

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

IGOR BRENO SILVA FARIA

**MONITORAMENTO DE BARRAGEM DE REJEITOS DE MINERAÇÃO A PARTIR
DE VIBRAÇÕES OPERACIONAIS**

BELO HORIZONTE

2021

IGOR BRENO SILVA FARIA

**MONITORAMENTO DE BARRAGEM DE REJEITOS DE MINERAÇÃO A PARTIR
DE VIBRAÇÕES OPERACIONAIS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Cláudio José Martins

BELO HORIZONTE

2021

Faria, Igor Breno Silva
F224m Monitoramento de barragem de rejeitos de mineração a partir de
vibrações operacionais / Igor Breno Silva Faria. – 2021.
142 f. : il., gráfs, tabs., fotos.

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em
Engenharia de Civil.
Orientador: Cláudio José Martins.
Bibliografia: f. 93-99.
Dissertação (mestrado) – Centro Federal de Educação Tecnológica de
Minas Gerais, Departamento de Engenharia Civil.

1. Barragens de rejeitos – Monitoramento – Teses. 2. Mineração –
Resíduos – Teses. 3. Dinâmica estrutural – Teses. 4. Vibração – Teses.
5. Análise modal – Teses. I. Martins, Cláudio José. II. Centro Federal de
Educação Tecnológica de Minas Gerais. Departamento de Engenharia
Civil. III. Título.

CDD 624.151

IGOR BRENO SILVA FARIA

**MONITORAMENTO DE BARRAGEM DE REJEITOS DE MINERAÇÃO A PARTIR
DE VIBRAÇÕES OPERACIONAIS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do CEFET-MG como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Prof. Dr. Cláudio José Martins
Orientador
Departamento de Engenharia Civil, CEFET-MG

Prof. Dra. Hersília de Andrade e Santos
Departamento de Engenharia Civil, CEFET-MG

Prof. Dr. Manoel Porfírio Cordão Neto
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, UnB

Belo Horizonte, 24 de agosto de 2021

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente ao CEFET-MG, destacando principalmente o PPGEC, pelas oportunidades e apoio durante o mestrado.

Agradeço aos meus pais, Nanci e Rozimar, e à minha namorada Ângela pelo incentivo, apoio, dedicação e companheirismo.

Ao meu orientador, Professor Cláudio, que me deu suporte para a realização do presente estudo e pela gama de conhecimentos transmitidos.

À todos os meus amigos e aos colegas adquiridos durante o período de Pós-Graduação.

À todas as pessoas que contribuíram diretamente ou indiretamente ao longo de todo o percurso realizado na instituição.

EPÍGRAFE

“Pouco conhecimento faz com que as pessoas se sintam orgulhosas. Muito conhecimento, que se sintam humildes. É assim que as espigas sem grãos erguem desdenhosamente a cabeça para o céu, enquanto que as cheias as baixam para a terra, sua mãe.”

Leonardo da Vinci

RESUMO

Em virtude dos acidentes ocorridos com barragens de rejeitos de mineração no decorrer do tempo, o monitoramento e os estudos do comportamento dessas estruturas são essenciais, principalmente quando se fala sobre os riscos e os danos que elas estão submetidas. A mudança de comportamento das estruturas tem incentivado o desenvolvimento de técnicas de monitoramento da integridade estrutural por meio das vibrações impostas no sistema a partir de análises dinâmicas. Um tipo de análise dinâmica empregado para verificação da integridade estrutural é a Análise Modal. Nesse tipo de estudo, é possível determinar os parâmetros modais, os quais governam o comportamento da estrutura sob carregamentos dinâmicos e dentre eles, a frequência natural é um parâmetro que está relacionado com a rigidez e a massa da estrutura. Dessa forma, o presente estudo teve como objetivo identificar as frequências naturais de uma barragem de rejeitos, como forma de monitoramento da estrutura a partir da Análise Modal Operacional, e verificar a influência do nível de água da barragem e da obra de reforço da estrutura nos valores de frequências encontrados. Com isso, foram registradas as vibrações operacionais da barragem de rejeitos utilizando dois acelerômetros triaxiais, com intuito de estabelecer um monitoramento contínuo. Os dados foram processados baseando-se na técnica de Decomposição no Domínio da Frequência, para a obtenção dos espectros e foi possível estabelecer as frequências naturais mais dominantes para o monitoramento desse parâmetro. Verificou-se que após a finalização da obra de reforço, a maioria das frequências naturais dominantes tiveram um ligeiro aumento em seus valores e que o nível d'água na barragem aumentou. Além disso o nível d'água não mostrou nenhum tipo de relação direta com os valores de frequências naturais. Porém, como as variações nos valores das frequências naturais foram muito pequenas, essa obra de reforço não influenciou de forma significativa nos valores das frequências encontradas. O estudo mostra a importância do plano de monitoramento para verificar as mudanças no comportamento da estrutura durante a vida útil.

Palavras-chave: Barragens de rejeitos, Frequência natural, Análise Modal Operacional, Monitoramento.

ABSTRACT

Due the mining tailings dams accidents, the monitoring and studies of the structures behavior are essentials, mainly when we talk about the risk and damage they are subjected to. The change in the structures behavior has encouraged the development of techniques for monitoring the structural integrity through vibrations imposed on the system from dynamic analysis. One type of dynamic analysis for checking structural integrity is Modal Analysis. In this study type, it is possible to determine the modal parameters, which govern the structure behavior under dynamic loads and among them, the natural frequency is a parameter that is related to the stiffness and structure mass. So, the present study aimed to identify the tailings dam natural frequencies, as one way of structure monitoring from Operational Modal Analysis and verify the dam water level influence and the structure reinforcement work on the found frequency values. Thus, the tailings dam operational vibrations were recorded in order to establish continuous monitoring using two triaxial accelerometers. The data were processed based on the Frequency Domain Decomposition technique to obtain the spectra and it was possible to establish the most dominant natural frequencies for monitoring this parameter. It was found that after the completion of the reinforcement work, most of the dominant natural frequencies had a slight increase in their values and that the dam water level increased. Furthermore, the water level did not show any kind of direct relationship with the values of natural frequencies. However, as the variations in the natural frequencies values were tiny, this reinforcement work did not significantly influence the found frequencies values. The study shows the monitoring plan importance to verify changes in the structure's behavior during its useful life.

Key words: Tailings dams, Natural frequency, Modal Operational Analysis, Monitoring.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação genérica SDOF (a) e MDOF (b)	20
Figura 2 - Carregamentos periódicos e não periódicos	22
Figura 3 - Resposta de vibração de um sistema com amortecimento crítico	25
Figura 4 - Resposta de vibração de um sistema com amortecimento subcrítico	26
Figura 5 - Esquema de medição de vibrações	30
Figura 6 - Três formas de onda representadas pelas componentes do gráfico	33
Figura 7 - Método de montante	38
Figura 8 - Método de jusante	38
Figura 9 - Método por linha de centro	39
Figura 10 - Método de construção	39
Figura 11 - Inserção de barragens de rejeitos na PNSB	42
Figura 12 - Quantidade de barragens por UF	42
Figura 13 - Quantidade de barragens por UF inseridas e não inseridas na PNSB ...	43
Figura 14 - Aspectos de uma barragem que se insere na PNSB	44
Figura 15 - Quantidade de barragens por categoria de risco	45
Figura 16 - Quantidade de barragens por dano potencial associado	45
Figura 17 - Quantidade de barragens pelo porte do volume	46
Figura 18 - Barragem B2	53
Figura 19 - Vista lateral da Barragem B2	53
Figura 20 - Crista da Barragem B2	54
Figura 21 - Vista frontal da Barragem B2	54
Figura 22 - Praia de rejeitos da Barragem B2	55
Figura 23 - Vista superior da Barragem B2	55
Figura 24 - Vista elevada da Barragem B2	56
Figura 25 - Seção transversal da barragem B2	56
Figura 26 - Localização do INA 04B	57
Figura 27 - Localização em corte do INA 04B	58
Figura 28 - Acelerômetro SYSCOM MR3000C	59
Figura 29 - Planejamento e efetivação inicial do programa experimental	59
Figura 30 - Planejamento dos pontos do ensaio inicial	61
Figura 31 - Ponto F00	61
Figura 32 - Direção dos canais de medição: x, y e z	62

Figura 33 - Reforço da Barragem B2	63
Figura 34 - Rotinas dos scripts SysModal	64
Figura 35 - Primeiros valores singulares de todos os ensaios	68
Figura 36 - Alinhamentos dos valores singulares.....	71
Figura 37 - Espectros com picos de frequência	72
Figura 38 - Processamento nas direções x, y e z - Ensaio 1	73
Figura 39 - Processamento nas direções x, y e z - Ensaio 2	74
Figura 40 - Processamento nas direções x, y e z - Ensaio 3	74
Figura 41 - Processamento nas direções x, y e z - Ensaio 4.....	75
Figura 42 - Processamento nas direções x, y e z - Ensaio 5	75
Figura 43 - Processamento nas direções x, y e z - Ensaio 6	76
Figura 44 - Processamento nas direções x, y e z - Ensaio 7	76
Figura 45 - Processamento nas direções x, y e z - Ensaio 8	77
Figura 46 - Processamento nas direções x, y e z - Ensaio 9	77
Figura 47 - Análise da f_1 e nível d'água.....	79
Figura 48 - Análise da f_2 e nível d'água.....	79
Figura 49 - Análise da f_3 e nível d'água.....	80
Figura 50 - Análise da f_4 e nível d'água.....	80
Figura 51 - Análise da f_5 e nível d'água.....	81
Figura 52 - Análise da f_6 e nível d'água.....	81
Figura 53 - Análise da f_7 e nível d'água.....	82
Figura 54 - Análise da f_1 e precipitação.....	84
Figura 55 - Análise da f_2 e precipitação.....	85
Figura 56 - Análise da f_3 e precipitação.....	85
Figura 57 - Análise da f_4 e precipitação.....	86
Figura 58 - Análise da f_5 e precipitação.....	86
Figura 59 - Análise da f_6 e precipitação.....	87
Figura 60 - Análise da f_7 e precipitação.....	87
Figura 61 - Ensaio 1: Registro temporal F00 (F00-M01)	99
Figura 62 - Ensaio 1: Registro temporal M01 (F00-M01)	99
Figura 63 - Ensaio 1: Registro temporal F00 (F00-M02)	100
Figura 64 - Ensaio 1: Registro temporal M02 (F00-M02)	100
Figura 65 - Ensaio 1: Registro temporal F00 (F00-M03)	101
Figura 66 - Ensaio 1: Registro temporal M03 (F00-M03)	101

Figura 67 - Ensaio 1: Registro temporal F00 (F00-M04)	102
Figura 68 - Ensaio 1: Registro temporal M04 (F00-M04)	102
Figura 69 - Ensaio 1: Registro temporal F00 (F00-M05)	103
Figura 70 - Ensaio 1: Registro temporal M05 (F00-M05)	103
Figura 71 - Ensaio 1: Registro temporal F00 (F00-M06)	104
Figura 72 - Ensaio 1: Registro temporal M06 (F00-M06)	104
Figura 73 - Ensaio 1: Registro temporal F00 (F00-M07)	105
Figura 74 - Ensaio 1: Registro temporal M07 (F00-M07)	105
Figura 75 - Ensaio 1: Registro temporal F00 (F00-M08)	106
Figura 76 - Ensaio 1: Registro temporal M08 (F00-M08)	106
Figura 77 - Ensaio 1: Registro temporal F00 (F00-M09)	107
Figura 78 - Ensaio 1: Registro temporal M09 (F00-M09)	107
Figura 79 - Ensaio 1: Registro temporal F00 (F00-M10)	108
Figura 80 - Ensaio 1: Registro temporal M10 (F00-M10)	108
Figura 81 - Ensaio 1: Registro temporal F00 (F00-M11)	109
Figura 82 - Ensaio 1: Registro temporal M11 (F00 M11)	109
Figura 83 - Ensaio 1: Registro temporal F00 (F00-M12)	110
Figura 84 - Ensaio 1: Registro temporal M12 (F00-M12)	110
Figura 85 - Ensaio 2: Registro temporal F00 (F00-M04)	111
Figura 86 - Ensaio 2: Registro temporal M04 (F00-M04)	111
Figura 87 - Ensaio 3: Registro temporal F00 (F00-M04)	112
Figura 88 - Ensaio 3: Registro temporal M04 (F00-M04)	112
Figura 89 - Ensaio 4: Registro temporal F00.....	113
Figura 90 - Ensaio 5: Registro temporal F00.....	113
Figura 91 - Ensaio 6: Registro temporal F00 (F00-M04)	114
Figura 92 - Ensaio 6: Registro temporal M04 (F00-M04)	114
Figura 93 - Ensaio 7: Registro temporal F00 (F00-M04)	115
Figura 94 - Ensaio 7: Registro temporal M04 (F00-M04)	115
Figura 95 - Ensaio 8: Primeiro registro temporal F00.....	116
Figura 96 - Ensaio 8: Segundo registro temporal F00.....	116
Figura 97 - Ensaio 8: Terceiro registro temporal F00	117
Figura 98 - Ensaio 8: Quarto registro temporal F00	117
Figura 99 - Ensaio 8: Quinto registro temporal F00.....	118
Figura 100 - Ensaio 8: Sexto registro temporal F00	118

Figura 101 - Ensaio 9: Registro temporal F00 (F00-M04)	119
Figura 102 - Ensaio 9: Registro temporal M04 (F00-M04)	119
Figura 103 - Processamento Ensaio 1	121
Figura 104 - Processamento Ensaio 2	121
Figura 105 - Processamento Ensaio 3	122
Figura 106 - Processamento Ensaio 4	122
Figura 107 - Processamento Ensaio 5	123
Figura 108 - Processamento Ensaio 6	123
Figura 109 - Processamento Ensaio 7	124
Figura 110 - Processamento Ensaio 8	124
Figura 111 - Processamento Ensaio 9	125
Figura 112 - CPTu 0001	126
Figura 113 - CPTu 0001A.....	127
Figura 114 - CPTu 0001B.....	128
Figura 115 - CPTu 0002B.....	129
Figura 116 - CPTu 0003A.....	130
Figura 117 - CPTu 0004.....	131
Figura 118 - CPTu 0005.....	132
Figura 119 - CPTu 0006.....	133
Figura 120 - CPTu 0007.....	134
Figura 121 - CPTu 0007A.....	135
Figura 122 - CPTu 0007B.....	136
Figura 123 - CPTu 0008.....	137
Figura 124 - CPTu 0008A.....	138
Figura 125 - CPTu 0008B.....	139
Figura 126 - CPTu 0009.....	140
Figura 127 - CPTu 0010A.....	141

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Pontos e horários das medições	62
Tabela 2 - Resumo dos ensaios	63
Tabela 3 - Frequências naturais dos estudos de Chakraborty <i>et al.</i> (2019)	65
Tabela 4 - Picos candidatos a frequências naturais dos ensaios	68
Tabela 5 - Frequências naturais dominantes	69
Tabela 6 - Intervalo de confiança	69
Tabela 7 - Frequências coincidentes com os alinhamentos	72
Tabela 8 - Leituras do INA 04B	78
Tabela 9 - Precipitações totais nas datas dos ensaios	84
Tabela 10 - Resumo dos valores estatísticos	120

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Palavras chave utilizadas na pesquisa.....	47
Quadro 2 - Artigos do portfólio	47
Quadro 3 - Informações resumo Barragem B2.....	57

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANA – Agência Nacional de Águas

ANM – Agência Nacional de Mineração

CEFET-MG – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

CPT – Ensaio de Penetração de Cone (do inglês – “*Cone Penetration Test*”)

EMA – Análise Modal Experimental (do inglês – “*Experimental Modal Analysis*”)

EFDD – Decomposição Aprimorada no Domínio da Frequência (do inglês – “*Enhanced Frequency Domain Decomposition*”)

FDD – Decomposição no Domínio da Frequência – (do inglês – “*Frequency Domain Decomposition*”)

FFT – Transformada Rápida de Fourier – (do inglês “*Fast Fourier Transform*”)

INA – Indicar de Nível de Água

MDOF – Múltiplos Graus de Liberdade (do inglês “*Multi Degree of Freedom*”)

NA – Nível d’água

PNSB – Política Nacional de Segurança de Barragens

PSD – Densidade de Energia Espectral (do inglês “*Power Spectral Density*”)

OMA – Análise Modal Operacional (do inglês “*Operational Modal Analysis*”)

SDOF – Único Grau de Liberdade (do inglês “*Single Degree of Freedom*”)

SSI – Identificação Estocástica de Subespaço (do inglês “*Stochastic Subspace Identification*”)

SVD – Decomposição de Valor Singular (do inglês “*Singular Value Decomposition*”)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	16
1.1	PERGUNTA DE PESQUISA	18
1.2	OBJETIVOS	18
1.2.1	Objetivo geral.....	18
1.2.2	Objetivos específicos	19
1.3	RESTRIÇÕES E LIMITAÇÕES DA PESQUISA	19
1.4	ESTRUTURA DO TRABALHO	19
2	REVISÃO TEÓRICA.....	20
2.1	DINÂMICA E VIBRAÇÕES EM ESTRUTURAS	20
2.1.1	Parâmetros modais	22
2.1.1.1	Frequência natural (ω).....	23
2.1.1.2	Taxa de amortecimento (ξ).....	24
2.1.1.3	Modos de vibração.....	27
2.2	ANÁLISE MODAL.....	28
2.3	AQUISIÇÃO E PROCESSAMENTO DE SINAIS	30
2.3.1	Teorema de amostragem.....	31
2.3.2	Função de correlação	31
2.3.3	Série e Transformada Rápida de Fourier	32
2.3.4	Densidade espectral	34
2.3.5	Decomposição no domínio da frequência.....	34
2.3.6	Decomposição de valor singular	36
2.4	BARRAGENS DE MINERAÇÃO	36
2.4.1	Métodos de alteamento.....	37
2.4.2	Monitoramento de barragens	40
2.4.3	Panorama atual no Brasil.....	41
2.4.4	Classificação das barragens de rejeitos de mineração	44
2.5	ESTADO DA ARTE	46
3	METODOLOGIA.....	52
3.1	MÉTODO DE ABORDAGEM.....	52
3.2	MATERIAIS	52
3.3	PROGRAMA EXPERIMENTAL	59
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	67

4.1	FREQUÊNCIAS NATURAIS.....	67
4.2	AMPLITUDES DE VIBRAÇÃO NAS TRÊS DIREÇÕES ORTOGONAIS ...	73
4.3	FREQUÊNCIAS NATURAIS VERSUS NÍVEL D'ÁGUA E PRECIPITAÇÃO.....	78
4.4	INFLUÊNCIA DO REFORÇO DA BARRAGEM NAS FREQUÊNCIAS NATURAIS	88
5	CONCLUSÃO.....	90
5.1	SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS	91
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	92
	APÊNDICE A – Medições Registradas	99
	APÊNDICE B – Resumo dos valores estatísticos.....	120
	APÊNDICE C – Resultados dos processamentos	121
	ANEXO A – Laudos CPTu	126

1 INTRODUÇÃO

A situação das barragens brasileiras é um assunto que vem ganhando cada vez mais relevância, principalmente em Minas Gerais. No referido estado, duas grandes barragens de rejeitos da indústria da mineração, uma situada em Brumadinho e outra em Mariana romperam, resultando em muitos mortos e feridos, além do impacto econômico e ambiental nas regiões afetadas.

A indústria da mineração está presente em várias localidades do Brasil, devido a abundância e diversidade de minérios no território. Apesar de estar interligada com o desenvolvimento da sociedade, a atividade mineira possui desvantagens, pois ela proporciona um elevado risco ambiental e social, em virtude do desmatamento, devastação e contaminação do meio ambiente. E em casos de tragédias envolvendo obras geotécnicas de mineração, as consequências tanto ambientais, quanto sociais e econômicas, são enormes e ficam evidenciados os riscos e danos que envolvem esse tipo de estrutura (CHIOSSI, 2013).

Os acidentes ocorridos ao longo dos anos com barragens de rejeitos mostraram a importância de se ter um monitoramento desenvolvido a partir de um bom plano de instrumentação. A instrumentação das barragens permite verificar as condições de segurança do maciço e dos materiais em todas as etapas do empreendimento – construção, operação, encerramento ou desmobilização (MACHADO, 2007).

Uma meta fundamental em um projeto de barragens é a segurança de curto e longo prazo. Dessa forma, o monitoramento adequado desempenha um papel importante no projeto. O plano de monitoramento e instrumentação visa detectar possíveis anormalidades e antecipar uma possível deterioração que possa desencadear algum evento mais grave ou até mesmo a falha (NOVAK et al., 2007).

Dos sete modos de falha (instabilidade de talude, terremoto, galgamento, infiltração, fundação, estrutural, subsidência) abordados por Hui, Charlebois e Sun (2018), seis podem ser mitigados por meio do monitoramento. O único modo que não pode ser reduzido é o modo de falha por terremotos, geralmente devido à rápida ocorrência do tremor, possuindo esse modo uma tratativa melhor durante a fase de projeto. Por outro lado, os outros modos de falha podem ser previstos a partir das informações e compreensão do comportamento esperado do maciço (HUI; CHARLEBOIS; SUN, 2018).

Na indústria da mineração, as barragens de rejeitos são normalmente utilizadas para a disposição dos resíduos provenientes da extração dos minérios. De uma forma geral, essas obras geotécnicas devem ser monitoradas periodicamente a partir da determinação da linha de saturação, poropressão e movimentações do maciço por meio de equipamentos como piezômetros, marcos topográficos e medidores de nível de água, dentre outros (ALBUQUERQUE et al., 2019; CAPUTO; CAPUTO; RODRIGUES, 2015).

A mudança de comportamento ao longo do tempo das estruturas, tem incentivado o desenvolvimento de métodos para monitoramento da integridade estrutural a partir de vibrações uma vez que, independentemente do tipo ou material constituinte, qualquer tipo de sistema estrutural está sujeito a carregamentos dinâmicos durante a sua vida útil (CLOUGH; PENZIEN, 1995; CUNHA; CAETANO, 2006; HANIF *et al.*, 2018).

As vibrações originadas de carregamentos dinâmicos podem afetar a estrutura e, no caso de barragens de rejeitos, as vibrações produzem uma força de inércia nas partículas constituintes do material do rejeito, podendo alterar o estado sólido para o estado líquido com a presença de umidade, comprometendo o sistema estrutural (WU *et al.*, 2001).

Diante disso, faz-se necessário a realização de análises dinâmicas em estruturas sujeitas a esforços que gerem vibrações. A análise é frequentemente utilizada para controle de qualidade e monitoramento da integridade estrutural (REYNDERS, 2012).

Uma forma de realizar uma análise dinâmica sem interromper o funcionamento e sem introduzir fontes artificiais de vibração sobre a estrutura, que em muitos casos, podem ser fontes extremamente nocivas, é por meio da Análise Modal Operacional (*Operational Modal Analysis* - OMA). Essa técnica consiste em determinar experimentalmente os parâmetros modais da estrutura sob condições de serviço (MASJEDIAN; KESHMIRI, 2009; REYNDERS, 2012).

São três, os parâmetros modais investigados pela Análise Modal, conhecidos como: frequência natural, taxa de amortecimento e modos de vibração. Esses parâmetros dinâmicos governam o comportamento da estrutura submetida a ações estáticas e dinâmicas (HE; FU, 2001; SEVIM; BAYRAKTAR; ALTUNISIK, 2011).

A Análise Modal Operacional permite a investigação e o monitoramento de grandes estruturas por meio do comportamento dinâmico frente aos carregamentos operacionais. As principais vantagens desse método estão em sua forma não

destrutiva, a não necessidade de paralisar a operação do local e pelo fato de que os sinais de resposta são obtidos em condições operacionais de carregamento (HERLUFSEN *et al.*, 2005). Além disso, essa técnica pode ser realizada em conjunto com o monitoramento de amplitudes, otimizando o uso dos acelerômetros em campo. Esses ensaios possibilitam avaliar o estado de integridade da estrutura, com resultados confiáveis e, normalmente, melhores do que os ensaios baseados em métodos estáticos (NÓBREGA; HANAI, 2005).

Nesse contexto, a presente pesquisa teve como objetivo estimar e monitorar as frequências naturais de uma barragem de rejeitos por meio da Análise Modal Operacional. A determinação desse parâmetro para uma estrutura desse porte, pode se tornar difícil devido à heterogeneidade do material constituinte do maciço. Dessa forma, com a utilização de acelerômetros para as medições das amplitudes de aceleração a partir da realização de um monitoramento mensal, as leituras obtidas em campo foram processadas na técnica de Decomposição no Domínio da Frequência e obteve-se os espectros de frequência, onde foram possíveis determinar as frequências naturais da barragem.

Ao identificar as frequências naturais da barragem, os valores obtidos representarão a rigidez e a massa do maciço, já que a frequência natural está relacionada com essas duas grandezas do sistema. Ao estabelecer um monitoramento dinâmico contínuo, alterações no comportamento da estrutura no decorrer do tempo serão mais fáceis de serem detectadas (OLIVEIRA *et al.*, 2003).

1.1 PERGUNTA DE PESQUISA

É possível identificar as frequências naturais de uma barragem de rejeitos de mineração?

1.2 OBJETIVOS

Neste item serão apresentados o objetivo geral e os objetivos específicos da pesquisa.

1.2.1 Objetivo geral

Identificar as frequências naturais de uma barragem de rejeitos de mineração por meio da Análise Modal Operacional.

1.2.2 Objetivos específicos

- a) Obter um espectro de frequência a partir das medições realizadas e estimar as frequências naturais da barragem;
- b) Realizar a Análise Modal Operacional em períodos aproximadamente mensais para verificação dos valores das frequências naturais;
- c) Verificar a variação dos valores das frequências naturais no decorrer do tempo;
- d) Verificar a influência do nível d'água e da obra de reforço nos valores de frequências naturais.

1.3 RESTRIÇÕES E LIMITAÇÕES DA PESQUISA

- A quantidade de equipamentos para as medições em campo não permite a captação dos modos de vibração da barragem;
- Não foi possível realizar a caracterização do rejeito;
- Não constitui como objetivo do presente trabalho, desenvolver e implementar scripts e códigos para o processamento dos sinais;
- Tinha-se disponível informações de apenas um indicador de nível d'água.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho está estruturado sob cinco capítulos.

No capítulo 1 é apresentada uma contextualização do tema, pergunta de pesquisa, objetivos e limitações da pesquisa.

O capítulo 2 aborda a revisão teórica essencial ao entendimento do trabalho sobre dinâmica das estruturas, Análise Modal Operacional, processamento de sinais, barragens de mineração e por último, o desenvolvimento do estado da arte, analisando os trabalhos ligados diretamente ao tema.

O capítulo 3 apresenta a metodologia da pesquisa por meio de suas etapas e recursos necessários, além do método de abordagem da pesquisa.

O capítulo 4 exhibe os resultados obtidos na pesquisa e as discussões inferidas.

Por último, o capítulo 5 apresenta a conclusão do desenvolvimento da pesquisa e sugestões para trabalhos futuros.

2 REVISÃO TEÓRICA

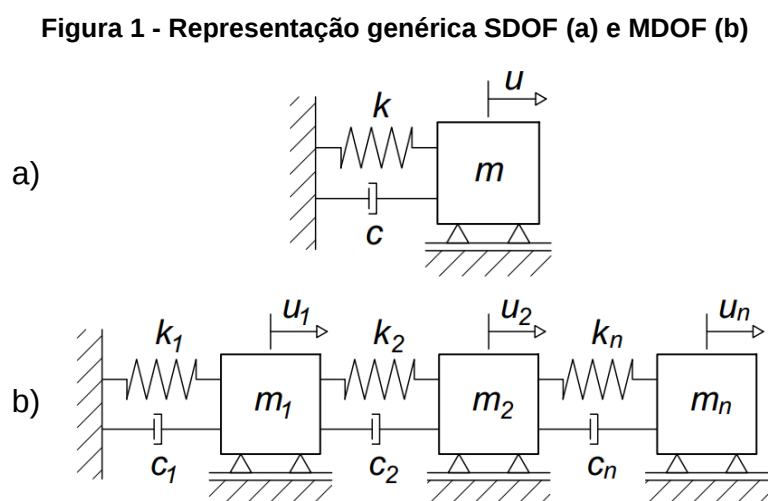
O presente capítulo aborda os principais conceitos referentes ao tema da pesquisa. São apresentados assuntos relacionados à dinâmica e vibrações em estruturas, Análise Modal Operacional, processamento de sinais, barragens de rejeitos e a implementação do estado da arte da pesquisa.

2.1 DINÂMICA E VIBRAÇÕES EM ESTRUTURAS

O termo dinâmica pode ser entendido como uma variação no tempo, logo, um carregamento dinâmico é aquele que varia a magnitude ou direção com o tempo. Na análise dinâmica, deve-se levar em consideração as forças produzidas pela inércia das massas em aceleração (MO, 1994).

Para a realização de uma análise estrutural, cria-se um modelo físico ou conceitual afim de representar a estrutura real. Posteriormente, implementa-se um modelo matemático com parâmetros da estrutura, aplicando-se as leis da mecânica. Por fim, resolve-se as equações por métodos analíticos ou numéricos (BRASIL; SILVA, 2015).

Os modelos analíticos são idealizações conceituais da estrutura real e podem apresentar um ou vários graus de liberdade, onde cada grau de liberdade terá uma direção de movimento. A Figura 1 mostra uma representação genérica de modelos analíticos. O esquema representa a modelagem de sistemas de único grau de liberdade (*System degree of freedom* - SDOF) e um modelo com múltiplos graus de liberdade (*Multi degree of freedom* – MDOF) respectivamente (PAZ; LEIGH, 2004).



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Na figura anterior os parâmetros m , k , c e u correspondem respectivamente à massa, rigidez, amortecimento e deslocamento do sistema.

Conforme apresentado por Clough e Penzien (1995), em um sistema SDOF, a expressão que rege o comportamento da estrutura se dá pela equação de movimento do sistema dinâmico básico (equação 1):

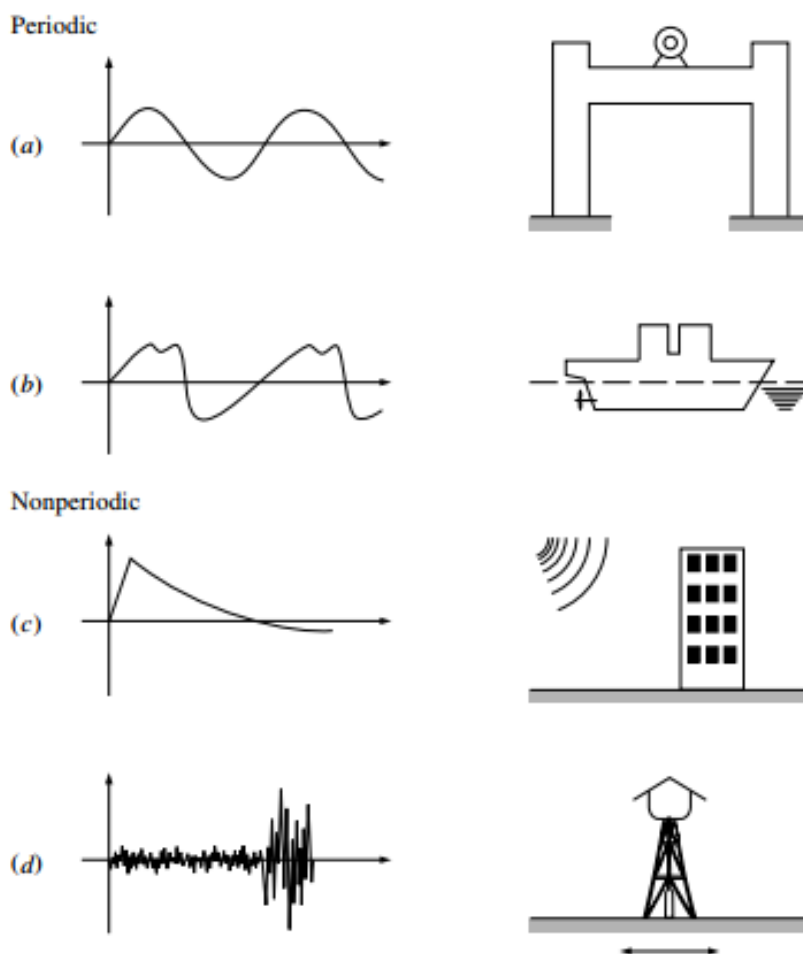
$$m\ddot{u}(t) + c\dot{u}(t) + ku(t) = p(t) \quad (1)$$

Onde m representa a massa, c o amortecimento, k a rigidez, $p(t)$ o carregamento, $\ddot{u}$ a aceleração, $\dot{u}$ a velocidade e u o deslocamento. Cada força resistente da equação (lado esquerdo) é uma função do deslocamento $u(t)$ ou de uma de suas derivadas temporais. A primeira parcela do lado esquerdo da equação representa a força inercial, a segunda representa o amortecimento e a terceira a rigidez do sistema (CLOUGH; PENZIEN, 1995).

Em relação às vibrações em estruturas, existem dois tipos: a vibração livre e a vibração forçada. A vibração livre é quando a estrutura vibra sem ser perturbada por forças externas. A estrutura, quando submetida a uma vibração livre, vibra em sua frequência natural, uma propriedade dinâmica da estrutura e que será abordada no item 2.1.1.1. A vibração forçada é aquela em que o sistema estrutural sofre uma força externa e a frequência de excitação é independente da frequência natural do sistema (MO, 1994).

Do ponto de vista analítico, é conveniente dividir os carregamentos em duas categorias básicas: periódicas e não periódicas. Alguns exemplos de carregamentos periódicos e não periódicos estão mostrados na Figura 2. Um carregamento periódico possui a mesma variação de tempo sucessivamente para um elevado número de ciclos. Exemplos desse tipo de carregamento são as vibrações de máquinas rotativas (a) e pressões hidrodinâmicas geradas por uma hélice de um navio (b). Já os carregamentos não periódicos não possuem a mesma variação de tempo em seus ciclos e podem ser exemplificados como explosões (c) e sismos (d), dentre outros (CLOUGH; PENZIEN, 1995).

Figura 2 - Carregamentos periódicos e não periódicos



Fonte: Clough e Penzien (1995).

Nas análises dinâmicas de estruturas, a modelagem de sistemas de único grau de liberdade pode se mostrar imprecisa na representação estrutural. Modelos com múltiplos graus de liberdade tendem a apresentar um comportamento mais aproximado do real, levando em conta o comportamento não linear da estrutura (EL-DAKHAKHNI *et al.*, 2009). E para a solução de sistemas MDOF complexos, são utilizadas técnicas numéricas para realizar a avaliação dinâmica da estrutura (EL-DAKHAKHNI *et al.*, 2009; EL-MAHDY *et al.*, 2017).

2.1.1 Parâmetros modais

O comportamento da estrutura diante de vibrações se dá pelos parâmetros modais, sendo eles: frequências naturais, modos de vibração e taxas de amortecimento (SEVIM; BAYRAKTAR; ALTUNISIK, 2011).

É importante obter esses parâmetros pois, quando submetido a algum tipo de vibração, o comportamento da estrutura é controlado por essas propriedades

dinâmicas. Além disso, o conhecimento desses parâmetros pode ser utilizado para prever ou monitorar o desempenho dinâmico do sistema (ALMEIDA, 1990).

2.1.1.1 Frequência natural (ω)

A frequência natural é um parâmetro global da estrutura que representa a taxa em que o sistema estrutural oscila livremente após a estrutura ser excitada por uma força externa (BOLINA *et al.*, 2014).

Conforme mostrado por Mo (1994), o somatório das forças na direção u pode ser dado pela equação de movimento de um sistema SDOF conforme o da Figura 1. Porém adotando um sistema não amortecido ($c\dot{u}(t) = 0$) submetido a uma vibração livre ($p(t) = 0$), obtêm-se a equação 2:

$$m\ddot{u}(t) + ku(t) = 0 \quad (2)$$

Para explicar a frequência natural e resolver a equação 2, assume-se que $u(t) = A\cos(\omega t)$, ou podendo ser também assumido como uma forma de seno. A constante A depende do início do movimento e ω representa uma característica física do sistema.

Substituindo $u(t) = A.\cos(\omega t)$ na equação 2, tem-se:

$$(-m\omega^2 + k)A\cos(\omega t) = 0 \quad (3)$$

Para que a equação 3 seja satisfeita a qualquer momento, a primeira expressão entre parênteses precisa ser igual a 0. Resolvendo essa igualdade, a raiz positiva será:

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (4)$$

A resposta é conhecida como frequência natural angular (ou circular) do sistema, dada em radianos/segundo. A frequência natural f é geralmente expressa em Hertz e portanto, tem-se:

$$f = \frac{1}{T} = \frac{\omega}{2\pi} \quad (5)$$

Na expressão acima, T corresponde ao período de vibração, expresso em unidade de tempo.

Apesar das estruturas possuírem diversas frequências naturais, geralmente a frequência natural de maior interesse é a primeira, ou seja, a de menor frequência e que na maioria dos casos, mobiliza a maior quantidade de massa da estrutura, a qual é denominada frequência fundamental (NÓBREGA; HANAI, 2005).

2.1.1.2 Taxa de amortecimento (ξ)

A taxa de amortecimento está relacionada à capacidade da estrutura de dissipar a energia do sistema. Dessa forma, após o final da excitação da estrutura por uma força externa, haverá uma tendência para o retorno ao repouso (NÓBREGA; HANAI, 2005).

Os mecanismos de dissipação de energia são difíceis de serem modelados, e normalmente são aproximados por amortecimentos viscosos. Para este tipo de comportamento, Paz e Leigh (2004), mostram que as forças na direção u considerando um sistema SDOF amortecido em vibração livre igual ao da Figura 1, são dadas pela seguinte equação:

$$m\ddot{u}(t) + c\dot{u}(t) + ku(t) = 0 \quad (6)$$

Nesse caso, m representa a massa, c o amortecimento, k a rigidez, $\ddot{u}$ a aceleração, $\dot{u}$ a velocidade e u o deslocamento.

A relação adotada para a frequência natural não satisfará a equação anterior. Dessa forma adota-se a seguinte relação $u(t) = Ce^{pt}$ que substituindo na equação 6 e cancelando os fatores comuns, a equação reduzida resultante é dada por:

$$mp^2 + cp + k = 0 \quad (7)$$

Onde p representa uma característica física do sistema em uma situação de vibração livre amortecida.

As raízes da equação (p_1, p_2) anterior são expressas por:

$$p_1, p_2 = -\frac{c}{2m} \pm \sqrt{\left(\frac{c}{2m}\right)^2 - \frac{k}{m}} \quad (8)$$

Podem ocorrer três situações com a expressão presente no radical: ser igual a zero (a), ser negativa (b) ou positiva (c). Esses três casos serão abordados nos tópicos a seguir, com base na bibliografia de Clough e Penzien (1995).

a) Amortecimento crítico

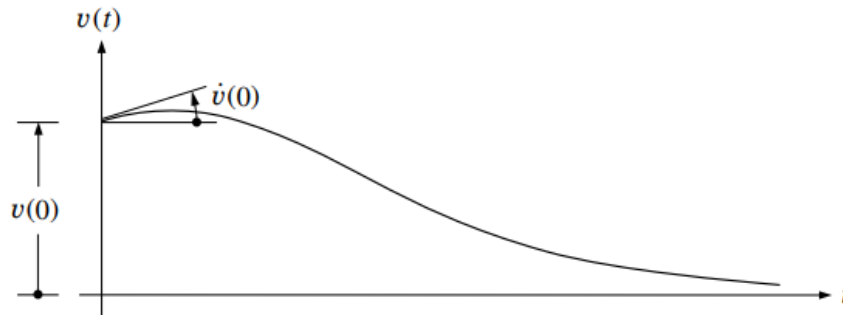
Em um sistema com amortecimento crítico ($c = c_{cr}$) a expressão do radical é igual a zero. Logo, fazendo a igualdade, chega-se à equação:

$$c_{cr} = 2m\omega \quad (9)$$

Onde c_{cr} é o amortecimento crítico, m a massa e ω a frequência natural.

É a menor quantidade de amortecimento para qual nenhuma oscilação ocorre na resposta de vibração livre do sistema. A Figura 3 ilustra a afirmação anterior.

Figura 3 - Resposta de vibração de um sistema com amortecimento crítico



Fonte: Clough e Penzien (1995).

b) Amortecimento subcrítico

No conjunto de amortecimento subcrítico, o valor do radical é negativo, portanto, o amortecimento é menor do que o valor crítico ($c < c_{cr}$). Nesse caso, com o intuito de avaliar a resposta de vibração livre, é conveniente representar o amortecimento em termos de uma taxa de amortecimento ξ , que é expressa pela razão entre o amortecimento fornecido com o valor crítico:

$$\xi = \frac{c}{c_{cr}} = \frac{c}{2m\omega} \quad (10)$$

Substituindo a equação 10 na equação 8, encontram-se as raízes da equação (p_1, p_2):

$$p_1, p_2 = -\xi\omega \pm i\omega_D \quad (11)$$

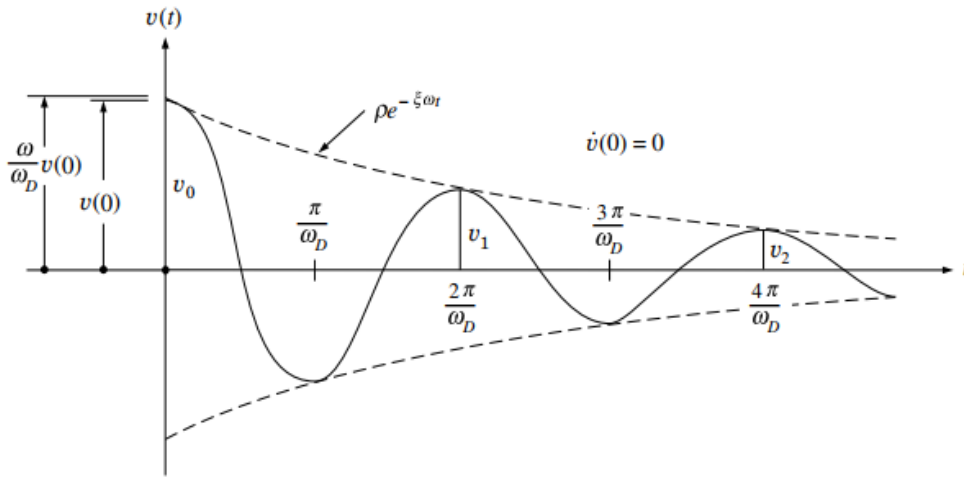
Onde:

$$\omega_D = \sqrt{1 - \xi^2} \quad (12)$$

ω_D é a frequência de vibração livre de um sistema amortecido.

A Figura 4 mostra a resposta de vibração de um amortecimento subcrítico. O sistema subcrítico oscila sobre a posição neutra com uma frequência constante ω_D . Além disso, a resposta diminui exponencialmente de acordo com o passar do tempo.

Figura 4 - Resposta de vibração de um sistema com amortecimento subcrítico



Fonte: Clough e Penzien (1995).

c) Amortecimento supercrítico

Esse tipo de sistema não é muito comum, porém o amortecimento excessivo pode estar presente em alguns sistemas mecânicos.

Nesse sistema, o valor do radical assume o valor positivo. Dessa forma $\xi > 1$ ($c > c_{cr}$), isso induz a duas raízes (p_1, p_2) reais e distintas da equação 8.

$$p_1, p_2 = -\xi\omega \pm \omega\sqrt{\xi^2 - 1} = -\xi\omega \pm \hat{\omega} \quad (13)$$

Onde:

$$\hat{\omega} = \omega\sqrt{\xi^2 - 1} \quad (14)$$

A resposta de vibração de um sistema com amortecimento supercrítico é semelhante ao movimento de um sistema com amortecimento crítico, conforme a

Figura 3. Por outro lado, o retorno assintótico à posição de deslocamento zero é mais lento, que dependerá da quantidade de amortecimento presente no sistema.

A resposta é dada também por uma função exponencial e logo o movimento do sistema não é oscilatório e a magnitude de oscilação decai exponencialmente com o tempo (PAZ; LEIGH, 2004).

2.1.1.3 Modos de vibração

O modo de vibração corresponde a configuração geométrica na qual uma estrutura vibra em uma determinada frequência natural e um fator de amortecimento (ALMEIDA, 1990).

Em um sistema de múltiplos graus de liberdade (esquema b da Figura 1), a massa, rigidez e amortecimento da estrutura não serão representadas por únicos valores como em um modelo de um grau de liberdade e sim por vários valores que representam todo o sistema. Esses valores estarão expressos em matrizes e os valores para deslocamento e força estarão expressos em vetores (BRASIL; SILVA, 2015).

Nesse caso o problema dinâmico será representado pela seguinte equação de equilíbrio:

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = p \quad (15)$$

Onde M, C, K são respectivamente as matrizes de massa, amortecimento e rigidez da estrutura. E u e p expressam os vetores de deslocamento (e suas derivadas no tempo) e carregamento respectivamente.

Novamente, considerando um sistema sob vibração livre não amortecida, baseando-se na obra de Brasil e Silva (2015), tem-se:

$$M\ddot{u} + Ku = 0 \quad (16)$$

As soluções da equação são formas $\hat{u}$ conhecidas como modos de vibração livre não amortecidos em que todas as coordenadas variam harmonicamente no tempo em uma mesma frequência de vibração livre não amortecida, todas com a mesma fase (θ), logo:

$$u = \hat{u} \cos(\omega t - \theta) \quad (17)$$

Substituindo a equação 17 na equação 16 e cancelando a função harmônica, tem-se:

$$[K - \omega^2 M]\hat{u} = 0 \quad (18)$$

O determinante da matriz nos colchetes necessita ser igual a zero, para que as soluções sejam não triviais:

$$\det[K - \omega^2 M] = 0 \quad (19)$$

Na resolução do problema matricial, os autovalores representam as frequências naturais e os autovetores representam as formas modais ou modos de vibração (ALMEIDA, 1990; BRASIL; SILVA, 2015). Além disso, a primeira frequência natural encontrada também é conhecida como fundamental e da mesma forma, o primeiro modo de vibração como modo fundamental (SORIANO, 2014).

A equação 17 mostra que a estrutura irá oscilar na configuração $\hat{u}$ e frequência ω . Para o caso geral, em que os mecanismos de amortecimento estão presentes, a oscilação do sistema na configuração $\hat{u}$ corresponde a um movimento harmônico com frequência ω_D e decaimento exponencial de amplitude $e^{-\xi\omega t}$.

2.2 ANÁLISE MODAL

A Análise Modal tem se tornado uma das maiores tecnologias para determinar, melhorar e otimizar parâmetros dinâmicos da engenharia de estruturas. O processo consiste em determinar de forma experimental as propriedades dinâmicas de um sistema e utilizar esses dados para formulação de um modelo matemático para representar o comportamento dinâmico (HE; FU, 2001).

Se uma estrutura estiver danificada, o comportamento dinâmico será alterado dependendo da localização e tamanho do dano. Essas alterações surgem nos valores dos parâmetros modais (TURKER; BAYRAKTAR; SEVIM, 2014).

Dessa forma a Análise Modal permite estabelecer um monitoramento com o intuito de detectar problemas na estrutura por meio de avaliações contínuas de seus parâmetros modais (FERREIRA, 2013).

Como apontado por Herlufsen *et al.* (2005), a Análise Modal é uma técnica conhecida a anos, aplicada na engenharia civil e para análises de máquinas rotativas, automotivas e aeroespaciais.

As principais aplicações da Análise Modal são (HE; FU, 2001):

- a) Correlação de um modelo implementado em elementos finitos e resultados experimentais - calibração do modelo;
- b) Detecção de danos estruturais - relação entre o dano e as alterações dos parâmetros modais de uma estrutura. Quando ocorrem as alterações desses parâmetros, é possível investigar os danos estruturais que provocam as alterações.

Existem dois tipos de Análise Modal: a Análise Modal Experimental (*Experimental Modal Analysis* - EMA) e a Análise Modal Operacional (*Operational Modal Analysis* - OMA). Em ambas as metodologias, a análise realizada visa obter os parâmetros modais a partir da vibração da estrutura. Porém na EMA as forças aplicadas são conhecidas e na OMA as forças aplicadas na estrutura são devido a situação real de serviço, ou seja, sob excitação ambiental, o que permite testar estruturas sob condições operacionais ou em outras situações em que as forças de entrada não são possíveis de serem mensuradas (EWINS, 2000; HERLUFSEN *et al.*, 2005; MASJEDIAN; KESHMIRI, 2009).

A Análise Modal Operacional é geralmente aplicada para grandes estruturas e consiste em uma técnica com dados apenas de saída, diferentemente da Análise Modal Experimental, a qual possui como desvantagem a dificuldade de impor vibrações para verificação dos modos mais importantes em uma baixa escala de frequência com a energia necessária e de forma controlada (CUNHA; CAETANO, 2006; FERREIRA, 2013; RODRIGUES, 2004). Além disso, trata-se de uma técnica mais simples e que não é necessário a paralisação das atividades na estrutura, já que as respostas obtidas se devem a excitação de operação (RODRIGUES, 2004).

As técnicas de identificação dos parâmetros modais por meio de medições de vibrações ambientais tornam-se atraentes, pois técnicas forçadas pesadas para excitação são caras e as vezes podem causar danos à estrutura, sobretudo em grandes estruturas, nas quais existem dificuldades para submeter a uma vibração (RODRIGUES, 2004; SEVIM; BAYRAKTAR; ALTUNISIK, 2011).

Como motivo adicional para o desenvolvimento da técnica, tem-se os avanços tecnológicos relacionados aos equipamentos de medição, que vem permitindo obter dados precisos de níveis baixos da resposta dinâmica das estruturas submetidas a vibrações ambientais. Dessa forma, a utilização de testes modais com resposta apenas de saída tornou-se uma alternativa de avaliação e monitoramento importante

na engenharia civil (CUNHA; CAETANO, 2006; FERREIRA, 2013; RODRIGUES, 2004).

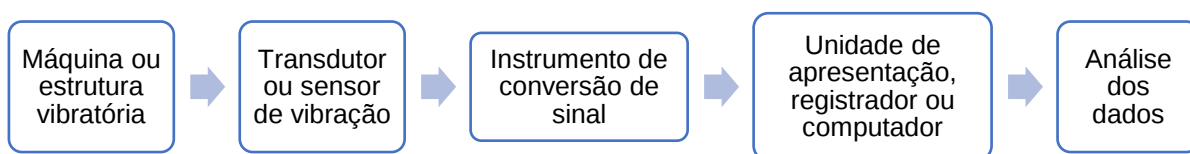
Para a medição de vibração são normalmente usados geofones ou acelerômetros, que captam as velocidades ou acelerações, respectivamente. O acelerômetro permite a captação de sinais de frequências muito baixas (até mesmo nulas), desta forma sua utilização é indicada na realização de Análise Modal de grandes estruturas (PEREIRA et al., 2021a; RAO, 2009).

Diante dos fatos anteriormente mencionados e do aprimoramento de técnicas para o processamento de sinais, a Análise Modal Operacional vem sendo aplicada a diversos tipos de estruturas, como edifícios, pontes, monumentos e barragens (RODRIGUES, 2004).

2.3 AQUISIÇÃO E PROCESSAMENTO DE SINAIS

Na Figura 5 é apresentado um esquema básico de medição de vibração:

Figura 5 - Esquema de medição de vibrações



Fonte: Adaptado de Rao (2009).

Seguindo a linha de processamento dos dados, antes mesmo de se realizar o processamento em si das medições, existem passos que antecedem o processamento e que servem para a filtragem do sinal, decimação e remoção de tendências dos dados para que as informações estejam adequadas para a realização do processamento. No próximo parágrafo serão abordadas duas metodologias comumente utilizadas para o processamento dos dados.

Herlufsen *et al.* (2005), apresenta em seu trabalho uma visão geral das duas técnicas básicas disponíveis para a análise dos dados a partir da realização de um teste modal. A primeira técnica é denominada como Decomposição no Domínio da Frequência (*Frequency Domain Decomposition* - FDD) e a segunda Identificação Estocástica de Subespaço (*Stochastic Subspace Identification* - SSI). Além disso, o autor afirma que o método FDD é mais simples e direto a ser utilizado quando os resultados gráficos revelam picos isolados de frequência.

2.3.1 Teorema de amostragem

O teorema de amostragem é um teorema utilizado para a análise de sinais digitais e que pode ser desenvolvido de várias formas. O teorema expõe que o sinal analógico $x(t)$ pode ser representado por suas amostras discretas se, e somente se, for expresso usando uma frequência de amostragem maior que o dobro da largura de banda (intervalo de frequências) do sinal analógico. Respeitando o teorema, o sinal analógico pode ser reconstruído a partir da equação (BRANDT, 2011):

$$x(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x(n) \text{sinc}[f_s(t - n\Delta t)] \quad (20)$$

Onde:

$$\text{sinc} = \frac{\sin(\pi x)}{\pi x} \quad (21)$$

A função *sinc* é uma função normalizada geralmente utilizada na teoria de processamento digital de sinais e informações.

O valor que corresponde à metade da frequência de amostragem ($f_s/2$) é conhecido como frequência de Nyquist. Caso o teorema seja respeitado, o sinal da amostra possuirá todos os dados do sinal analógico. Conforme a equação 20, qualquer sinal analógico $x(t)$ pode ser calculado usando as amostras do sinal discreto $x(n)$ (BRANDT, 2011).

2.3.2 Função de correlação

A função de correlação desempenha um papel importante nos dados de saída na identificação modal (RAINIERI; FABBROCINO, 2014). A primeira coisa a se fazer em uma OMA é estimar as funções de correlação, já que elas possuem todas as informações de interesse (BRINCKER; VENTURA, 2015).

A correlação é uma mensuração de similaridade entre os sinais. Ela pode ser realizada com o próprio sinal, chamada de autocorrelação e com sinais diferentes, conhecida como correlação cruzada (THOMSON, 1978).

A função de autocorrelação, $R_{xx}(\tau)$, é uma medida de semelhança de um determinado sinal com a sua versão em um desvio de tempo (desvio de tempo τ).

Para um dado sinal aleatório e constante $x(t)$, ela pode ser definida como (BRANDT, 2011):

$$R_{xx}(\tau) = E[x(t)x(t - \tau)] \quad (22)$$

Do mesmo modo, a correlação cruzada entre duas funções diferentes $x(t)$ e $y(t)$ aleatórias e constantes, sendo respectivamente funções de entrada e saída, é definida como:

$$R_{yx}(\tau) = E[y(t)x(t - \tau)] \quad (23)$$

A equação anterior representa a média do produto cruzado dos sinais. Caso os sinais sejam médios nulos o produto mostrará uma dependência entre o sinal $y(t)$ e o sinal com o desvio $x(t - \tau)$. Caso não haja correlação entre esses dois sinais o produto cruzado terá uma média zero, mas se houver uma dependência entre os sinais ambos serão positivos ou negativos simultaneamente, obtendo uma média diferente de zero, existindo assim uma relação linear entre os dois sinais (BRANDT, 2011).

2.3.3 Série e Transformada Rápida de Fourier

Na dinâmica estrutural, um carregamento periódico qualquer pode ser representado como uma série de senos e cossenos. Essa foi uma grande descoberta do francês Jean Baptiste Joseph Fourier, onde uma função arbitrária periódica pode ser reduzida por uma soma de componentes harmônicas (BRASIL; SILVA, 2015).

A teoria da série apresenta que todo sinal periódico $x_p(t)$ pode ser representado como (BRANDT, 2011):

$$x_p(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} a_k \cos\left(\frac{2\pi k}{T}t\right) + \sum_{k=1}^{\infty} b_k \sin\left(\frac{2\pi k}{T}t\right) \quad (24)$$

Onde T é o período do sinal e os coeficientes a_k e b_k podem ser calculados por:

$$a_k = \frac{2}{T} \int_{t_1}^{t_1+T} x_p(t) \cos\left(\frac{2\pi k}{T}t\right) dt \text{ para } k = 0, 1, 2, \dots \quad (25)$$

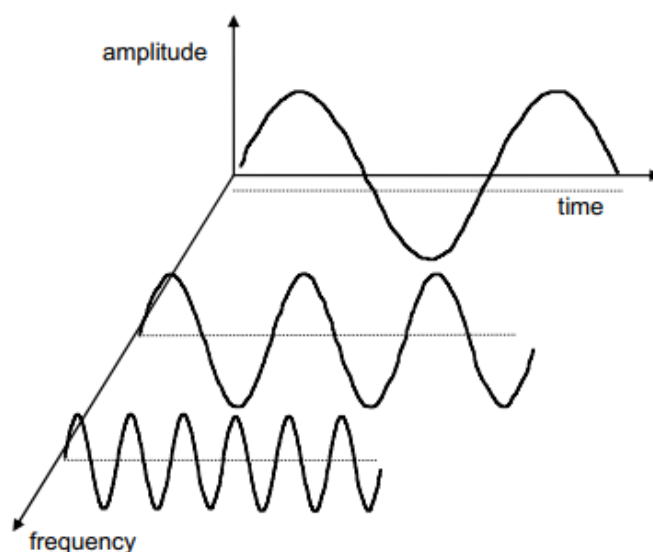
$$b_k = \frac{2}{T} \int_{t_1}^{t_1+T} x_p(t) \sin\left(\frac{2\pi k}{T} t\right) dt \text{ para } k = 1, 2, 3, \dots \quad (26)$$

Ocorrendo a integração durante um período arbitrário $x_p(t)$.

Baseando-se nesse princípio, uma das metodologias disponíveis para analisar o espectro é a chamada transformada rápida de Fourier (*Fast Fourier Transform* – FFT). O algoritmo elaborado por J. W. Cooley e J. W. Tukey em 1965, permitiu a aplicação rápida e predominante da técnica experimental em dinâmica das estruturas.

