distanciamento do nível de água do local (ressecamento do material), sendo um meio não saturado e com presença de ar entre as partícula de solo.
- Para o Aterro 1, com relação aos equipamentos e de forma isolada, a Escavadeira apresentou maior velocidade de vibração (15,0 mm/s), seguido da Patrol (10,0 mm/s), Rolo Liso A/V (8,0 mm/s), Trator de Esteiras (6,0 mm/s), Carregadeira (5,5 mm/s), Caminhão Carregado (3,7 mm/s), Rolo Liso S/V (2,7 mm/s). Tanto a Escavadeira como a Patrol realizaram atividades nos aterros além do trânsito do equipamento, com escavação e escarificação, respectivamente, o que contribui para os resultados obtidos.
- Ainda para o Aterro 1, porém para os comboios e combinações de equipamentos, a combinação de Rolo Liso A/V apresentou valores considerados elevados de vibração, com 15 mm/s, semelhantes aos máximos observados para a Escavadeira, porém somente com o trânsito dos equipamentos. Neste caso verifica-se que ocorre a sobreposição dos efeitos isolados de cada equipamento. Situação semelhante ocorre com os comboios de Caminhões Vazios, chegando-se a velocidades de 10 mm/s.

- Para o Aterro 2, também com relação aos equipamentos e de forma isolada, a Patrol e o Caminhão apresentaram maiores velocidades de vibração (6,5 mm/s), seguido da Escavadeira (5,0 mm/s), Carregadeira (4,8mm/s), Rolo Liso A/V (4,1 mm/s) e Rolo Liso S/V (2,9 mm/s). Da mesma forma como para o Aterro 1, a Escavadeira e a Patrol realizaram atividades nos aterros além do trânsito do equipamento, com escavação e escarificação, respectivamente, o que contribui para os resultados obtidos. Porém, para o Aterro 2 foram observados valores significativos para os caminhões.
- Seguindo com o Aterro 2, para os comboios e combinações de equipamentos, onde foram realizadas mais combinações em relação ao Aterro 1, os testes com Rolo Liso A/V + Trator de Esteiras apresentam os maiores valores de velocidade de vibração de partícula, passando de 12 mm/s, com reduções para a consideração do Rolo Liso com Baixa Vibração - B/V (6,9 mm/s) ou Sem Vibração - S/V (6,1 mm/s), e ainda menor para a combinação do Trator de Esteiras com o Caminhão (5,0 mm/s), porém sempre superiores aos testes com equipamentos isolados, evidenciado a sobreposição dos efeitos.
- Para verificação das atenuações das vibrações com o distanciamento horizontal e vertical, os resultados apresentam distâncias horizontais de 35m para no Aterro 1 e 20m para o Aterro 2 com valores considerados inicialmente significativos de PPV (5mm/s). Para o distanciamento vertical, esses valores de vibração ocorrem até 6m para o aterro 1 e até 2m para o Aterro 2. Verifica-se maior atenuação das vibrações para o Aterro 2, que tem maior espessura de aterro/lastro pré-existente e maior distanciamento do nível de água, com rejeitos não saturados.
- Para o Aterro 2, os dados apresentaram algumas deficiências e falta de informações em alguns testes, o que reduz a sua confiabilidade e validação, sendo os dados do Aterro 1 mais representativos para as análises realizadas, onde sempre todos os instrumentos estiveram em funcionamento.

4.3 POROPRESSÕES – PIEZÔMETROS

Neste item são apresentados os resultados específicos dos piezômetros elétricos, com os dados de poropressão obtidos nos testes de campo. Os resultados são apresentados para cada aterro experimental (Aterro 1 e 2), e para as diferentes alturas de aterro e equipamentos testados.

Para os dados de poropressão foram analisadas as leituras diretas dos instrumentos, que são as poropressões totais medidas (u) e, também, as variações de poropressões (Δu ou du) causadas pelos testes de campo com o tráfego e atividades dos equipamentos.

Para as leituras diretas dos instrumentos, foram consideradas todos os dados obtidos, a cada segundo, para todos os testes e todos os piezômetros instalados em campo.

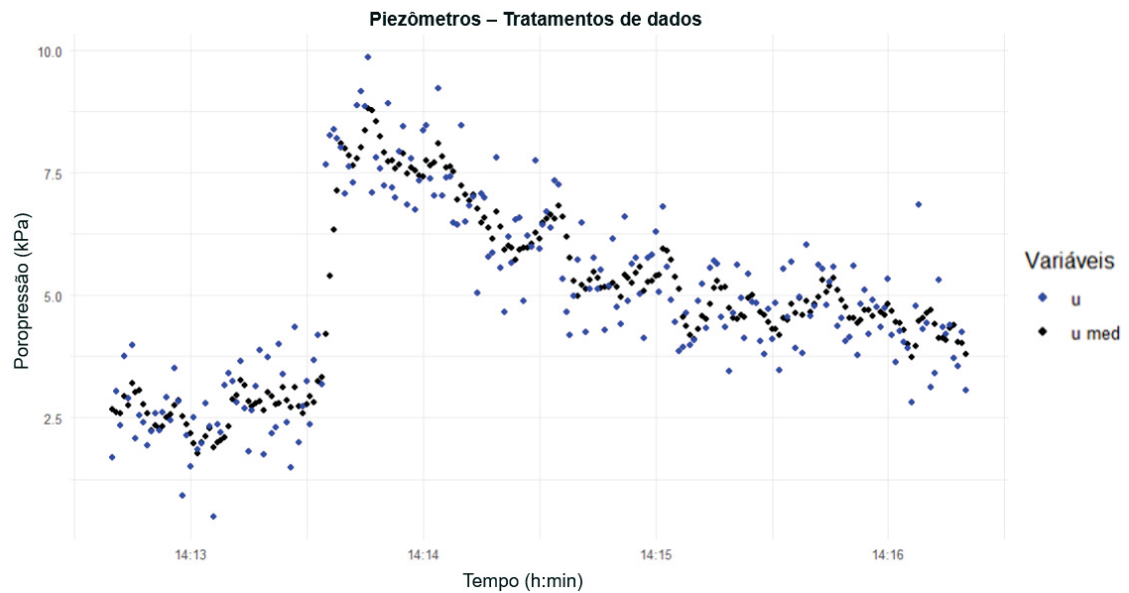
As variações das poropressões foram obtidas subtraindo-se os picos ($u_{\text{máx}}$) observados nos testes dos valores médios obtidos antes da passagem do equipamento (u_0). Para este caso, e para a redução do erro devido a precisão do instrumento, trabalhou-se com a média móvel de grau 5 dos dados brutos. Para a separação dos dados antes e depois da passagem dos equipamentos, considerou-se o tempo onde o sismógrafo correspondente ao piezômetro (localizado ao seu lado), apresentou velocidade de vibração de partícula maior ou igual a 0,1 mm/s. Para esta análise de variação das poropressões, foram considerados somente os piezômetros que apresentam sismógrafos correspondentes, e cada teste representou um par de valores de poropressão inicial (u_0) e variação de poropressão (Δu ou du) dos conjuntos de instrumentos.

As interpretações dos dados considerados nas análises pode ser resumida da seguinte forma:

- **u** = poropressão total medida pelo instrumento;
- **$u_{\text{máx}}$** = valor máximo observado considerando a média móvel dos dados brutos;
- **u_0** = valor médio observado antes da passagem do equipamento de teste, representado pela detecção de velocidade de vibração de partícula maior ou igual a 0,1 mm/s do sismógrafo correspondente.
- **Δu ou du** = variação máxima da poropressão observada em cada teste, obtida pela subtração de $u_{\text{máx}}$ com u_0 .

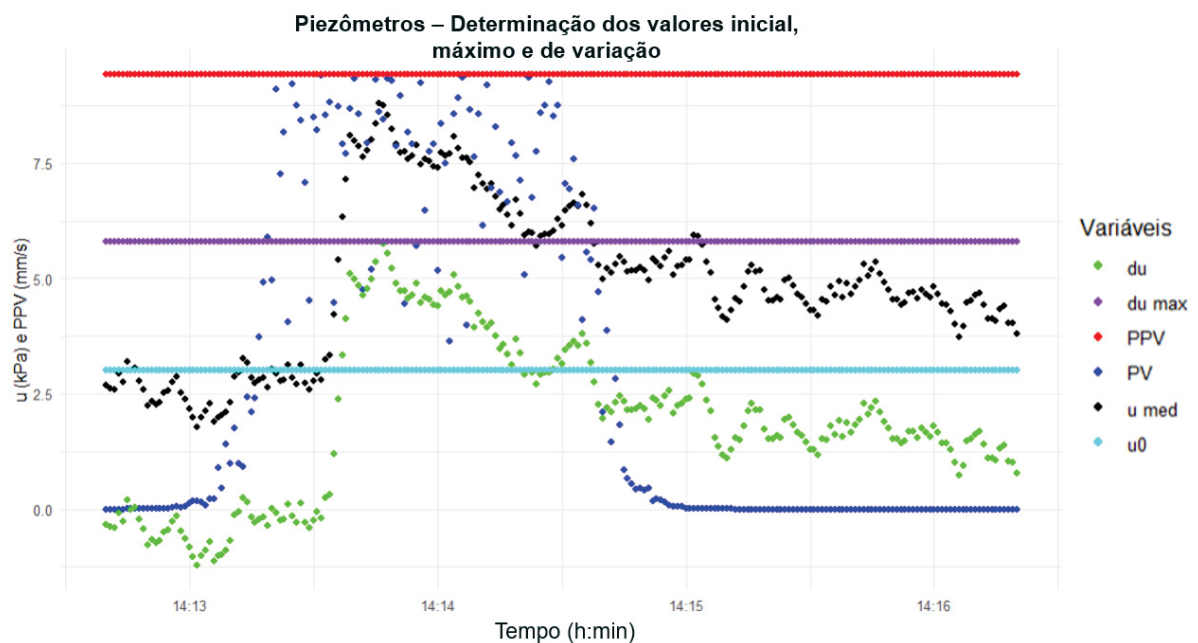
Na FIGURA 4.23 apresenta-se um exemplo do tratamento de dados para os piezômetros considerando a aplicação da média móvel aos dados brutos.

FIGURA 4.23 – TRATAMENTO DE DADOS PARA OS PIEZÔMETROS – MÉDIA MÓVEL



Na apresenta-se um exemplo do tratamento de dados para os piezômetros para a determinação dos valores iniciais (u_0), máximos (u_{max}) e variações (Δu ou du).

FIGURA 4.24 - TRATAMENTO DE DADOS PARA OS PIEZÔMETROS – DETERMINAÇÃO DOS VALORES INICIAL, MÁXIMO E DE VARIAÇÃO



Os resultados das análises também são apresentados como diagramas de caixa ou gráficos de caixa, assim como para os sismógrafos (ver FIGURA 4.10).

4.3.1 Aterro 1

Os resultados das análises dos dados dos piezômetros para o Aterro 1 são apresentados nos itens que seguem, e separadamente para os dados totais (u) e de variações (Δu ou du).

4.3.1.1 Aterro 1 – Dados totais (u)

Nas figuras seguintes são apresentados os resultados das poropressões totais (u) para cada altura de aterro (1m a 4m) e piezômetro (PE06 a PE09) (FIGURA 4.25), por equipamento e piezômetro para todas as alturas de aterro (FIGURA 4.26), e por equipamento com todas os dados dos testes (FIGURA 4.27).

FIGURA 4.25 – ATERRO 1 - POROPRESSÕES TOTAIS POR ALTURA DE ATERRO (1 a 4m) E PIEZÔMETRO (PE06 a PE09).

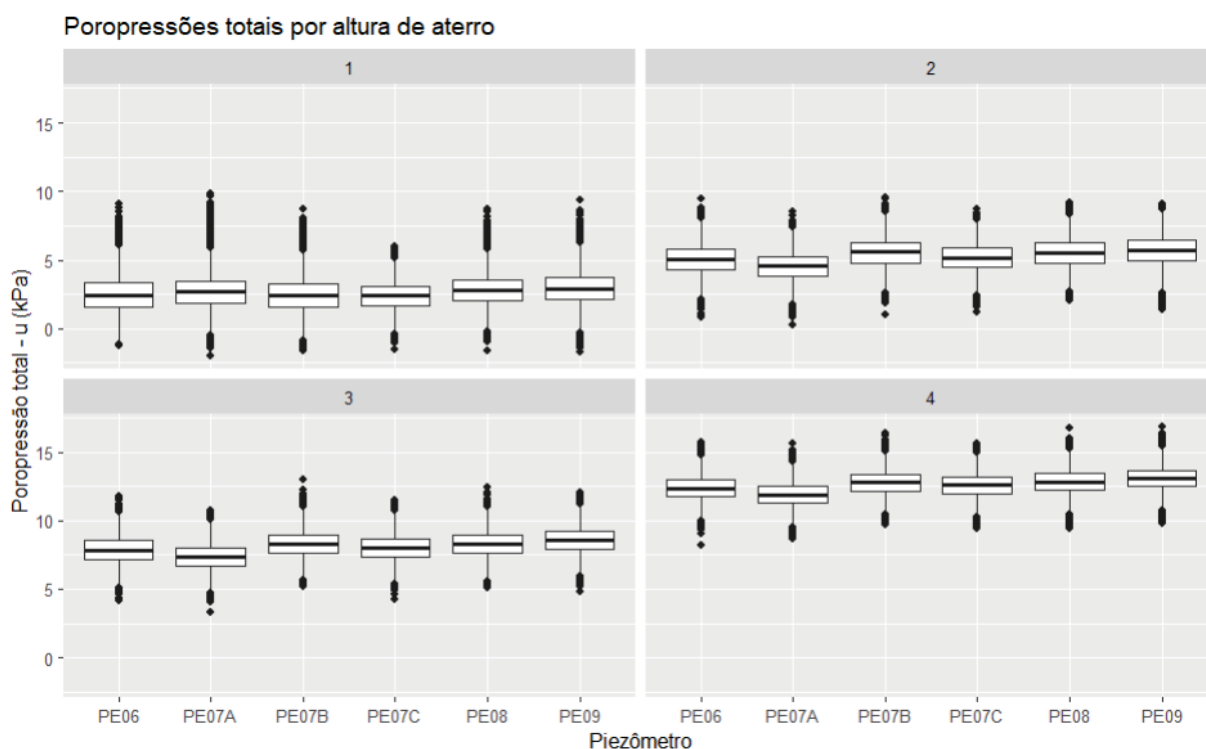


FIGURA 4.26 - ATERRO 1 - POROPRESSÕES TOTAIS POR TIPO DE EQUIPAMENTO E PIEZÔMETRO (PE06 a PE09).

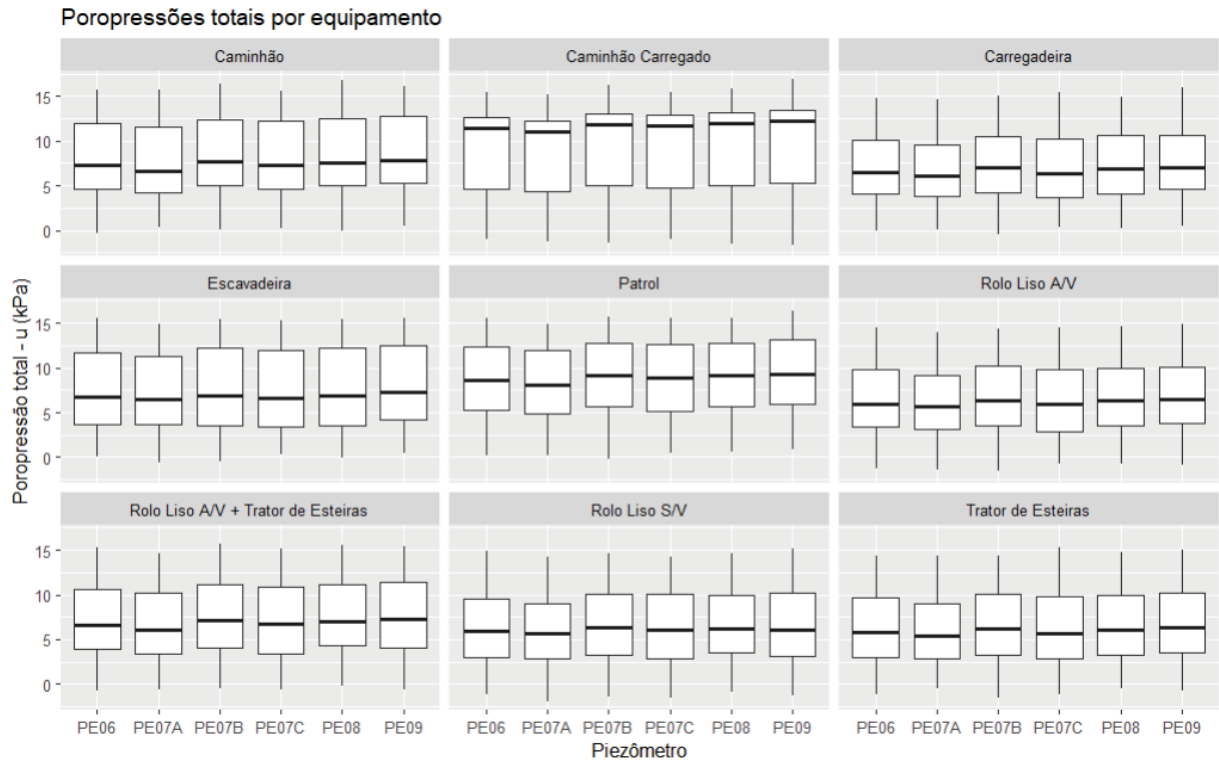
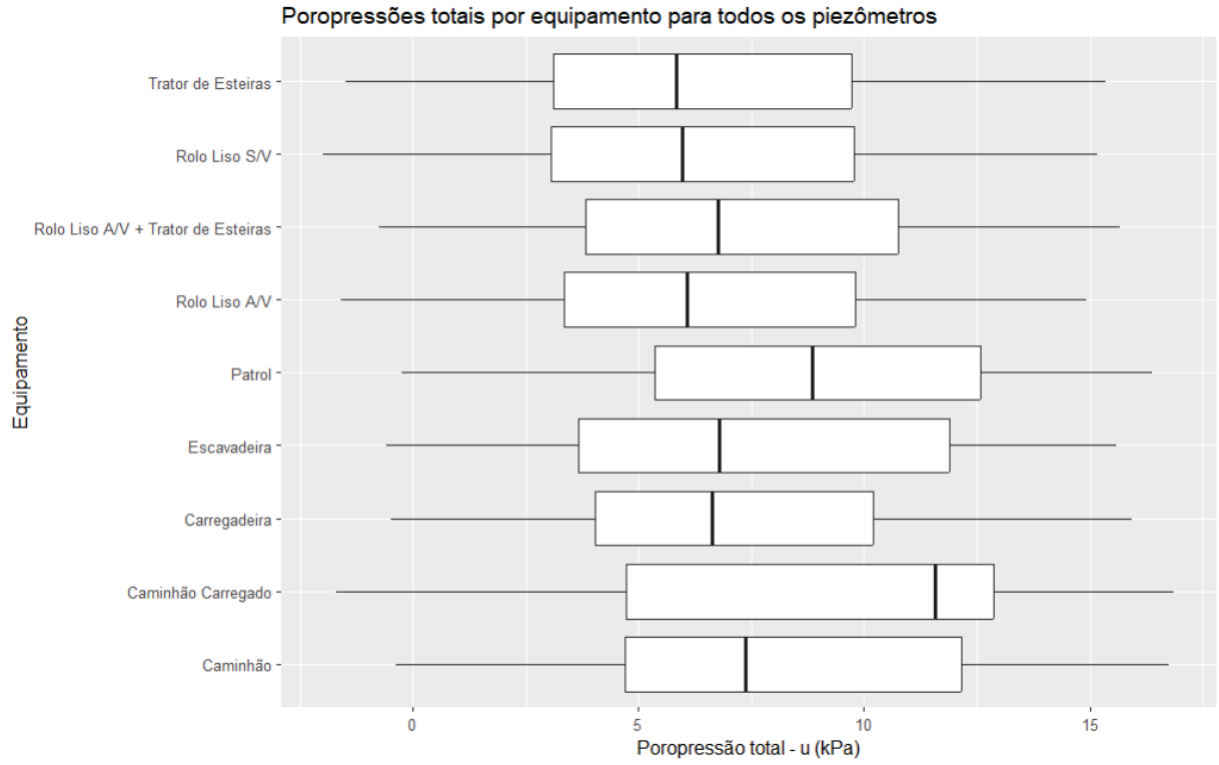


FIGURA 4.27 - ATERRO 1 - POROPRESSÕES TOTAIS POR EQUIPAMENTO E CONSIDERANDO TODOS OS TESTES E PIEZÔMETROS.



Na FIGURA 4.25, observa-se a redução da a variação entre os limites inferior e superior das poropressões totais com o aumento da altura de aterro, porém também se observa que os valores mínimos tiveram incrementos entre os testes como 1m e 4m, o que pode ser devido a uma elevação da freática na região, uma vez que os testes, neste aterro, foram iniciados em 08/09/2022 e finalizados em 07/10/2022.

Essa condição pode levar a interpretações errôneas nas análises por equipamento e com todas as alturas de aterro, como observado nas figuras seguintes (FIGURA 4.26 e FIGURA 4.27), onde os resultados apresentam pouca variação entre os equipamentos por partirem de limites inferiores variáveis. Outra consideração é a variação ou precisão do próprio instrumento, conforme já comentado. Com isso, os resultados das variações de poropressões observadas em cada teste, apresentados no item seguinte, são mais representativos para os efeitos causados pelos equipamentos, nos diferentes testes realizados.

4.3.1.2 Aterro 1 – Variações de poropressões (Δu ou du)

Neste item são apresentados os resultados das variações de poropressões totais (Δu ou du) obtidas em cada teste. Para estas análises, cada valor de “ Δu ou du ” representa o resultado de um teste específico.

Nas figuras seguintes são apresentadas os resultados das variações de poropressões para cada altura de aterro (1m a 4m) e piezômetro (PE06 a PE09) (FIGURA 4.28), por equipamento e piezômetro para todas as alturas de aterro (FIGURA 4.29), e por equipamento com todas os dados dos testes (FIGURA 4.30). Ressalta-se que para as análises de variações de poropressões, só foram considerados os piezômetros associados a sismógrafos, para as posteriores análises de correlação entre as vibrações e poropressões.

Os piezômetros PE07 (A, B e C) estão localizados no centro do aterro experimental e mesma projeção vertical, com variação da profundidade de instalação, com 0,9m para o PE07A, 1,9m para o PE07B e 6,0m para o PE07C. Já o piezômetro PE09 está localizado logo ao lado da pista experimental e a 0,9m de profundidade, e sob menor influência da altura dos aterros e das sobrecargas / pesos próprios dos equipamentos de construção

FIGURA 4.28 – ATERRO 1 - VARIAÇÃO DE PORPRESSÃO POR ALTURA DE ATERRO (1 a 4 m) E PIEZÔMETRO (PE07A A PE09).

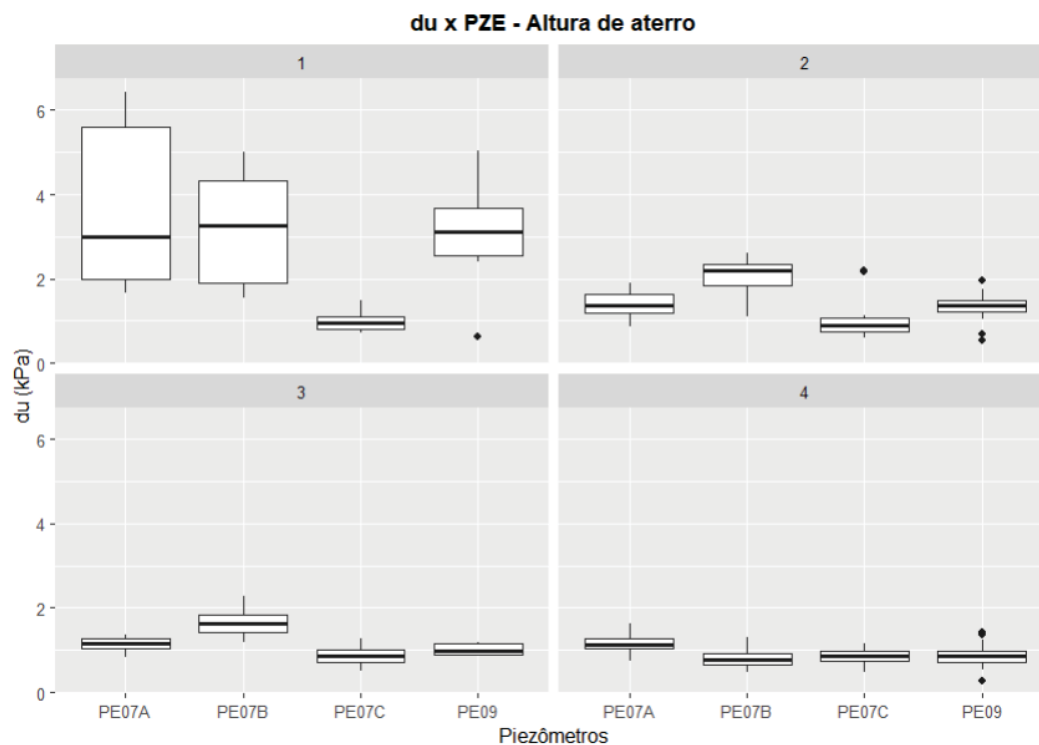


FIGURA 4.29 – ATERRO 1 – VARIAÇÕES DE POROPRESSÕES POR EQUIPAMENTO E PIEZÔMETRO.

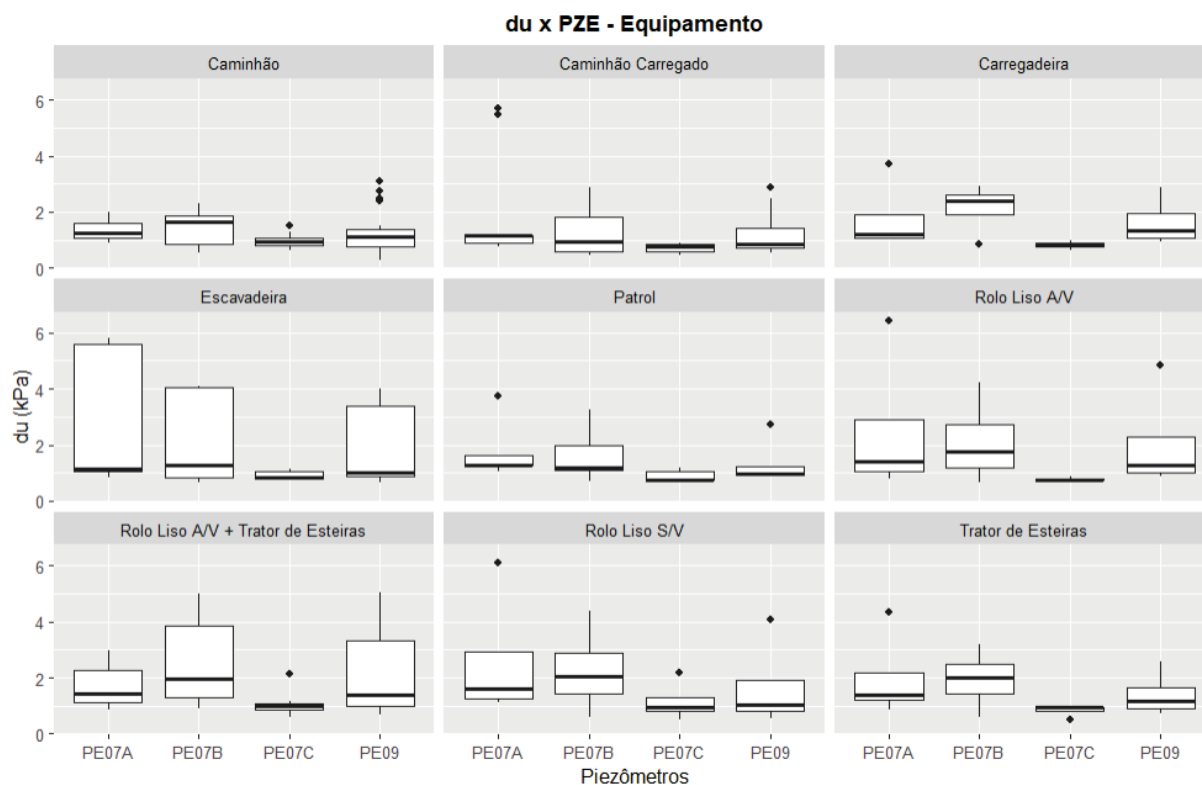
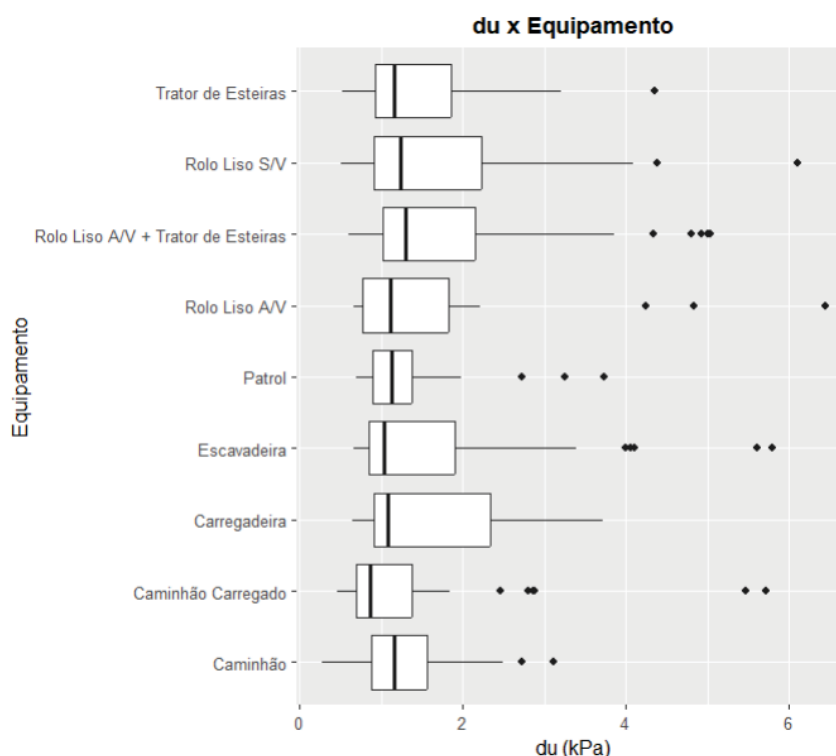


FIGURA 4.30 – ATERRO 1 – VARIAÇÕES DE PORPRESSÕES POR EQUIPAMENTO – PARA TODOS OS TESTES E PIEZÔMETROS.



Conforme esperado, as variações das poropressões permitem melhores interpretações dos testes realizados e, para o Aterro 1, com coerência entre os resultados, com maiores variações de poropressões no PE07A, localizado mais próximo a superfície e no centro do aterro, com reduções graduais para o PE07B e PE07C, na maioria dos casos. O mesmo ocorre com as alturas dos aterros, sendo a altura de 4m quase não registrando variações de poropressões, sendo indicativo da menor ou não influência dos equipamentos de construção nas poropressões das fundações. Para o PE09, instalado próximo à superfície, porém na lateral do aterro experimental, observaram-se valores de poropressão pouco inferiores ao PE07A, na maioria dos testes, sendo também um comportamento esperado devido ao seu afastamento horizontal em relação ao centro da pista experimental.

4.3.2 Aterro 2

Os resultados das análises dos dados dos piezômetros para o Aterro 2 são apresentados nos itens que seguem, e separadamente para os dados totais (u) e de variações (Δu ou du).

4.3.2.1 Aterro 2 – Dados totais (u)

Nas figuras seguintes são apresentados os resultados das poropressões totais (u) para cada altura de aterro (0m a 4m) e piezômetro (PE01 a PE05) (FIGURA 4.31), por equipamento e piezômetro para todas as alturas de aterro (FIGURA 4.32), e por equipamento com todas os dados dos testes (FIGURA 4.33).

FIGURA 4.31 - ATERRO 2 - POROPRESSÕES TOTAIS POR ALTURA DE ATERRO (0 A 4m) E PIEZÔMETRO (PE01 A PE05).

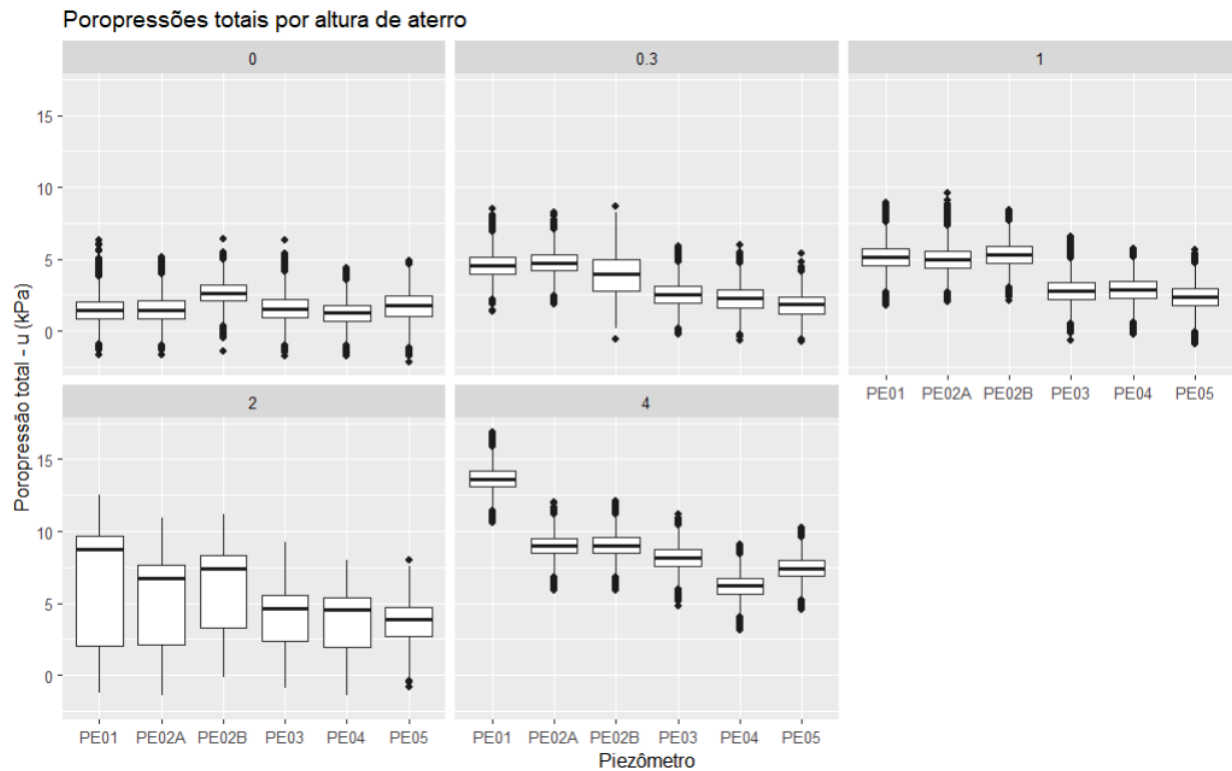


FIGURA 4.32 - ATERRO 2 - POROPRESSÕES TOTAIS POR TIPO DE EQUIPAMENTO E PIEZÔMETRO (PE01 a PE05).

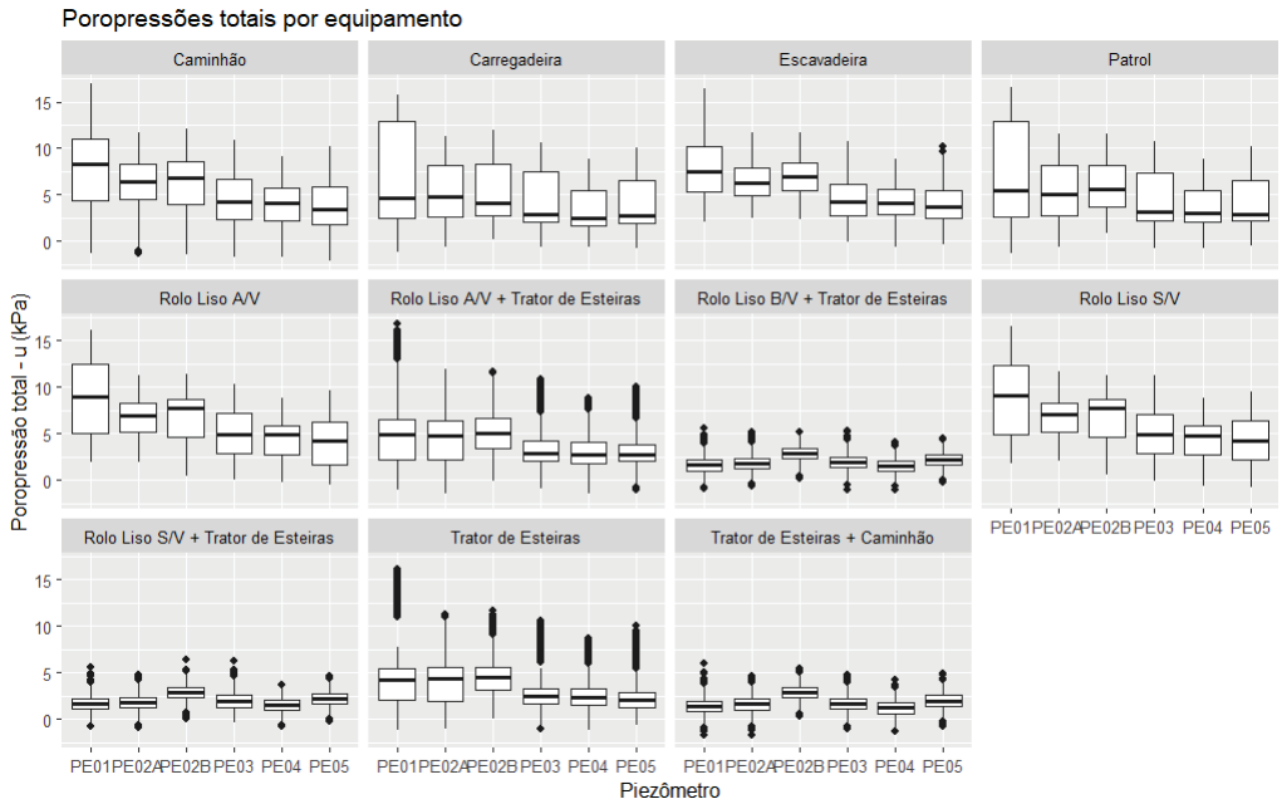
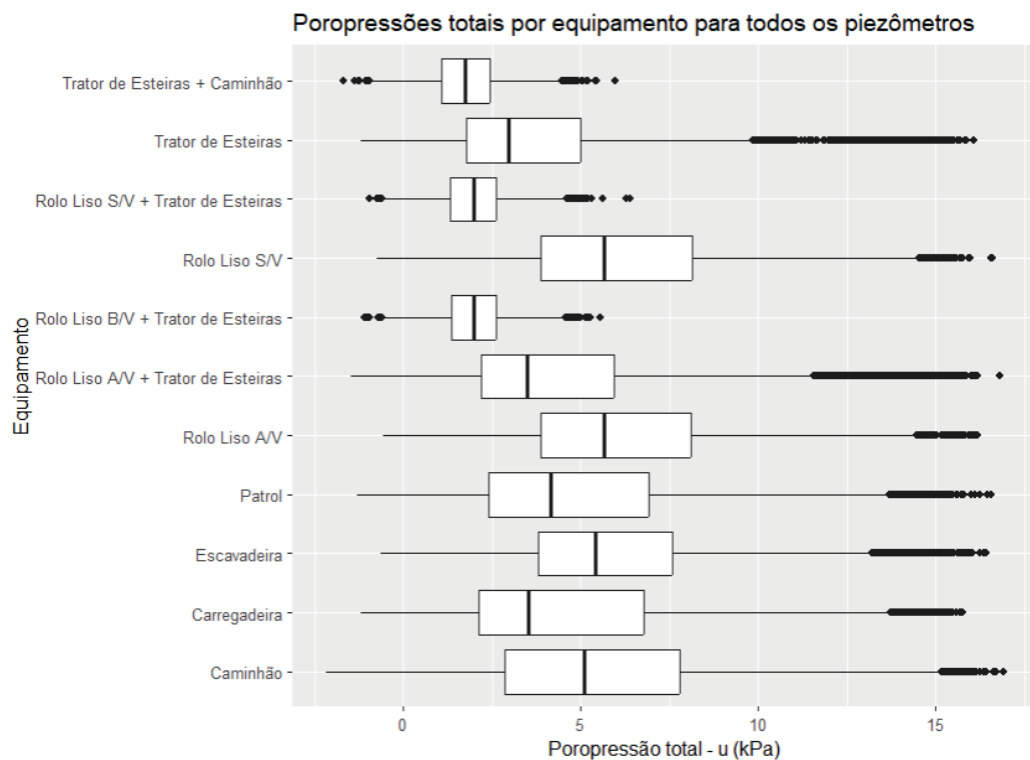


FIGURA 4.33 - ATERRO 2 - POROPRESSÕES TOTAIS POR EQUIPAMENTO E CONSIDERANDO TODOS OS TESTES E PIEZÔMETROS.



Assim como para o Aterro 1, a interpretação das leituras diretas das poropressões, com todos as alturas de aterro testadas pode levar a interpretações incorretas, com limites inferiores ainda mais variáveis do que o Aterro 1, até para uma mesma altura de aterro. Além disso, para o Aterro 2, existe a condição de não saturação do solo de fundação, com somente o piezômetro PE02B localizado abaixo do nível de água do terreno, estando os demais piezômetros instalados em materiais não saturados ou parcialmente saturados, conforme indicam os resultados diretos do ensaio CPTU no locam (FIGURA 3.11), que indicam geração de excesso de poropressão mesmo acima do nível de água do terreno, mostrando a condição de possível saturação parcial dos materiais. Com isso, os resultados não apresentaram um padrão de comportamento coerente, com resultados que podem ser interpretados como não conclusivos, sendo necessário aprofundar as análises para tentar identificar algum padrão de comportamento, como as análises de variações de poropressões apresentadas no item seguinte.

4.3.2.2 Aterro 2 – Variações de poropressões (Δu ou du)

Neste item são apresentados os resultados das variações de poropressões totais (Δu ou du) obtidas em cada teste. Para estas análises, cada valor de “ Δu ou du ” representa o resultado de um teste específico.

Nas figuras seguintes são apresentados os resultados das variações de poropressões totais (Δu ou du) para cada altura de aterro (0m a 4m) e piezômetro (PE02A a PE05) (FIGURA 4.34), por equipamento e piezômetro para todas as alturas de aterro (FIGURA 4.35), e por equipamento com todas os dados dos testes (FIGURA 4.36). Ressalta-se que para as análises de variações de poropressões, só foram considerados os piezômetros associados a sismógrafos, para a posteriores análises de correlações.

Os piezômetros PE02 (A e B) estão localizados no centro do aterro experimental e mesma projeção vertical, com variação da profundidade de instalação, com 1,2m para o PE02A e 8,3m para o PE02B. O piezômetro PE04 está localizado logo ao lado da pista experimental e a 2,3m de profundidade, e o PE05 está mais afastado da pista e a 2,3m de profundidade, estes dois últimos sob menor influência da altura dos aterros e das sobrecargas / pesos próprios dos equipamentos. O piezômetro PE01, apesar de estar associado a um sismógrafo (SV04B) não foi

considerado devido ao mau funcionamento do sismógrafo SV04B, que não apresentou dados em diversos testes realizados.

FIGURA 4.34 - ATERRO 2 - VARIAÇÃO DE PORPRESSÃO POR ALTURA DE ATERRO E PIEZÔMETRO.

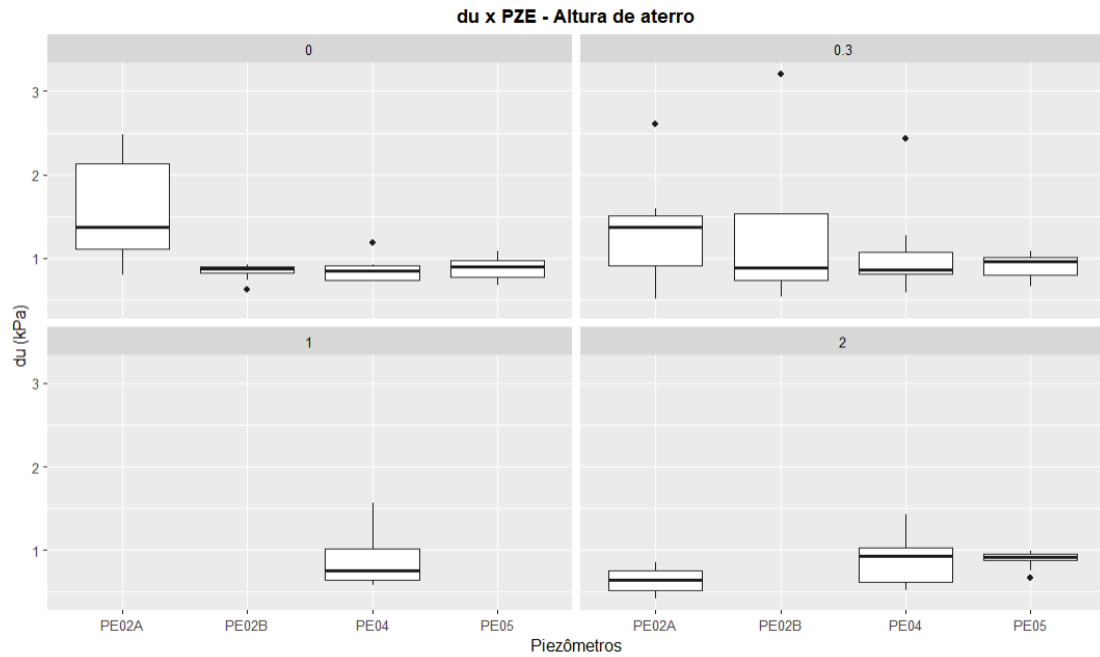


FIGURA 4.35 - ATERRO 2 – VARIAÇÕES DE POROPRESSÕES POR EQUIPAMENTO E PIEZÔMETRO.