A FFT é a forma mais comum para processamento de sinal e nos equipamentos atuais, a transformada é geralmente mais utilizada para fornecer informações no domínio da frequência. Esse método obtém um sinal variável no tempo e transforma em componentes com amplitude, fase e frequência. As formas de onda podem ser representadas em um gráfico tridimensional, tendo como eixos o tempo, a frequência e a amplitude, conforme a Figura 6. A FFT corresponderá ao plano representado pela amplitude versus frequência (SHREVE, 1995).

Figura 6 - Três formas de onda representadas pelas componentes do gráfico



Fonte: Shreve (1995).

Além disso, pelo teorema apresentado por Claude Shannon e Harry Nyquist, a menor taxa de amostragem que pode ser utilizada necessita ser pelo menos o dobro da frequência máxima. Isso significa que é necessário amostrar uma onda senoidal pura pelo menos duas vezes a sua frequência fundamental para defini-la adequadamente (SHREVE, 1995).

Esse analisador FFT recebe os sinais e calcula os espectros de frequência discreta de sinais individuais, como também espectros cruzados entre os sinais de entrada e saída. Com o gráfico (representação da amplitude da resposta de vibração em função da frequência) resultante, pode-se determinar as frequências naturais, fatores de amortecimento e modos de vibração a partir dos picos de frequências observados no tempo (RAO, 2009).

2.3.4 Densidade espectral

Os sinais aleatórios possuem um espectro contínuo e nesse caso, deve-se representar esses sinais por meio de um espectro de densidade. Esse espectro é conhecido como Densidade Espectral de Potência (*Power Spectral Density* - PSD) (BRANDT, 2011).

Em teoria, a derivação do PSD geralmente envolve a função de correlação. A função de densidade espectral ($S_{xx}(f)$) para uma determinada série temporal é definida como a transformada de Fourier ($\mathcal{F}$) da função de correlação (BRANDT, 2011; BRINCKER; VENTURA, 2015):

$$S_{xx}(f) = \mathcal{F}[R_{xx}(\tau)] = \int_{-\infty}^{\infty} R_{xx}(\tau) e^{-j2\pi f\tau} d\tau \quad (27)$$

De maneira análoga, para um sinal de entrada $x(t)$, produzindo um sinal de saída $y(t)$ por meio de um sistema arbitrário, a densidade espectral cruzada ($S_{yx}(f)$) é a transformada de Fourier direta da correlação cruzada (BRANDT, 2011):

$$S_{yx}(f) = \mathcal{F}[R_{yx}(\tau)] = \int_{-\infty}^{\infty} R_{yx}(\tau) e^{-j2\pi f\tau} d\tau \quad (28)$$

2.3.5 Decomposição no domínio da frequência

A técnica de decomposição no domínio da frequência (*Frequency Domain Decomposition* - FDD), apresentada por Brincker, Zhang e Andersen (2001), se baseia na decomposição de valor singular da matriz de densidade espectral.

Diferentemente do domínio do tempo, no domínio da frequência cada modo possui uma pequena faixa de frequência onde esse modo torna-se dominante. Essa é a

principal vantagem do método, pois considerando diferentes faixas de frequência, tem-se diferentes modos dominantes (BRINCKER; VENTURA, 2015).

Conforme Brincker e Ventura (2015), para apresentar o conceito da técnica é necessário expressar a resposta $y(t)$ em modos normais e coordenadas modais:

$$y(t) = a_1 q_1(t) + a_2 q_2(t) + \dots = Aq(t) \quad (29)$$

Sendo A a matriz de forma modal $A = [a_1, a_2, \dots]$ e $q(t)$ um vetor de coordenadas modais. Dessa forma, empregando uma função de correlação na matriz $R_y(\tau)$, tem-se:

$$\begin{aligned} R_y(\tau) &= E[y(t)y^T(t + \tau)] \\ &= AE[q(t)q^T(t + \tau)]A^T \\ &= AR_q(\tau)A^T \end{aligned} \quad (30)$$

Resultando na matriz R_q , que é a matriz de correlação das coordenadas modais. Usando a transformada de Fourier, obtém-se a matriz de densidade espectral:

$$G_y(f) = AG_q(f)A^T \quad (31)$$

Considerando que os valores não pertencentes da diagonal da matriz de correlação $R_q(\tau)$ sejam zero, a matriz $G_q(f)$ é a função de densidade espectral da coordenada modal e possuirá a diagonal positiva. Sabendo que alguma forma complexa pode existir nas formas de modo, é necessário utilizar o Hermitiano ao invés da transposição:

$$G_y(f) = A[g_n^2(f)]A^H \quad (32)$$

Onde $g_n^2(f)$, são as densidades auto espectrais (elementos diagonais) de $G_y(f)$.

Realizando uma decomposição de valor singular da matriz de densidade espectral, tem-se:

$$\begin{aligned} G_y(f) &= USU^H \\ &= U[s_n^2]U^H \end{aligned} \quad (33)$$

Logo, os valores singulares s_n^2 da matriz S correspondem aos autovalores de $G_y(f)$ e estão relacionados com as frequências naturais e os vetores de U como os modos de vibração. Tomando como base a equação 33, a matriz U é conhecida como vetor singular à esquerda, U^H como vetor singular à direita e por último, os valores da diagonal da matriz S como valores singulares (BRANDT, 2011).

2.3.6 Decomposição de valor singular

A decomposição de valor singular (*Singular Value Decomposition* - SVD) tem várias aplicações no processamento de sinais e no desenvolvimento de diversos outros tipos de problemas. A SVD consiste numa sequência de três processos na transformação de uma matriz: rotação, escalonamento e translação (RAINIERI; FABBROCINO, 2014).

Uma vantagem do método é que ele permite a decomposição dos autovalores em qualquer tipo de matriz, diferentemente de outros métodos que funcionam somente para matrizes quadradas (BRANDT, 2011).

2.4 BARRAGENS DE MINERAÇÃO

As barragens podem ser definidas como obstáculos artificiais que têm como característica a retenção de líquidos (principalmente água), rejeitos e detritos. Elas podem variar desde pequenos maciços de terra, a grandes estruturas de concreto ou aterro. E dentre as várias funções desses maciços, estão: abastecimento de água, irrigação, controle de cheias, regularização de vazões, geração de energia elétrica, contenção de rejeitos, navegação interior, piscicultura, dessedentação e lazer (COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS, 2013).

As barragens de rejeitos visam evitar que os materiais que ficam retidos no maciço, danifiquem o leito dos cursos d'água, de forma física (assoreamento), como também de forma química, evitando que as partículas de materiais tóxicos entrem em contato com o ambiente (COSTA, 2012).

As barragens de rejeitos de mineração são estruturas geotécnicas únicas que necessitam de atenções especiais desde o desenvolvimento do projeto, passando pela construção e operação, até a sua inativação (MACHADO, 2007; SABBO; ASSIS; BERTERQUINI, 2017).

Esses maciços são primeiramente executados a partir de um dique de partida composto de material de empréstimo e em variadas vezes, feito por enrocamento. Logo após, são realizados os alteamentos sucessivos de acordo com a demanda de cada empreendedor (SANTANA; MOTA, 2019).

Na maioria das vezes o próprio rejeito é utilizado como material constituinte do corpo da barragem. Essa técnica permite a diluição dos custos da construção ao longo da vida útil do maciço, porém, a barragem pode apresentar uma condição crítica devido à baixa resistência do resíduo (ALBUQUERQUE FILHO, 2004; GERSCOVICH, 2016).

De uma forma geral existem quatro métodos para a disposição do rejeito no maciço da barragem (THOMÉ; PASSINI, 2018; VALERIUS, 2014):

- a) Lançamento da polpa por um único ponto – geralmente utilizado quando o lançamento da polpa é feito à montante da crista;
- b) Lançamento por vários plugues ou espigotes – ligação de tubos menores com a tubulação principal ao longo da barragem possibilitando uma disposição mais uniforme;
- c) Lançamento por barras aspersoras – tubulação com pequenos furos ao longo da praia, diminuindo o arreste de partículas e melhorando a segregação hidráulica;
- d) Lançamento com hidrociclones – equipamento mecânico centrífugo que separa as partículas (grossa e fina).

Devido à uma maior demanda de minérios pela indústria global, aumentou-se também a produção de rejeitos e com isso houve a necessidade de maciços maiores para a contenção desses rejeitos, tendo influência da vida útil do empreendimento e da viabilidade econômica (MACHADO, 2007).

2.4.1 Métodos de alteamento

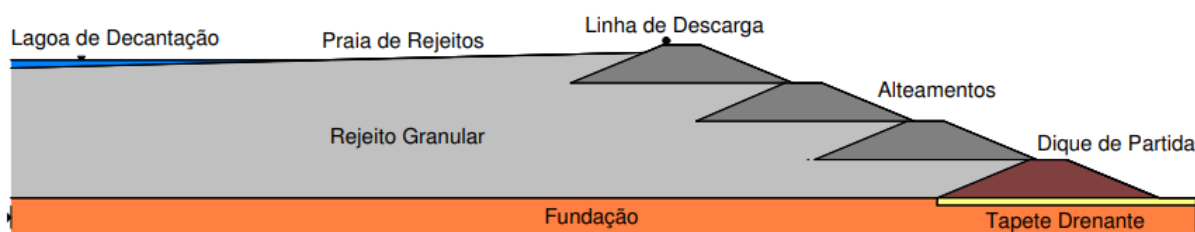
No Brasil a técnica mais comum para a disposição dos rejeitos da indústria mineral era com a implementação de barragens. Essas barragens eram executadas por apenas um barramento ou por sucessivos alteamentos. Além disso, os alteamentos podiam ser executados com o próprio rejeito resultante do processo (MACHADO, 2007; THOMÉ; PASSINI, 2018; VALERIUS, 2014)

O método para a realização do alteamento das barragens de rejeitos vai depender das características exclusivas de cada empreendimento. Existem três métodos de

alteamento, sendo eles: montante, jusante e linha de centro (THOMÉ; PASSINI, 2018).

O alteamento a montante (Figura 7) é composto pela construção de diques pela praia de rejeitos, deslocando assim, o eixo da barragem para montante. Essa técnica possui como vantagens menor custo, maior velocidade de construção e menor utilização de máquinas para a realização da terraplanagem. Por outro lado, o método apresenta-se com uma menor segurança, além de ser desaconselhado em diversos países (ALBUQUERQUE FILHO, 2004; MACHADO, 2007; THOMÉ; PASSINI, 2018).

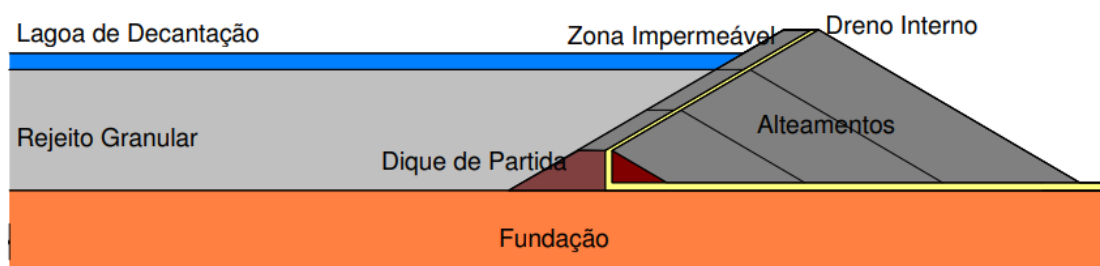
Figura 7 - Método de montante



Fonte: Albuquerque Filho (2004).

Já o método de jusante (Figura 8), como o próprio nome se refere, desloca o eixo da barragem a jusante da mesma. O método possui como principal vantagem a sua maior segurança e como desvantagens o maior custo, menor velocidade do alteamento, maior área de ocupação e maior volume de material a ser trabalhado (ALBUQUERQUE FILHO, 2004; MACHADO, 2007; THOMÉ; PASSINI, 2018; VALERIUS, 2014).

Figura 8 - Método de jusante

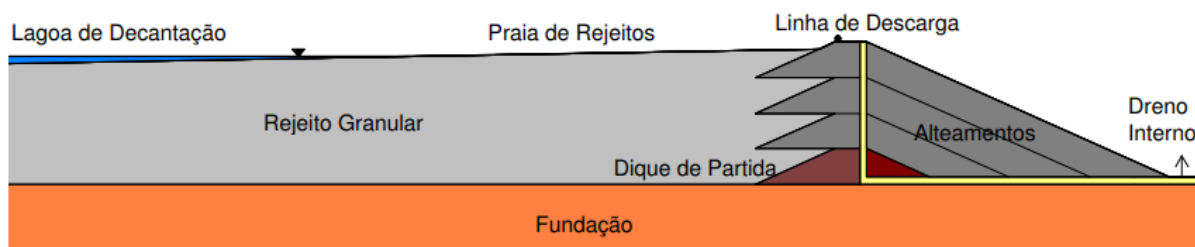


Fonte: Albuquerque Filho (2004).

O alteamento por linha de centro (Figura 9) caracteriza-se por uma metodologia intermediária, pela fixação da linha com o eixo da barragem. Os alteamentos são

construídos uma parte sobre a praia de rejeitos, outra parte pelo talude de jusante (MACHADO, 2007; THOMÉ; PASSINI, 2018; VALERIUS, 2014).

Figura 9 - Método por linha de centro

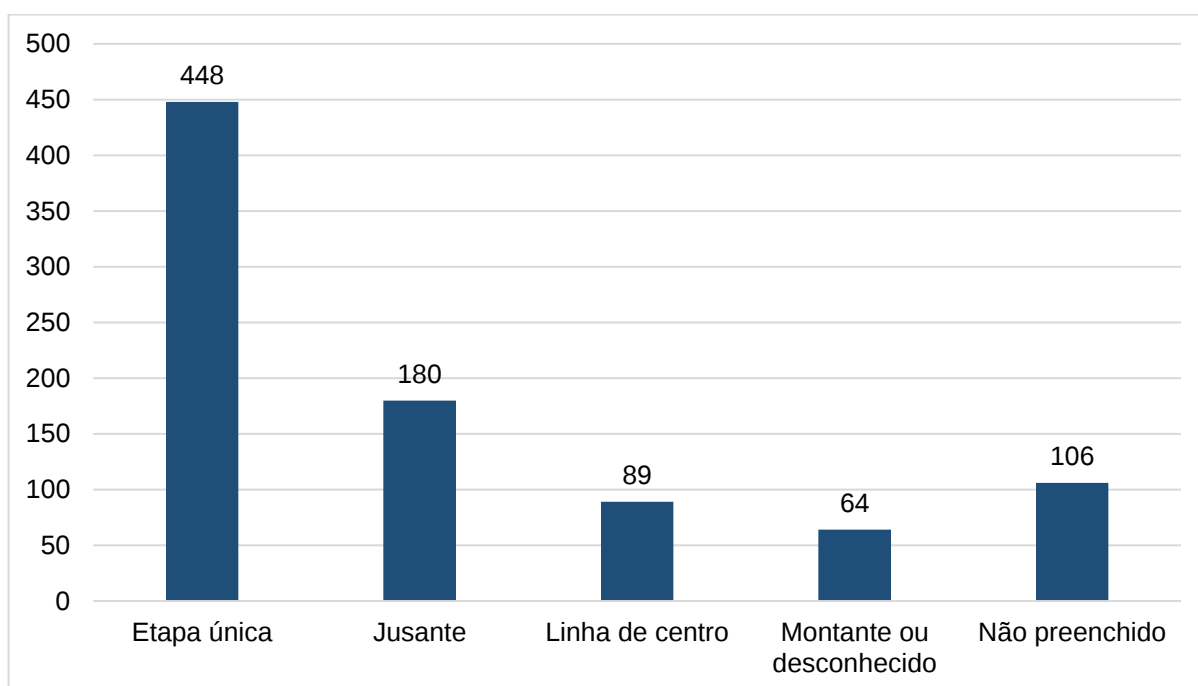


Fonte: Albuquerque Filho (2004).

Apesar do método de montante ser o mais utilizado nos alteamentos, houve a suspensão da implementação de novas barragens a partir desse método no estado de Minas Gerais. Os alteamentos são implementados sobre uma camada ainda não consolidada e dentre os principais motivos, cita-se os últimos acidentes ocorridos em que a maioria das barragens que entraram em colapso eram alteadas por meio desse método (MACHADO, 2007; THOMÉ; PASSINI, 2018).

Atualmente existem 64 barragens com método de construção à montante ou desconhecido de acordo com os dados da Agência Nacional de Mineração (ANM) na Figura 10.

Figura 10 - Método de construção



Fonte: Adaptado de Agência Nacional de Mineração (2021).

2.4.2 Monitoramento de barragens

O monitoramento de uma barragem de rejeitos é uma importante etapa do empreendimento. O procedimento parte do desenvolvimento de um projeto, implementação dos instrumentos e manutenção dos mesmos durante a vida útil da barragem.

A definição de qual instrumento vai muito além de uma simples escolha. É necessário definir o que irá medir, o quanto irá medir, por quanto tempo será essa medição e é claro, o valor do investimento. A escolha do instrumento a ser instalado na barragem também será direcionada pelo valor máximo a ser medido, valor máximo de interesse, precisão e sensibilidade. Ao mesmo tempo, deve-se optar por um instrumento que traga confiança nos resultados, caso contrário, a interpretação pode trazer uma falsa sensação de segurança (SILVEIRA, 2006).

Outro ponto importante a se observar são quais os limites aceitáveis para os parâmetros monitorados. E é importante também se ter uma ideia do provável comportamento do maciço para confrontar os dados medidos.

A instrumentação de uma barragem vai além das medições de parâmetros geotécnicos, como também serve para averiguar as hipóteses adotadas durante o projeto e viabilizar economicamente a obra dentro das condições de segurança (GRAÇA; FAGGION, 2016). Dados como volumes de chuvas, variação de temperaturas e alteamento de aterros devem ser colocados juntos aos relatórios da instrumentação para auxiliar na análise, pois esses fatores influenciam nos níveis d'água a jusante e montante (SILVEIRA, 2006).

Segundo Machado (2007), geralmente as principais grandezas monitoradas em barragens de rejeitos, são:

- Deslocamentos;
- Deformações e tensões;
- Níveis piezométricos;
- Pressões de água;
- Vazão.

Porém um outro fenômeno não citado e que tem mostrado relevância nos últimos tempos é a vibração. Alguns empreendedores estão tratando valores de amplitudes a partir da utilização de sismógrafos, acelerômetros e geofones.

Para a seleção da localização dos instrumentos, Silveira (2006) aponta a utilização do Método de Elementos Finitos como uma alternativa para definir os pontos mais críticos do empreendimento para então monitorá-los. Esses locais são caracterizados por maiores carregamentos e/ou maiores pressões de água.

Outros aspectos observados na seleção do local são áreas de seção transversais (primárias) que se considera o comportamento geral da barragem e áreas secundárias para servir de base como comparação dos resultados anteriores. Além disso, é extremamente importante instrumentar o local de maior altura do barramento devido à grande tensão e também nas ombreiras, pois por mais que possam ser simétricas, comportamentos diferentes podem ser apresentados em uma e outra (SILVEIRA, 2006).

Atualmente no mercado temos disponíveis diversos tipos de instrumentos que vem tendo uma boa aceitação na mineração. Dentre eles pode-se citar os radares, laser scanners, estações totais robóticas ou não, extensômetros, inclinômetros, placas de recalque, tassômetros, sensores elétricos, dentre outros, para verificação de deslocamentos e recalques. Conta-se também com os geofones e acelerômetros para a obtenção de dados relacionados a vibrações. E por último, os diversos tipos de piezômetros para medição de poropressão e os tradicionais Indicadores de Nível d'água (INA) e medidores de vazão e precipitação.

Também é recorrente a automatização dos dados obtidos nas leituras dos instrumentos e uma integração dessas informações nos sistemas dos respectivos empreendedores, por questões de praticidade, segurança e avanço das tecnologias.

2.4.3 Panorama atual no Brasil

O Brasil possui 887 barragens de mineração cadastradas, das quais 443 delas foram inseridas na Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB). Conforme a Figura 11, pouco menos da metade das barragens estão inseridas na PNSB (AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO, 2021).

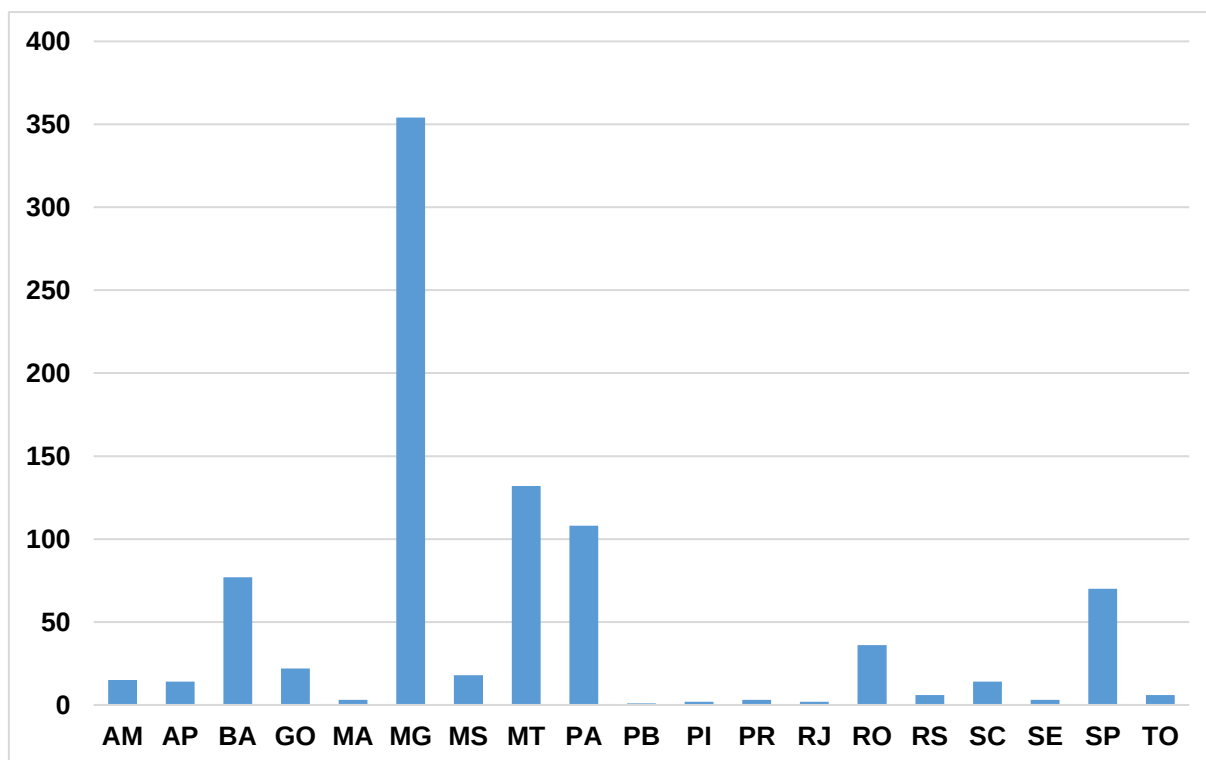
Figura 11 - Inserção de barragens de rejeitos na PNSB



Fonte: Adaptado de Agência Nacional de Mineração (2021).

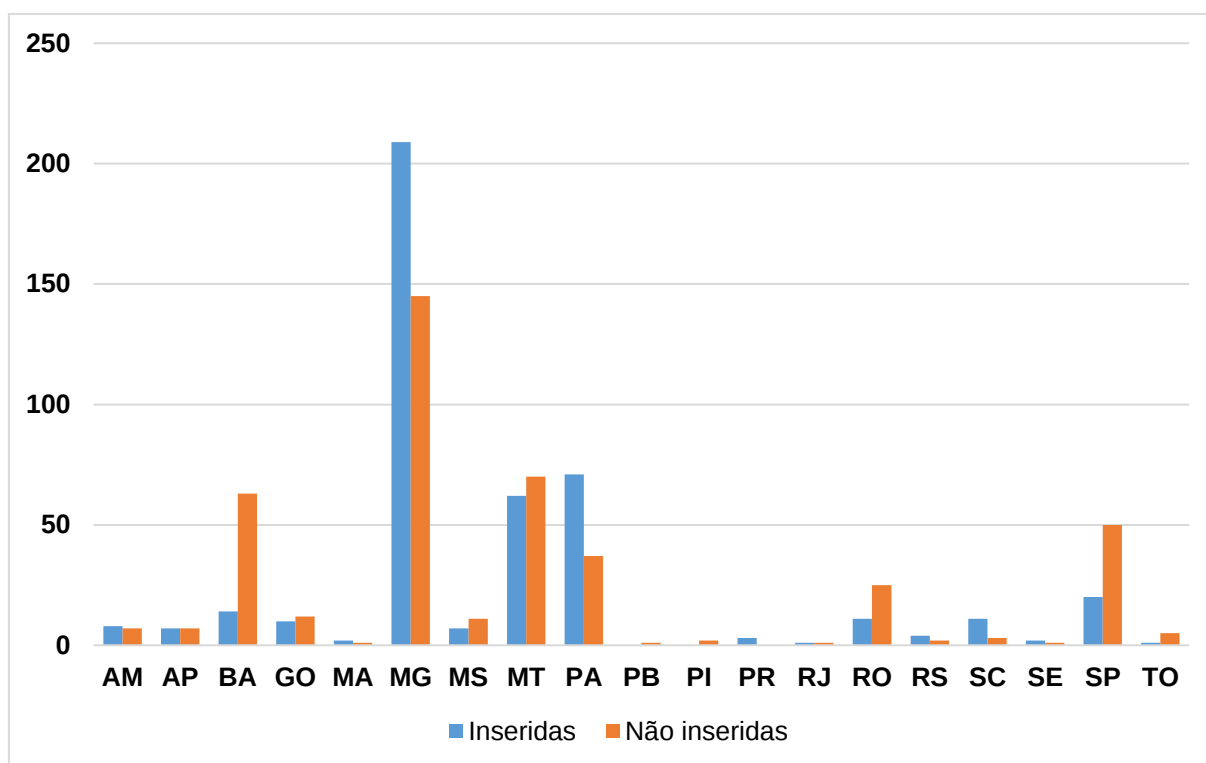
As Figuras 12 e 13 estabelecem respectivamente a quantidade total das barragens e a distribuição da quantidade das barragens inseridas e não inseridas na PNSB de acordo com cada União Federativa (UF) (AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO, 2021).

Figura 12 - Quantidade de barragens por UF



Fonte: Adaptado de Agência Nacional de Mineração (2021).

Figura 13 - Quantidade de barragens por UF inseridas e não inseridas na PNSB



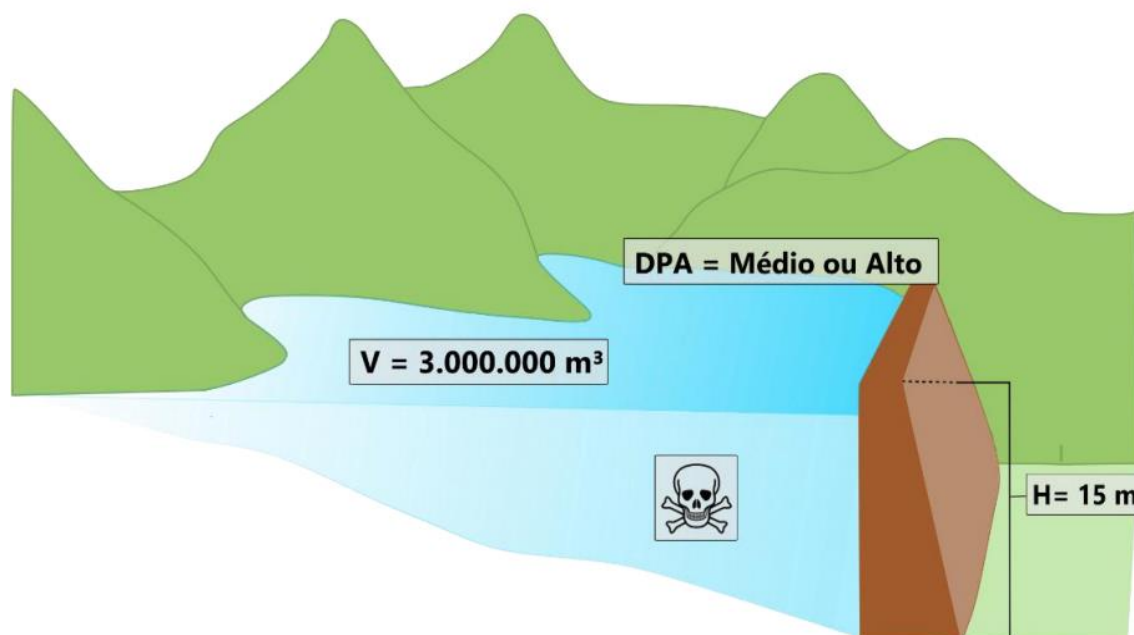
Fonte: Adaptado de Agência Nacional de Mineração (2021).

O estado de Minas Gerais possui cerca de 39,91% de todas as barragens presentes no território brasileiro e em comparação com o número de barragens inseridas na PNSB com os demais estados, Minas Gerais corresponde a 47,18% das barragens inseridas na política.

A Lei nº 12.334 de setembro de 2010, estabelece que uma barragem de mineração inserida na PNSB precisa apresentar ao menos um dos seguintes aspectos, conforme Figura 14:

- Altura do maciço maior ou igual a 15 m;
- Capacidade total do reservatório maior ou igual a 3.000.000 m³;
- Reservatório que possua resíduos perigosos de acordo com as técnicas aplicáveis;
- Categoria de dano potencial associado, médio ou alto, em relação a condições econômicas, sociais, ambientais ou perda de vidas humanas.

Figura 14 - Aspectos de uma barragem que se insere na PNSB



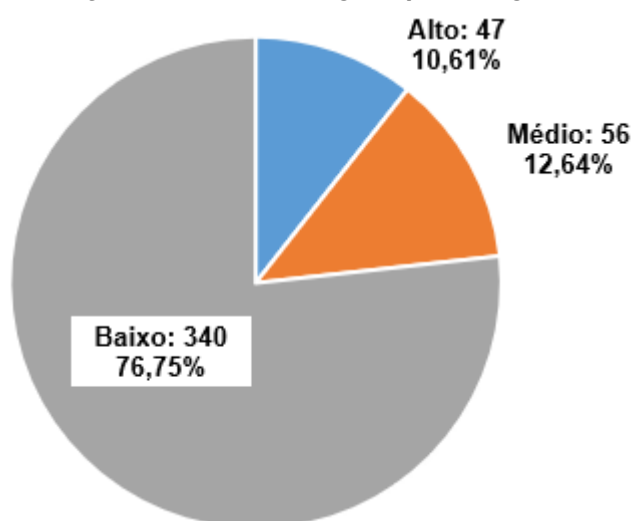
Fonte: Neves (2018).

2.4.4 Classificação das barragens de rejeitos de mineração

As barragens são classificadas pelos agentes fiscalizadores de acordo com a sua categoria de risco, dano potencial associado e volume. Esses critérios de avaliação são estabelecidos pelo Conselho Nacional de Recursos Hídricos. A categoria de risco depende dos aspectos técnicos da barragem, do estado de conservação e do atendimento ao Plano de Segurança de Barragem. Em relação ao dano potencial associado, a classificação irá depender do potencial de perdas de vidas humanas, dos impactos sociais, econômicos e ambientais caso a barragem entre em colapso (NEVES, 2018).

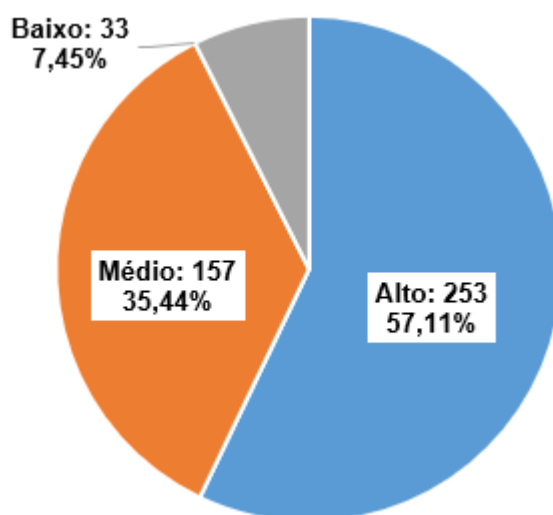
Detalhes das quantidades e classificações segundo cada um dos itens anteriormente mencionados estão listados nas Figuras 15 a 17.

Figura 15 - Quantidade de barragens por categoria de risco

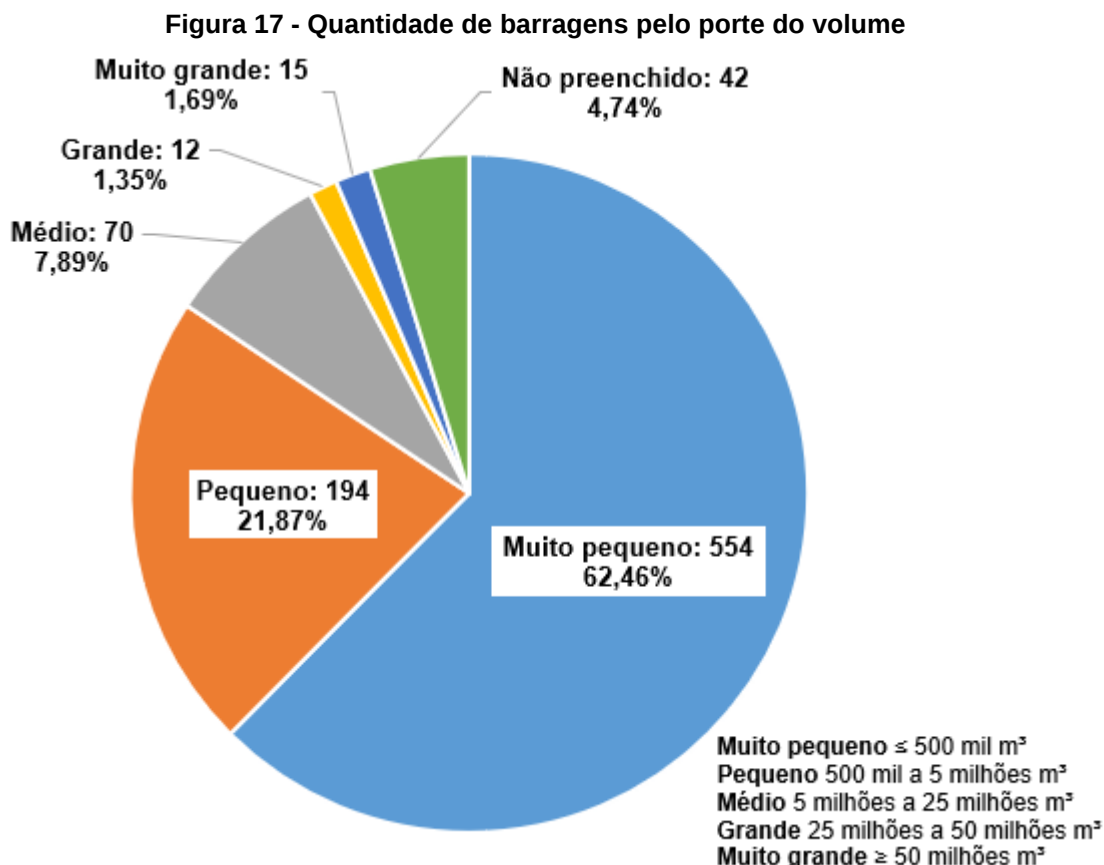


Fonte: Adaptado de Agência Nacional de Mineração (2021).

Figura 16 - Quantidade de barragens por dano potencial associado



Fonte: Adaptado de Agência Nacional de Mineração (2021).



Fonte: Adaptado de Agência Nacional de Mineração (2021).

2.5 ESTADO DA ARTE

Com o intuito de verificar as possíveis lacunas e analisar os estudos ligados diretamente à Análise Modal Operacional de barragens, foi desenvolvida uma revisão sistemática a partir da metodologia *Knowledge Development Process-Constructivist* (ProKnow-C). Esse método desenvolvido pelo Laboratório de Metodologias Multicritério em Apoio à Decisão (LabMCDA) estabelece diretrizes para a escolha, análise bibliométrica e sistêmica de um portfólio de artigos resultante (ENSSLIN et al., 2010).

Para a realização do levantamento bibliográfico dos artigos utilizados no trabalho, foram escolhidas as seguintes bases eletrônicas de dados: AIP Scitation, ASCE, Compendex (Engineering Village), ScienceDirect, Scopus, Springer Link, Web of Science e Wiley Online Library.

Nas buscas iniciais nas bases de dados, pode-se verificar um limitado número de artigos retornados. Dessa forma, optou-se por não restringir o intervalo de busca referente ao ano de publicação, afim de se obter trabalhos antigos que pudessem contribuir com o desenvolvimento da pesquisa.

As palavras chave utilizadas para a realização da pesquisa foram definidas com o foco na investigação da Análise Modal e parâmetros modais de barragens de rejeitos, de terra e barragens em geral. As palavras chaves estão listadas no Quadro 1.

Quadro 1 - Palavras chave utilizadas na pesquisa

Operational Modal Analysis	earth dam
	earthfill dam
	tailings dam
	dam
Modal Analysis	earth dam
	earthfill dam
	tailings dam
	dam
Natural frequency	earth dam
	earthfill dam
	tailings dam
	dam
Vibrations	earth dam
	earthfill dam
	tailings dam
	dam
Modal parameters	earth dam
	earthfill dam
	tailings dam
	dam

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Além disso, alguns artigos foram adicionados ao portfólio pelo já conhecimento do autor para a complementação do tópico. O autor optou por não aplicar o filtro relativo ao reconhecimento científico das obras para exclusão de artigos do portfólio, devido à quantidade de artigos resultantes. Após a análise sistêmica, o portfólio final resultou em 21 artigos. Os artigos selecionados estão mostrados no Quadro 2.

Quadro 2 - Artigos do portfólio

Título	Autores	Ano
Determination of the characteristic frequency of two dams located in the region of Calabria, Italy	Castro <i>et al.</i>	1998
Natural frequencies measured from ambient vibration response of the arch dam of Mauvoisin	Darbre, De Smet e Kraemer	2000
Experiment and mechanism of vibration liquefaction and compacting of saturated bulk solid	Wu <i>et al.</i>	2001
Liquefaction and displacement of saturated sand under vertical vibration loading	Xiaobing <i>et al.</i>	2004
Identification techniques for operational modal analysis - An overview and practical experiences	Herlufsen <i>et al.</i>	2005

System identification of a concrete arch dam and calibration of its finite element model	Alves e Hall	2006
Review Article: Numerical analysis of the seismic behaviour of earth dam	Parish, Sadek e Shahrour	2009
Analysis of ultimate bearing capacity of high concrete arch dam with cracks in service using natural vibration frequency	Zheng, Li e Huo	2010
Modal parameter identification of a prototype arch dam using enhanced frequency domain decomposition and stochastic subspace identification techniques	Sevim <i>et al.</i>	2010
Finite element model calibration of berke arch dam using operational modal testing	Sevim, Bayraktar e Altunisik	2011
Damage identification in a concrete dam by fitting measured modal parameters	Oliveira, Toader e Vieira	2012
Vibration based damage identification of concrete arch dams by finite element model updating	Turker, Bayraktar e Sevim	2014
Full-scale experimental modal analysis of an arch dam: The first experience in Iran	Tarinejad, Ahmadi e Harichandran	2014
Numerical analyses of earthquake induced liquefaction and deformation behaviour of an upstream tailings dam	Zardari <i>et al.</i>	2017
System identification and modal analysis of an arch dam based on earthquake response records	Yang <i>et al.</i>	2017
Ambient vibration tests at some buttress dams in Romania	Abdulamit <i>et al.</i>	2017
Modal identification of arch dams using balanced stochastic subspace identification	Tarinejad e Pourgholi	2018
Variation of pore water pressure in tailing sand under dynamic loading	Jin <i>et al.</i>	2018
Natural frequency of earthen dams at different induced strain levels	Chakraborty <i>et al.</i>	2019
Determining the natural frequencies and modes of vibration of the Chirkey Arch Dam by the Standing-Wave Method	Liseikin, Seleznev e Adilov	2019
Online modal identification of concrete dams using the Subspace Tracking-Based Method	Cheng <i>et al.</i>	2019
Monitoring of the natural frequencies of Chirkey arch dam	Liseikin, Seleznev e Adilov	2020
Vibration-based damage detection of a concrete arch dam	Pereira <i>et al.</i>	2021
Modal identification of concrete dams under natural excitation	Pereira <i>et al.</i>	2021

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Pela realização das pesquisas nas bases de dados, verificou-se a inexistência de estudos que aplicam a Análise Modal Operacional para barragens de rejeitos. Dessa forma, o levantamento mostra uma lacuna dessa temática e a oportunidade de desenvolvimento de estudos na área.

A maioria dos estudos obtidos no levantamento referem-se à aplicação de Análise Modal ou a determinação de parâmetros modais de barragens de concreto. As pesquisas de Alves e Hall (2006), Castro *et al.* (1998), Cheng *et al.* (2019), Darbre, De Smet e Kraemer (2000), Liseikin, Seleznev e Adilov (2019), Oliveira, Toader e Vieira (2012), Tarinejad, Ahmadi e Harichandran (2014), Yang *et al.* (2017), Liseikin,

Seleznev e Adilov (2020) e Pereira *et al.* (2021a, 2021b) foram aplicadas em barragens de concreto em arco e Abdulamit *et al.* (2017), em barragens de concreto de contrafortes. Já Sevim *et al.* (2010), Turker, Bayraktar e Sevim (2014), utilizaram protótipos em laboratório de barragens de concreto em arco em suas análises. Para barragens de terra, tem-se os trabalhos de Castro *et al.* (1998) e Chakraborty *et al.* (2019).

Em grande parte dos estudos que envolviam barragens de concreto de reservatórios, os autores verificaram que o nível de água é um importante fator influenciador dos parâmetros modais, pois a massa de água adicionada ao sistema, afeta as propriedades dinâmicas da barragem (ALVES; HALL, 2006; CHENG *et al.*, 2019; DARBRE; DE SMET; KRAEMER, 2000; LISEIKIN; SELEZNEV; ADILOV, 2019, 2020; SEVIM *et al.*, 2010; TARINEJAD; AHMADI; HARICHANDRAN, 2014; YANG *et al.*, 2017). Quando não há variação de massa na estrutura, a frequência natural representa nitidamente a rigidez do sistema. Ademais, danos na estrutura diminuem a rigidez o que levará a uma alteração do valor da frequência natural (ALVES; HALL, 2006; ZHENG; LI; HUO, 2010).

Pode-se averiguar também que a maior parte dos estudos utilizam modelagens via elementos finitos para estimativa de parâmetros modais, análises dinâmicas ou calibração de modelos (CHAKRABORTY *et al.*, 2019; OLIVEIRA; TOADER; VIEIRA, 2012; PARISH; SADEK; SHAHROUR, 2009; PEREIRA *et al.*, 2021b; SEVIM *et al.*, 2010; SEVIM; BAYRAKTAR; ALTUNISIK, 2011; TARINEJAD; AHMADI; HARICHANDRAN, 2014; TURKER; BAYRAKTAR; SEVIM, 2014; ZARDARI *et al.*, 2017; ZHENG; LI; HUO, 2010). A Análise Modal garante também uma maior confiabilidade para modelos desenvolvidos via elementos finitos. Os parâmetros modais obtidos em campo tornam-se valores referenciais para a calibração de modelos (SEVIM; BAYRAKTAR; ALTUNISIK, 2011).

Em relação ao método de excitação da estrutura, nos trabalhos de Abdulamit *et al.* (2017), Darbre, De Smet e Kraemer (2000), Liseikin, Seleznev e Adilov (2019), Sevim *et al.* (2010), Sevim, Bayraktar e Altunisik (2011), Turker, Bayraktar e Sevim (2014), Liseikin, Seleznev e Adilov (2020) e Pereira *et al.* (2021a, 2021b) as vibrações das barragens foram induzidas a partir de vibrações ambientais e nos estudos de Alves e Hall (2006) e Tarinejad, Ahmadi e Harichandran (2014), as vibrações são geradas a partir de métodos de vibração forçada. Para as leituras dessas vibrações

nas barragens, foi recorrente a utilização de sensores de velocidade e aceleração, sendo esse último o mais utilizado.

O teste modal em condições operacionais (ou ambientais) excita diversos modos de vibração, o que pode ser difícil de obter com o uso de excitação artificial (HERLUFSEN *et al.*, 2005).

Em todos os artigos que objetivavam estimar parâmetros modais da barragem, foi possível obter as frequências naturais das estruturas e em alguns estudos, os modos de vibração. Já a estimativa dos valores das taxas de amortecimento, mostrou-se problemática (TARINEJAD; AHMADI; HARICHANDRAN, 2014). Nos trabalhos de Sevim *et al.* (2010) e Sevim, Bayraktar e Altunisik (2011), houve uma variação nos valores das taxas de amortecimento encontrados, até mesmo por meio da estimativa de duas técnicas distintas, não sendo possível ter uma confiabilidade nos resultados. Além disso, Alves e Hall (2006) afirmam que a falta de simetria no formato da barragem, dificulta a estimativa da taxa e Cheng *et al.* (2019), recomendam que o método (*Recursive Stochastic Subspace Identification* – RSSI), proposto por eles, seja aprimorado para estimar as taxas de amortecimento. Apenas no estudo de Yang *et al.* (2017), os autores apontam terem encontrado uma taxa de amortecimento confiável, pelo modelo *autoregressive exogenous* (ARX).

De uma forma geral, de acordo com Herlufsen *et al.* (2005), as metodologias de análise dos dados das vibrações são baseadas em técnicas de Decomposição do Domínio da Frequência (FDD) e Identificação Estocástica de Subespaço (SSI), assim como foi constatado no decorrer das análises dos artigos.

Outra observação importante é a de que boa parte dos estudos utilizaram carregamentos dinâmicos provenientes de terremotos (ALVES; HALL, 2006; CASTRO *et al.*, 1998; CHAKRABORTY *et al.*, 2019; CHENG *et al.*, 2019; YANG *et al.*, 2017; ZARDARI *et al.*, 2017). Isso mostra a importância de considerações sísmicas para grandes estruturas.

Com foco na relação entre vibração e liquefação, estudos como os de Jin *et al.* (2018), Wu *et al.* (2001), Xiaobing *et al.* (2004) e Zardari *et al.* (2017), analisaram a influência da vibração como gatilho para a ocorrência do fenômeno de liquefação.

A vibração produz forças nas partículas saturadas, o que pode alterar o estado sólido para o estado líquido. Além disso, existem muitos fatores que podem influenciar no fenômeno da liquefação, dentre eles: comportamento das partículas (forma e formação), densidade do material, características da estrutura, tensão inicial,

comportamento diante da vibração (tipo de onda, amplitude, frequência, duração e direção das forças ativas) e também as condições de drenagem (WU *et al.*, 2001).

Em modelos implementados em escalas reduzidas submetidos a vibrações, pode-se verificar uma relação direta entre a frequência, amplitude de vibração e a densidade do rejeito. Estando a frequência e a amplitude positivamente correlacionadas com a pressão de água nos poros, enquanto que a densidade está negativamente correlacionada. A equação desenvolvida no estudo representa a relação entre liquefação do rejeito e a frequência, amplitude e densidade do rejeito em uma dada profundidade e tempo, podendo ser utilizada para avaliar mais precisamente a estabilidade de uma barragem de rejeitos sob carga dinâmica (JIN *et al.*, 2018).

Zardari *et al.* (2017) investigaram, via modelagem em elementos finitos (utilizando o software PLAXIS), a estabilidade de uma barragem de rejeitos na Suécia, a partir de dois terremotos de diferentes magnitudes para avaliar o potencial de liquefação, deformações permanentes e estabilidade da barragem. Os pesquisadores obtiveram os valores de frequência natural e puderam verificar que as poropressões são maiores para um evento sísmico de maior magnitude. Houve também um aumento de poropressão em todo o corpo da barragem e que os maiores valores de poropressão estão situados nas partes inferiores da barragem, abaixo dos diques de aterro.

A principal contribuição do estado da arte foi reforçar a afirmativa em relação à lacuna existente do trabalho a ser desenvolvido. Outra contribuição foi em relação às análises dinâmicas de barragens, geralmente realizadas para localidades sujeitas a sismos, que teve como principal parâmetro dinâmico estimado durante a análise das estruturas, a frequência natural, parâmetro esse relacionado com a massa e a rigidez do sistema. E no caso de barragens de concreto, o nível de água a montante influencia diretamente nos valores das frequências naturais.

A abordagem também mostrou a dificuldade de estimar a taxa de amortecimento da estrutura, devido às variações e confiabilidade dos resultados. Além disso, uma modelagem calibrada via elementos finitos pode ser uma boa alternativa para análises dinâmicas de barragens no geral. Por último, pode-se verificar a influência das vibrações em falhas de barragem de rejeitos devido ao fenômeno de liquefação.

3 METODOLOGIA

A seguir serão apresentados o método de abordagem, os recursos necessários e as principais etapas para o desenvolvimento do estudo.

3.1 MÉTODO DE ABORDAGEM

Segundo Gil (2009), a presente pesquisa pode ser classificada como explicativa, pois visa identificar fatores que definem ou que colaborem para o acontecimento de um determinado fenômeno. Ainda, a pesquisa é realizada a partir de um método experimental, já que se determina um objeto de estudo, seleciona variáveis, as quais podem ser capazes de influenciá-lo e definem as formas de controle e de observação das consequências que a variável produz.

Quanto à maneira de abordagem do problema, a pesquisa pode ser classificada como quantitativa, pois serão obtidos resultados numéricos que representam uma característica dinâmica da estrutura (SILVA; MENEZES, 2005).

Do ponto de vista da finalidade, a pesquisa pode ser considerada como pesquisa aplicada, visto que ela auxilia para finalidade prática, objetivando a solução de um problema que se encontra na realidade, desenvolvendo uma ação existente (BARROS; LEHFELD, 2000).

3.2 MATERIAIS

Primeiramente torna-se necessário a caracterização da barragem utilizada na análise como objeto de estudo. A barragem de rejeitos é denominada Barragem B2 e encontra-se desativada. Ela está situada em Brumadinho/MG e o produto principal da empresa é o minério de ferro.

As Figuras de 18 a 24 mostram a Barragem B2 analisada na presente pesquisa.

Figura 18 - Barragem B2



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Figura 19 - Vista lateral da Barragem B2



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Figura 20 - Crista da Barragem B2



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Figura 21 - Vista frontal da Barragem B2



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Figura 22 - Praia de rejeitos da Barragem B2



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Figura 23 - Vista superior da Barragem B2



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

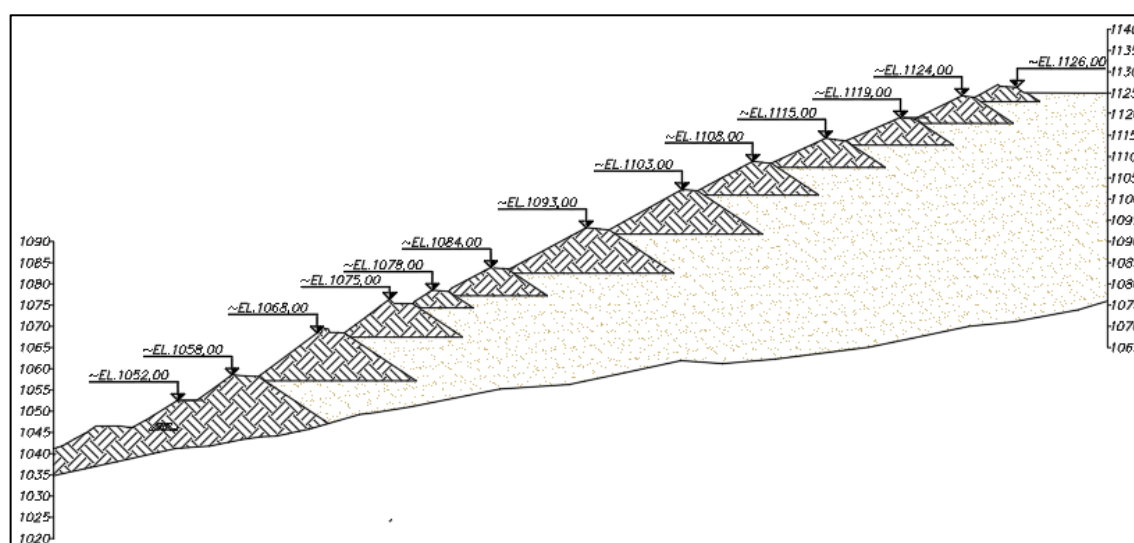
Figura 24 - Vista elevada da Barragem B2



Fonte: Google Earth (2021).

De acordo com os arquivos disponibilizados pela mineradora e conforme a Figura 25, a barragem possui aproximadamente 85 metros de altura e o método de construção foi a montante com dique de partida feito por enrocamento.

Figura 25 - Seção transversal da barragem B2



Fonte: Arquivo disponibilizado pela mineradora.

A seguir, o Quadro 3 apresenta algumas informações retiradas dos projetos disponibilizados pela mineradora.

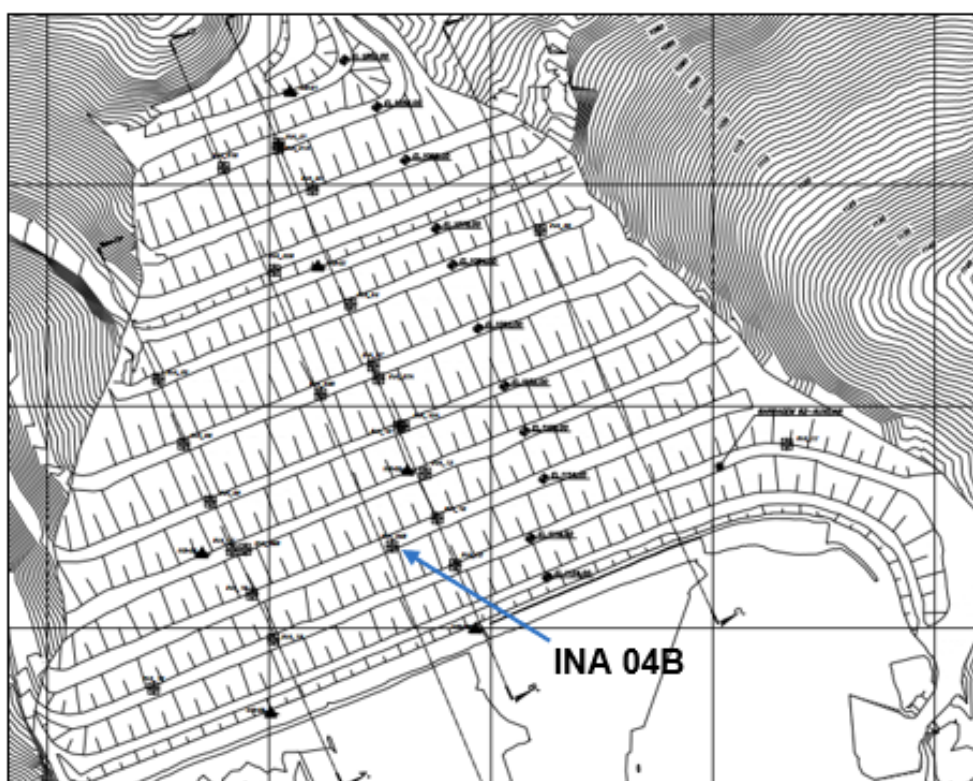
Quadro 3 - Informações resumo Barragem B2

Nome da estrutura	Barragem B2
Comprimento da crista	352,79 m
Altura da barragem máxima	84,94 m
Área atual do reservatório	25.963,02 m ²
Número de instrumentos	INA: 26

Fonte: Adaptado de arquivo disponibilizado pela mineradora.

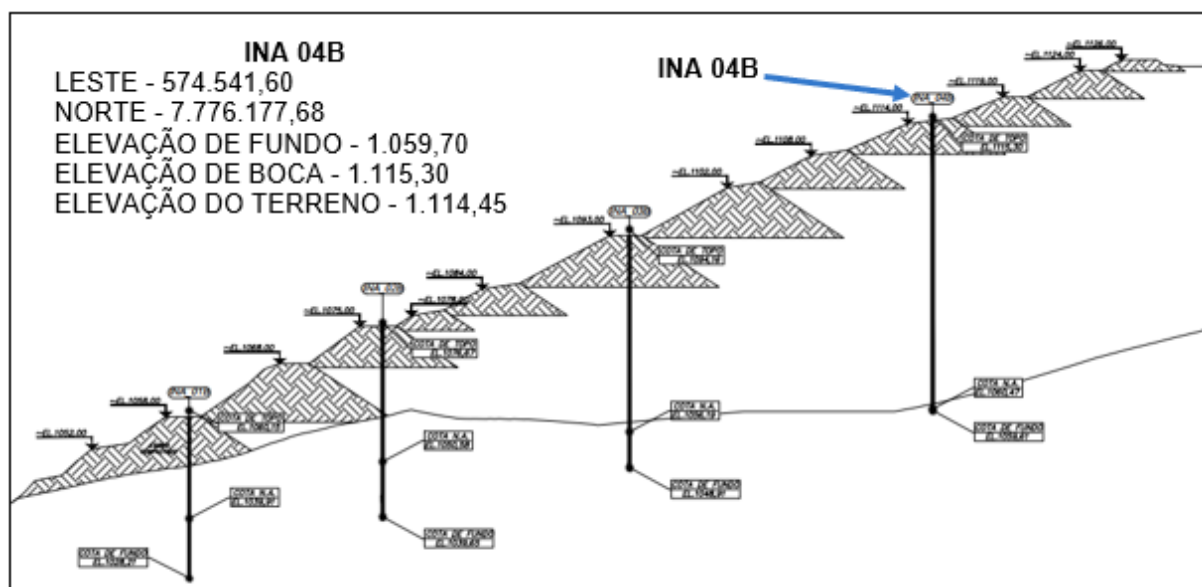
Foram disponibilizadas também, leituras de um indicador de nível de água (INA), denominado como INA 04B, localizado conforme indicações e informações nas Figuras 26 e 27.

Figura 26 - Localização do INA 04B



Fonte: Arquivo disponibilizado pela mineradora.

Figura 27 - Localização em corte do INA 04B



Fonte: Arquivo disponibilizado pela mineradora.

Além disso, foram disponibilizados laudos de 16 ensaios de *Cone Penetration Test* (CPTu) que estão apresentados parcialmente no Anexo A. O ensaio consiste basicamente na cravação de uma ponteira cônica no solo com velocidade aproximada de 20 mm/s e um registro praticamente contínuo de valores de resistência de ponta, atrito lateral e poropressão do solo. Com os resultados do ensaio, podem ser determinadas várias propriedades do solo além dos dados medidos diretamente no ensaio (SCHNAID; ODEBRECHT, 2012).

Os ensaios CPTu são datados de 24/11/2020 a 07/01/2021 e as profundidades variaram entre 4,00 a 39,81 metros. Além disso, conforme o Anexo A, alguns resultados apresentaram grande variabilidade de material, possuindo classificações como material orgânico, argila, silte e areia. Porém a maioria dos ensaios mostraram a predominância da presença de um solo composto por areia e silte.

Já na aquisição das medições dos ensaios, foram utilizados dois acelerômetros triaxiais da fabricante SYSCOM e sistema de aquisição modelo MR3000C. A Figura 28 apresenta um dos equipamentos utilizados na pesquisa.

Figura 28 - Acelerômetro SYSCOM MR3000C

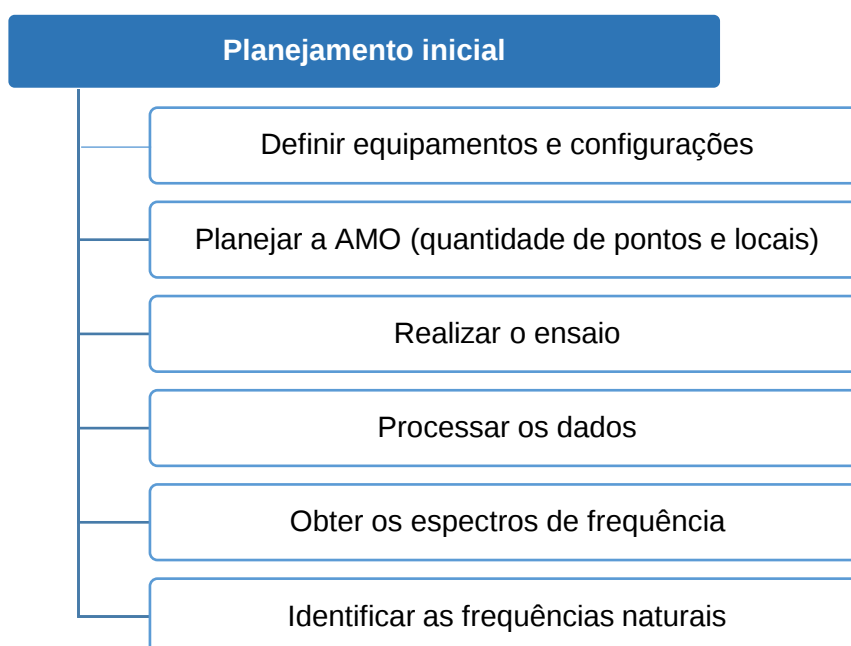


Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

3.3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

O presente tópico aborda o planejamento inicial, conforme Figura 29, para a realização da Análise Modal Operacional na barragem de rejeitos.

Figura 29 – Planejamento e efetivação inicial do programa experimental



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

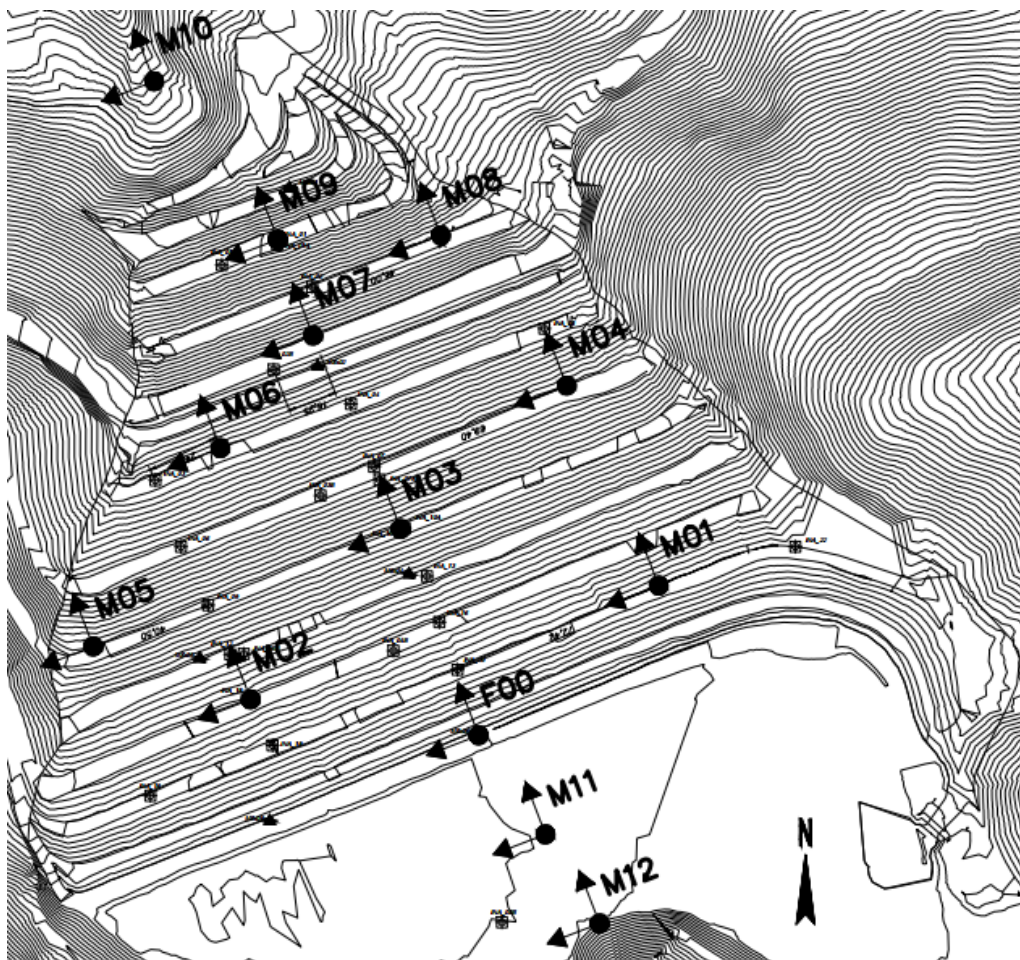
Como se trata de um ensaio por excitação ambiente, é importante ter registros de respostas em um longo tempo, pois não existe o controle sobre as forças de excitação. As vibrações são dadas de formas ambientais e também vibrações devidas ao vento, máquinas e equipamentos em operação e detonações no entorno da mina. Logo, espera-se que durante o intervalo de tempo proposto e no intervalo de frequência de interesse, todos os modos da estrutura sejam excitados de forma satisfatória (RODRIGUES, 2004).

Para a análise do comportamento dinâmico da barragem frente as vibrações ambientes, foi realizado um ensaio inicial mais abrangente, definindo 13 pontos distribuídos ao longo das bermas da barragem para a realização das medições, tendo cada medição duração de 30 minutos.

O primeiro ponto definido e também o principal em todas as medições é o ponto F00. Esse ponto está localizado na crista da barragem, e como exposto na NBR 15307:2006 — Ensaio não destrutivo - Provas de cargas dinâmicas em grandes estruturas - Procedimento, as medições em barragens são preferencialmente realizadas na crista do barramento. Os demais pontos foram distribuídos ao longo da superfície da barragem para captar as vibrações em diferentes regiões do maciço, tomando como referência algum instrumento ou marco superficial.

O ponto F00, corresponde ao local de medição onde o aparelho permaneceu fixo durante todo o tempo, variando a posição do outro aparelho nos demais locais (pontos M01 a M12) nesse primeiro ensaio. As medições dos pontos M01 a M12 foram feitas simultaneamente com o ponto F00, de modo a se ter pares de medições (12 medições simultâneas) ao longo do tempo e ao longo das bermas da barragem. A Figura 30 apresenta os locais selecionados para as medições e a Figura 31 mostra o equipamento no ponto F00 durante o ensaio.

Figura 30 - Planejamento dos pontos do ensaio inicial



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Figura 31 - Ponto F00



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

A Tabela 1 apresenta os horários das medições realizadas em cada ponto no ensaio inicial.

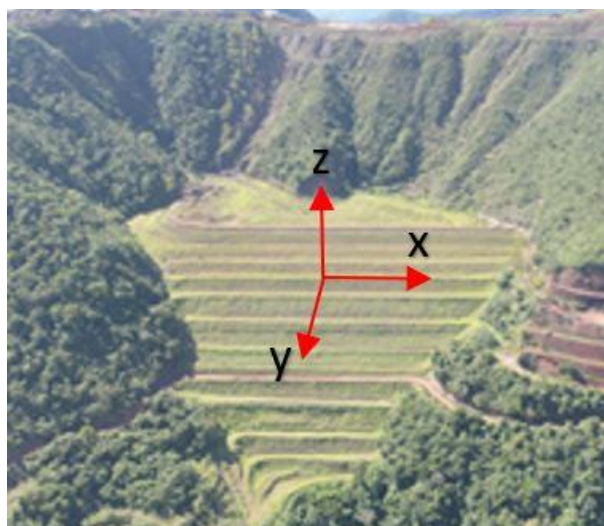
Tabela 1 - Pontos e horários das medições

Pontos	Início	Fim
F00 – M01	9:15	9:45
F00 – M02	10:00	10:30
F00 – M03	10:40	11:10
F00 – M04	11:20	11:50
F00 – M05	12:00	12:30
F00 – M06	12:40	13:10
F00 – M07	13:20	13:50
F00 – M08	14:40	15:10
F00 – M09	15:20	15:50
F00 – M10	16:00	16:30
F00 – M11	16:55	17:25
F00 – M12	17:35	18:05

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

A partir da vibração ambiente (ou operacional), medida em forma de aceleração, os equipamentos obtêm dados de acelerações nas três direções ortogonais ao longo do tempo (conforme o Apêndice A). Os acelerômetros foram posicionados de forma que o sentido do eixo x ficasse na direção paralela às bermas da barragem, o sentido positivo do eixo y perpendicular às bermas (saindo da barragem em direção ao dreno de pé) e consequentemente o eixo z é em direção à vertical, de acordo com a Figura 32. Além disso, a taxa de aquisição foi definida para 400 Hz, com o intuito de respeitar o teorema de Nyquist, conforme abordado na fundamentação teórica. Dessa forma, a frequência máxima que poderia ser medida corresponde a 200 Hz.

Figura 32 - Direção dos canais de medição: x, y e z



Fonte: Adaptado de arquivo disponibilizado pela mineradora.

Conforme a Tabela 9 (presente no Apêndice B), pode-se verificar que os pontos F00 e M04 foram os pontos que apresentaram maiores valores médios de amplitude de vibração. Logo, esses foram os dois pontos escolhidos para as leituras mensais. É válido ressaltar que se pode ter outros pontos da estrutura que gerem maiores vibrações, mas dependerá da fonte de excitação.

A Tabela 2 resume as informações de todos os ensaios realizados na Barragem B2:

Tabela 2 - Resumo dos ensaios

Ensaio	Data	Quantidade de pontos	Quantidade de medições	Denominação dos pontos	Taxa de aquisição (Hz)	Tempo de ensaio (s)
1	29/08/2019	13	24	F00, M01 a M12	400	1800
2	27/09/2019	2	2	F00 e M04	400	1800
3	31/10/2019	2	2	F00 e M04	400	1800
4	09/12/2019	1	1	F00	400	1800
5	03/01/2020	1	1	F00	400	1800
6	27/01/2020	2	2	F00 e M04	400	1800
7	28/02/2020	2	2	F00 e M04	400	1800
8	10/08/2020	1	6	F00	200	255
9	24/10/2020	2	2	F00 e M04	400	1800

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Nota-se um intervalo de tempo entre o final do mês de fevereiro e o mês de agosto. Isso se deve ao reforço da barragem que ocorreu entre os dias 07/04/2020 a 02/06/2020 e que foi realizado por meio da disposição de enrocamento na parte inferior da barragem, conforme a Figura 33.

Figura 33 - Reforço da Barragem B2



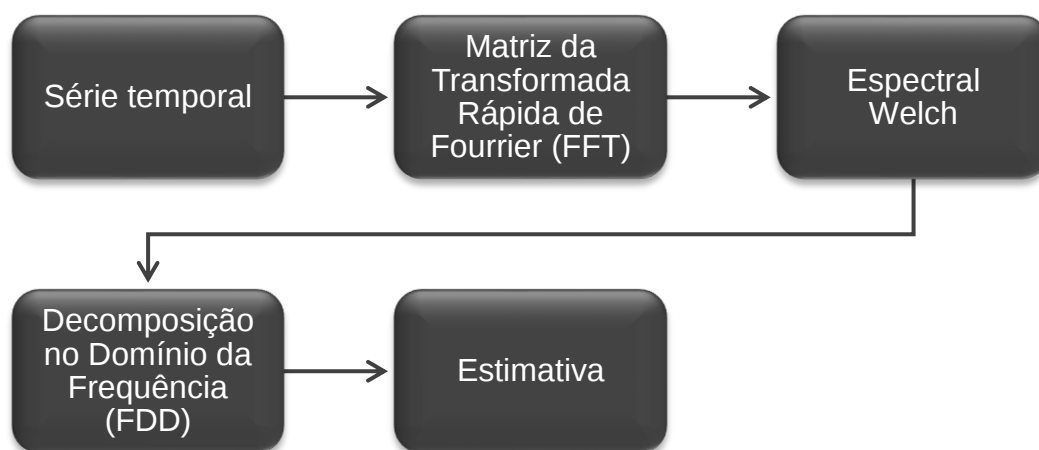
Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Nos ensaios 4, 5 e 8 tinha-se disponível apenas um aparelho para realização das medições, o qual foi posicionado na crista da barragem no ponto F00. E no ensaio 8, o aparelho disponível possuía uma configuração diferente das outras medições, permitindo que a taxa de aquisição máxima de medição fosse 200 Hz e o tempo de medição de 255 segundos.

Após a realização dos ensaios, as leituras foram organizadas e para o processamento de sinais das medições obtidas foram utilizados os scripts SYSModal, desenvolvidos por Martins (2016), que foram configurados de acordo com as características de cada ensaio e os quais utilizam a técnica de Decomposição no Domínio da Frequência para obtenção dos espectros de frequência. O método se torna mais vantajoso, pois, segundo Herlufsen *et al.* (2005), ele é mais claro quando as análises gráficas exibem picos isolados causados por ressonância e, conforme Tavares (2013), é um método eficaz na determinação de modos com frequências próximas.

Os scripts de processamentos dos dados seguem as rotinas retratadas na Figura 34.

Figura 34 - Rotinas dos scripts SysModal



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Na primeira rotina as leituras de campo são filtradas e organizadas em uma única matriz. Na segunda rotina é aplicada a Transformada Rápida de Fourier (*Fast Fourier Transform* – FFT). Na terceira rotina é obtida a matriz de densidade espectral pela técnica de Welch. Na quarta rotina, a matriz de densidade espectral é decomposta no domínio da frequência. E na quinta e última, os resultados são organizados e exibidos a partir de arquivos, podendo serem exibidos pelo Excel.

Para cada ensaio apresentado na Tabela 2, as medições foram processadas conforme as taxas de aquisição e tempo de medição, realizando a decimação no processamento para verificação das frequências naturais iniciais.

Confrontou-se os dados obtidos no ensaio inicial para verificar se há algum tipo de padrão nos valores de frequências naturais. Identificando as frequências naturais da barragem, será possível monitorar alterações nos valores de massa e/ou rigidez da maciço ao longo do tempo.

Além disso, para um embasamento nos valores de frequências naturais antes da realização dos processamentos, alguns artigos apresentados no estado da arte tratavam-se desses valores para barragens de terra. Embora não seja o mesmo material de barragens de rejeitos, as barragens de terra tendem a exibir um comportamento semelhante mais próximo para barragens de rejeitos de mineração, em relação aos outros tipos de barragens existentes.

Nas pesquisas de Castro *et al.* (1998), Chakraborty *et al.* (2019), Parish, Sadek e Shahrour (2009) e Zardari *et al.* (2017), onde foram determinadas as frequências naturais de barragens de terra e uma de rejeitos de mineração, pode-se ter uma ideia da ordem de grandeza dos valores das frequências naturais iniciais.

Na pesquisa de Chakraborty *et al.* (2019), os autores realizaram um apanhado para determinar e confrontar o resultado dos valores de frequências naturais de barragens de terra de outras três pesquisas anteriores e também definiram as frequências naturais ainda não determinadas para uma barragem de terra a partir de um software comercial. Os valores de frequências naturais são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 - Frequências naturais dos estudos de Chakraborty *et al.* (2019)

Barragem da pesquisa	Características da barragem	Frequências naturais (Hz)
Clough and Chopra (1966)	Homogênea isotópica	1,26; 2,35; 2,94; 3,70; 4,17
Tsiatas and Gazetas (1982)	Não homogênea	1,35; 2,27
Cetin <i>et al.</i> (2005)	Heterogênea	0,98; 1,72; 3,22; 4,54
Barragem de represamento hidráulico	-	2,39

Fonte: Adaptado de Chakraborty *et al.* (2019).

Castro *et al.* (1998) determinaram as frequências naturais de uma barragem de terra com núcleo também de argila utilizando amplitudes espectrais de terremotos e puderam verificar que a primeira frequência natural da barragem é da ordem de 2,5

Hz. Já na pesquisa de Parish, Sadek e Shahrour (2009), os autores desenvolveram um modelo 3D em um software de diferenças finitas de uma barragem de terra com núcleo de argila e puderam determinar as frequências naturais da barragem durante um carregamento sísmico e que tiveram como resultados as seguintes frequências: 0,7 e 1,4 Hz. Zardari *et al.* (2017), realizaram análises dinâmicas a partir de um software também com a utilização de espectros sísmicos de uma barragem de rejeitos de construção a montante, para avaliar o potencial de liquefação e estabilidade do maciço, e os autores dispunham de uma frequência natural da barragem de 1,2 Hz para a análise dos dados.

Diante dos fatos mencionados, fica evidenciado uma faixa de valores de interesse dos espectros de frequência para análise das medições obtidas. A determinação das frequências naturais da barragem é realizada por meio da seleção de picos correspondentes no gráfico de valores singulares de representação da amplitude da resposta de vibração em função da frequência (ARAÚJO, 2015; RAO, 2009; TAVARES, 2013).

Verificou-se também as amplitudes de vibração nas três direções ortogonais separadamente. Para isso, cada canal de medição (x, y e z) foi processado de maneira independente para avaliar as amplitudes de vibração nas três direções para cada um dos ensaios realizados.

A partir das leituras do indicador de nível d'água (INA 04B), foi analisada a influência da variação do nível d'água nos valores de frequências naturais. Dessa forma, foram desenvolvidos gráficos para mostrar o comportamento das frequências naturais dominantes da estrutura mediante aos valores estimados junto à variação do nível d'água no instrumento, comparando essas duas grandezas no decorrer do tempo durante os ensaios realizados.

Além disso, foi realizada uma pesquisa no portal HIDROWEB da Agência Nacional de Águas (ANA), para a obtenção de dados pluviométricos referentes ao intervalo de tempo entre o primeiro ao último ensaio. Foi escolhida a estação denominada como Fazenda Vista Alegre, a qual é operada pela CPRM no município de Mateus Leme/MG e que possui a numeração 2244019 como código. A escolha da estação foi determinada pela totalidade de dados no período de interesse e a proximidade da localização com a mineradora. Com os dados de precipitações, realizou-se uma análise semelhante à desenvolvida frente aos valores do indicador de nível d'água.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

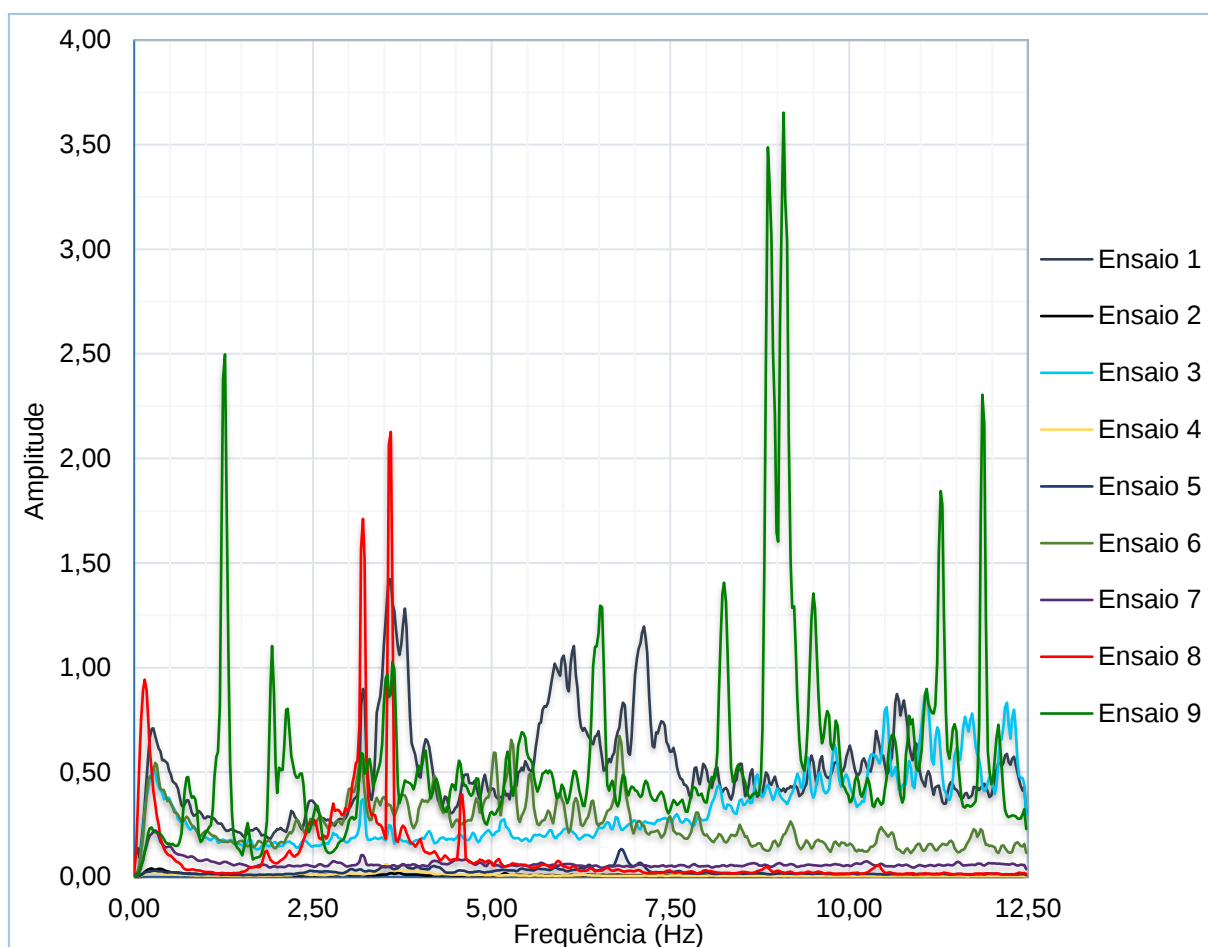
No Apêndice A são apresentados os registros obtidos das medições e no Apêndice B estão presentes os valores de amplitudes de acelerações, velocidades e deslocamentos do Ensaio 1. Dessa forma, o ensaio ocorre sem colocar em risco a estabilidade da estrutura, pois, os valores de amplitudes são muito baixos.

4.1 FREQUÊNCIAS NATURAIS

Os processamentos foram realizados para cada ensaio e os espectros de frequência estão apresentados no Apêndice C, nos quais são exibidos o primeiro valor singular de cada processamento e geralmente os valores de interesse são os primeiros valores de frequências naturais. Os picos dos gráficos são indicativos da presença de frequências naturais, porém, é válido ressaltar que alguns dos valores inicialmente estimados como frequências naturais, podem ser falsos picos que representem ruídos e/ou harmônicos das ações.

Todos os espectros foram organizados em apenas um gráfico (Figura 35) para se ter uma análise global de todos os ensaios realizados na barragem. Dessa forma, cada linha (valor singular) exibida no gráfico corresponde a um ensaio.

Figura 35 - Primeiros valores singulares de todos os ensaios



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

A Tabela 4 evidencia os primeiros doze picos, organizados de forma crescente, identificadas de acordo com cada ensaio a partir dos espectros do Apêndice C.

Tabela 4 - Picos candidatos a frequências naturais dos ensaios

Ensaio	Data	Frequências (Hz)											
		1°	2°	3°	4°	5°	6°	7°	8°	9°	10°	11°	12°
1	29/08/2019	2,20	2,50	3,20	3,56	3,78	4,08	4,91	5,88	6,15	6,49	6,84	7,13
2	27/09/2019	2,39	2,64	3,17	3,71	3,93	4,27	5,20	6,35	6,76	7,67	8,59	9,25
3	31/10/2019	1,61	2,78	3,20	3,56	4,13	4,74	4,96	5,18	6,62	6,74	7,59	8,15
4	09/12/2019	2,32	2,83	3,00	3,54	3,76	4,05	5,59	6,30	7,35	8,06	-	-
5	03/01/2020	2,47	3,49	3,76	4,20	5,15	5,42	5,88	6,25	6,81	7,08	7,62	8,01
6	27/01/2020	2,27	2,47	3,20	4,20	4,49	5,27	5,54	5,79	6,18	6,79	7,06	7,50
7	28/02/2020	1,81	2,59	2,78	3,20	3,91	4,20	4,64	4,83	5,69	6,45	7,40	7,64
8	10/08/2020	1,86	2,17	2,51	2,78	3,20	3,59	3,76	4,59	-	-	-	-
9	24/10/2020	1,27	1,93	3,17	3,61	4,08	4,54	5,22	6,15	6,50	6,84	7,67	8,27

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Os valores em negrito e vermelho tratam-se de frequências que exibiram um pico de frequência de acordo com uma adoção dos autores e dessa forma, teve-se uma identificação mais nítida do valor como candidato a frequência natural.

A partir da Tabela 4, percebe-se alguns picos se repetem entre os ensaios ou que exibem valores muito próximos. Esses valores evidenciados na Tabela 5, denominados respectivamente por f_1 , f_2 , f_3 , f_4 , f_5 , f_6 e f_7 , são de prováveis frequências naturais que apresentaram picos em determinadas frequências do espectro na maioria dos ensaios.

Tabela 5 - Frequências naturais dominantes

Denominação	Quantidade de valores	Frequências naturais (Hz)	Média	Desvio padrão
f_1	5	2,50; 2,47; 2,47; 2,59; 2,51*	2,51	0,049
f_2	7	3,20; 3,17; 3,20; 3,20; 3,20; 3,20*; 3,17*	3,19	0,015
f_3	6	3,56; 3,56; 3,54; 3,49; 3,59*; 3,61*	3,56	0,042
f_4	5	3,78; 3,71; 3,76; 3,76; 3,76*	3,75	0,026
f_5	5	5,20; 5,18; 5,15; 5,27; 5,22*	5,20	0,045
f_6	6	6,84; 6,76; 6,74; 6,81; 6,79; 6,84*	6,80	0,041
f_7	5	7,67; 7,59; 7,62; 7,64; 7,67*	7,64	0,034

*valores estimados depois da obra de reforço da barragem.

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Pela Tabela 5, verifica-se que os valores com médias de frequências de 3,19; 3,75 e 7,64 Hz, são os três valores que apresentaram menor dispersão dos dados obtidos, estando a frequência de 3,19 com menor desvio padrão e também o valor de frequência que se teve mais picos de frequência.

Foram calculados também os intervalos de confiança de cada uma das frequências de f_1 a f_7 com nível de confiança de 95%, a partir da distribuição t de Student para indicar a margem de incerteza dos dados da amostra. Os resultados estão apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 - Intervalo de confiança

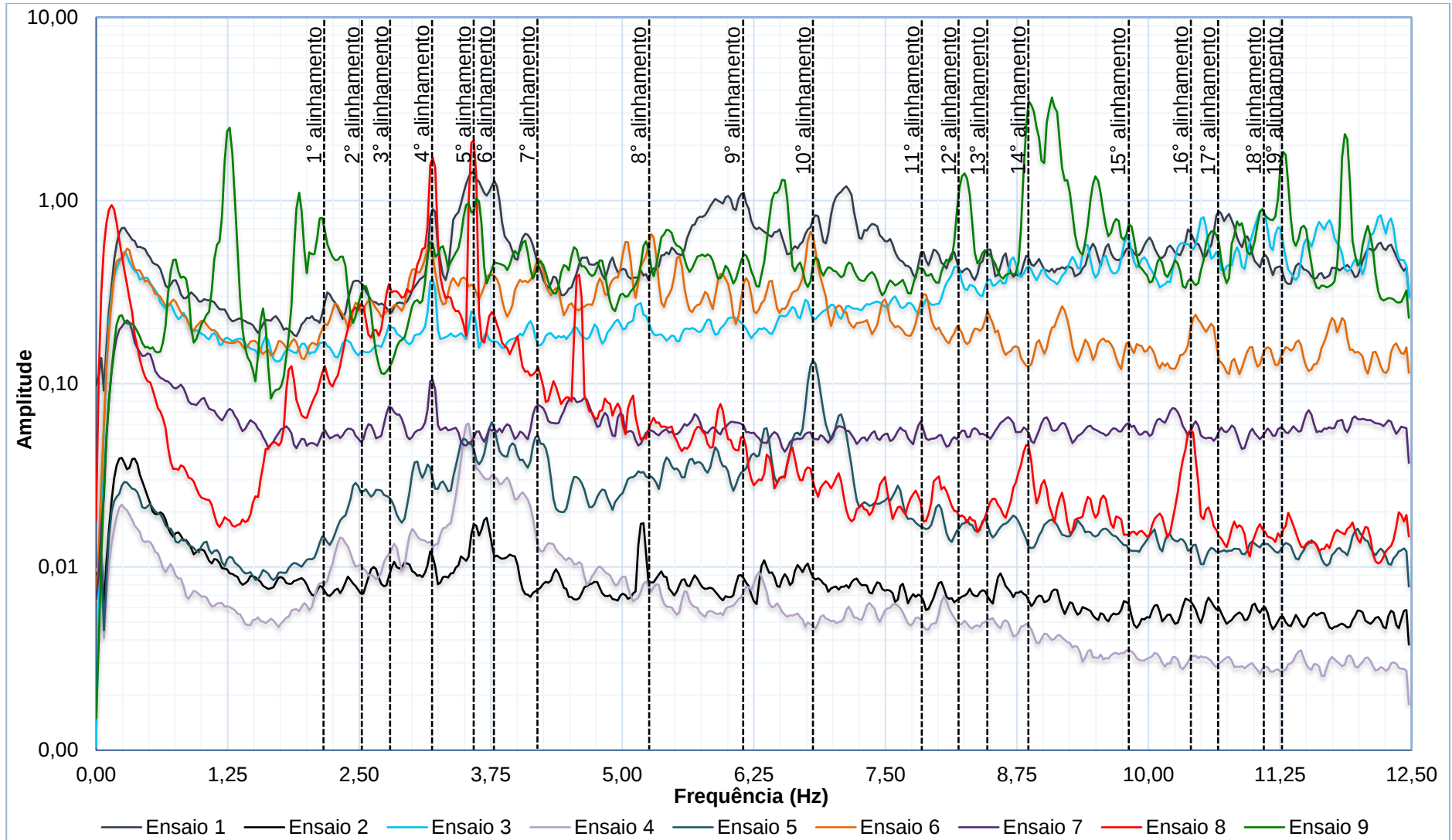
Denominação	Nível de significância	Erro	Intervalo de confiança	
			Limite inferior	Limite superior
f_1	0,05	0,061	2,447	2,569
f_2	0,05	0,014	3,178	3,205
f_3	0,05	0,044	3,515	3,602
f_4	0,05	0,032	3,722	3,786
f_5	0,05	0,056	5,148	5,260
f_6	0,05	0,043	6,753	6,840
f_7	0,05	0,042	7,596	7,680

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Em valores percentuais, a f_6 foi a frequência que apresentou a maior quantidade de valores situados dentro do intervalo de confiança calculado, resultando em 83,33% das frequências naturais obtidas. Já a f_3 , obteve-se 66,67% dos valores dentro do intervalo de confiança, sendo a menor porcentagem das frequências naturais da Tabela 5.

Foi realizada outra análise por meio do gráfico apresentado na Figura 35. A partir desse gráfico, foram inseridos alinhamentos verticais representados por linhas pontilhadas com uma escala logarítmica no eixo das ordenadas, para mostrar que nesses valores de frequências naturais, pode-se verificar três ou mais valores singulares que apresentam pico de frequência na região, conforme a Figura 36.

Figura 36 - Alinhamentos dos valores singulares



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Os 2°, 4°, 5°, 6°, 8° e 10° alinhamentos coincidem respectivamente com os seis primeiros valores de frequências naturais apresentados na Tabela 5 e estão resumidos na Tabela 7. Ademais, são claros os picos de frequência de vários espectros nas frequências de 3,19 Hz e 3,56 Hz. Isso mostra que as frequências estimadas são dominantes não só por seus valores absolutos, mas também realizando uma identificação visual de todos os espectros.

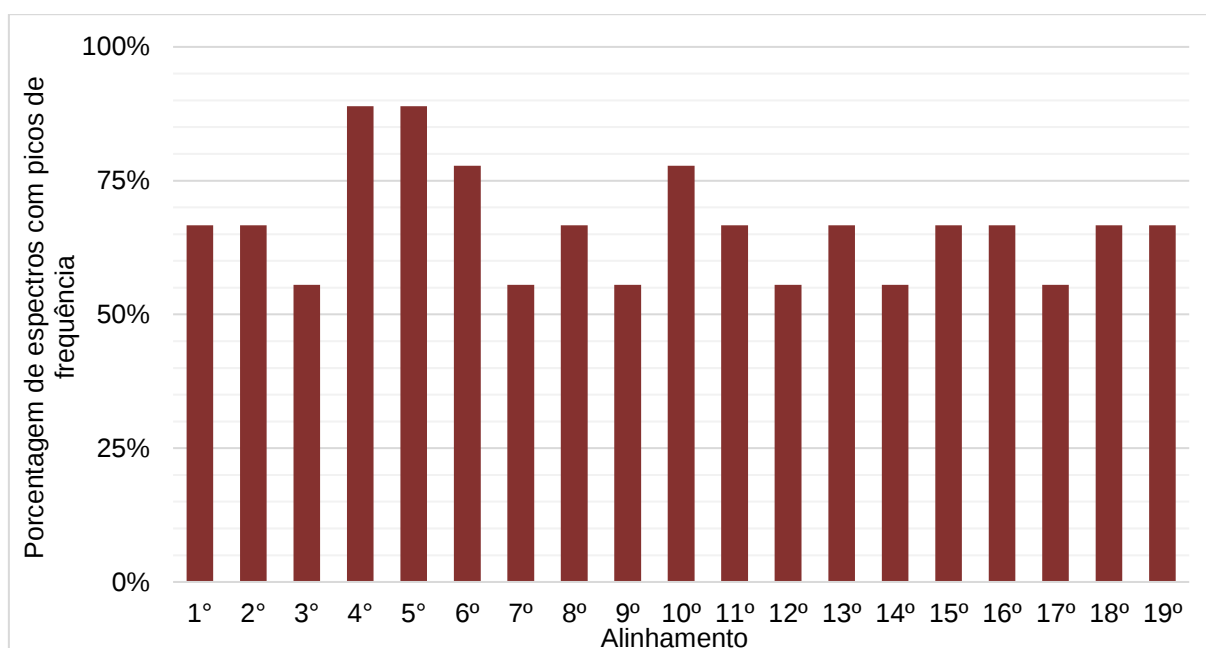
Tabela 7 - Frequências coincidentes com os alinhamentos

Alinhamento	Frequência (Hz)
2°	2,51
4°	3,19
5°	3,56
6°	3,75
8°	5,20
10°	6,80

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Também se tem a opção de realizar uma análise visual de forma isolada e constatar a quantidade de valores singulares (cada uma das curvas dos ensaios) que exibem um pico caracterizado como um valor de frequência natural em cada alinhamento apresentado anteriormente. Essa investigação é tratada na Figura 37 que apresenta a porcentagem de valores singulares que exibe um pico de frequência no gráfico, tomando o alinhamento como referência.

Figura 37 - Espectros com picos de frequência



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

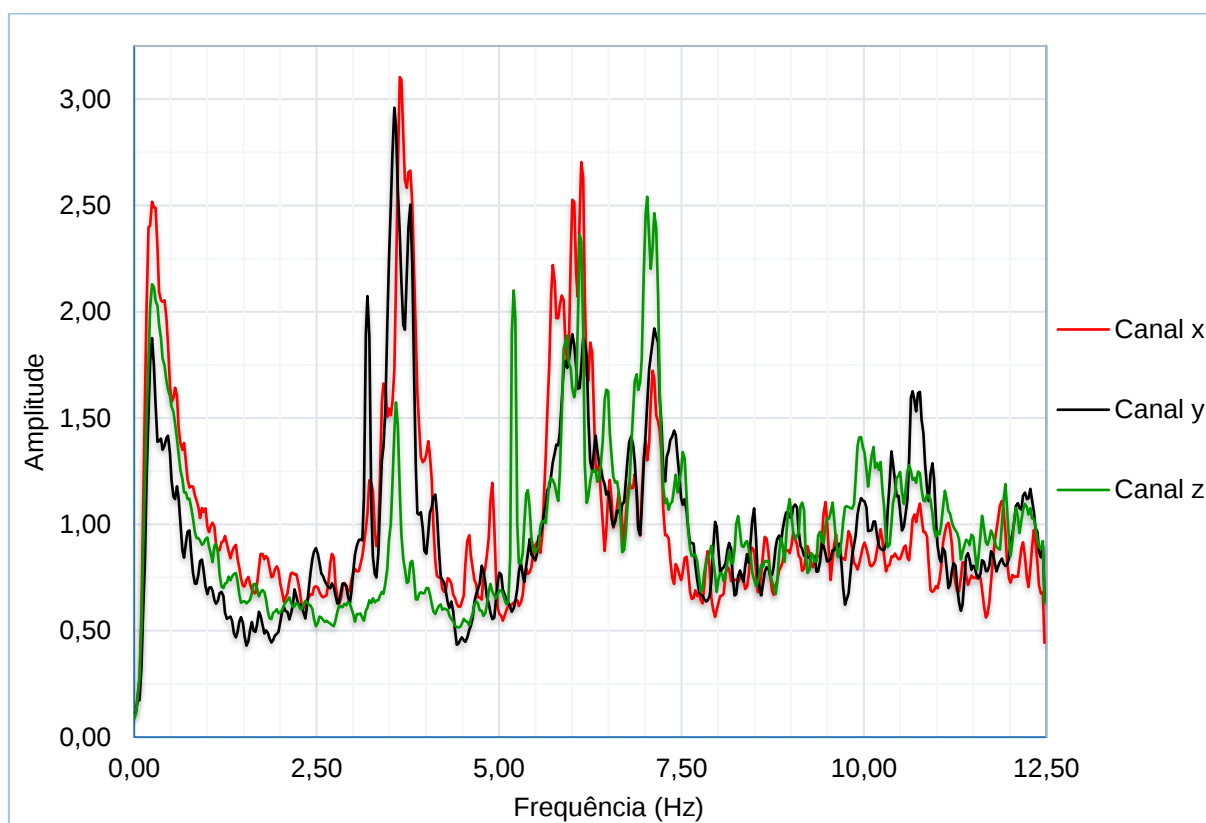
Pelo gráfico da Figura 37, observa-se que o 4°, 5°, 6° e 10° alinhamentos apresentam uma frequência natural dominante onde mais 75% dos espectros apresentam um pico para um determinado valor de frequência na região do alinhamento tomado como referência. Novamente, esses alinhamentos mostram a dominância das seguintes frequências naturais 3,19 Hz, 3,56 Hz e 6,80 Hz, dando ênfase para as duas primeiras conforme analisado anteriormente.

É válido ressaltar ainda, que outros espectros com menores amplitudes podem contribuir para essa convergência, mas pela visualização do gráfico, não é possível verificar devido aos pequenos valores de amplitude.

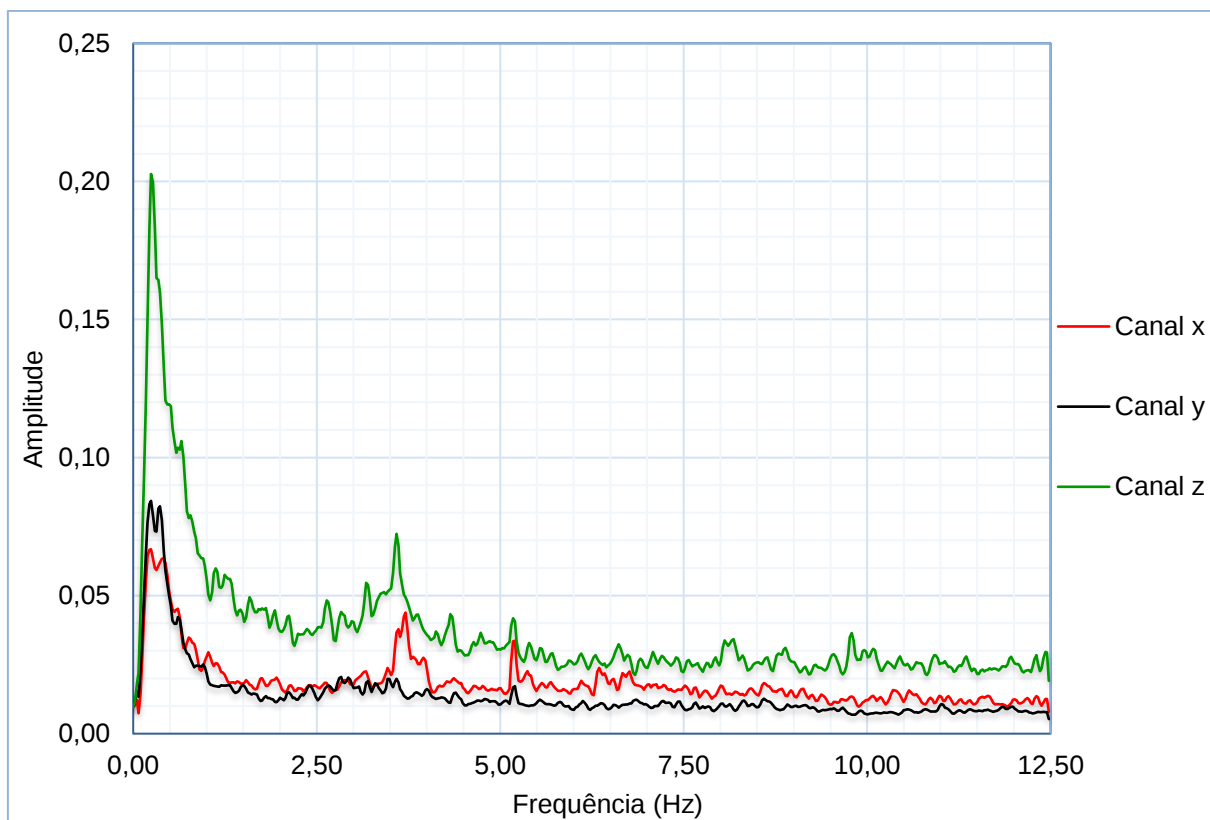
4.2 AMPLITUDES DE VIBRAÇÃO NAS TRÊS DIREÇÕES ORTOGONAIS

Nas Figuras 38 a 46 são exibidos os gráficos referentes aos processamentos independentes das direções x, y e z de cada ensaio.

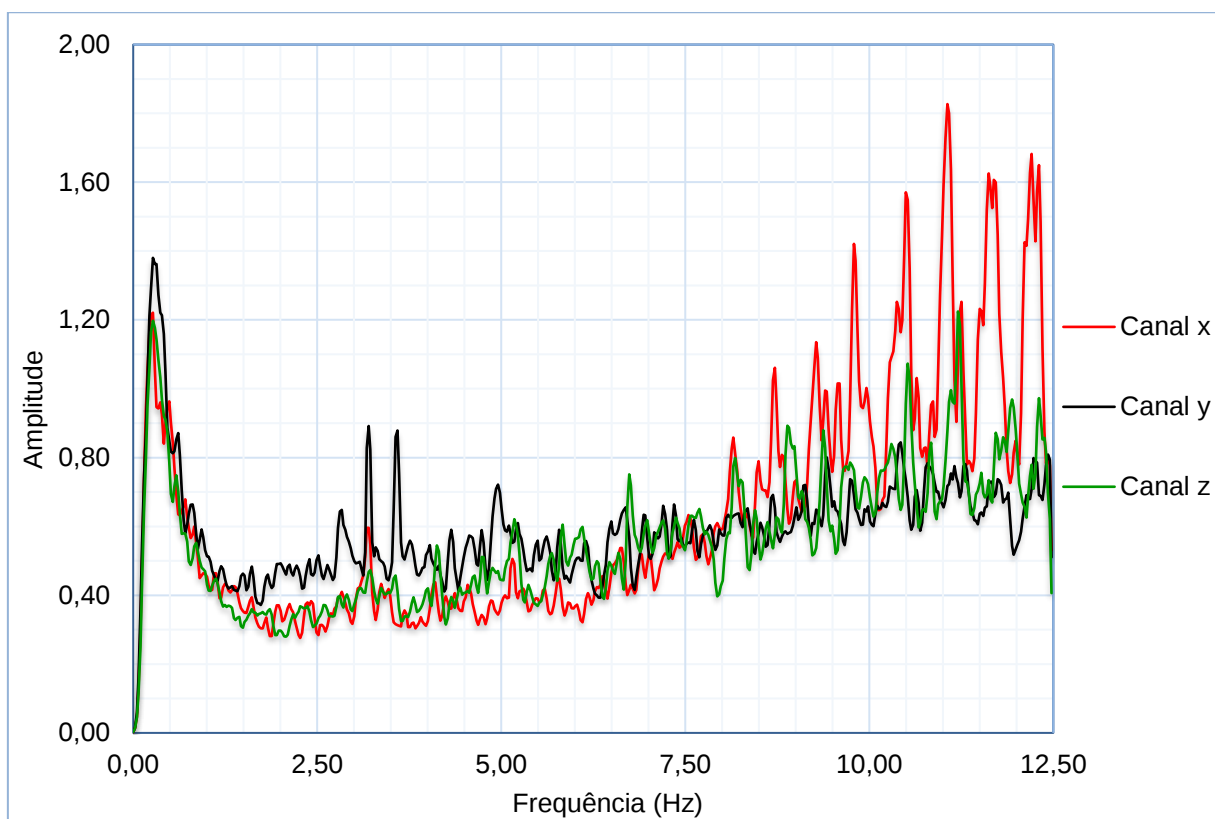
Figura 38 - Processamento nas direções x, y e z - Ensaio 1



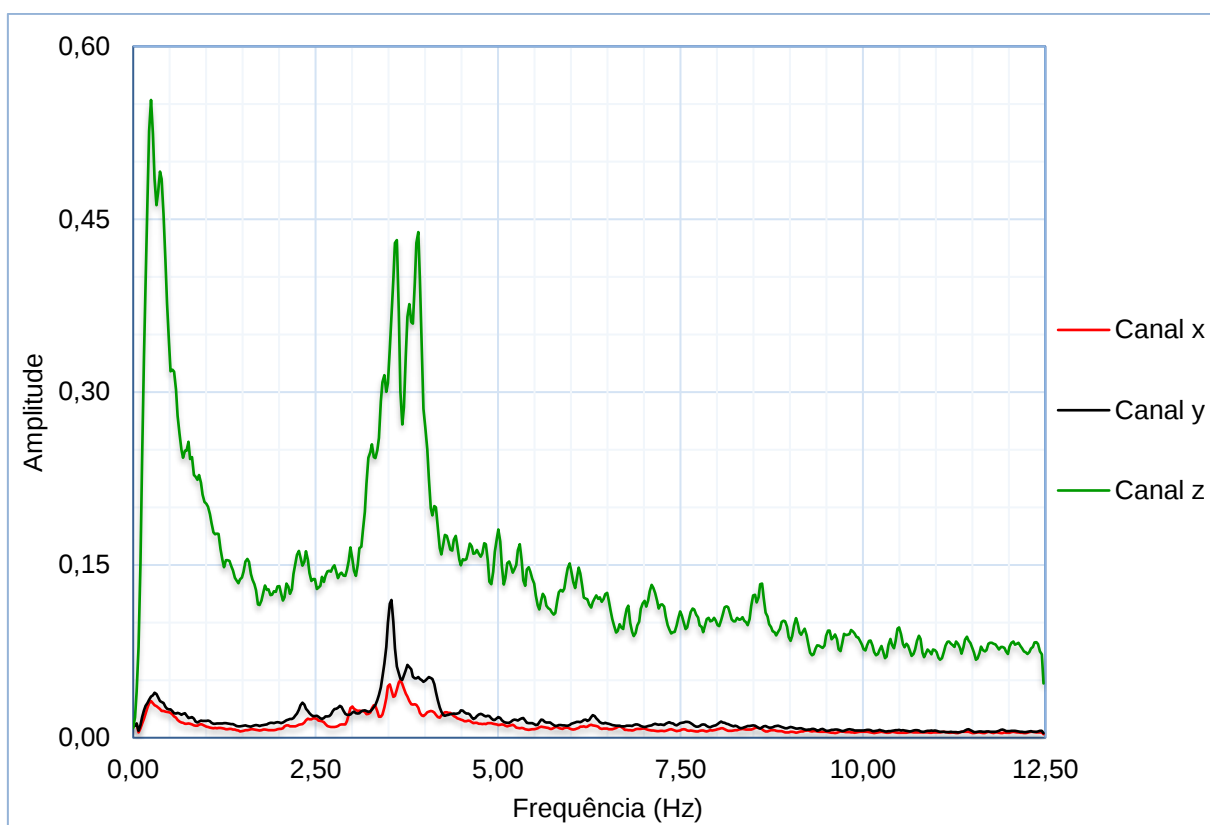
Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Figura 39 - Processamento nas direções x, y e z - Ensaio 2

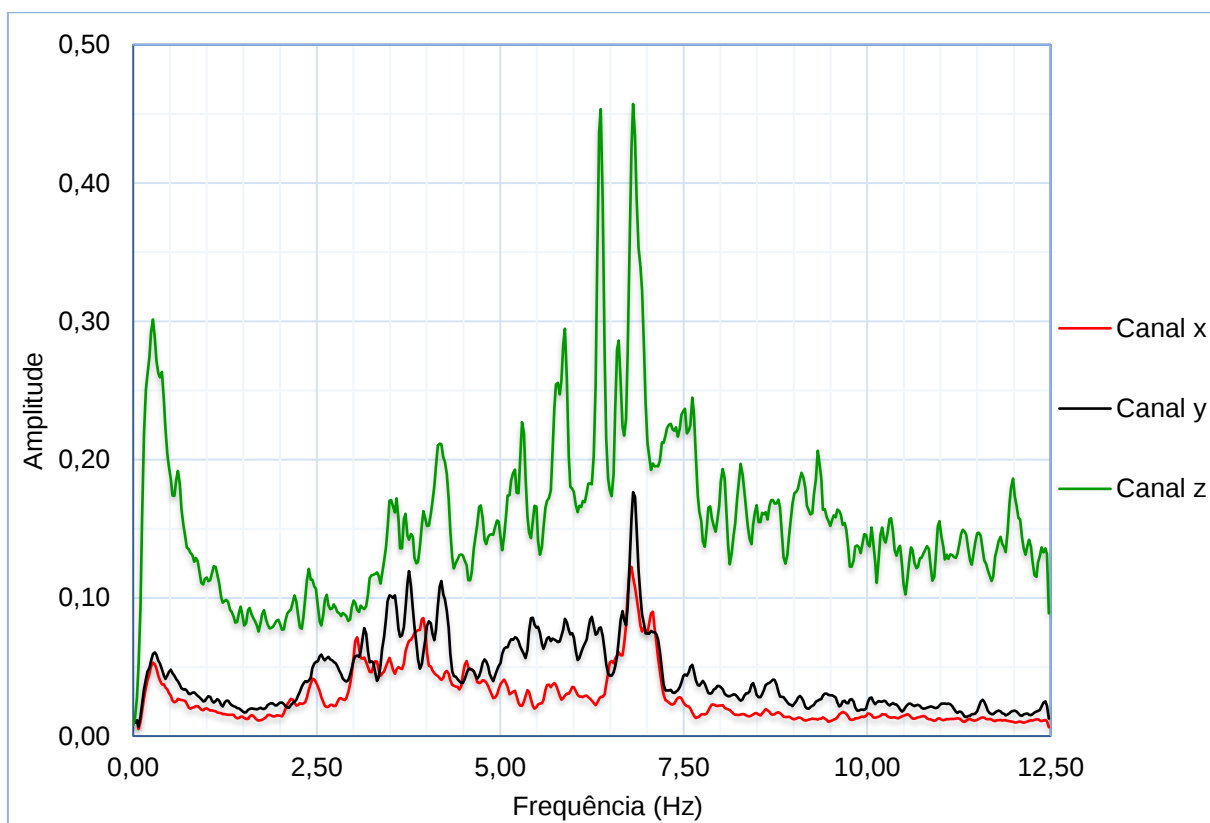
Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Figura 40 - Processamento nas direções x, y e z - Ensaio 3

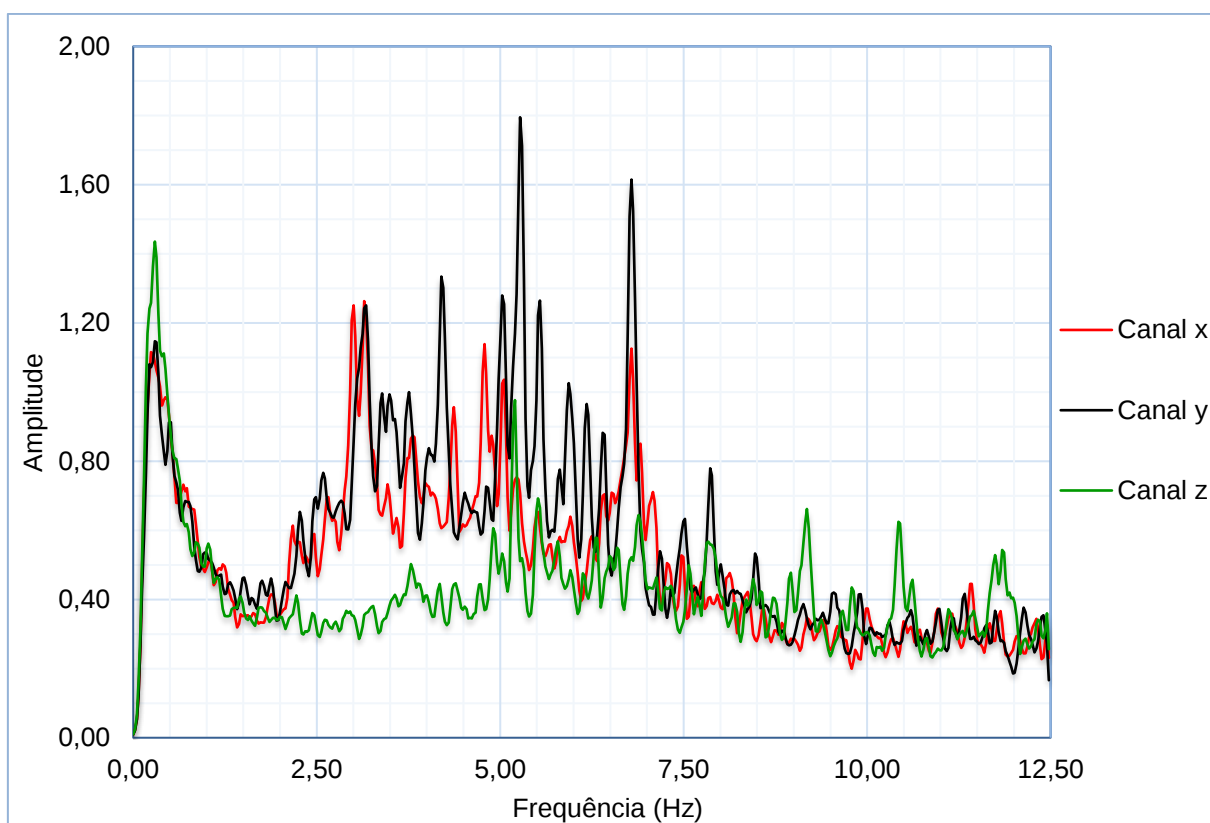
Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Figura 41 - Processamento nas direções x, y e z - Ensaio 4