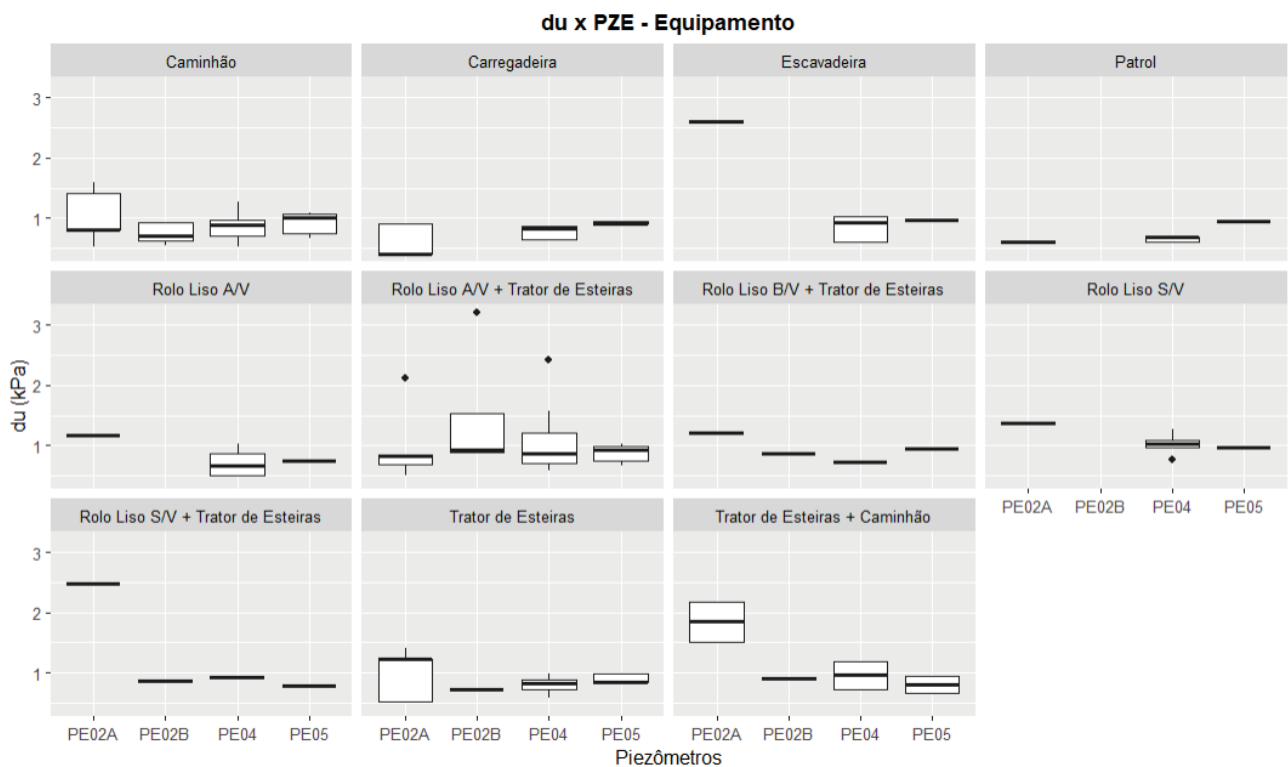
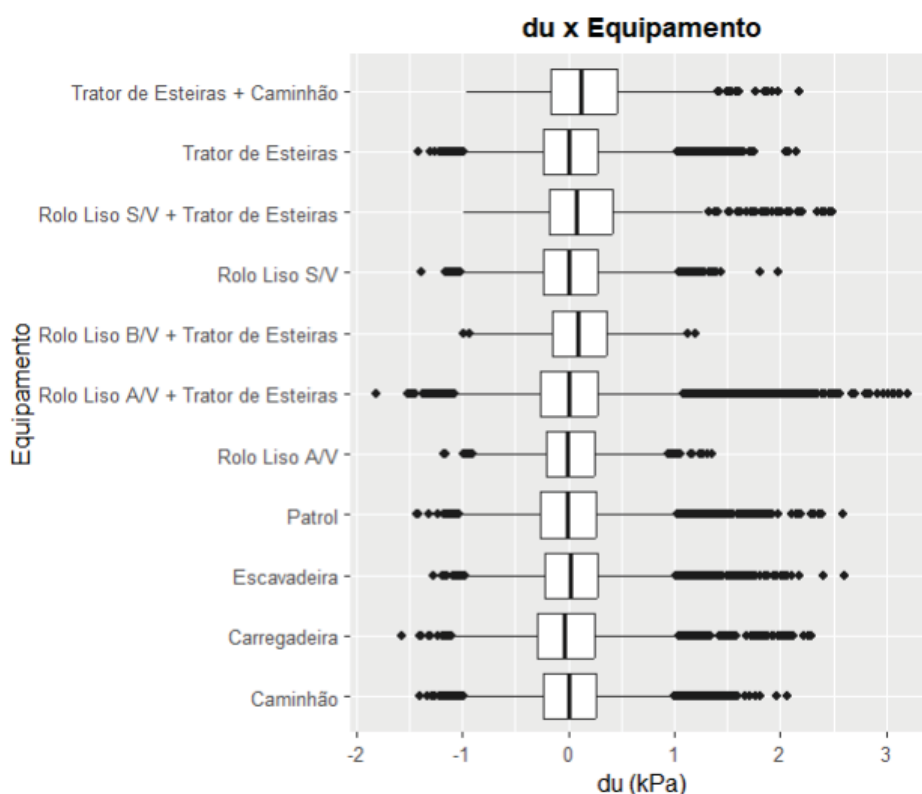


FIGURA 4.36 - ATERRO 2 – VARIAÇÕES DE PORPRESSÕES POR EQUIPAMENTO – PARA TODOS OS TESTES E PIEZÔMETROS.



Mesmo analisando-se as variações das poropressões, não foi possível identificar um padrão de comportamento no Aterro 2, provavelmente devido à condição de não saturação dos materiais. Os valores observados são baixos e até nulos para alguns instrumentos a partir da altura de aterro de 1m. Com isso, para os estudos de correlações entre vibrações e poropressões, os testes do Aterro 2 não foram mais considerados, sendo tratados os dados do Aterro 1, conforme apresentado na continuidade do estudo.

4.3.3 Análise dos resultados das vibrações

A respeito dos resultados específicos dos piezômetros elétricos, com os dados de poropressões totais (u) e variações de poropressões (Δu ou du), algumas observações iniciais podem ser realizadas, que são:

- Comparando-se o Aterro 1 e o Aterro 2, semelhante ao já observado nas análises de vibrações, também foram observados valores inferiores de poropressões para o Aterro 2, sendo este testado desde a superfície e sem a necessidade de lançamento prévio de lastro de

conquista. Entende-se que as observações para os estudos de vibrações também se aplicam para as poropressões, com o Aterro 2 com maior espessura de aterro pré-existente, com comportamento dilatante, e maior distanciamento do nível de água do local, sendo um meio não saturado na maioria dos locais de instalação dos instrumentos. Com isso, não se deu continuidade na avaliação dos testes do Aterro 2, sendo considerados para o prosseguimento estudo os dados provenientes do Aterro 1.

- Para o Aterro 1, observou-se uma significativa redução das variações de poropressões com o aumento da altura do aterro experimental, com valores de superiores a 6 kPa para aterro de 1m, e inferiores a 3 kPa para o aterro de 2m e 3m. Para a altura de 4m, entende-se que não foram observadas variações significativas de poropressão, com valores baixos e próximos da variação ou precisão do próprio instrumento.
- Ainda o Aterro 1, com relação aos equipamentos e de forma isolada, a Escavadeira, o Caminhão Carregado e os Rolos Lisos A/V e S/V apresentaram as maiores variações de poropressão, com valores próximos a 6 kPa, seguidos do Trator de Esteiras, Patrol e Carregadeira, próximos de 4 kPa, com os menores valores observados para o Caminhão Vazio, próximos a 3 kPa.
- A ordem dos maiores valores observados para as poropressões diferencia-se dos resultados das vibrações, sendo necessário observar as características específicas dos equipamentos, testes, atividades realizadas, entre outras, para a tentativa de correlacionar os resultados do testes experimentais.
- Conforme já comentado na análise das vibrações, a Escavadeira e a Patrol realizaram atividades nos aterros além do trânsito do equipamento, com escavação e escarificação, respectivamente.
- Ainda para o Aterro 1, porém para os comboios e combinações de equipamentos, a combinação de Rolo Liso A/V + Trator de Esteiras apresentou valores de variações de poropressão pouco abaixo dos máximos observados pelos equipamentos isolados, com variações máximas próximas a 5 kPa. E os comboios de Caminhões Vazios

apresentaram os menores resultados, próximos a 3 kPa. O que também é divergente da análise das vibrações, comparando-se os maiores valores das duas grandezas.

- Para o Aterro 2, os dados apresentaram algumas deficiências e falta de informações em alguns testes, o que reduz a sua confiabilidade e validação, sendo os dados do Aterro 1 mais representativos para as análises realizadas, onde sempre todos os instrumentos estiveram em funcionamento. Com isso, e conforme já comentado, deu-se continuidade nos estudos com os dados do Aterro 1, sendo a análise do Aterro 2 finalizada neste tópico.

4.4 CORRELAÇÕES ENTRE VIBRAÇÕES E POROPRESSÕES

Após as análises iniciais e isoladas dos sismógrafos e piezômetros, a partir deste item são apresentados os estudos mais específicos deste trabalho, de correlações entre as vibrações e poropressões.

Estes estudos foram realizados entre os dados de velocidade de vibração de partícula de pico (PPV), com as variações de poropressões (Δu ou du) e, também, com as razões de poropressões (PPR), que são determinadas pela relação entre a variação da poropressão observada em um evento com a tensão efetiva inicial ($PPR = du / \sigma'_{v0}$). A consideração da razão de poropressão é devida pela possibilidade do estudo do potencial de liquefação dos materiais, com referências de estudos e ensaios disponíveis e passíveis de verificações.

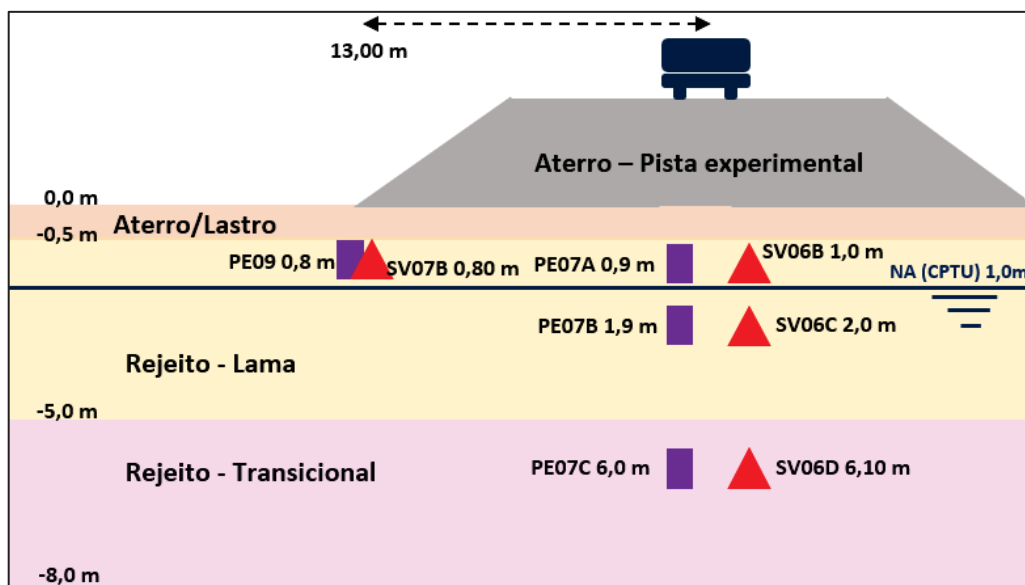
Conforme já comentado, foram analisados os dados dos testes do Aterro 1, pelos materiais estarem em condições saturadas e contráteis, passíveis de potenciais de liquefação, e com resultados considerados coerentes nas análises específicas de vibrações e poropressões.

Os piezômetros e sismógrafos de engenharia foram analisados sempre em pares, para aqueles considerados como correspondentes, instalados próximos entre si, e medindo a vibração e a poropressão sempre nas mesmas condições, ou muito próximas. Aqueles instrumentos sem o par correspondente não foram utilizados nestas análises.

Os dados considerados nestes estudos são aqueles que representam cada teste realizado, com um par de valores de “PPV” e “du” por conjunto de instrumentos

de cada teste, sendo os máximos observados em cada um deles, e considerados representativos de cada teste. As tensões efetivas iniciais (σ'_{v0}) são específicas de cada ponto de instalação dos sensores dos instrumentos, e são incrementadas com o aumento de altura do aterro experimental (pista) dos testes, para os instrumentos instalados sob os aterros (PE07A-SV06B, PE07B-SV06C e PE07C-SV06D). Somente o par de instrumentos PE09 e SV07B não apresentou variação da tensão efetiva com o aumento da altura do aterro experimental dos testes, por estar localizado ao lado da saia do talude do aterro. Na FIGURA 4.37 apresenta-se a seção esquemática do Aterro experimental 1, com os sismógrafos e piezômetros correspondentes, que são listados no QUADRO 4.9 seguinte, com os materiais onde foram instalados (todos contráteis).

FIGURA 4.37 – SEÇÃO ESQUEMÁTICA DO ATERRO EXPERIMENTAL 1, COM PIEZÔMETROS E SISMÓGRAFOS CORRESPONDENTES.



QUADRO 4.9 - PIEZÔMETROS E SISMÓGRAFOS CORRESPONDENTES.

PIEZÔMETROS E SISMÓGRAFOS CORRESPONDENTES		MATERIAL DE INSTALAÇÃO
PE07A	SV06B	REJEITO - LAMA
PE07B	SV06C	REJEITO - LAMA
PE07C	SV06D	REJEITO - TRANSICIONAL
PE09	SV07B	REJEITO - LAMA

Seguindo a metodologia do estudo, as análises foram realizadas conforme se seguinte sequência:

- Correlações gerais: elaboração de gráficos gerais de “PPV”, “du” e “PPR”: considerando todos os dados e testes, e separação por instrumento e altura de aterro, para entendimento inicial;
- Matrizes de correlação: entre as variáveis numéricas envolvidas, com a verificação daquelas que apresentam influência no fenômeno observado;
- Modelos de correlação: seguindo os resultados das matrizes de correlação e a ordem natural das variáveis envolvidas nos testes realizados, sendo as variáveis não numéricas também consideradas.
- Equações entre “du” e “PPR” com “PPV”: gerais, por equipamento e combinações de equipamentos, seguindo os resultados observados nos modelos de correlação, com análises das variáveis envolvidas para entendimento e interpretação dos resultados observados.
- Proposta de equação geral de correlação variação ou razão de poropressão e velocidade de vibração de partícula de pico: com inclusão de variáveis que incrementem a convergência do modelo/equação, em acordo com os estudos e análises realizados até então.

Todas as análises foram realizadas com auxílio do software estatístico R e o Excel.

4.4.1 Correlações gerais

Os estudos iniciais, com objetivo de entendimento também inicial das correlações entre vibrações e poropressões, são apresentados neste item.

Nas figuras seguintes são apresentados os gráficos de variação de poropressão (du) e razão de poropressão (PPR) com a velocidade de vibração de partícula de pico (PPV), considerando todos os dados (FIGURA 4.38 e FIGURA 4.41), separados por piezômetro (FIGURA 4.39 e FIGURA 4.42) e separados por altura de aterro (FIGURA 4.40 e FIGURA 4.43). Nos gráficos, apresenta-se, também, linhas de

suavização, que representam tendências nos dados. Esta linha pode ser uma linha de regressão linear, uma curva polinomial, uma linha de suavização local, entre outras, escolhida automaticamente com base no padrão dos dados.

FIGURA 4.38 – VARIAÇÃO DE POROPRESSÃO (Δu ou du) E VELOCIDADE DE VIBRAÇÃO DE PARTÍCULA DE PICO (PPV) – TODOS OS DADOS.

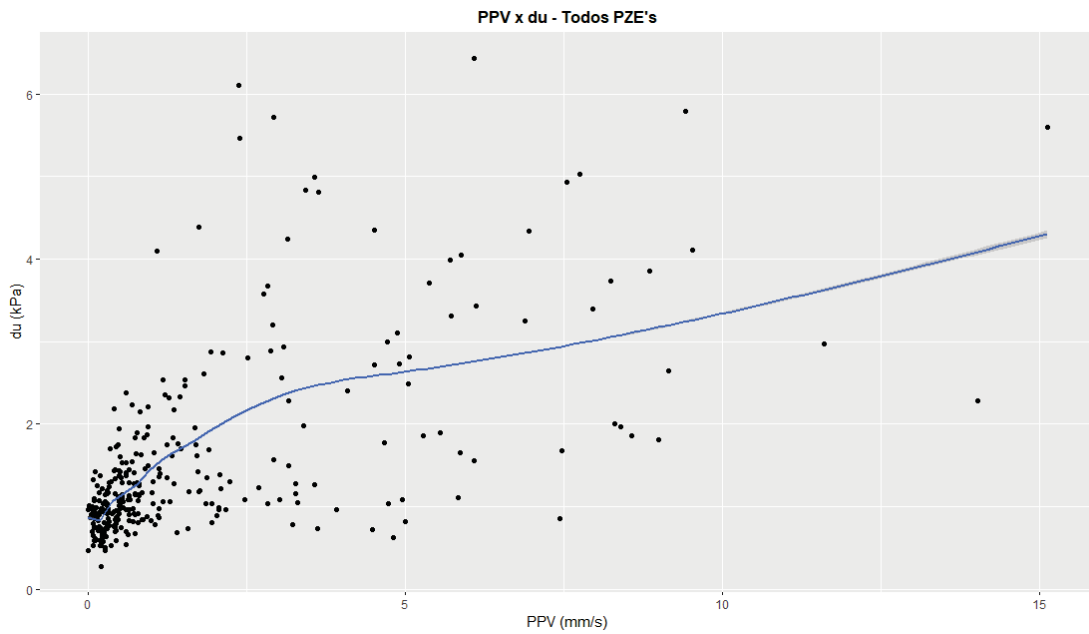


FIGURA 4.39 - VARIAÇÃO DE POROPRESSÃO (Δu ou du) E VELOCIDADE DE VIBRAÇÃO DE PARTÍCULA DE PICO (PPV) – SEPARADOS POR PIEZÔMETRO.

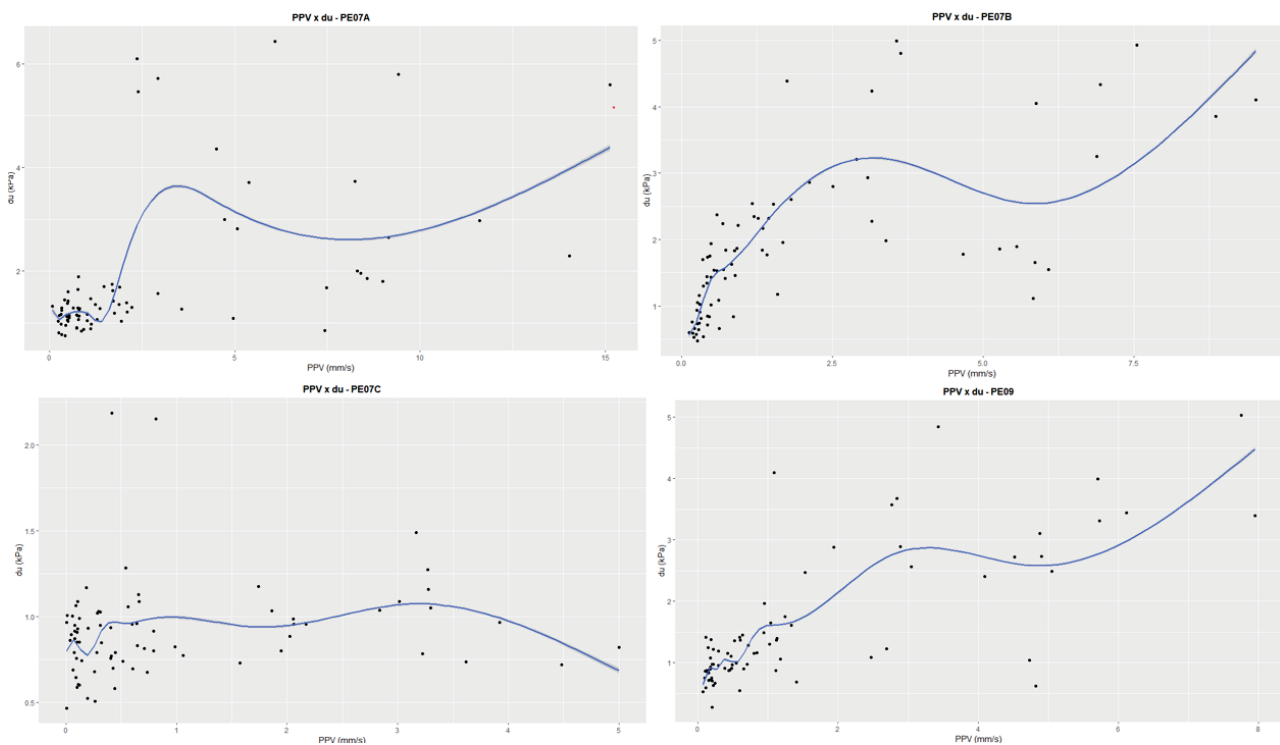


FIGURA 4.40 - VARIAÇÃO DE POROPRESSÃO (Δu ou du) E VELOCIDADE DE VIBRAÇÃO DE PARTÍCULA DE PICO (PPV) – SEPARADOS POR ALTURA DO ATERRO EXPERIMENTAL (PISTA).

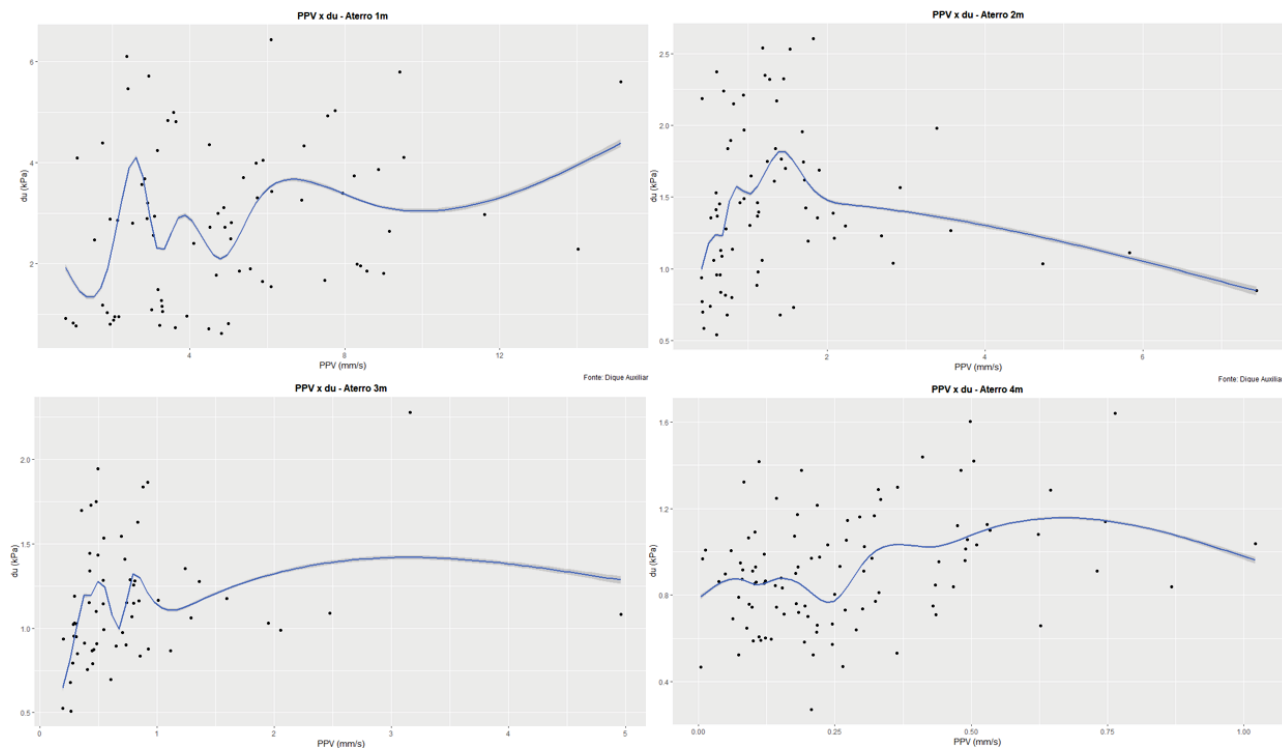


FIGURA 4.41 - RAZÃO DE POROPRESSÃO (PPR) E VELOCIDADE DE VIBRAÇÃO DE PARTÍCULA DE PICO (PPV) – TODOS OS DADOS.

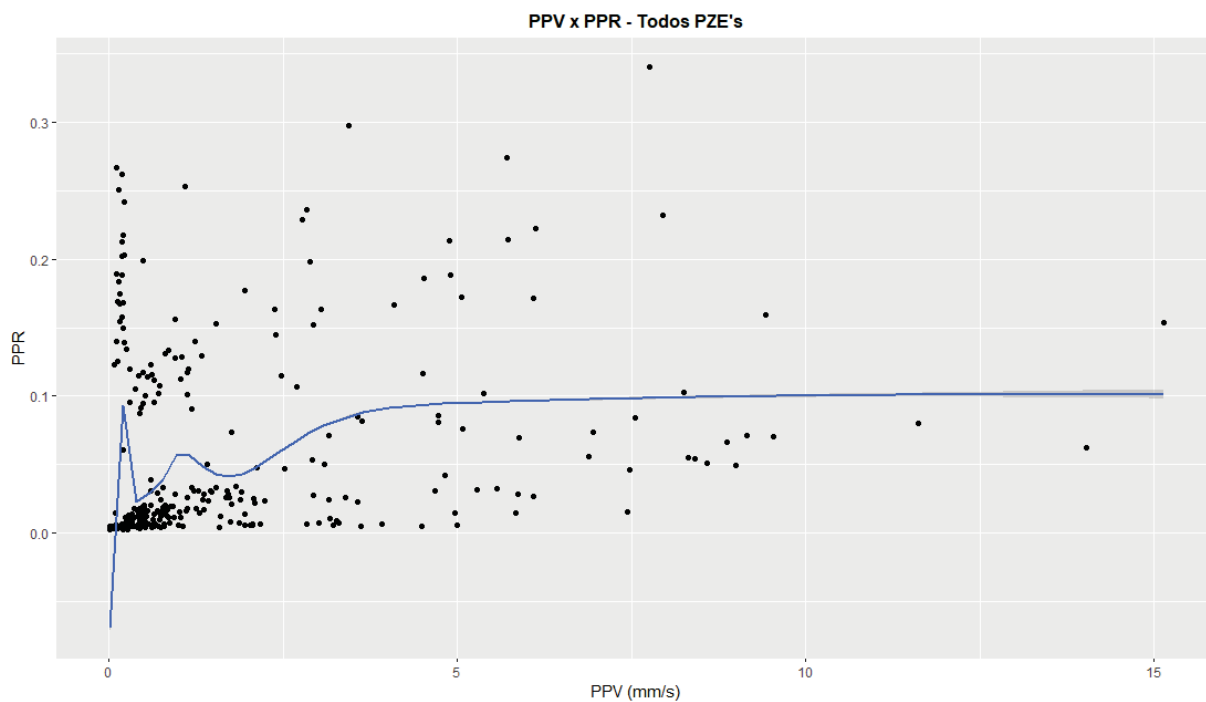


FIGURA 4.42 - RAZÃO DE POROPRESSÃO (PPR) E VELOCIDADE DE VIBRAÇÃO DE PARTÍCULA DE PICO (PPV) – SEPARADOS POR PIEZÔMETRO.

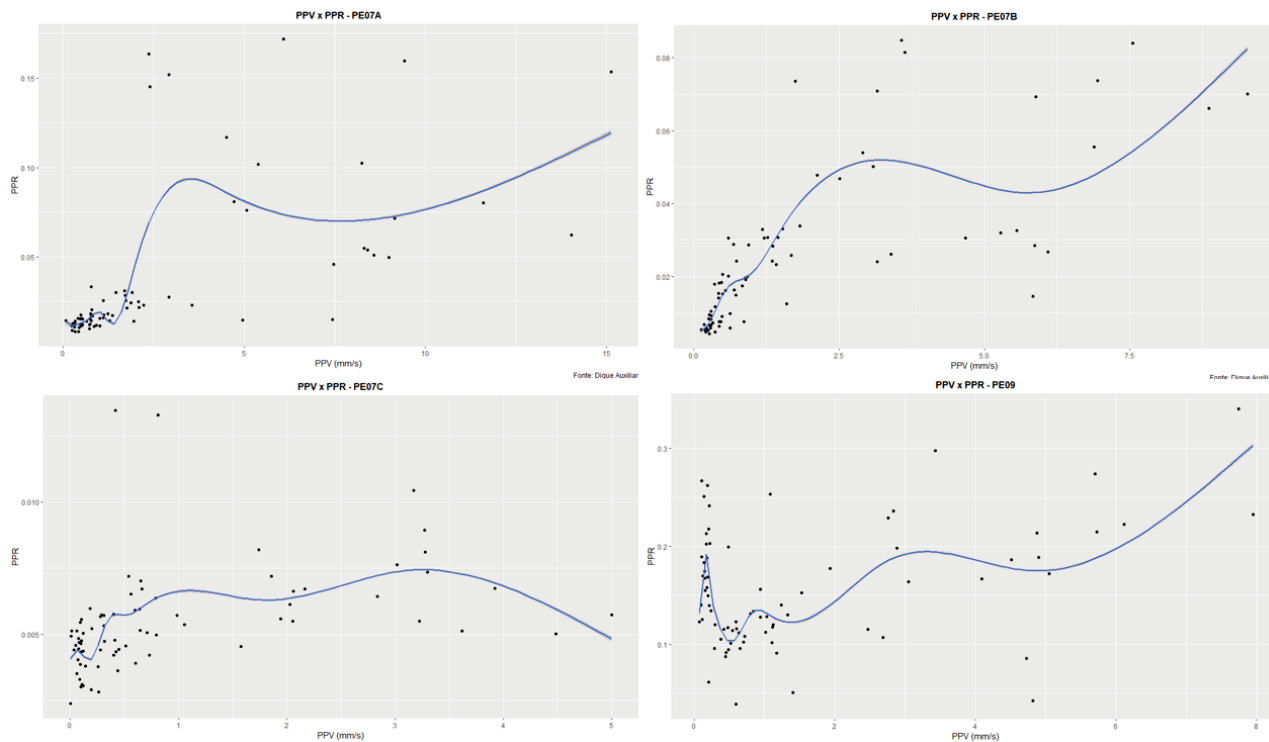
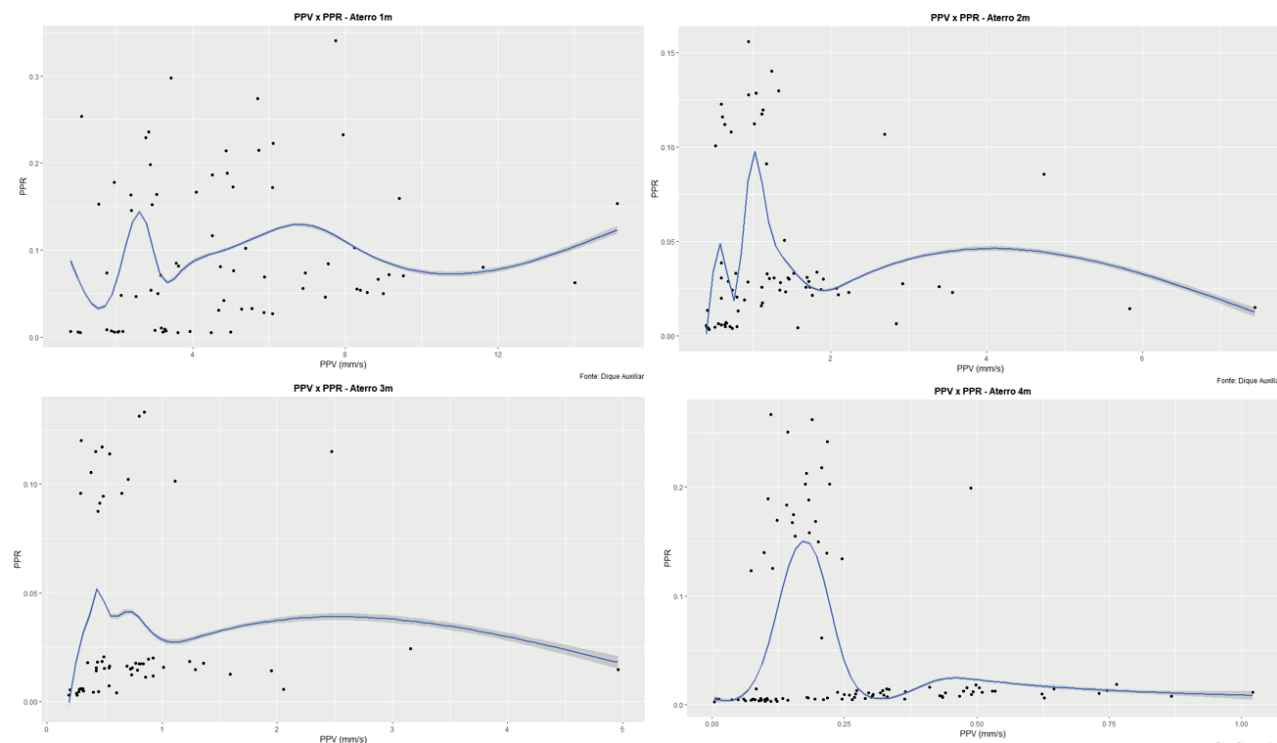


FIGURA 4.43 - RAZÃO DE POROPRESSÃO (PPR) E VELOCIDADE DE VIBRAÇÃO DE PARTÍCULA DE PICO (PPV) – SEPARADOS POR ALTURA DO ATERRO EXPERIMENTAL (PISTA).



A análise considerando todos os dados e os dados separados por piezômetro, apesar da variabilidade dos resultados, verificam-se que os menores efeitos das vibrações e poropressões são observados com o aumento da profundidade, nos pares de instrumentos mais profundos. Isso pode ser devido a maior confinamento e, conseqüentemente, maior rigidez (e menor índice de fragilidade) dos materiais com aumento da profundidade, sendo submetidos a menores vibrações e menores efeitos de poropressões.

Porém, os estudos iniciais evidenciam a variabilidade do fenômeno observado, não sendo obtidos padrões identificáveis, sendo necessário o aprofundamento e entendimento de todas as variáveis envolvidas, conforme sequência do estudo com as matrizes, modelos e equações de correlações.

4.4.2 Matrizes de correlação

Na sequência do estudo foram determinadas as matrizes de correlação entre as variáveis numéricas envolvidas, com objetivo de aprofundar o entendimento do fenômeno observado, com a determinação das variáveis que apresentam influência nos resultados.

As matrizes foram determinadas com alguns filtros de dados, buscando-se obter melhores coeficientes de correlação. Foram testados todos os dados, aterro com 1m, 2m e 3m de altura, e testes com exclusão do piezômetro PE09, por estar fora do off-set do aterro e sem variação significativa da tensão efetiva, o que poderia influenciar nos resultados para a razão de poropressão (PPR), principalmente.

Os dados do aterro de 4m de altura não foram considerados, por não terem apresentado variações consideráveis de poropressão, com entendimento de que nesta profundidade as vibrações e sobrecargas dos equipamentos são dissipadas e não solicitam as fundações da pista experimental.

Foram consideradas as seguintes variáveis numéricas no estudo:

- Poropressão total medida pelo instrumento (u), poropressão inicial (u_0 – antes da passagem do equipamento), poropressão total com aplicação da média móvel na série de dados (u_{med}), variação da poropressão – poropressão máxima medida subtraída da poropressão inicial (du);

- Velocidade de vibração de partícula mínima, média, máxima, padrão e mediana (min_ppv , med_ppv , max_ppv = PPV, std_ppv e mediana_ppv);
- Frequência de vibração mínima, média, máxima, padrão e mediana (min_f , med_f , max_f , min_f , std_f e mediana_f);
- Distância vertical do instrumento (piezômetro) em relação a base do aterro (prof_base), distância total em relação a base (dist_base) e distância total em relação ao topo do aterro (dist_topo);
- Tensão total na cota de instalação do instrumento (s_sensor) e tensão efetiva (t_{ef}). Com a tensão efetiva sendo determinada pela tensão total subtraída do valor da poropressão inicial (u_0) antes da passagem do equipamento;
- Resultados do ensaio CPTU na cota de instalação do sensor: resistência de ponta (q_c_sensor), atrito lateral (f_s_sensor), razão de atrito (r_f_sensor) e excesso de poropressão (u_2_sensor);
- Velocidade de propagação de ondas do ensaio CPTU sísmico (v_s_ensaio) e obtido por correlação com ensaio CPTU (v_s_correl);
- Densidade relativa (D_r) e Módulo de deformabilidade (E_s) do material onde o sensor do instrumento está instalado.

Os resultados são apresentados nas figuras seguintes, com todos os dados considerados no estudo – Aterro de 1 a 3m e todos os pares de instrumentos (FIGURA 4.44), Aterro de 1 a 3m e sem o par PE09-SV07B por estar fora do off-set do aterro (FIGURA 4.45), Aterro de 1m (FIGURA 4.46), Aterro de 1m e sem o par PE09-SV07B (FIGURA 4.47), Aterro de 1 e 2m (FIGURA 4.48), Aterro de 1 e 2m e sem o par PE09-SV07B (FIGURA 4.49).

Por fim, o resumo dos resultados com os coeficientes de correlação e com foco nos valores de variação de poropressão (du) e razão de poropressão (PPR) é apresentado no QUADRO 4.10.

Com relação aos valores de coeficientes de correlação apresentados, os valores positivos representam correlações diretas (cor azul), e negativos as inversas (cor vermelha), com os maiores valores, positivos ou negativos, representado a força da correlação entre as variáveis.

FIGURA 4.44 - MATRIZ DE CORRELAÇÃO – TODOS OS DADOS – ATERRO 1m A 3m.

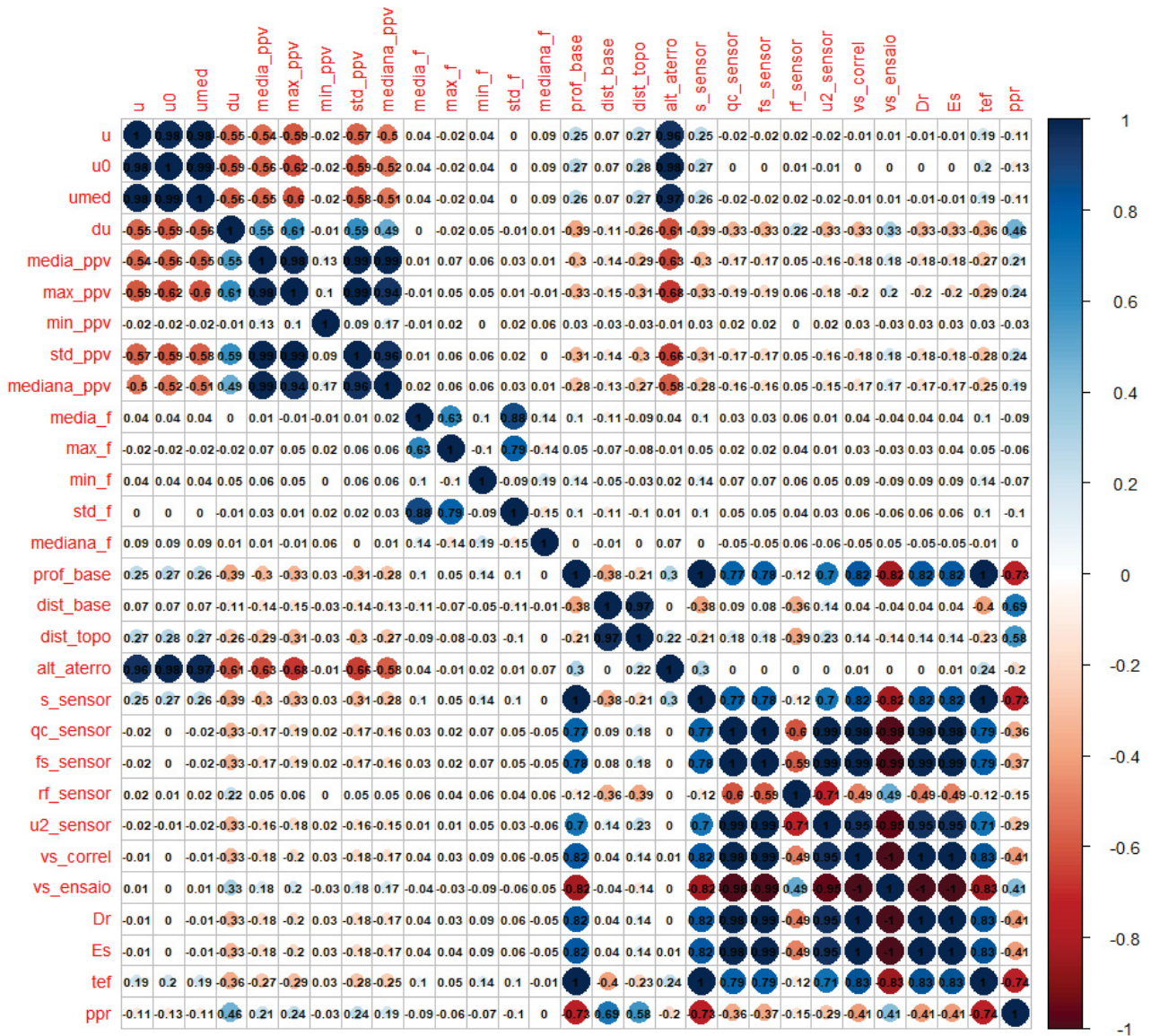


FIGURA 4.45 – MATRIZ DE CORRELAÇÃO – ATERRO 1m A 3m E SEM O PE09-SV07B.

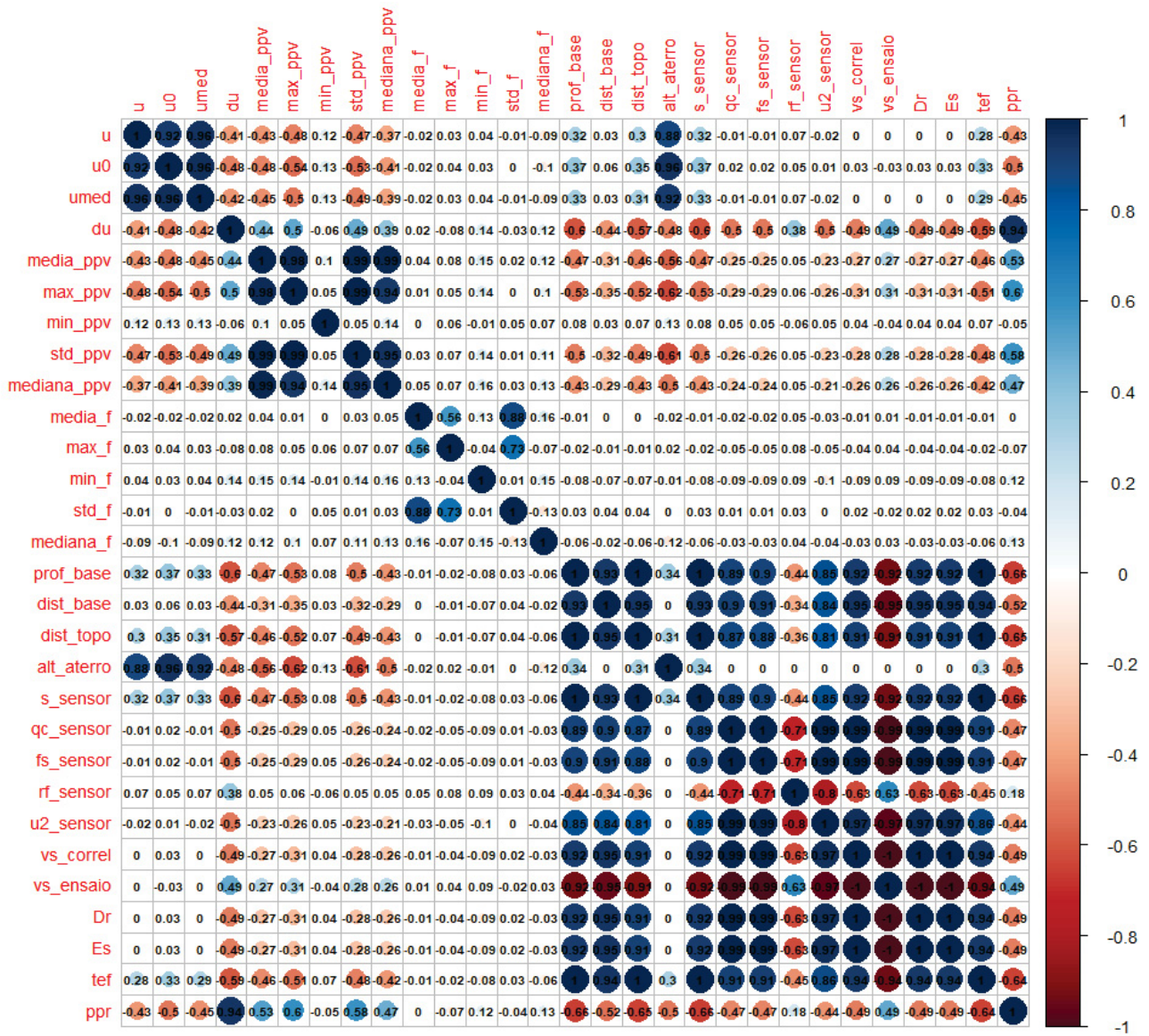


FIGURA 4.46 - MATRIZ DE CORRELAÇÃO – ATERRO 1m.

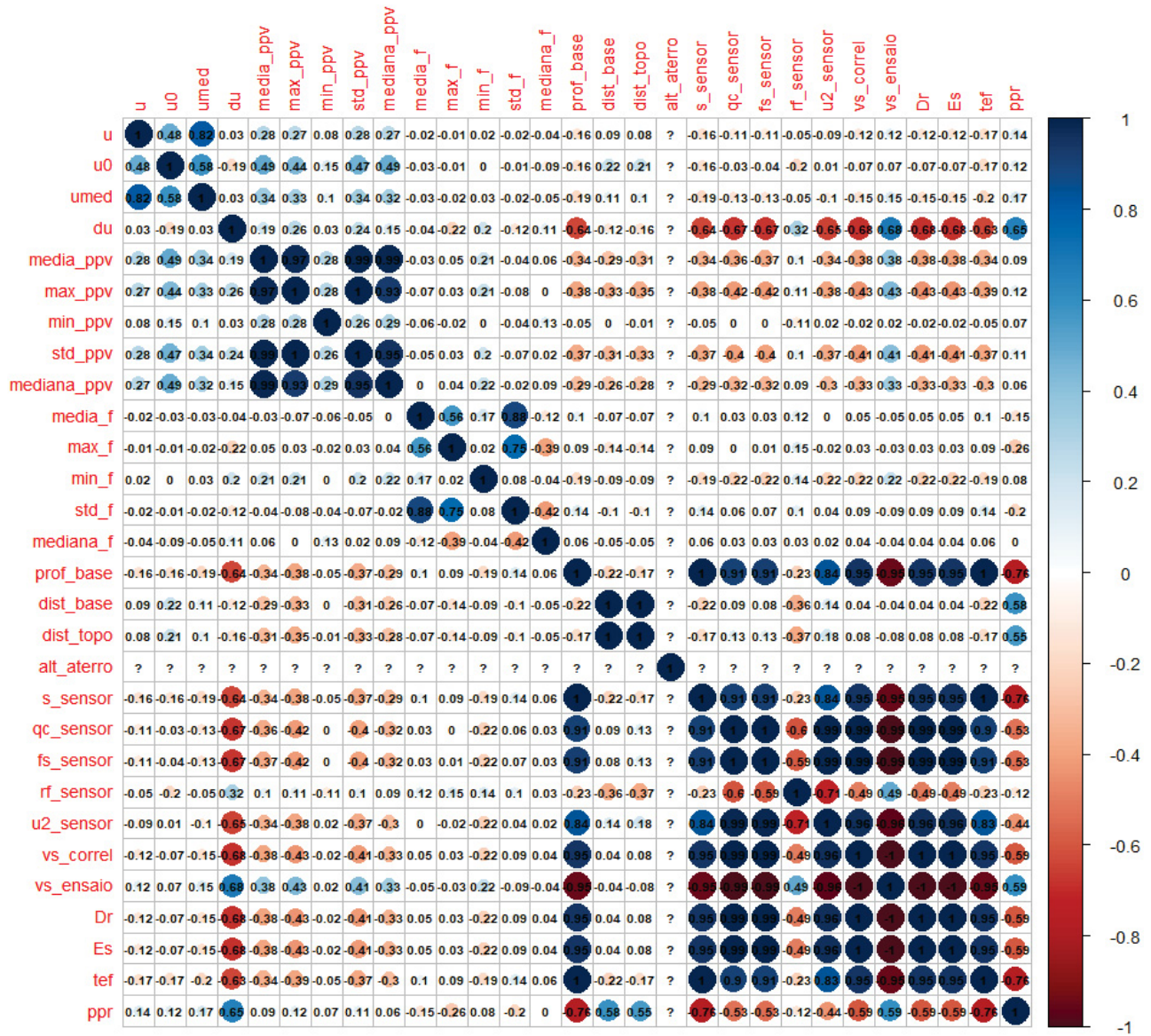


FIGURA 4.47 - MATRIZ DE CORRELAÇÃO – ATERRO 1m E SEM O PE09-SV07B

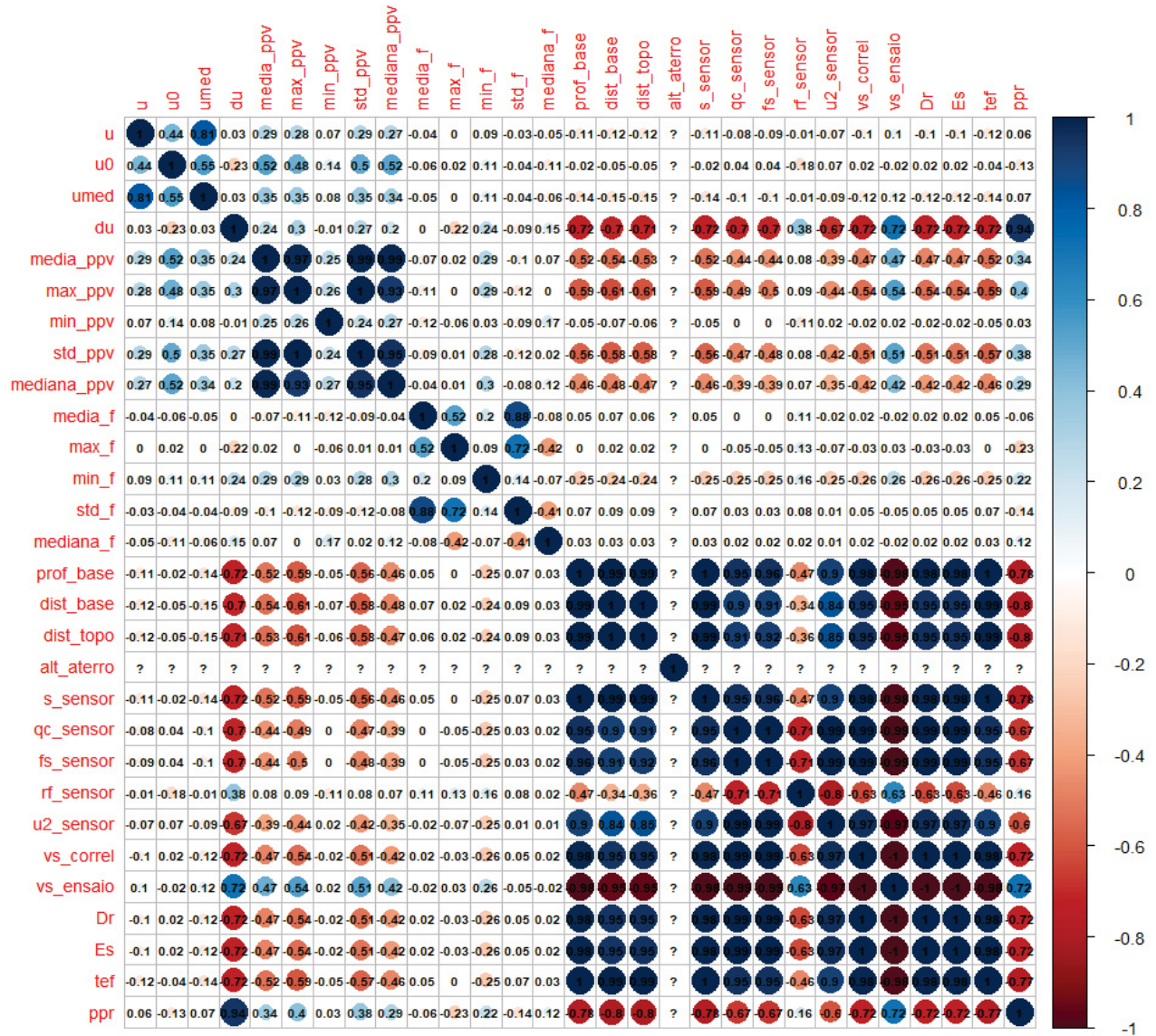


FIGURA 4.48 - MATRIZ DE CORRELAÇÃO – ATERRO 1m E 2m.