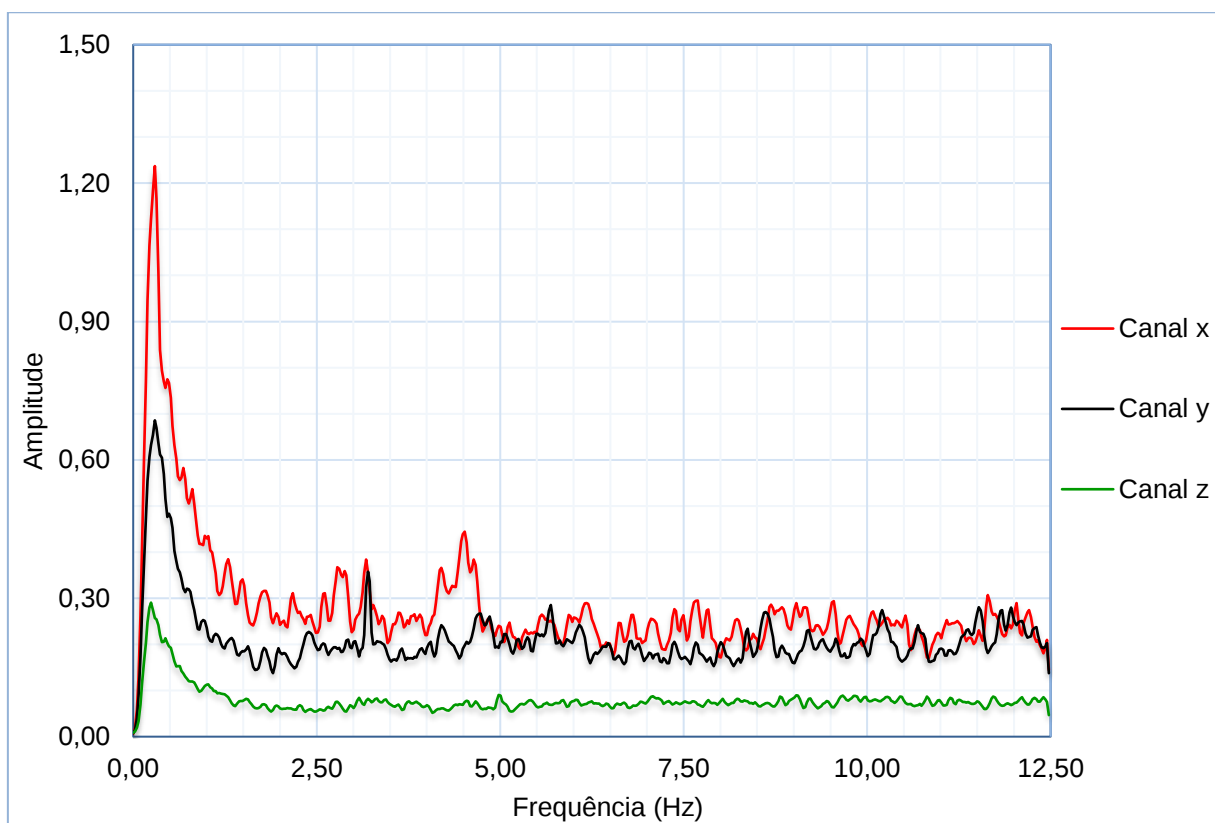
Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Figura 42 - Processamento nas direções x, y e z - Ensaio 5

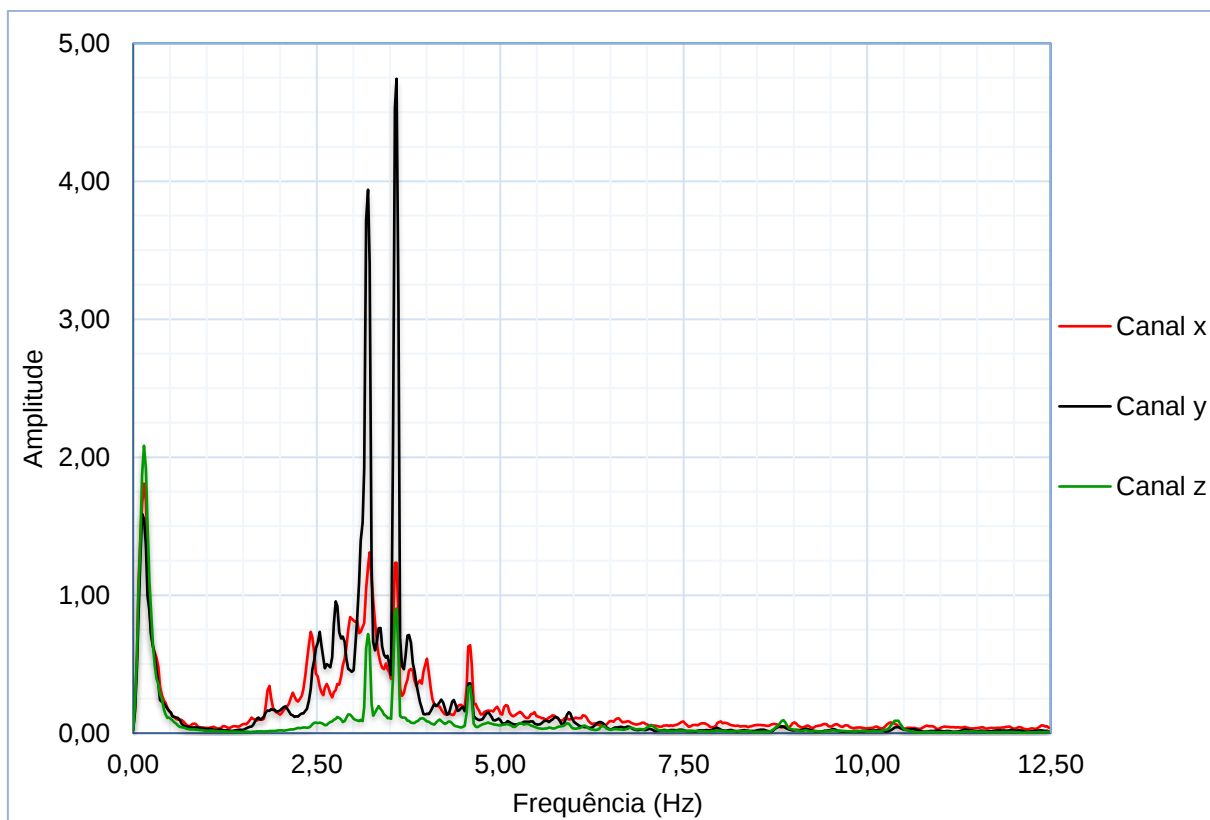
Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Figura 43 - Processamento nas direções x, y e z - Ensaio 6

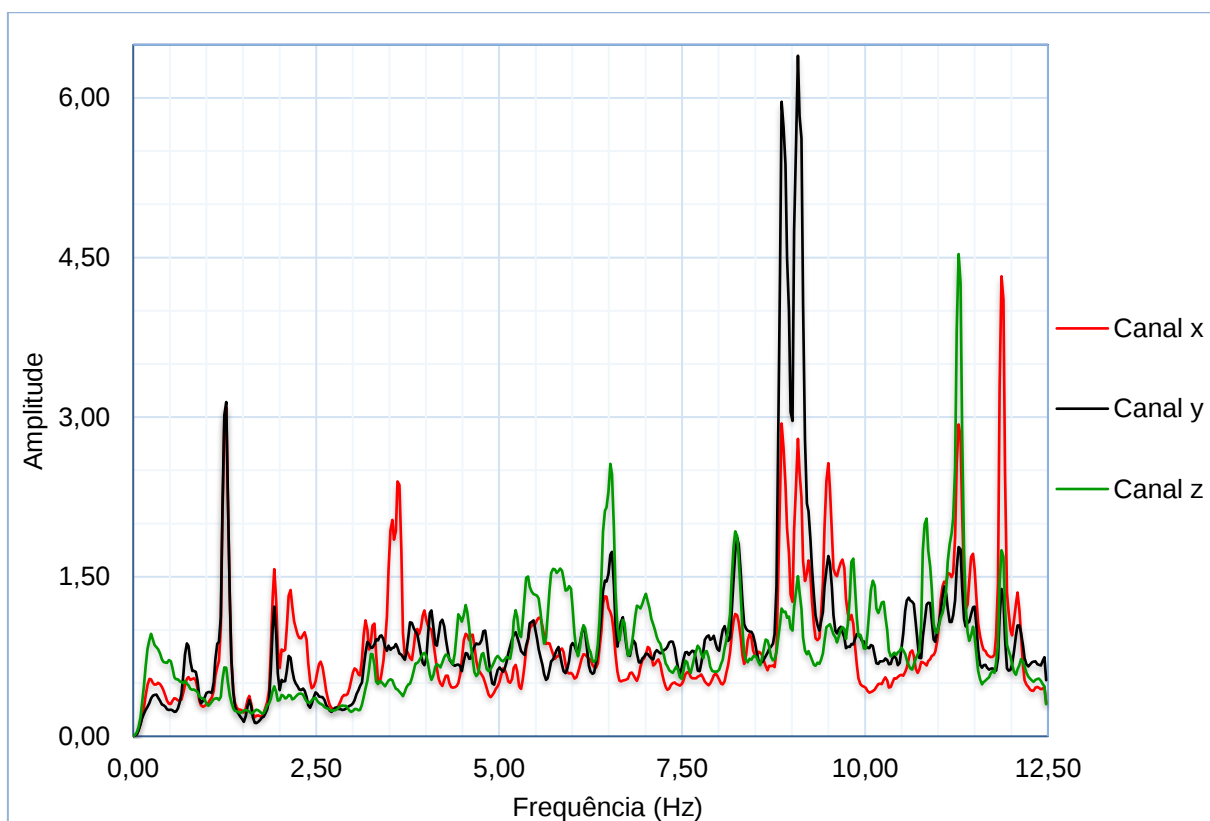
Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Figura 44 - Processamento nas direções x, y e z - Ensaio 7

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Figura 45 - Processamento nas direções x, y e z - Ensaio 8

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Figura 46 - Processamento nas direções x, y e z - Ensaio 9

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Pode-se observar uma predominância dos espectros de x, y e z nos Ensaio 1, 3, 6 e 9. No Ensaio 7 há um ligeira predominância da direção x em relação as outras duas (y e z) e no Ensaio 8 a direção y para dois picos de frequência. Já nos Ensaio 2, 4 e 5 há uma predominância clara do canal z em relação aos demais. Isso pode ser devido às ondas de superfície, que refletem em maiores deslocamentos na direção vertical.

Também pode ser inferido no Ensaio 9, realizado após o reforço, que os espectros apresentam maiores amplitudes para maiores valores de frequências (a partir de 8,5 Hz) para os três canais (x, y e z).

4.3 FREQUÊNCIAS NATURAIS VERSUS NÍVEL D'ÁGUA E PRECIPITAÇÃO

Visando averiguar a influência do nível d'água (NA) da barragem nos valores de frequências naturais, foram desenvolvidos gráficos com cada uma das frequências apresentadas na Tabela 5 com os dados obtidos do indicador de nível d'água (INA 04B) e com as precipitações obtidas no portal da HIDROWEB. Além disso, são indicadas em linhas pontilhadas, o intervalo de confiança calculado anteriormente para cada uma dessas frequências.

Na Tabela 8 são apresentadas as leituras do indicador de nível d'água (INA 04B) conforme tratado no item 3.2.

Tabela 8 - Leituras do INA 04B

Data da leitura	Leitura (m)	Cota
29/08/2019	53,68	1061,62
27/09/2019	53,86	1061,44
28/10/2019	54,17	1061,13
13/12/2019	54,45	1060,85
02/01/2020	54,54	1060,76
28/01/2020	54,63	1060,67
19/02/2020	54,65	1060,65
10/08/2020	50,63	1064,67
27/10/2020	50,68	1064,62

Fonte: Arquivo disponibilizado pela mineradora.

Em cada uma das Figuras 47 a 53, o eixo vertical à esquerda se refere aos valores de frequências naturais e o eixo à direita aos valores das cotas de níveis d'água. Essas duas grandezas são comparadas no decorrer do tempo situado no eixo das abscissas.

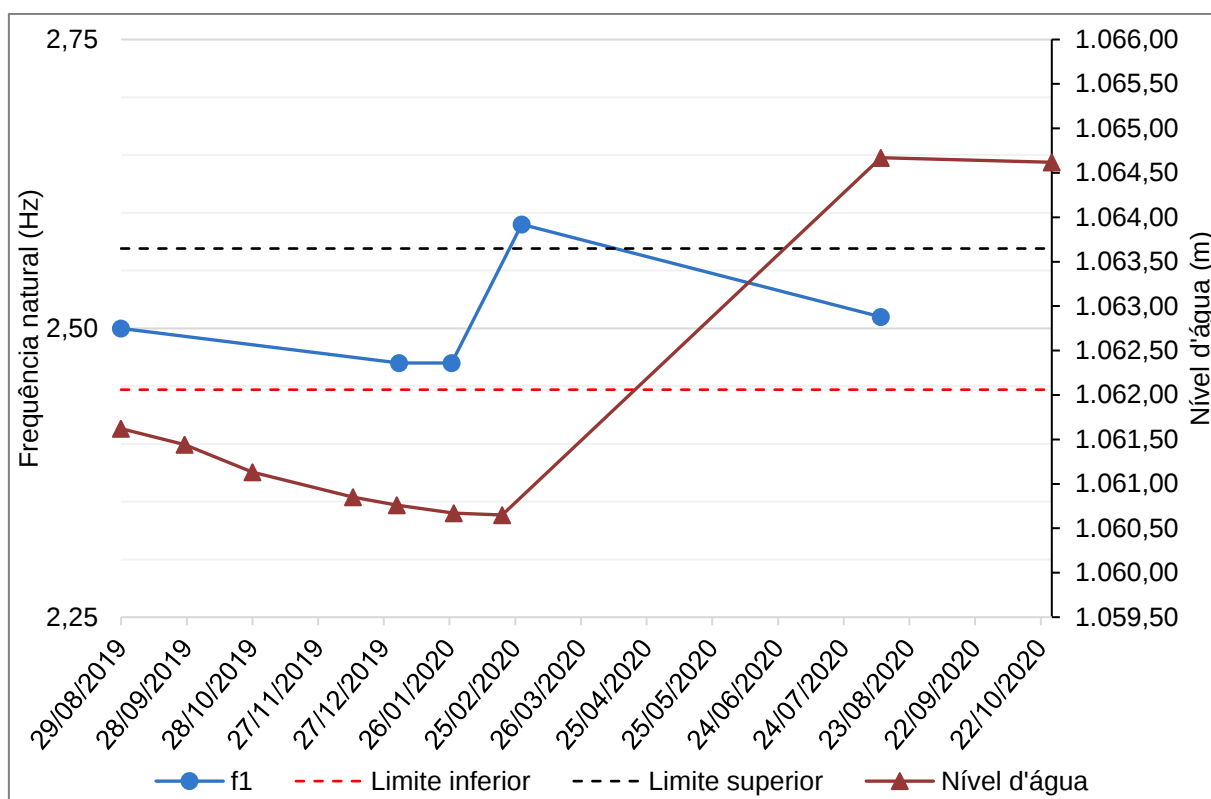
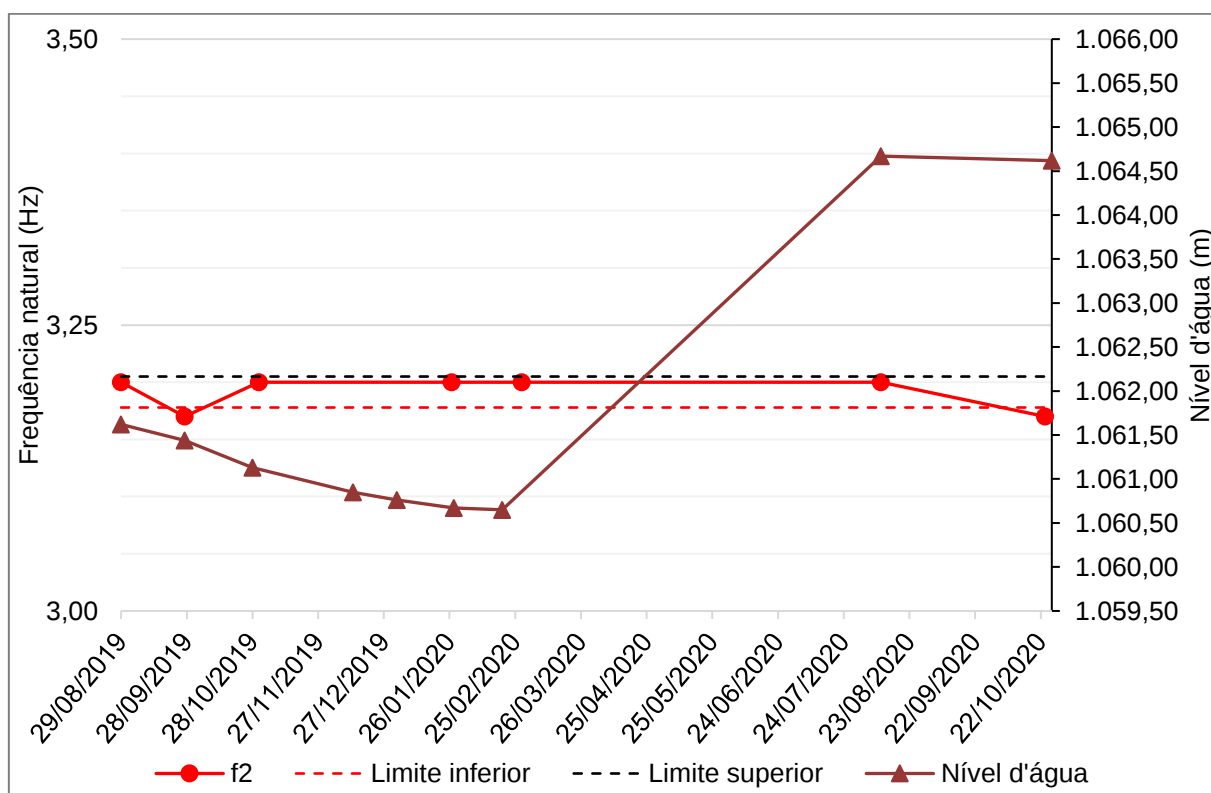
Figura 47 - Análise da f_1 e nível d'águaFigura 48 - Análise da f_2 e nível d'água

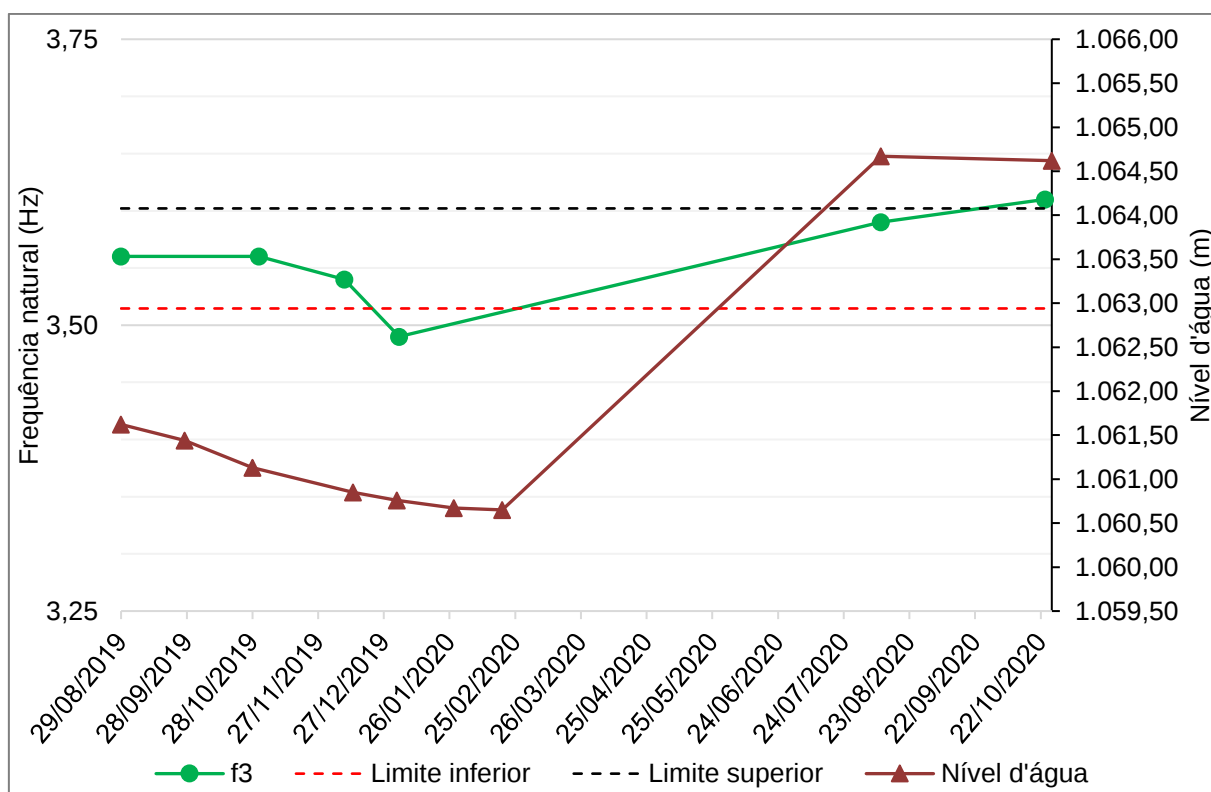
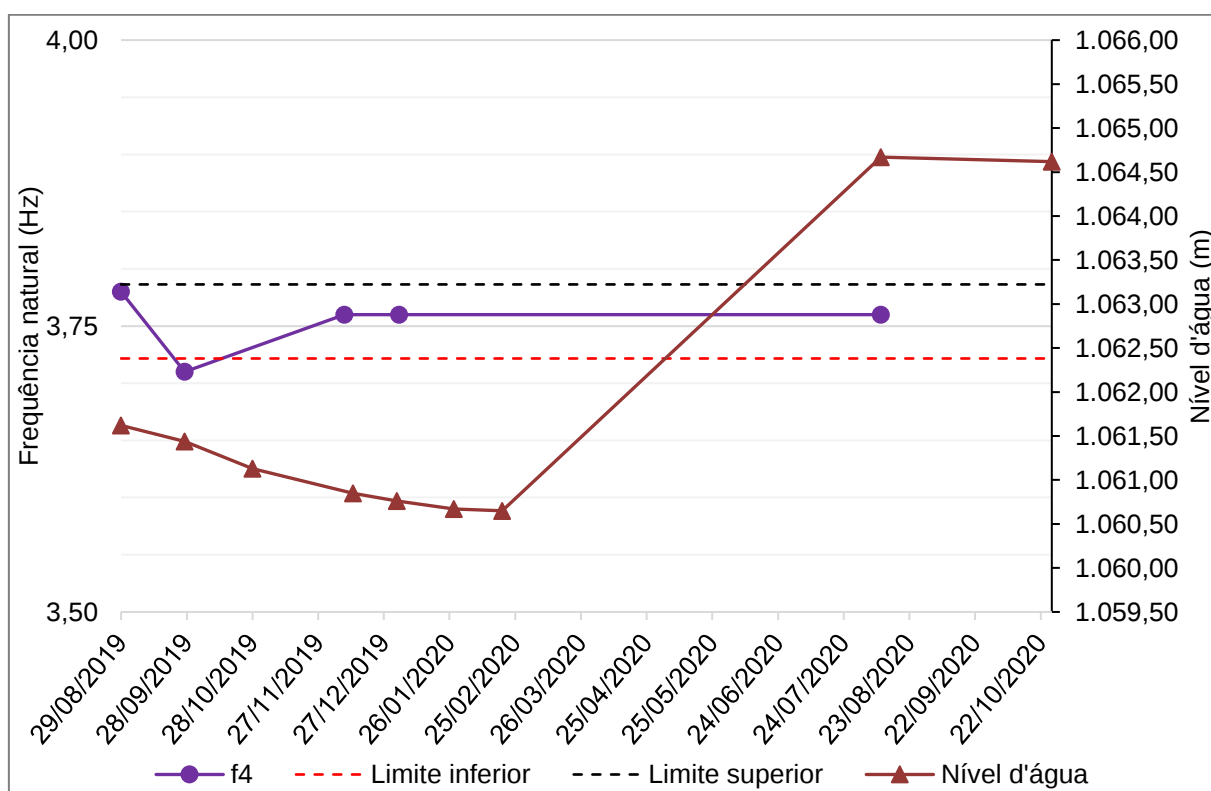
Figura 49 - Análise da f_3 e nível d'águaFigura 50 - Análise da f_4 e nível d'água

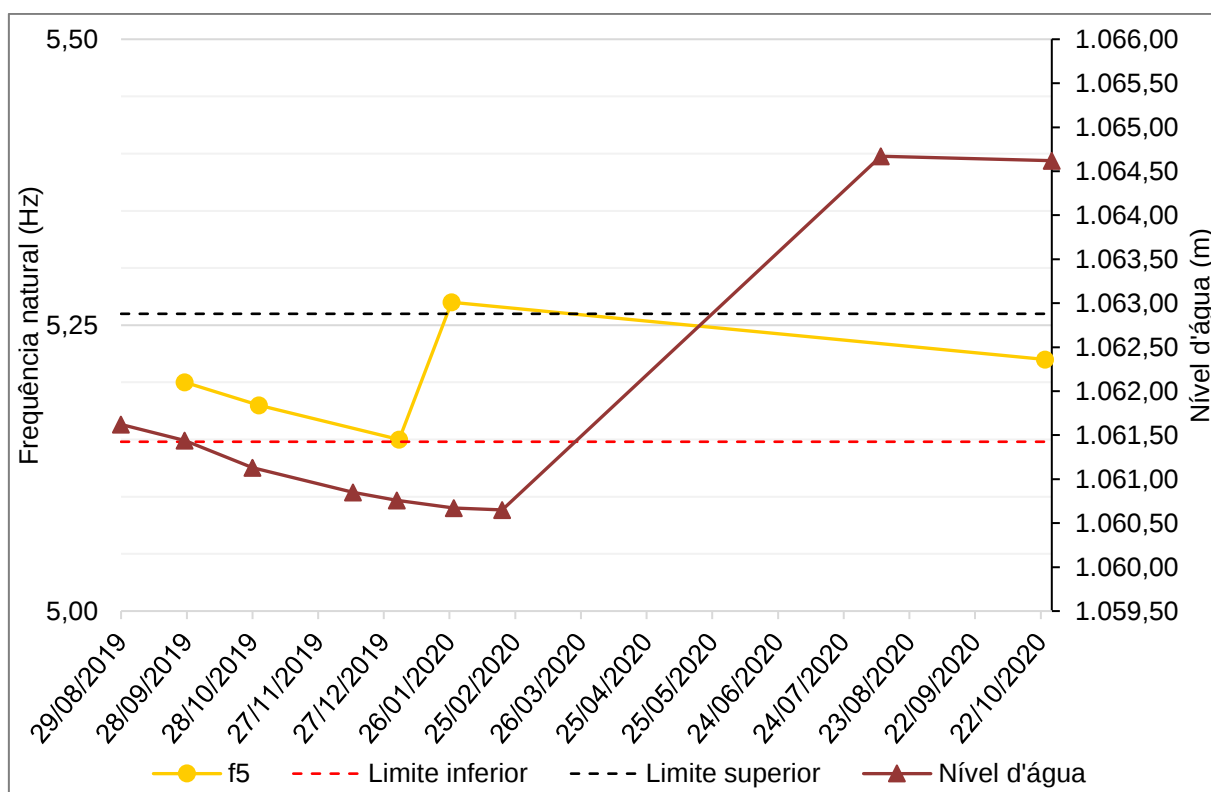
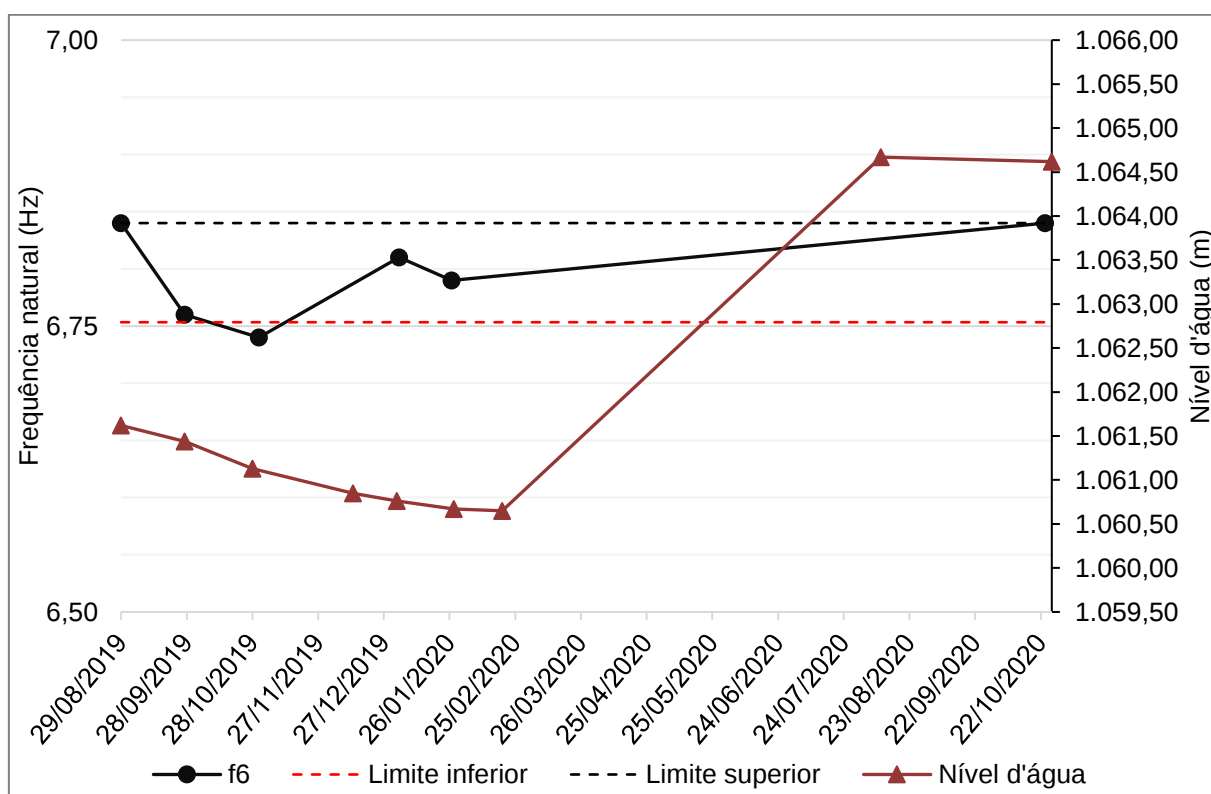
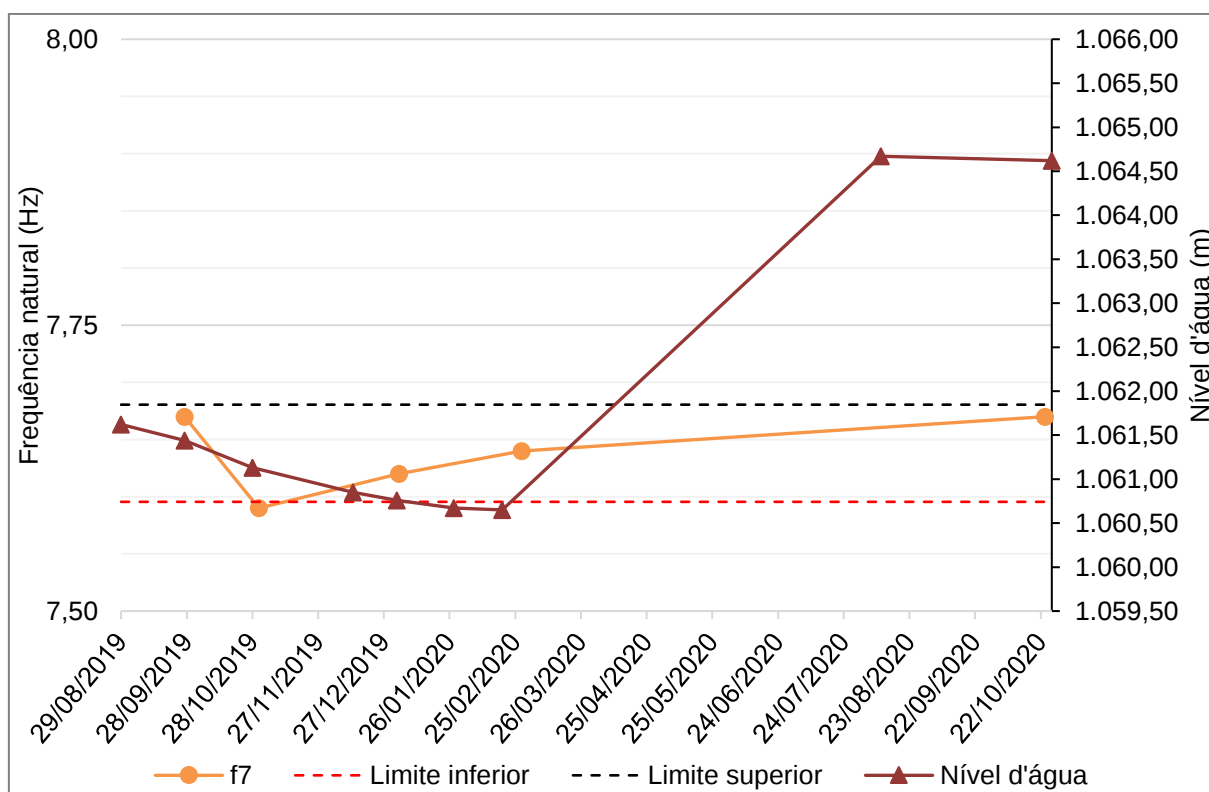
Figura 51 - Análise da f_5 e nível d'águaFigura 52 - Análise da f_6 e nível d'água

Figura 53 - Análise da f_7 e nível d'água

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

No gráfico da Figura 47, observa-se um declínio no NA e da frequência nos primeiros 5 meses e posteriormente um aumento (valor máximo) durante os menores valores do nível d'água. E quando houve a subida do NA (logo depois do reforço), o valor da frequência natural foi igual ao valor médio.

Já a Figura 48, mostra um caimento no primeiro mês da frequência junto ao NA. No mês seguinte o valor retornou ao primeiro valor estimado e houve uma estabilização do valor da frequência natural na continuação da diminuição do NA. E depois do reforço, dentre as duas frequências identificadas, uma possui valor acima da média e a outra abaixo.

No esquema da Figura 49, é apresentado um decréscimo nos valores de frequências nos 4 primeiros meses simultaneamente ao decréscimo do NA. Após o reforço, os valores de frequências ficaram situados em valores acima da média, denotando um comportamento de aumento desses valores.

De forma similar ao início do esboço da Figura 48, o gráfico da Figura 50 exibe uma diminuição no valor da frequência no primeiro mês concomitantemente com a diminuição do NA, logo depois um aumento de valor e uma estabilização na

frequência, permanecendo com um valor ligeiramente acima do valor médio após o reforço da barragem.

Um semelhante abatimento da Figura 47 é exibido na Figura 51, porém apresentado nos 3 primeiros meses de frequências estimadas, seguido de um aumento no valor. E assim como na maioria dos gráficos anteriores, o valor de frequência natural estabelecido depois da obra de reforço, se mostrou com um valor acima da média.

No gráfico da Figura 52 percebe-se uma diminuição no valor da frequência natural após os dois primeiros meses de medição, um aumento ao quarto mês e depois um leve decaimento, sendo todo esse intervalo de tempo seguido pela diminuição do nível d'água na barragem. Posteriormente ao reforço, o valor de frequência também segue um valor estimado acima do valor médio.

E no último gráfico (Figura 53), nota-se um comportamento bastante semelhante ao gráfico da Figura 50, onde ocorre a diminuição do valor da frequência no primeiro mês de medição e em seguida um aumento nesse valor, mantendo-se em um valor acima do valor médio após o reforço da Barragem B2.

É importante salientar que no intervalo de tempo compreendido entre 28/02/2020 a 10/08/2020 referente ao último ensaio antes da obra de reforço da barragem e ao primeiro ensaio após a finalização da obra, não pode ser inferido nenhum tipo de consideração sobre as frequências naturais e sobre os níveis d'água, uma vez que não houve a realização de ensaios e a disponibilização de dados do indicador de nível d'água nesse período.

Nas medições com datas iniciais (principalmente do primeiro ensaio para o segundo) há uma tendência na diminuição da frequência, simultaneamente com a diminuição do nível d'água. Mas essa hipótese não pode ser totalmente afirmada pois em alguns gráficos, os níveis mais baixos do NA, não são coincidentes com os menores valores de frequência natural. Dessa forma, as variações do nível d'água não mostraram nenhuma relação direta com as variações das frequências naturais estimadas.

Como a quantidade de dados e de instrumentos é limitada, também foi investigado se o regime de chuvas poderia promover algum tipo de mudança nas frequências naturais. A partir das precipitações da Tabela 9 foram elaborados gráficos (Figuras 54 a 60) semelhantes aos anteriores, analisando cada uma das frequências junto às

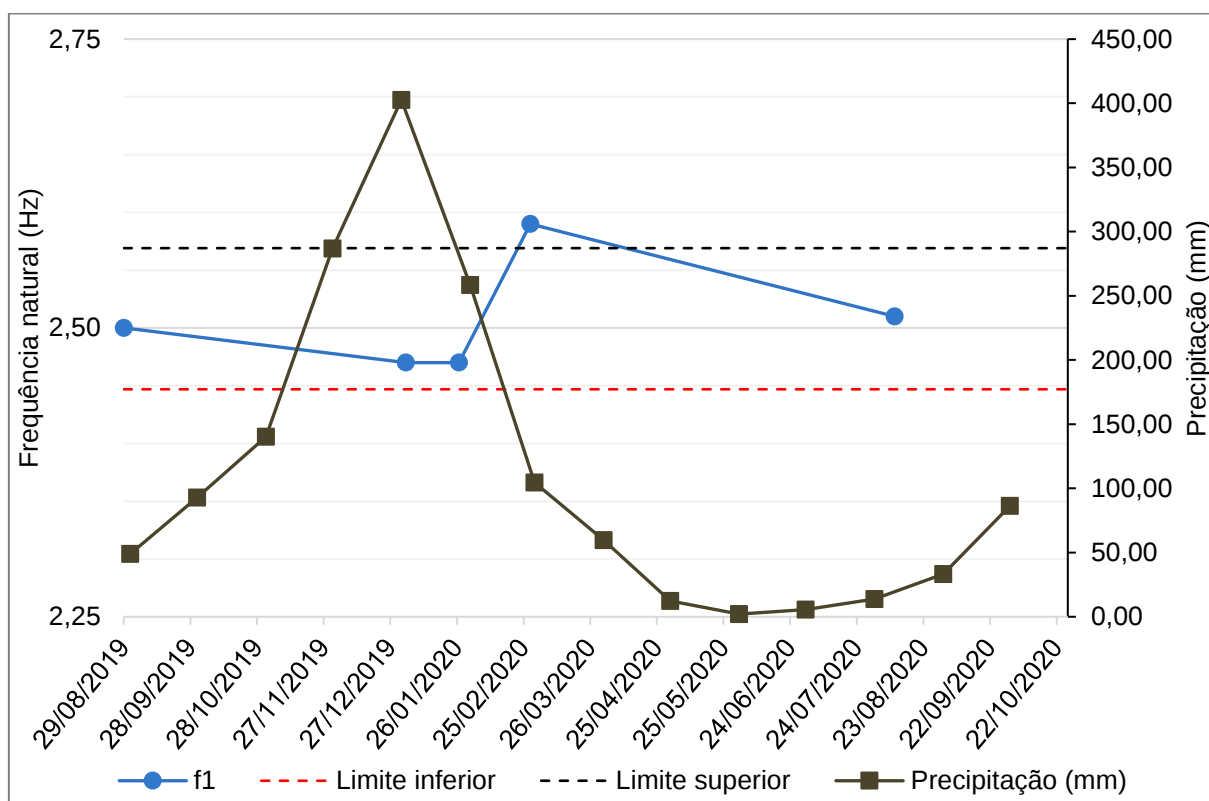
precipitações totais de cada um dos meses, ocorridas durante o intervalo entre os ensaios.

Tabela 9 - Precipitações totais nas datas dos ensaios

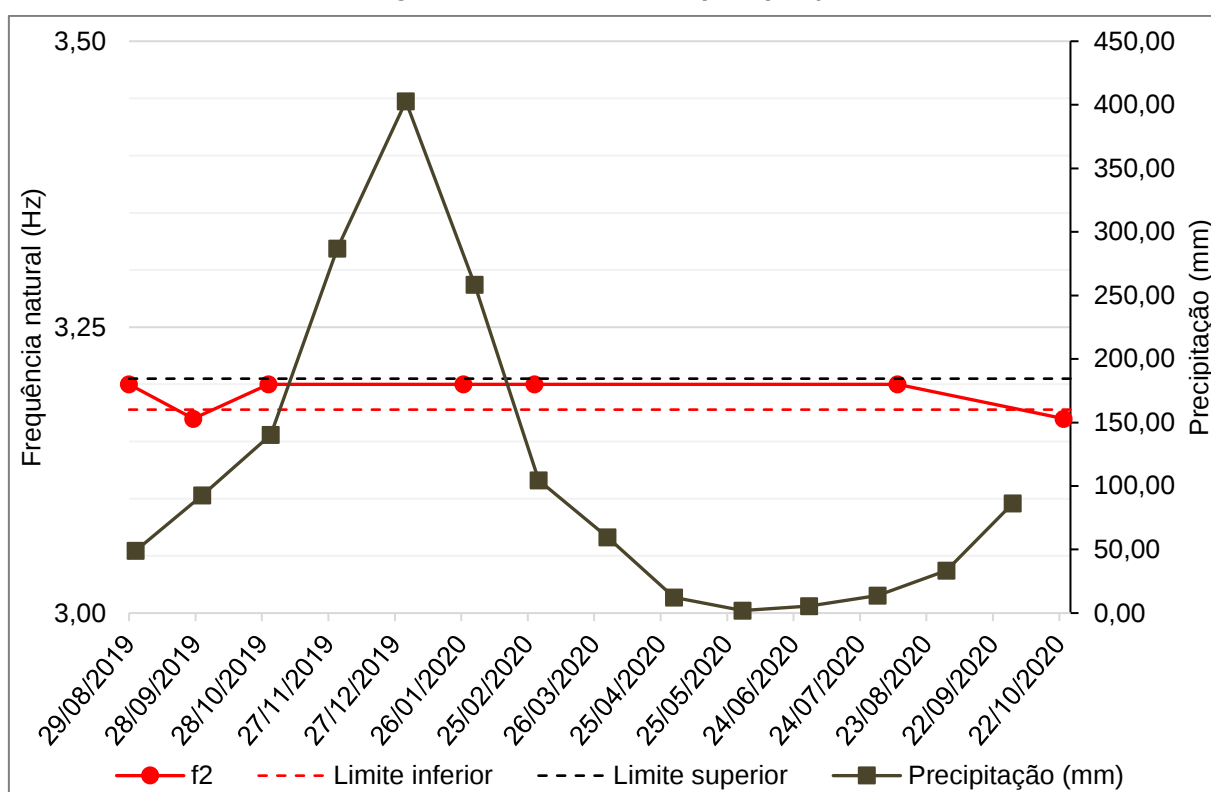
Data	Precipitação total (mm)	Nº de dias de chuva
01/08/2019	0	0
01/09/2019	49,1	2
01/10/2019	92,8	6
01/11/2019	140,3	14
01/12/2019	286,9	15
01/01/2020	402,7	16
01/02/2020	258,4	15
01/03/2020	104,5	10
01/04/2020	59,7	9
01/05/2020	12,3	1
01/06/2020	2	1
01/07/2020	5,6	1
01/08/2020	13,8	3
01/09/2020	33,4	3
01/10/2020	86,3	12

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

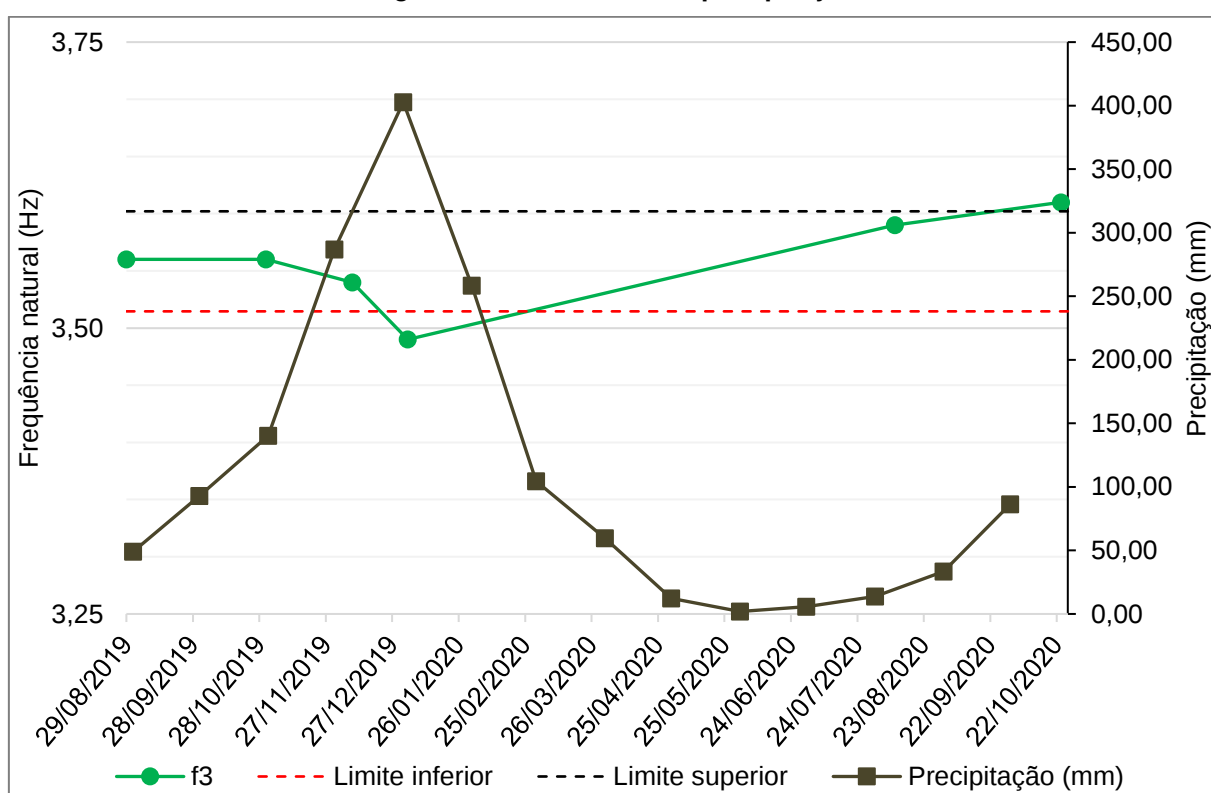
Figura 54 - Análise da f_1 e precipitação



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Figura 55 - Análise da f_2 e precipitação

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Figura 56 - Análise da f_3 e precipitação

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

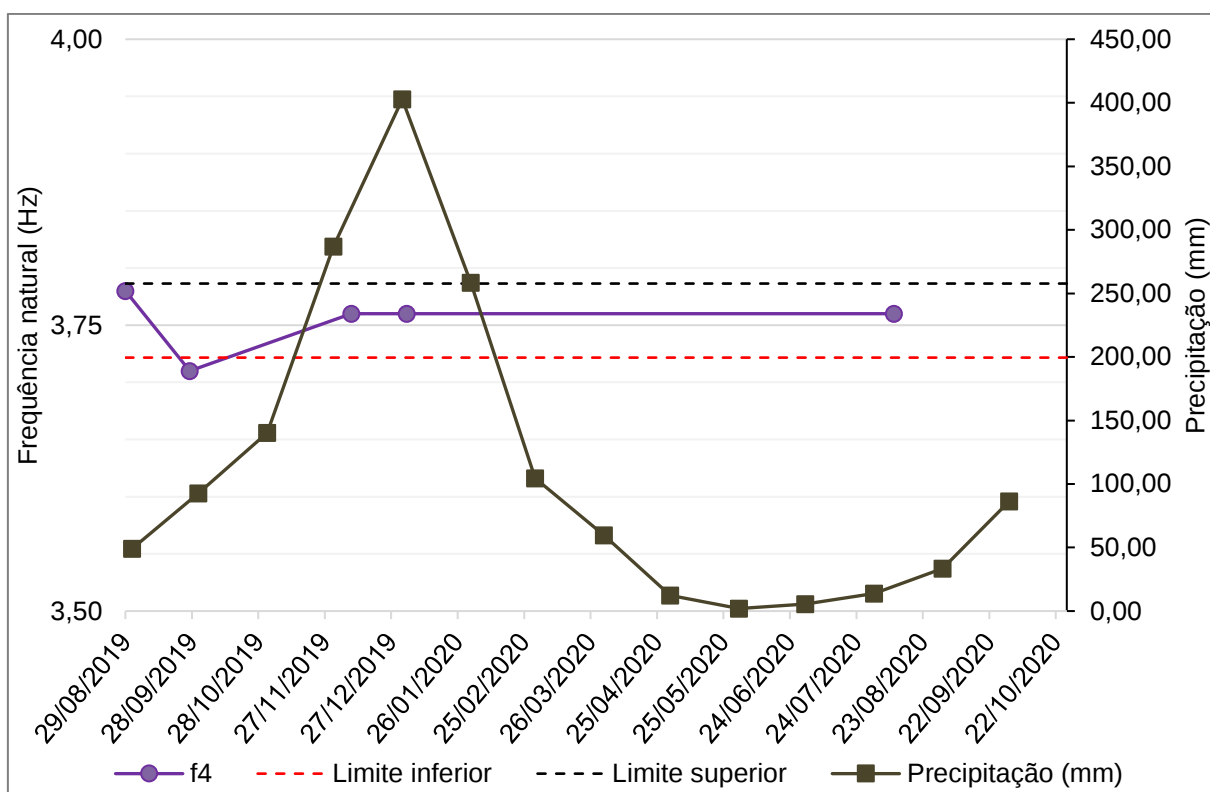
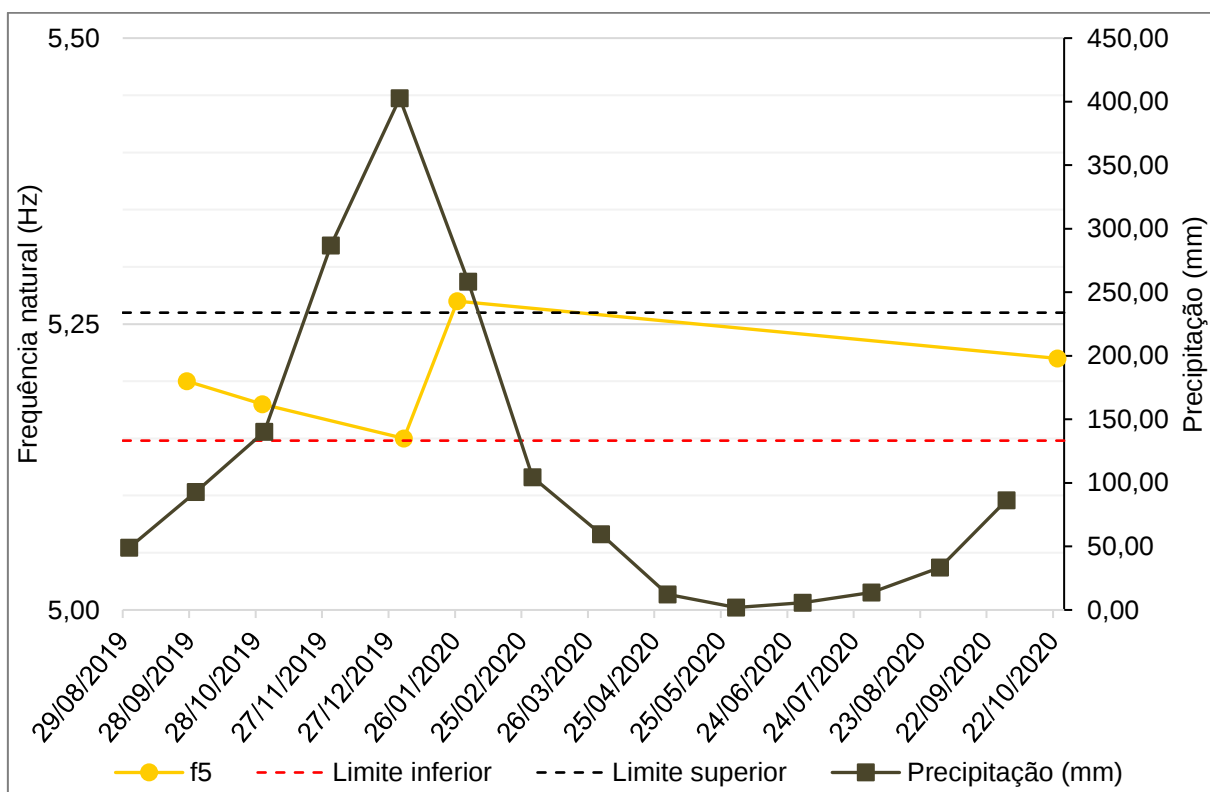
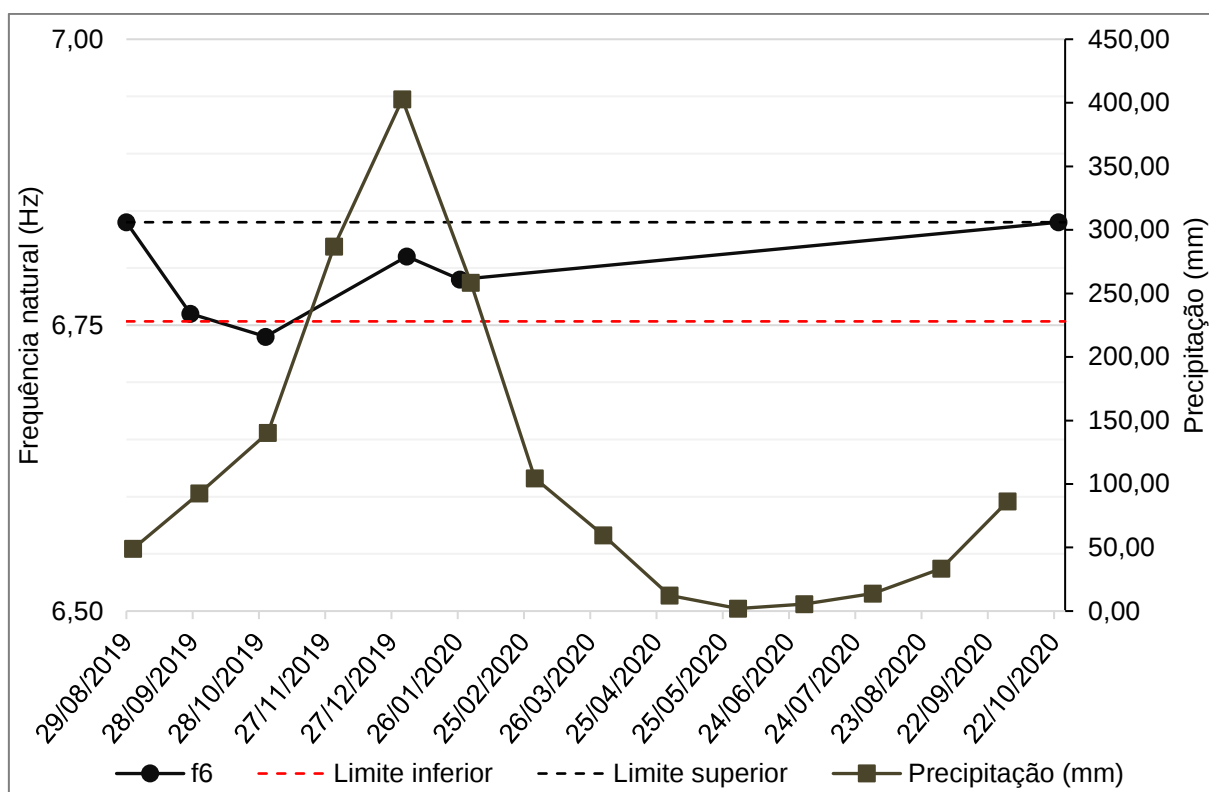
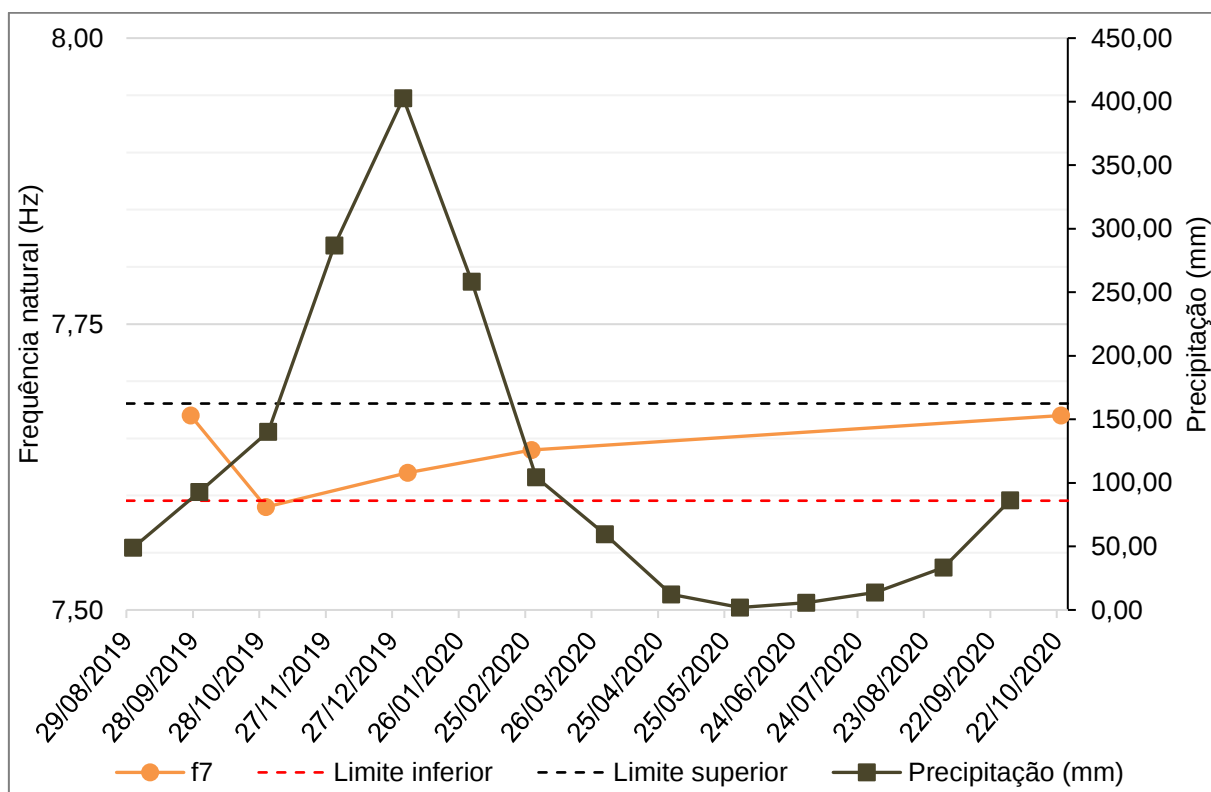
Figura 57 - Análise da f_4 e precipitaçãoFigura 58 - Análise da f_5 e precipitação

Figura 59 - Análise da f_6 e precipitação

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Figura 60 - Análise da f_7 e precipitação

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Pelas precipitações dos gráficos anteriores, não é possível perceber qualquer tipo de alteração nos valores das frequências naturais com os valores das precipitações.

Por outro lado, analisando as leituras do INA 04B após o estágio de reforço, ocorrido entre 07/04/2020 a 02/06/2020, constata-se um aumento do nível de água da barragem (ou pelo menos na região do instrumento) de 1.060,65 para 1.064,67 m (Tabela 8), supostamente devido ao reforço da Barragem B2, pois, quando se analisa as chuvas do período entre os meses de maio, junho, julho e agosto de 2020, verifica-se as menores precipitações do ano, sendo respectivamente de 12,3 mm; 2 mm; 5,6 mm e 13,8 mm.

Logo, pode-se averiguar que o reforço da barragem aumentou o valor do nível d'água no maciço medido pelo indicador de nível d'água, INA 04B. Isso pode ser inferido, uma vez que a quantidade precipitada durante e após o reforço foi muito pouca, mostrando que o aumento do nível d'água não seria devido ao regime de chuvas.

Além disso, pela aplicação de carga em um determinado maciço de solo, a tendência é de que a poropressão aumente por um determinado tempo até que ocorra a sua dissipação. O que foi possível de se confirmar com a equipe da mineradora, a qual informou que atualmente o nível d'água se encontra nas cotas anteriores ao reforço.

4.4 INFLUÊNCIA DO REFORÇO DA BARRAGEM NAS FREQUÊNCIAS NATURAIS

Em termos dos valores apresentados na Tabela 5, verifica-se que o reforço da barragem pode ter aumentado ligeiramente os valores de frequências naturais em relação aos valores médios. Das frequências apontadas na mesma tabela (f_1 a f_7), de todas elas identificadas após o reforço da barragem, sinalizadas por um asterisco (*), apenas uma (valor igual a 3,17 Hz) apresentou valor abaixo do valor médio, o restante apresentou valor igual (apenas um valor igual 2,51 Hz) ou ligeiramente superiores aos valores médios (3,20; 3,59; 3,61; 5,22; 6,84; 7,67 Hz).

Porém, como as variações nos valores das frequências são muito pequenos, essa obra de reforço não influenciou de forma significativa os valores das frequências naturais. O ligeiro aumento nos valores em relação aos valores médios, poderia estar relacionado ao pequeno incremento de rigidez da barragem. Essa relação no valor da frequência natural pode ser explicada com o auxílio da equação (4) apresentada no item 2.1.1.1:

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (4)$$

Depreende-se que o ligeiro aumento da frequência natural (ω) em relação ao valor médio é devido ao aumento de rigidez (k), após a obra de reforço por enrocamento (Figura 33). Porém, esse aumento foi muito pequeno, uma vez que, como o nível d'água também subiu, isso caracteriza a inserção de mais material no maciço, nesse caso a água e o enrocamento. Portanto, realizando um acréscimo de massa (m) na estrutura, balanceando o membro direito da equação, fazendo com que houvesse uma equivalência e por isso não aumentou significativamente o valor da frequência natural.

Entretanto, não há diretrizes que possam definir de maneira quantitativa quando as alterações nos valores de frequências naturais podem ser indicativos de perda de segurança em barragens, muito menos para barragens de rejeitos de mineração. Cada uma dessas estruturas geotécnicas são únicas e possuem um comportamento distinto.

5 CONCLUSÃO

A pesquisa objetivou identificar as frequências naturais de uma barragem de rejeitos de mineração. Para isso foram realizados ensaios a partir da Análise Modal Operacional para a identificação desses parâmetros. As leituras obtidas foram processadas em scripts baseados na técnica de Decomposição no Domínio da Frequência e foram obtidos os espectros dos valores singulares de frequência.

A partir do processamento dos resultados foi possível identificar diversas frequências naturais e determinar quais dessas frequências são mais dominantes na estrutura. As frequências naturais dominantes ao final da análise foram as seguintes: 3,19 Hz, 3,56 Hz e 6,80 Hz. Houve a identificação de várias frequências naturais, algumas até com valores inferiores, porém as frequências apresentadas anteriormente se mostram com uma confiabilidade maior para a implementação de um monitoramento a partir desses valores.

Durante o plano de monitoramento houve uma obra de reforço da barragem, caracterizada pela disposição de enrocamento na parte inferior do barramento. Apesar da pouca quantidade de ensaios após a obra de reforço, foi possível verificar um ligeiro aumento nos valores de frequências naturais da barragem em relação aos valores médios. Porém as diferenças nos valores não contribuíram de forma significativa para que a obra de reforço tenha influenciado os valores de frequências naturais.

Outra observação importante é a de que após o reforço, o nível d'água aumentou consideravelmente, pelo menos na região de localização do instrumento, o qual está localizado em uma berma próxima à crista e à região central da barragem. E ao se comparar o nível d'água do instrumento com as frequências naturais da estrutura, não foi possível obter nenhum tipo de relação direta entre os dois parâmetros.

O monitoramento estabelecido se mostra uma boa tecnologia para averiguação das vibrações na barragem. No ensaio, pode-se obter valores de amplitudes e principalmente valores de frequências naturais. E pelo fato de a frequência natural estar relacionada à valores de rigidez e massa, um acompanhamento pode ser estabelecido para verificação de quaisquer alterações nesse valor, podendo indicar alguma mudança no comportamento da barragem durante a operação.

A temática sobre segurança de barragens, principalmente barragens de rejeitos de mineração é um assunto muito mencionado atualmente e é evidente que essas estruturas sejam monitoradas por sistemas eficientes e confiáveis. Mas não basta

apenas obter esses resultados, é preciso analisá-los criticamente e verificar qual seria o provável comportamento do maciço.

A concepção de um sistema de monitoramento confiável e redundante não é uma tarefa fácil. Existem diversas técnicas e equipamentos disponíveis no mercado. O que fará diferença é o que se pretende medir/monitorar e o quão confiável esse sistema se apresenta.

5.1 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestão para trabalhos futuros, recomenda-se a realização da Análise Modal Operacional em outra barragem que se encontra em operação e que possua dados da caracterização do rejeito, e outros instrumentos de monitoramento disponíveis, principalmente piezômetros, para verificar a influência das poropressões no interior do maciço e marcos superficiais monitorados constantemente para verificação em seu histórico de algum evento significativo de movimentação da barragem durante o monitoramento da frequência natural. Além disso, sugere-se a realização de ensaios conforme o primeiro realizado nessa pesquisa, por incorporar uma quantidade maior de pontos ao longo das bermas da barragem, garantindo assim uma maior confiabilidade dos dados obtidos em campo.

Outra sugestão para pesquisa futura, seria o desenvolvimento de um modelo numérico da barragem e realizar as análises antes e depois do reforço em confronto com os dados da instrumentação, ensaios de campo e ensaios de laboratório.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDULAMIT, A. et al. Ambient vibration tests at some buttress dams in Romania. **Procedia Engineering**, v. 199, p. 2196–2201, 2017.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **HIDROWEB**. Disponível em: <https://www.snirh.gov.br/hidroweb/serieshistoricas>. Acesso em: 21 maio. 2021.

AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO. **Relatório Quantitativo**. Disponível em: <https://app.anm.gov.br/SIGBM/Publico/Estatistica>. Acesso em: 4 maio. 2021.

ALBUQUERQUE FILHO, L. H. **Avaliação do comportamento geotécnico de barragens de rejeitos de minério de ferro através de ensaios de piezocone**. Ouro Preto: Universidade Federal de Ouro Preto, 2004.

ALBUQUERQUE, R. et al. Caracterização de barragens de rejeito usando geofísica rasa aplicação na barragem B1 de Cajati, São Paulo. **Anuário do Instituto de Geociências - UFRJ**, v. 42, n. 1, p. 567–579, 13 maio 2019.

ALMEIDA, M. T. DE. **Vibrações mecânicas para engenheiros**. 2. ed. São Paulo: Blucher, 1990.

ALVES, S. W.; HALL, J. F. System identification of a concrete arch dam and calibration of its finite element model. **Earthquake Engineering and Structural Dynamics**, v. 35, n. 11, p. 1321–1337, 2006.

ARAÚJO, I. D. G. **Análise Modal Operacional: Métodos de Identificação Baseados em Transmissibilidade**. [s.l.] Universidade de São Paulo, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15307: Ensaios não destrutivos - Provas de cargas dinâmicas em grandes estruturas - Procedimento**. Rio de Janeiro, 2006.

BARROS, A. J. DA S.; LEHFELD, N. A. DE S. **Fundamentos de metodologia científica: Um guia para iniciação científica**. 2. ed. São Paulo: Makron Books, 2000.

BOLINA, C. C. et al. **Vibrações: as frequências naturais estimada e experimental de uma estrutura**. Congresso Nacional de Matemática Aplicada à Indústria. **Anais...**Caldas Novas: 2014.

BRANDT, A. **Noise and vibration analysis: Signal analysis and experimental procedures**. [s.l.] John Wiley & Sons, 2011.

BRASIL, R. M. L. R. F.; SILVA, M. A. **Introdução à dinâmica das estruturas**. São Paulo: Blucher, 2015.

BRINCKER, R.; VENTURA, C. E. **Introcuction to operational modal analysis**. [s.l.] John Wiley & Sons, 2015.

BRINCKER, R.; ZHANG, L.; ANDERSEN, P. Modal identification of output-only systems using frequency domain decomposition. **Smart Materials and Structures**, v. 10, p. 441–445, 2001.

CAPUTO, H. P.; CAPUTO, A. N.; RODRIGUES, J. M. DE A. **Mecânica dos solos e suas aplicações: mecânica das rochas, fundações e obras de terra**. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2015.

CASTRO, R. R. et al. Determination of the characteristic frequency of two dams located in the region of Calabria, Italy. **Bulletin of the Seismological Society of America**, v. 88, n. 2, p. 503–511, 1998.

CHAKRABORTY, S. et al. Natural frequency of earthen dams at different induced strain levels. **Engineering Geology**, v. 248, p. 330–345, jan. 2019.

CHENG, L. et al. Online modal identification of concrete dams using the Subspace Tracking-Based Method. **Shock and Vibration**, v. 2019, p. 1–18, 23 abr. 2019.

CHIOSSI, N. J. **Geologia de engenharia**. 3. ed. São Paulo: Oficina de textos, 2013.

CLOUGH, R. W.; PENZIEN, J. **Dynamics of Structures**. 3. ed. Berkeley: Computers & Structures, 1995.

COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS. **Apresentação das Barragens**. Disponível em: [http://www.cbdb.org.br/5-38/Apresentação das Barragens](http://www.cbdb.org.br/5-38/Apresentação%20das%20Barragens). Acesso em: 30 ago. 2019.

COSTA, W. D. **Geologia de barragens**. São Paulo: Oficina de textos, 2012.

CUNHA, Á.; CAETANO, E. Experimental modal analysis of civil engineering structures. **Sound and Vibration**, p. 12–20, 2006.

DARBRE, G. R.; DE SMET, C. A. M.; KRAEMER, C. Natural frequencies measured from ambient vibration response of the arch dam of Mauvoisin. **Earthquake Engineering & Structural Dynamics**, v. 29, n. 5, p. 577–586, maio 2000.

EL-DAKHAKHNI, W. W. et al. Response sensitivity of blast-loaded reinforced concrete

structures to the number of degrees of freedom. **Canadian Journal of Civil Engineering**, v. 36, n. 8, p. 1305–1320, 2009.

EL-MAHDY, O. et al. Application of AEM in progressive collapse dynamics analysis of R.C. structures. **Civil Engineering Journal**, v. 26, n. 3, p. 315–332, 2017.

ENSSLIN, L. et al. **ProKnow-C, Knowledge Development Process - Construtivist. Processo técnico com patente de registro pendente junto ao INPI**. Brasil, 2010.

EWINS, D. J. **Modal testing: theory, practice and application**. 2. ed. Baldock: Research Studies Press, 2000.

FERREIRA, A. C. N. **Identificação modal e actualização de modelos de elementos finitos**. Lisboa: Universidade Nova de Lisboa, 2013.

GERSCOVICH, D. M. S. **Estabilidade de taludes**. 2. ed. São Paulo: Oficina de textos, 2016.

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2009.

GOOGLE EARTH. **Google Earth**. Disponível em: <https://www.google.com.br/earth/>. Acesso em: 24 maio. 2021.

GRAÇA, N. L. S. DE S.; FAGGION, P. L. Validação da determinação de deslocamentos relativos em barragens utilizando Topografia e Medidores Triortogonais de Junta. **Revista Brasileira de Geomática**, v. 4, n. 2, p. 89–98, 2016.

HANIF, M. U. et al. Damage assessment of reinforced concrete structures using a model-based nonlinear approach – A comprehensive review. **Construction and Building Materials**, v. 192, p. 846–865, 2018.

HE, J.; FU, Z.-F. **Modal analysis**. Oxford: Butterworth-Heineman, 2001.

HERLUFSEN, H. et al. **Identification techniques for operational modal analysis - An overview and practical experiences**. Dinamarca, 2005. Disponível em: <https://www.semanticscholar.org/paper/IDENTIFICATION-TECHNIQUES-FOR-OPERATIONAL-MODAL---Herlufsen-Brüel/ecdebcee90589af8b972b6237f06d54d0685eb00>. Acesso em: 28 set. 2019.

HUI, S. (ROB); CHARLEBOIS, L.; SUN, C. Real-time monitoring for structural health, public safety, and risk management of mine tailings dams. **Canadian Journal of Earth Sciences**, v. 55, n. 3, p. 221–229, 2018.

JIN, J. et al. Variation of pore water pressure in tailing sand under dynamic loading. **Shock and Vibration**, v. 2018, p. 1–13, 2018.

LISEIKIN, A. V.; SELEZNEV, V. S.; ADILOV, Z. A. Determining the natural frequencies and modes of vibration of the Chirkey Arch Dam by the Standing-Wave Method. **Power Technology and Engineering**, v. 53, n. 1, p. 39–43, 3 maio 2019.

LISEIKIN, A. V.; SELEZNEV, V. S.; ADILOV, Z. A. Monitoring of the natural frequencies of Chirkey arch dam. **Magazine of Civil Engineering**, v. 96, n. 4, p. 15–26, 2020.

MACHADO, W. G. DE F. **Monitoramento de barragens de contenção de rejeitos da mineração**. São Paulo: Biblioteca Digital de Teses e Dissertações da Universidade de São Paulo, 3 dez. 2007.

MARTINS, C. J. **SYSModal**. Belo Horizonte, 2016.

MASJEDIAN, M. H.; KESHMIRI, M. **A review on operational modal analysis researches: Classification of methods and applications**. IOMAC 2009 - 3rd International Operational Modal Analysis Conference. **Anais...** 1 jan. 2009.

MO, Y. L. **Dynamic behavior of concrete structures**. Amsterdam: Elsevier Science, 1994.

NEVES, L. P. **Segurança de Barragens - Legislação federal brasileira em segurança de barragens comentada**. Brasília: Agência Nacional de Mineração, 2018.

NÓBREGA, P. G. B. DA; HANAI, J. B. DE. **A análise modal na avaliação de estruturas de concreto pré-moldado**. 1º Encontro Nacional de Pesquisa-Projeto-Produção em Concreto Pré-moldado. **Anais...** São Carlos: 2005.

NOVAK, P. et al. **Hydraulic Structures**. 4. ed. Abingdon: Taylor & Francis, 2007.

OLIVEIRA, S. et al. **Monitorização e modelação do comportamento dinâmico de barragens de betão**. VII Congresso de Mecânica Aplicada e Computacional. **Anais...** Évora: 2003.

OLIVEIRA, S.; TOADER, A.-M.; VIEIRA, P. Damage identification in a concrete dam by fitting measured modal parameters. **Nonlinear Analysis: Real World Applications**, v. 13, n. 6, p. 2888–2899, dez. 2012.

PARISH, Y.; SADEK, M.; SHAHROUR, I. Numerical analysis of the seismic behaviour of earth dam. **Natural Hazards and Earth System Sciences**, v. 9, n. 2, p. 451–458, 23 mar. 2009.

PAZ, M.; LEIGH, W. **Structural Dynamics**. 5. ed. New York: Springer, 2004.

PEREIRA, S. et al. Modal identification of concrete dams under natural excitation. **Journal of Civil Structural Health Monitoring**, v. 11, p. 465–484, 11 abr. 2021a.

PEREIRA, S. et al. Vibration-based damage detection of a concrete arch dam. **Engineering Structures**, v. 235, maio 2021b.

RAINIERI, C.; FABBROCINO, G. **Operational analysis of civil engineering structures: An introduction and guide for applications**. [s.l.] Springer, 2014.

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

REPÚBLICA FEDERATIVA DO BRASIL. LEI Nº 12.334, DE 20 DE SETEMBRO DE 2010. . 2010.

REYNDERS, E. System identification methods for (operational) Modal Analysis: review and comparison. **Archives of Computational Methods in Engineering**, v. 19, n. 1, p. 51–124, 9 mar. 2012.

RODRIGUES, J. **Identificação Modal Estocástica: métodos de análises e aplicações em estruturas de engenharia civil**. Porto: Universidade do Porto, 2004.

SABBO, G. R.; ASSIS, M. M. G. DE; BERTERQUINI, A. B. T. Barragens de retenção de rejeitos mineração. **Engenharia em Ação UniToledo**, v. 2, n. 1, p. 3–15, 2017.

SANTANA, P. H. R.; MOTA, O. DE S. Estudo comparativo dos métodos construtivos de barragens de rejeitos sob o ponto de vista da geotecnia. **Revista Científica Semana Acadêmica**, v. 1, 2019.

SCHNAID, F.; ODEBRECHT, E. **Ensaio de campo e suas aplicações à engenharia**. 2. ed. São Paulo: Oficina de textos, 2012.

SEVIM, B. et al. Modal parameter identification of a prototype arch dam using enhanced frequency domain decomposition and stochastic subspace identification techniques. **Journal of Testing and Evaluation**, v. 38, n. 5, 2010.

SEVIM, B.; BAYRAKTAR, A.; ALTUNISIK, A. C. Finite element model calibration of berke arch dam using operational modal testing. **JVC/Journal of Vibration and**

Control, v. 17, n. 7, p. 1065–1079, 2011.

SHREVE, D. H. **Signal processing for effective vibration analysis**. Columbus: [s.n.].

SILVA, E. L. DA; MENEZES, E. M. **Metodologia da pesquisa e elaboração de dissertação**. Florianópolis: UFSC, 2005.

SILVEIRA, J. F. A. **Instrumentação e Segurança de Barragens de Terra e Enrocamento**. São Paulo: Oficina de textos, 2006.

SORIANO, H. L. **Introdução à dinâmica das estruturas**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2014.

TARINEJAD, R.; AHMADI, M. T.; HARICHANDRAN, R. S. Full-scale experimental modal analysis of an arch dam: The first experience in Iran. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, v. 61–62, p. 188–196, jun. 2014.

TARINEJAD, R.; POURGHOLI, M. Modal identification of arch dams using balanced stochastic subspace identification. **JVC/Journal of Vibration and Control**, v. 24, n. 10, p. 2030–2044, 2018.

TAVARES, M. A. O. **Identificação modal e monitorização dinâmica de uma ponte em arco**. Porto: Faculdade de Engenharia Universidade do Porto, 2013.

THOMÉ, R.; PASSINI, M. L. Barragens de rejeitos de mineração: características do método de alteamento para montante que fundamentaram a suspensão de sua utilização em Minas Gerais. **Ciências Sociais Aplicadas em Revista**, v. 18, n. 34, p. 49–65, 2018.

THOMSON, W. T. **Teoria das vibrações com aplicações**. Rio de Janeiro: Interciência, 1978.

TURKER, T.; BAYRAKTAR, A.; SEVIM, B. Vibration based damage identification of concrete arch dams by finite element model updating. **Computers and Concrete**, v. 13, n. 2, p. 209–220, 2014.

VALERIUS, M. B. **Cadastro e análise do potencial de risco das barragens de rejeitos de mineração do estado de Goiás**. Brasília: Universidade de Brasília, 2014.

WU, A. et al. Experiment and mechanism of vibration liquefaction and compacting of saturated bulk solid. **Journal of Central South University of Technology**, v. 8, n. 1,

p. 34–39, mar. 2001.

XIAOBING, L. et al. Liquefaction and displacement of saturated sand under vertical vibration loading. **Acta Mechanica Sinica**, v. 20, n. 1, p. 96–105, fev. 2004.

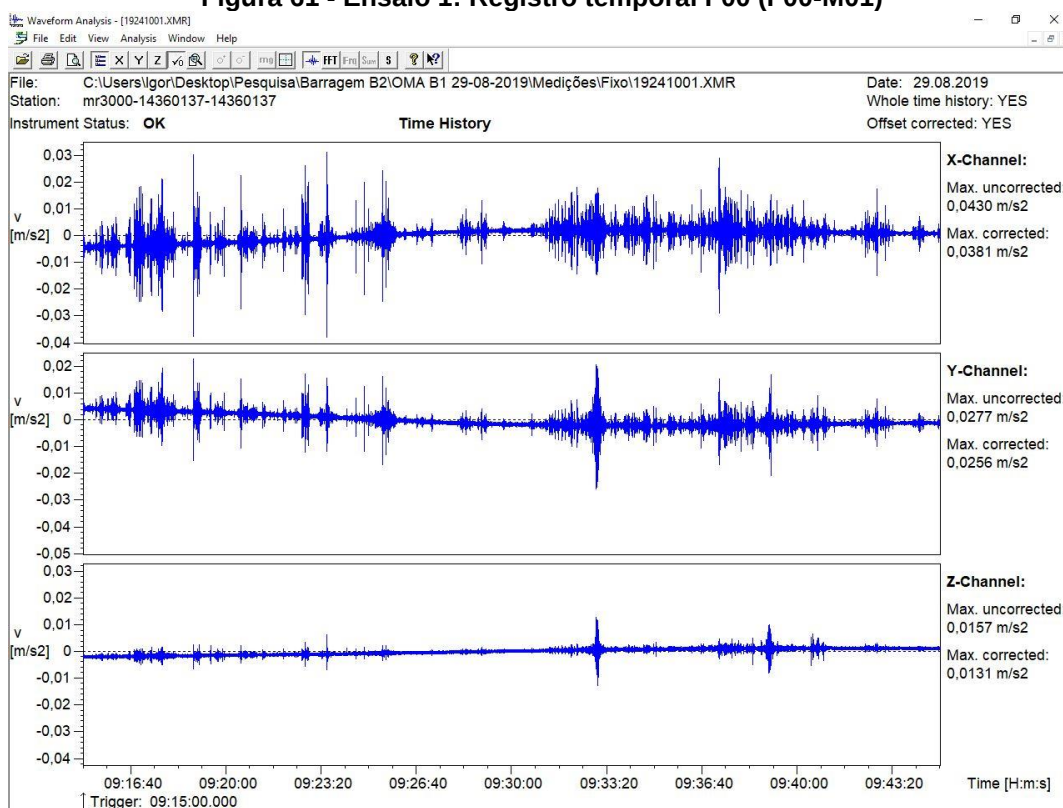
YANG, J. et al. System identification and modal analysis of an arch dam based on earthquake response records. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, v. 92, p. 109–121, jan. 2017.

ZARDARI, M. A. et al. Numerical analyses of earthquake induced liquefaction and deformation behaviour of an upstream tailings dam. **Advances in Materials Science and Engineering**, v. 2017, p. 1–12, 15 fev. 2017.

ZHENG, D.; LI, L.; HUO, Z. **Analysis of ultimate bearing capacity of high concrete arch dam with cracks in service using natural vibration frequency**. Earth and Space 2010. **Anais...** Reston, VA: American Society of Civil Engineers, 11 mar. 2010. Disponível em: <http://ascelibrary.org/doi/10.1061/41096%28366%2937>. Acesso em: 11 set. 2019.

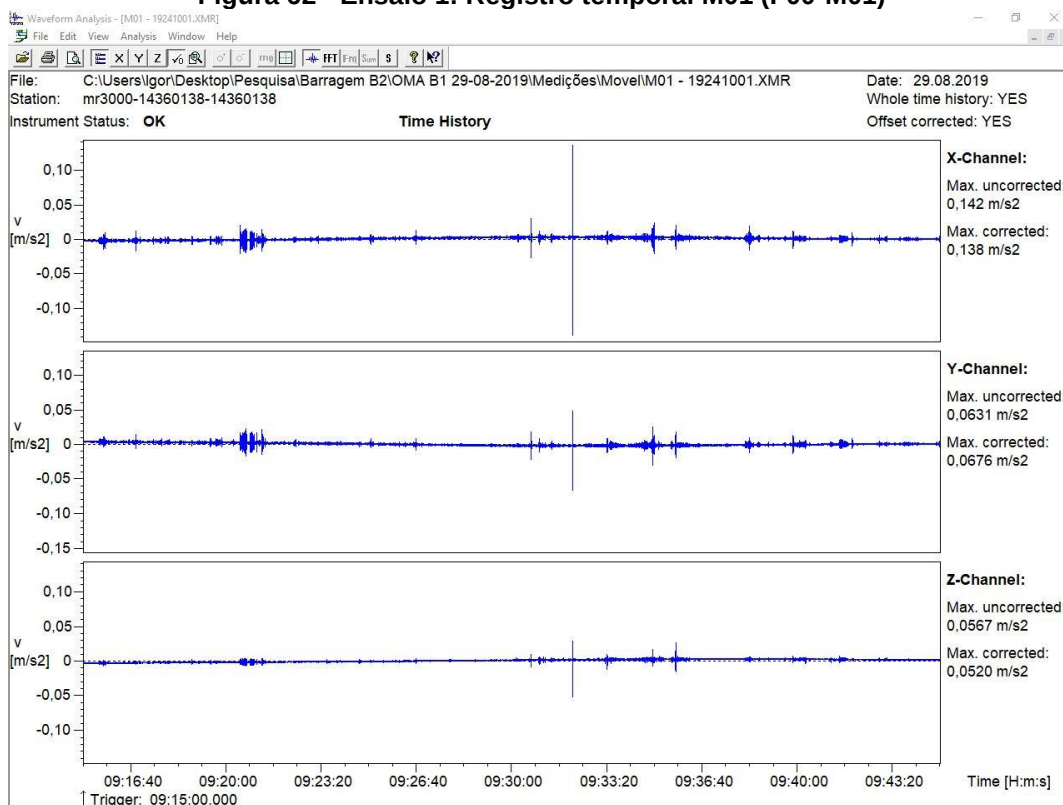
APÊNDICE A – Medições Registradas

Figura 61 - Ensaio 1: Registro temporal F00 (F00-M01)



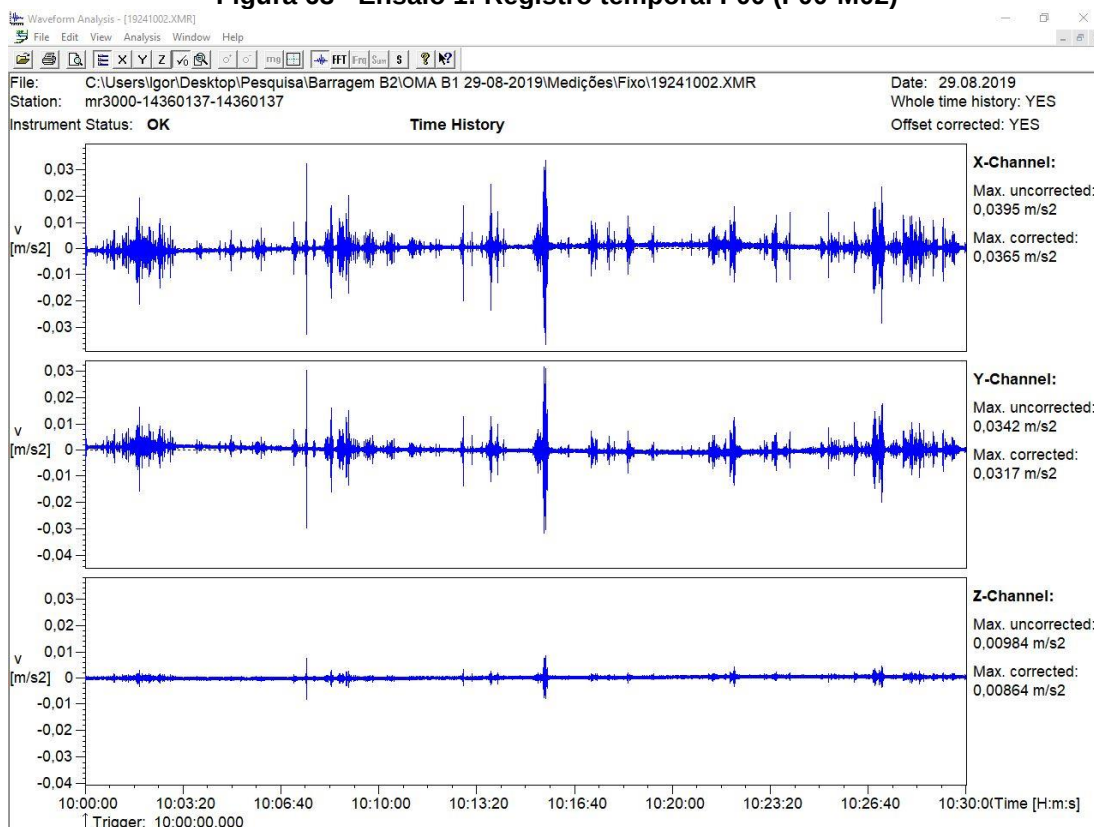
Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Figura 62 - Ensaio 1: Registro temporal M01 (F00-M01)



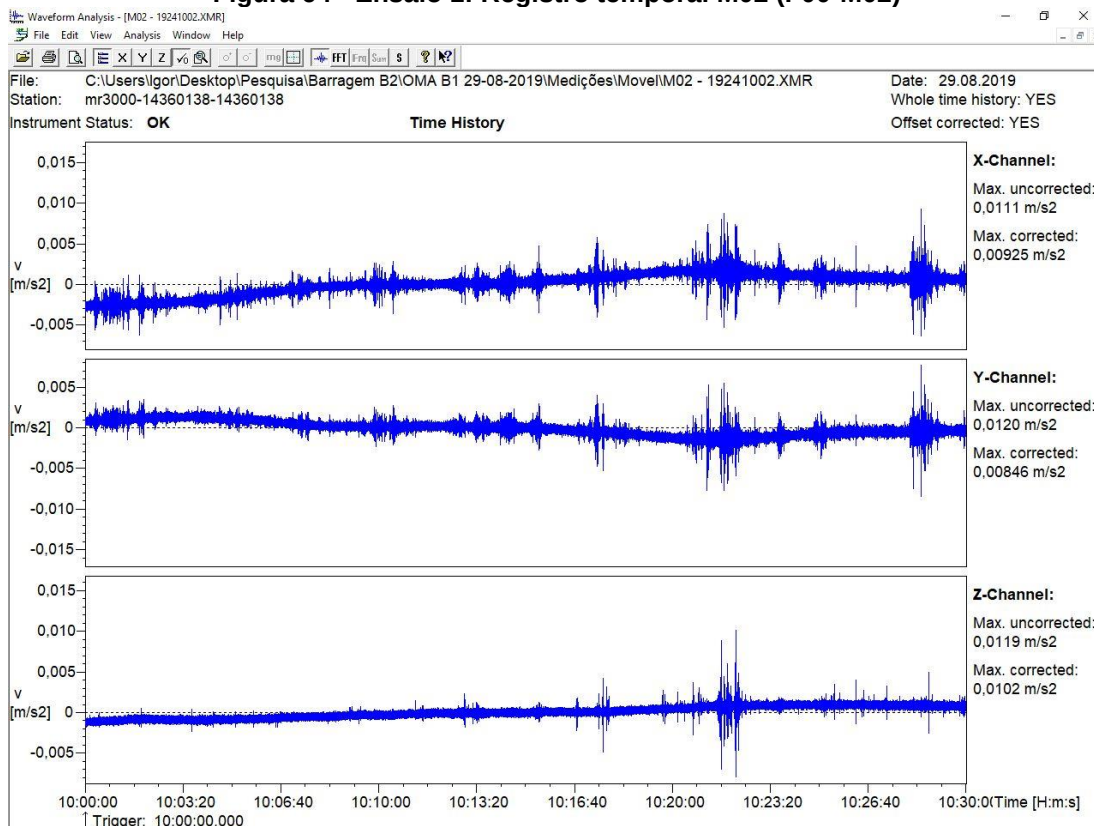
Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Figura 63 - Ensaio 1: Registro temporal F00 (F00-M02)



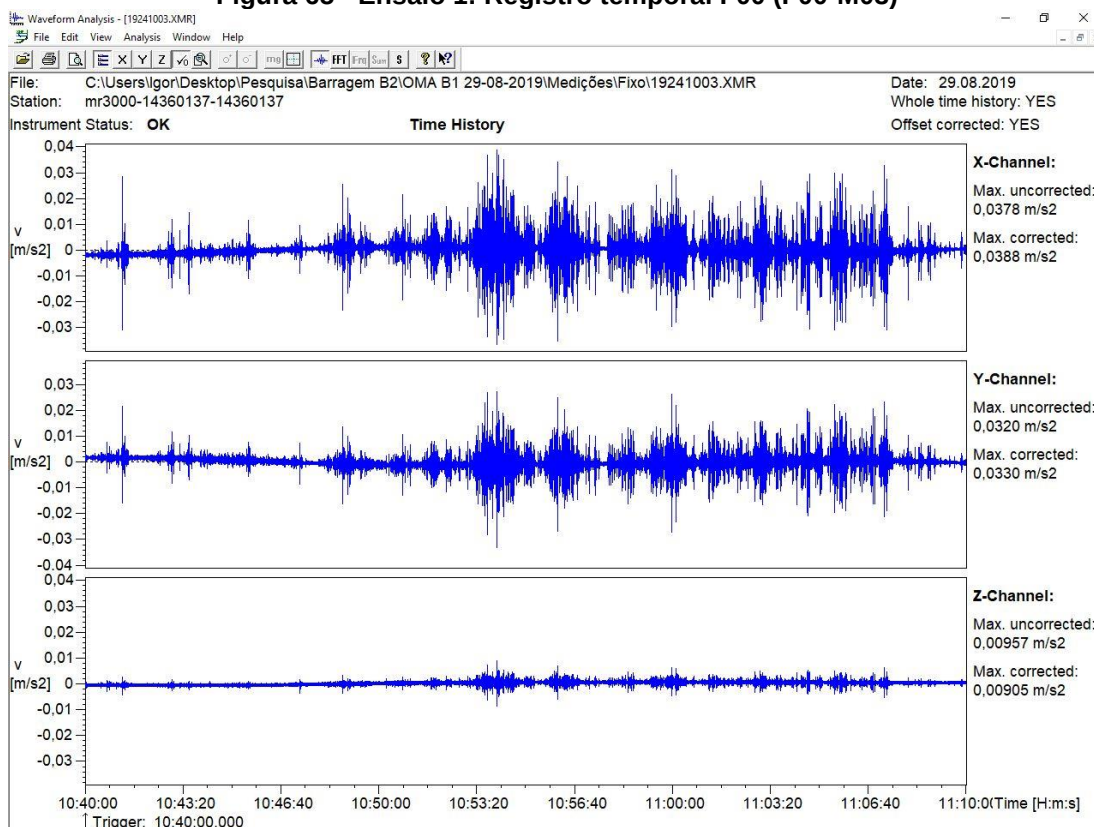
Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Figura 64 - Ensaio 1: Registro temporal M02 (F00-M02)



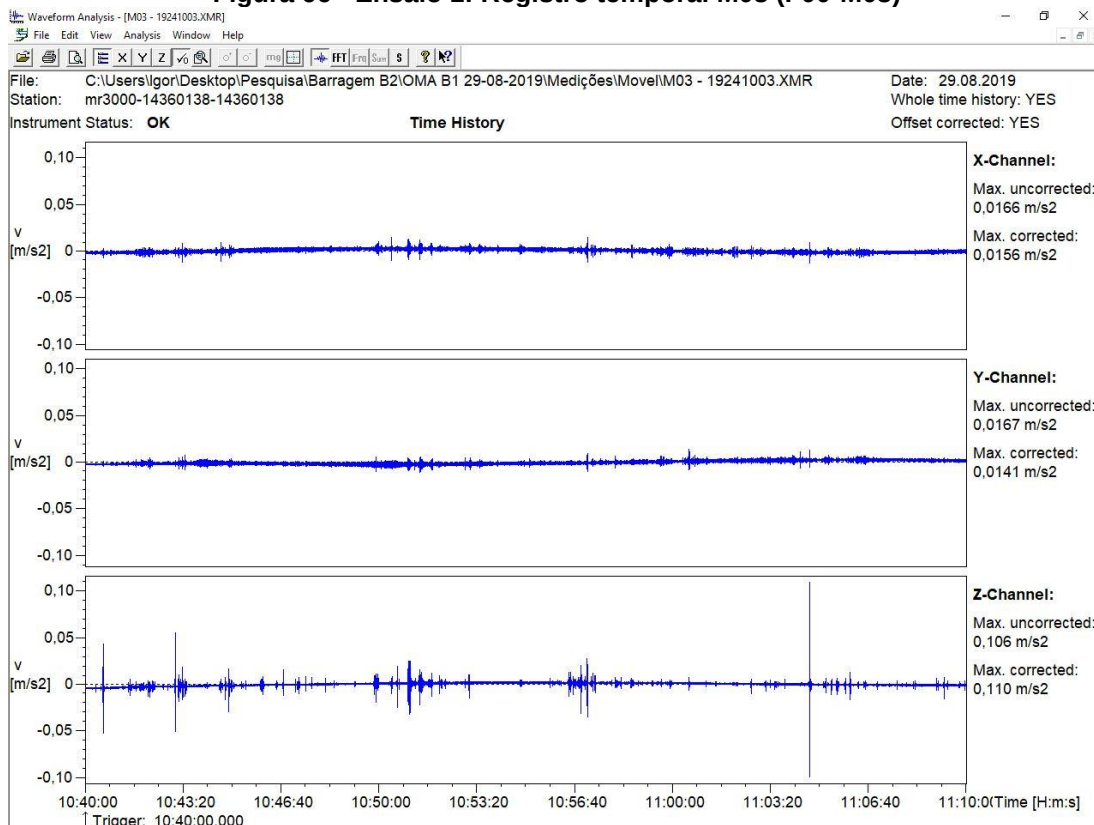
Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Figura 65 - Ensaio 1: Registro temporal F00 (F00-M03)



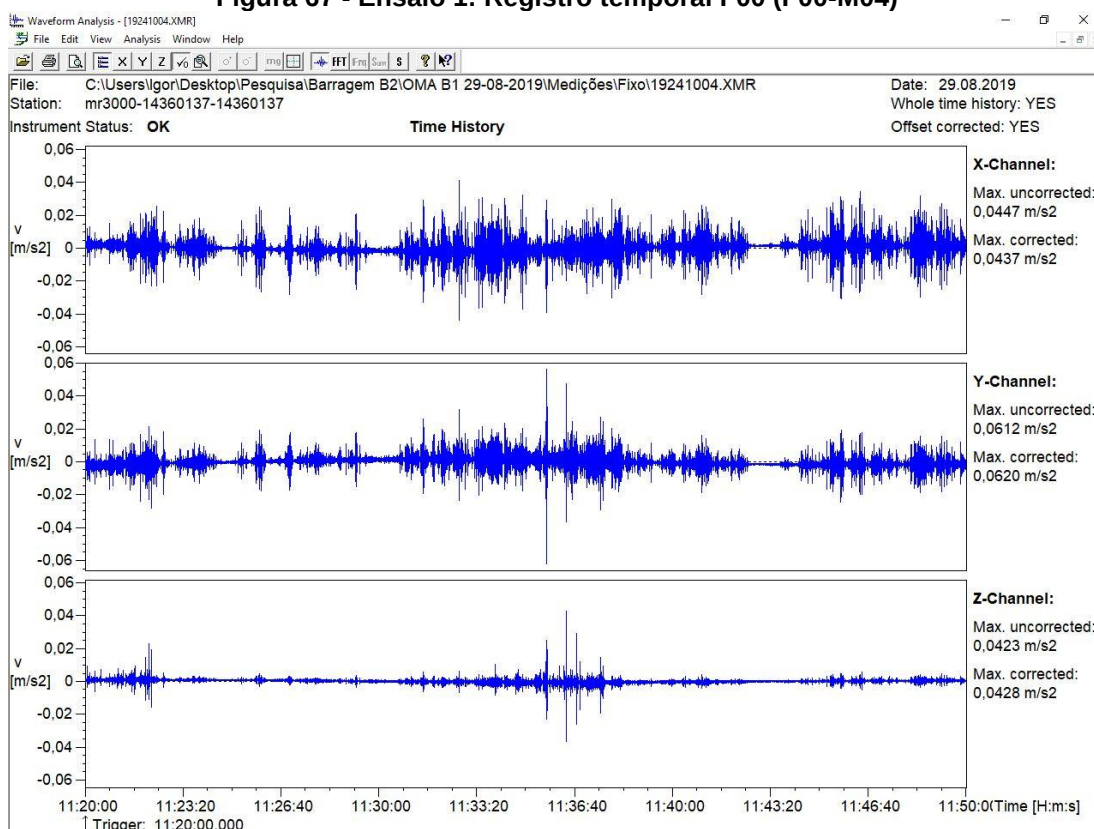
Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Figura 66 - Ensaio 1: Registro temporal M03 (F00-M03)



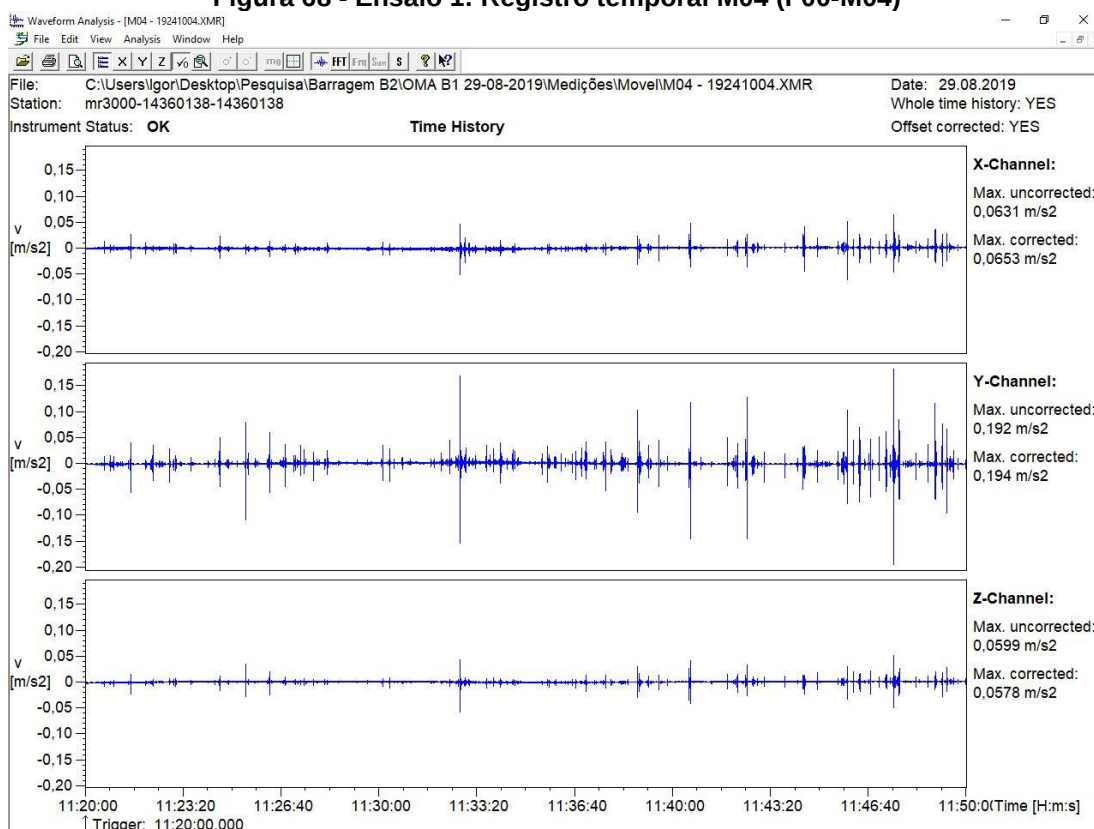
Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Figura 67 - Ensaio 1: Registro temporal F00 (F00-M04)



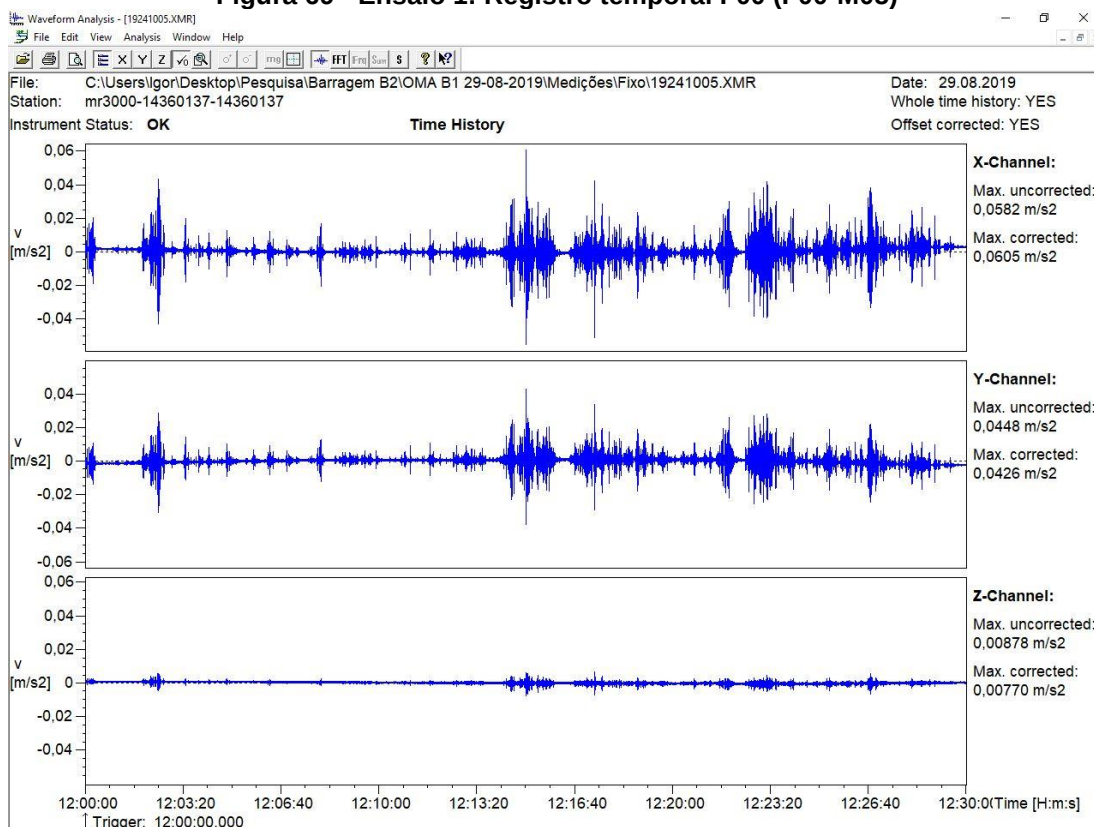
Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Figura 68 - Ensaio 1: Registro temporal M04 (F00-M04)



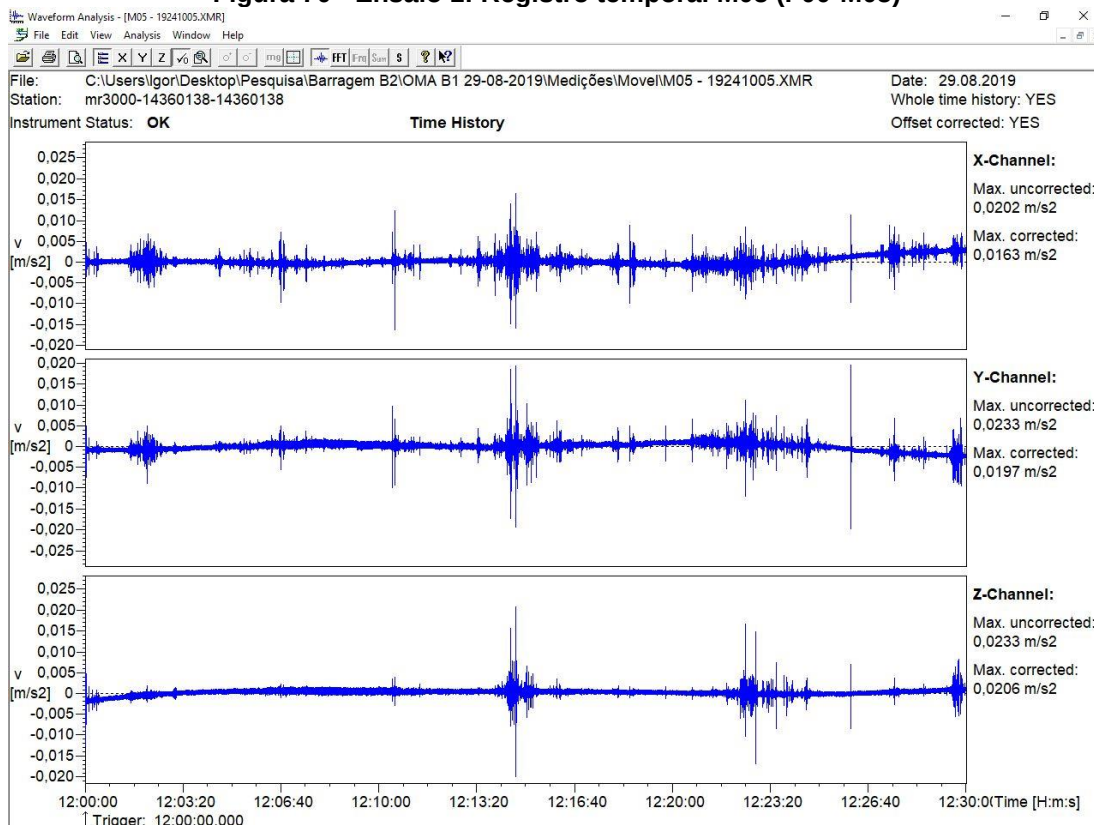
Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Figura 69 - Ensaio 1: Registro temporal F00 (F00-M05)



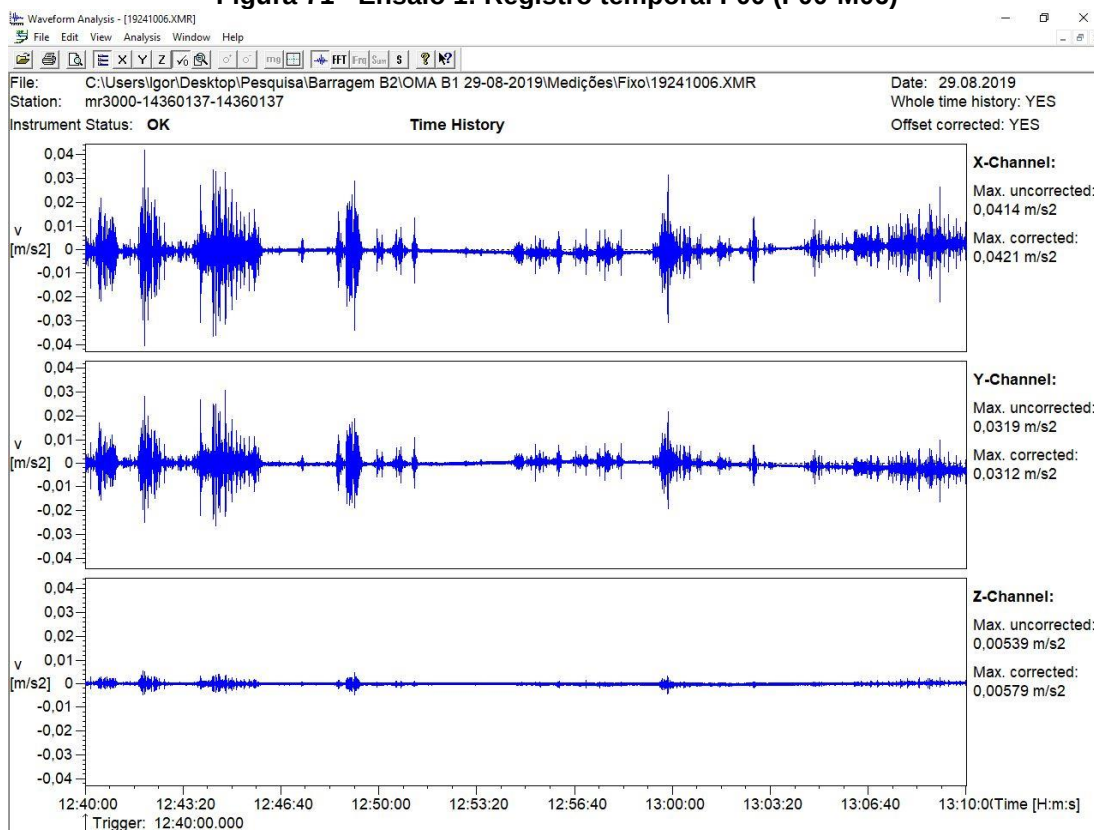
Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Figura 70 - Ensaio 1: Registro temporal M05 (F00-M05)



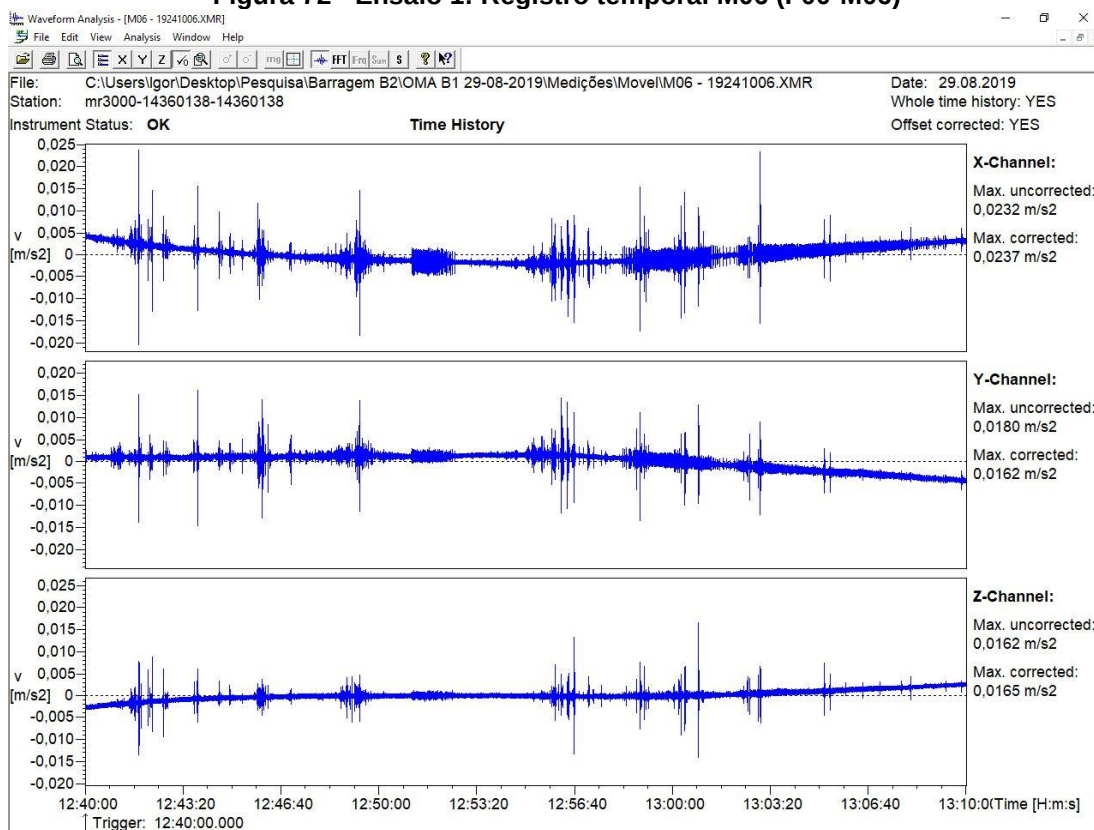
Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Figura 71 - Ensaio 1: Registro temporal F00 (F00-M06)