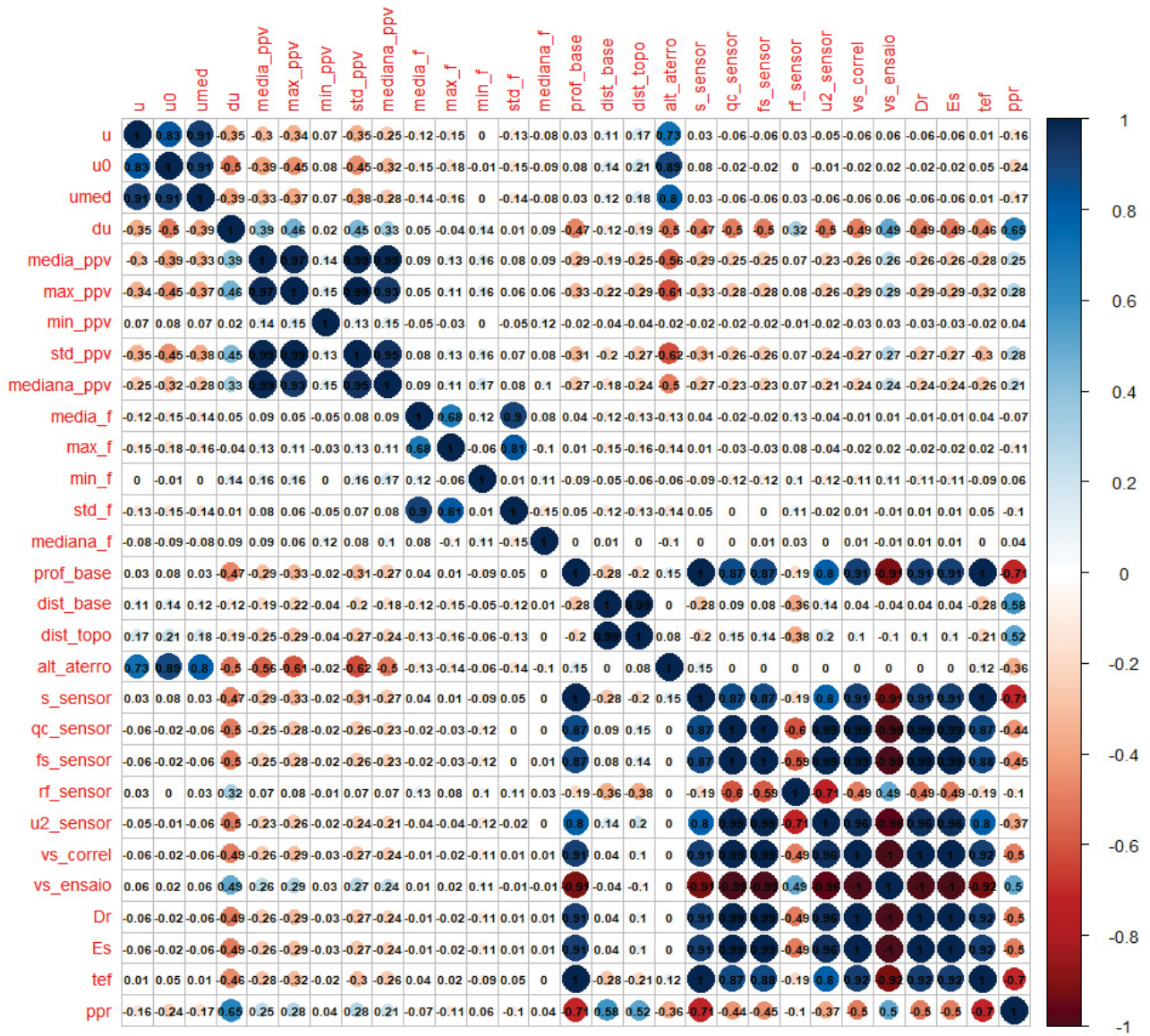
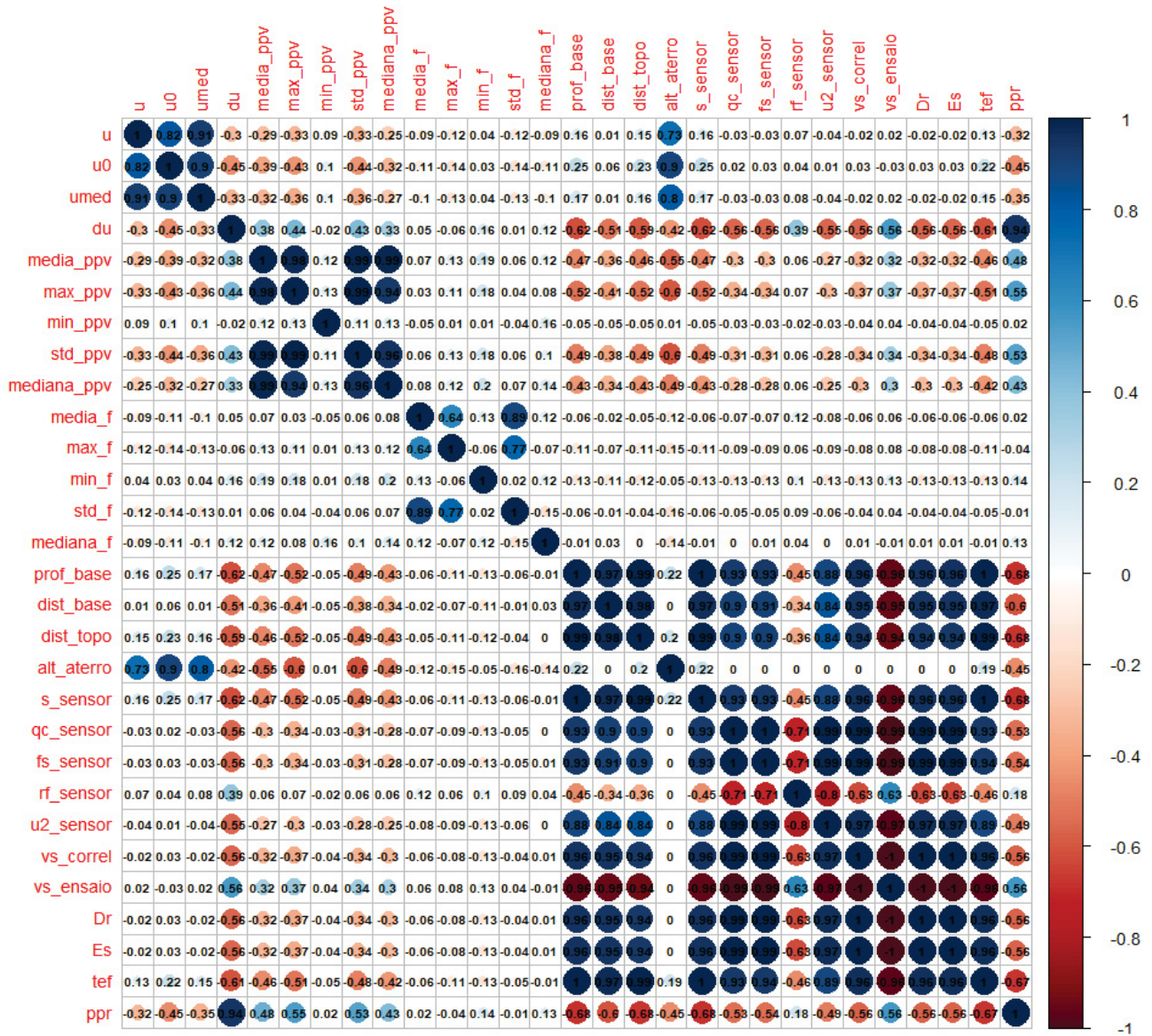


FIGURA 4.49 - MATRIZ DE CORRELAÇÃO – ATERRO 1m E 2m E SEM O PE09-SV07B



QUADRO 4.10 - MATRIZES DE CORRELAÇÃO – RESUMO DOS RESULTADOS COM ENFOQUE NAS VARIÁVEIS DE ESTUDO (du E PPR).

Variáveis	ATERRO 1 A 3m		ATERRO 1 A 3m E SEM PE09		ATERRO 1m		ATERRO 1m E SEM PE09		ATERRO 1m e 2m		ATERRO 1m e 2m E SEM PE09	
	du	ppr	du	ppr	du	ppr	du	ppr	du	ppr	du	ppr
u	-0,55	-0,11	-0,41	-0,43	0,03	0,14	0,03	0,06	-0,35	-0,16	-0,30	-0,32
u0	-0,59	-0,13	-0,48	-0,50	-0,19	0,12	-0,23	-0,13	-0,50	-0,24	-0,45	-0,45
umed	-0,56	-0,11	-0,42	-0,45	0,03	0,17	0,03	0,07	-0,39	-0,17	-0,33	-0,35
du	1,00	0,46	1,00	0,94	1,00	0,65	1,00	0,94	1,00	0,65	1,00	0,94
media_ppv	0,55	0,21	0,44	0,53	0,19	0,09	0,24	0,34	0,39	0,25	0,38	0,48
max_ppv	0,61	0,24	0,50	0,60	0,26	0,12	0,30	0,40	0,46	0,28	0,44	0,55
min_ppv	-0,01	-0,03	-0,06	-0,05	0,03	0,07	-0,01	0,03	0,02	0,04	-0,02	0,02
std_ppv	0,59	0,24	0,49	0,58	0,24	0,11	0,27	0,38	0,45	0,28	0,43	0,53
mediana_ppv	0,49	0,19	0,39	0,47	0,15	0,06	0,20	0,29	0,33	0,21	0,33	0,43
media_f	0,00	-0,09	0,02	0,00	-0,04	-0,15	0,00	-0,06	0,05	-0,07	0,05	0,02
max_f	-0,02	-0,06	-0,08	-0,07	-0,22	-0,26	-0,22	-0,23	-0,04	-0,11	-0,06	-0,04
min_f	0,05	-0,07	0,14	0,12	0,20	0,08	0,24	0,22	0,14	0,06	0,16	0,14
std_f	-0,01	-0,10	-0,03	-0,04	-0,12	-0,20	-0,09	-0,14	0,01	-0,10	0,01	-0,01
mediana_f	0,01	0,00	0,12	0,13	0,11	0,00	0,15	0,12	0,09	0,04	0,12	0,13
prof_base	-0,39	-0,73	-0,60	-0,66	-0,64	-0,76	-0,72	-0,78	-0,47	-0,71	-0,62	-0,68
dist_base	-0,11	0,69	-0,44	-0,52	-0,12	0,58	-0,70	-0,80	-0,12	0,58	-0,51	-0,60
dist_topo	-0,26	0,58	-0,57	-0,65	-0,16	0,55	-0,71	-0,80	-0,19	0,52	-0,59	-0,68
alt_aterro	-0,61	-0,20	-0,48	-0,50	-	-	-	-	-0,50	-0,36	-0,42	-0,45
s_sensor	-0,39	-0,73	-0,60	-0,66	-0,64	-0,76	-0,72	-0,78	-0,47	-0,71	-0,62	-0,68
qc_sensor	-0,33	-0,36	-0,50	-0,47	-0,67	-0,53	-0,70	-0,67	-0,50	-0,44	-0,56	-0,53
fs_sensor	-0,33	-0,37	-0,50	-0,47	-0,67	-0,53	-0,70	-0,67	-0,50	-0,45	-0,56	-0,54
rf_sensor	0,22	-0,15	0,38	0,18	0,32	-0,12	0,38	0,16	0,32	-0,10	0,39	0,18
u2_sensor	-0,33	-0,29	-0,50	-0,44	-0,65	-0,44	-0,67	-0,60	-0,50	-0,37	-0,55	-0,49
vs_correl	-0,33	-0,41	-0,49	-0,49	-0,68	-0,59	-0,72	-0,72	-0,49	-0,50	-0,56	-0,56
vs_ensaio	0,33	0,41	0,49	0,49	0,68	0,59	0,72	0,72	0,49	0,50	0,56	0,56
Dr	-0,33	-0,41	-0,49	-0,49	-0,68	-0,59	-0,72	-0,72	-0,49	-0,50	-0,56	-0,56
Es	-0,33	-0,41	-0,49	-0,49	-0,68	-0,59	-0,72	-0,72	-0,49	-0,50	-0,56	-0,56
tef	-0,36	-0,74	-0,59	-0,64	-0,63	-0,76	-0,72	-0,77	-0,46	-0,70	-0,61	-0,67
ppr	0,46	1,00	0,94	1,00	0,65	1,00	0,94	1,00	0,65	1,00	0,94	1,00

Observando-se diretamente os resultados das correlações de “du” com “PPV” (QUADRO 4.10), o maior coeficiente é obtido com o aterro de 1 a 3m e com todos os pares de instrumentos. Isto pode ser devido a consideração a maior variação de “du” e “PPV” entre os dados, o que é limitado quando não se considera algum teste de altura de aterro. A não consideração do par de instrumentos PE09-SV07B não se mostrou impactante nos resultados, talvez por não incluir o valor da tensão efetiva na variável observada “du”. Com isso, manteve-se o par de instrumentos nas análises de “du” com “PPV”.

Com relação aos resultados da correlação de “PPR” com “PPV”, a mesma consideração sobre o uso dos dados das 3 alturas de aterro se aplica, porém agora com forte influência da consideração do par de instrumentos PE09-SV07B, com significativa redução correlação se o par de instrumentos é considerado. Isto se deve possivelmente a menor variação da tensão efetiva para o par de instrumentos entre os testes (considerada variação nula), porém com variação significativa de “du”, sendo o fenômeno melhor observado e correlacionado sem a consideração do par de instrumentos. Os coeficientes de correlação relacionados a tensão efetiva (tef) mostram essa influência, sempre com valores elevados, uma vez que a variável observada “PPR” é calculada com a tensão efetiva “tef”.

De posse destas informações, os estudos seguintes, modelos de correlação e equações de correlação, consideraram sempre testes com as três alturas de aterro (1 a 3m), com todos os pares de instrumentos para as análises de variação de poropressão “du”, e sem o par PE09-SV07B para as análises da variação de poropressão “PPR”.

Com relação às demais variáveis analisadas, têm-se as seguintes observações:

- As frequências de vibração, da forma como foram apresentadas, não apresentaram correlação direta com os resultados de “du” ou “PPR”, sempre com valores muito baixos de coeficientes de correlação;
- As distâncias da base e topo do aterro com os instrumentos apresentam valores intermediários de correlação, com a profundidade exercendo maior influência.
- A altura de aterro também apresenta coeficiente significativo para a análise de “du”, com menor influência na análise de “PPR”, uma vez que a tensão efetiva “tef” já considera a influência da altura do aterro.

- A tensão total apresenta resultados semelhantes com a tensão efetiva e altura de aterro, por serem correlacionáveis entre si.
- Os resultados das propriedades do solo, com os resultados dos ensaios CPTU, sísmico e correlações apresentaram valores intermediários ($\sim 0,3$) e próximos entre si. Isto se deve a pouca variação entre os materiais testados, com 3 pares de instrumentos instalados na camada de rejeito lamoso, e um par na camada de rejeito transicional. Com isso, os resultados são representativos para os materiais analisados (rejeito lamoso, principalmente), sendo necessários mais testes com diferentes materiais para analisar adequadamente a influência das propriedades dos materiais no fenômeno em estudo.

É importante ressaltar que nesta análise as variáveis não numéricas não puderam ser consideradas, e sabe-se que tem forte influência nos resultados com os resultados específicos dos instrumentos já analisados e apresentados nos itens 4.2 e 4.3, como o tipo de equipamento, por exemplo. Porém, esta variável será considerada nos modelos e equações de correlação apresentados nos itens seguintes.

Por fim, estes resultados foram considerados na elaboração dos modelos de correlação, buscando-se utilizar aqueles com influência significativa no estudo.

4.4.3 Modelos de correlação

Com objetivo de analisar e quantificar a relação entre as variáveis envolvidas, numéricas ou não, foram propostos modelos de correlação entre variação de poropressão “du” e razão de poropressão “PPR” com a velocidade de vibração de vibrações “PPV” e demais variáveis envolvidas nos testes. Os modelos foram sendo propostos e incorporados a partir do modelo básico, com as geometrias, tipos de equipamentos e materiais e suas características. Busca-se uma forma de representar o objeto de estudo com informações facilmente obtidas em problemas práticos.

Utilizou-se como critério de avaliação dos modelos o valor coeficiente de determinação “R²”, que mede a qualidade do ajuste do modelo de regressão dos dados.

Assim como as matrizes de correlação, os modelos foram testados para diferentes alturas de aterro e com e sem a consideração do par de instrumentos PE09-

SV07B, sendo apresentados aquelas que apresentaram melhor ajuste nas matrizes de correlação, que são:

- Modelo da variação de poropressão (du): Aterro com 1 a 3m de altura e todos os pares de instrumentos;
- Modelo da razão de poropressão (PPR): Aterro com 1 a 3m de altura e exclusão do par de instrumentos PE09-SV07B, localizados no limite do off-set do aterro/pista experimental.

Os modelos foram propostos com a seguintes informações ou variáveis, tendo como base a variação e razão de poropressão de poropressão (du e PPR) e a velocidade de vibração de partícula de pico (PPV):

- Altura de aterro ou pista experimental (alt_aterro);
- Equipamento (equip);
- Característica/atividade do equipamento (carac_equip);
- Classificação SBT do material de instalação do sensor (SBT);
- Tensão efetiva inicial na cota do sensor (tef);
- Densidade relativa (D_r);
- Velocidade de onda cisalhante do ensaio sísmico para o material de instalação do sensor (V_s _ensaio);

Outras variáveis não foram consideradas porque são correlacionáveis entre si, como mostraram as matrizes de correlação, e não teriam influência nos resultados se adicionadas em relação a variável base, pela qual a mesma foi calculada.

Foram testados modelos essencialmente lineares, com alguns testes exponenciais, utilizando-se a logaritmo de variáveis envolvidas. As informações foram sendo incrementadas em cada modelo, e foram testadas outras combinações de variáveis, baseadas nos estudos correlatos, que apresentam correlação com tensão efetiva e densidade relativa. Nos itens seguintes são apresentados os resultados dos modelos de análise.

4.4.3.1 Modelos gerais de variação de poropressão “du”

Os resultados dos modelos de correlação da variação de poropressão “du” são apresentados no QUADRO 4.11.

QUADRO 4.11 – MODELOS DE CORRELAÇÃO – du x PPV.

Modelos du x PPV	Aterro 1 a 3m
	R ²
du x PPV	0,28
du x PPV x equip	0,38
du x PPV x equip x alt_aterro	0,42
du x PPV x equip x alt_aterro x carac_equip	0,48
du x PPV x equip x alt_aterro x carac_equip x tef	0,53
du x PPV x equip x alt_aterro x carac_equip x tef x SBT	0,61
du x PPV x equip x alt_aterro x carac_equip x tef x SBT x Dr	0,61
du x PPV x equip x alt_aterro x carac_equip x tef x SBT x Dr x Vs_ensaio	0,61
du x PPV x alt_aterro	0,36
du x PPV x tef	0,35
du x PPV x tef x Dr	0,35
du x log(PPV) x log(tef) x log(Dr)	0,38
du x log(PPV)	0,30
du x PPV x alt_aterro x SBT	0,49
du x PPV x tef x SBT	0,37
du x PPV x tef x SBT x equip	0,46
du x PPV x tef x Vs_ensaio	0,37

Observa-se que os modelos apresentam acréscimo no coeficiente de determinação R² até a consideração do material de instalação do sensor, ou a classificação SBT, com coeficiente de 0,61. As informações adicionais apresentadas, densidade relativa (Dr) e velocidade cisalhante (Vs) não contribuíram para o modelo, por já estarem diretamente vinculadas a outras variáveis já apresentadas. Outras tentativas foram realizadas com algumas combinações de variáveis, porém sem conseguir melhorar a calibração do modelo.

As variáveis densidade relativa (Dr) e velocidade cisalhante (Vs) tem total influência na relação entre vibração e geração de excesso de poropressão, pois materiais menos densos ou com menor velocidade cisalhante são mais frágeis e mais suscetíveis à geração de poropressão. Porém, a não contribuição ao modelo não se deve a influência ou não, mas sim ao fato de essa condição já estar associada a outras informações apresentadas, não sendo uma informação nova ou adicional para os

modelos. Isto deve, também, ao fator de se estar analisando materiais semelhantes, sem tanta variação em suas propriedades.

4.4.3.2 Modelos gerais de razão de poropressão “PPR”

Os resultados dos modelos de correlação da razão de poropressão “PPR” são apresentados no QUADRO 4.12.

QUADRO 4.12 - MODELOS DE CORRELAÇÃO – PPR x PPV.

Modelos PPR x PPV	Aterro 1 a 3m e sem PE09-SV07B
	R ²
du x PPV	0,36
du x PPV x equip	0,46
du x PPV x equip x alt_aterro	0,46
du x PPV x equip x alt_aterro x carac_equip	0,53
du x PPV x equip x alt_aterro x carac_equip x tef	0,64
du x PPV x equip x alt_aterro x carac_equip x tef x SBT	0,64
du x PPV x equip x alt_aterro x carac_equip x tef x SBT x Dr	0,64
du x PPV x equip x alt_aterro x carac_equip x tef x SBT x Dr x Vs_ensaio	0,64
du x PPV x alt_aterro	0,30
du x PPV x tef	0,41
du x PPV x tef x Dr	0,41
du x log(PPV) x log(tef) x log(Dr)	0,43
du x log(PPV)	0,27
du x PPV x alt_aterro x SBT	0,48
du x PPV x tef x SBT	0,41
du x PPV x tef x SBT x equip	0,48
du x PPV x tef x Vs_ensaio	0,41

Observa-se resultado semelhante para os modelos para a razão de poropressão PPR, porém o coeficiente R² não apresenta incrementos a partir da variável tensão efetiva. A apresentação do tipo ou classificação de material (SBT) está diretamente vinculada à tensão efetiva, uma vez que apenas um par de instrumentos está instalado na camada de rejeito com comportamento transicional, e em maior profundidade, já sendo considerada na variável tensão efetiva. Outras tentativas

também foram realizadas com algumas combinações de variáveis, porém sem conseguir melhorar a calibração do modelo.

4.4.3.3 Modelos específicos de “du” e “PPR”

Como os resultados ainda não apresentaram uma calibração considerada adequada para a tentativa de generalizar o fenômeno de estudo, novas verificações e testes foram realizadas, separando-se o conjunto de dados de entrada por altura de aterro e por equipamento, obtendo-se, assim, melhores resultados, conforme apresenta-se na sequência.

O modelo específico da variação de poropressão (du) separado por altura de aterro é apresentado na FIGURA 4.50, e separado por equipamento é apresentado na FIGURA 4.52. E o modelo específico da razão de poropressão (PPR) separado por altura de aterro é apresentado na FIGURA 4.51, e separado por equipamento na FIGURA 4.53.

FIGURA 4.50 – GRÁFICOS DE “du” POR “PPV” SEPARADOS POR ALTURA DE ATERRO.

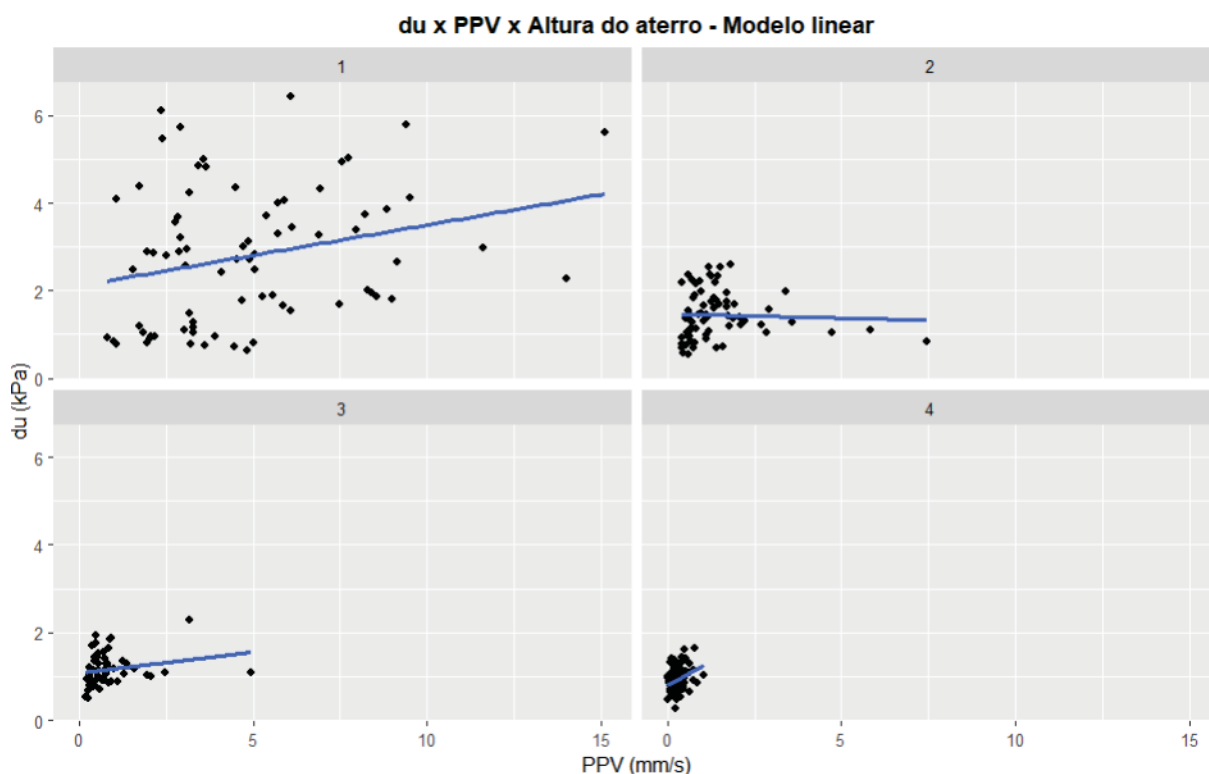


FIGURA 4.51 - GRÁFICOS DE “du” POR “PPV” SEPARADOS POR EQUIPAMENTO.

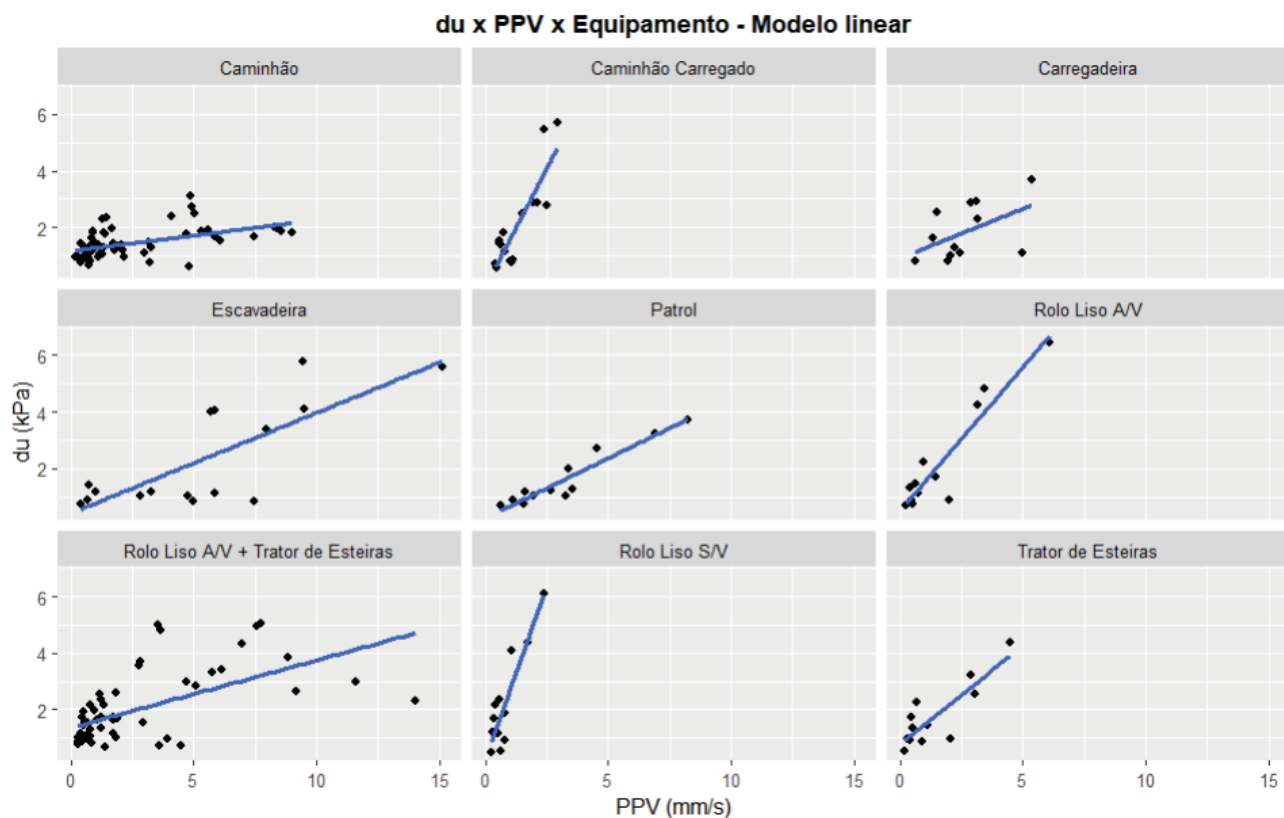


FIGURA 4.52 - GRÁFICOS DE “PPR” POR “PPV” SEPARADOS POR ALTURA DE ATERRO.

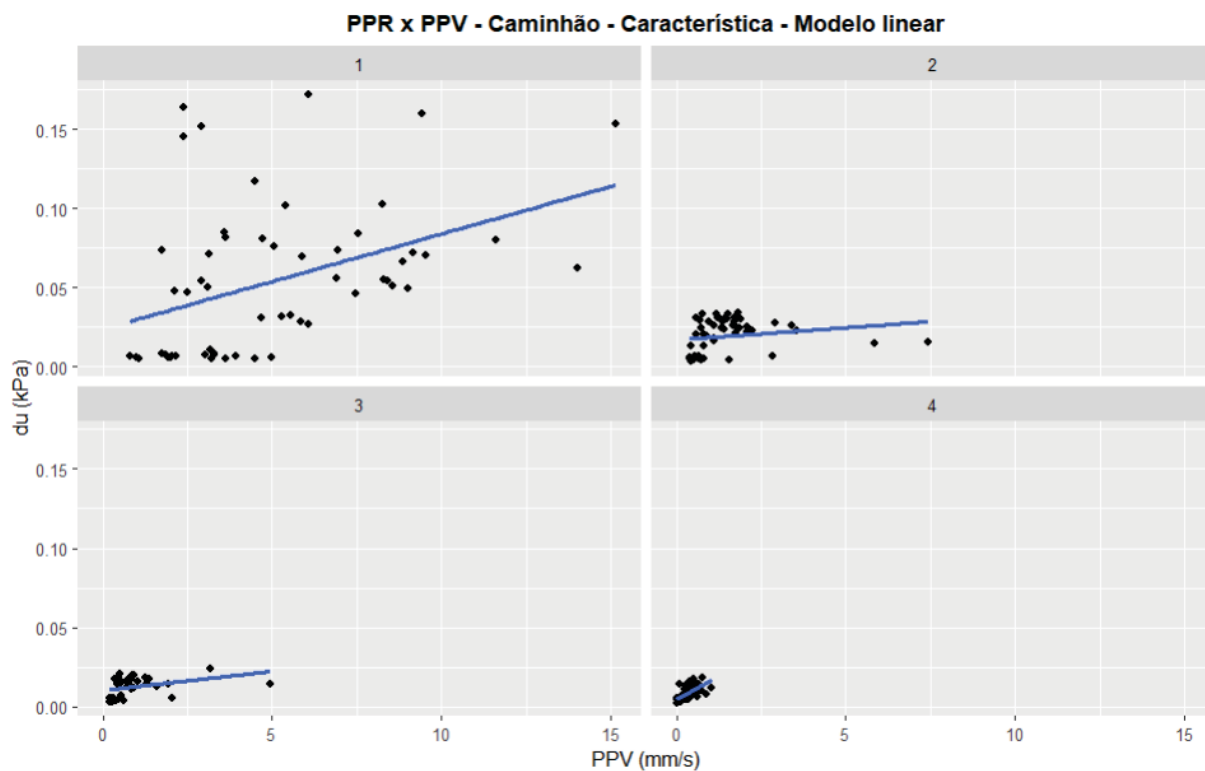
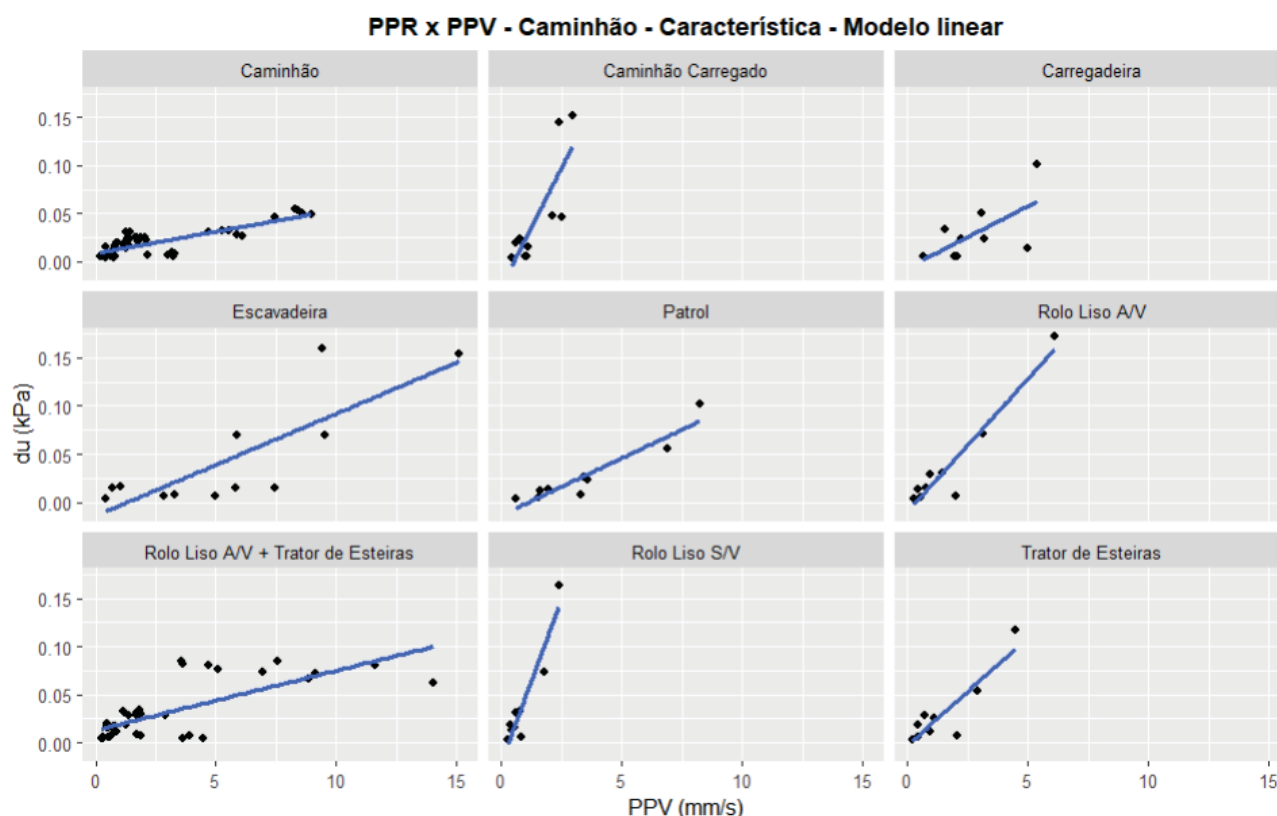


FIGURA 4.53 - GRÁFICOS DE “PPR” POR “PPV” SEPARADOS POR EQUIPAMENTO.



Os resultados separados por altura de aterro permanecem com a dispersão de dados, principalmente para a altura de 1m, que apresenta os maiores valores de propressão e velocidades de vibração, porém evidencia a não necessidade de consideração dos testes com altura de aterro de 4m, pela dissipação dos efeitos com a maior altura de aterro.

Com os resultados separados por equipamento, verifica-se uma melhor convergência das relações de “du” e “PPR” com “PPV”, e de forma linear, principalmente pra os equipamentos isolados.

Algumas variações nos resultados ainda podem ser devidas a diferença de atividades que cada equipamento desempenhou nas pistas experimentais, a condição de comboios para os caminhões vazios e a combinação de trator de esteiras com rolo liso de alta vibração. Estas informações, e os resultados dos coeficientes de determinação R^2 de cada modelo, foram consideradas na proposição de equações de correlação, e apresentadas no item seguinte.

4.4.4 Equações de correlação

De posse de todas as informações e resultados obtidos até o momento, foram propostas equações de correlação de “du” e “PPR”, inicialmente gerais e posteriormente separadas por equipamento, conforme estudos e modelos de correlação indicaram. Inicialmente, apresentam-se os resultados das variações de poropressão “du” e, posteriormente, da razão de poropressão “PPR”.

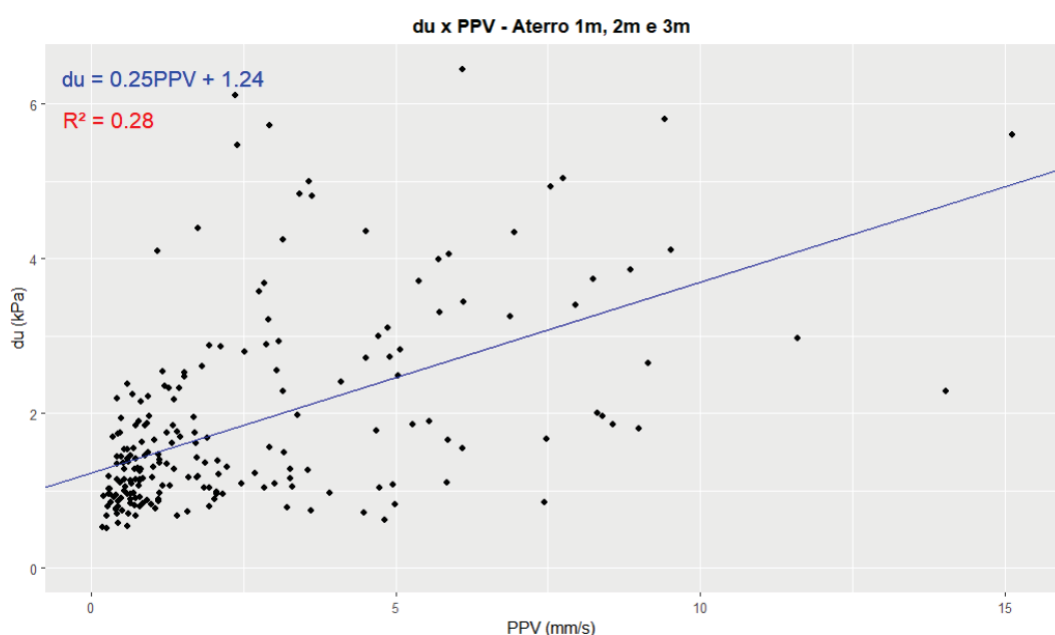
4.4.4.1 Equações de correlação com a variação da poropressão “du”

Para as equações de correlação “du” foram considerados modelos lineares, e dois testes com modelos exponenciais (caminhões vazios e combinação de rolo liso com trator de esteiras), devido aos resultados apresentados nos testes com comboio ou combinação de equipamentos, que apresentam resultados considerados diversos, conforme apresenta-se na sequência.

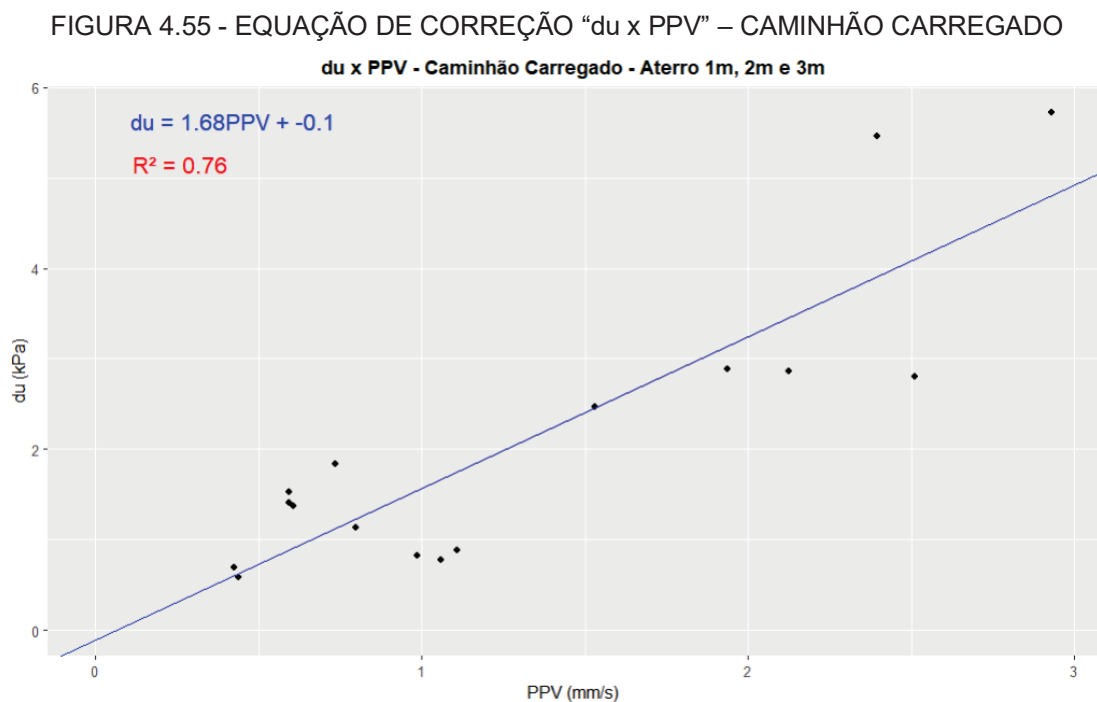
As equações e o coeficiente R^2 são apresentadas no canto superior esquerdo de cada gráfico.

a) Geral - Considerando todos os equipamentos (FIGURA 4.54).

FIGURA 4.54 – EQUAÇÃO DE CORREÇÃO “du x PPV” - GERAL



b) Caminhão Carregado (FIGURA 4.55).



c) Caminhão vazio

Considerando todos os comboios com modelo linear (FIGURA 4.56) e exponencial (FIGURA 4.57), e separados por característica do teste em modelo linear (FIGURA 4.58).

FIGURA 4.56 - EQUAÇÃO DE CORREÇÃO “du x PPV” – CAMINHÃO VAZIO – TODOS OS COMBOIOS – MODELO LINEAR.

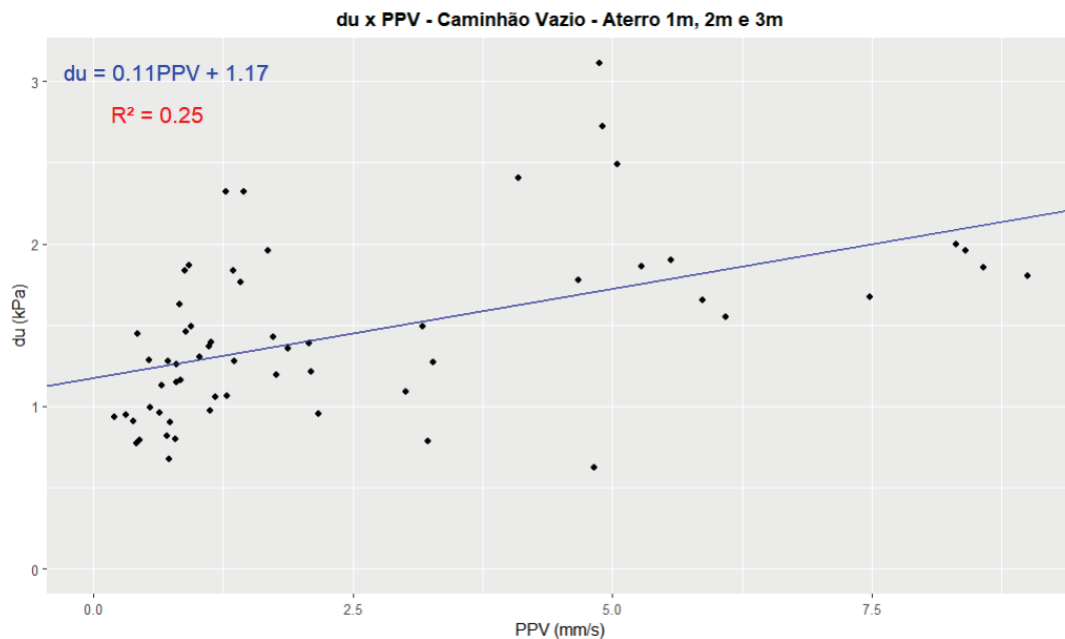


FIGURA 4.57 - EQUAÇÃO DE CORREÇÃO “du x PPV” – CAMINHÃO VAZIO – TODOS OS COMBOIOS – MODELO EXPONENCIAL.