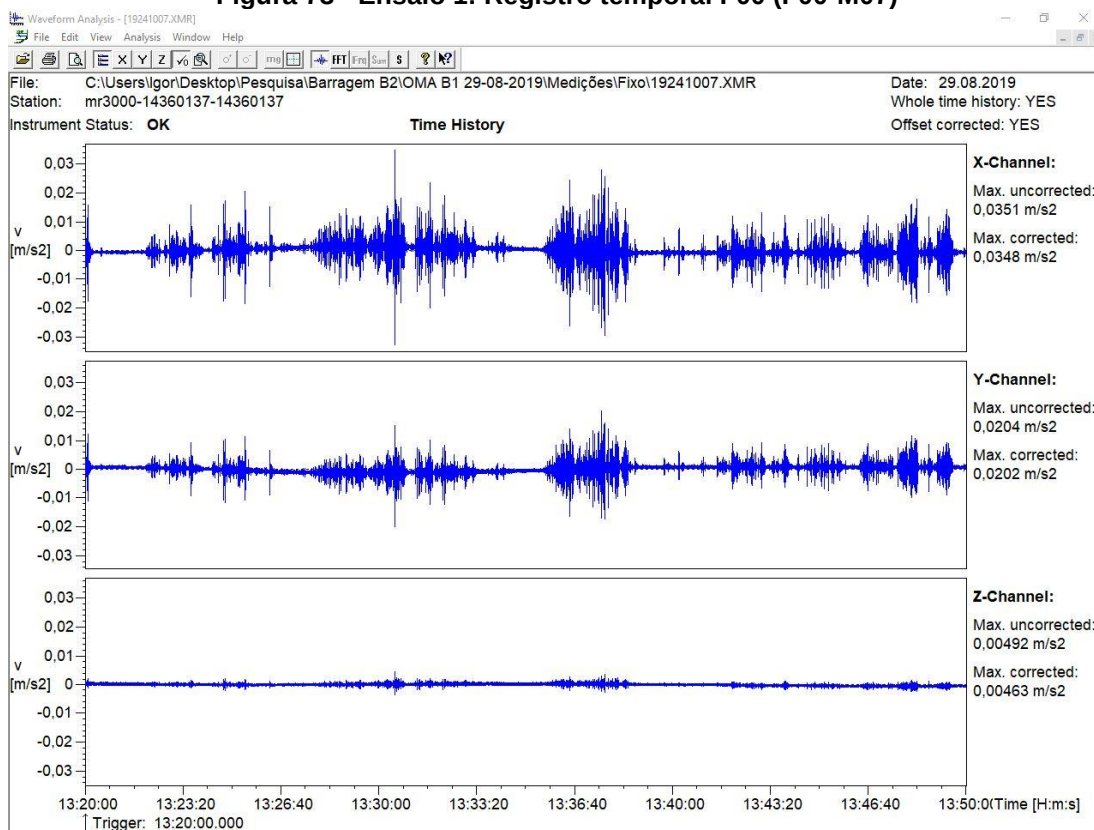
Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Figura 72 - Ensaio 1: Registro temporal M06 (F00-M06)



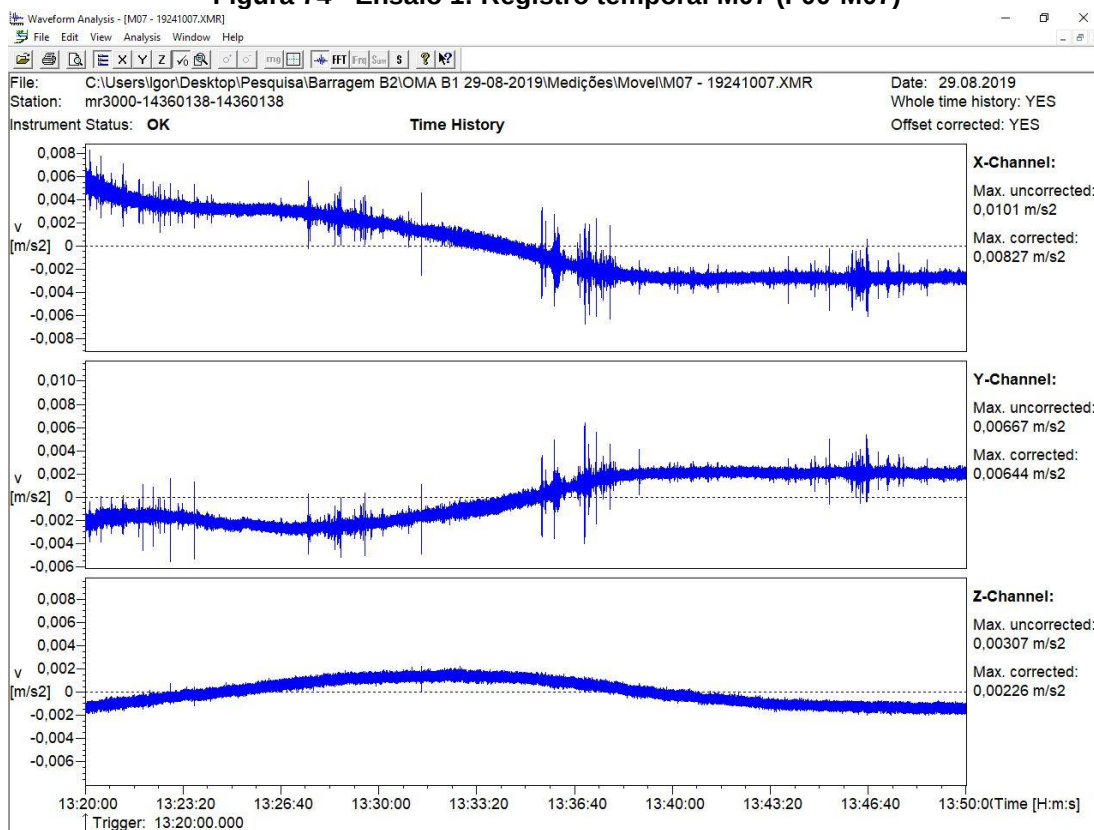
Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Figura 73 - Ensaio 1: Registro temporal F00 (F00-M07)



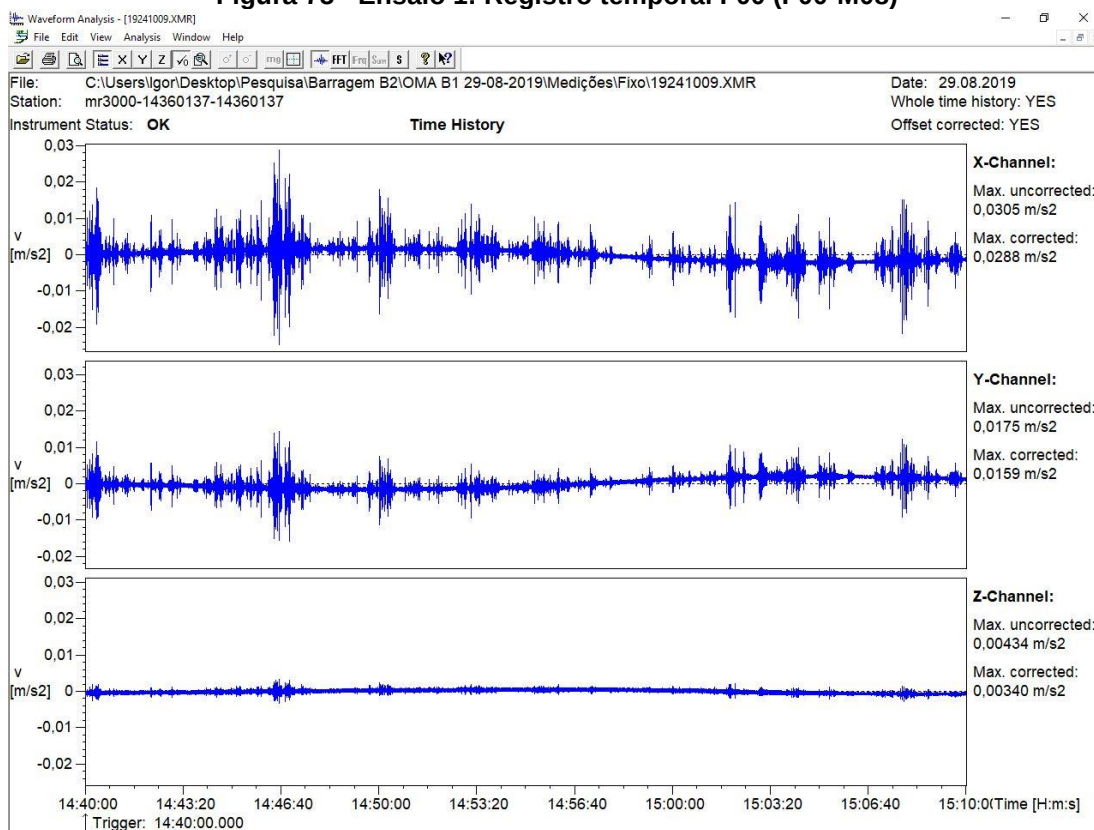
Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Figura 74 - Ensaio 1: Registro temporal M07 (F00-M07)



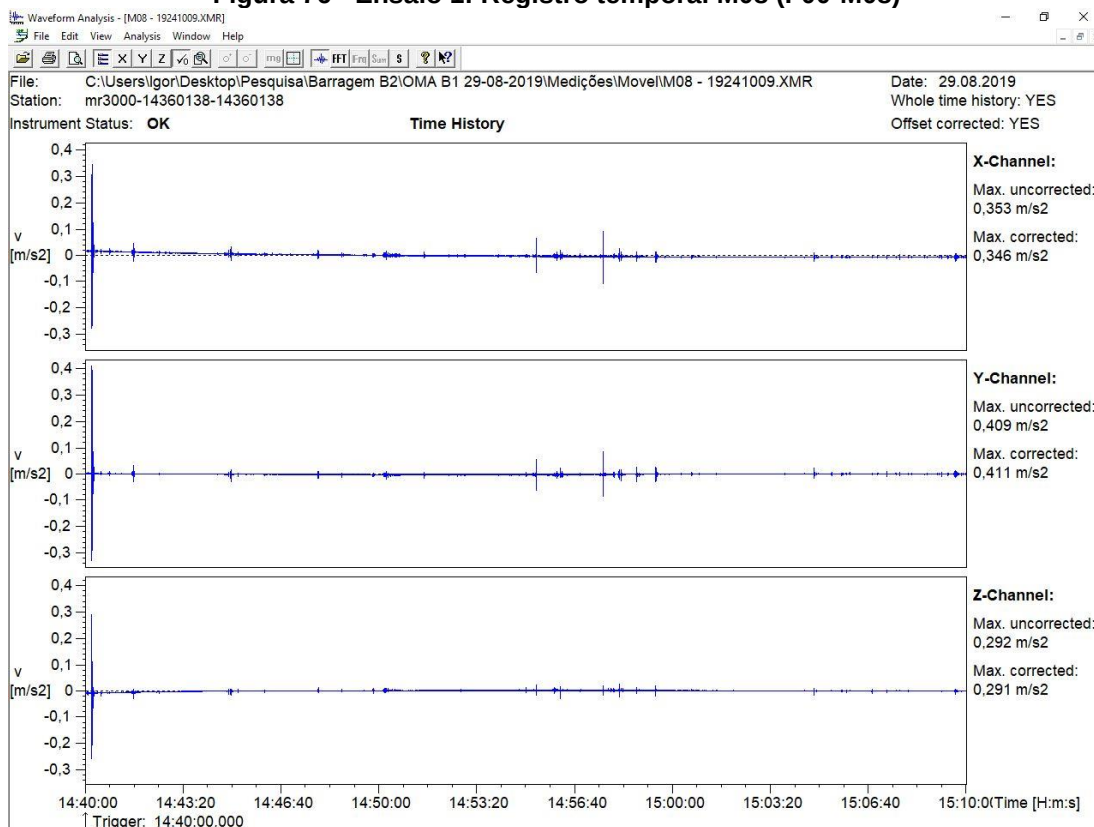
Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Figura 75 - Ensaio 1: Registro temporal F00 (F00-M08)



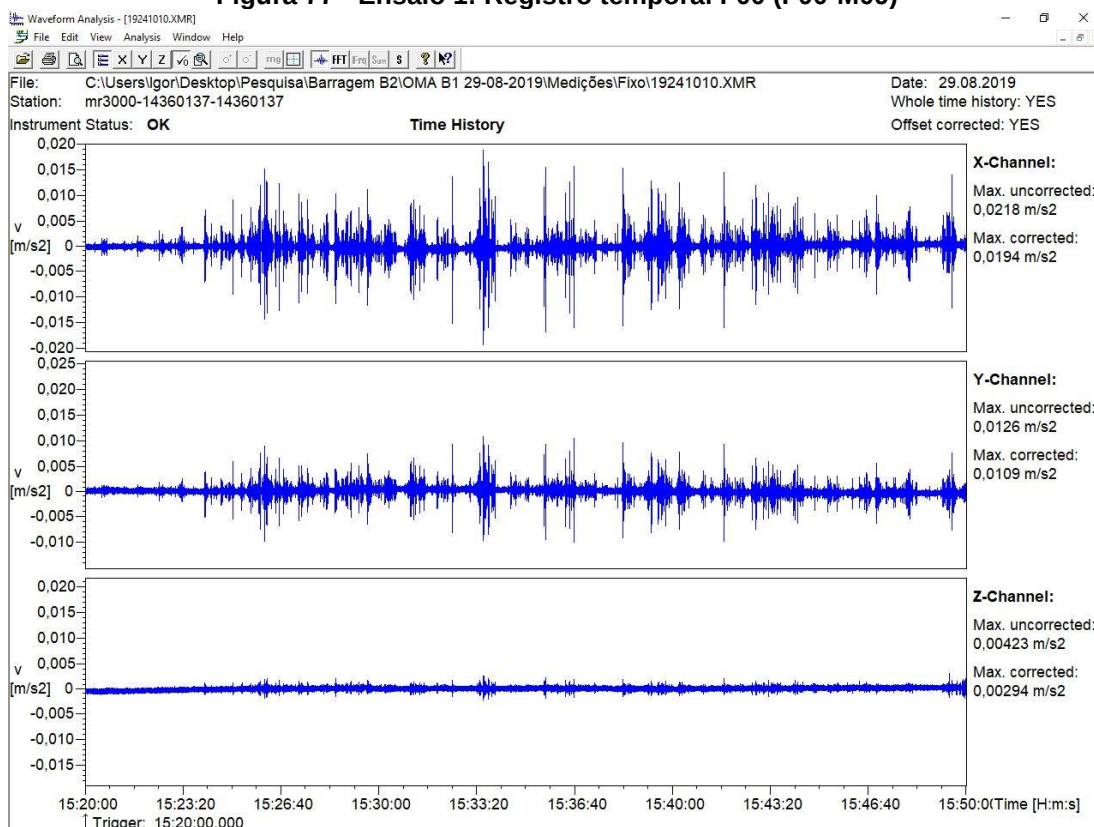
Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Figura 76 - Ensaio 1: Registro temporal M08 (F00-M08)



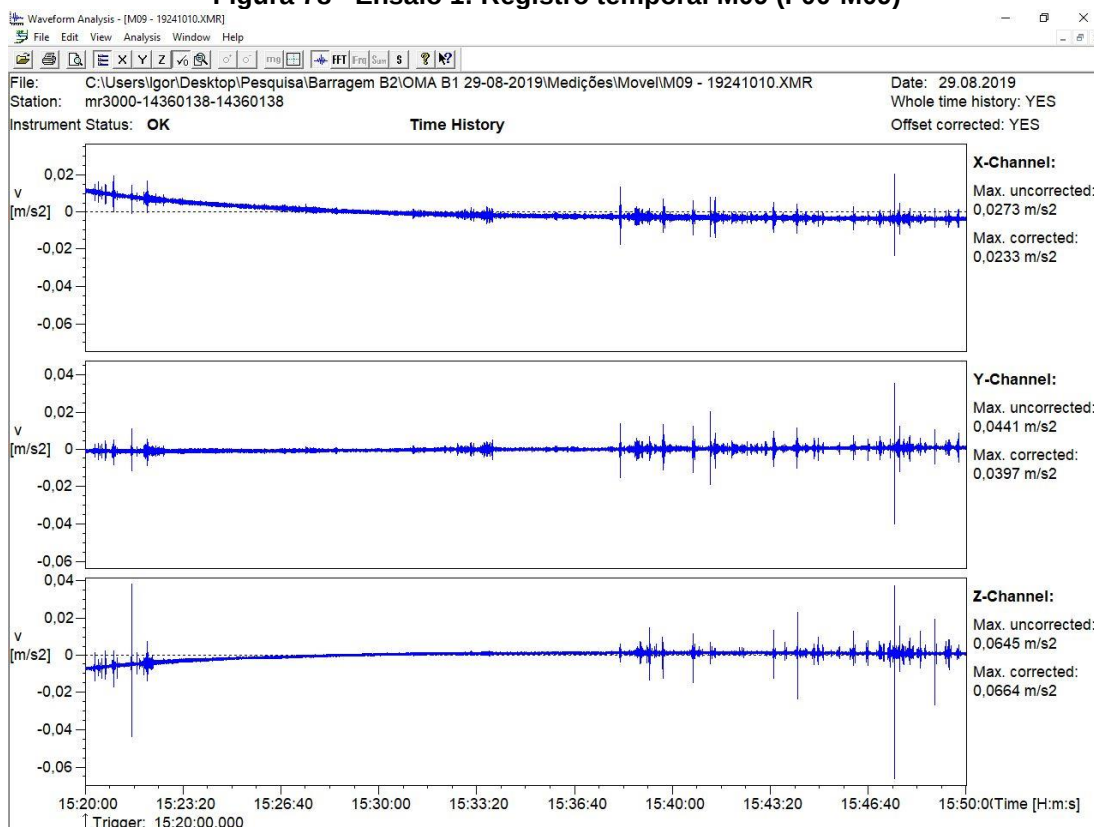
Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Figura 77 - Ensaio 1: Registro temporal F00 (F00-M09)



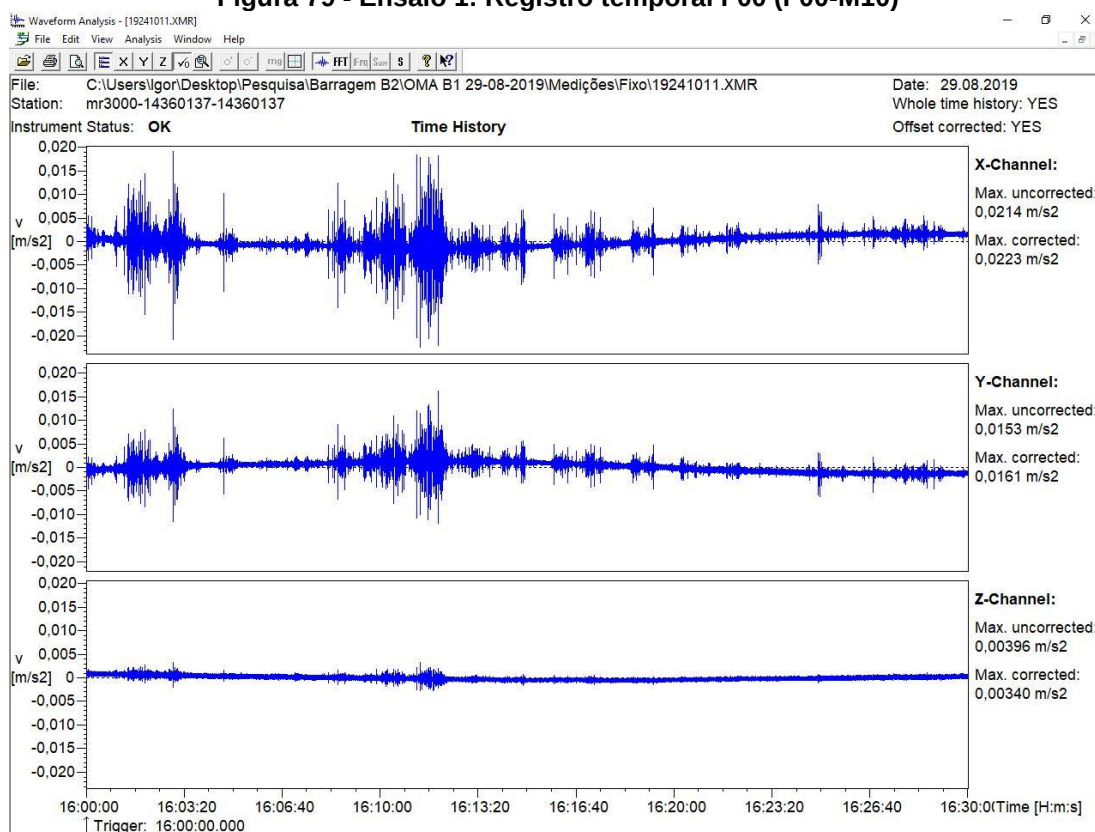
Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Figura 78 - Ensaio 1: Registro temporal M09 (F00-M09)



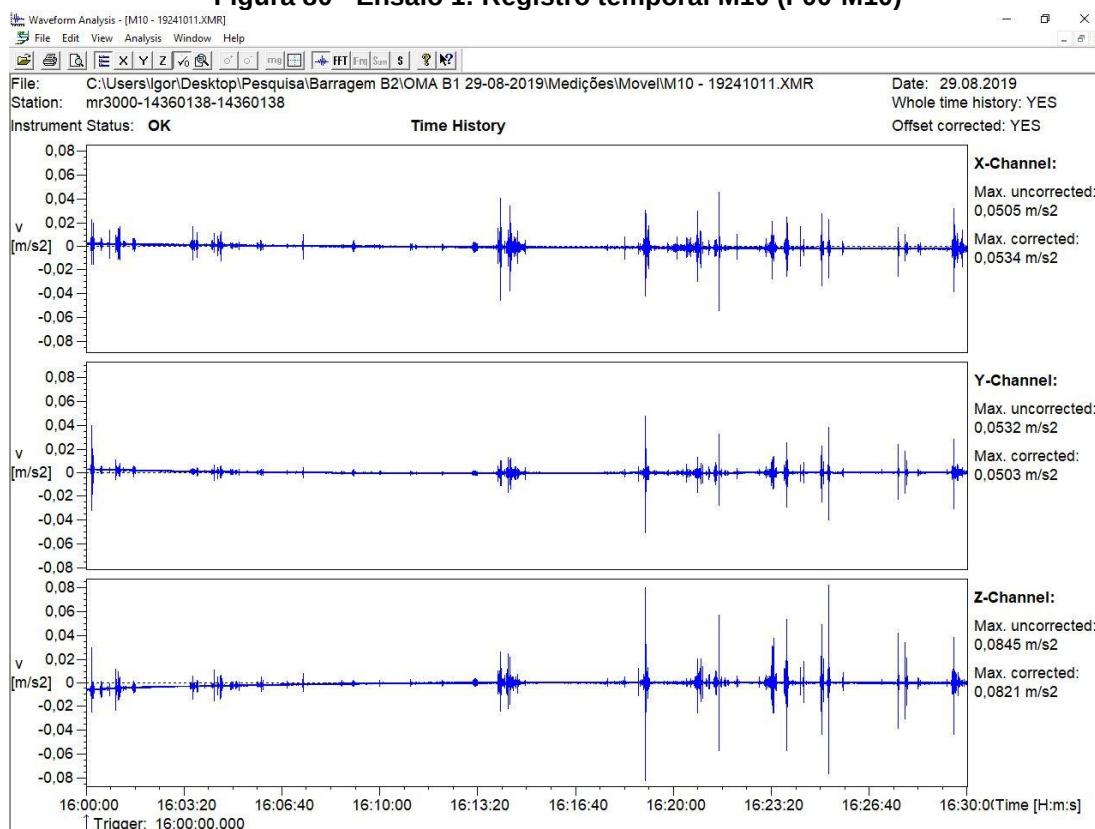
Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Figura 79 - Ensaio 1: Registro temporal F00 (F00-M10)



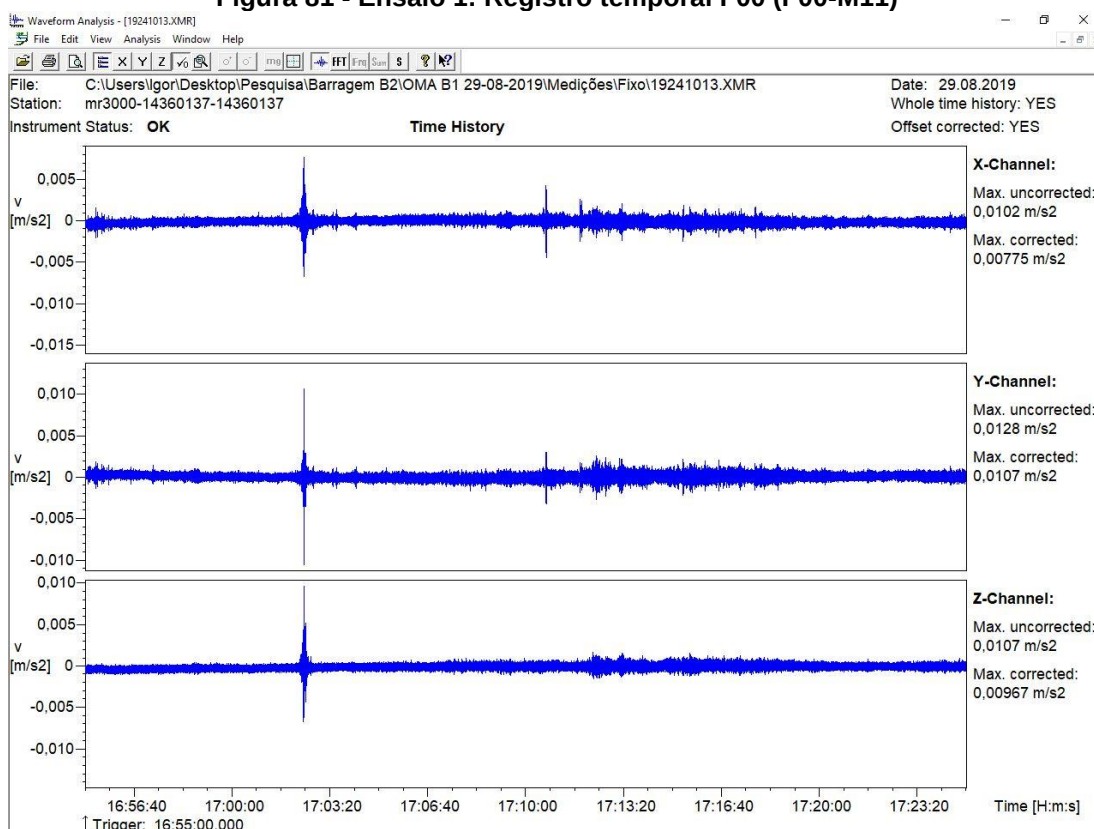
Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Figura 80 - Ensaio 1: Registro temporal M10 (F00-M10)



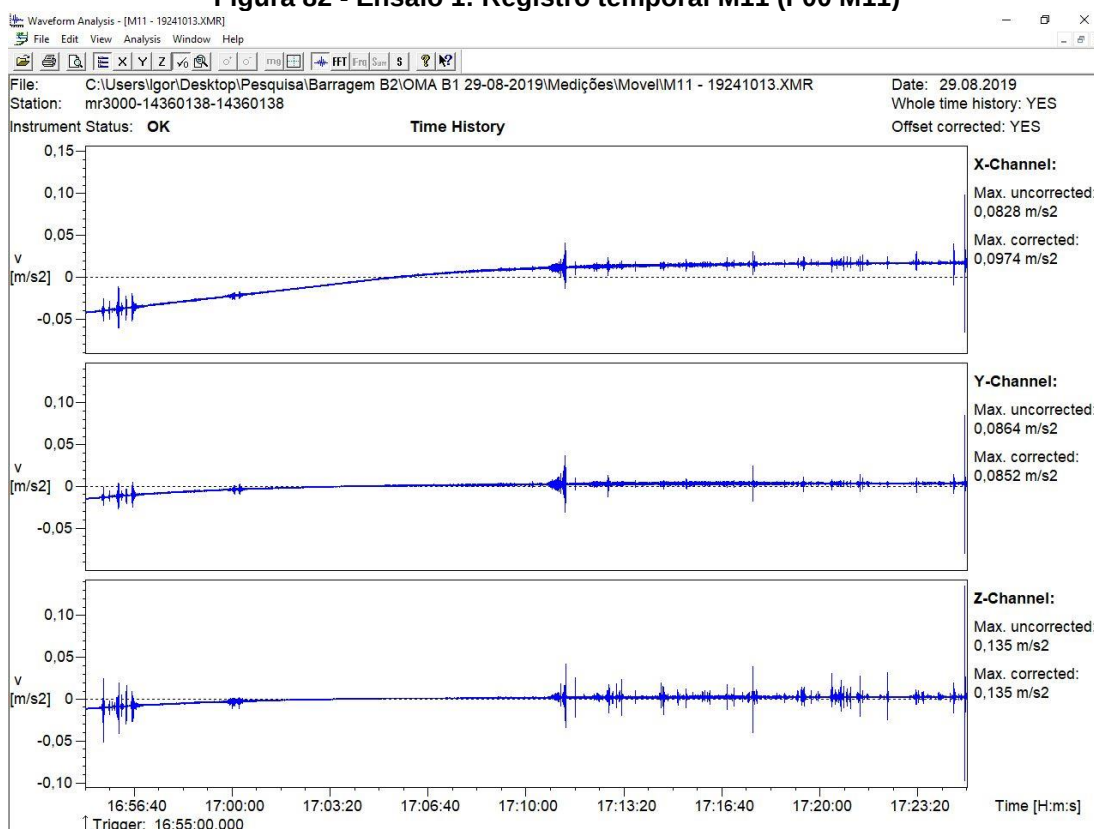
Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Figura 81 - Ensaio 1: Registro temporal F00 (F00-M11)



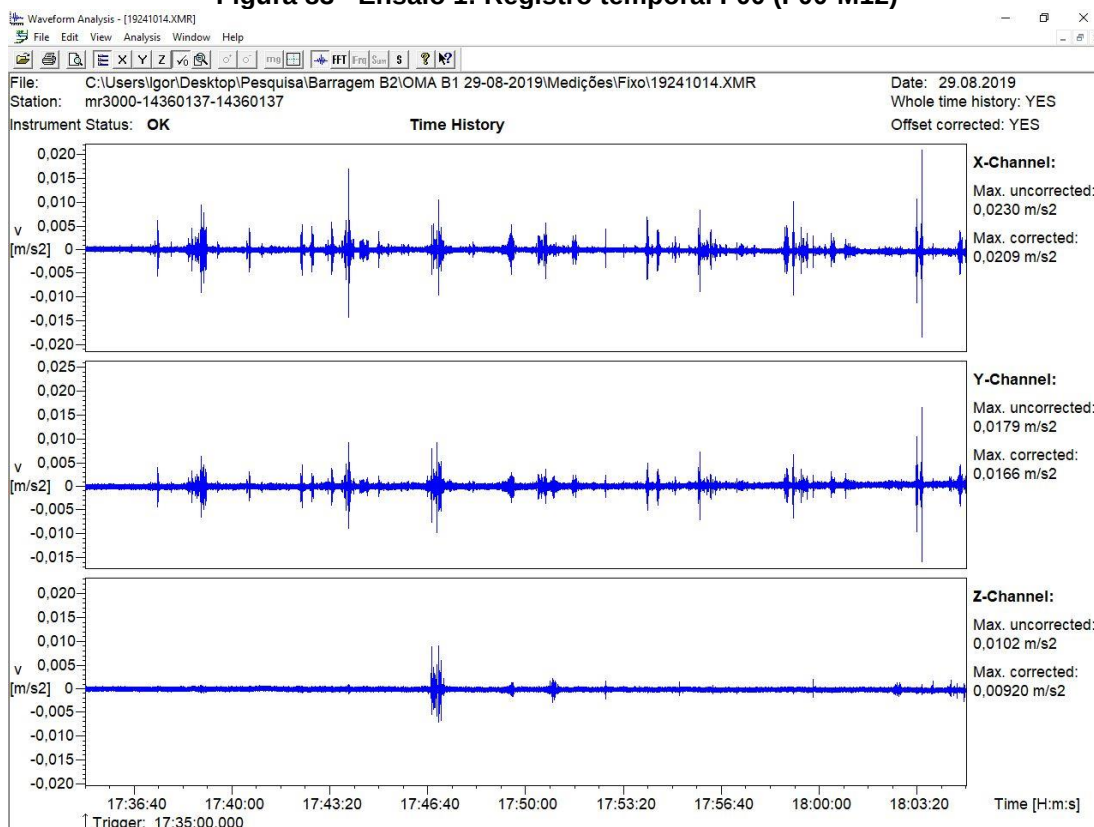
Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Figura 82 - Ensaio 1: Registro temporal M11 (F00 M11)



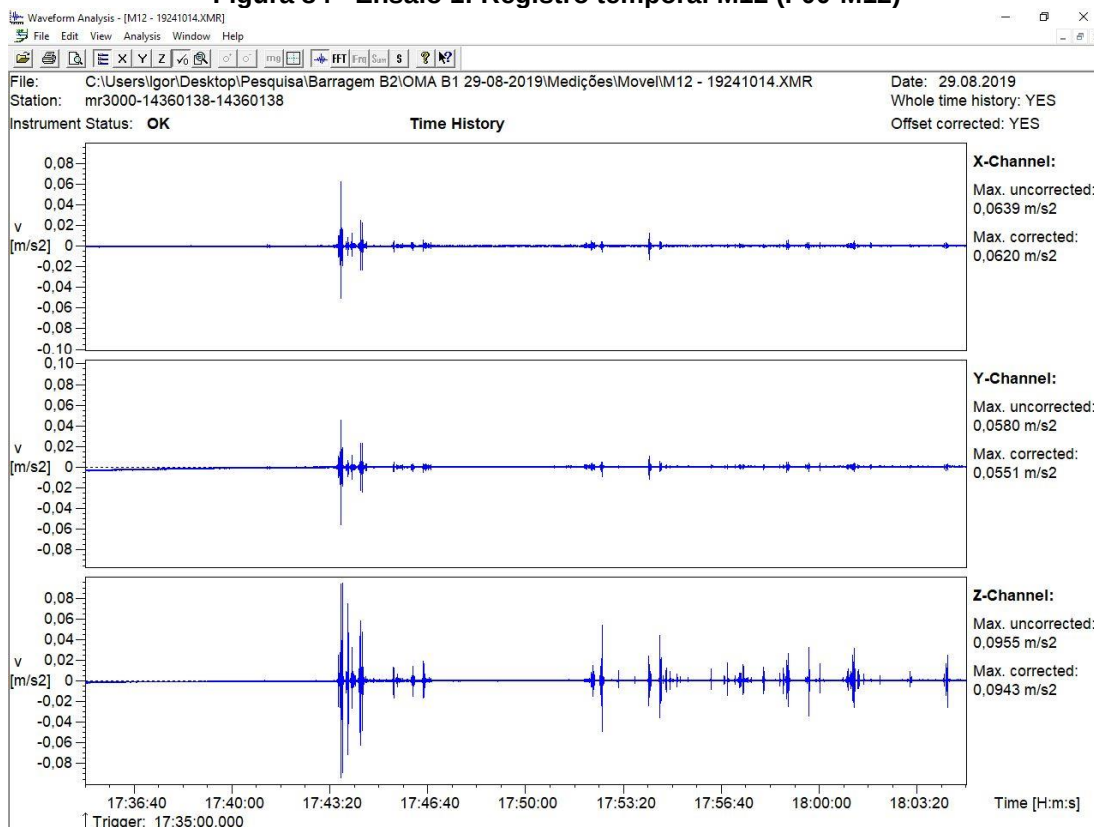
Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Figura 83 - Ensaio 1: Registro temporal F00 (F00-M12)



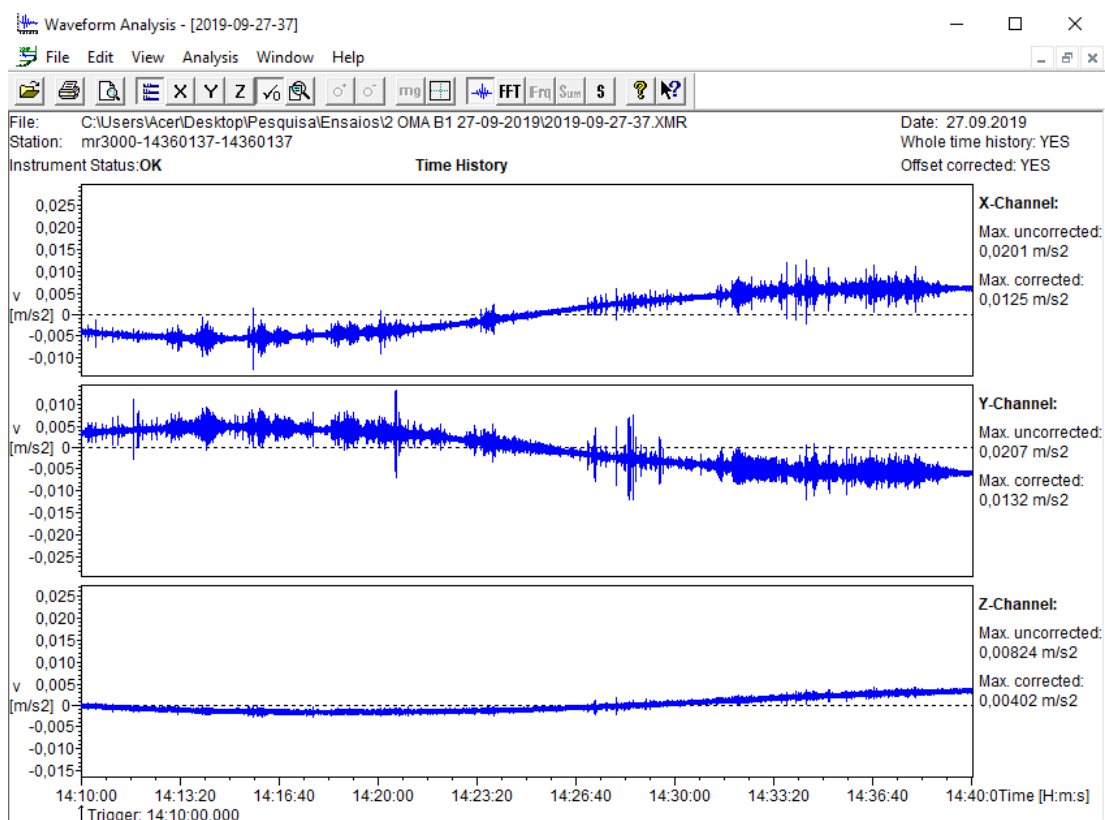
Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Figura 84 - Ensaio 1: Registro temporal M12 (F00-M12)



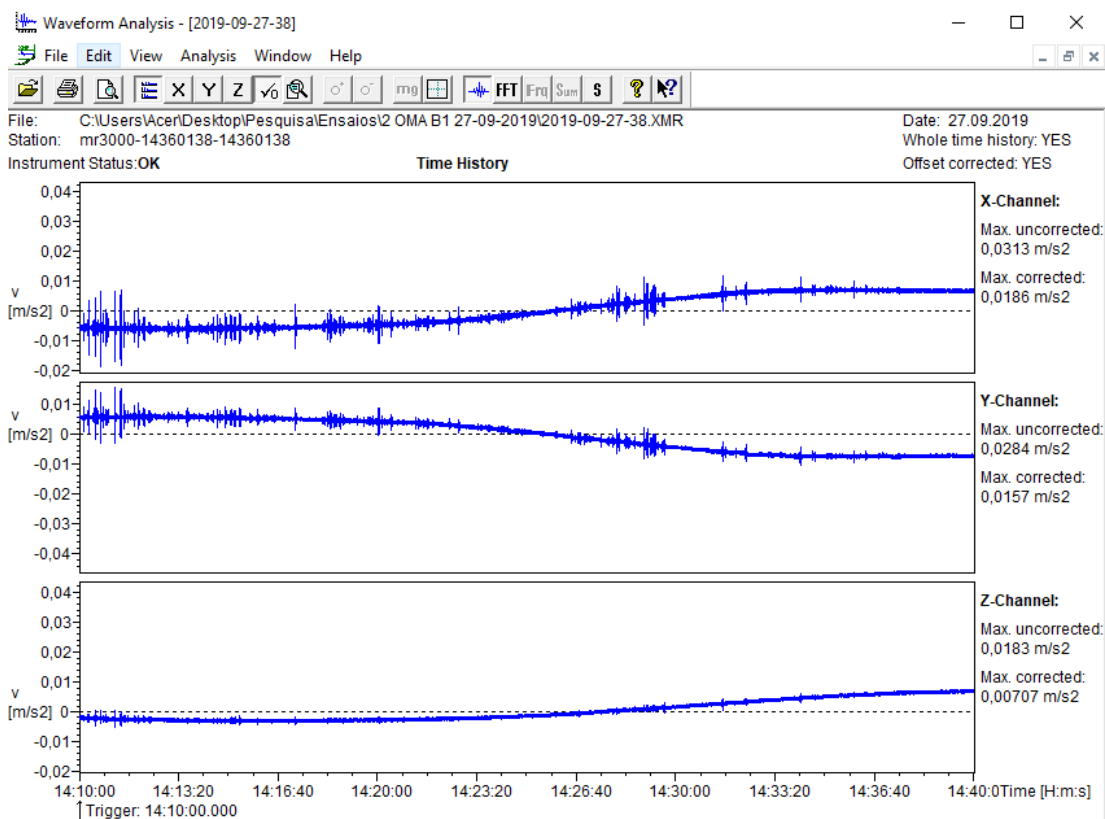
Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Figura 85 - Ensaio 2: Registro temporal F00 (F00-M04)



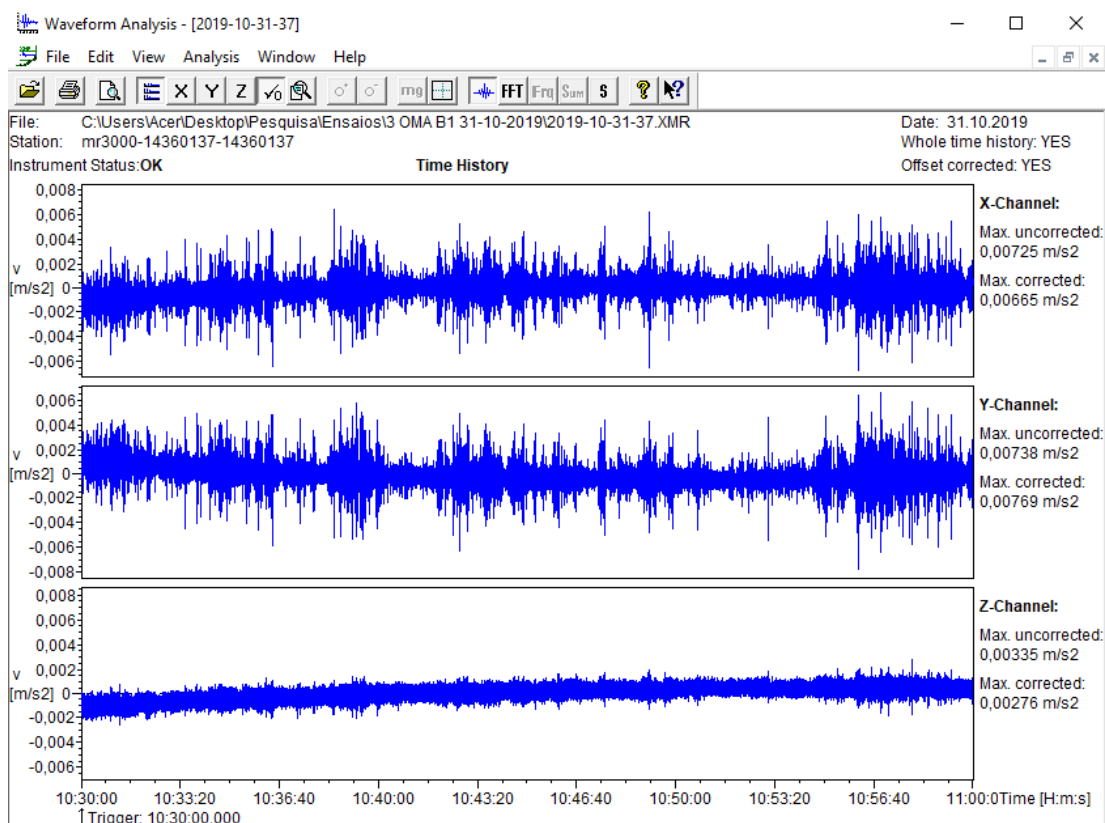
Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Figura 86 - Ensaio 2: Registro temporal M04 (F00-M04)



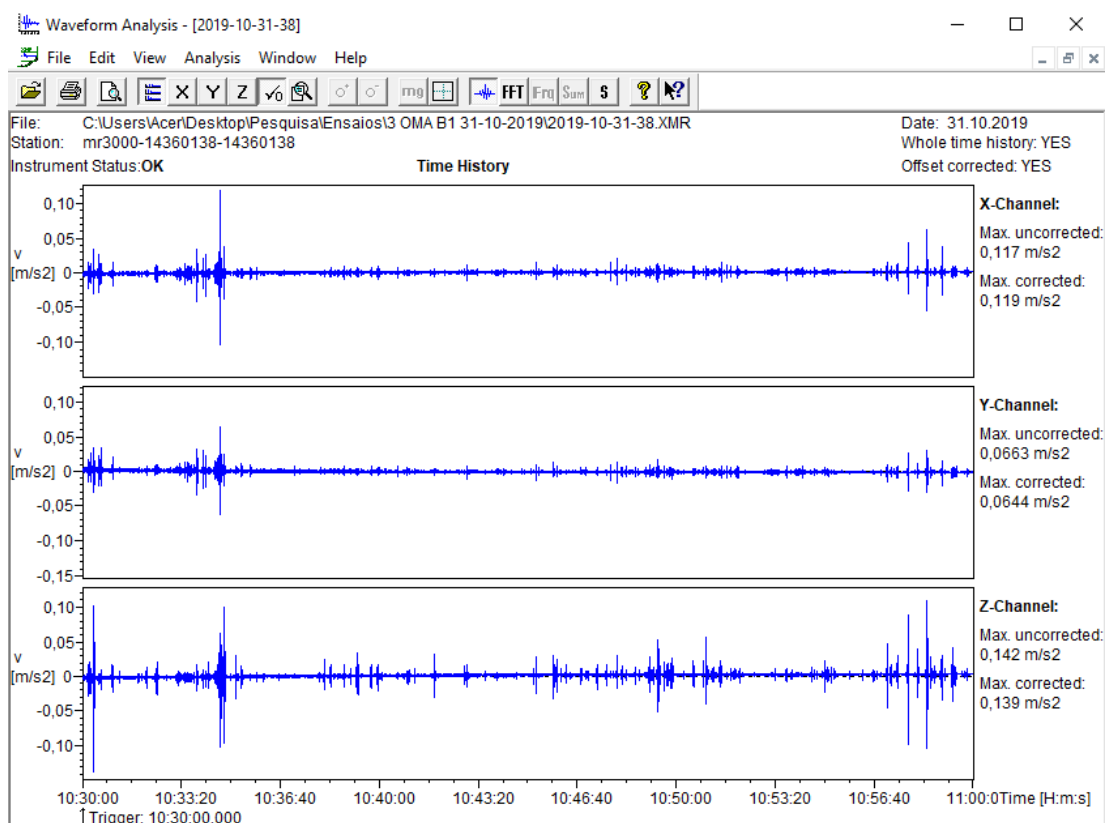
Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Figura 87 - Ensaio 3: Registro temporal F00 (F00-M04)



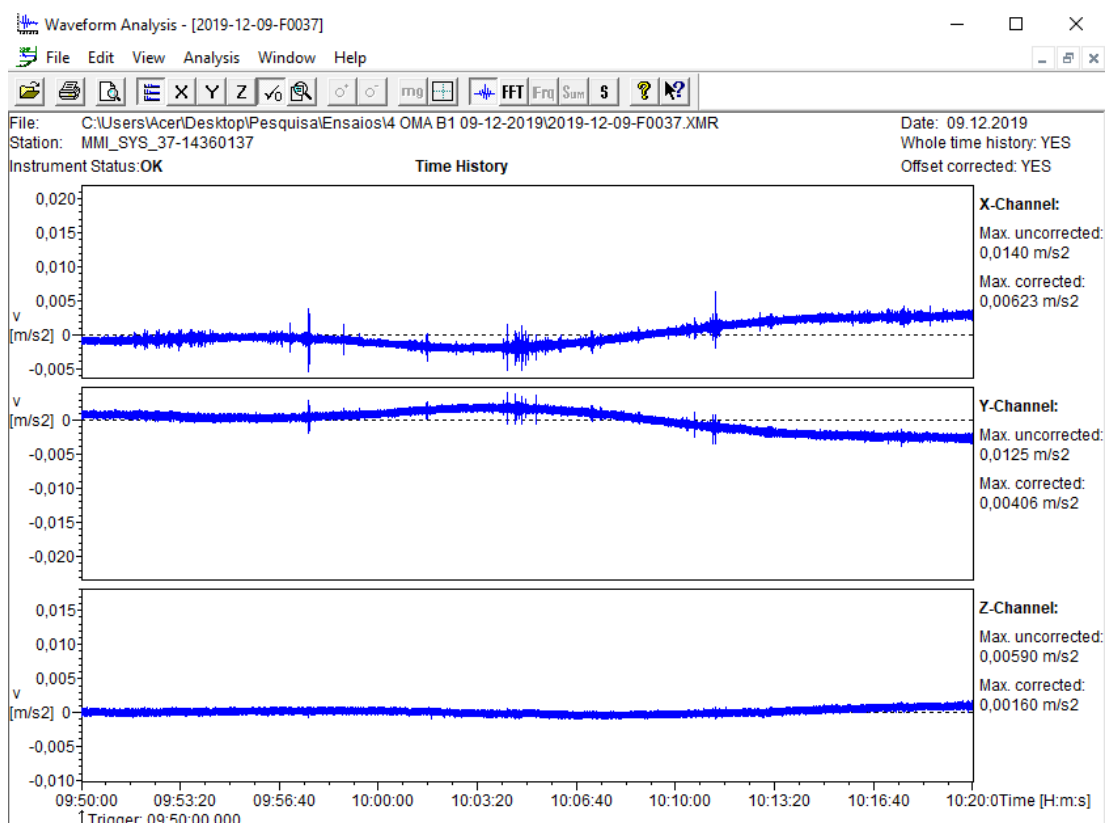
Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Figura 88 - Ensaio 3: Registro temporal M04 (F00-M04)



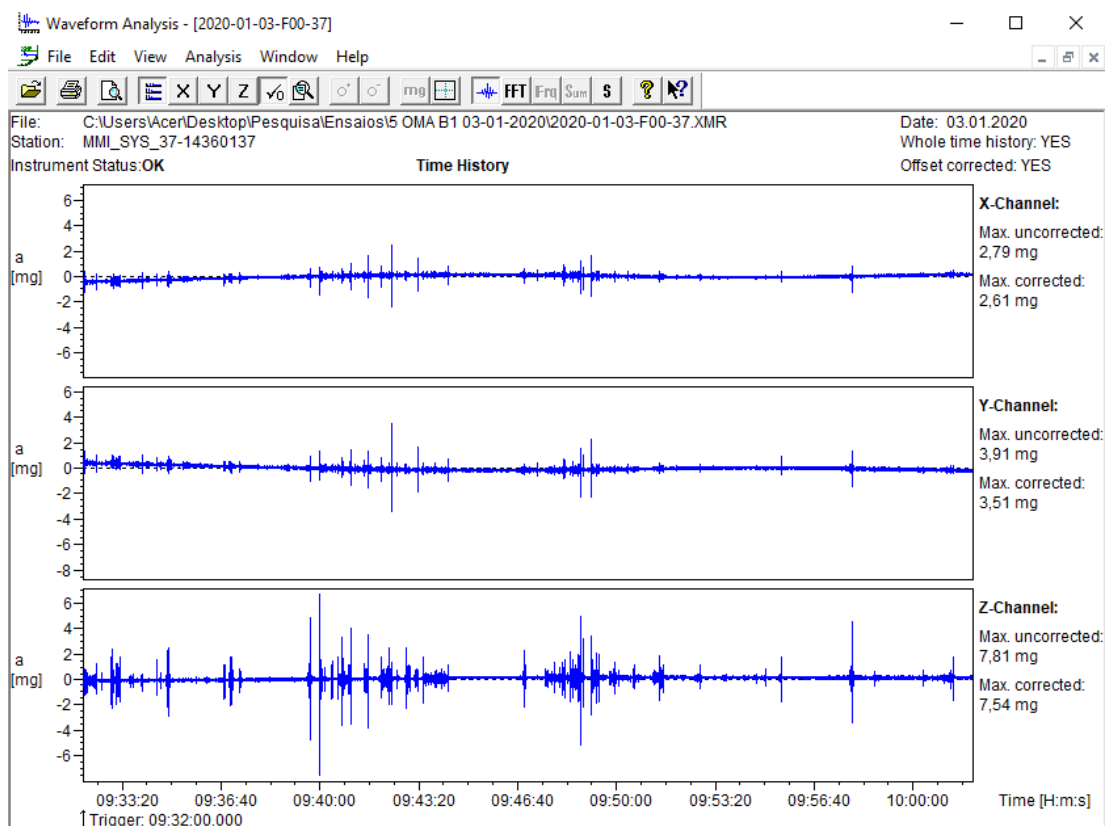
Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Figura 89 - Ensaio 4: Registro temporal F00



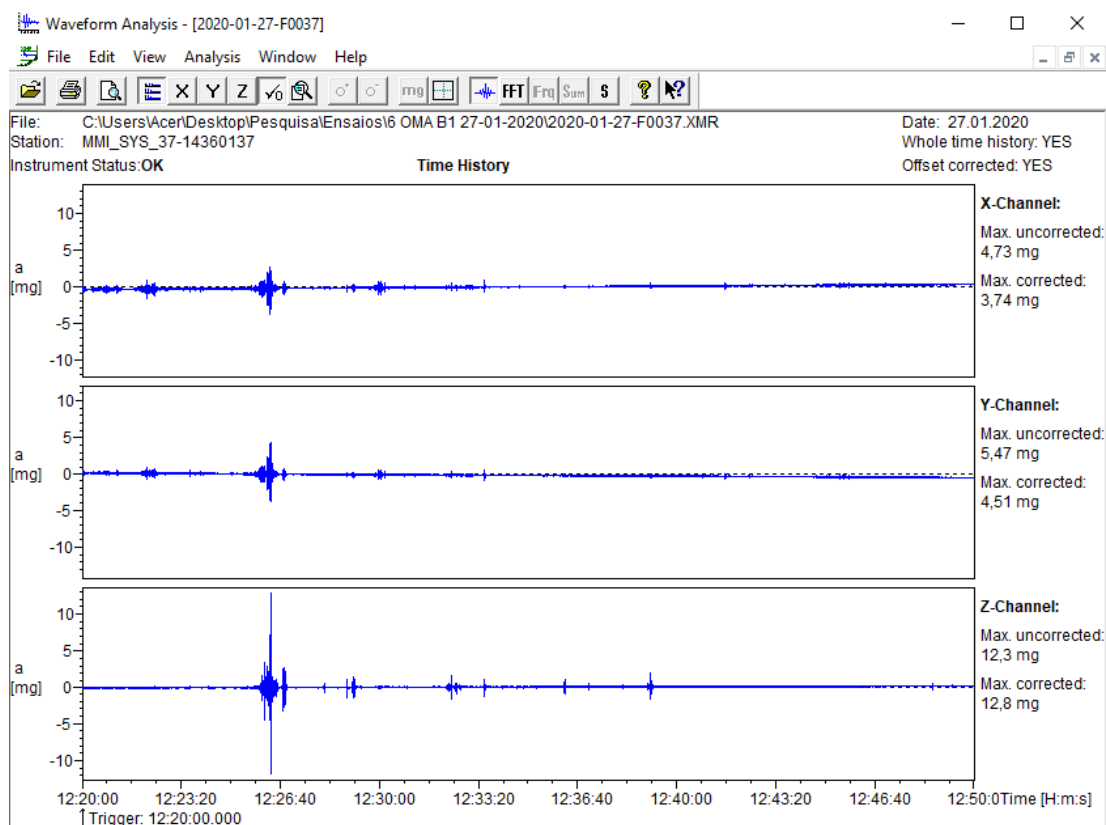
Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Figura 90 - Ensaio 5: Registro temporal F00



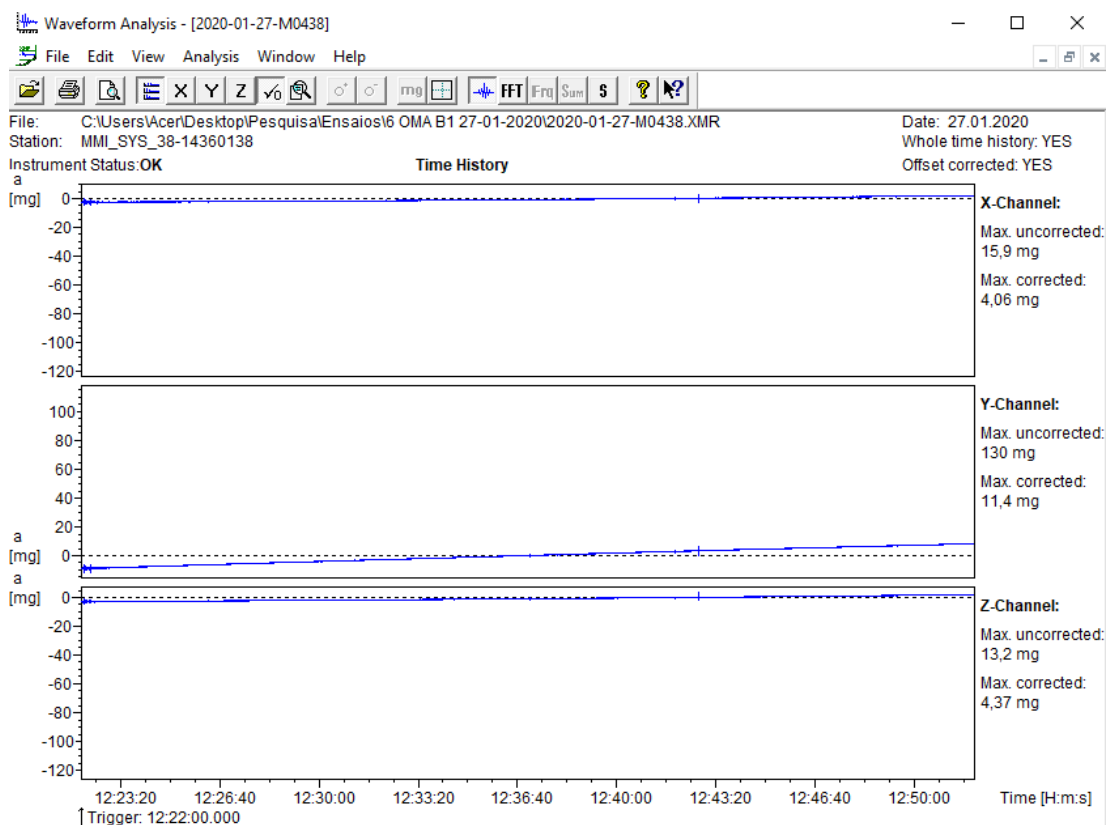
Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Figura 91 - Ensaio 6: Registro temporal F00 (F00-M04)



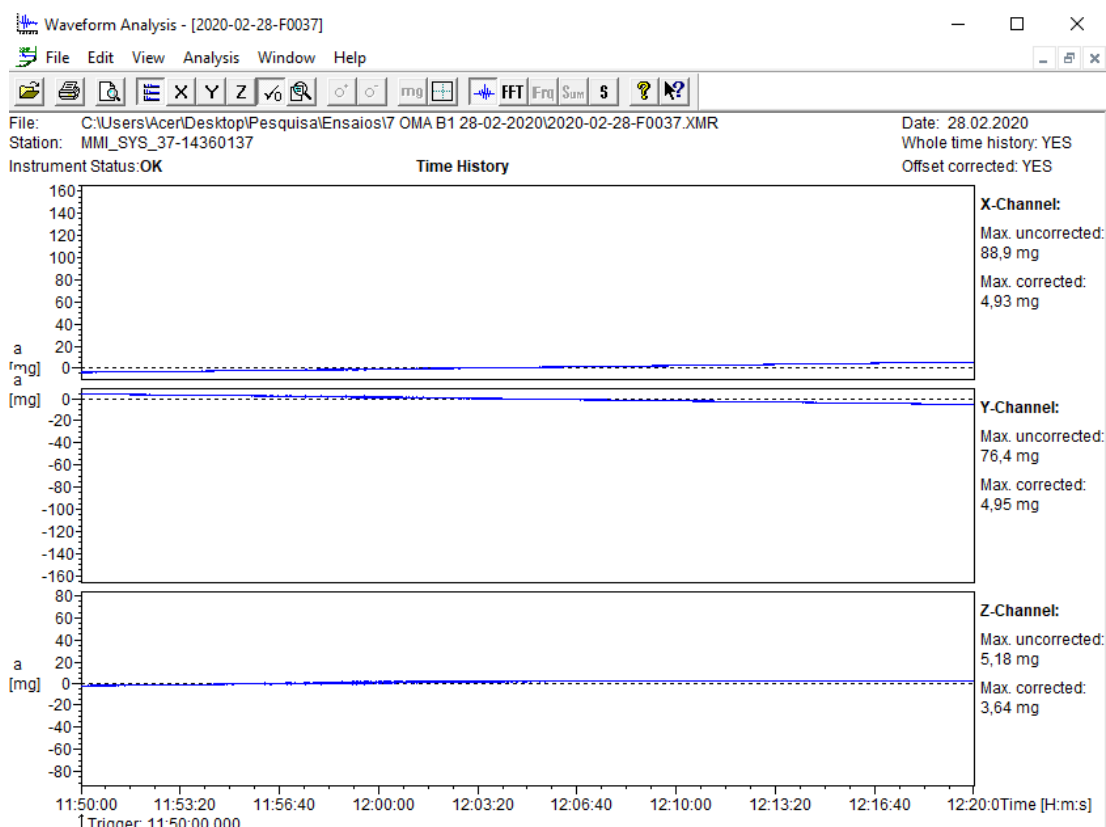
Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Figura 92 - Ensaio 6: Registro temporal M04 (F00-M04)



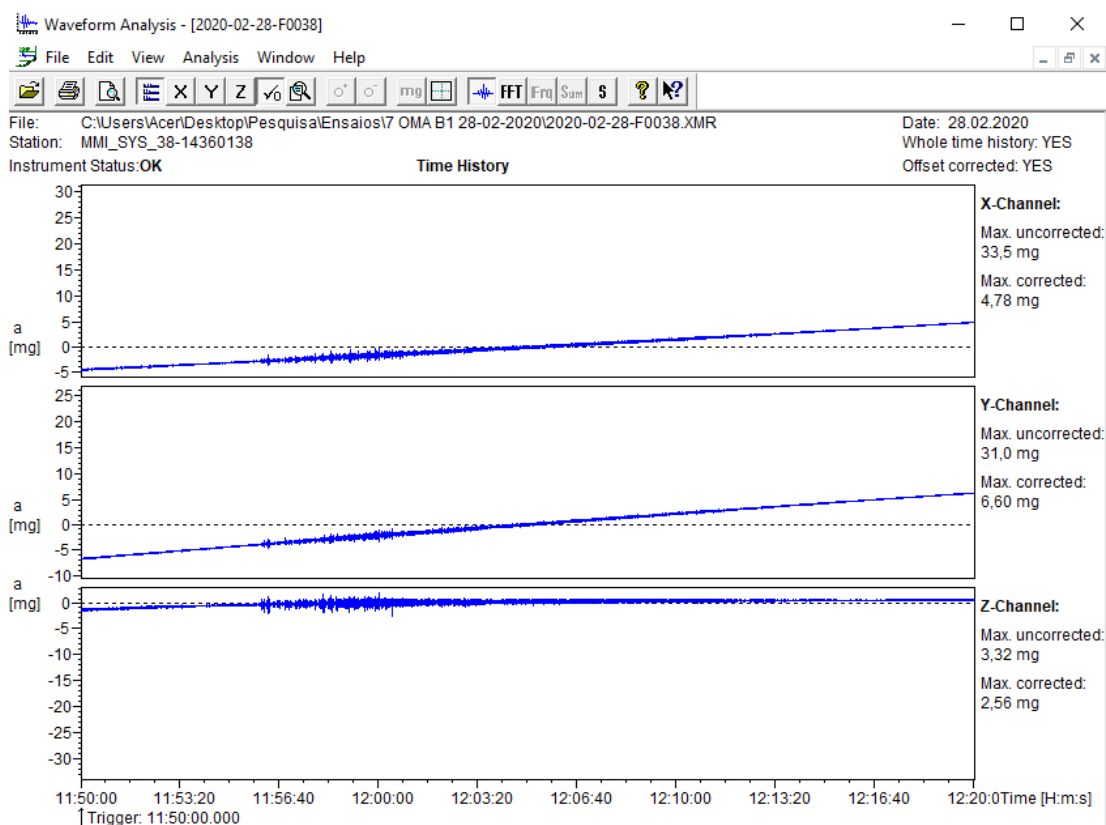
Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Figura 93 - Ensaio 7: Registro temporal F00 (F00-M04)



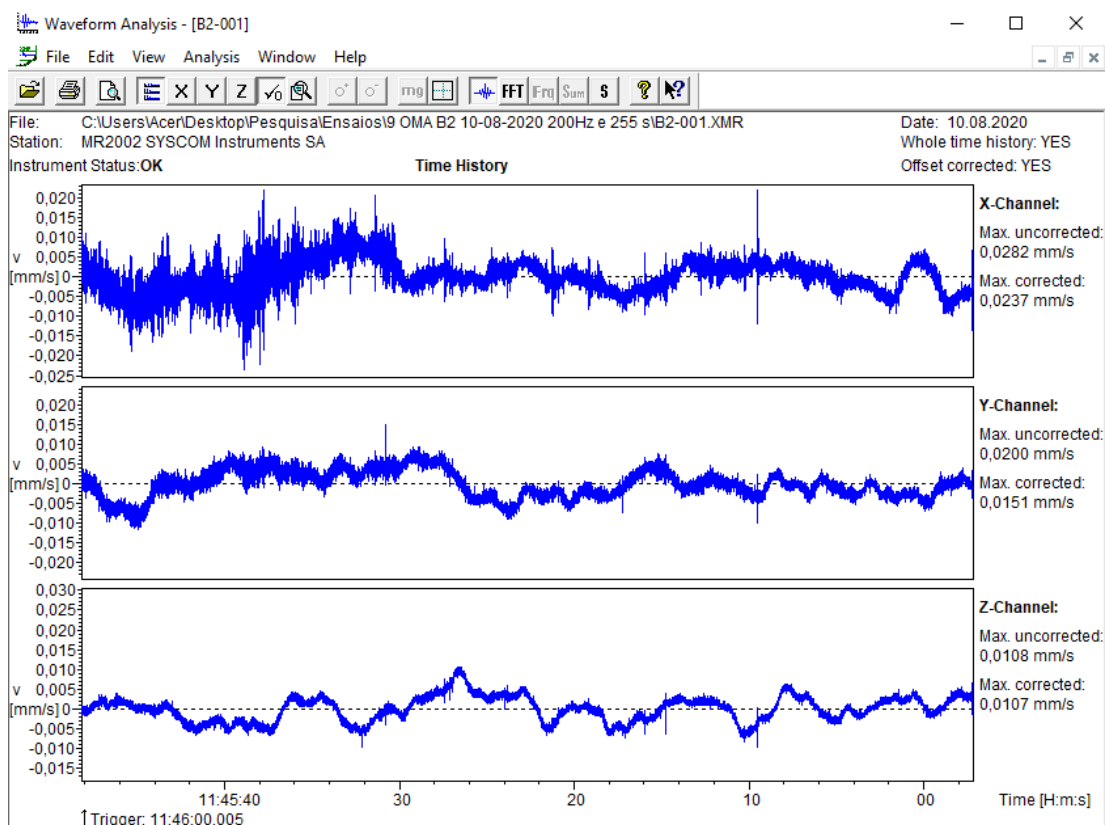
Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Figura 94 - Ensaio 7: Registro temporal M04 (F00-M04)



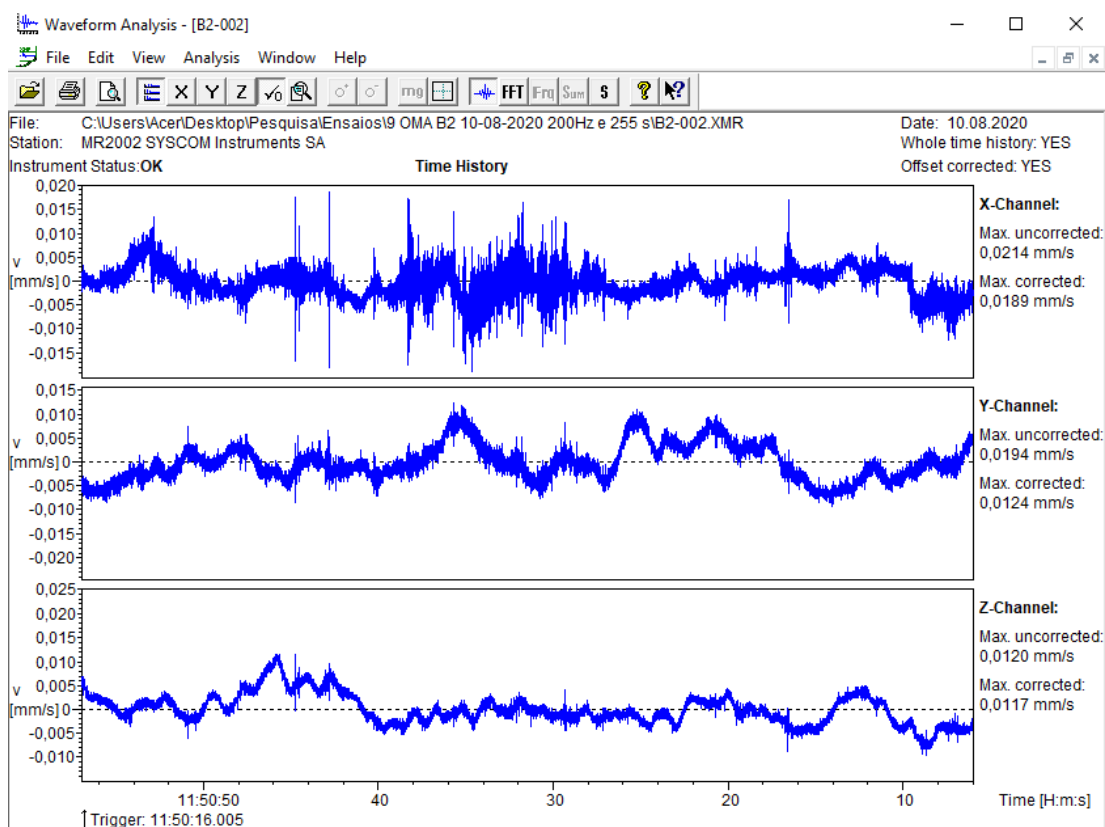
Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Figura 95 - Ensaio 8: Primeiro registro temporal F00



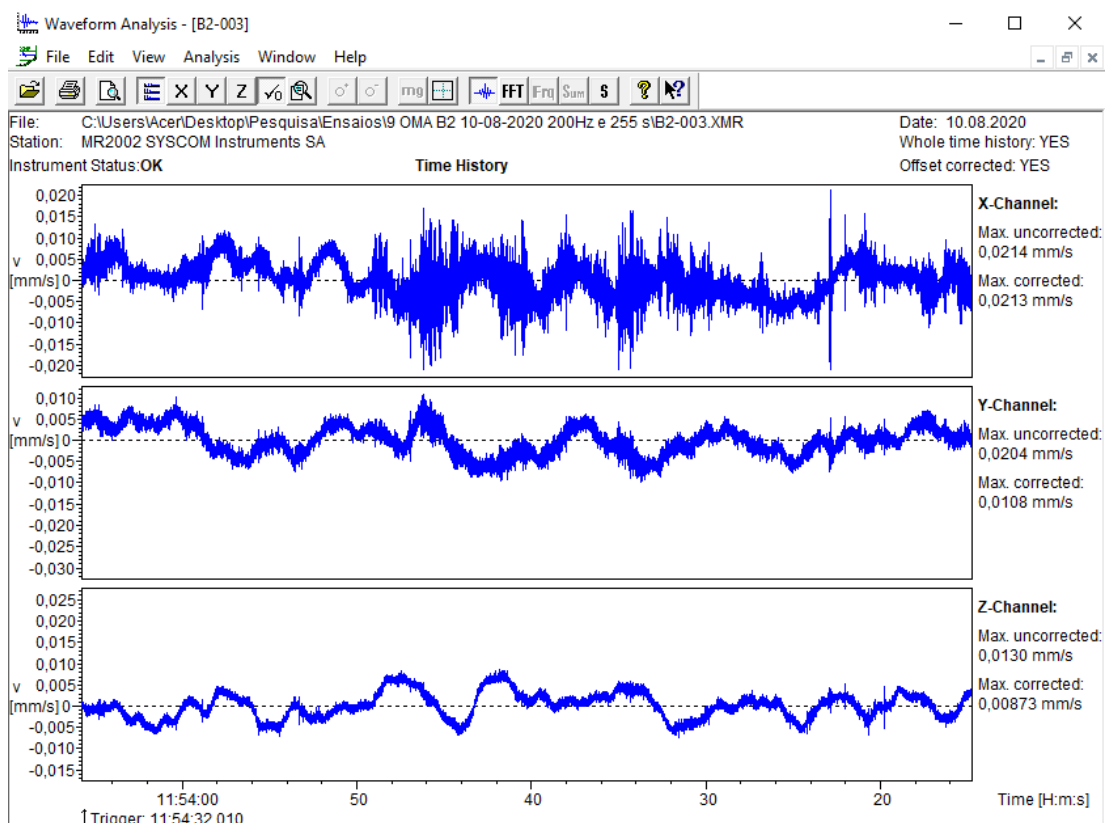
Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Figura 96 - Ensaio 8: Segundo registro temporal F00



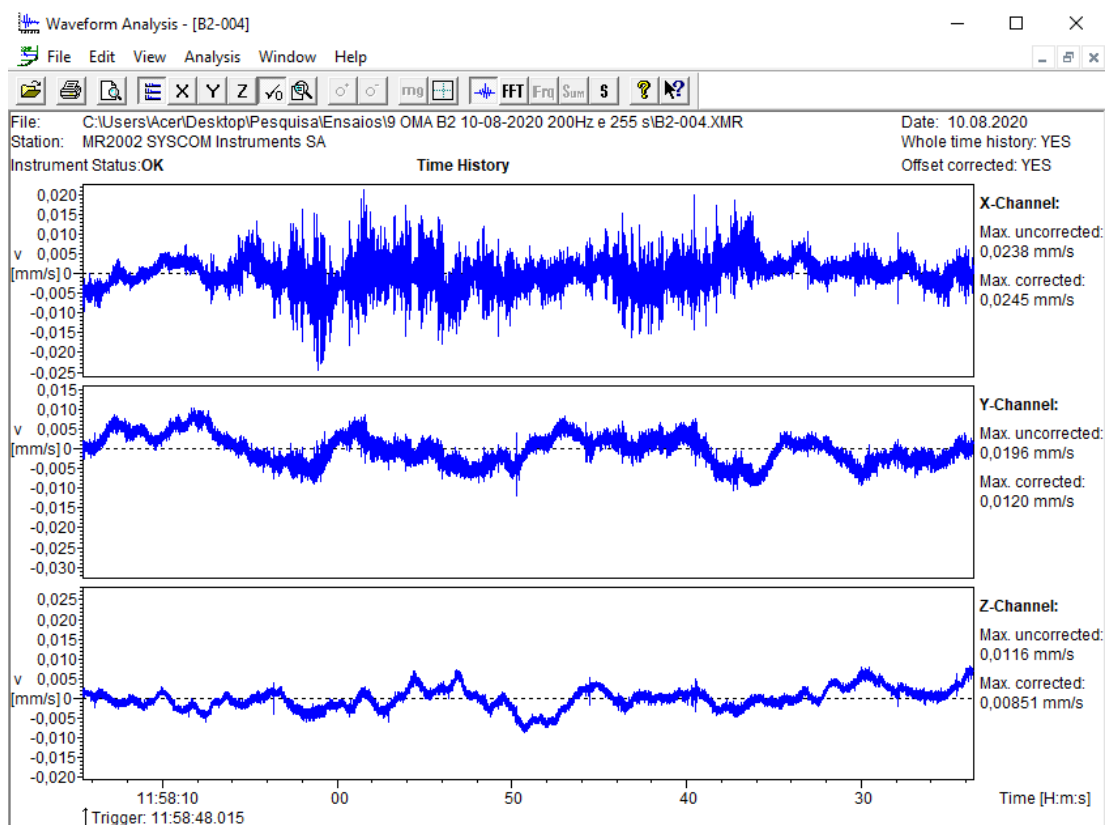
Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Figura 97 - Ensaio 8: Terceiro registro temporal F00



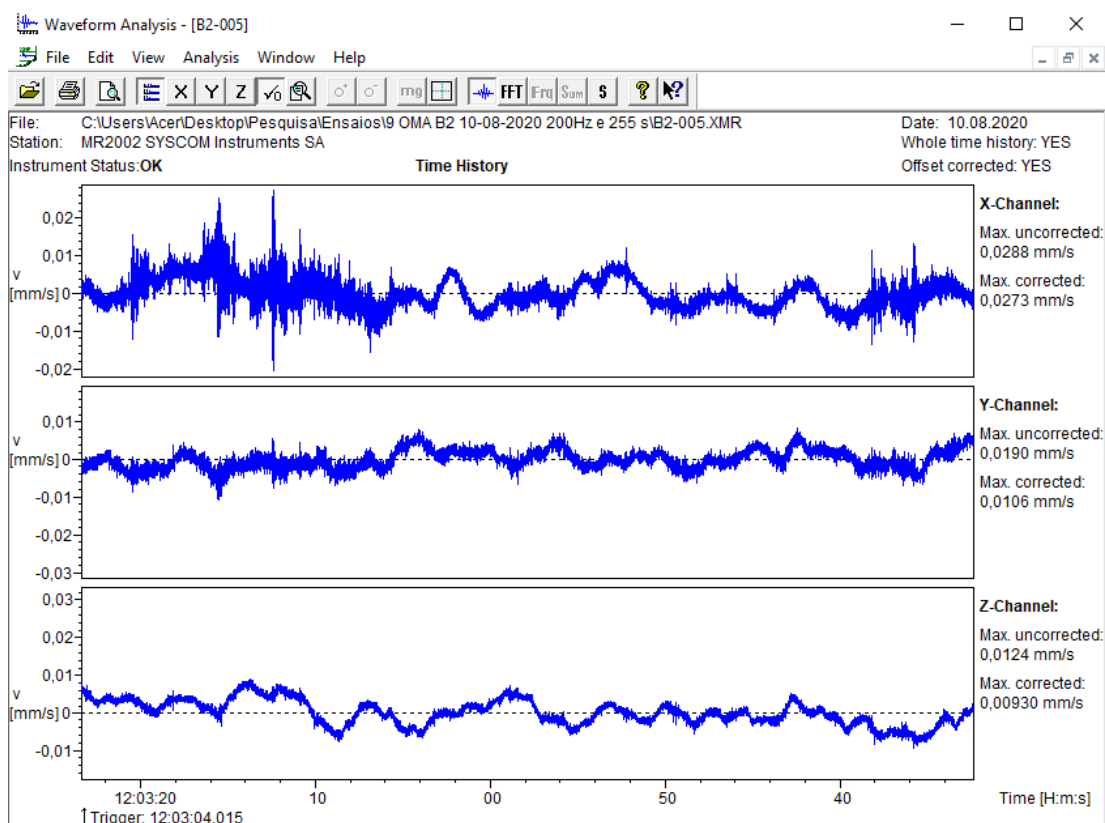
Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Figura 98 - Ensaio 8: Quarto registro temporal F00



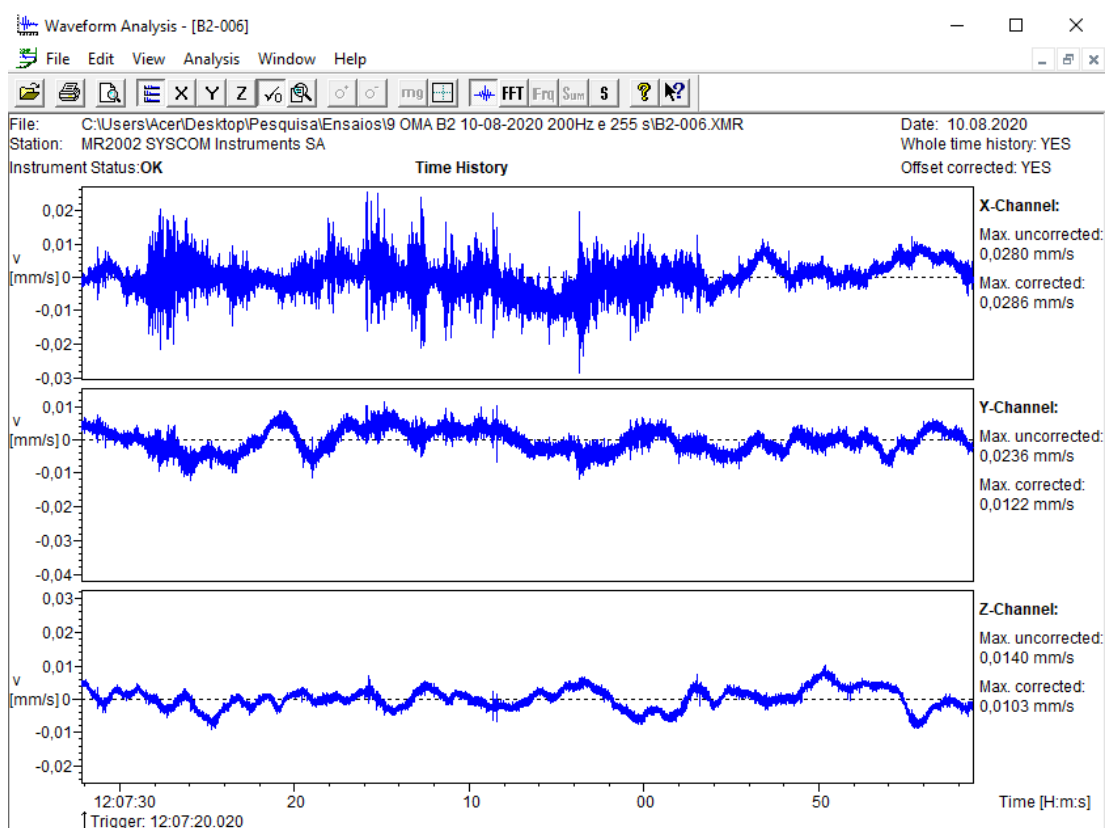
Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Figura 99 - Ensaio 8: Quinto registro temporal F00



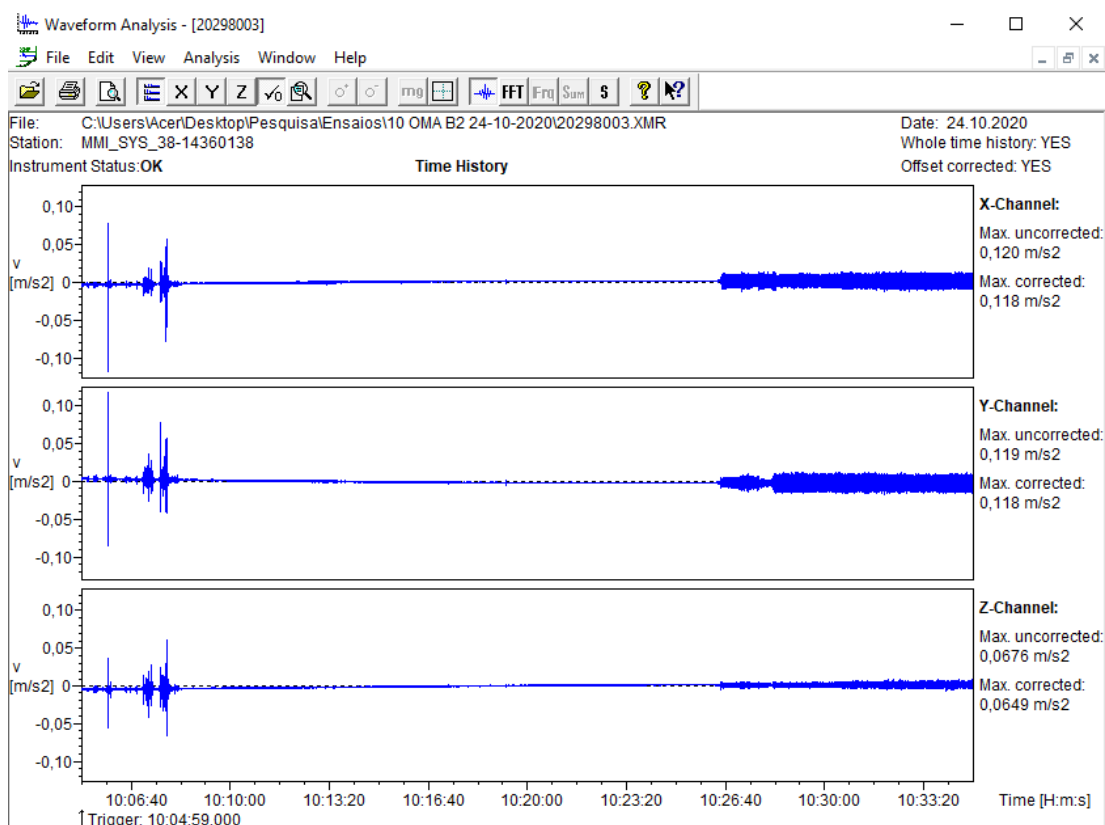
Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Figura 100 - Ensaio 8: Sexto registro temporal F00



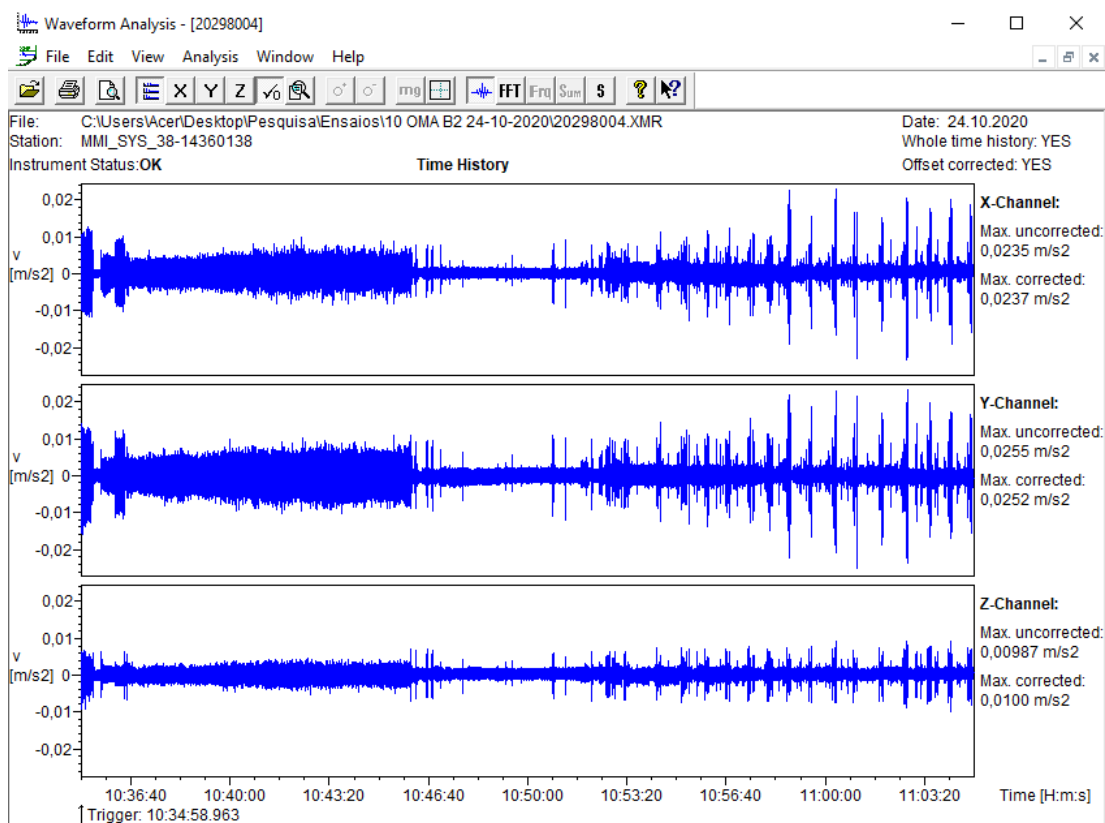
Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Figura 101 - Ensaio 9: Registro temporal F00 (F00-M04)



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Figura 102 - Ensaio 9: Registro temporal M04 (F00-M04)



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

APÊNDICE B – Resumo dos valores estatísticos

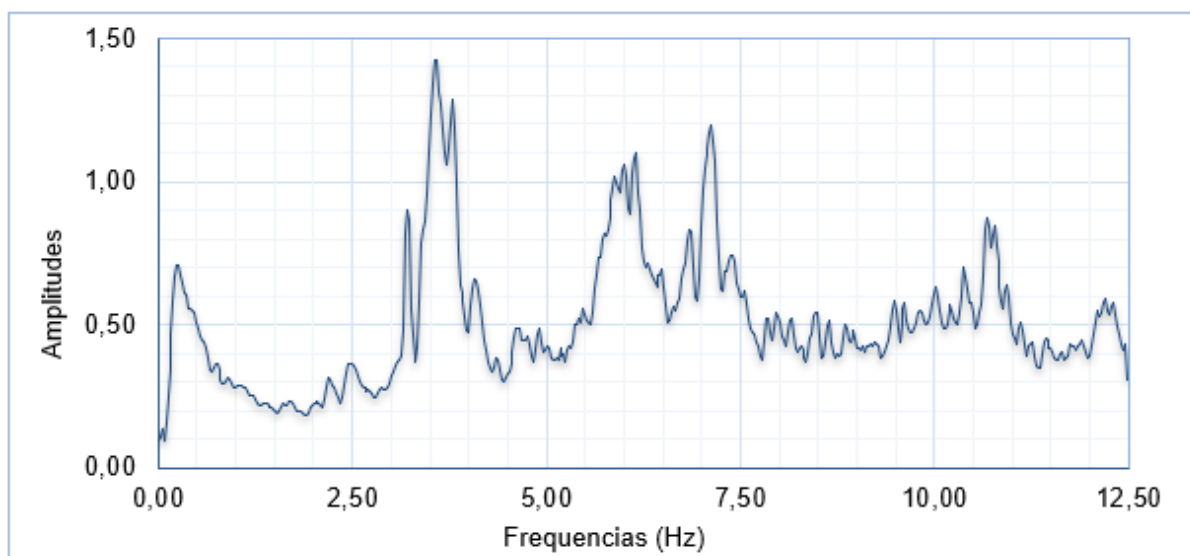
Tabela 10 - Resumo dos valores estatísticos

Ponto	Sequencia	Acelerações			Velocidades			Deslocamentos		
		Medias	RMS	Amplitudes	Medias	RMS	Amplitudes	Medias	RMS	Amplitudes
F00	1	3.62E-04	6.69E-04	1.31E-02	2.29E-07	4.23E-07	8.35E-06	4.47E-10	8.48E-10	1.61E-08
F00	2	2.67E-04	5.34E-04	1.56E-02	1.70E-07	3.45E-07	1.03E-05	3.14E-10	6.50E-10	1.85E-08
F00	3	5.75E-04	9.67E-04	1.60E-02	3.68E-07	6.21E-07	1.06E-05	7.04E-10	1.21E-09	1.87E-08
F00	4	7.50E-04	1.19E-03	2.79E-02	4.78E-07	7.58E-07	1.72E-05	9.10E-10	1.46E-09	2.55E-08
F00	5	4.94E-04	9.43E-04	1.85E-02	3.15E-07	6.03E-07	1.12E-05	6.08E-10	1.20E-09	2.51E-08
F00	6	3.56E-04	6.85E-04	1.28E-02	2.26E-07	4.37E-07	8.03E-06	4.32E-10	8.68E-10	1.74E-08
F00	7	2.63E-04	4.57E-04	1.14E-02	1.65E-07	2.89E-07	7.19E-06	3.17E-10	5.86E-10	1.55E-08
F00	8	2.49E-04	4.38E-04	8.86E-03	1.57E-07	2.80E-07	5.72E-06	2.97E-10	5.59E-10	1.18E-08
F00	9	2.09E-04	3.40E-04	6.30E-03	1.30E-07	2.13E-07	4.05E-06	2.56E-10	4.54E-10	8.65E-09
F00	10	1.98E-04	3.46E-04	7.02E-03	1.24E-07	2.17E-07	4.21E-06	2.37E-10	4.57E-10	9.45E-09
F00	11	9.61E-05	1.16E-04	6.11E-03	5.87E-08	7.10E-08	4.13E-06	8.97E-11	1.10E-10	5.31E-09
F00	12	1.37E-04	2.27E-04	8.33E-03	8.59E-08	1.47E-07	5.48E-06	1.40E-10	2.49E-10	9.87E-09
M01	1	2.32E-04	4.76E-04	4.49E-02	1.45E-07	3.02E-07	3.07E-05	2.76E-10	5.97E-10	5.97E-08
M02	2	1.13E-04	1.46E-04	5.18E-03	6.69E-08	8.67E-08	3.26E-06	1.26E-10	1.71E-10	3.20E-09
M03	3	1.61E-04	3.15E-04	5.92E-02	8.57E-08	1.73E-07	4.08E-05	2.00E-10	2.85E-10	3.58E-08
M04	4	3.87E-04	1.21E-03	9.54E-02	2.34E-07	7.35E-07	6.48E-05	3.36E-10	9.59E-10	7.51E-08
M05	5	1.71E-04	2.73E-04	1.18E-02	1.03E-07	1.65E-07	7.72E-06	1.79E-10	2.86E-10	1.03E-08
M06	6	1.58E-04	2.65E-04	1.17E-02	9.69E-08	1.62E-07	6.23E-06	1.65E-10	2.77E-10	8.14E-09
M07	7	1.21E-04	2.82E-04	4.53E-02	7.34E-08	1.75E-07	2.89E-05	1.30E-10	3.34E-10	4.59E-08
M08	8	1.95E-04	7.94E-04	1.53E-01	1.19E-07	4.68E-07	8.37E-05	2.30E-10	9.58E-10	1.63E-07
M09	9	1.50E-04	2.49E-04	3.22E-02	8.71E-08	1.42E-07	1.48E-05	1.81E-10	2.84E-10	2.32E-08
M10	10	1.47E-04	4.81E-04	4.43E-02	8.77E-08	2.98E-07	2.95E-05	1.52E-10	4.87E-10	3.98E-08
M11	11	1.49E-04	4.28E-04	2.09E-02	8.93E-08	2.55E-07	4.19E-05	1.45E-10	3.91E-10	4.91E-08
M11	12	1.51E-04	5.81E-04	1.84E-02	8.79E-08	3.24E-07	2.95E-05	1.24E-10	3.91E-10	3.04E-08
Máximo		7.50E-04	1.21E-03	1.53E-01	4.78E-07	7.58E-07	8.37E-05	9.10E-10	1.46E-09	1.63E-07

Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

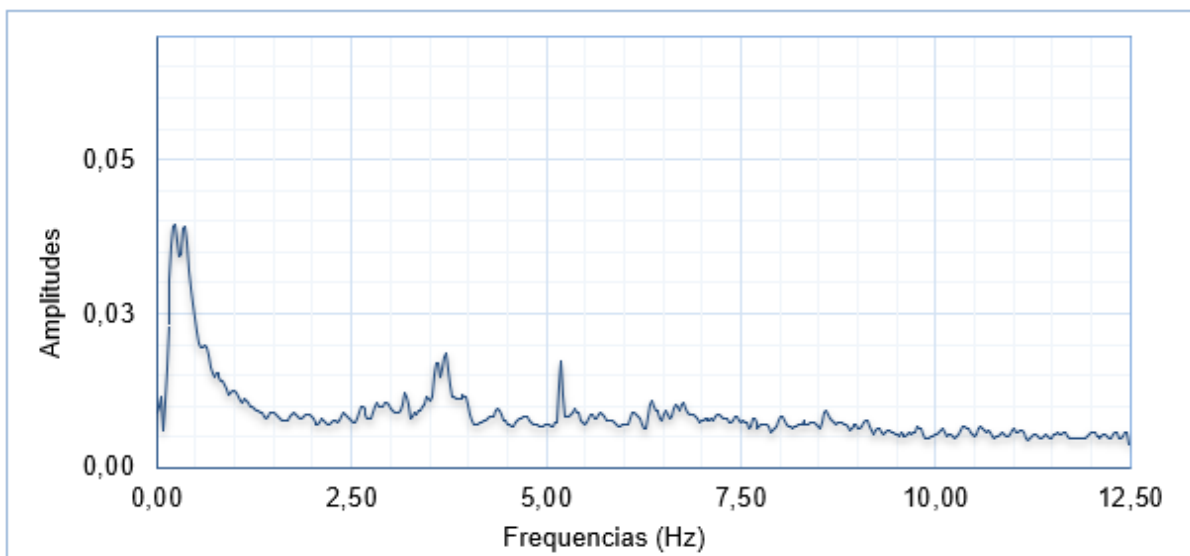
APÊNDICE C – Resultados dos processamentos

Figura 103 - Processamento Ensaio 1

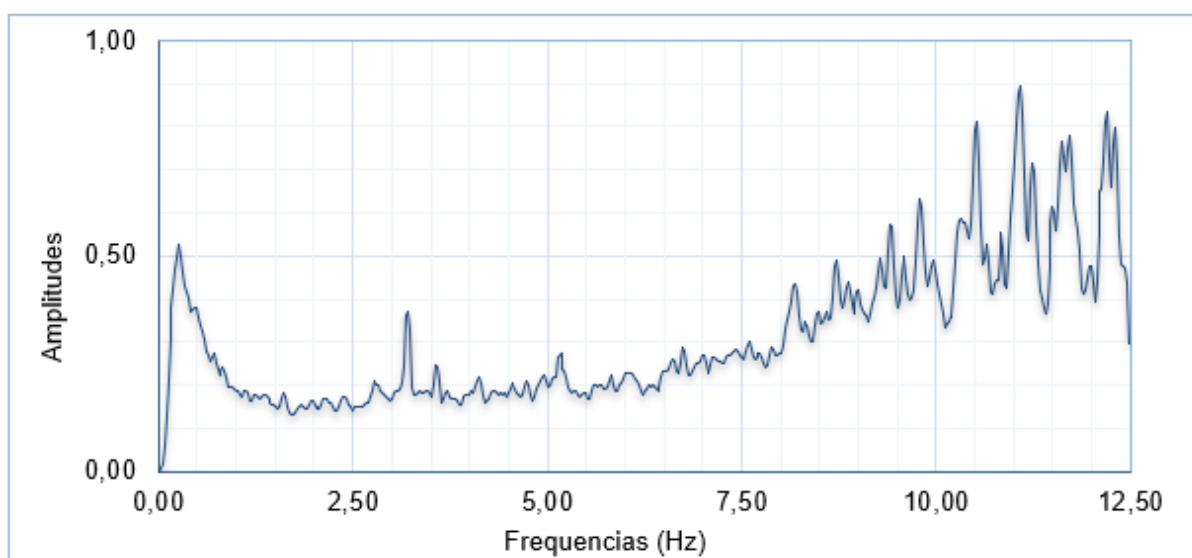


Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

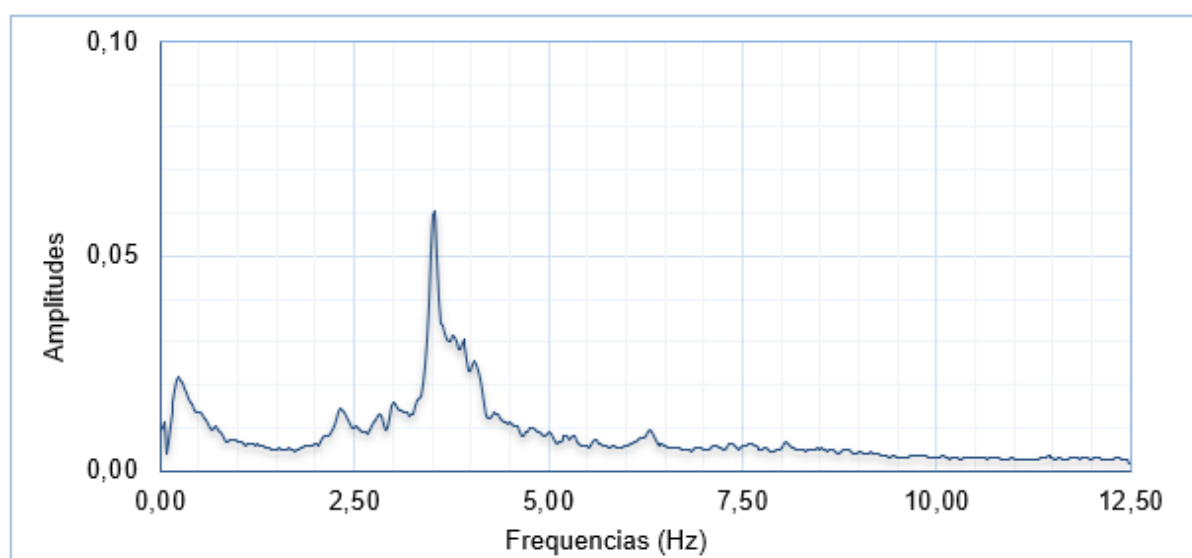
Figura 104 - Processamento Ensaio 2



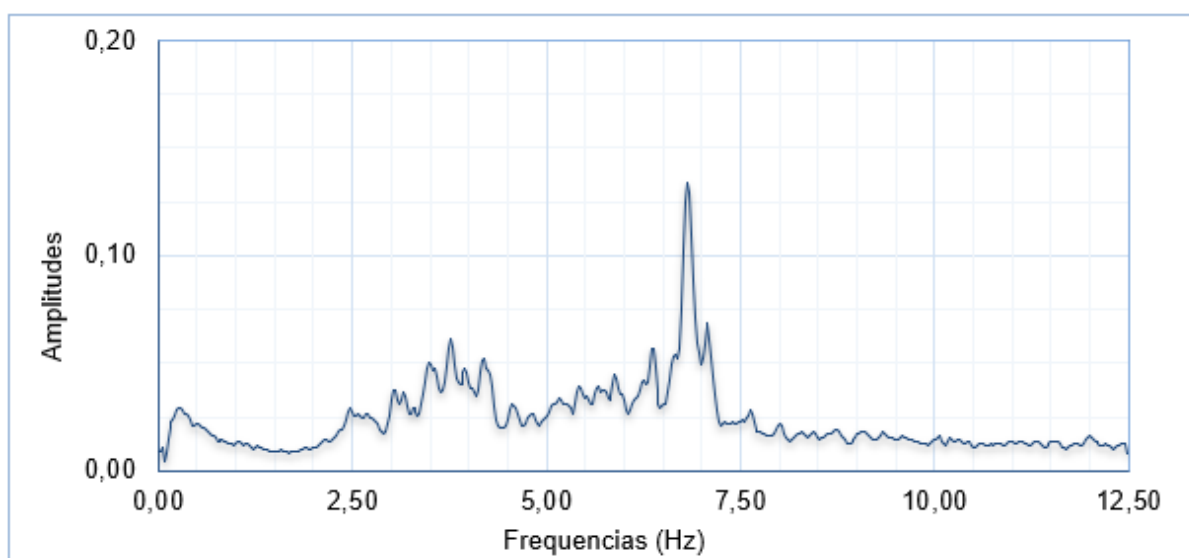
Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Figura 105 - Processamento Ensaio 3

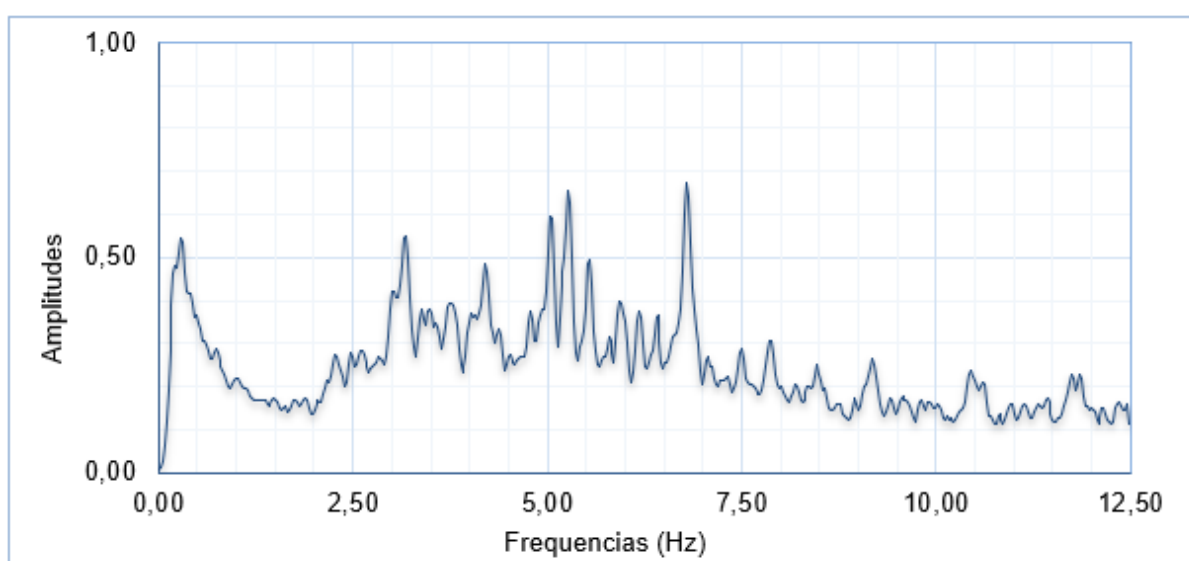
Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Figura 106 - Processamento Ensaio 4

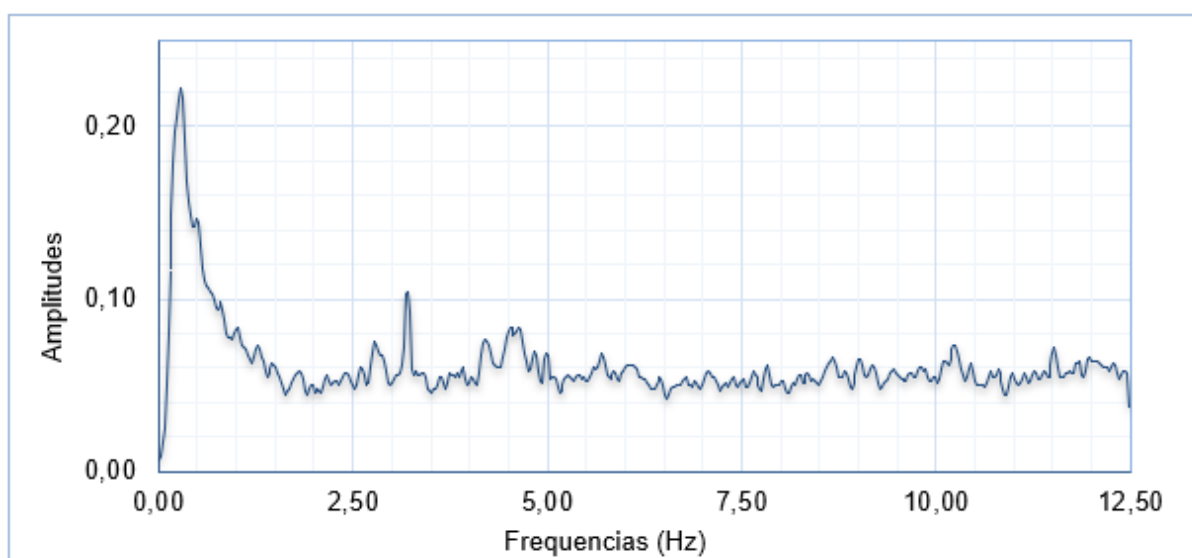
Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Figura 107 - Processamento Ensaio 5

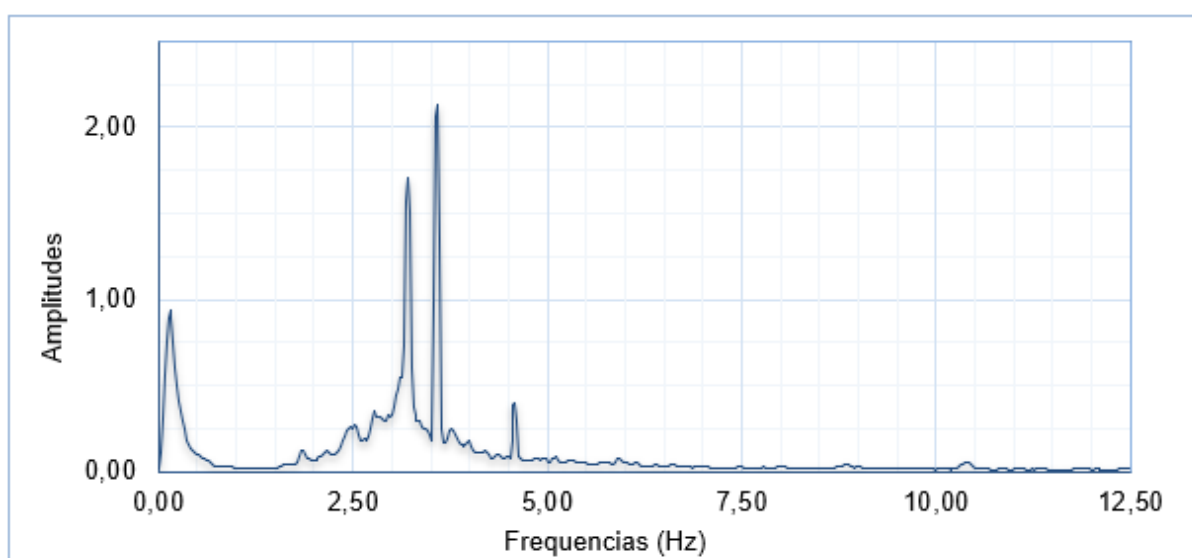
Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Figura 108 - Processamento Ensaio 6

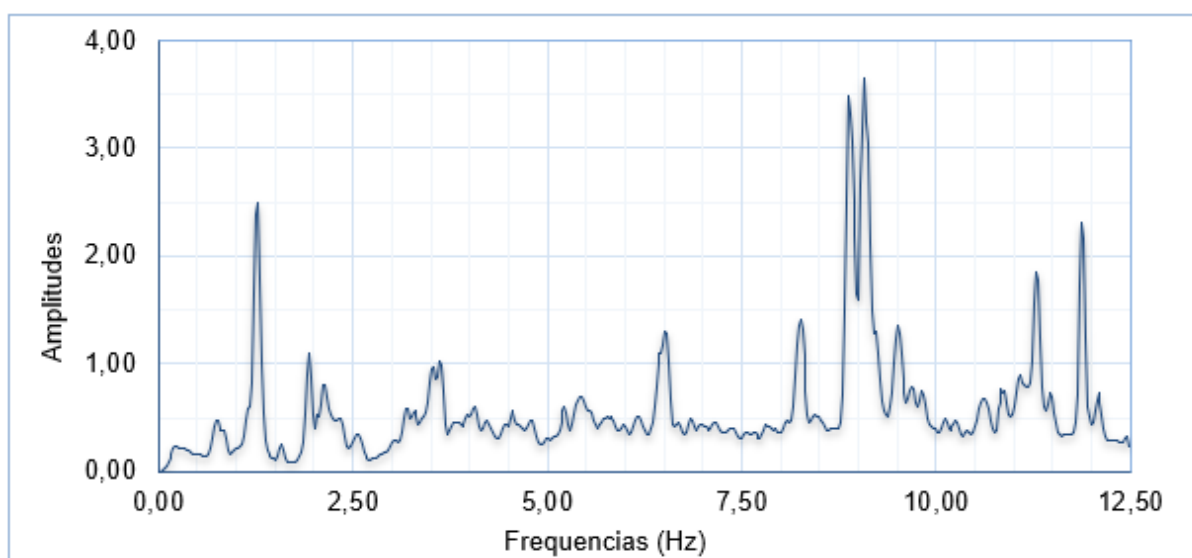
Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Figura 109 - Processamento Ensaio 7

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Figura 110 - Processamento Ensaio 8

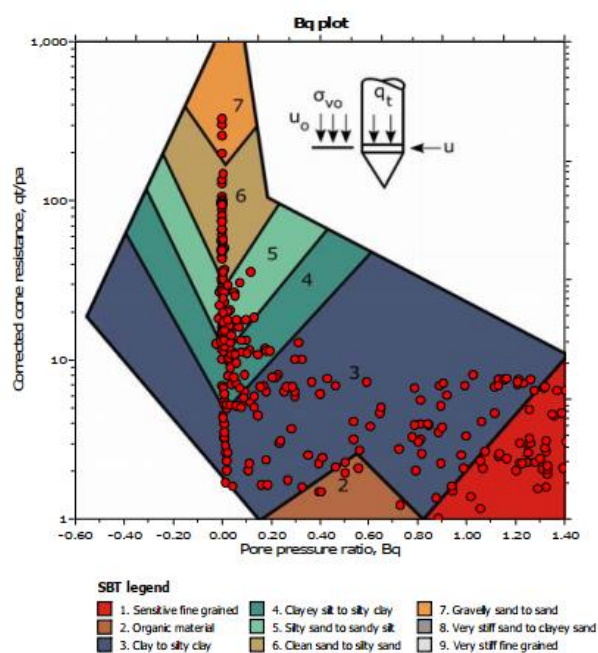
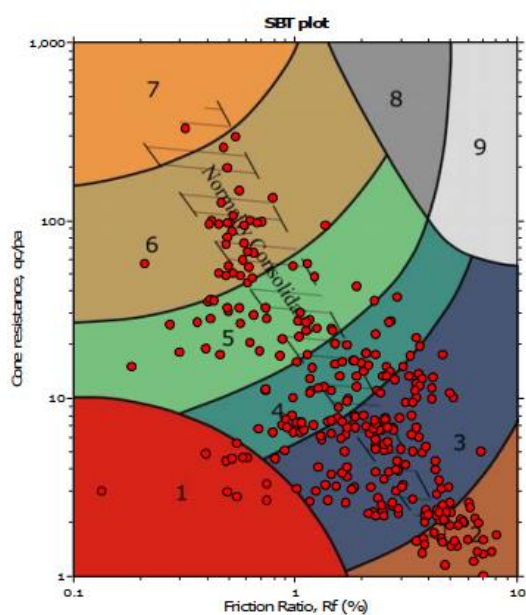
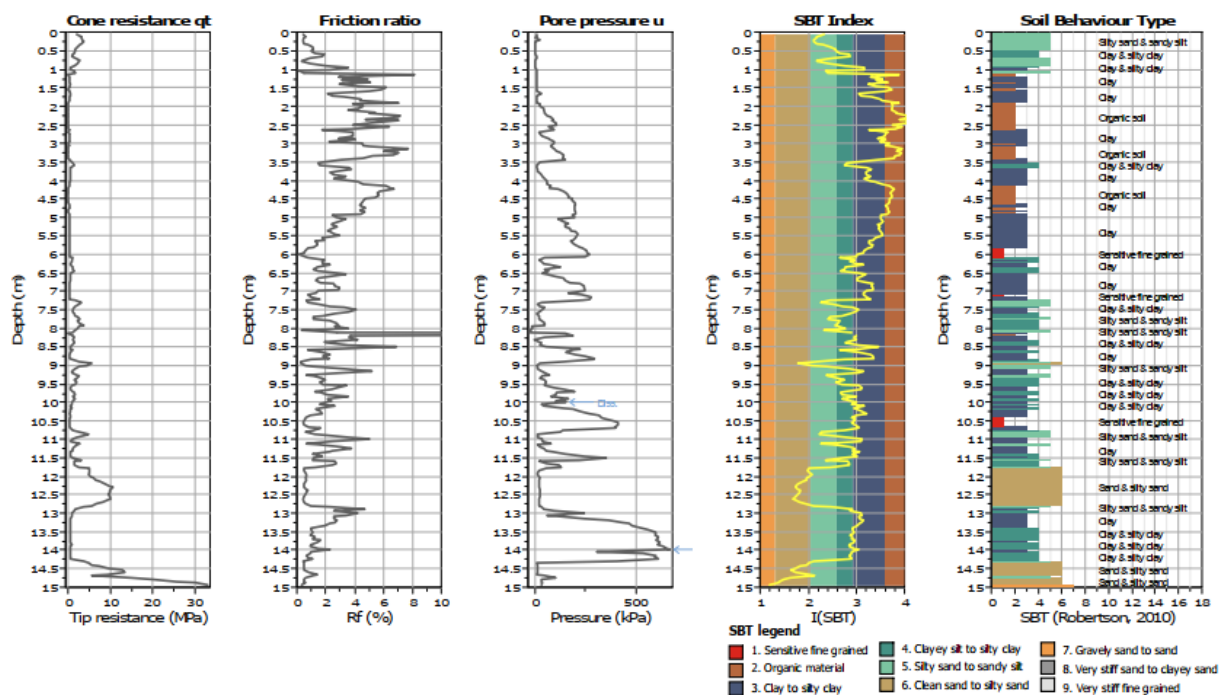
Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Figura 111 - Processamento Ensaio 9

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

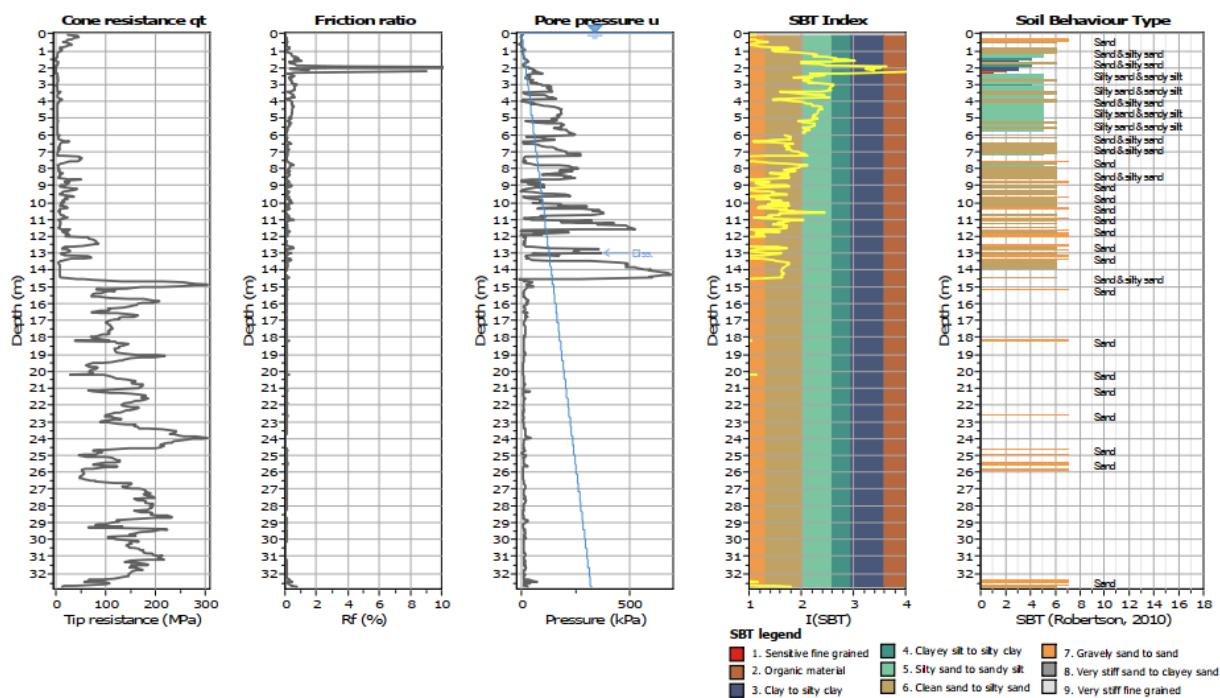
ANEXO A – Laudos CPTu

Figura 112 - CPTu 0001

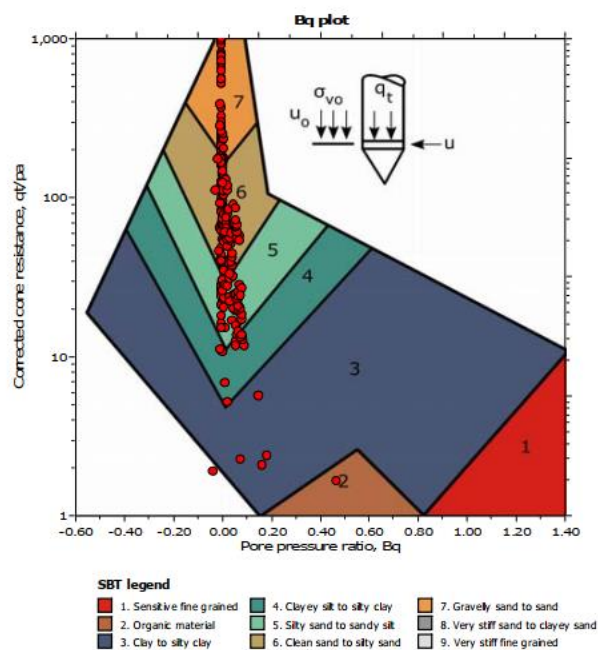
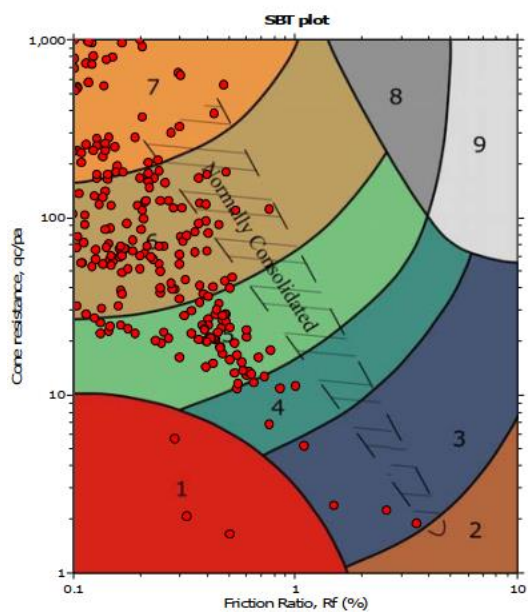


Fonte: Arquivo disponibilizado pela mineradora.