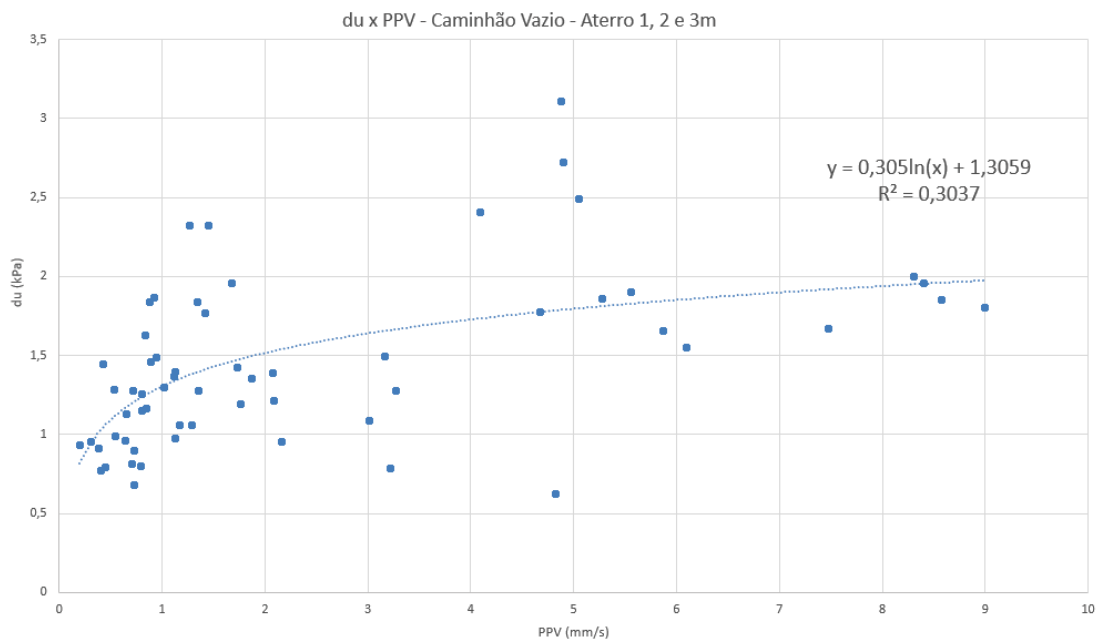
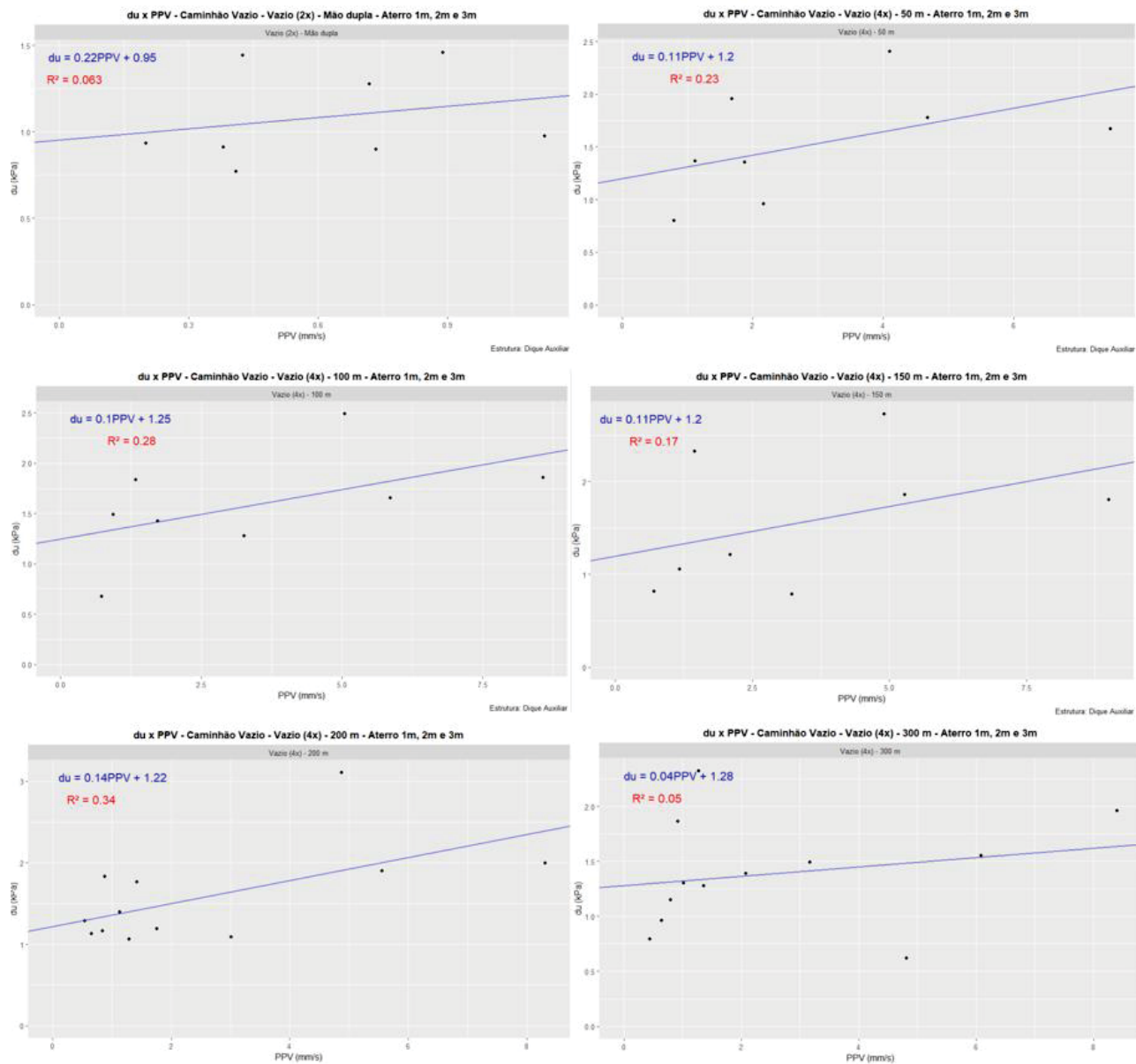
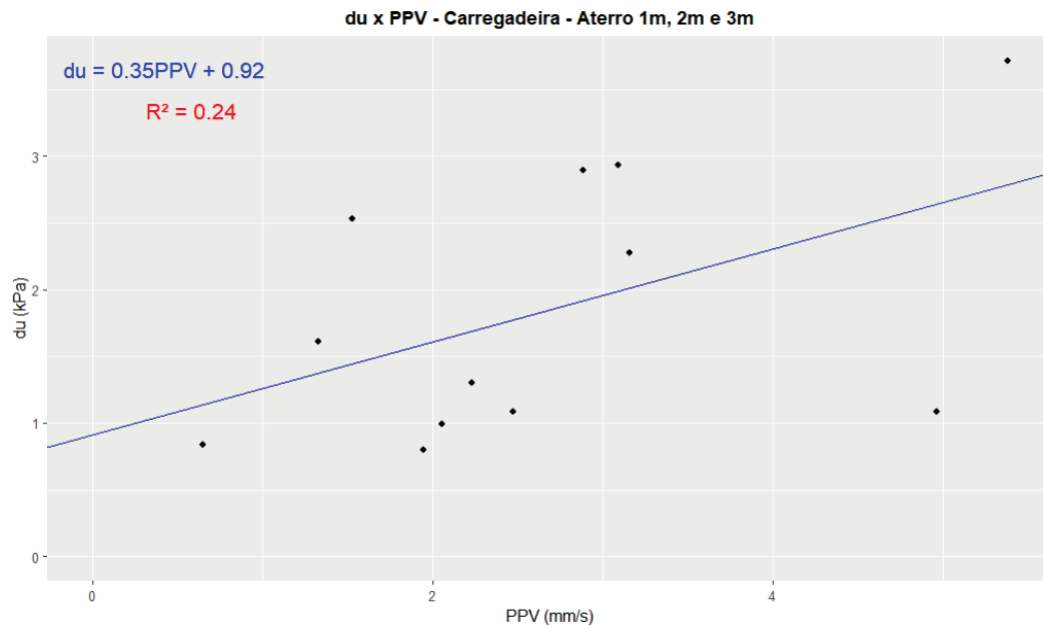


FIGURA 4.58 - EQUAÇÃO DE CORREÇÃO “du x PPV” – CAMINHÃO VAZIO – SEPARADOS POR CARACTERÍSTICA DO TESTE/COMBOIO – MODELO LINEAR.



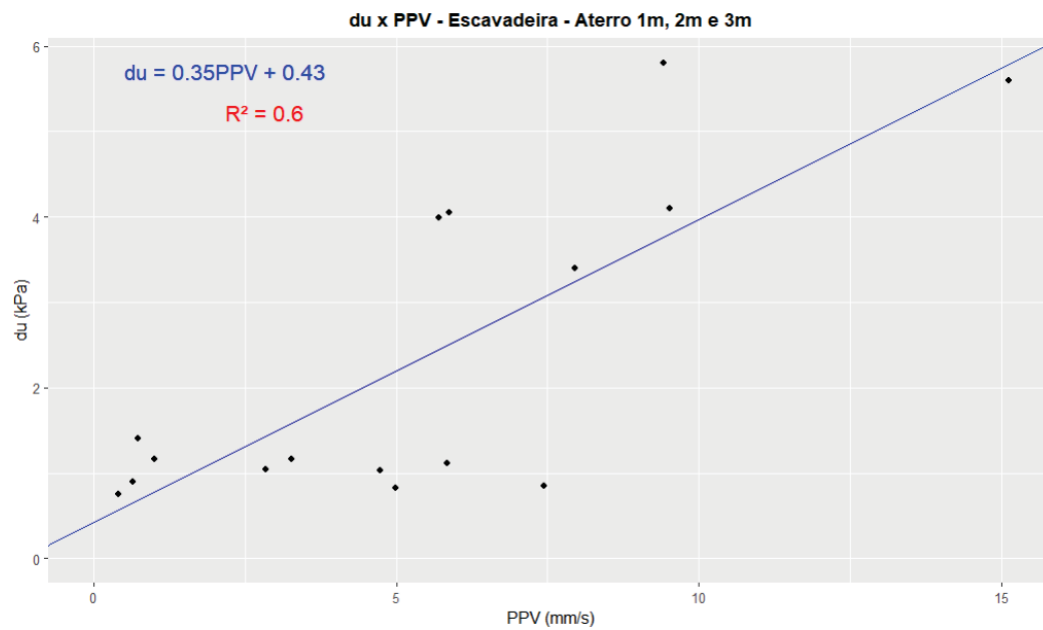
d) Carregadeira (FIGURA 4.59)

FIGURA 4.59 - EQUAÇÃO DE CORREÇÃO “du x PPV” – CARREGADEIRA.



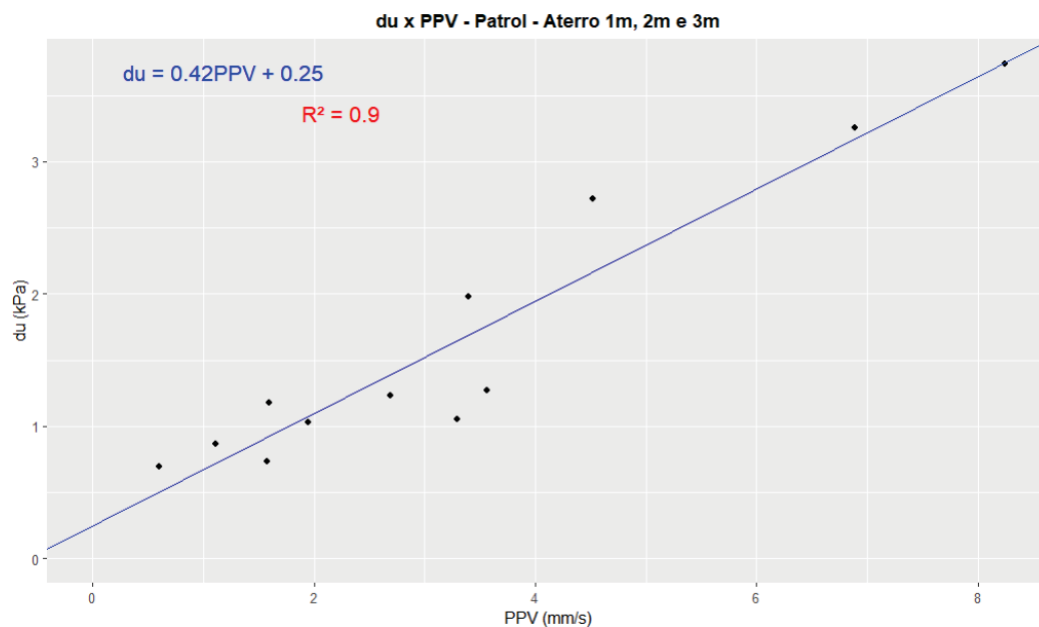
e) Escavadeira (FIGURA 4.60)

FIGURA 4.60 - EQUAÇÃO DE CORREÇÃO “du x PPV” – ESCAVADEIRA.



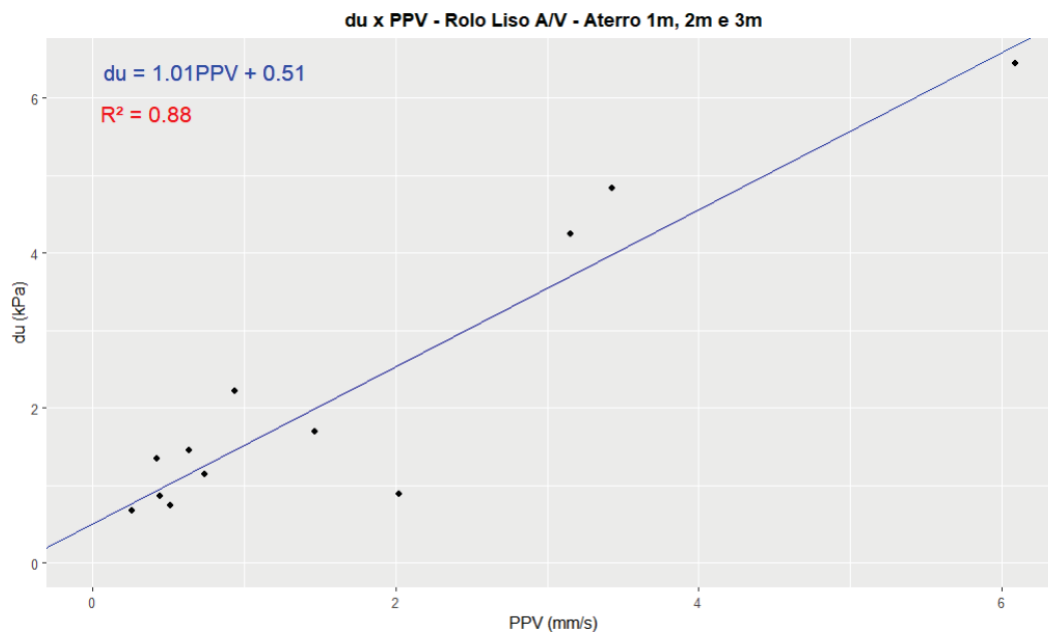
f) Patrol (FIGURA 4.61)

FIGURA 4.61 - EQUAÇÃO DE CORREÇÃO “du x PPV” – PATROL



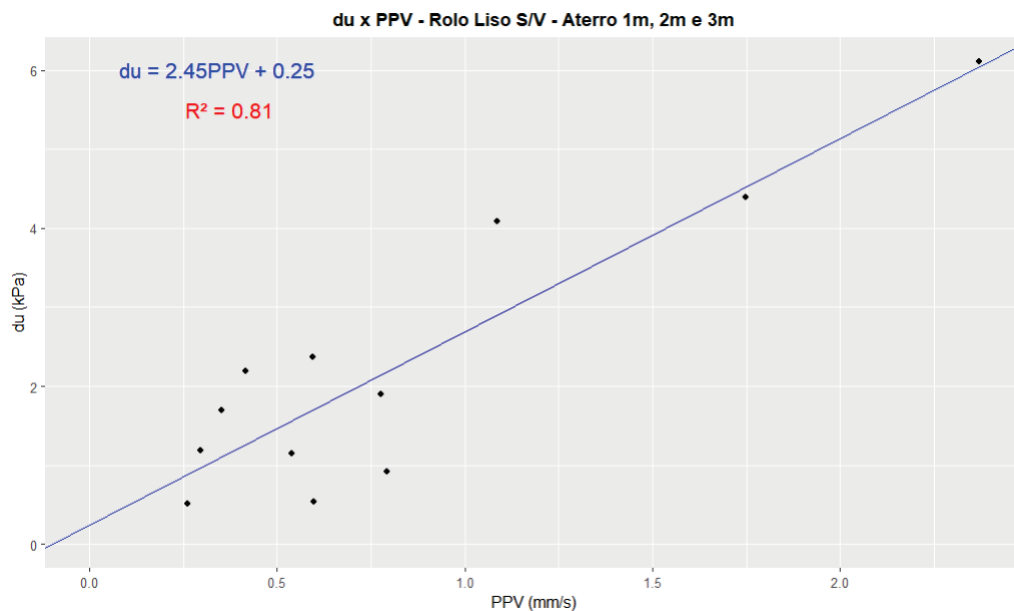
g) Rolo Liso A/V (FIGURA 4.62)

FIGURA 4.62 - EQUAÇÃO DE CORREÇÃO “du x PPV” – ROLO LISO A/V



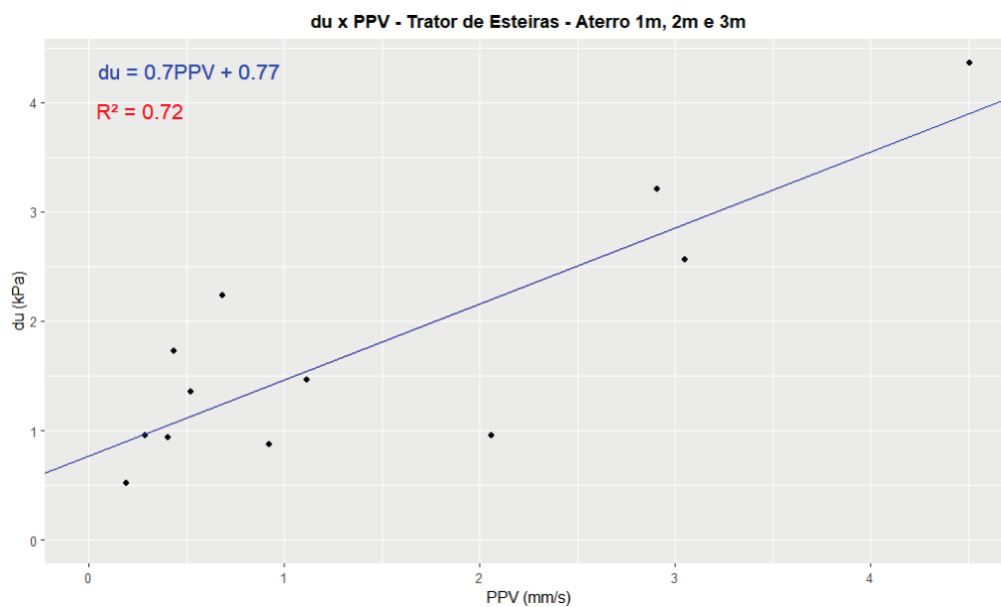
h) Rolo Liso S/V (FIGURA 4.63)

FIGURA 4.63 - EQUAÇÃO DE CORREÇÃO “du x PPV” – ROLO LISO S/V



i) Trator de Esteiras (FIGURA 4.64)

FIGURA 4.64 - EQUAÇÃO DE CORREÇÃO “du x PPV” – TRATOR DE ESTEIRAS.



j) Rolo Liso A/V + Trator de Esteiras

Considerando todos os comboios com modelo linear (FIGURA 4.65) e exponencial (FIGURA 4.66), e separados por característica do teste em modelo linear (FIGURA 4.67).

FIGURA 4.65 - EQUAÇÃO DE CORREÇÃO “du x PPV” – ROLO LISO + TRATOR DE ESTEIRAS – TODOS OS COMBOIOS – MODELO LINEAR.

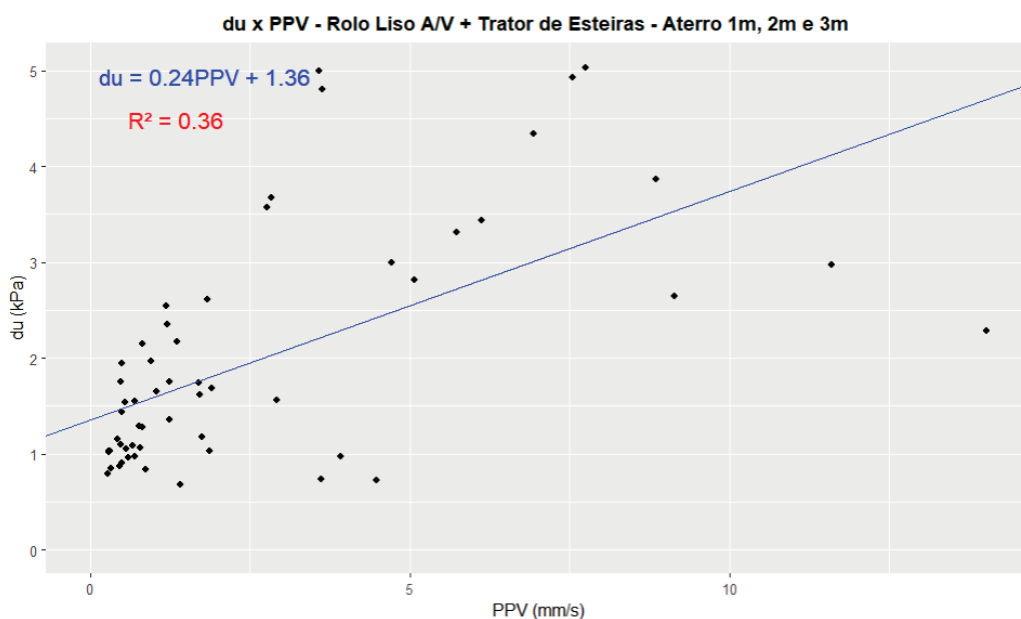


FIGURA 4.66 - EQUAÇÃO DE CORREÇÃO “du x PPV” – ROLO LISO + TRATOR DE ESTEIRAS – TODOS OS COMBOIOS – MODELO EXPONENCIAL.

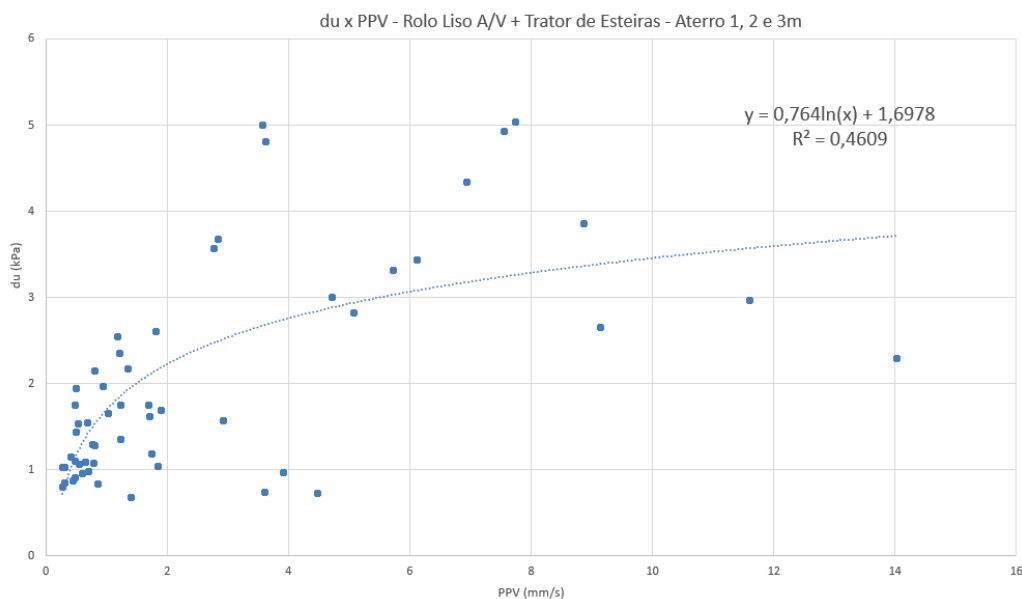
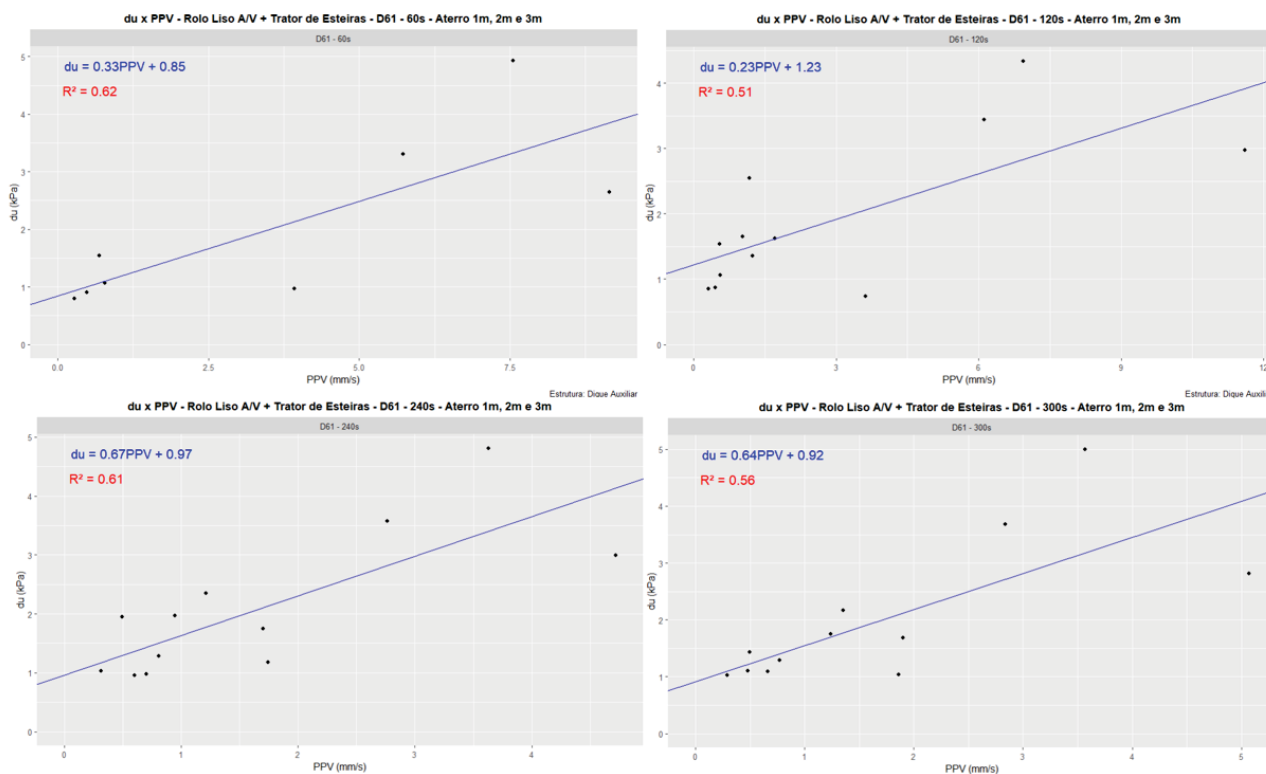


FIGURA 4.67 - EQUAÇÃO DE CORREÇÃO “du x PPV” – ROLO LISO + TRATOR DE ESTEIRAS – SEPARADOS POR CARACTERÍSTICA DO TESTE – MODELO LINEAR.



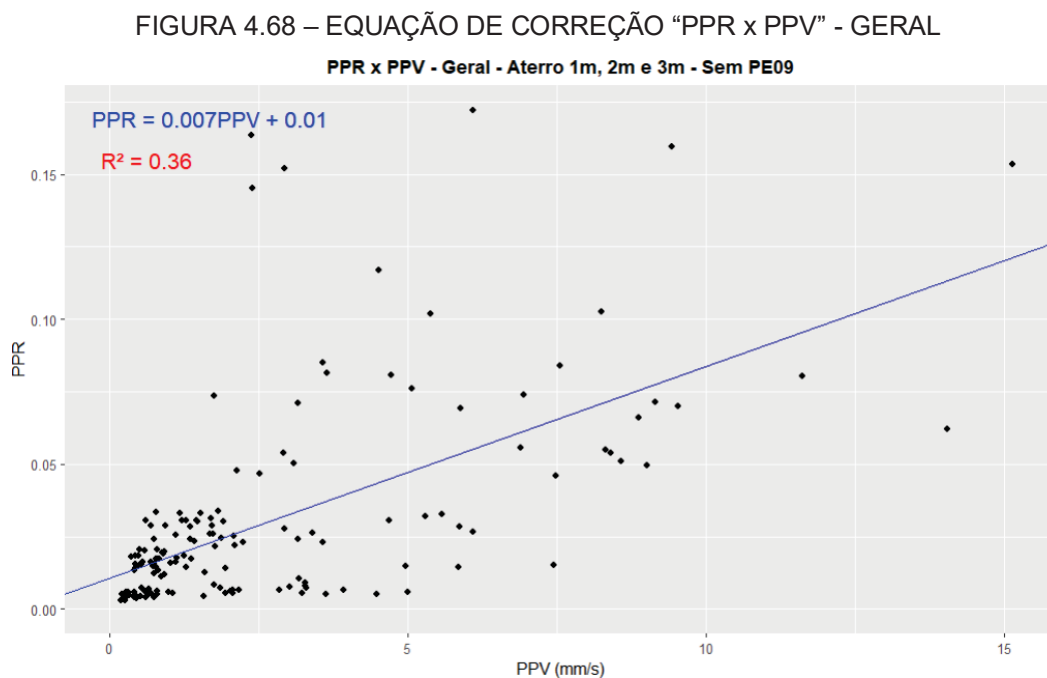
As análises iniciais dos resultados deste item, referente às equações de correlação da variação de poropressão (“du”) com velocidade de vibração de partícula de pico (“PPV”), são apresentadas em conjunto com os resultados do item seguinte (4.4.4.2), que é referente às equações de correlação da razão de poropressão (“PPR”) com o mesmo “PPV”. Estas análises iniciais conjuntas são apresentadas no item 4.4.4.3, que apresenta, também, os resumos dos resultados obtidos para as duas variáveis (“du” e “PPR”).

4.4.4.2 Equações de correlação com a razão da poropressão “PPR”

Para as equações de correlação com “PPR” foram considerados modelos lineares devido a distribuição dos resultados e a melhora na convergência considerada não significativa nos ajustes com modelos exponenciais no resultados anteriores (“du”).

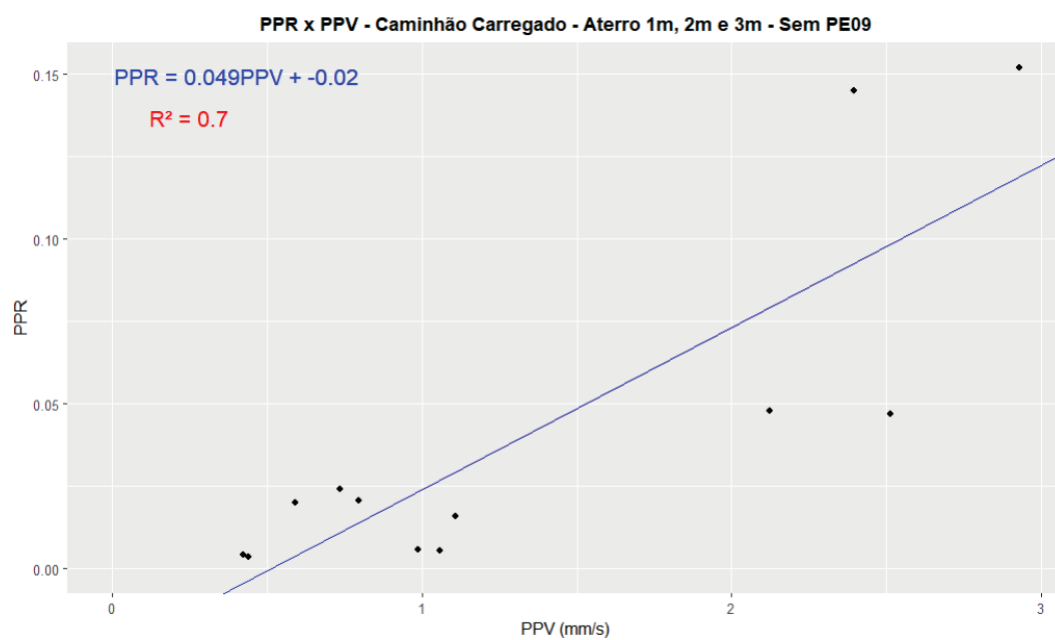
As equações e o coeficiente R^2 são apresentadas no canto superior esquerdo de cada gráfico.

a) Geral - Considerando todos os equipamentos (FIGURA 4.68).



b) Caminhão Carregado (FIGURA 4.69).

FIGURA 4.69 - EQUAÇÃO DE CORREÇÃO “PPR x PPV” – CAMINHÃO CARREGADO



c) Caminhão vazio

Considerando todos os comboios (FIGURA 4.70), e separados por característica do teste (FIGURA 4.71).

FIGURA 4.70 - EQUAÇÃO DE CORREÇÃO “PPR x PPV” – CAMINHÃO VAZIO – TODOS OS COMBOIOS.

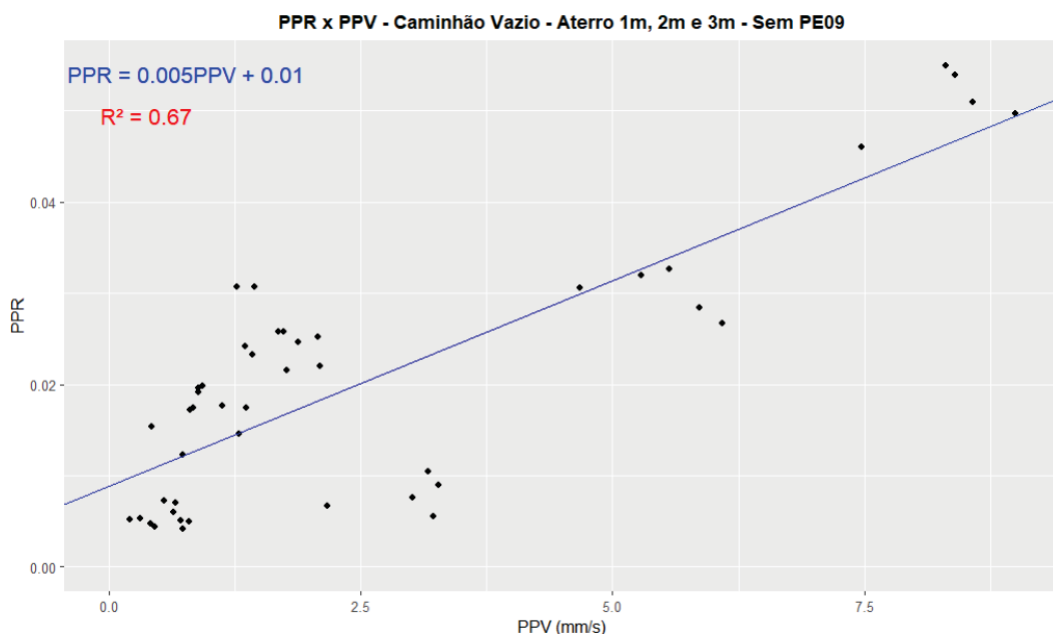
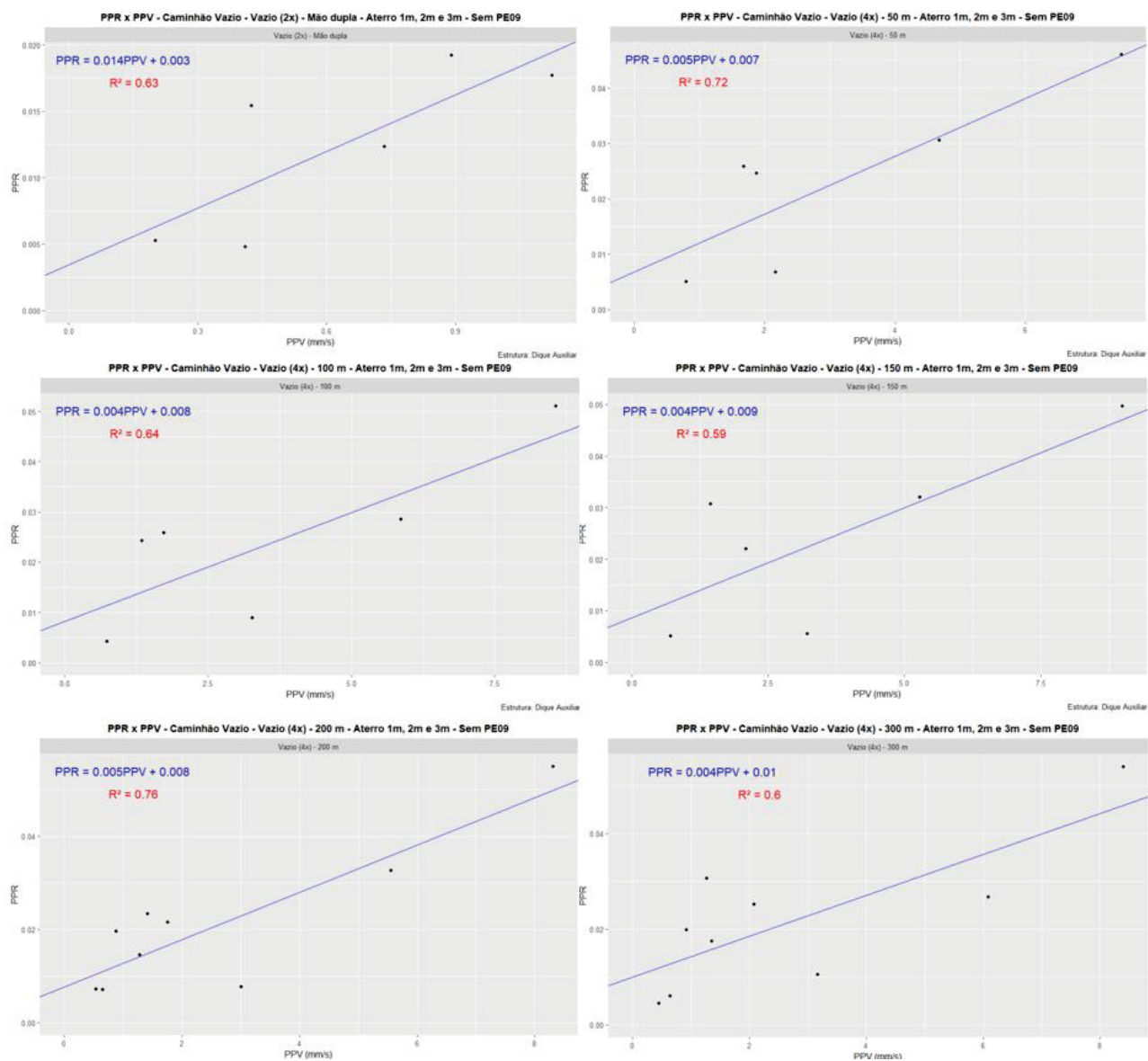
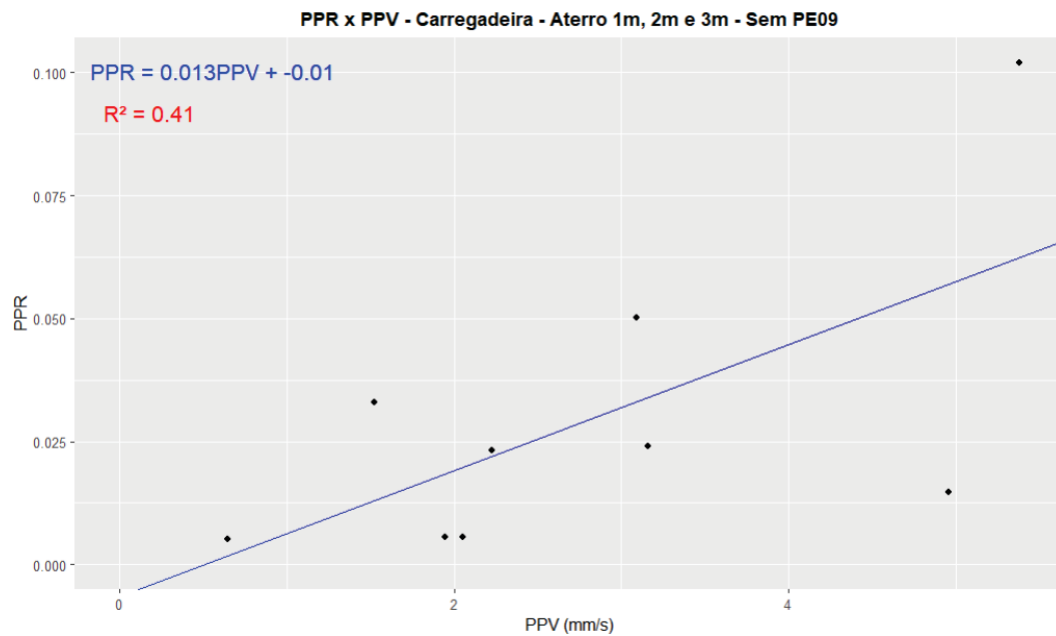


FIGURA 4.71 - EQUAÇÃO DE CORREÇÃO “PPR x PPV” – CAMINHÃO VAZIO – SEPARADOS POR CARACTERÍSTICA DO TESTE/COMBOIO.



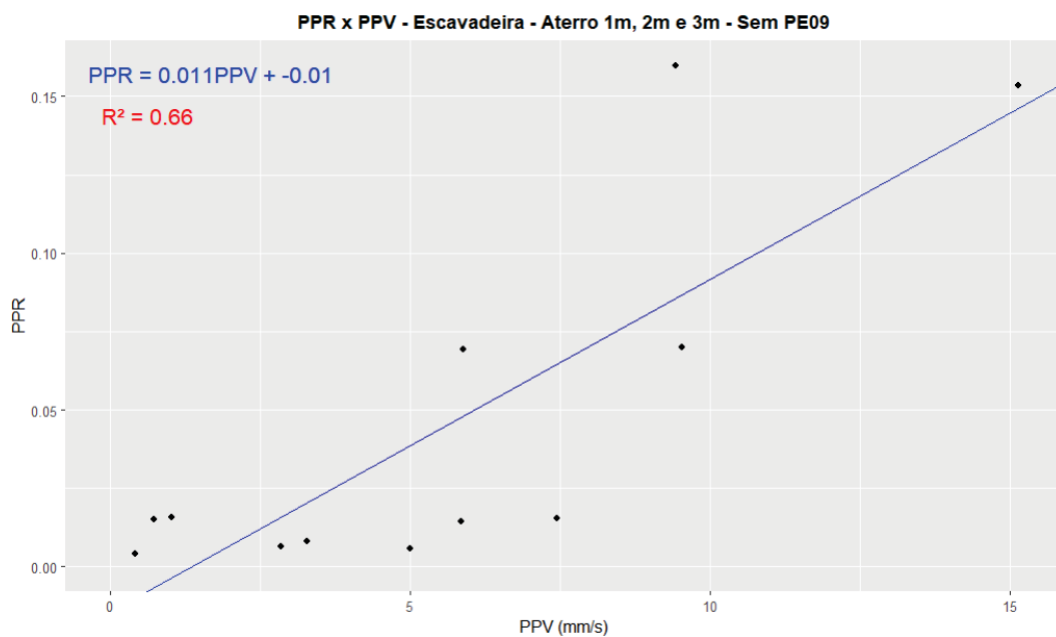
d) Carregadeira (FIGURA 4.72)

FIGURA 4.72 - EQUAÇÃO DE CORREÇÃO “PPR x PPV” – CARREGADEIRA.

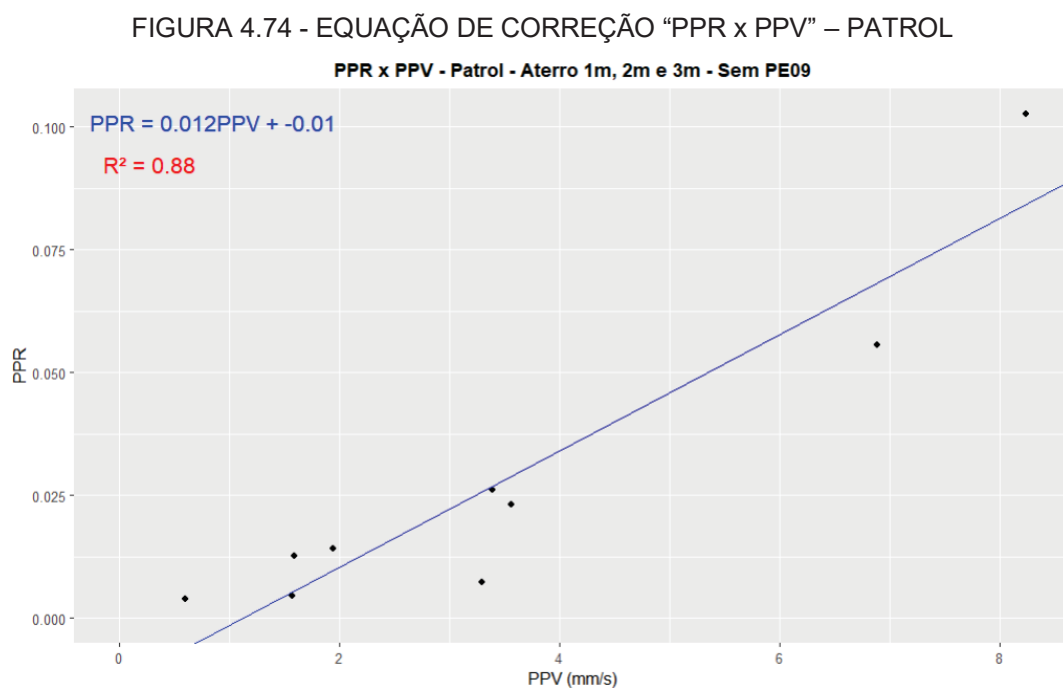


e) Escavadeira (FIGURA 4.73)

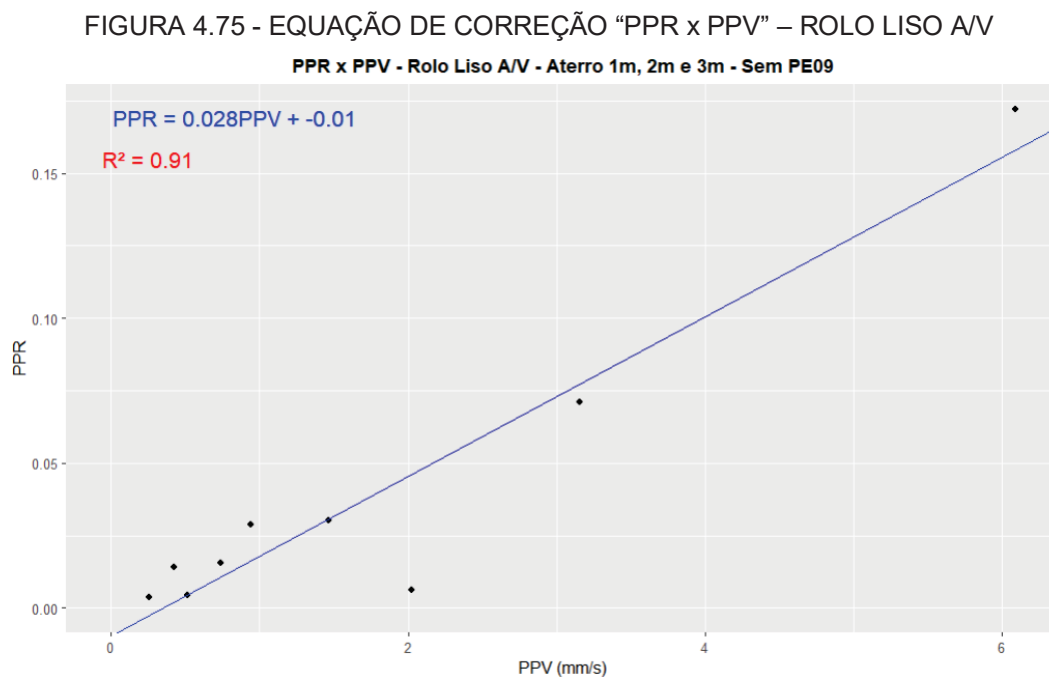
FIGURA 4.73 - EQUAÇÃO DE CORREÇÃO “PPR x PPV” – ESCAVADEIRA.



f) Patrol (FIGURA 4.74)

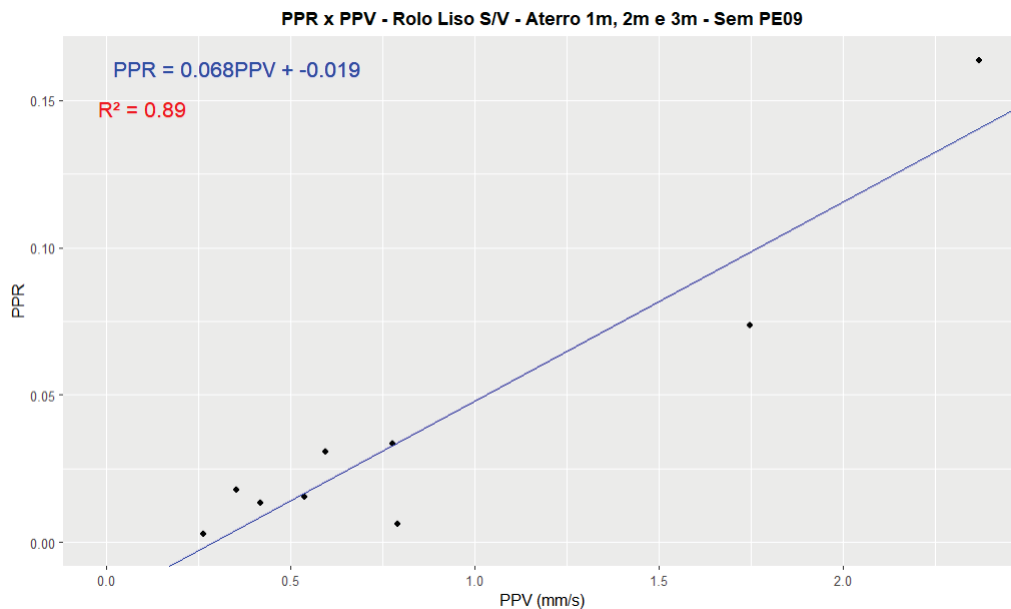


g) Rolo Liso A/V (FIGURA 4.75)



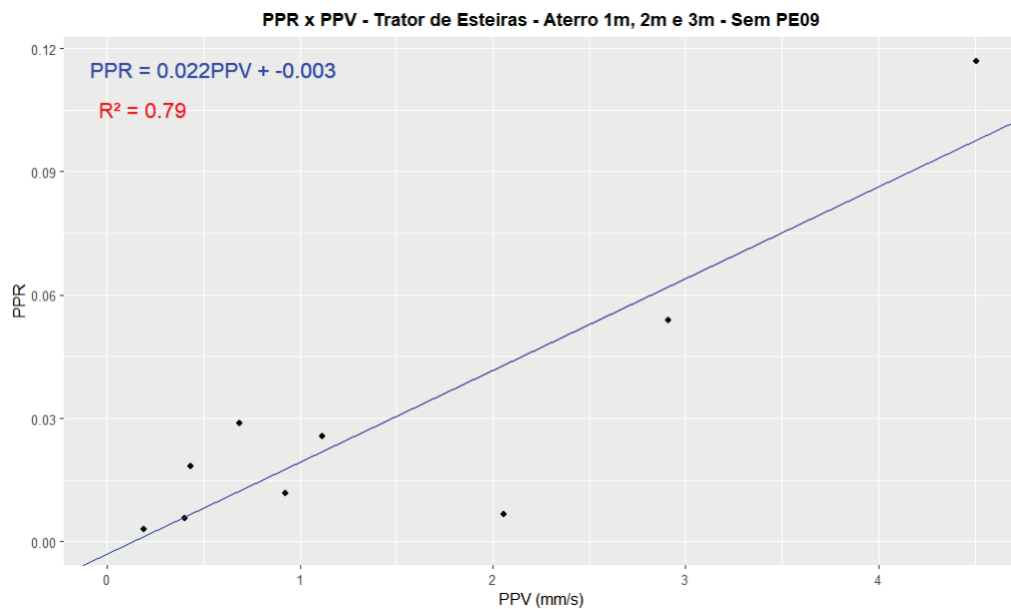
h) Rolo Liso S/V (FIGURA 4.76)

FIGURA 4.76 - EQUAÇÃO DE CORREÇÃO “PPR x PPV” – ROLO LISO S/V



i) Trator de Esteiras (FIGURA 4.77)

FIGURA 4.77 - EQUAÇÃO DE CORREÇÃO “PPR x PPV” – TRATOR DE ESTEIRAS.



j) Rolo Liso A/V + Trator de Esteiras

Considerando todos os comboios (FIGURA 4.78), e separados por característica do teste (FIGURA 4.79).

FIGURA 4.78 - EQUAÇÃO DE CORREÇÃO “PPR x PPV” – ROLO LISO + TRATOR DE ESTEIRAS – TODOS OS COMBOIOS.

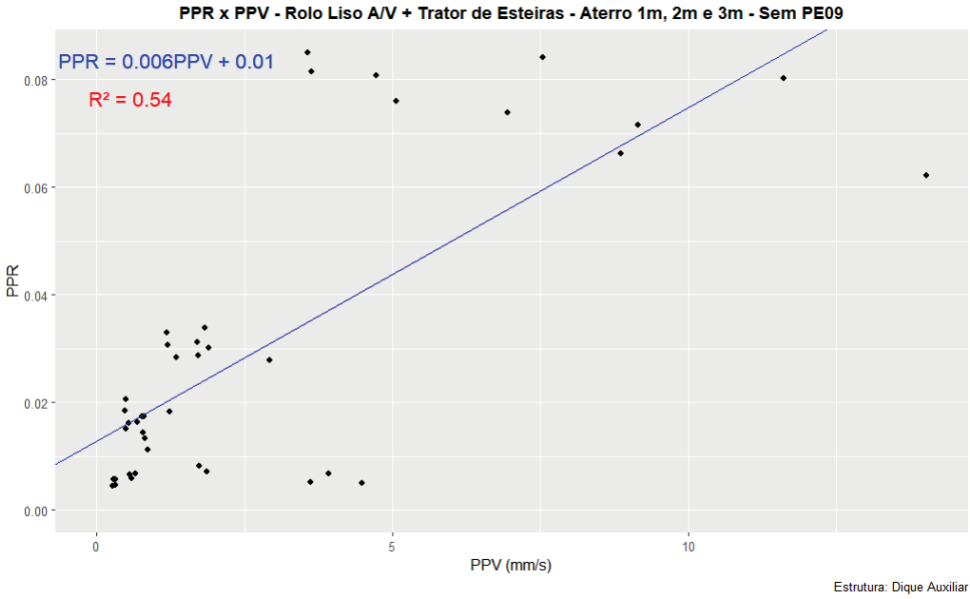
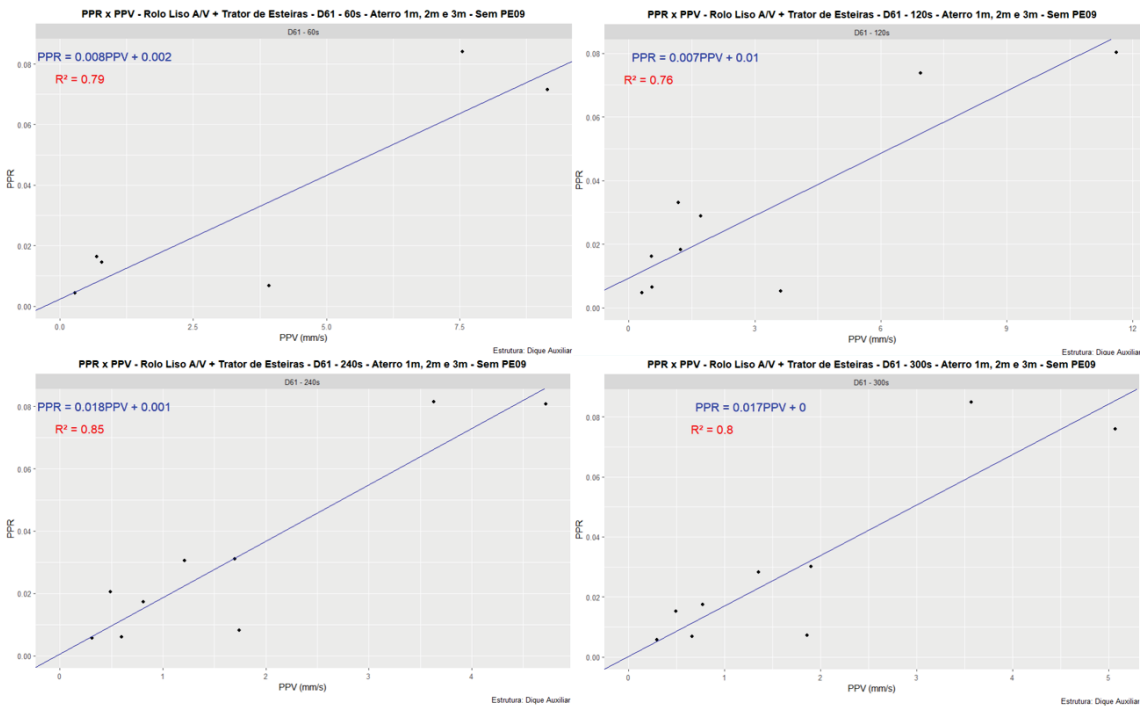


FIGURA 4.79 - EQUAÇÃO DE CORREÇÃO “PPR x PPV” – ROLO LISO + TRATOR DE ESTEIRAS – SEPARADOS POR CARACTERÍSTICA DO TESTE.



Conforme comentado no item anterior, as análises iniciais dos resultados das correlações e equações de “du” e “PPR” com “PPV” são apresentadas no item seguinte (4.4.4.3), que também apresenta um resumo dos resultados obtidos até então.

4.4.4.3 Resumo e análise dos resultados das equações de correlação

Um resumo de todas as equações e coeficientes de determinação para os modelos de variação de poropressão “du” e razão de poropressão “PPR” é apresentado no QUADRO 4.13.

QUADRO 4.13 - – RESUMO DOS RESULTADOS DAS EQUAÇÕES DE CORRELAÇÃO.

Equipamento		Aterro de 1 a 3m		Aterro de 1 a 3m e sem PE09	
Tipo	Característica ou Atividade	Equação du = a. PPV + b	R ²	Equação PPR = a. PPV + b	R ²
TODOS OS EQUIPAMENTOS	-	0,25.PPV + 1,24	0,28	0,007.PPV + 0,01	0,36
CAMINHÃO CARREGADO	-	1,68.PPV - 0,1	0,76	0,049.PPV - 0,02	0,70
CAMINHÃO VAZIO	TODOS OS COMBOIOS	0,11.PPV + 1,17	0,25	0,005.PPV + 0,01	0,67
	Vazio (2x) - Mão Dupla	0,22.PPV + 0,95	0,06	0,014.PPV + 0,003	0,63
	Vazio (4x) - 50m	0,11.PPV + 1,2	0,23	0,005.PPV + 0,007	0,72
	Vazio (4x) - 100m	0,10.PPV + 1,25	0,28	0,004.PPV + 0,008	0,64
	Vazio (4x) - 150m	0,11.PPV + 1,2	0,17	0,004.PPV + 0,009	0,59
	Vazio (4x) - 200m	0,14.PPV + 1,22	0,34	0,005.PPV + 0,008	0,76
	Vazio (4x) - 300m	0,04.PPV + 1,28	0,05	0,004.PPV + 0,01	0,60
CARREGADEIRA	-	0,35.PPV + 0,92	0,24	0,013.PPV - 0,01	0,41
ESCAVADEIRA	-	0,35.PPV + 0,43	0,60	0,011.PPV - 0,01	0,66
PATROL	-	0,42.PPV + 0,25	0,90	0,012.PPV - 0,01	0,88
ROLO LISO A/V	-	1,01.PPV + 0,51	0,88	0,028.PPV - 0,01	0,91
ROLO LISO S/V	-	2,45.PPV + 0,25	0,81	0,068.PPV - 0,019	0,89
TRATOR DE ESTEIRAS	-	0,70.PPV + 0,77	0,72	0,022.PPV - 0,003	0,79

Equipamento		Aterro de 1 a 3m		Aterro de 1 a 3m e sem PE09	
Tipo	Característica ou Atividade	Equação $du = a. PPV + b$	R^2	Equação $PPR = a. PPV + b$	R^2
ROLO LISO A/V + TRATOR DE ESTEIRAS	TODOS OS COMBOIOS	$0,24.PPV + 1,36$	0,36	$0,006.PPV + 0,01$	0,54
	D61 - 60s	$0,33.PPV + 0,85$	0,62	$0,008.PPV + 0,002$	0,79
	D61 - 120s	$0,23.PPV + 1,23$	0,51	$0,007.PPV + 0,01$	0,76
	D61 - 240s	$0,67.PPV + 0,97$	0,61	$0,018.PPV + 0,001$	0,85
	D61 - 300s	$0,64.PPV + 0,92$	0,56	$0,0017.PPV + 0$	0,80

As equações apresentadas representam o comportamento da geração de poropressão e análise da razão de poropressão de diferentes equipamentos de construção, com convergências que podem ser consideradas satisfatórias para alguns casos, dentro das limitações e tipos de materiais testados.

Observando-se os coeficientes R^2 , de maneira geral, os resultados apresentam melhores índices em relação ao modelo geral de “du” ou “PPR” por “PPV”, sem considerar as demais variáveis envolvidas, com coeficientes de 0,76 e 0,70 para o Caminhão Carregado, 0,60 e 0,66 para a Escavadeira, 0,90 e 0,88 para a Patrol, 0,88 e 0,91 para o Rolo Liso A/V, 0,81 e 0,89 para o Rolo Liso S/V e 0,72 e 0,79 para o Trator de Esteiras. Os comboios de equipamentos apresentam convergência menor, com 0,25 e 0,67 para o Caminhão Vazio e 0,36 e 0,54 para o Rolo Liso A/V + Trator de Esteiras, com melhora na análise do “PPR”. Dos equipamentos isolados, apenas a Carregadeira apresentou menor convergência, com coeficientes de 0,24 e 0,41.

Com relação às equações de correlação obtidas, um agrupamento com equações semelhantes pode ser realizado como os equipamentos Carregadeira, Escavadeira e Patrol, que apresentam relação próxima de 0,4 para “du x PPV” e 0,01 para “PPR x PPV”. Os demais equipamentos e comboios apresentam comportamentos distintos entre si, não sendo possível um agrupamento para as correlações diretas de “du” e “PPR” com “PPV”.

Constatações importantes foram observadas nos comparativos de um mesmo tipo de equipamento, porém com característica diferentes, como o Caminhão Vazio e Carregado, e o Rolo Liso A/V e S/V:

- Comparando-se os resultados gerais dos Caminhões Vazios e Carregados, verifica-se que o Caminhão Carregado apresenta “PPV” máximo próximo de 3 mm/s, com o Vazio apresentando maior vibração, com valor máximo próximo de 9 mm/s, porém o Caminhão Carregado apresenta maior variação de poropressão, com “du” próximo de 6 kPa, contra aproximadamente 3 kPa do Vazio. Ou seja, o peso do equipamento (43,5t contra 16,0t) é relevante na geração de poropressão neste caso, além da vibração gerada pelo equipamento.
- E comparando-se os Rolos Lisos A/V e S/V, que são iguais, com diferença apenas no acionamento da vibração do equipamento de A/V, apresentam diferenças na geração de vibração, com valor máximo próximo de 6mm/s para o A/V e próximo de 3mm/s para o S/V, porém ambos apresentam praticamente a mesma variação de poropressão (du), com valores próximos de 6 e 6,5 kPa. Esta é uma constatação ainda mais relevante sobre a influência do peso ou sobrecarga do equipamento, sobressaindo-se com relação a vibração gerada pelo mesmo.

Na tentativa de reduzir a influência do peso dos equipamentos semelhantes, foram analisados os testes com Caminhão Carregado e Vazio e Rolo Liso A/V e S/V com os resultados somente do par de instrumentos PE09-SV07B, localizado no limite do off-set do aterro/pista experimental, e sob menor influência das sobrecargas dos equipamentos. O par de instrumento analisado não está livre da influência da sobrecarga, porém a mesma são incide diretamente sobre o par.

Na FIGURA 4.80 apresenta-se o resultado para o Caminhão Carregado, na FIGURA 4.81 para o Caminhão Vazio, na FIGURA 4.82 para o Rolo Liso A/V e na FIGURA 4.83 para o Rolo Liso S/V.

FIGURA 4.80 - EQUAÇÃO DE CORREÇÃO “du x PPV” – CAMINHÃO CARREGADO – SOMENTE COM PE09-SV07B.

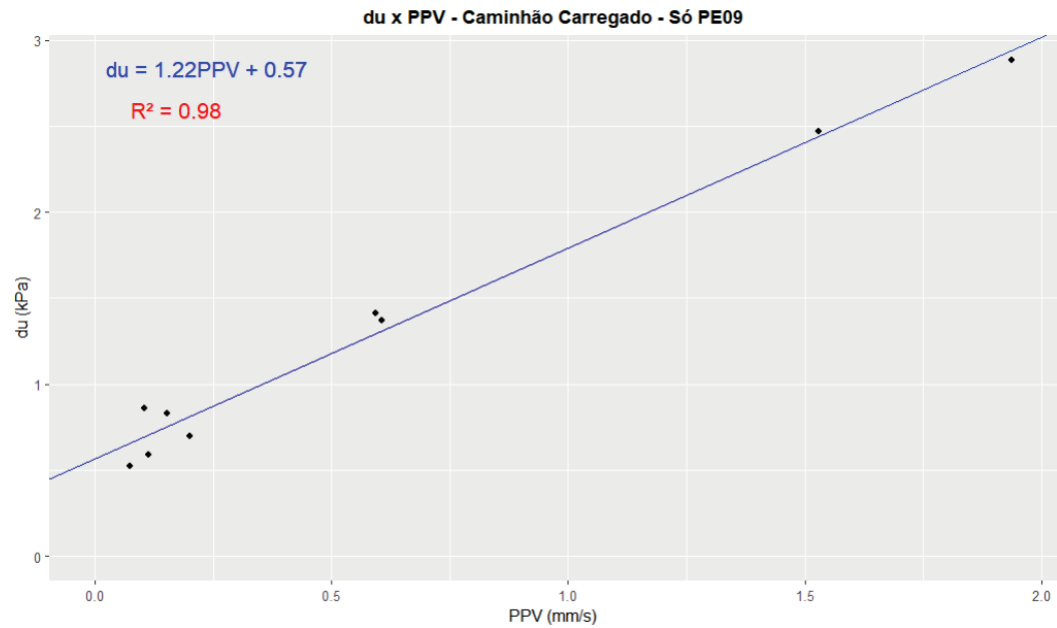


FIGURA 4.81 - EQUAÇÃO DE CORREÇÃO “du x PPV” – CAMINHÃO VAZIO – SOMENTE COM PE09-SV07B.

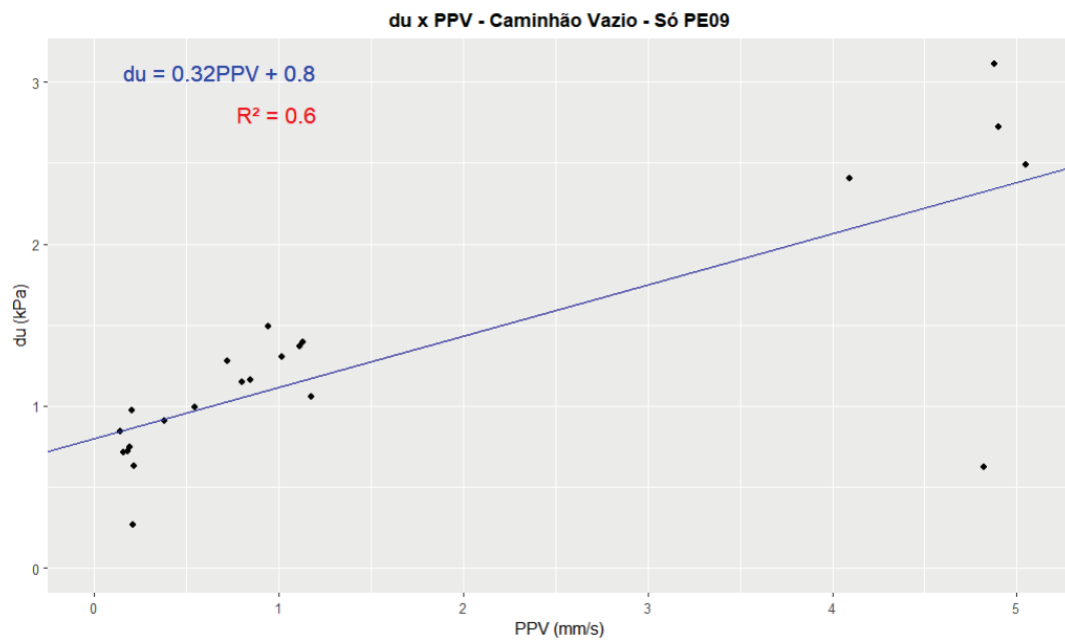


FIGURA 4.82 - EQUAÇÃO DE CORREÇÃO “du x PPV” – ROLO LISO A/V – SOMENTE COM PE09-SV07B.

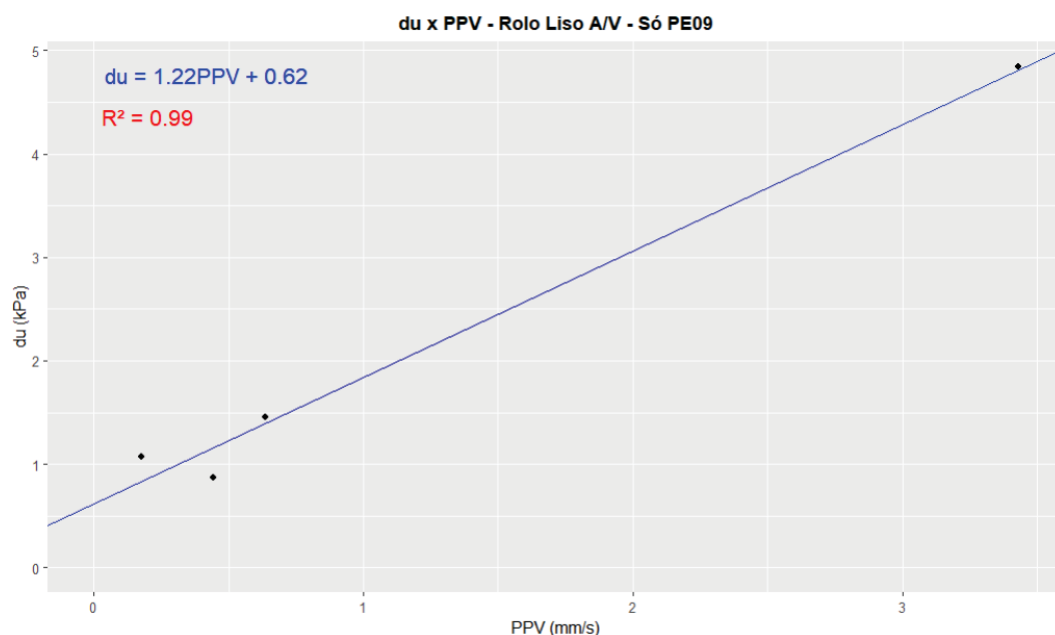
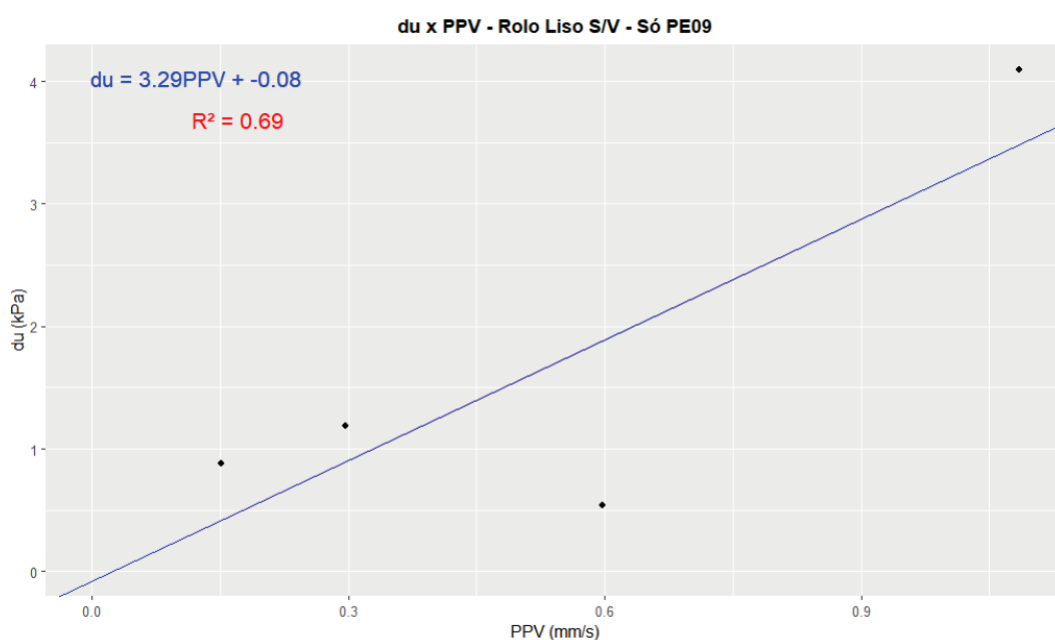


FIGURA 4.83 - EQUAÇÃO DE CORREÇÃO “du x PPV” – ROLO LISO S/V – SOMENTE COM PE09-SV07B.



Para os Caminhões, verifica-se que nesta análise o efeito da sobre carga foi reduzido, com o equipamento Carregado gerando máxima variação de poropressão próxima do Vazio, em torno de 3 kPa, porém com menor velocidade de vibração PPV, com 5mm/s para o Carregado e 3,5mm/s para o vazio.

E para os Rolos Lisos, verificou-se pequena variação na máxima poropressão gerada, com valor pouco inferior a 5 KPa para o Rolo Liso A/V, e pouco superior a 4 kPa para o S/V. Para as vibrações, houve maior redução do máximo PPV de 6mm/s para 3,5mm/s para o S/V e de 3mm/s para 1,1mm/s para o A/V.

Verificou-se uma redução da influência do peso ou sobrecarga do equipamento, porém ainda atuante nos resultados, devendo ser considerado nas análises do fenômeno observado.

A sequência do estudo prosseguiu com a análise das frequências de vibração, na tentativa de identificar possíveis relações com os resultados de cada equipamento, e com a tentativa de proposição de equação única que tenha abrangência de todos os equipamentos testados, com a melhor convergência possível.

4.4.4.4 Análises das frequências de vibração

As frequências de vibração podem ter influência na propagação das vibrações, devido ao possível efeito da ressonância com as frequências naturais dos materiais, conforme apresentado em 2.4.1. A consideração da frequência das vibrações está presente nas normativas apresentadas, e relacionadas a limites recomendáveis para velocidades de vibrações de partículas, com limites de velocidade inferiores para as menores faixas de frequência de vibrações, conforme apresentado no item relacionado aos critérios de segurança para vibrações (item 2.4.2).

Com isso, e para verificação das distribuições de frequências de cada equipamento, foram elaborados os espectros de frequência de vibração, que são as distribuições dos dados de velocidade com as frequências de vibração correspondentes. Estes espectros permitem a análise das frequências componentes de um sinal de vibração. Nas figuras seguintes (FIGURA 4.84 a FIGURA 4.92), apresentam-se os resultados para os espectros de frequência de vibração de cada equipamento e conjunto de equipamentos testados.

FIGURA 4.84 – ESPECTRO DE FREQUÊNCIA DE VIBRAÇÃO – CAMINHÃO CARREGADO.

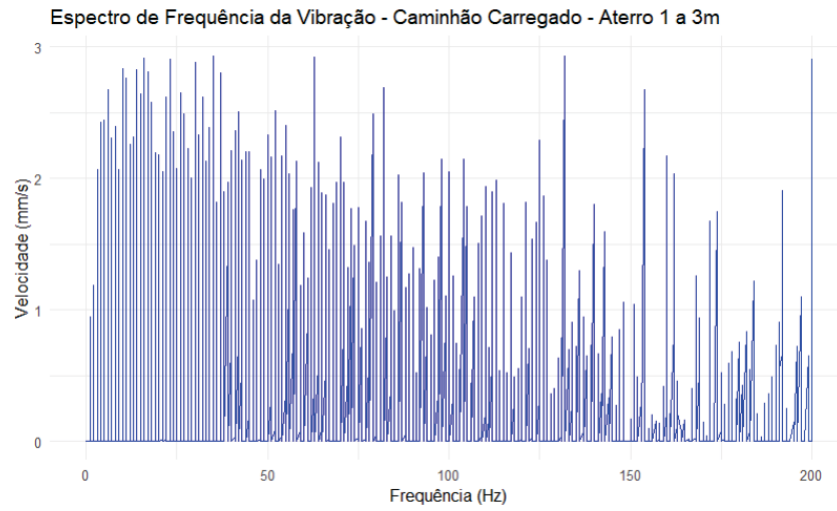


FIGURA 4.85 - ESPECTRO DE FREQUÊNCIA DE VIBRAÇÃO – CAMINHÃO VAZIO.

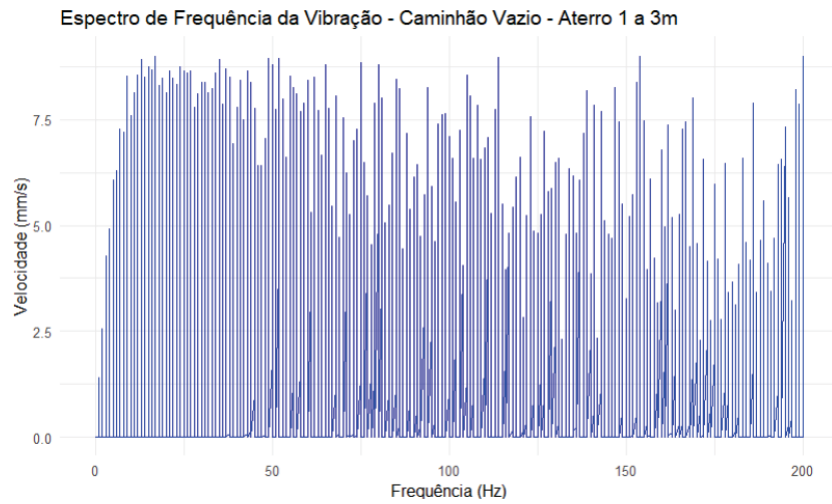


FIGURA 4.86 - ESPECTRO DE FREQUÊNCIA DE VIBRAÇÃO – CARREGADEIRA.

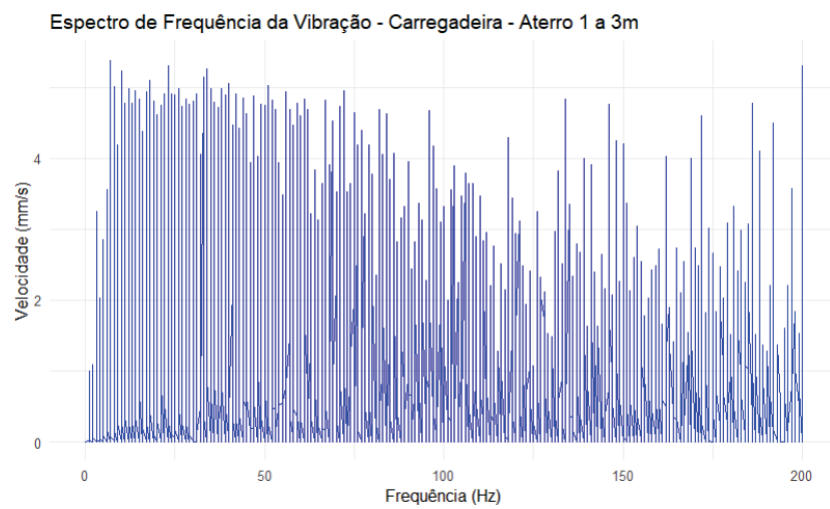


FIGURA 4.87 - ESPECTRO DE FREQUÊNCIA DE VIBRAÇÃO – ESCAVADEIRA.

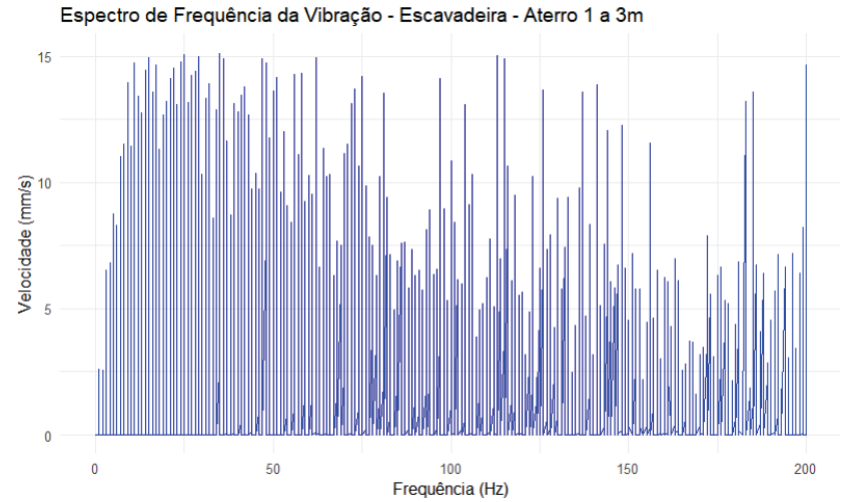


FIGURA 4.88 - ESPECTRO DE FREQUÊNCIA DE VIBRAÇÃO – PATROL.

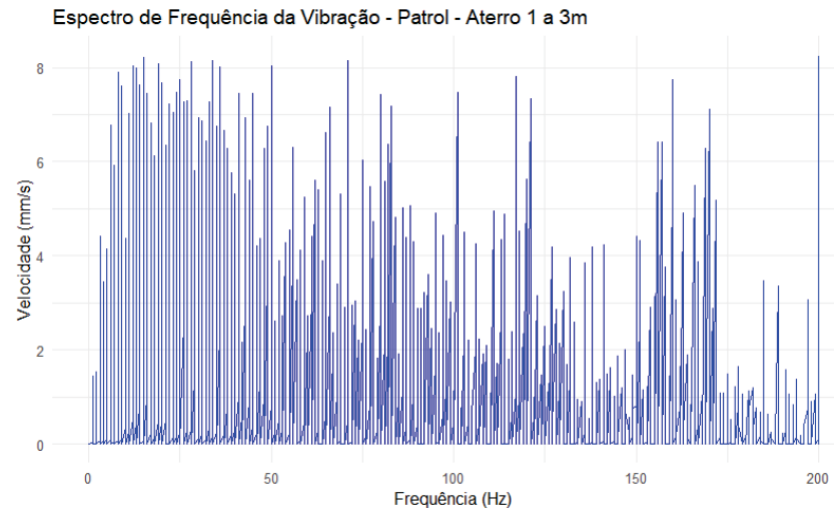


FIGURA 4.89 – ESPECTRO DE FREQUÊNCIA DE VIBRAÇÃO – ROLO LISO A/V.

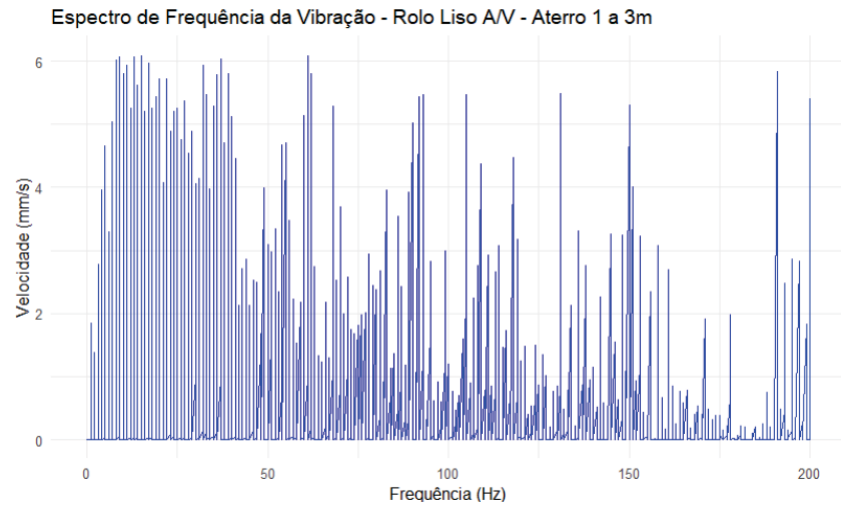


FIGURA 4.90 - ESPECTRO DE FREQUÊNCIA DE VIBRAÇÃO – ROLO LISO S/V.

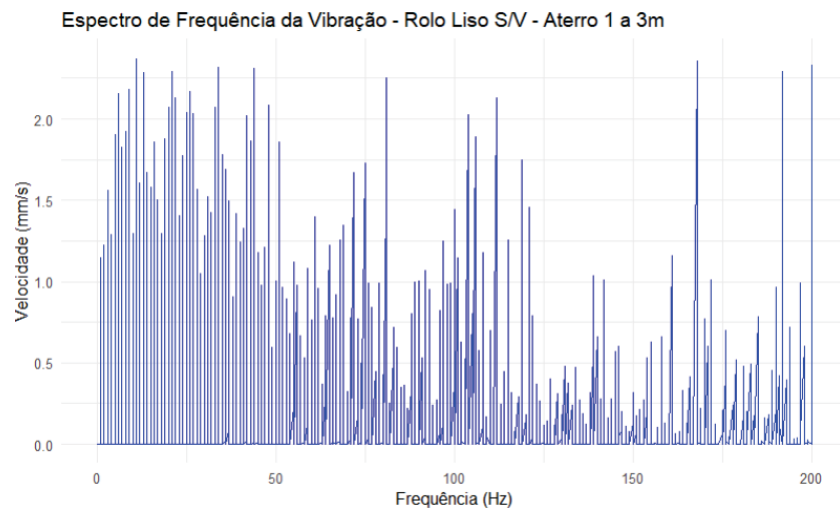


FIGURA 4.91 - ESPECTRO DE FREQUÊNCIA DE VIBRAÇÃO – TRATOR DE ESTEIRAS.

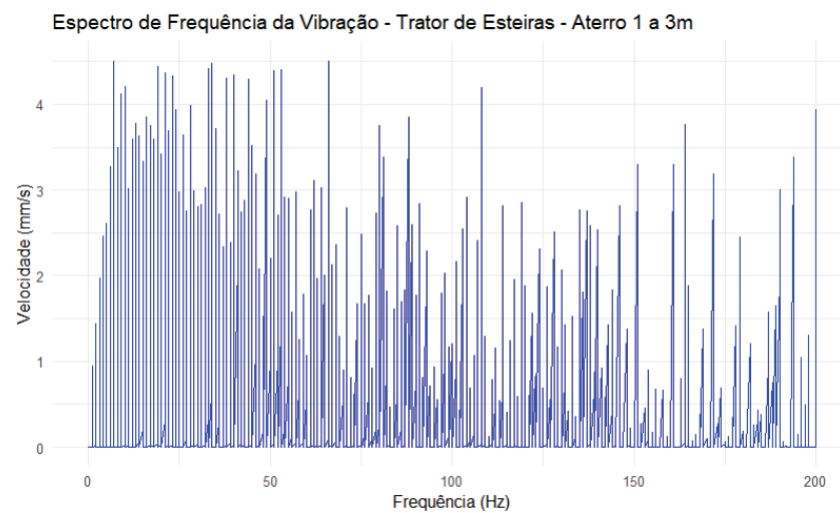
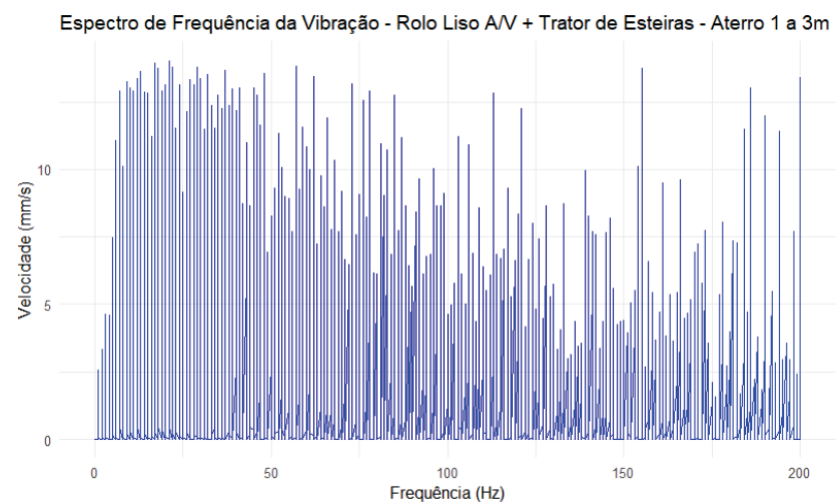


FIGURA 4.92 - ESPECTRO DE FREQUÊNCIA DE VIBRAÇÃO – ROLO LISO A/V + TRATOR DE ESTEIRAS.



De posse dos resultados, é possível verificar que os dados de são bastante distribuídos na faixa até 200 Hz, que provavelmente foi delimitada como valor máximo quando da determinação dessas frequências, que são oriundas diretas dos dados brutos disponibilizados para os sismógrafos de engenharia.

Neste contexto, buscou-se identificar onde ocorrem as maiores concentrações de dados nos espectros, porém sabendo-se que ocorrem frequências ao longo de toda escala adotada (0 a 200 Hz). As faixas aproximadas com maiores concentrações foram determinadas a partir do cruzamento do valor médio de PPV com a tendência de distribuição das frequências, em faixas de 25 Hz, e são apresentados abaixo, no QUADRO 4.14, com as equações de correlações específicas de “du” e “PPV” apresentadas juntamente, na tentativa de identificar algum padrão de comportamento.

Também foram reapresentados os gráficos de propagação das velocidades de partícula de pico máximas detectadas pelos sismógrafos em distâncias horizontais e verticais (profundidade) em relação ao centro e base da pista experimental, agora para cada tipo de equipamento. Para o gráfico das distâncias verticais (FIGURA 4.93), foram considerados os sismógrafos em profundidade, a partir da superfície, com SV06A, SV06B, SV06C e SV06D. E os gráficos das distâncias horizontais (FIGURA 4.93), foram considerados os sismógrafos de superfície SV06A, SV07A, SV08A, SV09 e SV10.

QUADRO 4.14 – EQUIPAMENTOS, FREQUÊNCIAS E CORREÇÕES DE du E PPV.

Equipamento	Peso equipamento (kN)	Faixa com concentração de frequências (estimada) (Hz)	du máx (kPa)	PPV máx (mm/s) ⁽¹⁾	Equação
Patrol	147,5	50	3,7	8,24	$du = 0,42.PPV + 0,25$
Rolo Liso A/V	112	50	6,4	6,1	$du = 1,01.PPV + 0,51$
Rolo Liso S/V	112	50	6,1	2,4	$du = 2,45.PPV + 0,25$
Caminhão Carregado	435	50	5,7	2,9	$du = 1,68.PPV - 0,1$
Escavadeira	372,5	50	5,8	15,1	$du = 0,35.PPV + 0,43$
Trator de Esteiras	198	50	4,4	4,5	$du = 0,70.PPV + 0,77$
Carregadeira	232	75	3,7	5,4	$du = 0,35.PPV + 0,92$
Rolo Liso A/V + Trator de Esteiras	310	75	5	14	$du = 0,24.PPV + 1,36$

Equipamento	Peso equipamento (kN)	Faixa com concentração de frequências (estimada) (Hz)	du máx (kPa)	PPV máx (mm/s) ⁽¹⁾	Equação
Caminhão Vazio	160	100	3,1	9	$du = 0,11.PPV + 1,17$

(1) PPV máximo considerando os sismógrafos que apresentam piezômetro correspondente, que foram considerados para a determinação as equações de correlação de “du” e “PPV”.

FIGURA 4.93 – VELOCIDADE DE VIBRAÇÃO DE PARTÍCULA DE PÍCO MÁXIMA PELA PROFUNDIDADE.

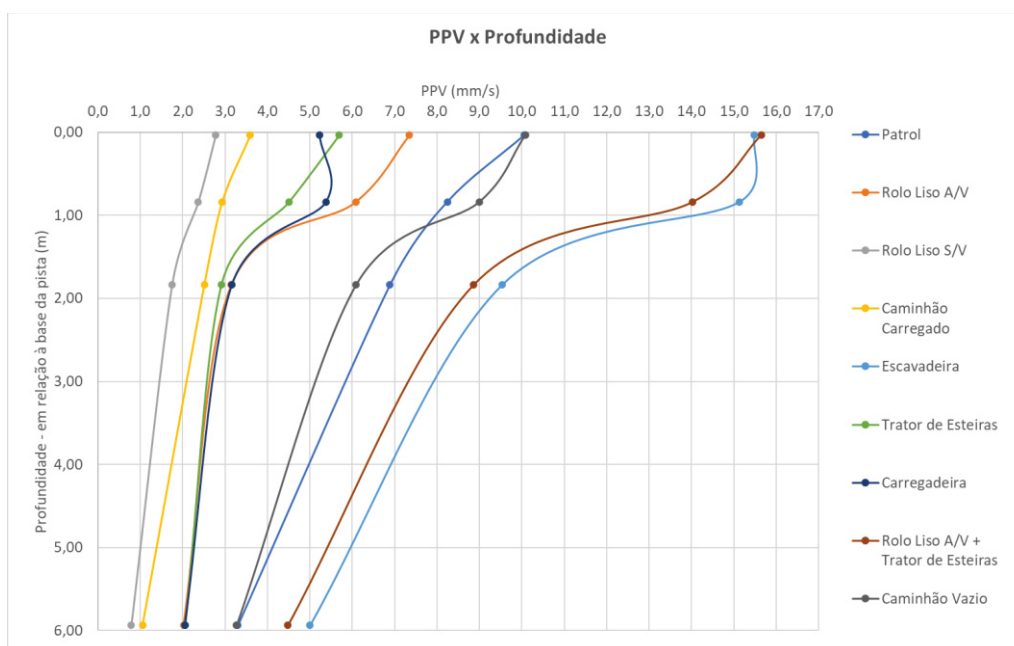
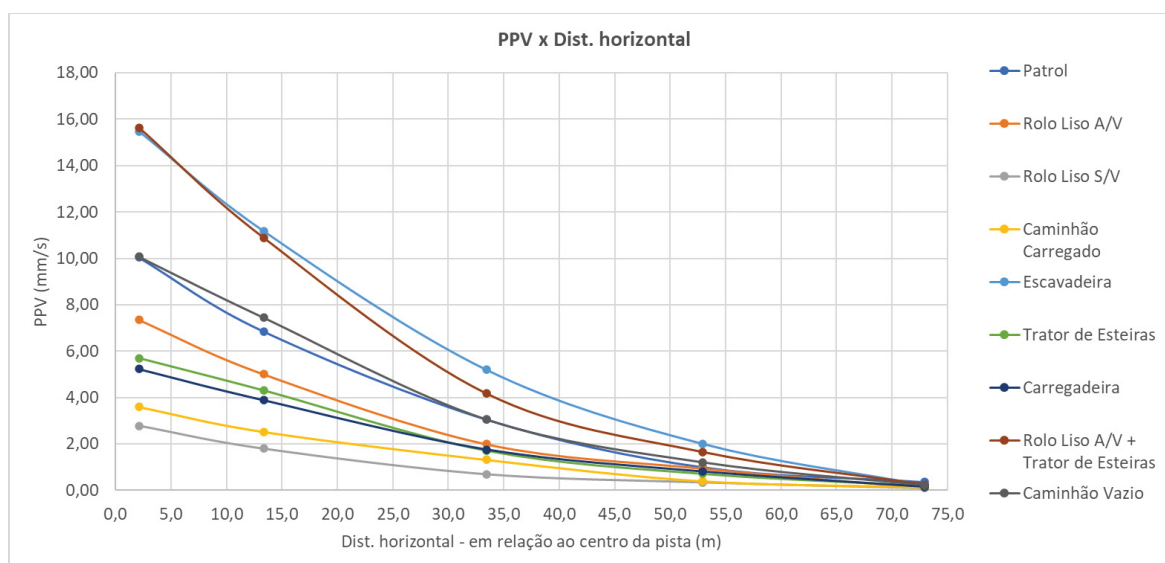


FIGURA 4.94 - VELOCIDADE DE VIBRAÇÃO DE PARTÍCULA DE PÍCO MÁXIMA PELA DISTÂNCIA HORIZONTAL.



Assim como já apresentavam os resultados das matrizes de correlação, as frequências de vibração destes testes medidas pela instrumentação de campo não parecem ter relação direta com as propagações das vibrações e geração de excessos ou variação de poropressões da forma como foram analisadas e apresentadas ao modelos, não sendo possível identificar um padrão de comportamento, seja com as leituras dos instrumentos, seja com as equações/relações entre “du” e “PPV”. Porém, verifica-se que a maioria dos equipamentos apresenta concentração das maiores velocidades de vibração nas menores faixas frequências, de até 50 Hz.

Para continuar o estudo dessa variável associada ao estudo, foram determinados os histogramas de frequências para os dados brutos de todos os equipamentos (geral) e de cada equipamento específico, conforme apresentado nas figuras abaixo (FIGURA 4.95, FIGURA 4.96 e FIGURA 4.97).

FIGURA 4.95 – FREQUÊNCIAS DE VIBRAÇÕES – GERAL, CAMINHÃO VAZIO, CARREGADEIRA E ESCAVADEIRA.

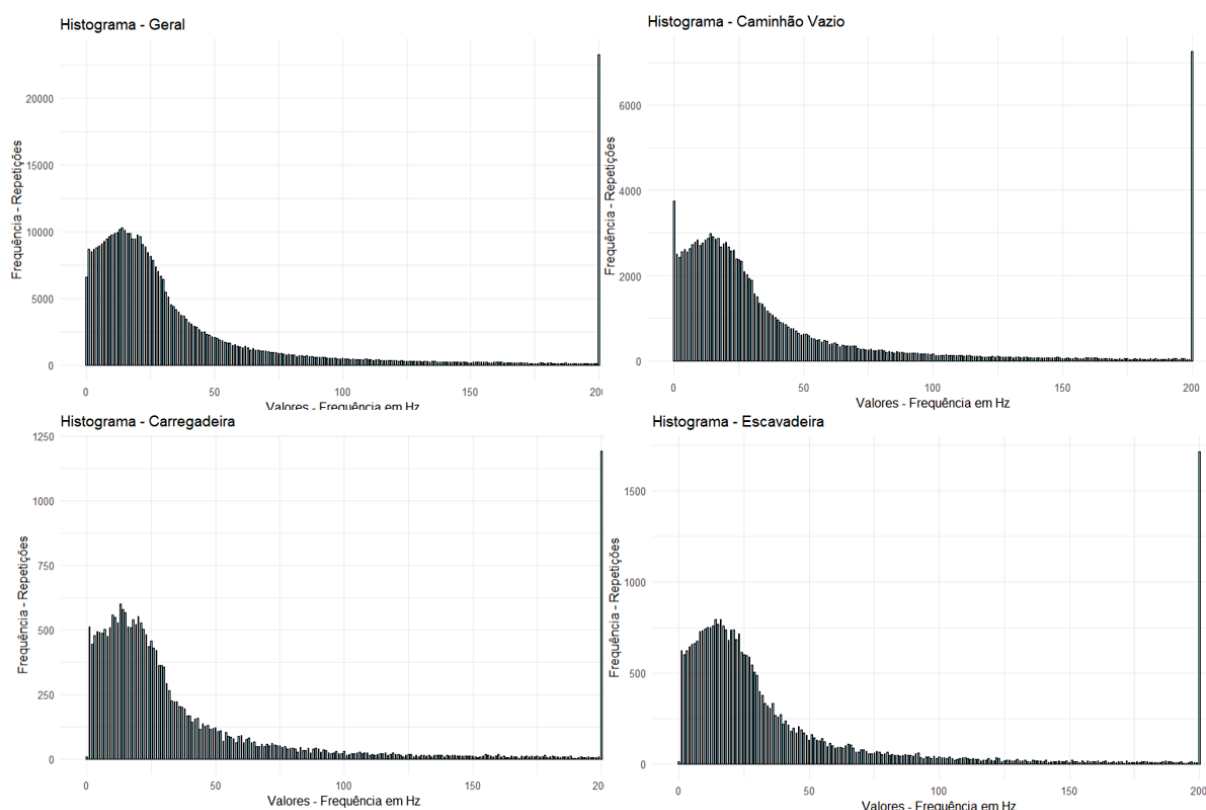


FIGURA 4.96 - FREQUÊNCIAS DE VIBRAÇÕES – CAMINHÃO CARREGADO, PATROL, ROLO LISO A/V E ROLO LISO S/V.

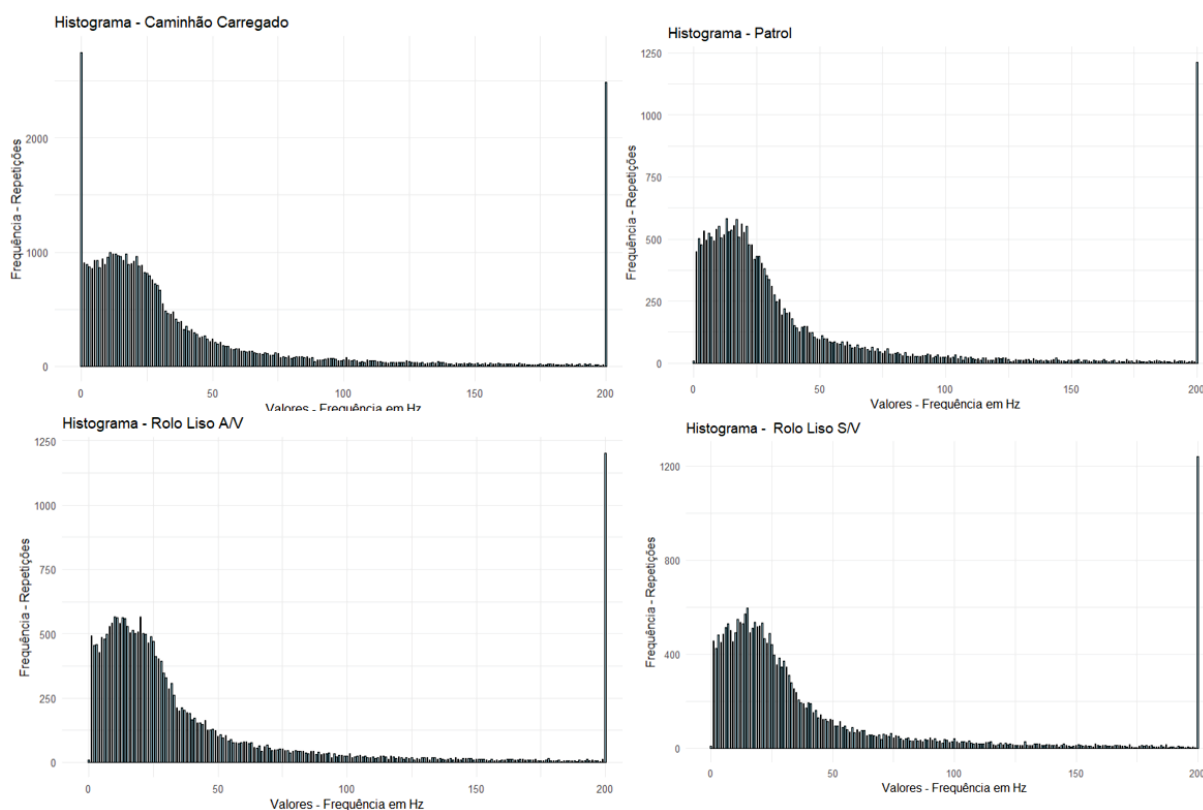
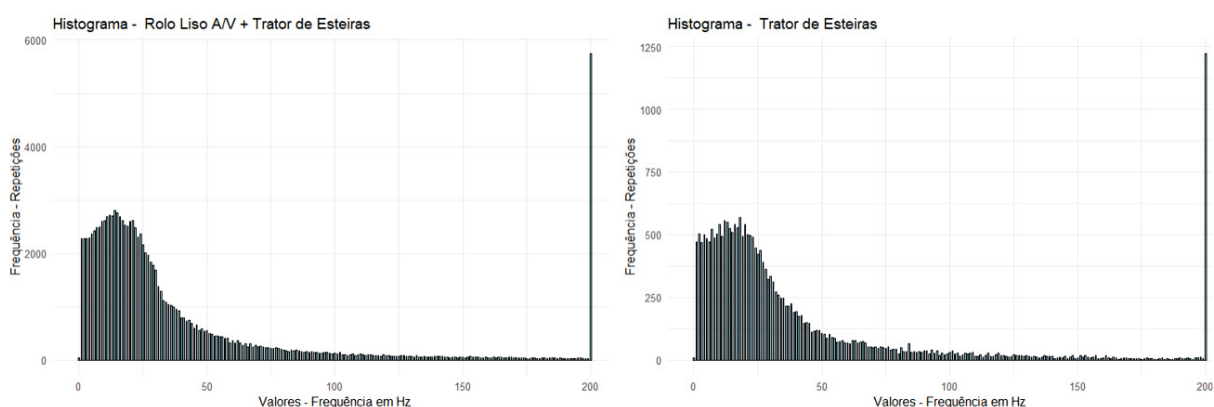


FIGURA 4.97 - FREQUÊNCIAS DE VIBRAÇÕES – ROLO LISO + TRATOR DE ESTEIRAS E TRATOR DE ESTEIRAS.



E os resultados indicam praticamente as mesmas distribuições de frequências para todos os equipamentos e abaixo dos mesmos 50Hz verificados nos espectros de frequência já apresentados, o que se entende como a não influência ou menor influência dos equipamentos nas frequências naturais do meio onde foram instalados os sensores, não alterando-as significativamente.

Com os estudos específicos das frequências de vibração, não foi possível ainda associá-las com as propagações de vibrações e variações de poropressões entre os diferentes equipamentos de construção testados. Porém verificou-se que as concentrações das maiores velocidades de vibração ocorrem nas faixas de frequência próximas ou inferiores a 50Hz, que se aproximam das frequências observadas em sismos naturais e frequências naturais dos solos, que são também baixas, podendo gerar efeitos de ressonância e propagação desses efeitos, porém necessitando de estudos mais específicos sobre o tema.

4.4.5 Proposta de equação de correlação geral

Após a obtenção dos resultados das equações de correlação para cada tipo de equipamento e teste, com resultados com convergência considerada satisfatória para a maioria dos equipamentos (isoladamente), dada a variabilidade dos resultados e o ambiente não totalmente controlado dos testes em campo (diferente de testes de laboratório, por exemplo), prosseguiu-se o estudo com uma proposta de equação geral para todos os equipamentos testados.

Após todos os estudos realizados, foi possível verificar que a geração de excesso de poropressão é mais influenciada pelas variáveis, além dos dados de vibrações, da altura da camada de aterro e do tipo de equipamento. Para representar essas duas variáveis adicionais no modelo, considerou-se: a tensão efetiva inicial (σ'_{v0}) para representar a altura de aterro, por estar associada à altura da camada de material sobre o ponto de análise; e o peso do equipamento (P), para representar o tipo de equipamento com um valor numérico. A variável peso foi considerada pelos tipos de dados disponíveis dos testes, que podem também estar disponíveis nas situações de campo/obra. Porém, de posse dos resultados já obtidos e analisados, sabe-se que cada equipamento tem particularidades na geração da poropressão que vão além do seu peso, como a forma de transmissão do peso para o solo, com diferentes áreas de contato, materiais (pneus, esteiras, rolos, etc.), além da combinação de equipamentos e comboios que podem ocorrer em situações de campo.

Outra característica que poderia contribuir para a convergência da equação proposta é o tipo de material. Porém, como os testes foram realizados essencialmente

em rejeito lamoso (fino a transicional), a inclusão desta informação não teria impacto nos resultados dos testes deste trabalho em específico.

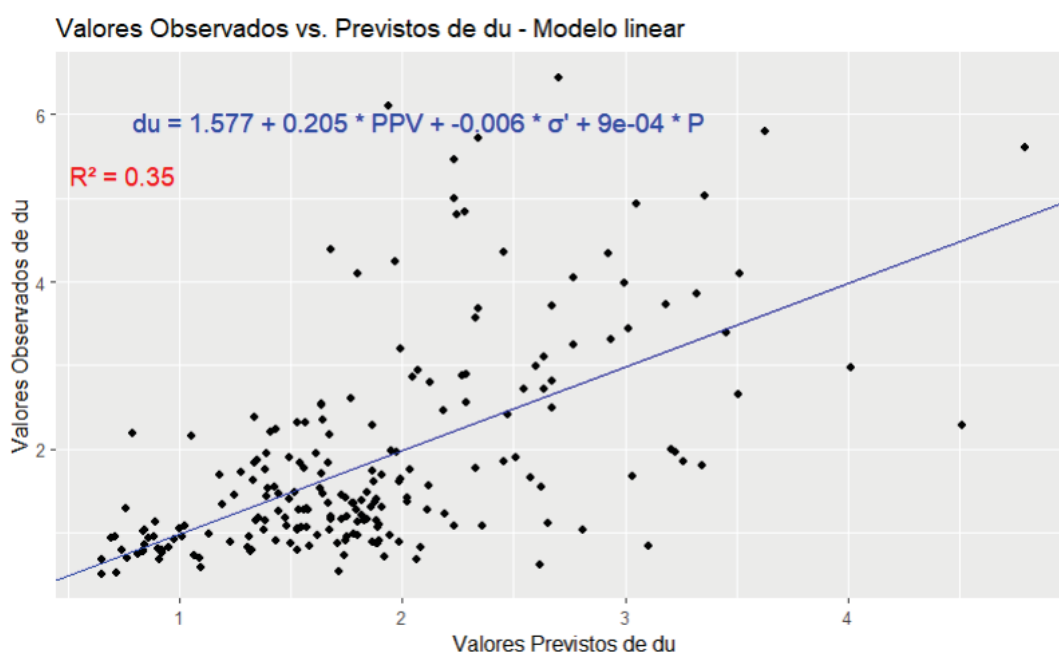
Para a elaboração da equação geral, utilizou-se dos modelos de regressão múltipla, dada a quantidade de variáveis, lineares e não lineares, buscando-se a melhor representação das grandezas analisadas variação ou excesso de poropressão “du” e razão de poropressão “PPR”.

Por fim, considerou-se todos os pares de instrumentos dos testes experimentais, mesmo o par de instrumentos PE09-SV07B, pelo modelo atual considerar a variável tensão efetiva, o que não era possível nos modelos de regressão simples, já apresentados.

Os resultados para as duas grandezas analisadas são apresentadas a seguir, com a comparação dos valores observados e previstos pelos modelos, a equação resultante e o coeficiente de determinação R^2 .

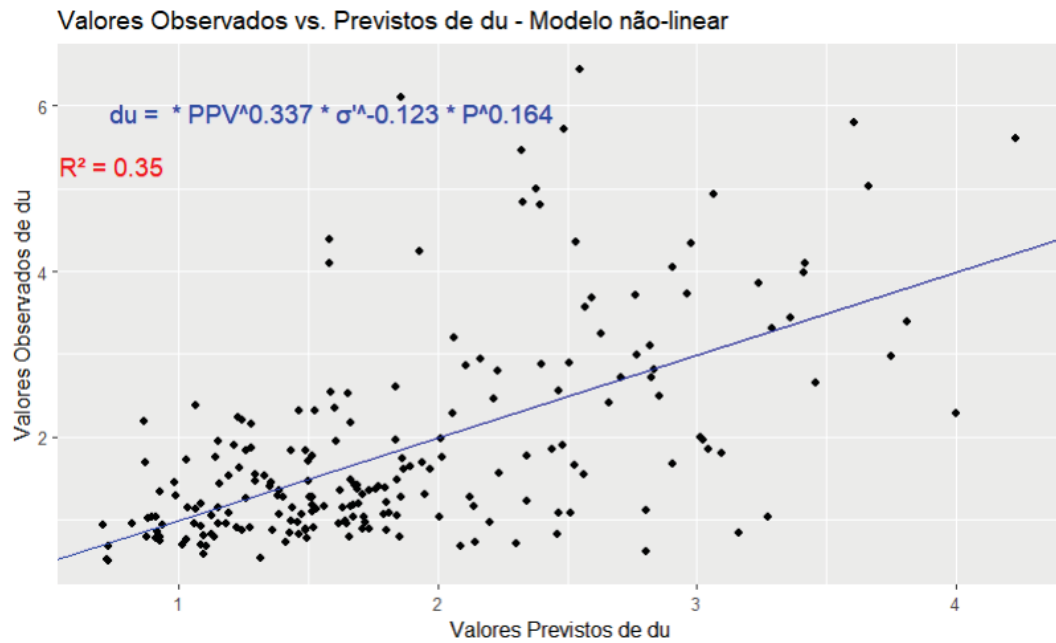
- Variação de poropressão “du” e modelo linear (FIGURA 4.98):

FIGURA 4.98 – EQUAÇÃO GERAL PARA VARIAÇÃO OU EXCESSO DE POROPRESSÃO “du” EM MODELO LINEAR



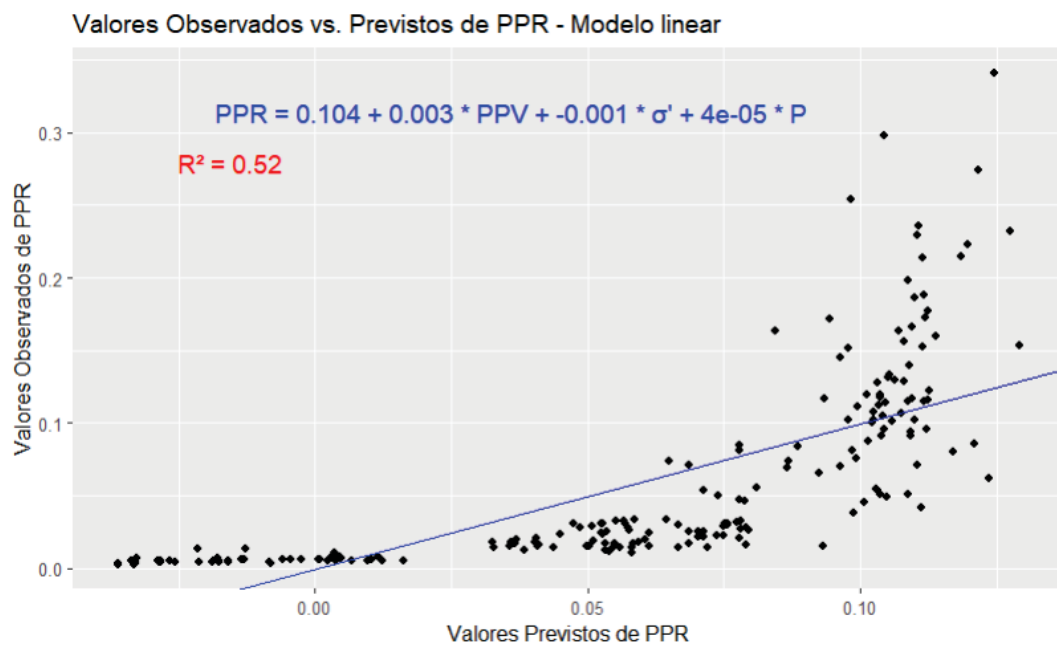
- Variação de poropressão “du” e modelo não-linear (FIGURA 4.99):

FIGURA 4.99 - EQUAÇÃO GERAL PARA VARIAÇÃO OU EXCESSO DE POROPRESSÃO “du” EM MODELO NÃO-LINEAR



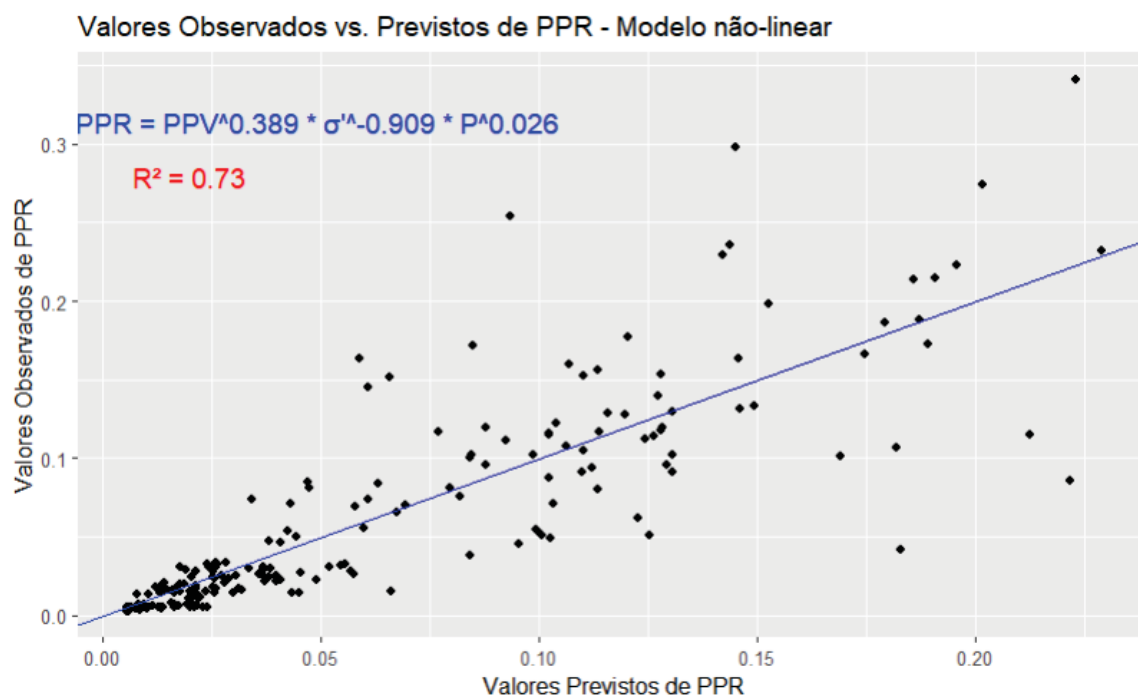
- Razão de poropressão “PPR” e modelo linear (FIGURA 4.100):

FIGURA 4.100 - EQUAÇÃO GERAL PARA A RAZÃO DE POROPRESSÃO “PPR” EM MODELO LINEAR



- Razão de poropressão “PPR” e modelo não-linear (FIGURA 4.101):

FIGURA 4.101 - EQUAÇÃO GERAL PARA A RAZÃO DE POROPRESSÃO “PPR” EM MODELO NÃO-LINEAR



De posse dos resultados, verifica-se que os modelos gerais de variação da poropressão “du” não apresentam convergência satisfatória, com os modelos de regressão linear e não linear resultando em fatores R^2 da ordem de 0,35, não sendo considerado um modelo que possa representar os testes com equipamentos de forma geral. Entende-se que a já verificada variabilidade dos resultados da variação de poropressão para os diferentes equipamentos e as diferentes correlações apresentadas para equipamentos com pesos semelhantes, influenciam na não convergência dos modelos. Para as análises diretas da variação de poropressão “du”, sugere-se a adoção das equações específicas propostas para cada equipamento, que apresentam melhores convergências, conforme apresentado no resumo dos resultados do item 4.4.4.3.

Com relação aos resultados da razão de poropressão “PPR”, que normaliza a variação de poropressão com a tensão efetiva, reduzindo-se a sua variação numérica, apresentou resultados com melhores convergências. O modelo linear resultou em um fator R^2 de 0,52, e o modelo não linear apresentou fator considerado satisfatório, com 0,73. Essa melhora na convergência pode estar associada a normalização da variável

em análise, e ao fato de a tensão efetiva ser um dado de entrada e, também, parte da resposta do modelo ($PPR = du/\sigma'_{v0}$). Apesar desta dependência da tensão efetiva para as estimativas da razão de poropressão, na prática de projeto e campo esta situação também ocorre, pela tensão efetiva ser um dado de entrada obtido em qualquer projeto ou análise, e a razão de poropressão (PPR) ser um dos parâmetros de comparação com limites de referência para a estabilidade dos materiais, conforme apresentado na fundamentação teórica deste trabalho, e nas análises dos potenciais de liquefação, apresentadas no item 4.5.

Com isso, entende-se a estimativa geral de “PPR” com o modelo não linear proposto pode representar, de forma geral, os testes realizados para estimativas futuras de valores médios de razão de poropressão de equipamentos de construção, sendo recomendada a adição de uma margem de segurança para resultados estimados condizente com a convergência do modelo.

Para estimativa dessa margem de segurança recomendada, verificou-se, também, a equação ou o fator de segurança associados aos valores máximos dos testes realizados, dada possível efeito adverso para os solos e a segurança das operações.

4.4.5.1 Equação empírica geral proposta

Com os resultados obtidos e as análises realizadas, propõe-se neste trabalho a equação geral e empírica para a determinação da razão de poropressão (PPR) em função da velocidade de vibração de partícula de pico (PPV), tensão efetiva (σ'_{v0}) e peso do equipamento (P), com a recomendação da aplicação de um fator de segurança (FS):

$$PPR = PPV^{0,389} \cdot \sigma'_{v0}{}^{-0,909} \cdot P^{0,026} \cdot (FS)$$

Onde:

PPR = Razão de poropressão (relação da variação de poropressão “ Δu ou du ” com a tensão efetiva inicial “ σ'_{v0} ” - adimensional;

PPV = Velocidade de vibração de partícula de pico – em mm/s;

σ'_{v0} = Tensão vertical efetiva inicial, antes da passagem dos equipamentos - em kPa;

P = peso do equipamento em - kN.

FS = Fator de segurança recomendado = 1,5 (Ver item 4.4.5.2 (c) , FIGURA 4.123 e FIGURA 4.124).

A equação foi proposta com base nos dados deste estudo que, além das características dos materiais testados, se situam em faixas ou valores limites, que se entende, até então, como faixas de valores válidas de aplicação. Essas faixas são:

- Velocidade de vibração de partícula de pico – PPV $\rightarrow$ 0 a 15 mm/s;
- Tensão efetiva inicial – $\sigma'_{v0} \rightarrow$ 0 a 200 kPa;
- Variação de poropressão – Δu ou $du \rightarrow$ 0 a 6,5 kPa;
- Poropressão total – $u \rightarrow$ 0 a 17 kPa
- Razão de poropressão – PPR $\rightarrow$ 0 a 0,35.
- Peso do equipamento – $P \rightarrow$ 112 a 435 kN.
- Fator de Segurança – FS $\rightarrow$ 1,5.

Recomenda-se a aplicação de um fator de segurança da ordem de 1,5 ao resultado estimado de PPR, dada a variabilidade encontrada nos testes e ao ajuste da equação. Com o fator de 1,5 atinge-se os maiores valores encontrados nos testes, e não estimados diretamente pela equação geral, que tem um ajuste médio. Esta estimativa do Fator de Segurança é apresentada juntamente com a verificação de equação proposta, no item seguinte, 4.4.5.2 (c).

Entende-se este resultado como uma das principais contribuições deste trabalho, pois permite estimar razões de poropressão e, por consequência, também as variações de poropressões, com as já comentadas e necessárias margens de segurança, para diferentes tipos de equipamentos e com tráfego em rejeitos lamosos de fundação, que são os mais suscetíveis a variações positivas de poropressão pela sua característica fina e compressível. Permite, também, estimar valores de controle para as indispensáveis instrumentações de campo, estabelecendo limites de vibração para os equipamentos de modo a não apresentar razões de poropressão que possam causar instabilidade para os materiais, conforme limites de referência estabelecidos e disponíveis na literatura.

Outra forma de inserir o tipo de equipamento na equação de correlação poderia ser por coeficientes, ao invés do seu peso, que é uma forma de abordagem que pode ser considerada em trabalhos futuros.

4.4.5.2 Verificação da equação geral proposta

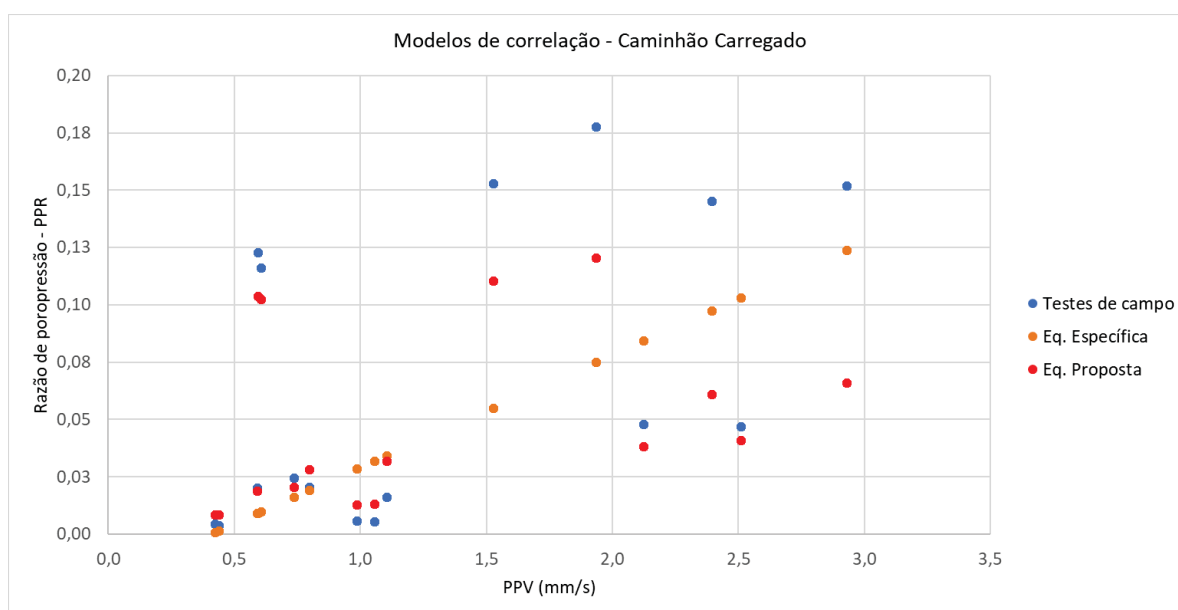
Para verificação da equação geral proposta neste trabalho, foram comparados, inicialmente, os resultados dos testes de campo, as equações específicas de cada equipamento e a equação geral. Posteriormente, a mesma equação geral foi comparada com outras equações de referências técnicas, relacionadas a detonações de explosivos, que são as disponíveis na literatura para análises de vibrações e poropressões.

a) Verificação com os testes de campo e equações específicas dos equipamentos

Para comparar os resultados da equação geral com os dos dados dos testes de campo e com as equações individualizadas de cada equipamento, foram gerados novamente os gráficos dos modelos de PPR de cada equipamento e também com todos os equipamentos, com a inclusão da equação geral proposta (não linear) e as equações individualizadas (lineares) apresentadas no item 4.4.4.2. Os resultados são apresentados abaixo, começando por cada equipamento, e terminando com os dados de todos os equipamentos.

- Caminhão Carregado:

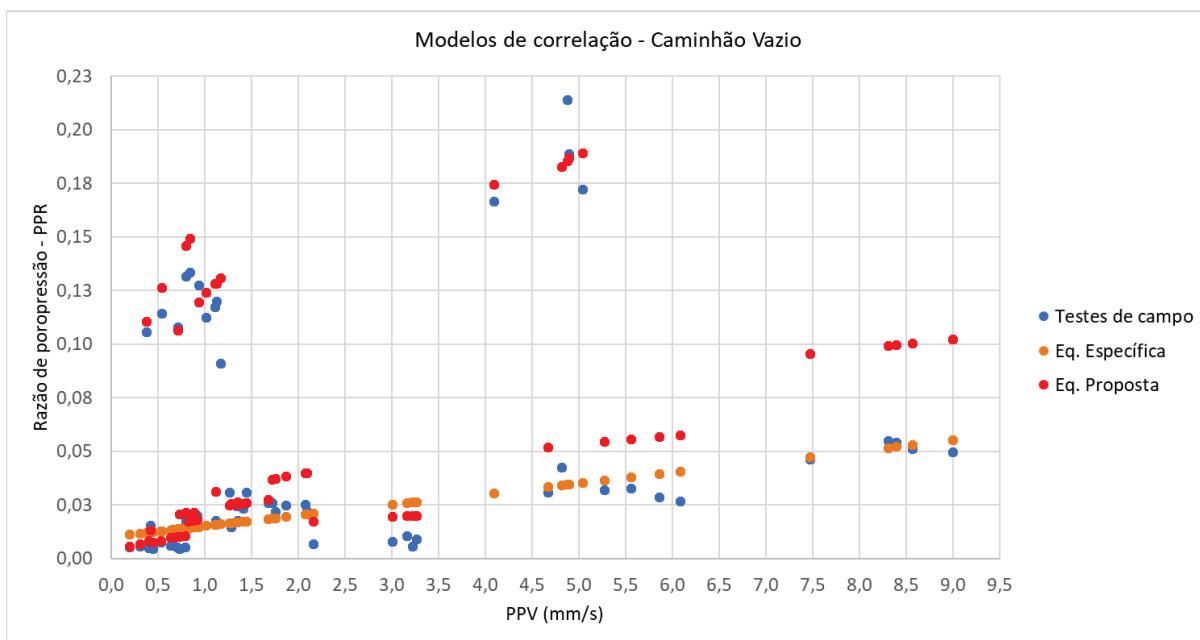
FIGURA 4.102 – VERIFICAÇÃO DOS MODELOS/EQUAÇÕES DE CORRELAÇÃO – CAMINHÃO CARREGADO.



(1) Eq. Específica: $PPR = 0,049.PPV - 0,02$

- Caminhão Vazio:

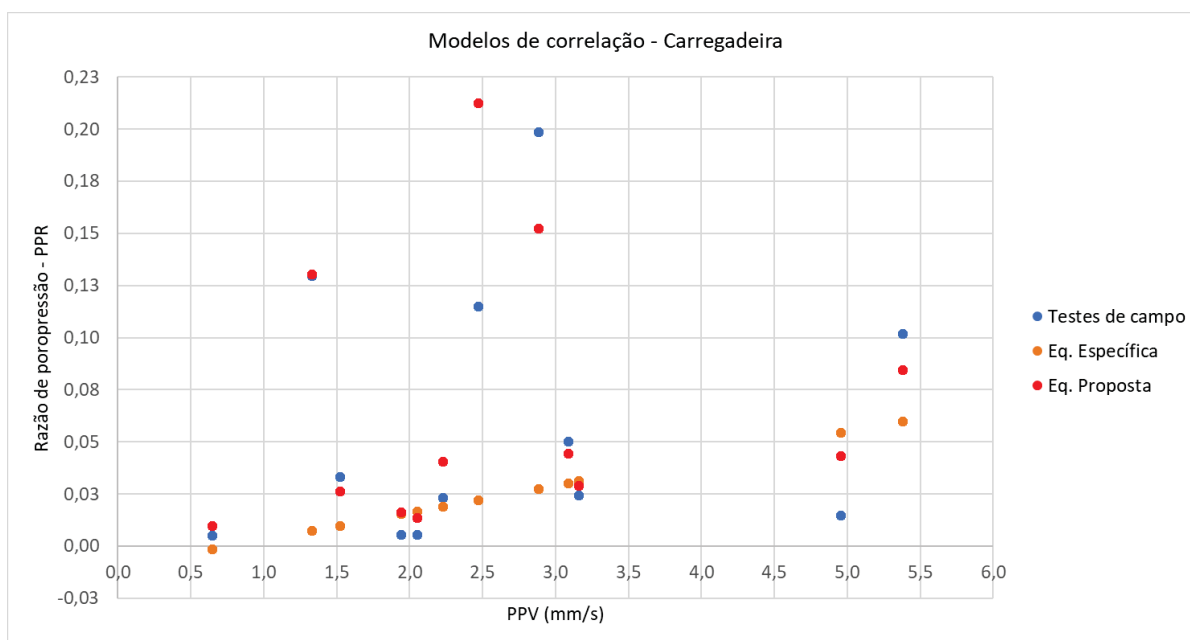
FIGURA 4.103 - VERIFICAÇÃO DOS MODELOS/EQUAÇÕES DE CORRELAÇÃO – CAMINHÃO VAZIO.



(1) Eq. Específica: $PPR = 0,005.PPV + 0,01$

- Carregadeira:

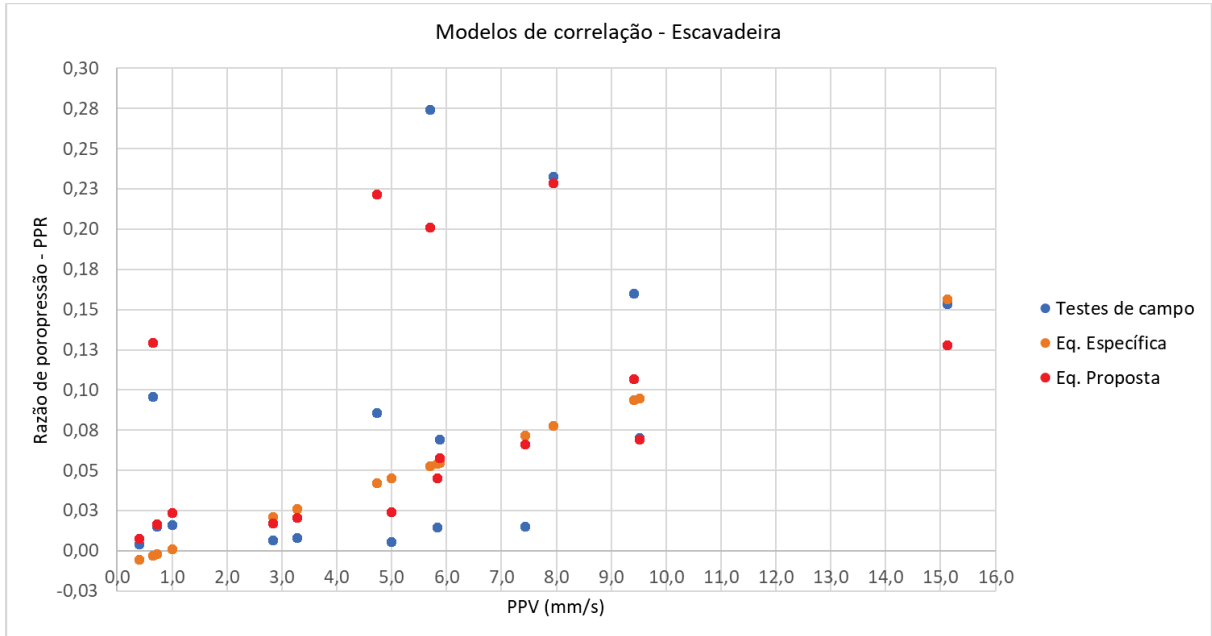
FIGURA 4.104 - VERIFICAÇÃO DOS MODELOS/EQUAÇÕES DE CORRELAÇÃO – CARREGADEIRA.



(1) Eq. Específica: $PPR = 0,013.PPV - 0,01$

- Escavadeira:

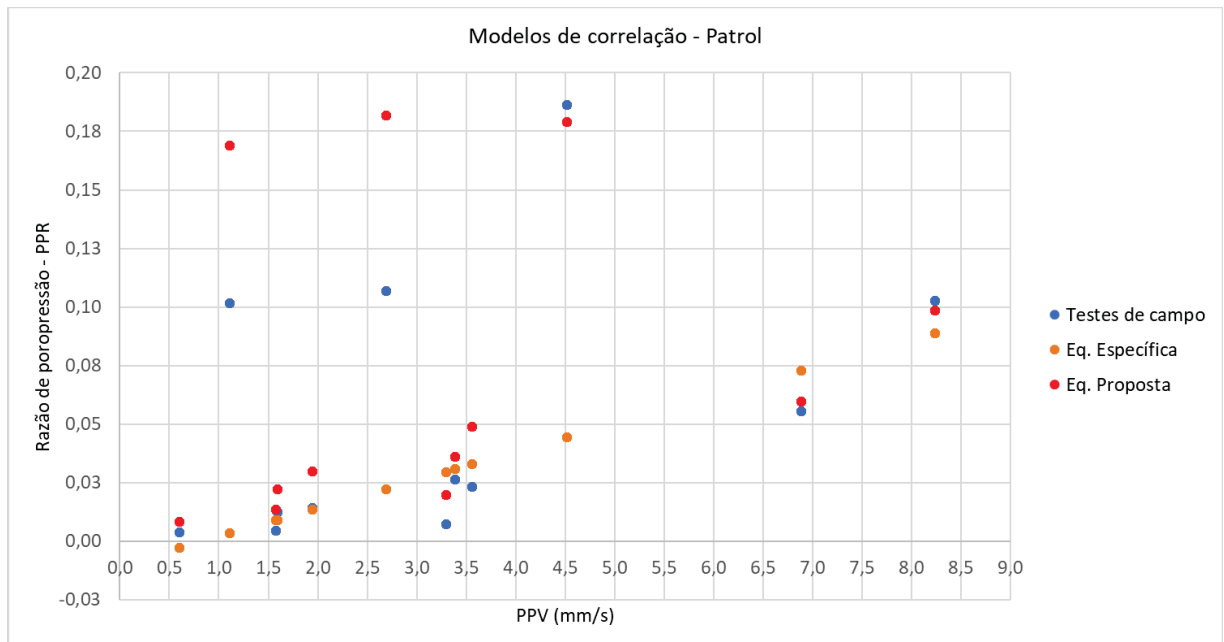
FIGURA 4.105 - VERIFICAÇÃO DOS MODELOS/EQUAÇÕES DE CORRELAÇÃO – ESCAVADEIRA.



(1) Eq. Específica: $PPR = 0,011.PPV - 0,01$

- Patrol:

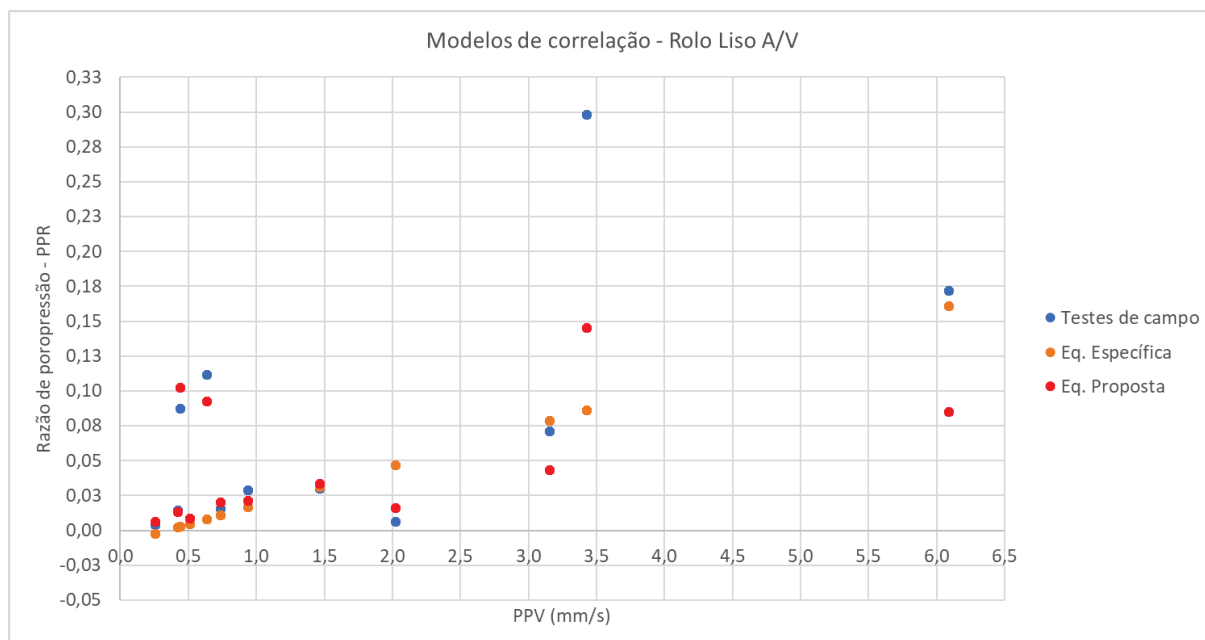
FIGURA 4.106 - VERIFICAÇÃO DOS MODELOS/EQUAÇÕES DE CORRELAÇÃO – PATROL.



(1) Eq. Específica: $PPR = 0,012.PPV - 0,01$

- Rolo Liso A/V:

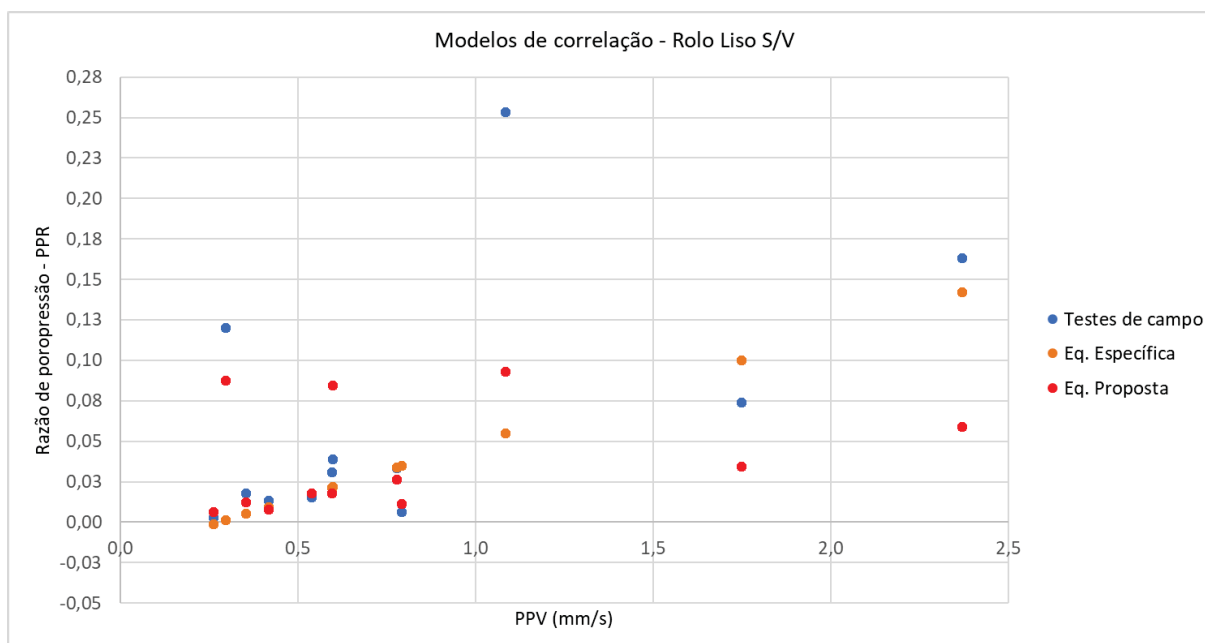
FIGURA 4.107 - VERIFICAÇÃO DOS MODELOS/EQUAÇÕES DE CORRELAÇÃO – ROLO LISO A/V.



(1) Eq. Específica: $PPR = 0,028.PPV - 0,01$

- Rolo Liso S/V:

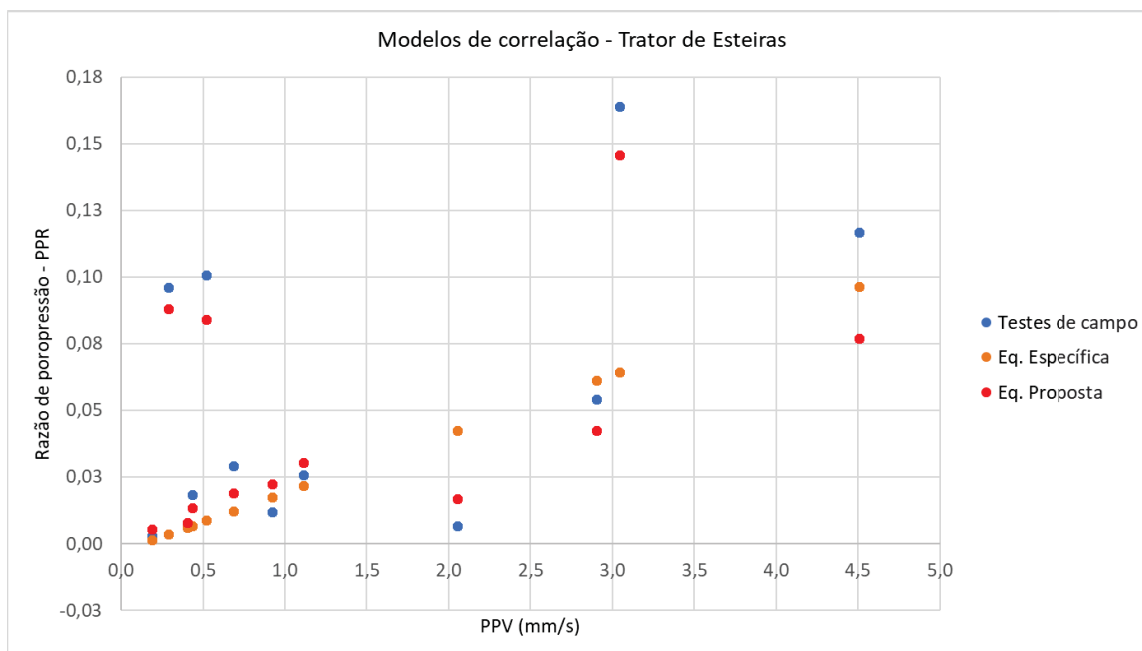
FIGURA 4.108 - VERIFICAÇÃO DOS MODELOS/EQUAÇÕES DE CORRELAÇÃO – ROLO LISO S/V.



(1) Eq. Específica: $PPR = 0,068.PPV - 0,02$

- Trator de Esteiras:

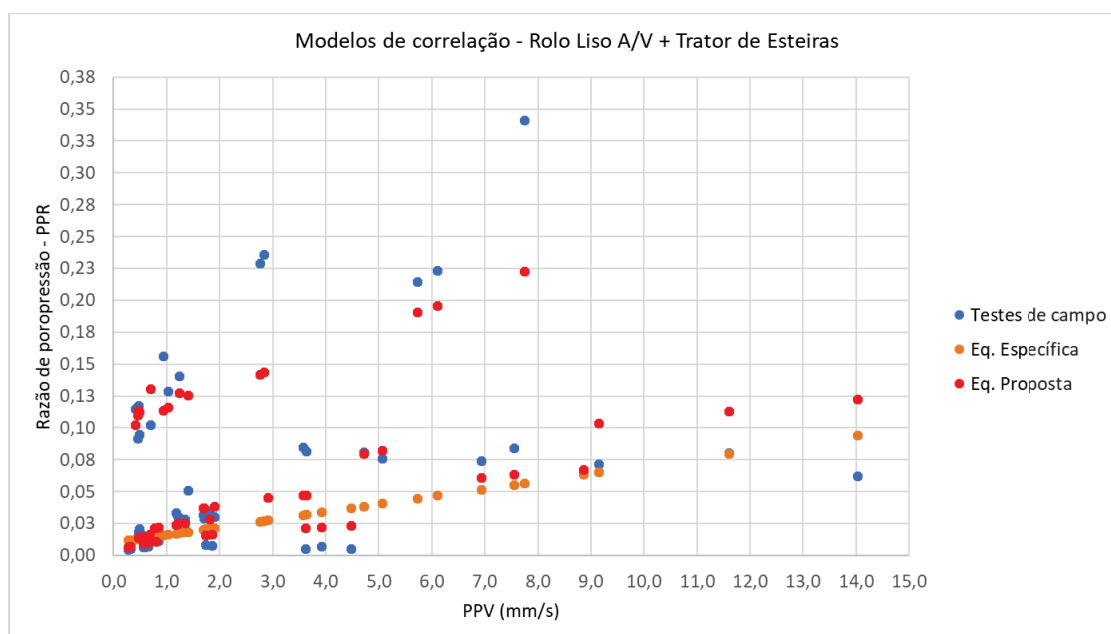
FIGURA 4.109 - VERIFICAÇÃO DOS MODELOS/EQUAÇÕES DE CORRELAÇÃO – TRATOR DE ESTEIRAS.



(1) Eq. Específica: $PPR = 0,022.PPV - 0,003$

- Rolo Liso + Trator de Esteiras:

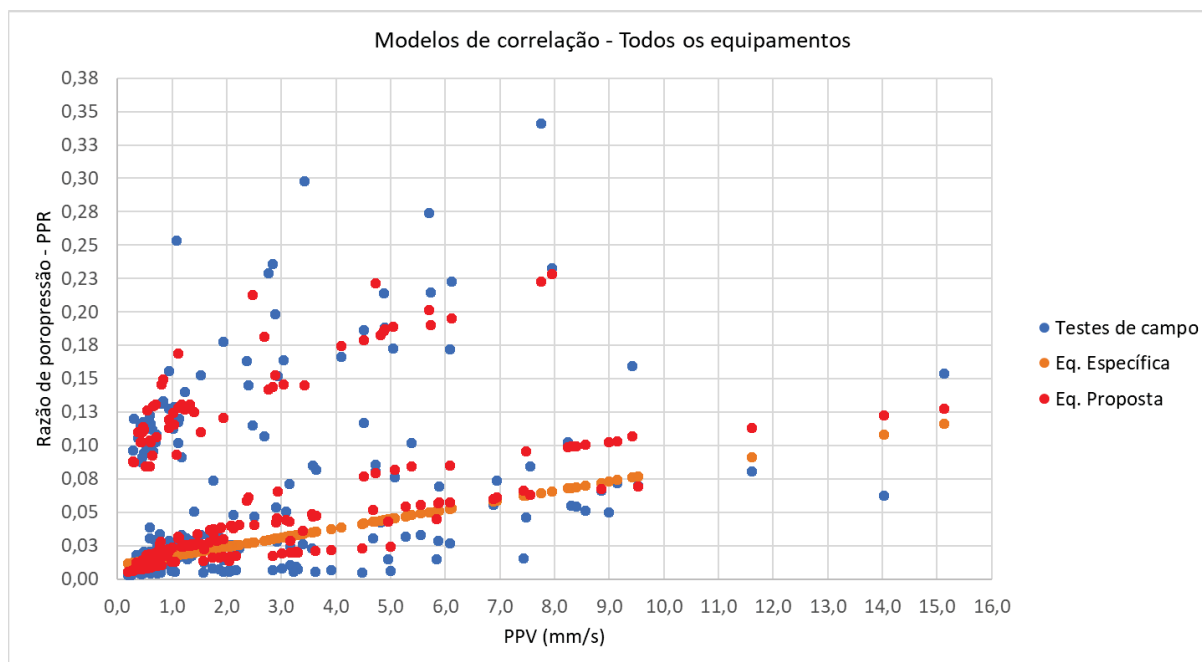
FIGURA 4.110 - VERIFICAÇÃO DOS MODELOS/EQUAÇÕES DE CORRELAÇÃO – ROLO LISO + TRATOR DE ESTEIRAS.



(1) Eq. Específica: $PPR = 0,006.PPV + 0,01$

- Todos os equipamentos:

FIGURA 4.111 - VERIFICAÇÃO DOS MODELOS/EQUAÇÕES DE CORRELAÇÃO – TODOS OS EQUIPAMENTOS.



(1) Eq. Específica: $PPR = 0,007.PPV + 0,01$

Analisando-se os resultados das verificações da equação geral com os dados de campo e equações específicas dos equipamentos, verifica-se uma melhor aproximação da equação geral com os dados de campo do que a equação específica, dada a não linearidade da relação entre PPR e PPV, e a dependência de mais variáveis, que são consideradas na equação geral proposta, somente.

Atenta-se para os resultados que envolvem os Rolos Lisos, onde a equação geral não se aproximou da mesma forma como para os demais equipamentos para os valores de pico de PPR, que pode ser devido ao equipamento apresentar o mesmo peso, gerações de poropressão semelhantes, porém vibrações distintas, sendo mais difícil a convergência do modelo de análise. Sugere-se maior atenção e refinamento para as análises deste tipo de equipamento e a verificação em conjunto com a equação específica, além da adoção do fator de segurança recomendado.

b) Verificação da equação geral com referências técnicas da literatura

Para analisar os resultados do modelo proposto ao longo da profundidade, ou com o incremento das tensões efetivas, e comparar os resultados da equação geral proposta com os testes de campo e as referências técnicas da literatura, foram gerados gráficos de razão de poropressão “PPR” pela tensão vertical efetiva “ σ'_{v0} ” para cada uma das fontes.

Para as referências da literatura, considerou-se as equações de Veyera (1985) e Charlie et. al. (2013), que são oriundas de vibrações devidas à detonação de explosivos em minas e foram testadas em diferentes materiais com diferentes compacidades. Estas foram selecionadas por apresentarem formato semelhante à equação proposta (não linear e com dependência da tensão efetiva inicial), e por serem as equações normalmente encontradas nas pesquisas bibliográficas e trabalhos correlatos. As equações das referências são apresentadas abaixo.

- Veyera (1985): $PPR = 6,67. (PPV)^{0,33}. (\sigma'_{v0})^{-0,31}. (D_r)^{-0,179}$
- Charlie et. al. (2013): $PPR = 134. (100. PPV/c)^{1,2}. (\sigma'_{v0})^{-0,15}. (D_r)^{-0,08}$

Onde:

c: velocidade da onda de compressão (m/s).

PPR: Razão de poropressão;

PPV: Velocidade de vibração de partícula de pico (m/s);

σ'_{v0} : Tensão efetiva inicial (kPa);

Dr: Densidade relativa (em porcentagem).

Estas equações apresentam a variável densidade relativa (Dr) e velocidade de onda de compressão (c ou Vs). A densidade relativa foi estimada com correlações com os resultados do ensaio CPTU, conforme apresentado no item 4.1.2., e para a velocidade de onda de compressão considerou-se os valores obtidos do ensaio CPTU sísmico ou S-CPTU-1B, com resultado disponível no Anexo 2.

Para a densidade relativa, dada a baixa variação estimada para o perfil de subsolo / rejeito analisado, considerou-se o valor médio de 20%, conforme valores estimados e apresentados anteriormente (19 e 21%). E para a velocidade de onda de compressão, foram considerados os valores obtidos do ensaio ao longo da

profundidade, com valores variando de 173,01 m/s até 435,23 m/s, do primeiro metro até a maior profundidade de instalação dos instrumentos (6 a 7m).

Traçou-se linhas de tendência de potência entre todos os resultados de todos os equipamentos e plotou-se, também, gráfico somente das linhas de tendência, para auxiliar na comparação e entendimento de cada modelo/equação. Os resultados de todos os equipamentos são apresentados na FIGURA 4.112 e FIGURA 4.113.

FIGURA 4.112 – GRÁFICO COMPARATIVO DOS TESTES DE CAMPO, EQUAÇÃO PROPOSTA E REFERÊNCIAS DA LITERATURA – TODOS OS EQUIPAMENTOS

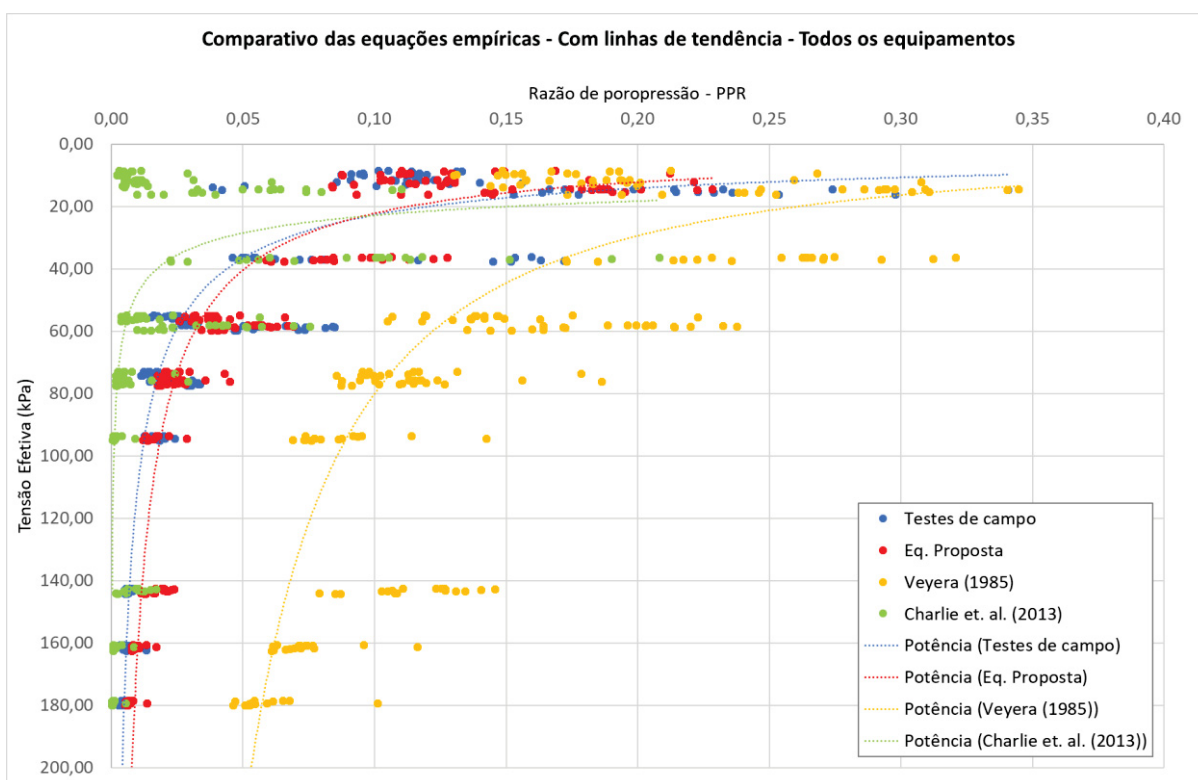
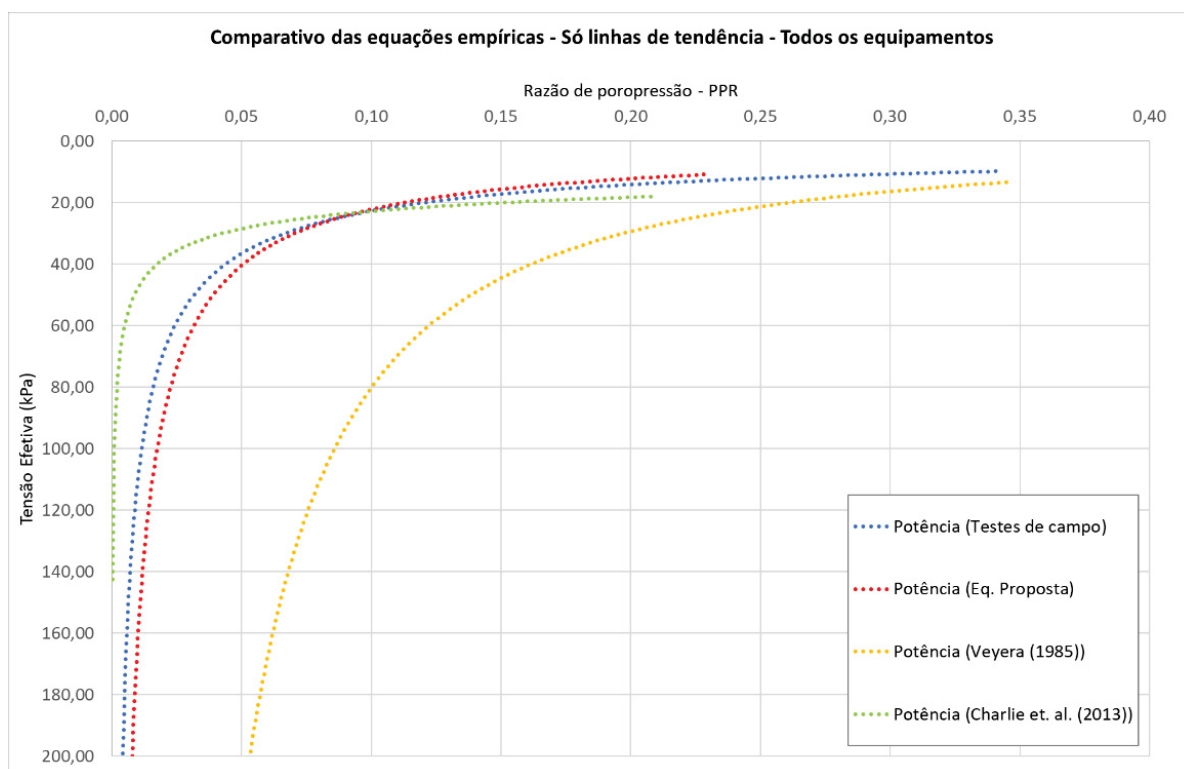


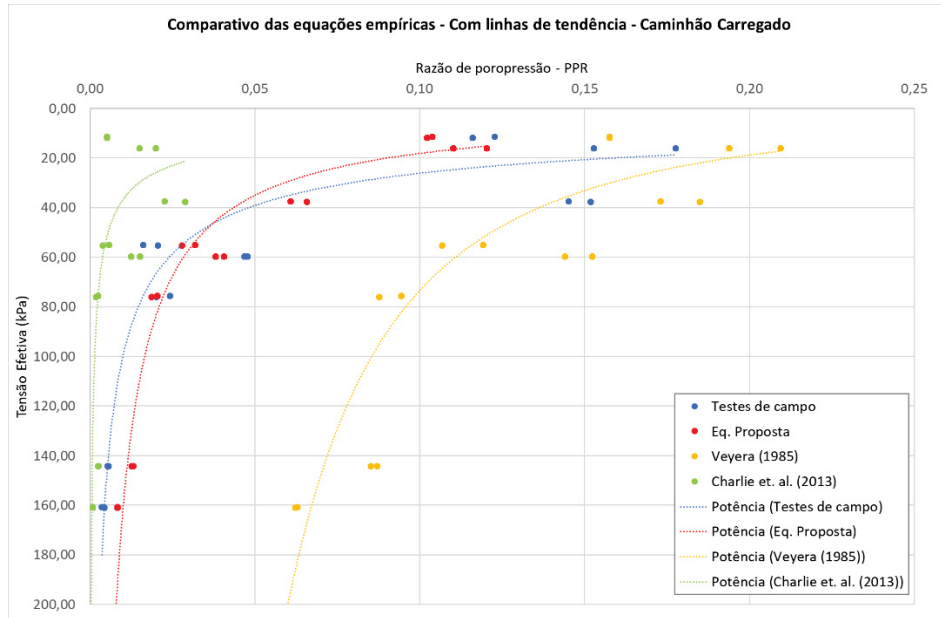
FIGURA 4.113 - GRÁFICO COMPARATIVO DAS LINHAS DE TENDÊNCIA DOS TESTES DE CAMPO, EQUAÇÃO PROPOSTA E REFERÊNCIAS DA LITERATURA – TODOS OS EQUIPAMENTOS.



A mesma verificação foi realizada para cada equipamento em específico, com a previsão dos modelos de referência e proposto para a razão de poropressão (PPR), comparados com os dados de campo e ao longo da profundidade, com variação da tensão efetiva, conforme apresentado nas figuras seguintes (FIGURA 4.114 a FIGURA 4.122)

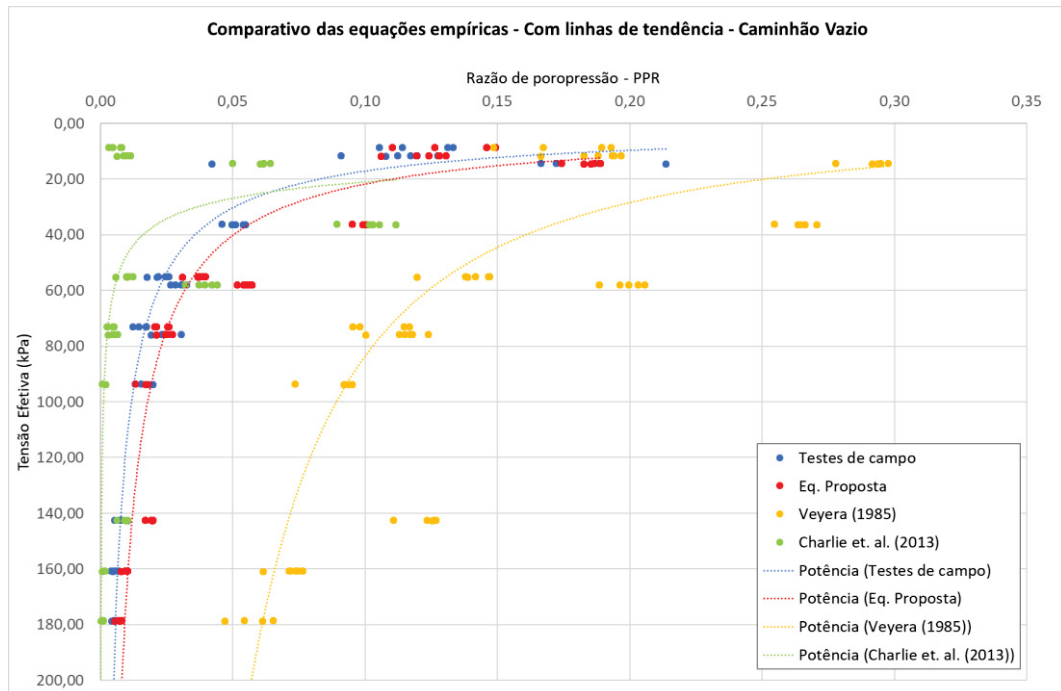
- Caminhão Carregado:

FIGURA 4.114 - GRÁFICO COMPARATIVO DOS TESTES DE CAMPO, EQUAÇÃO PROPOSTA E REFERÊNCIAS DA LITERATURA – CAMINHÃO CARREGADO.



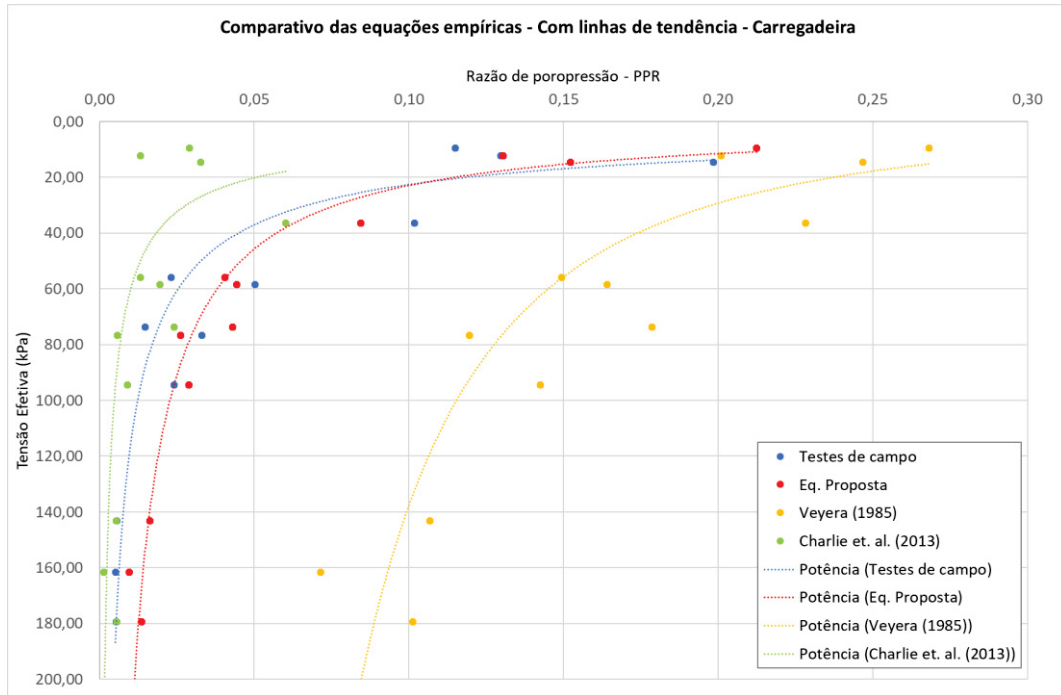
- Caminhão Vazio:

FIGURA 4.115 - GRÁFICO COMPARATIVO DOS TESTES DE CAMPO, EQUAÇÃO PROPOSTA E REFERÊNCIAS DA LITERATURA – CAMINHÃO VAZIO.



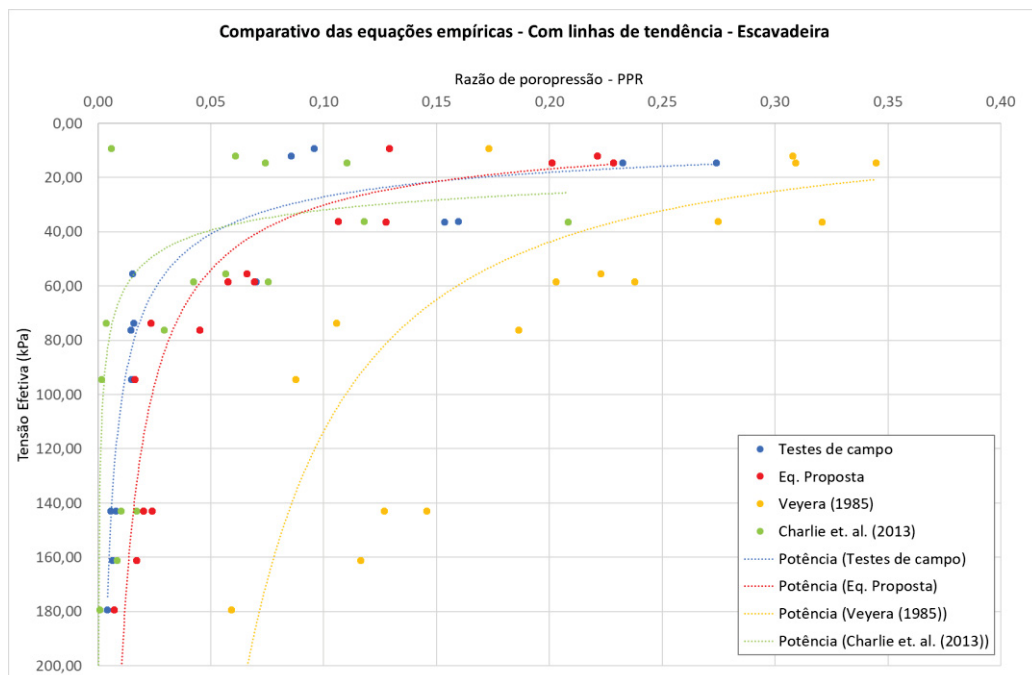
- Carregadeira:

FIGURA 4.116 - GRÁFICO COMPARATIVO DOS TESTES DE CAMPO, EQUAÇÃO PROPOSTA E REFERÊNCIAS DA LITERATURA – CARREGADEIRA.



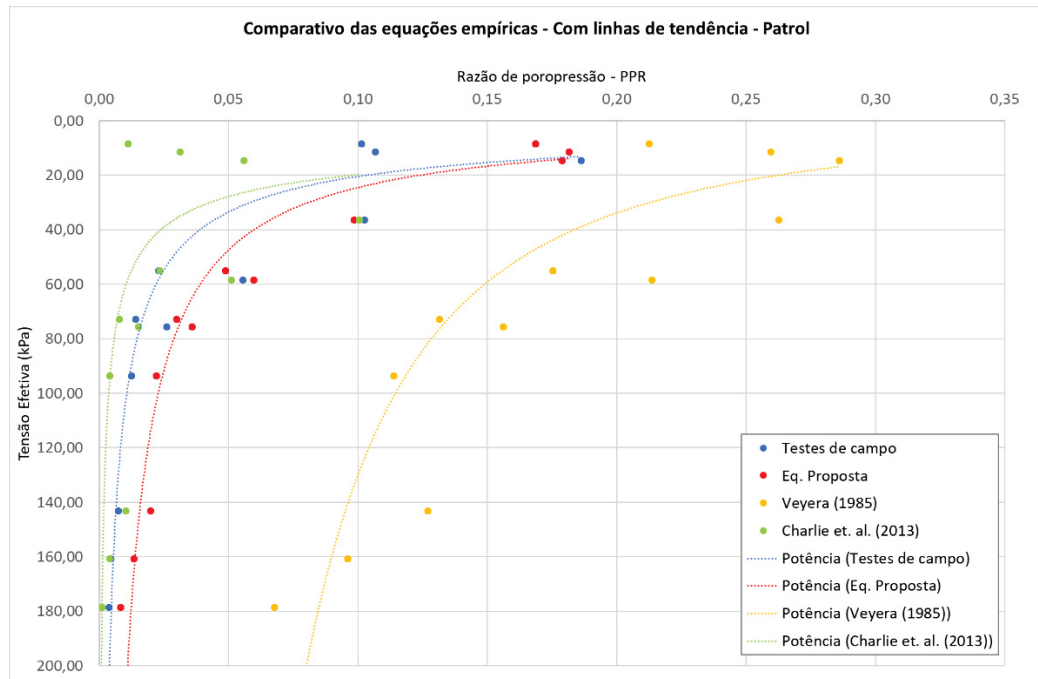
- Escavadeira:

FIGURA 4.117 - GRÁFICO COMPARATIVO DOS TESTES DE CAMPO, EQUAÇÃO PROPOSTA E REFERÊNCIAS DA LITERATURA – ESCAVADEIRA



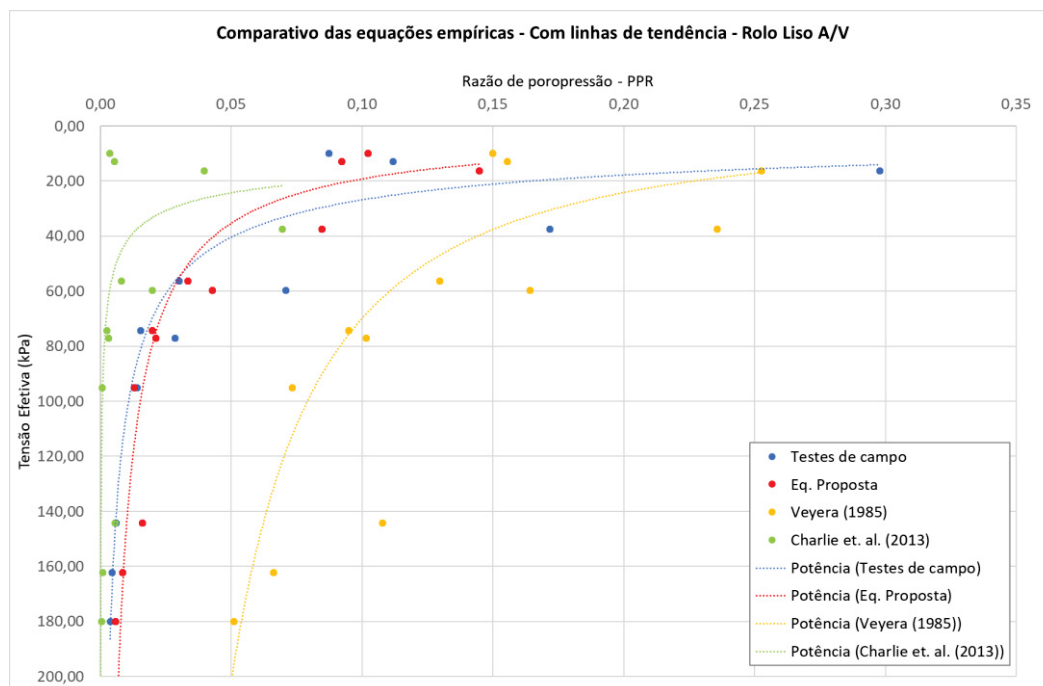
- Patrol:

FIGURA 4.118 - GRÁFICO COMPARATIVO DOS TESTES DE CAMPO, EQUAÇÃO PROPOSTA E REFERÊNCIAS DA LITERATURA – PATROL.



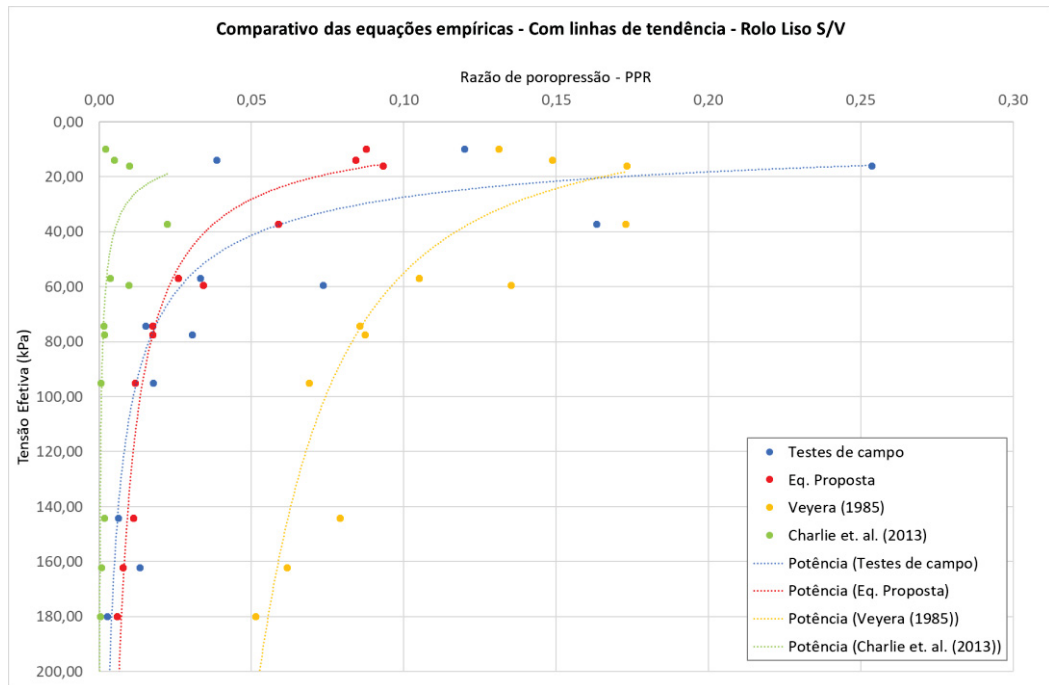
- Rolo Liso A/V:

FIGURA 4.119 - GRÁFICO COMPARATIVO DOS TESTES DE CAMPO, EQUAÇÃO PROPOSTA E REFERÊNCIAS DA LITERATURA – ROLO LISO A/V.



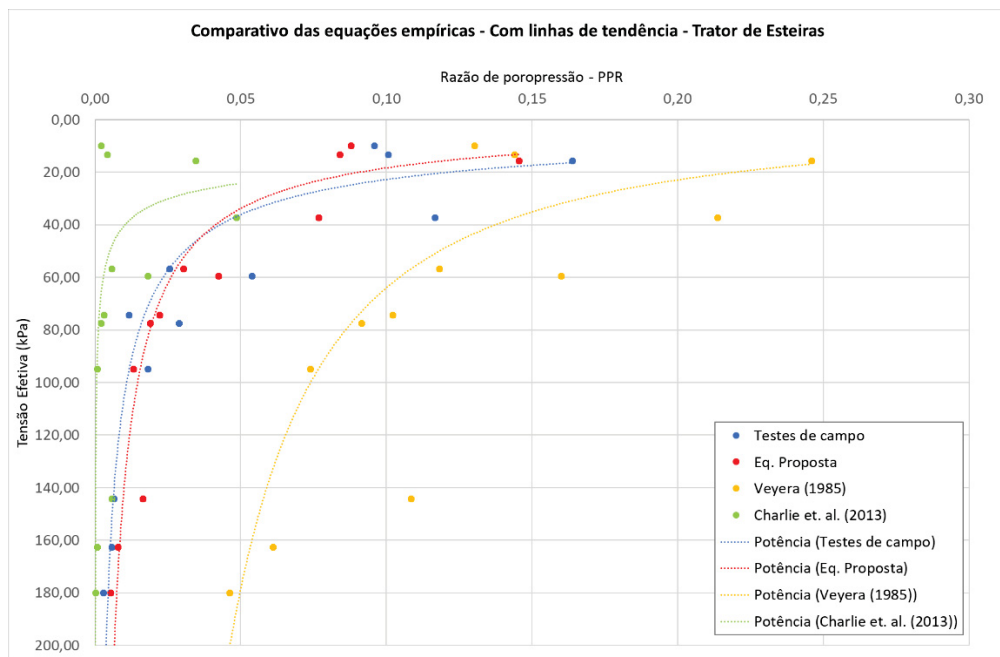
- Rolo Liso S/V:

FIGURA 4.120 - GRÁFICO COMPARATIVO DOS TESTES DE CAMPO, EQUAÇÃO PROPOSTA E REFERÊNCIAS DA LITERATURA – ROLO LISO S/V.



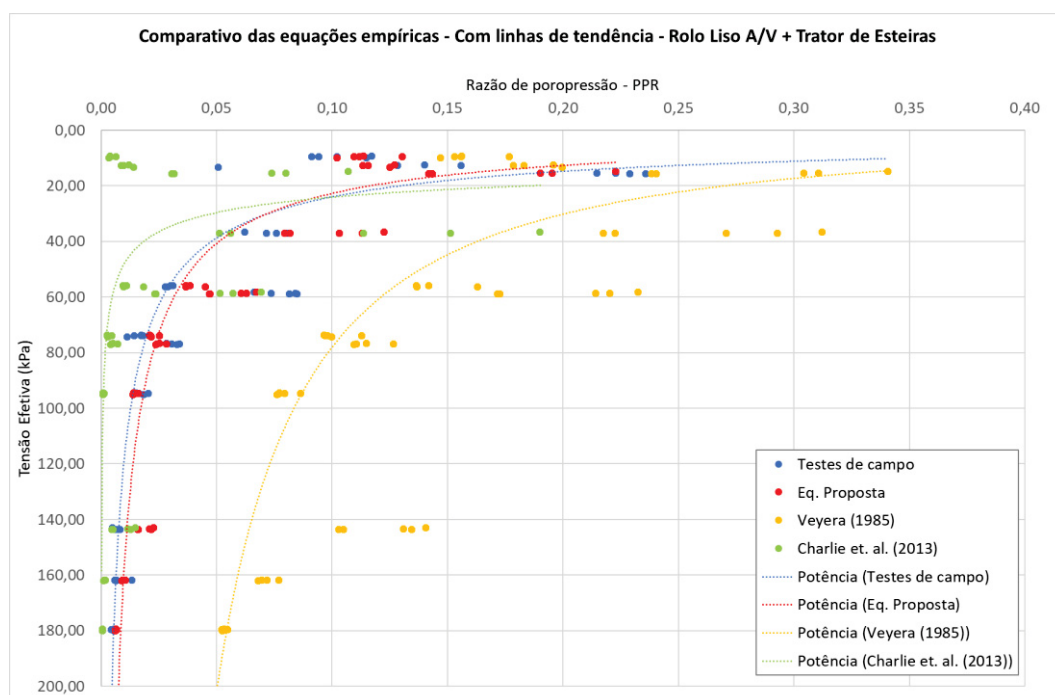
- Trator de esteiras:

FIGURA 4.121 - GRÁFICO COMPARATIVO DOS TESTES DE CAMPO, EQUAÇÃO PROPOSTA E REFERÊNCIAS DA LITERATURA – TRATOR DE ESTEIRAS.



- Rolo Liso A/V + Trator de Esteiras:

FIGURA 4.122 - GRÁFICO COMPARATIVO DOS TESTES DE CAMPO, EQUAÇÃO PROPOSTA E REFERÊNCIAS DA LITERATURA – ROLO LISO A/V + TRATOR DE ESTEIRAS.



Com relação aos resultados gerais dos testes de campo, verifica-se uma grande sensibilidade da geração de poropressão com a profundidade, com rápida dissipação dos efeitos como o aumento da profundidade, que está relacionado ao também aumento do confinamento e da rigidez dos rejeitos (maiores densidades relativas e velocidades cisalhantes), e menores índices de fragilidade. Conforme abordado ao longo do trabalho, as poropressões são geradas em função das deformações cisalhantes, que são causadas pelas vibrações. Com isso, as deformações diminuem com aumento da rigidez do material e, também, por perda da energia das vibrações com as atenuações que ocorrem com a propagação em profundidade.

Com relação ao estudo de correlação entre vibração e razão de poropressão e da equação proposta, os resultados da verificação com todos os equipamentos (FIGURA 4.112 e FIGURA 4.113) apresentam um considerado bom ajuste da equação geral proposta com relação aos testes de campo, uma vez que foi elaborada com base nestes mesmos testes, porém com toda a variabilidade dos resultados já apresentada ao longo do trabalho. Com relação as referências da literatura, oriundas de outro tipo

de teste (detonação de explosivos), verificam-se resultados divergentes, principalmente para Veyera (1985), com valores mais elevados de PPR ao longo da profundidade, sem apresentar a mesma atenuação observada nos testes de campo, apesar de valores próximos para as primeiras profundidades. Charlie *et. al.* (2013) se aproxima mais dos testes de campo, de forma geral, porém, para baixas profundidades ou tensões efetivas, apresenta razão de poropressão PPR superior aos testes de campo e com rápida dissipação com a profundidade, com valores zerados a partir de 100 kPa de tensão efetiva, também se afastando um pouco em relação aos testes com equipamentos de construção para a condição analisada.

Para os resultados das verificações específicas de cada equipamento (FIGURA 4.114 a FIGURA 4.122) as mesmas constatações podem ser consideradas, com algumas particularidades, ajustes um pouco mais ou menos próximos dos testes de campo, porém com a mesma tendência em relação à verificação geral de maior convergência em relação às referências da literatura. Ajustes mais próximos são verificados para: Caminhão Vazio, Carregadeira, Escavadeira, Patrol, Trator de Esteiras e combinação de Rolo Liso A/V com trator de esteiras. Ajustes um pouco mais afastados nas primeiras profundidades são observados para o Caminhão Carregado e Rolos Lisos A/V e S/V, talvez pela maior influência do peso e dos comboios para o Caminhão Carregado, e pela situação já comentada da similaridade dos pesos e geração de excesso de poropressão para os Rolos Lisos A/V e S/V, porém com diferenças nas velocidades de vibração de partícula de pico. Essas diferenças nas previsões são observadas para menores valores de tensões efetivas, localizadas mais próximas à superfície, com convergências para maiores profundidades, o que atenua possíveis efeitos adversos para a razão de poropressão, sendo também de forma localizada e mais próxima à superfície do terreno, caso ocorram.

c) Estimativa do fator ou margem de segurança - FS

Conforme comentado, de modo a estimar os maiores valores observados nos testes de campo para a razão de poropressão (PPR) e não alcançado diretamente em alguns casos pela equação geral proposta, que apresenta um ajuste médio, recomenda-se a adoção de um fator de segurança para as estimativas de campo, dada a sensibilidade dos rejeitos às vibrações e aos possíveis efeitos adversos.

Essa estimativa foi realizado testando-se fatores crescentes, até que os maiores valores medidos em campo fossem estimados também pela equação proposta. E o resultado encontrado é de aproximadamente 1,5 para um fator global para a equação.

Nas figuras seguintes (FIGURA 4.123 e FIGURA 4.124), são apresentados os gráficos com os valores dos testes de campo, de equação geral proposta e da mesma equação com a adoção do fator de segurança de 1,5, para verificação da abrangência da equação ao maiores valores observados em campo.

FIGURA 4.123 – ESTIMATIVA DO FATOR DE SEGURANÇA – FS=1,5 – TODOS OS EQUIPAMENTOS.

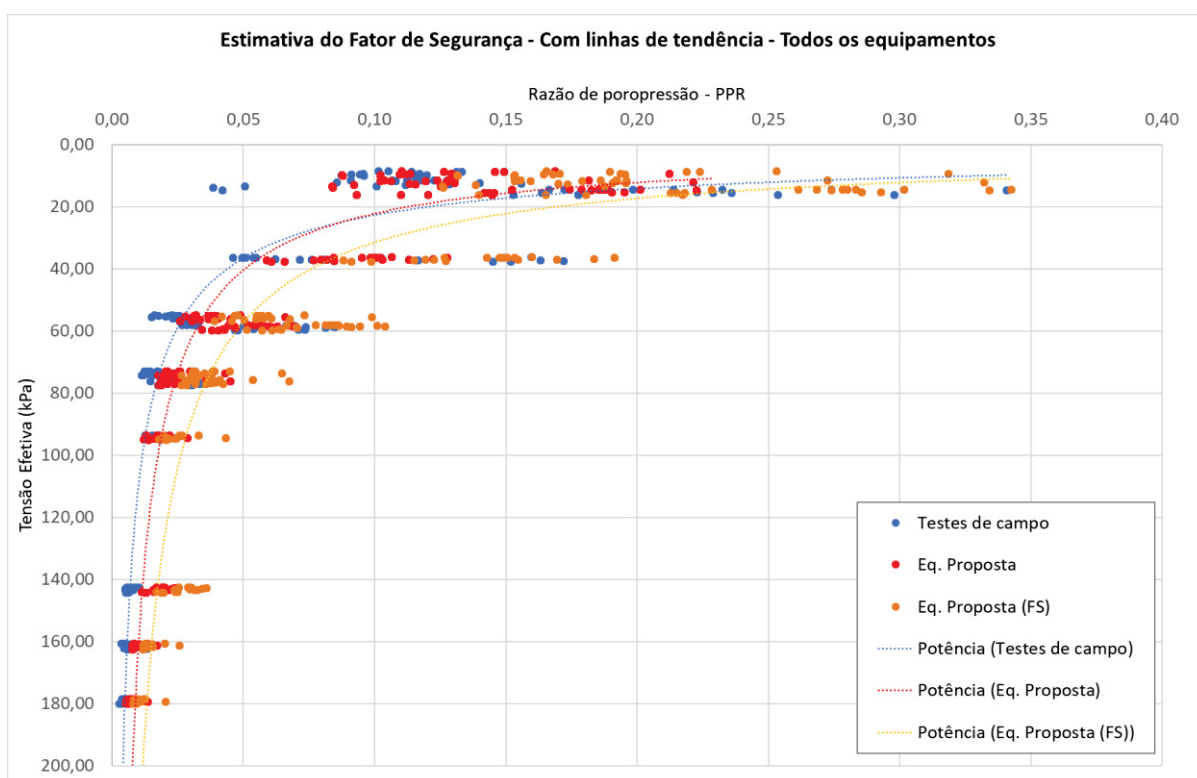
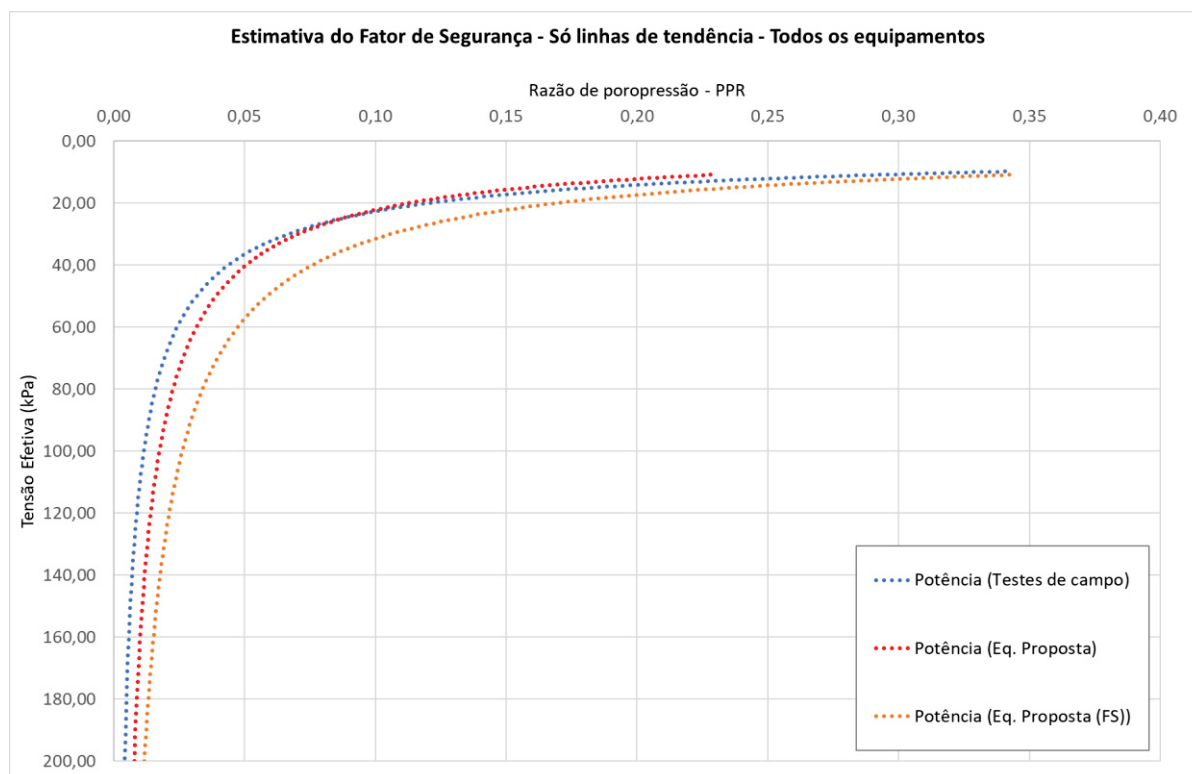


FIGURA 4.124 - ESTIMATIVA DO FATOR DE SEGURANÇA SÓ COM LINHAS DE TENDÊNCIA – FS=1,5 – TODOS OS EQUIPAMENTOS.



4.4.6 Considerações sobre os resultados dos estudos de correlação

De posse de todos os resultados dos estudos de correlação entre vibrações e poropressões, com as correlações gerais, matrizes, modelos e equações, têm-se as seguintes considerações gerais sobre os resultados:

- As correlações gerais (item 4.4.1) apresentaram resultados bastante diversos, dada a variabilidade dos testes e equipamentos, com propriedades distintas, não sendo possível obter correlações e convergências satisfatórias com os dados gerais de “du” ou “PPR” diretamente ou somente com PPV;
- Com as matrizes de correlação (item 4.4.2) foi possível verificar as variáveis numéricas com maiores forças ou influência nos resultados de “du” e “PPR”. Também propiciaram a verificação das formas de apresentação dos dados de entrada, que se diferenciam para as duas análises, principalmente devido a consideração da tensão efetiva na

determinação de “PPR”, com essas informações sendo consideradas para a sequência do estudo, com os modelos de correlação.

- Os modelos de correlação (item 4.4.3) propiciaram a determinação das variáveis, numéricas ou não, que contribuem para a explicação do fenômeno em estudo. Foi possível verificar que as propriedades dos materiais não influenciam diretamente os resultados para este estudo específico, pois os testes foram realizados essencialmente no material rejeito lamoso, com parte em transicional, sendo válidos os resultados para estes materiais analisados. Para comparar com outros tipos de materiais, como rejeitos arenosos, novos testes devem ser realizados para estes materiais.
- Ainda nos modelos de correlação (item 4.4.3), obteve-se a confirmação de que é possível obter boas correlações entre vibrações e poropressões, de forma direta, analisando-se separadamente cada equipamento, dadas as características e atividades de cada um deles, sendo o estudo específico de cada equipamento continuado na fase da determinação das equações de correlação.
- No estudo das equações de correlação (item 4.4.4), foram determinadas as equações de regressão lineares de cada equipamento testado, com coeficientes de determinação R^2 considerados satisfatórios para a maioria dos equipamentos. Verificou-se, também, que o peso ou sobrecarga dos equipamentos pode ter a maior contribuição na geração de poropressão, sendo necessários estudos específicos para entender e considerar sua influência nas equações e modelos propostos.
- Verificou-se, também, que os dados de frequência de vibração (item 4.4.4.4) destes testes não mostraram influência direta nos resultados, apresentando histogramas muito semelhantes para todos os equipamentos, talvez por não influenciar na frequência natural do meio, e distribuições ou espectros de frequência e velocidades distintos entre si, porém não sendo possível considerar neste trabalho sobre a influência dos mesmos nas vibrações e geração de excessos de poropressão. Existe uma tendência de as maiores concentrações das maiores velocidades de vibrações de partículas de pico ocorrerem nas

faixas das menores frequências, abaixo de 50Hz, que são próximas às frequências observadas em sismos naturais que apresentaram consequências para este tipo de estrutura, e também se aproximam das frequências naturais dessas estruturas, que são baixas, possibilitando efeitos de ressonância e propagações em maiores distâncias ou profundidades, porém sendo necessários estudos específicos e mais aprofundados sobre o tema para associá-los as variações ou excessos de poropressão devidos às vibrações dos equipamentos de construção.

- Após todos os estudos realizados, que possibilitaram um maior entendimento acerca das vibrações e poropressões oriundas dos equipamentos de construção nos rejeitos, apresentou-se uma proposta de correlação ou equação geral empírica para a razão de poropressão (item 4.4.5), que apresentou uma convergência considerada satisfatória dada a variabilidade do estudo realizado, com diferentes equipamentos, com diferentes características e formas de transmissão da sobrecarga e vibração, e em um ambiente externo e não totalmente controlado, como ocorre em laboratórios. Adotando-se a equação proposta, com uma margem de segurança sobre os valores previstos ($FS=1,5$), pode-se estabelecer estimativas de comportamento de rejeitos lamosos/transicionais quanto a geração de excesso de poropressão quando solicitados pelo tráfego de equipamentos de construção.
- Comparou-se a equação geral proposta com outras disponíveis na literatura (item 4.4.5.2), que são oriundas de testes com detonações de explosivos em minas, para todos os equipamentos em conjunto, e para cada equipamento especificamente, com resultados considerados próximos ou satisfatórios para a equação proposta, e divergentes para as referências da literatura, não sendo adequado o uso dessas referências de outras finalidades para as estimativas de razão de poropressão em testes com equipamentos de construção. A maioria dos equipamentos testados com a equação geral proposta apresentam convergência muito próxima dos dados da instrumentação de campo, porém alguns apresentam uma menor aproximação ou convergência

nas primeiras profundidades (Caminhão Carregado e Rolos Lisos), sendo recomendada maior atenção para as estimativas futuras e a adoção da margem ou fator de segurança proposto.

- Por fim, os resultados dos testes de campo mostram que a geração de poropressão é altamente sensível à profundidade, com rápida dissipação à medida que ela aumenta. Isso está relacionado ao maior confinamento, maior rigidez dos rejeitos (refletida em maiores densidades relativas e velocidades cisalhantes) e menores índices de fragilidade. As poropressões são geradas por deformações cisalhantes induzidas por vibrações, que diminuem com o aumento da rigidez do material e pela atenuação das vibrações à medida que se propagam em profundidade

4.5 ANÁLISES DOS POTENCIAIS DE LIQUEFAÇÃO

As análises dos potenciais de liquefação se deram pelos comparativos com os limites de razão de poropressão (PPR) e deformações cisalhantes (γ) disponíveis na literatura e determinados com testes de campo e laboratório, conforme apresentado na fundamentação teórica e metodologia do trabalho.

Como análise e referência inicial, e não necessariamente associadas a potenciais de liquefação, foram comparados os valores obtidos de velocidade de vibração de partícula de campo (PPV) com as referências normativas.

Na sequência, são apresentados os resultados das análises realizadas.

4.5.1 Valores limites de referências normativas

Antes de iniciar as análises de potenciais de liquefação, comparou-se as velocidades de vibração obtidas com os testes de campo com as referências normativas, que não representam análises de liquefação, uma vez que não se destinam ao tipo de estrutura analisado, conforme já comentado, mas fornecem valores de referência de vibração que algumas estruturas podem ser solicitadas sem causar consequências ou danos.

Tomando-se como base as referências brasileira e alemã (NBR 9653:2018 e DIN-4150-3:2016), apresentadas no item 2.4.2, considerou-se somente os limites da

norma alemã. Isto se deve consideração de estruturas mais sensíveis à vibração na normativa alemã, sendo a brasileira mais restritiva e aplicável a construções urbanas e para vibrações causadas por detonações de explosivos. Na FIGURA 4.125 reapresenta-se o guia de velocidades limites da norma DIN-4150-3:2016.

FIGURA 4.125 - GUIA DE VALORES DE VELOCIDADES DE VIBRAÇÃO ($v_{i,max}$) PARA AVALIAÇÃO DOS EFEITOS DE VIBRAÇÕES DE CURTO PRAZO EM ESTRUTURAS.

-	Tipo de estrutura	Valores de referência para $v_{i,max}$ em mm/s				
		Fundação, em todas as direções, $i = x, y, z$, a uma frequência de			Último andar, direção horizontal, $i = x, y$	Revestimentos de piso, direção vertical, $i = z$
		1 Hz to 10 Hz	10 Hz to 50 Hz	50 Hz to 100 Hz ^a	Todas as frequências	Todas as frequências
Coluna Linha	1	2	3	4	5	6
1	Edifícios comerciais, industriais e com design semelhante	20	20 to 40	40 to 50	40	20
2	Edifícios residenciais e de design e/ou ocupação semelhantes	5	5 to 15	15 to 20	15	20
3	Estruturas que, devido à sua sensibilidade particular à vibração, não podem ser classificadas sob as linhas 1 e 2 e possuem grande valor intrínseco (por exemplo, edifícios tombados)	3	3 to 8	8 to 10	8	20 ^b
Nota: Mesmo que os valores de referência, conforme a linha 1, colunas 2 a 5, sejam atendidos, danos menores não podem ser excluídos.						
^a Em frequências acima de 100 Hz, os valores de referência para 100 Hz podem ser aplicados como valores mínimos.						
^b O parágrafo 2 de 5.1.2 deverá ser observado						

FONTE: DIN-4150-3:2016.

Nas figuras seguintes (FIGURA 4.126 a FIGURA 4.128) são apresentados os espectros de frequência de vibração de dos equipamentos, apresentados também no item 4.4.4.4, porém agora com os limites de velocidade de vibração para cada faixa de frequência da norma DIN-4150-3:2016, e para as estruturas sensíveis à vibrações (linha 3 da FIGURA 4.125), por se tratarem de barragens de rejeitos, e sujeitas a potenciais de liquefação dos materiais.

Foram considerados todos os sismógrafos instalados no teste experimental, inclusive o SV06A, que foi instalado bem próximo à superfície e sujeito às maiores vibrações.

FIGURA 4.126 - ESPECTRO DE FREQUÊNCIA DE VIBRAÇÃO COM LIMITES DA DIN-4150-3:2016 – CAMINHÃO CARREGADO, CAMINHÃO VAZIO, CARREGADEIRA E ESCAVADEIRA.

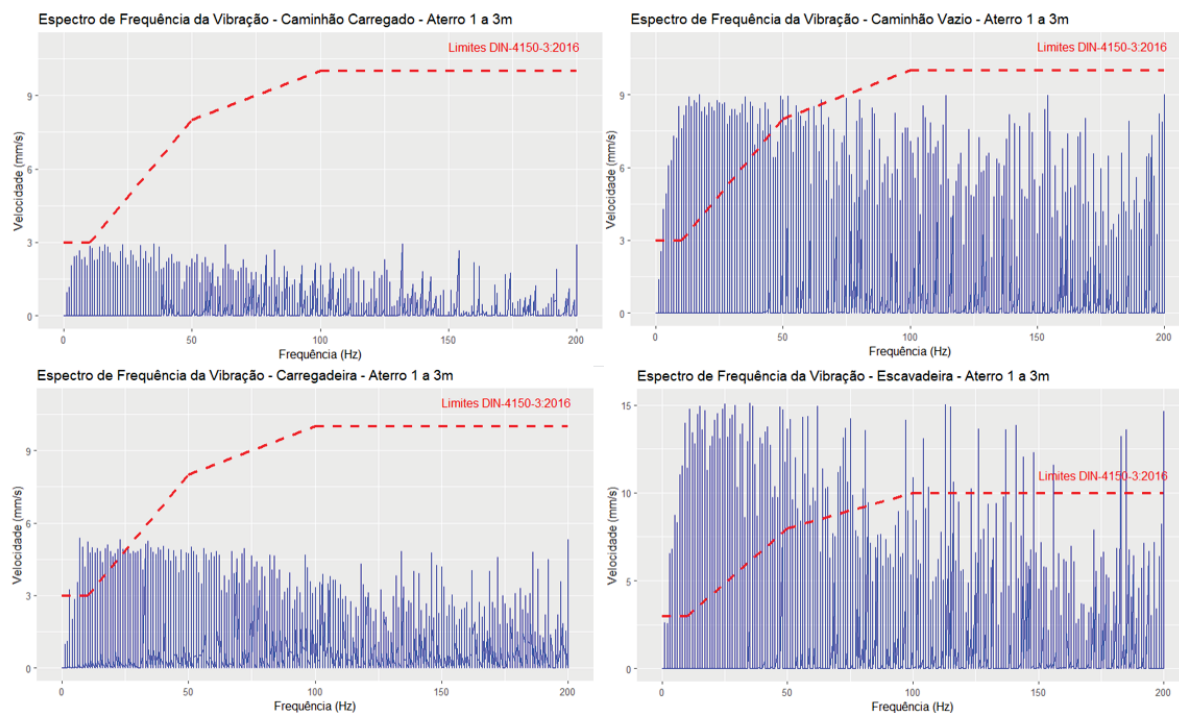


FIGURA 4.127 - ESPECTRO DE FREQUÊNCIA DE VIBRAÇÃO COM LIMITES DA DIN-4150-3:2016 – PATROL, ROLO LISO A/V, ROLO LISO S/V E TRATOR DE ESTEIRAS.

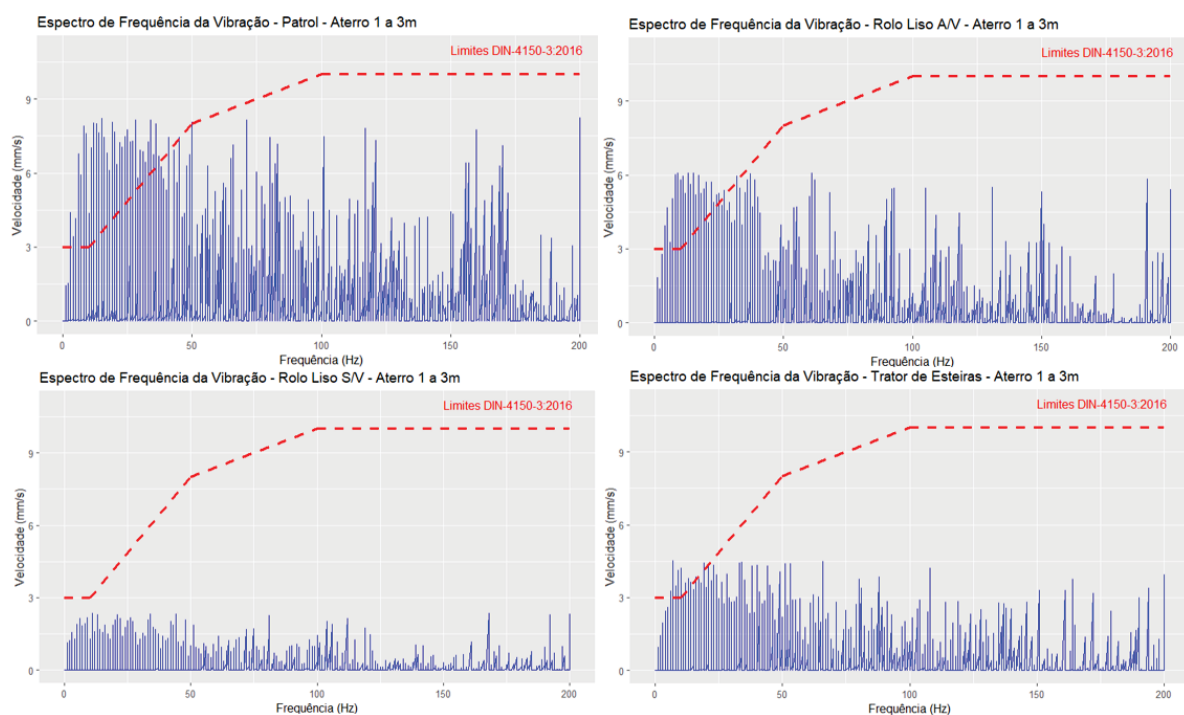
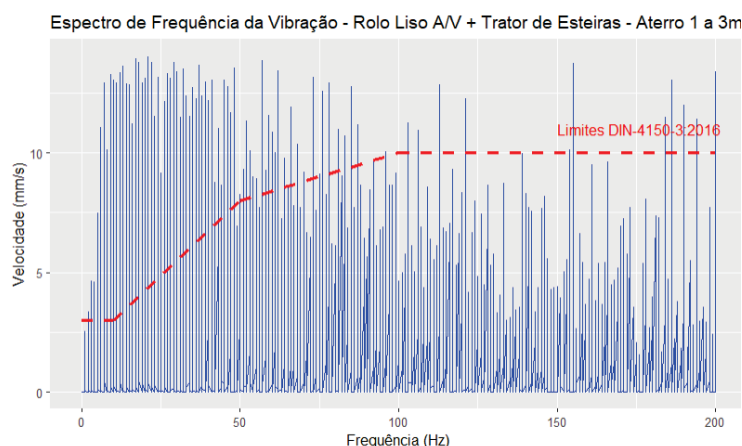


FIGURA 4.128 - ESPECTRO DE FREQUÊNCIA DE VIBRAÇÃO COM LIMITES DA DIN-4150-3:2016 – ROLO LISO A/V + TRATOR DÊ ESTEIRAS.



De posse dos resultados, verifica-se que:

- Os equipamentos Caminhão Carregado e Rolo Liso S/V se situam sempre abaixo dos limites de velocidade de vibração recomendados;
- Os equipamentos Carregadeira, Rolo Liso A/V e Trator de Esteiras apresentam velocidades pouco acima dos limites, e somente para a faixa inferior a 50 Hz.
- O Caminhão Vazio e a Patrol também superam os limites previstos e também até a faixa até 50Hz, porém com maiores valores de velocidade de vibração;
- E a Escavadeira e a combinação de Rolo Liso A/V + Trator de Esteiras ultrapassam os limites em todas as faixas de frequências de vibração.

Estas análises iniciais consideram somente às vibrações, sem considerar as variações de poropressões, que são as propriedades que contribuem para o potencial de liquefação dos materiais.

Seguindo-se as orientações iniciais e normativas, nem todos os equipamentos apresentam condições de tráfego. Porém, estes resultados podem indicar problemas mais localizados, principalmente pra os instrumentos instalados mais próximos a superfície e em materiais mais competentes, como o aterro pré-existente, e não necessariamente representam impactos na estrutura, o que realmente não ocorreu durante os testes realizados. Ressalta-se também, o nível orientativo desta análise

inicial das referências normativas, que não foram idealizadas especificamente para barragens ou rejeitos de mineração.

Análises mais específicas são apresentadas nos itens seguintes, que são direcionadas para propriedades geotécnicas dos materiais diretamente impactadas pelas ações dos equipamentos de construção.

4.5.2 Análises para a razão de poropressão “PPR” e deformação cisalhante “ γ ”.

Para a verificação do potencial de liquefação considerando a razão de poropressão “PPR ou r_u ” e a deformação cisalhante (γ), causadas pelas vibrações dos equipamentos nos testes realizados, comparou-se os dados obtidos e calculados com os testes experimentais de campo com valores limites de referência de trabalhos correlatos.

Para limites de razão de poropressão PPR, foram considerados os trabalhos de: Do et.al. (2023), que apresenta um limite de PPR (ou r_u) de 0,65 para a ruptura, e 0,20 para saída de uma região considerada estável e sem riscos associados; Tokimatsu and Toshimi (1983) apud Stark et. al. (2022), que apresenta uma situação de ruptura com FS=1,0 para PPR de 0,60; e Morgenstern et. al (2016) apud Stark et. al. (2022), que apresenta um acréscimo rápido, levando a posterior ruptura do material, a partir de um valor de PPR de 0,30. Com isso, pela proximidade dos valores das referências citadas e a consideração de fatores de segurança para os limites que indicam ruptura, adotou-se como valores limites: PPR de 0,20 para estabilidade e 0,60 para condição de ruptura.

E, para os limites de deformações cisalhantes, consideraram-se os trabalhos de Dobry e Abdo (2015), que indicam uma geração de excesso de poropressão a partir de deformações cisalhantes da ordem de 0,01%, e atingem a ruptura com deformações da ordem de 0,06%.

Os dados dos testes de razão de poropressão PPR são os mesmos já considerados no estudo, e obtidos pela relação entre a variação ou excesso de poropressão dos testes com as tensões efetivas iniciais, também sem considerar o par de instrumentos fora do off-set do aterro (PE09-SV07B), por não apresentar a variação de tensão efetiva e por ser uma tensão efetiva muito baixa, que pode representar uma situação de liquefação muito localizada e superficial, sem impactos para a estrutura ou para o equipamento. E as deformações cisalhantes “ γ ” (em %)

foram estimadas a partir da equação abaixo, relacionada às velocidades de vibração de partícula de pico “PPV” (em mm/s), obtidas nos testes de campo, e a velocidade de onda cisalhante sísmica “Vs” (em m/s) obtidas no ensaio CPTU sísmico para o material rejeito lamoso, que ocorre nas primeiras profundidades (após o lastro/aterro pré-existente), onde estão instalados os pares de instrumentos analisados.

$$\gamma = \left(\frac{PPV}{V_s} \right) \cdot 100$$

As verificações foram realizadas para os valores máximos de PPR e PPV obtidos nos testes de campo para cada altura de aterro/pista experimental, com objetivo de verificar a segurança do tráfego de equipamentos em cada nível de proteção gerada pela altura de aterro.

Foram considerados todos os pares de instrumentos com sismógrafos e piezômetros correspondentes, com exceção do par (PE09-SV07B), conforme já comentado, porém sabe-se que os maiores valores medidos, tanto de vibração como de poropressão, são referentes ao par PE07A-SV06B, que está localizado mais próximo à superfície (~1,0m de profundidade) e localizado no material rejeito lamoso.

Os resultados das avaliações são apresentados no QUADRO 4.15, abaixo.

QUADRO 4.15 - ANÁLISE DO POTENCIAL DE LIQUEFAÇÃO – RAZÃO DE POROPRESSÃO “PPR” E DEFORMAÇÃO CISALHANTE “ γ ”.

Testes de campo								Limites de referência	
Equipamento	Peso (kN)	Altura de aterro (m)	PPV (mm/s)	Δu ou du (kPa)	Vs (m/s)	PPR testes	γ testes (%)	PPR limite	γ limite (%)
Caminhão Carregado	435	1	2,93	5,72	203,9	0,15	0,001	0,20 e 0,60	0,01 e 0,06
		2	1,11	1,84	203,9	0,03	0,001		
		3	-	-	203,9	-	-		
Caminhão Vazio	160	1	9,00	2,00	203,9	0,06	0,004	0,20 e 0,60	0,01 e 0,06
		2	2,09	2,32	203,9	0,03	0,001		
		3	1,36	1,87	203,9	0,02	0,001		
Carregadeira	232	1	5,38	3,71	203,9	0,10	0,003	0,20 e 0,60	0,01 e 0,06
		2	2,23	2,53	203,9	0,03	0,001		
		3	4,96	2,28	203,9	0,02	0,002		

Testes de campo								Limites de referência	
Equipamento	Peso (kN)	Altura de aterro (m)	PPV (mm/s)	Δu ou Δd (kPa)	Vs (m/s)	PPR testes	γ testes (%)	PPR limite	γ limite (%)
Escavadeira	372,5	1	15,13	5,80	203,9	0,16	0,007	0,20 e 0,60	0,01 e 0,06
		2	7,44	1,11	203,9	0,02	0,004		
		3	1,01	1,41	203,9	0,02	0,000		
Patrol	147,5	1	8,24	3,74	203,9	0,10	0,004	0,20 e 0,60	0,01 e 0,06
		2	3,56	1,98	203,9	0,03	0,002		
		3	1,95	1,18	203,9	0,01	0,001		
Rolo Liso A/V	112	1	6,09	6,44	203,9	0,17	0,003	0,20 e 0,60	0,01 e 0,06
		2	1,46	2,21	203,9	0,03	0,001		
		3	0,74	1,34	203,9	0,02	0,000		
Rolo Liso S/V	112	1	2,37	6,10	203,9	0,16	0,001	0,20 e 0,60	0,01 e 0,06
		2	0,78	2,38	203,9	0,03	0,000		
		3	0,54	1,70	203,9	0,02	0,000		
Trator de Esteiras	198	1	4,51	4,36	203,9	0,12	0,002	0,20 e 0,60	0,01 e 0,06
		2	1,11	2,24	203,9	0,03	0,001		
		3	0,92	1,73	203,9	0,02	0,000		
Rolo Liso A/V + Trator de Esteiras	310	1	14,03	5,00	203,9	0,09	0,007	0,20 - 0,60	0,01 - 0,06
		2	2,92	2,60	203,9	0,03	0,001		
		3	1,23	1,94	203,9	0,02	0,001		

Com os resultados obtidos, verifica-se que:

- Todos os equipamentos testados apresentam razão de poropressão “PPR” e deformações cisalhantes abaixo dos limites de referência adotados, tanto para o limite de estabilidade de 0,2 para o “PPR”, como para o limite da deformação cisalhante “ γ ” que indica geração de poropressão de 0,01%.
- É importante destacar que os resultados da razão de poropressão consideram as poropressões medidas em campo, que são devidas não somente as vibrações dos equipamentos, como também a sobrecarga gerada por eles, como já constatado e comentado nos itens anteriores

deste trabalho. Os resultados deste estudo corroboram com a geração mais significativa de poropressão devida a sobrecarga do equipamento em relação a sua vibração, pois os valores de PPR se aproximam mais do limite inicial de estabilidade e indicam geração significativa de poropressão, e as deformações cisalhantes, estimadas com os dados de vibração, ficam mais afastadas do limite que indica o início de geração de poropressão.

- Os maiores valores de razão de poropressão e que se aproximam do limite de estabilidade são verificados nos equipamentos Caminhão Carregado (0,15), Escavadeira (0,16) e Rolo Liso A/V (0,17), com velocidades de vibração e deformações cisalhantes distintas, trazendo a particularidade de cada equipamento na geração de excesso de poropressão. Todos resultados para aterro com 1m de espessura.
- Os maiores valores de deformações cisalhantes são obtidos para a Escavadeira (0,007%) e para a combinação de Rolo Liso A/V + Trator de Esteiras (0,007%), por apresentarem as maiores velocidades de vibração de partícula de pico (PPV), porém abaixo do limite inicial que indica geração de poropressão de 0,01%.
- Para alturas de aterro de 2 e 3m, os valores obtidos para razão de poropressão se afastam do limite de estabilidade, indicando condições seguras para o tráfego e operação de equipamentos.
- Ressalta-se que os testes são para uma praça de trabalho isolada, e indicam a necessidade de afastamento entre praças de modo a evitar a sobreposição dos efeitos gerados pelos equipamentos, que poderiam se aproximar dos limites de segurança, caso ocorram.
- Verifica-se que os limites normativos e técnicos existentes são conservadores, pois limitam às vibrações a valores próximos de 5 a 15mm/s, e os resultados os testes mostram que as vibrações dos equipamentos não induzem a geração significativa de poropressões para esses mesmos valores de velocidade de vibração de partícula, e estão afastadas dos limites que indicariam a liquefação dos materiais. Mostram, também, que analisar somente as vibrações não é suficiente,

dada a variabilidade dos efeitos de cada equipamento, e da significativa contribuição dos seus pesos e sobrecargas.

- Por fim, evidencia-se que o monitoramento das obras de engenharia deve focar, principalmente, nas poropressões geradas pelos equipamentos, e nos limites associados para cada tipo de material e ao processo de liquefação. Analisar as poropressões é considerar tanto os efeitos das vibrações e deformações associadas, como da sobrecarga dos equipamentos, sendo esta a propriedade diretamente associada aos efeitos de liquefação para os materiais.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho apresentou um estudo das vibrações e poropressões geradas pelo tráfego de equipamentos de construção em rejeitos de mineração, com estudos específicos e buscas de critérios que associam diretamente as vibrações e poropressões, suas correlações e análises dos potenciais de liquefação envolvidos. Ressalta-se que o estudo realizado correlaciona essas duas propriedades de forma direta, com testes reais de campo com tráfego de equipamentos, diferente dos estudos disponíveis na literatura, que são referentes a outros processos, como detonações de explosivos, ou associam as poropressões com deformações (e não com vibrações) através de simulações de laboratório ou campo. De posse de todos os resultados e suas análises, são apresentadas, neste capítulo, as considerações gerais e finais do trabalho desenvolvido.

Os materiais analisados, que são rejeitos armazenados em uma barragem com alteamento de montante, foram classificados como de característica lamosa (fina) e transicional, com estado contrátil, e sujeitos a geração de excesso de poropressão e desenvolvimento de comportamento não drenado perante solicitações estáticas ou dinâmicas. O corpo do aterro ou pista experimental, onde foram desenvolvidos os testes, apresentou classificação de silte arenoso e silte argiloso.

Os estudos específicos das vibrações apresentaram os resultados típicos de cada equipamento, e como as vibrações se propagam com o distanciamento horizontal e vertical, com maior atenuação das vibrações observadas nos testes do Aterro 2, que apresenta fundação com camada de aterro pré-existente mais espessa e maior afastamento do nível de água. No Aterro 1, com menor espessura de aterro e maior proximidade do nível de água da fundação, a atenuação foi menor, podendo estar sujeita a maiores consequências dos efeitos causados pelas vibrações. Com relação aos equipamentos de construção, foram observados maiores velocidades de vibração de partículas na Escavadeira, com valores máximos próximos de 15 mm/s, seguida da Patrol, com 10 mm/s. Estes equipamentos, além de trafegarem, realizaram atividades nos testes, o que pode ter gerado esse maior efeito. A combinação de Rolo Liso e Trator de Esteiras também apresentou velocidades de vibração elevadas, aproximando-se, também, dos 15mm/s, mostrando a sobreposição dos efeitos individuais de cada equipamento.

Com relação à geração de excesso de poropressão detectadas pelos piezômetros, verificaram-se valores significativamente superiores para o Aterro 1 em relação ao Aterro 2, devido também à condição de fundação e, principalmente, a presença do nível de água mais próximo à superfície e a saturação dos rejeitos de fundação do Aterro 1. Para as alturas de aterro/pista experimental avaliados, verificou-se a considerável atenuação dos efeitos com a elevação do aterro, sendo o excesso de poropressão desprezível a partir de 3m de altura. Mesmo com 3m, os efeitos já são bastante reduzidos. Para os equipamentos, foram observados maiores valores de excesso de poropressão para a Escavadeira, Caminhão Carregado e Rolo Liso de Alta e Baixa Vibração, aproximando-se de 6 kPa, e não sendo diretamente proporcional aos equipamentos com as maiores vibrações observadas, sendo já um indício do envolvimento de outras variáveis dos equipamentos para a geração de poropressão, não somente a vibração gerada.

A análise específica da geração da poropressão com a profundidade mostrou a sua redução com aumento da profundidade, estando relacionada ao aumento do confinamento ou tensão efetiva e da rigidez dos materiais, à redução do seu índice de fragilidade e, também, à atenuação das vibrações, entre outros fatores ou propriedades correlacionadas.

O estudo das correlações foi desenvolvido inicialmente com o cruzamento de todos os dados de todos os equipamentos e testes desenvolvidos, observando-se a grande variação dos resultados. Com a elaboração das matrizes e modelos de correlação, foram verificadas as variáveis que mais influenciam no processo, sendo verificado a grande distinção dos resultados entre os equipamentos, sendo necessário o estudo específico de cada um deles para obter correlações consideradas satisfatórias. Observou-se, também, a influência do peso dos equipamentos na geração do excesso de poropressão, sendo o principal fator em alguns casos, e também mostrando que deve ser considerado nos modelos de correlação.

As frequências de vibração, da forma como os estudos foram realizados, não mostraram relação direta com a propagação das vibrações e geração de excessos de poropressão, talvez pela escala reduzida dos testes em comparação com estudos de sismos naturais, onde observa-se a relação devido aos efeitos de ressonância com as vibrações naturais das estruturas, que são também reduzidas.

Ainda nos estudos de correlação, propôs-se uma equação empírica geral para a razão de excesso de poropressão “PPR ou ru”, relacionada com a velocidade de

vibração de partícula de pico “PPV”, com tensão efetiva do ponto ou profundidade de análise e o peso do equipamento, que foram as variáveis que apresentaram as maiores influências nos estudos de correlação de vibração e poropressão, e são informações obtidas facilmente em situações de campo ou obra. A equação proposta foi comparada com outras referências técnicas e com os testes de campo, mostrando melhor convergência que as referências, que foram idealizadas para outra finalidade e não devem ser diretamente relacionadas as vibrações e poropressões geradas pelos equipamentos de construção. Ressalta-se a aplicação do modelo proposto para os materiais e equipamentos testados, e com certa margem de segurança dada a variabilidade do fenômeno e dos equipamentos de campo, porém pode-se considerar seu uso para estimativas iniciais e planejamento de instrumentação de campo, que sempre deve ser utilizada.

Os resultados dos testes de campo também mostraram que a geração de poropressão é sensível à profundidade, com rápida dissipação a pequenos incrementos de profundidade. Relaciona-se a isso, mais uma vez, o maior confinamento, maior rigidez e menores índices de fragilidade dos rejeitos, que são refletidas em propriedades como densidades relativas e velocidades cisalhantes mais elevadas. No contexto analisado, as poropressões são geradas por deformações cisalhantes, que são induzidas pelas vibrações, com redução dos efeitos com o aumento da rigidez do material e atenuação das vibrações à medida que alcançam maiores profundidades.

No contexto das análises dos potenciais de liquefação, os resultados mostraram que com 1,0m de lastro de conquista afasta-se a condição de liquefação geral dos rejeitos de fundação para praças de trabalho isoladas, estando os valores de razão de poropressão e deformação cisalhantes, comparados com limites de referência, na faixa considerada estável e sem riscos de liquefações devido a geração de excesso de poropressão pelos equipamentos de construção, que deve sempre ser considerada em obras que envolvam o tráfego desses equipamentos sobre rejeito.

No entanto, entende-se que não se pode descartar a ocorrência de liquefações de ocorrência local, no entorno do equipamento, dada a heterogeneidade dos materiais, trechos mais lamosos, menos resistentes em superfície, com maior grau de saturação e, também, a operação continuada dos equipamentos. Porém, de acordo com os testes e o estudo realizado, não são esperadas liquefações gerais, que se propaguem na estrutura como um todo, desde que sejam adotadas as

recomendações de praças isoladas, 1m de lastro e monitoramento constante das poropressões.

Verifica-se que o monitoramento das obras de engenharia deve focar, principalmente, nas poropressões geradas pelos equipamentos, e nos limites associados para cada tipo de material e ao processo de liquefação. Analisar somente vibrações associadas a referências normativas de outras aplicações ou a estudos em contextos diferentes pode levar a limites conservadores e fora da prática de campo. Deve-se sempre monitorar e analisar as poropressões, que consideram tanto os efeitos das vibrações e deformações associadas, como da sobrecarga dos equipamentos, sendo a poropressão a propriedade diretamente associada aos efeitos de liquefação dos materiais.

Por fim, entende-se que o trabalho contribui para o entendimento das vibrações, poropressões e potenciais de liquefação devido ao tráfego dos equipamentos de campo, porém sendo ainda um estudo inicial, que deve ser aprofundado e generalizado com mais testes de campo instrumentados e em diferentes condições e materiais de fundação para reduzir as incertezas relacionadas.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuros sobre o mesmo tema, têm-se as seguintes sugestões:

- Realização de novos testes instrumentados, com rejeitos de fundação com diferentes características, para introduzir propriedades dos materiais como variáveis ao modelo de correlação. Neste contexto, pode-se associar as vibrações a propriedades como densidade relativa, velocidade cisalhante, coeficiente de permeabilidade, entre outras.
- Estudos específicos da geração do excesso de poropressão em profundidade devido a somente o peso do equipamento transitando, para separar e classificar as componentes que contribuem para essa geração de poropressão;
- Análises detalhadas das frequências de vibração, com estudos específicos, associação às frequências naturais de cada tipo de solo ou rejeito, aplicação de filtros para faixas de frequências persistentes,

simulações computacionais das propagações das vibrações de cada equipamento de construção, entre outras que sejam aplicáveis.

- Para verificação das deformações cisalhantes estimadas, realizar testes com instrumentação específica e com precisão necessária para baixas deformações.
- Verificações específicas dos testes de comboio para análise de possíveis efeitos de sobreposição de vibrações e poropressões.
- Proposição de outra forma para representar a equação de correlação geral utilizando coeficientes para cada tipo de equipamento, por exemplo, ao invés ou além do seu peso.
- Validação da equação geral proposta em outro contexto com novos testes de campo, para verificação dos valores preditos e medidos.

REFERÊNCIAS

ABNT NBR 9653:2018. **Guia para avaliação dos efeitos provocados pelo uso de explosivos nas minerações em áreas urbanas**. ABNT Rio de Janeiro, 2018.

ANM – AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO. **Portaria nº 70.389/2017**.

ANM – AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO. **Resolução 95/2022**.

BVP GEOTECNIA E HIDROTECNIA. **Especificação técnica – Protocolo do Trafego de Equipamentos da Cava do Germano - Projeto executivo**. Belo Horizonte, 2023. Relatório técnico interno. Não publicado.

CASTILHO, B. M. **Análise dos gatilhos de liquefação dinâmica e modelagem numérica da Barragem do Germano**. 2017. 116 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Engenharia Geotécnica) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2017.

CERQUEIRA, H. **Critérios de projeto para instrumentação piezométrica de diversas estruturas geotécnicas em mineração**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Geotecnia. Universidade Federal de Ouro Preto, 2017.

CHAMMAS. R. **Barragens de Contenção de Rejeitos. Curso de Especialização em Engenharia de Barragens (CEEb)**. Universidade Federal de Ouro Preto, 1989.

CHANG, WEN-JONG, ELLEN M RATHJE, KENNETH H STOKOE, AND KENAN HAZIRBABA. **"In Situ Pore-Pressure Generation Behavior of Liquefiable Sand."** Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering 133.8 (2007): 921-31. Web.

CHARLIE, WA, WA LEWIS, AND DO DOEHRING. **"Explosive Induced Pore Pressure in a Sandfill Dam."** Geotechnical Testing Journal 24.4 (2001): 391-400. Web.

CHARLIE, W. A.; BRETZ T. E.; SCHURE, L.A.; DOEHRING, D. O. **"Blast-Induced Pore Pressure and Liquefaction of Saturated Sand,"** Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 139, No. 8, August 2013, pp. 1308-1319.

DALCÉ, J. D.; LI, L.; YANG, P. **Experimental Study of Uniaxial Compressive Strength (UCS) Distribution of Hydraulic Backfill Associated with Segregation**. Journal Minerals MDPI, set, 2019.

DIN 4150-3:2016. **Vibration in Buildings – Part 3 – Effects on structures, English translation of DIN 4150-3:2016-12.** DIN Deutsches Institut für Normung. Berlim, Alemanha, 2016.

DO, T. M.; LAUE, J.; MATTSSON, H.; JIA, Q. **Excess pore water pressure Generation in fine granular materials under undrained cyclic triaxial loading.** International Journal of Geo-Engineering, 14:8, 2023.

DOBRY, R.; ABDOUN, T. H. **Cyclic Shear Strain Needed for Liquefaction Triggering and Assessment of Overburden Pressure Factor $K\sigma$.** Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering 141(11), 2015.

ESPÓSITO, T. J. **Metodologia Probabilística e Observacional Aplicada a Barragens de Rejeito Construída por Aterro Hidráulico.** Tese de Doutorado em Geotecnia. Universidade Brasília, 2000.

FERDOSI, B., JAMES, M., AND AUBERTIN, M. **"Numerical Simulations of Seismic and Post-seismic Behavior of Tailings."** Canadian Geotechnical Journal 53.1 (2015): 85-92. Web.

FOURIE, A. B., BLIGHT, G. E., PAPAGEORGIOU, G. **Static liquefaction as a possible explanation for the Merriespruit tailings dam failure.** Can Geotech J 38, 2001.

GEEKON. **Piezômetro de Corda Vibrante – Modelo Serie 4500 – Manual de instruções.** Disponível em: https://www.geokon.com/content/manuals/4500_Manual_de_Instrucciones.pdf. 2021.

GOMES, R.C. **Mecânica da Liquefação dos Solos.** NUGEO – Núcleo de Geotecnia da Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, UFOP, 40p, 2010.

ISHIMWE, E.; COFFMAN, R.A.; ROLLINS, K.M. **Predicting blast-induced liquefaction within the New Madrid Seismic Zone.** AIMS Geosciences. Volume 6, Issue 1, 71–91, 2020.

JEFFERIES, M.; BEEN, K. **Soil liquefaction: A critical state approach..** CRC Press, 2016.

JIN, JIAXU, SHIHAO YUAN, HONGZHI CUI, XIAOCHUN XIAO, AND BAOXIN JIA. **"A Threshold Model of Tailings Sand Liquefaction Based on PSO-SVM."** Sustainability (Basel, Switzerland) 14.5 (2022): 2720. Web.

Labanda, Nicolas A, Roberto J Cier, and Mauro G Sottile. **"A High-fidelity Seismic Intensity Measure to Assess Dynamic Liquefaction in Tailings."** (2022). Web.

LARSON-ROBL, K. M. **Pore Pressure Measurement Instrumentation Response To Blasting.** Theses and Dissertations-Mining Engineering. University of Kentucky, 2016.

LEDESMA, O., SFRISO, A., AND MANZANAL, D.. **"Procedure for Assessing the Liquefaction Vulnerability of Tailings Dams."** Computers and Geotechnics 144 (2022): 104632. Web.

LIEW, MIN, MING XIAO, SHIMIN LIU, AND DOUGLAS RUDENKO. **"In Situ Seismic Investigations for Evaluating Geotechnical Properties and Liquefaction Potential of Fine Coal Tailings."** Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering 146.5 (2020): Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2020, Vol.146 (5). Web.

MASSIGNAN, R. S.; SÁNCHEZ, L. E. **"O Que Significa Descaracterizar Barragens De Rejeitos De Mineração? Uma Revisão Sistemática Da Literatura."** Engenharia Sanitária E Ambiental 27.2 (2022): 225-34. Web

MATASOVIC, N.; KAVAZANJIAN JR, E. **Seismic Response of a Composite Landfill Cover.** Journal Of Geotechnical And Geoenvironmental Engineering ASCE. April, 2006.

MATURANO RAFAEL, H. M. A. **Análise do Potencial de Liquefação de uma Barragem de Rejeito.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) –Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

MORGENSTERN, N. R.; VICK, S. G.; VIOTTI, C. B.; WATTS, B. D. **Fundão Tailings Dam Review Panel.** Report on the Immediate Causes of the Failure of the Fundão Dam, 2016.

MORGENSTERN, N.; JEFFERIES, B.; VAN ZYL, D.; WATES, J. **Report on NTSF Embankment Failure Cadia Valley Operations for Ashurst Australia by Independent Technical Review Board.** Abril, 2019.

OLSON, S. M.; STARK, T. D. **Flow liquefaction of sands and silty sands.** Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, v. 128, n. 12, p. 990–1003, 2002.

OLSON, S. O.; STARK, T. D. **Yield Strength Ratio and Liquefaction Analysis of Slopes and Embankments**. Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, ASCE, agosto, 2003.

ORDONEZ, G. A. **SHAKE2000 – A computer Program the 1-D Analysis of Geotechnical Earthquake Problems**. Geomotion, LLC. Lacey, Whashington, USA, 2012.

PEREIRA, E. L. **Estudo Do Potencial De Liquefação De Rejeitos De Minério De Ferro Sob Carregamento Estático**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), 2005.

PIRETE, W. **Estudo do potencial de liquefação estática de uma barragem de rejeito alteada para montante aplicando a metodologia de Olson (2001)**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Ouro Preto, 2010.

ROBERTSON, P. K. **Soil behavior and liquefaction**. In: Proceedings of the International Symposium on Geotechnical Earthquake Engineering, Tokyo, 2009.

ROBERTSON, P.K.; CABAL, K. L. **“Guide to Cone Penetration Testing for Geotechnical Engineering”**. Gregg Drillink & Testing, Inc. 6th Edition, 2015.

ROBERTSON, P.K. **"Cone Penetration Test (CPT)-based Soil Behaviour Type (SBT) Classification System — an Update."** Canadian Geotechnical Journal 53.12 (2016): 1910-927. Web.

ROBERTSON, P. K.; DE MELO, L.; WILIAMS, D. J.; WILSON, G. W. **Report of the expert panel on the technical cause of the failure of Feijão Dam I**. 2019.

FEAR, C. E.; ROBERTSON, P. K. **Estimating the potential for liquefaction or cyclic failure using the cone penetration test**. Canadian Geotechnical Journal, 32(4), 848-858. 1995.

RUSSO, F. M. **Comportamento de Barragens de Rejeito Construídas po Aterro Hidráulico: Caracterização Laboratorial e Simulação do Processo Construtivo**. Tese de Doutorado. Universidade de Brasília, 2007.

SEGARRA, P., SANCHIDRIÁN, J. A., DEL CASTILLO, I., CASTEDO, R., LÓPEZ, L. M., & NAVARRO, J. **Blasting seismographs: Transfer functions, standards and accuracy**. Universidad Politécnica de Madrid–ETSI Minas y Energía. 2017.

SOLVER TECNOLOGIAS. **Catálogo de Monitoramento de Estruturas**, 2021.

TR SEMAD/FEAM-MG nº 2.784/2019. **Termo de referência para descaracterização de barragens alteadas pelo método de montante**. SEMAD: Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável. FEAM: Fundação Estadual do Meio Ambiente. Minas Gerais, 2019.

TRIPATHY, G. R.; SHIRKE, R. R. **Assessment of safety of earthen dams against ground vibrations due to mining blasts**. MineTECH'10-Seminar on Mining Technology-Extraction, Beneficiation for Safe and Sustainable Development. Bhubaneswar, India, 2010.

TSUCHIDA, H. **Prediction and countermeasure against the liquefaction in sand deposits**. Abstracts of the Seminar in the Port and Harbor Research Institute, Yokosuka, Japão, 1970.

UNGAR, ERIC E, AND JEFFREY A ZAPFE. **"Limiting Effects of Construction Vibrations on Sensitive Equipment."** Practice Periodical on Structural Design and Construction 16.4 (2011): 199-203. Web.

USBR - U.S. Bureau of Reclamation. **Review of present practices used in predicting the effects of blasting on pore pressure**, 1985.

VEYERA, G. E. **Transient Porewater Pressure Response And Liquefaction In A Saturated Sand**. Ph.D. Dissertation, Department of Civil Engineering, Colorado State University, 1985.

VIBRAQUIPO. **Vibracord - Vibration meters and blasting seismographs**. Acessado em: 15/12/2022. Disponível em: <http://www.vibraquipo.com/VibrationMeters.php>.

VILCAHUAMÁN, P. J. P. **Análise numérica do potencial de liquefação induzido por terremoto em uma barragem de rejeitos no Peru**. Dissertação (Mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2018.

VICK, S.G. **Planning, design and analysis of tailings dams**. New York, USA: John Wiley and Sons, Inc, 1990. 369 p.

ANEXOS

ANEXO 1 - CATÁLOGOS DOS EQUIPAMENTOS DE CONSTRUÇÃO

QUADRO 0.1 – CATÁLOGOS TÉCNICOS DOS EQUIPAMENTOS DE CONSTRUÇÃO.

Caminhão Basculante – Axor 3131	 Caminhão Basculantes - Axor 31.
Carregadeira – CAT 966	 Carregadeira CAT 966.pdf
Escavadeira – CAT 366	 Escavadeira CAT 366.pdf
Motoniveladora – Patrol – CAT 140K	 Patrol CAT 140K.pdf
Rolo Liso CA250D	 Rolo Liso CA250D.pdf
Trator de Esteira D61	 Trator de Esteiras D61.pdf

ANEXO 2 - ENSAIOS CPTUS DOS TESTES

QUADRO 0.2 – ENSAIOS CPTUS E SÍSMICOS UTILIZADOS NOS ESTUDOS.

CPTU 1B – Aterro 1	 CPTU-BVP-01B.pdf
S-CPTU-1B (sísmico) – Aterro 1	 SÍSMICO-CPTU-BVP-0 1 B.pdf
CPTU-07 – Aterro 2	 CPTU-BVP-07.pdf

ANEXO 3 - CATÁLOGO TÉCNICO DOS INSTRUMENTOS

QUADRO 0.3 – CATÁLOGO TÉCNICO DOS INSTRUMENTOS – PIEZÔMETROS E SISMÓGRAFOS.

CÁTALOGO TÉCNICO DOS PIEZÔMETROS E SISMÓGRAFOS	 Catalogo 2021 - Outubro - REV02.pdf
---	--