Figura 113 - CPTu 0001A

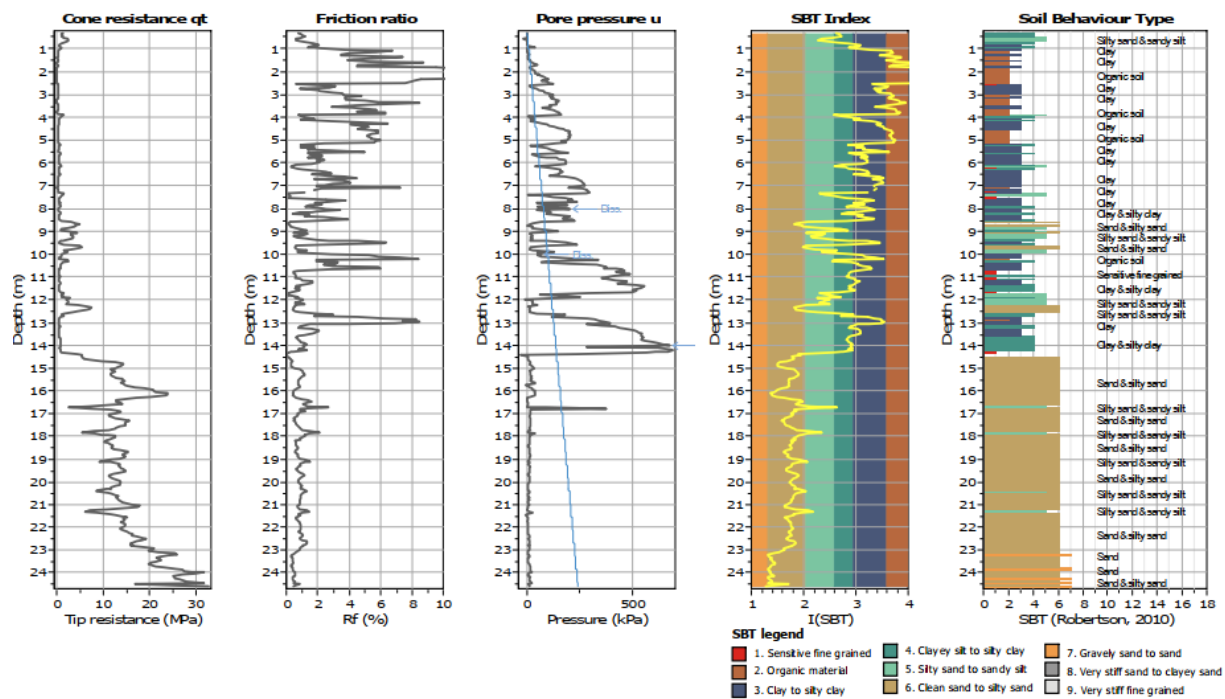


SBT - Bq plots

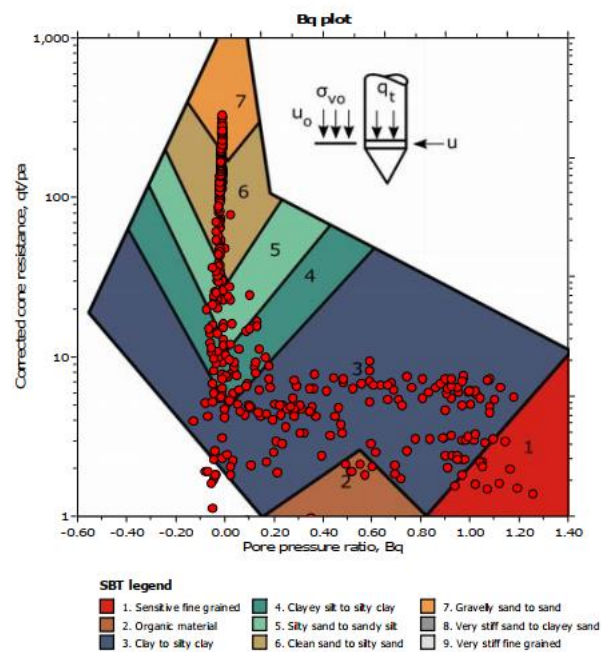
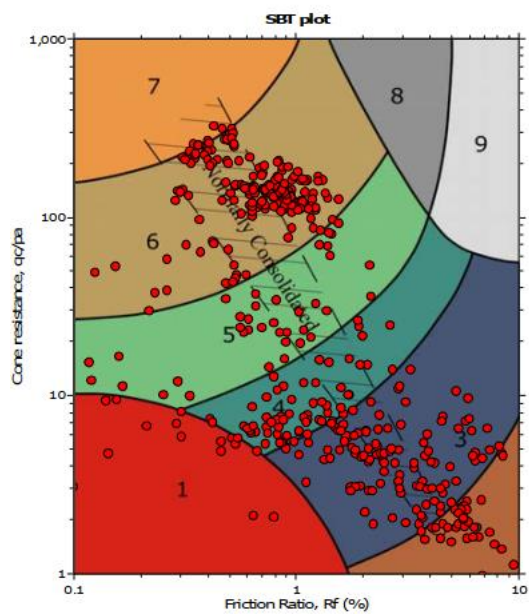


Fonte: Arquivo disponibilizado pela mineradora.

Figura 114 - CPTu 0001B

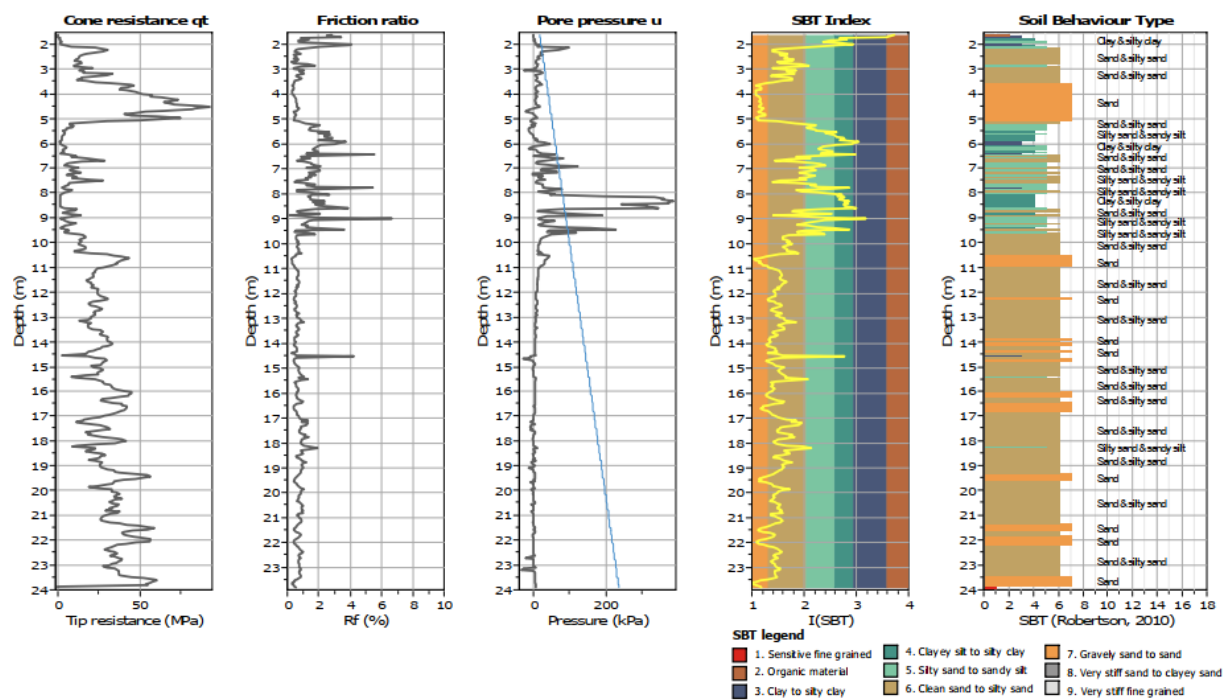


SBT - Bq plots

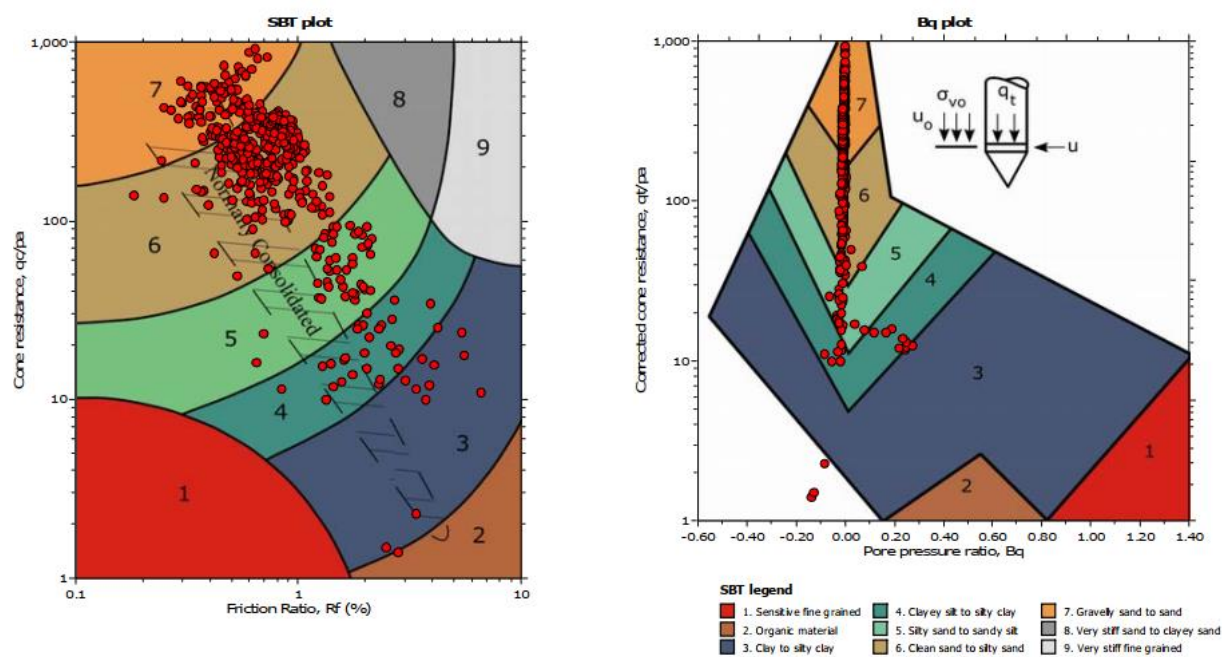


Fonte: Arquivo disponibilizado pela mineradora.

Figura 115 - CPTu 0002B

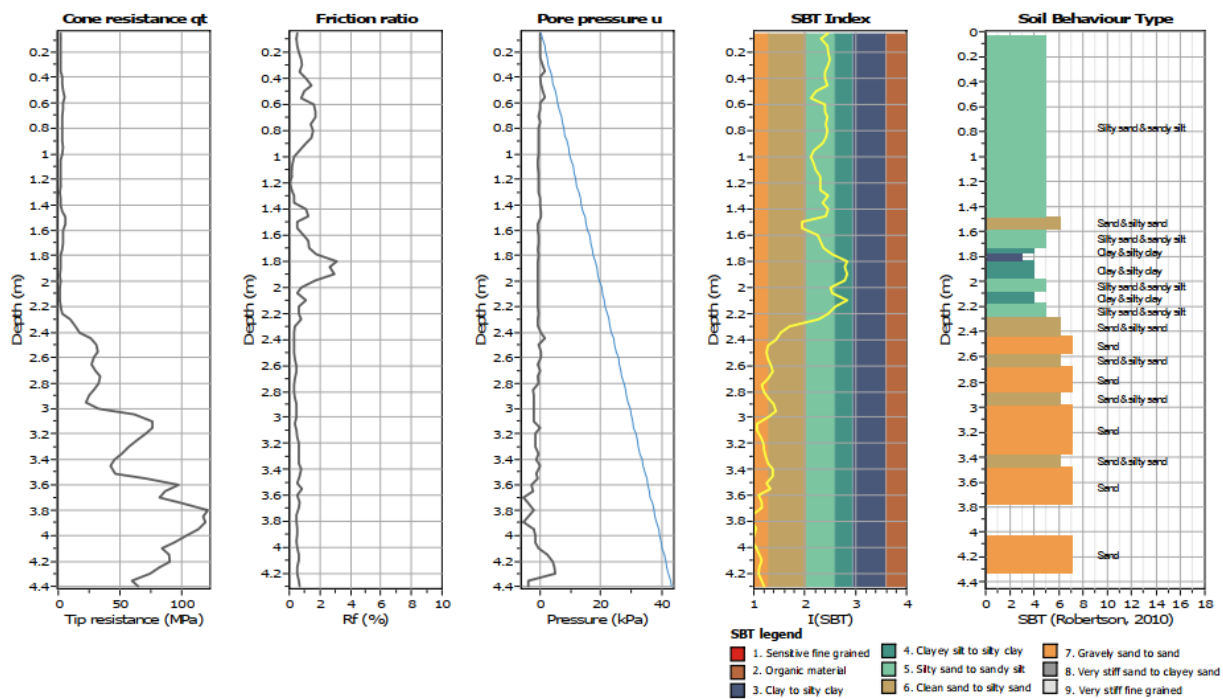


SBT - Bq plots

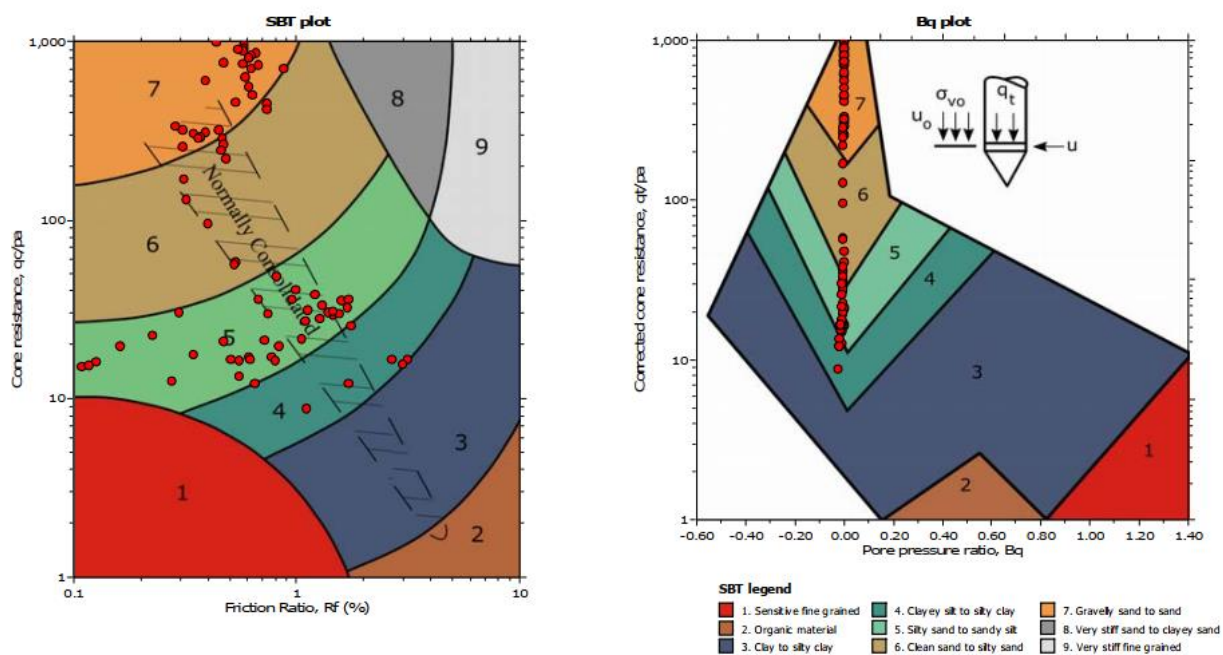


Fonte: Arquivo disponibilizado pela mineradora.

Figura 116 - CPTu 0003A

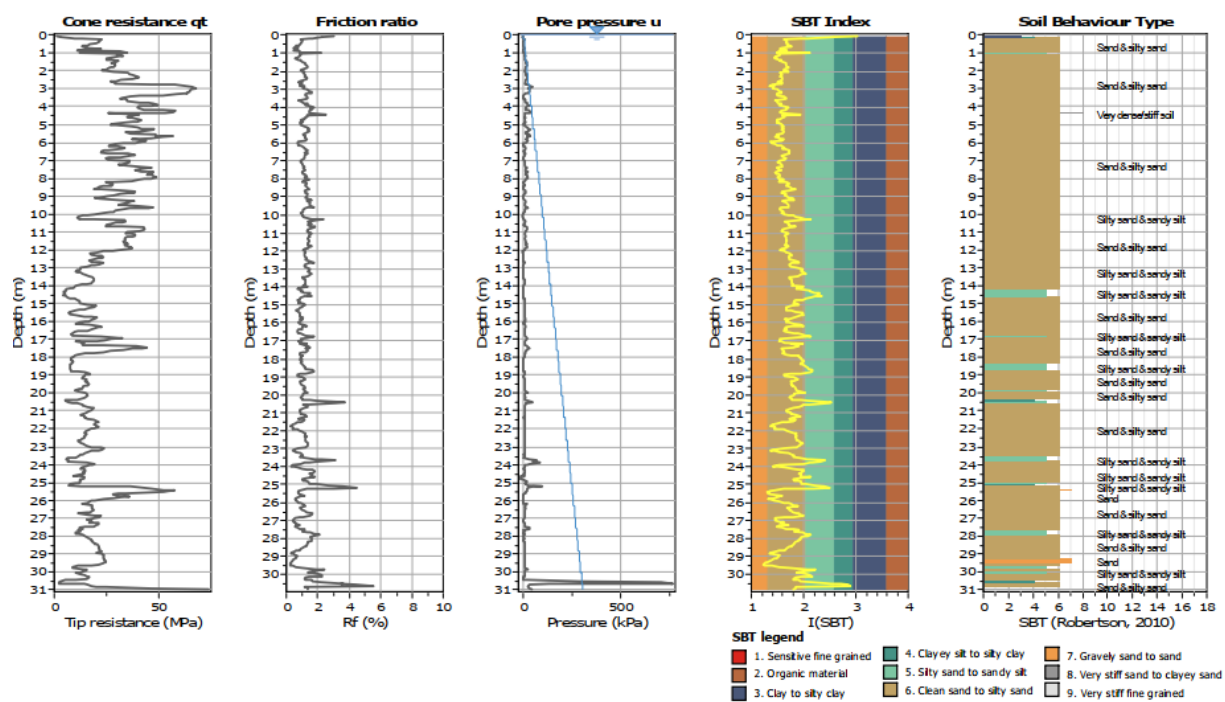


SBT - Bq plots

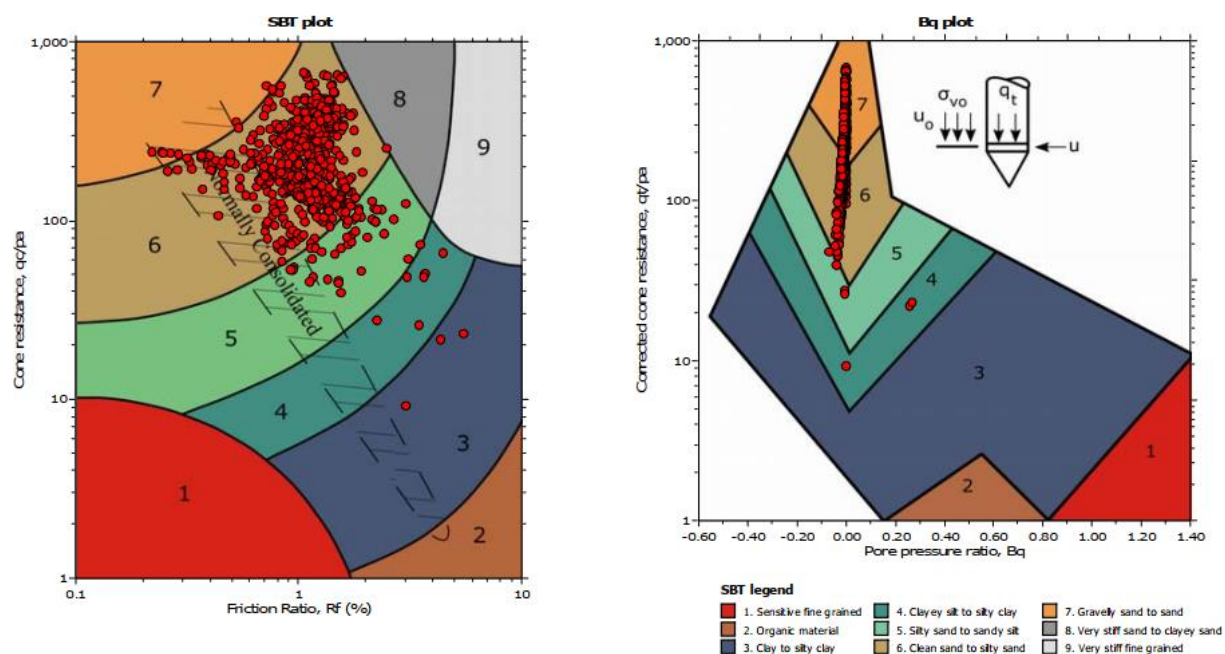


Fonte: Arquivo disponibilizado pela mineradora.

Figura 117 - CPTu 0004

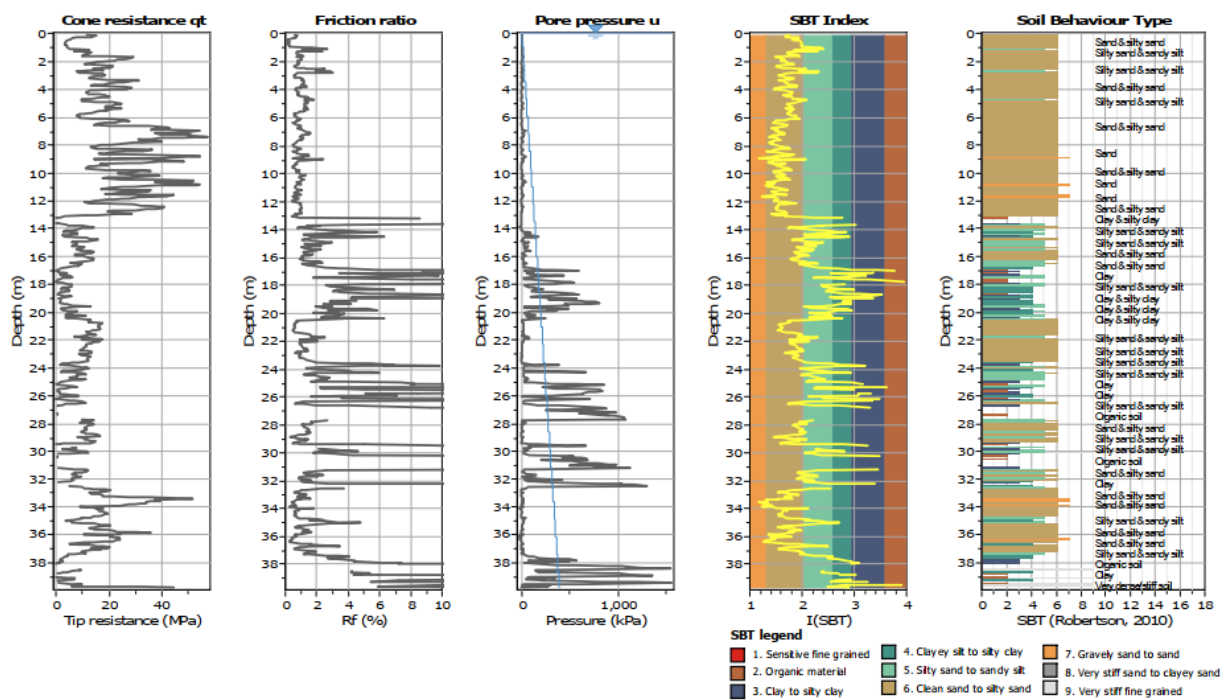


SBT - Bq plots

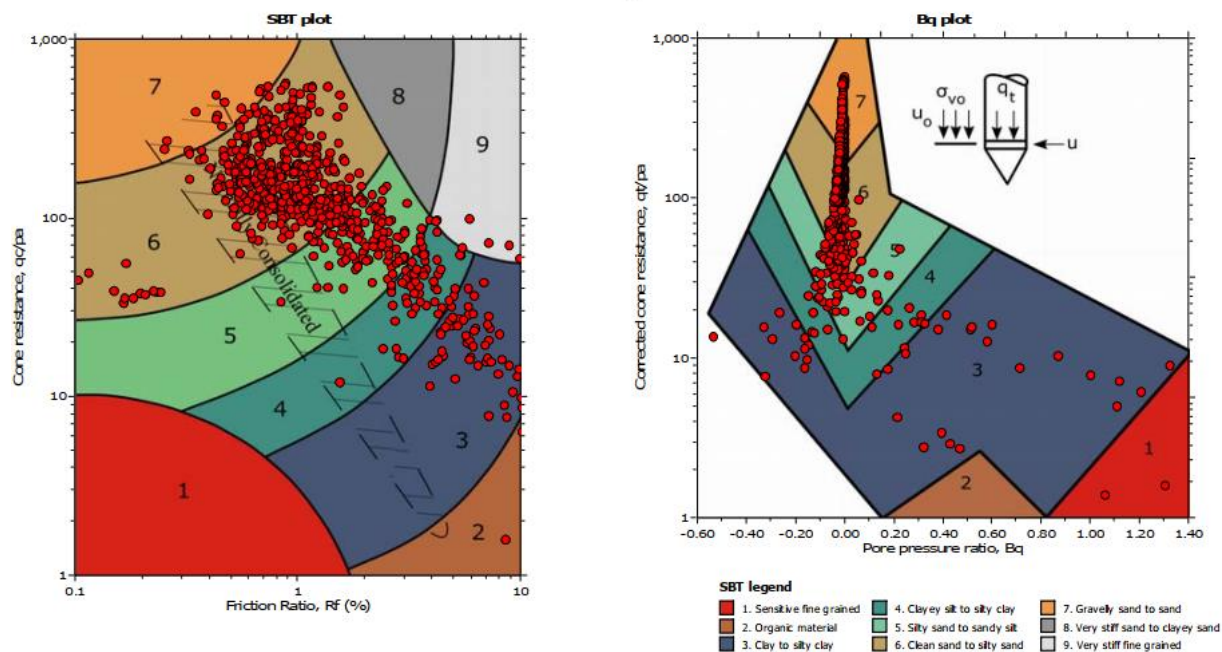


Fonte: Arquivo disponibilizado pela mineradora.

Figura 118 - CPTu 0005

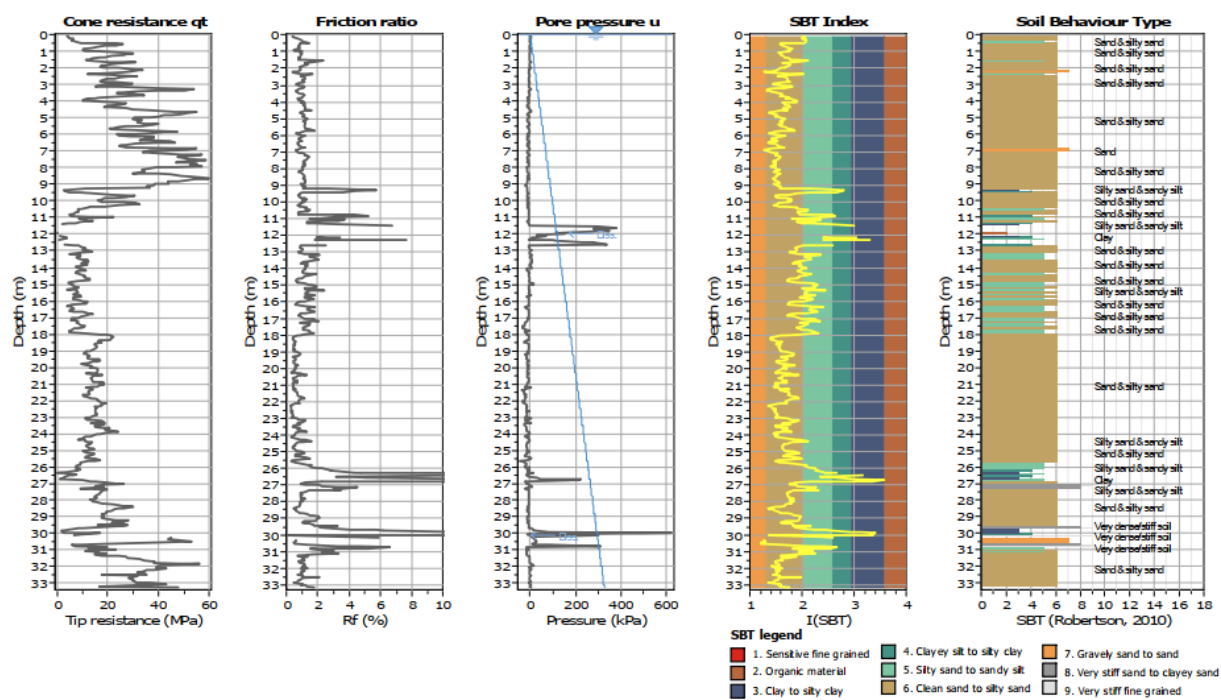


SBT - Bq plots

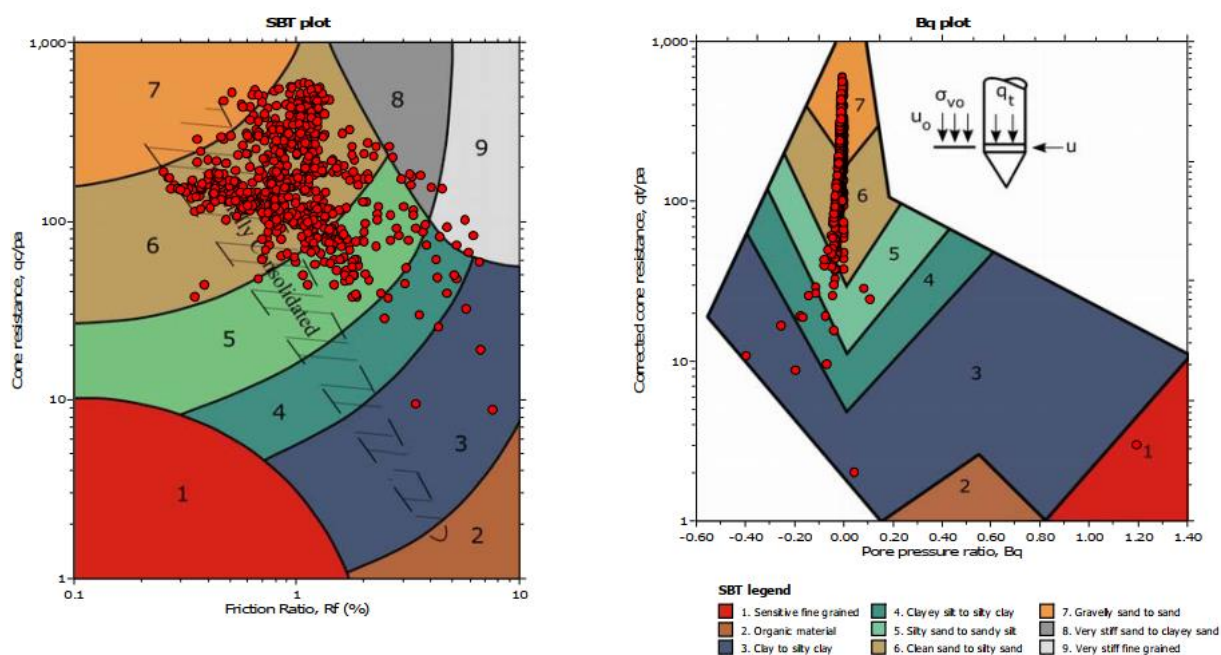


Fonte: Arquivo disponibilizado pela mineradora.

Figura 119 - CPTu 0006

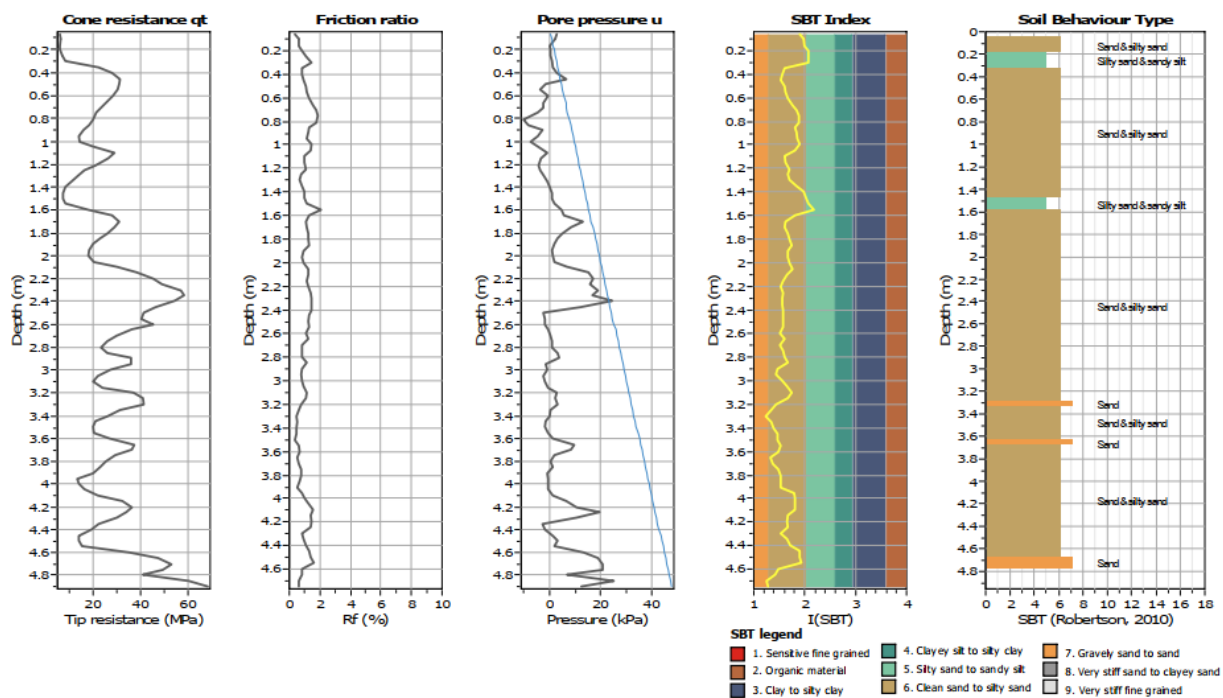


SBT - Bq plots

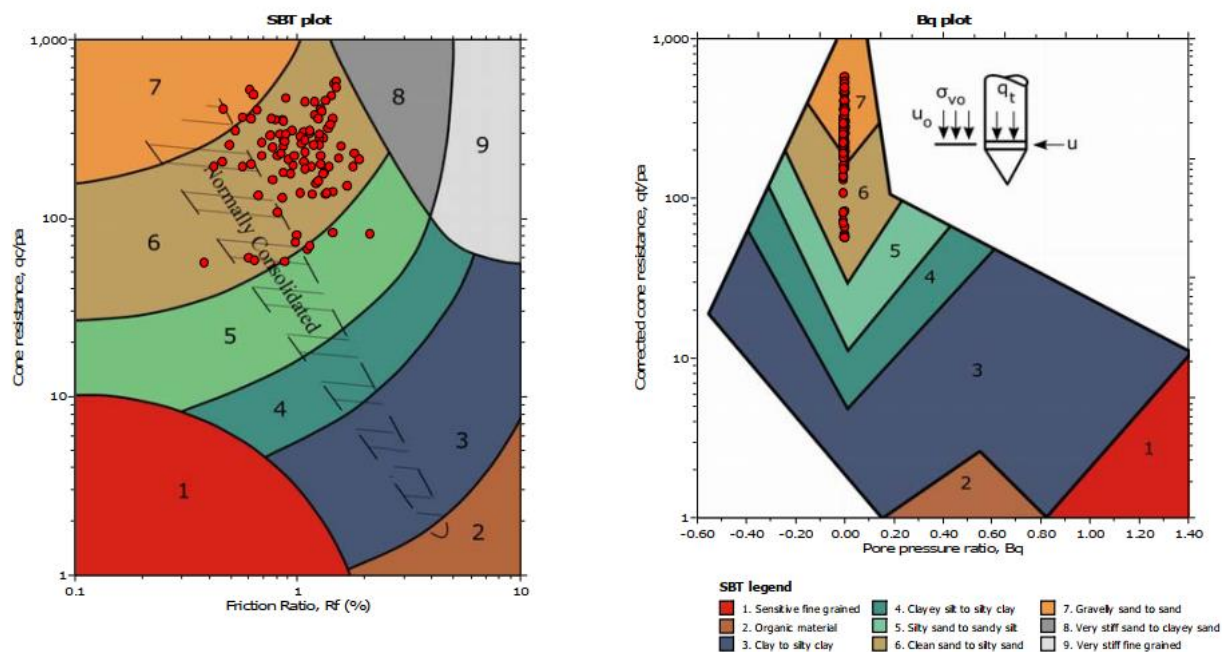


Fonte: Arquivo disponibilizado pela mineradora.

Figura 120 - CPTu 0007

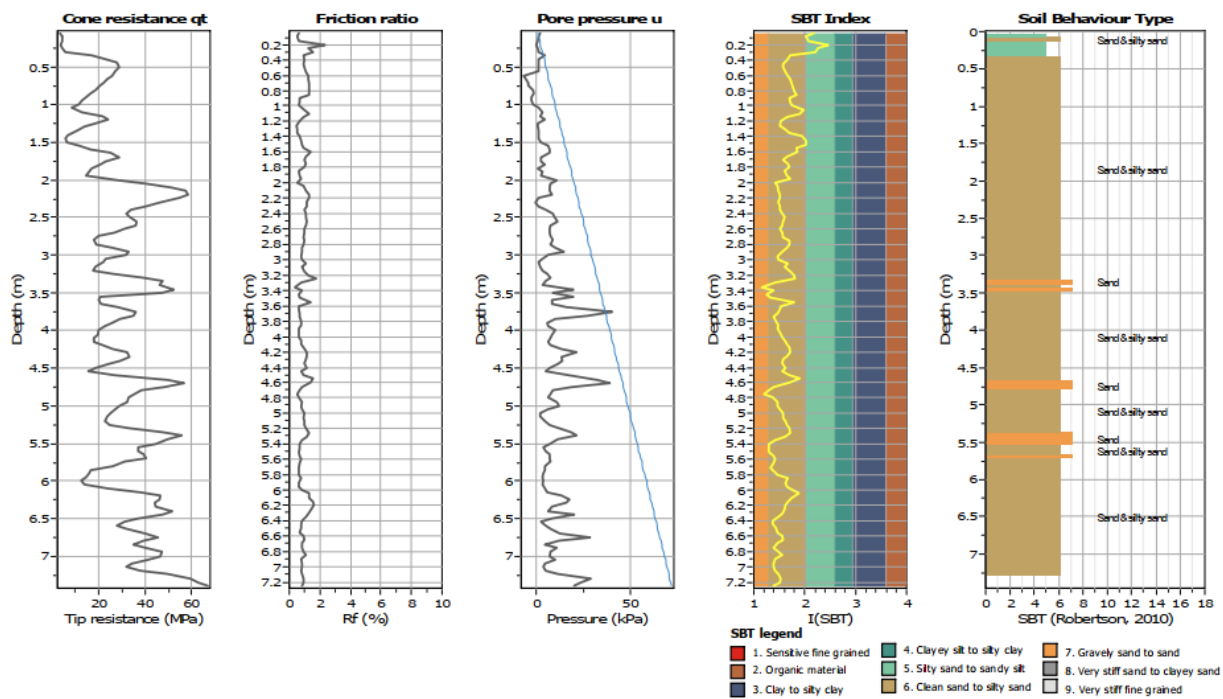


SBT - Bq plots

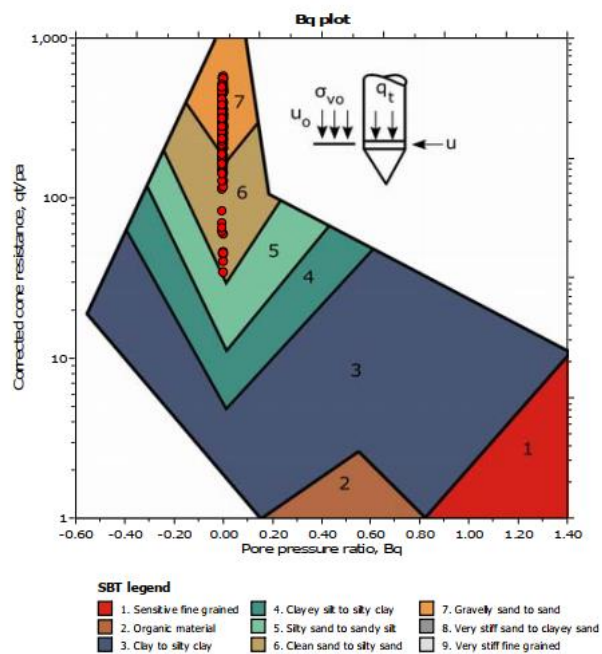
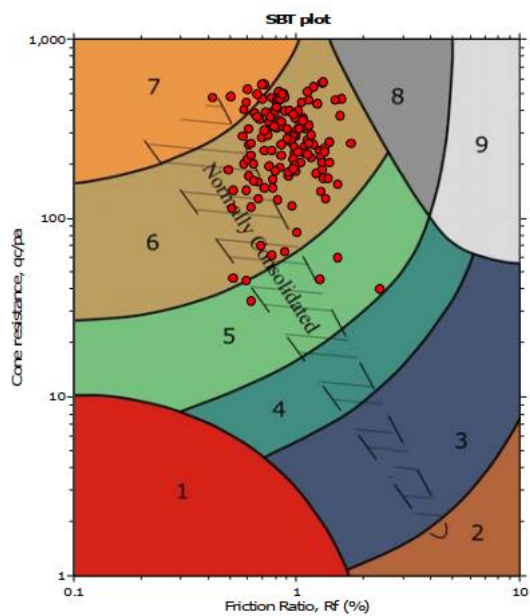


Fonte: Arquivo disponibilizado pela mineradora.

Figura 121 - CPTu 0007A

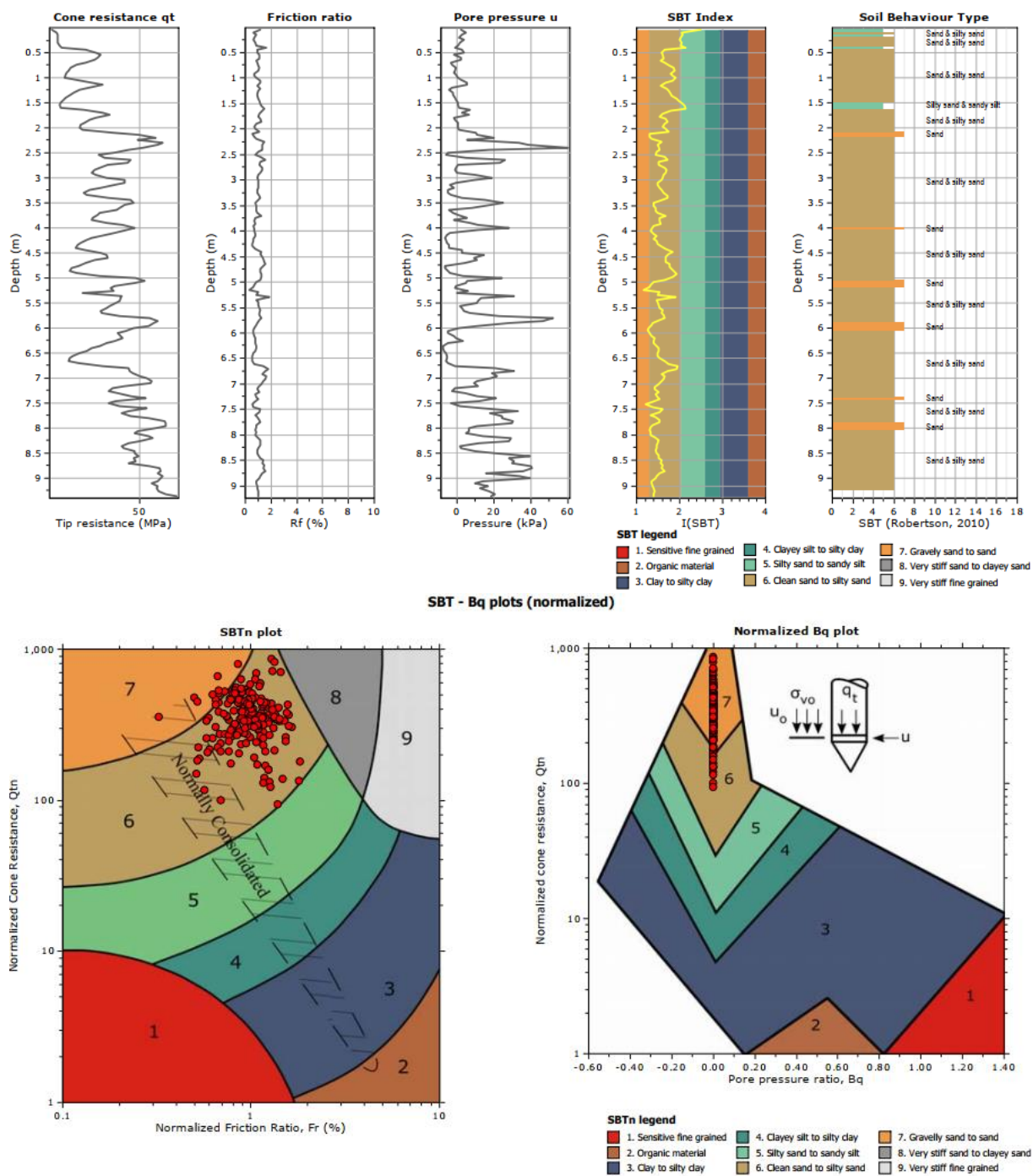


SBT - Bq plots



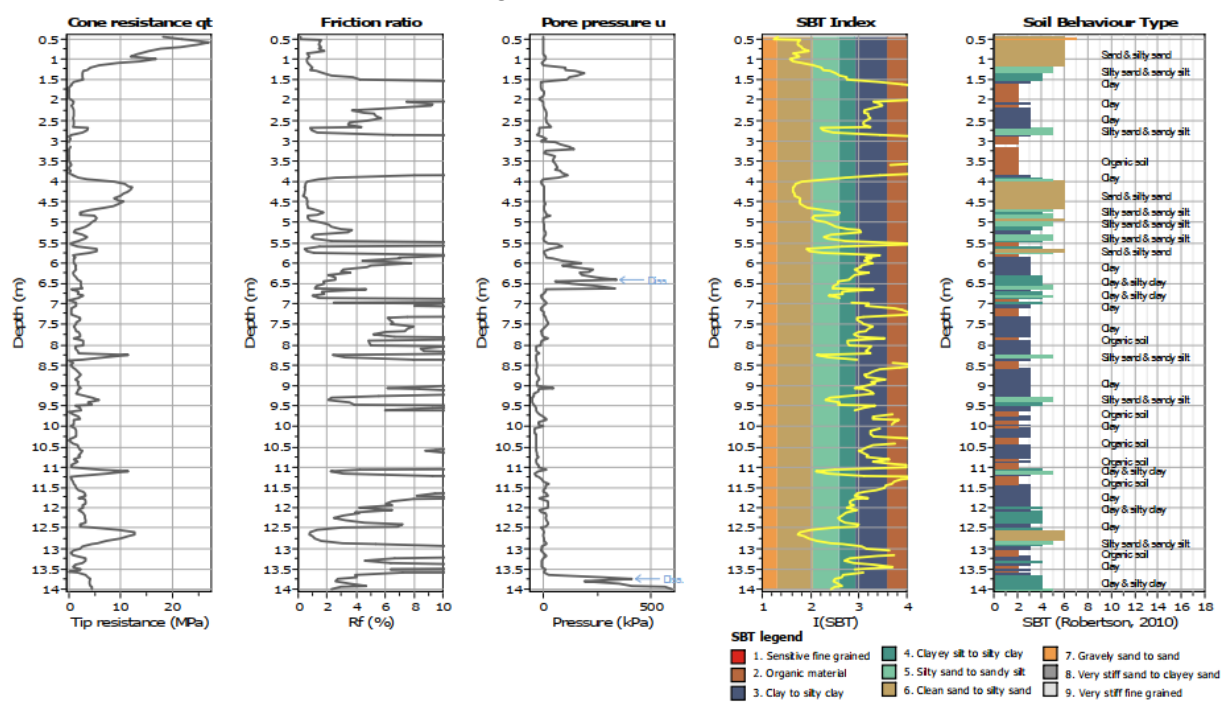
Fonte: Arquivo disponibilizado pela mineradora.

Figura 122 - CPTu 0007B

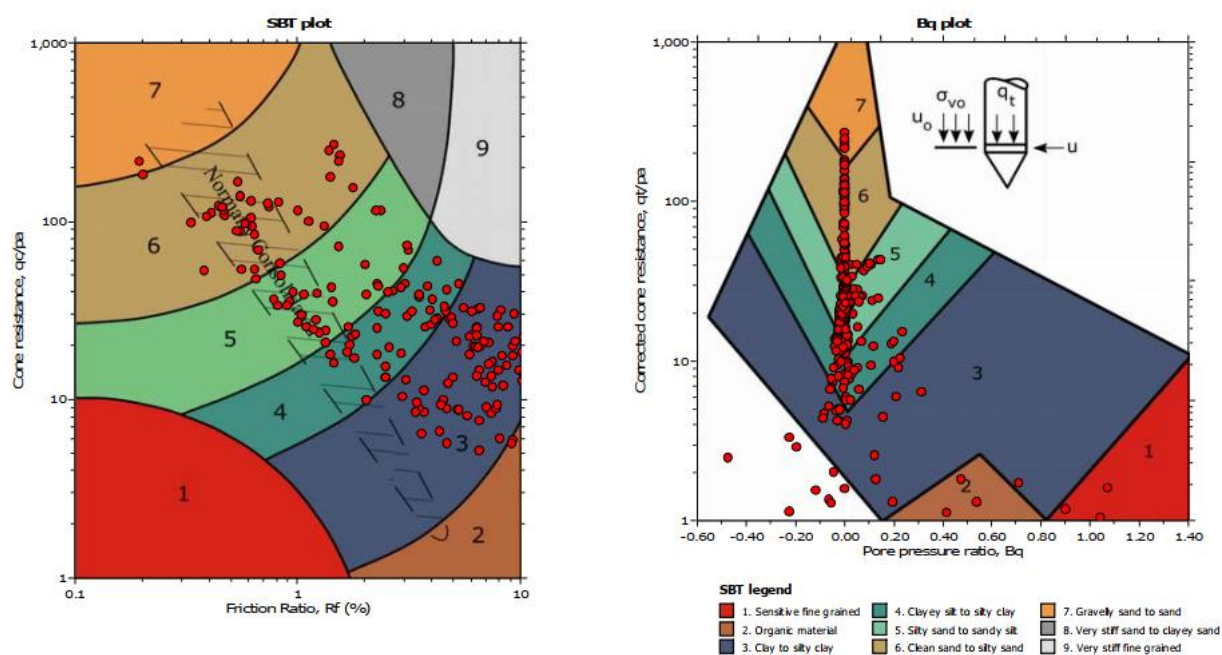


Fonte: Arquivo disponibilizado pela mineradora.

Figura 123 - CPTu 0008

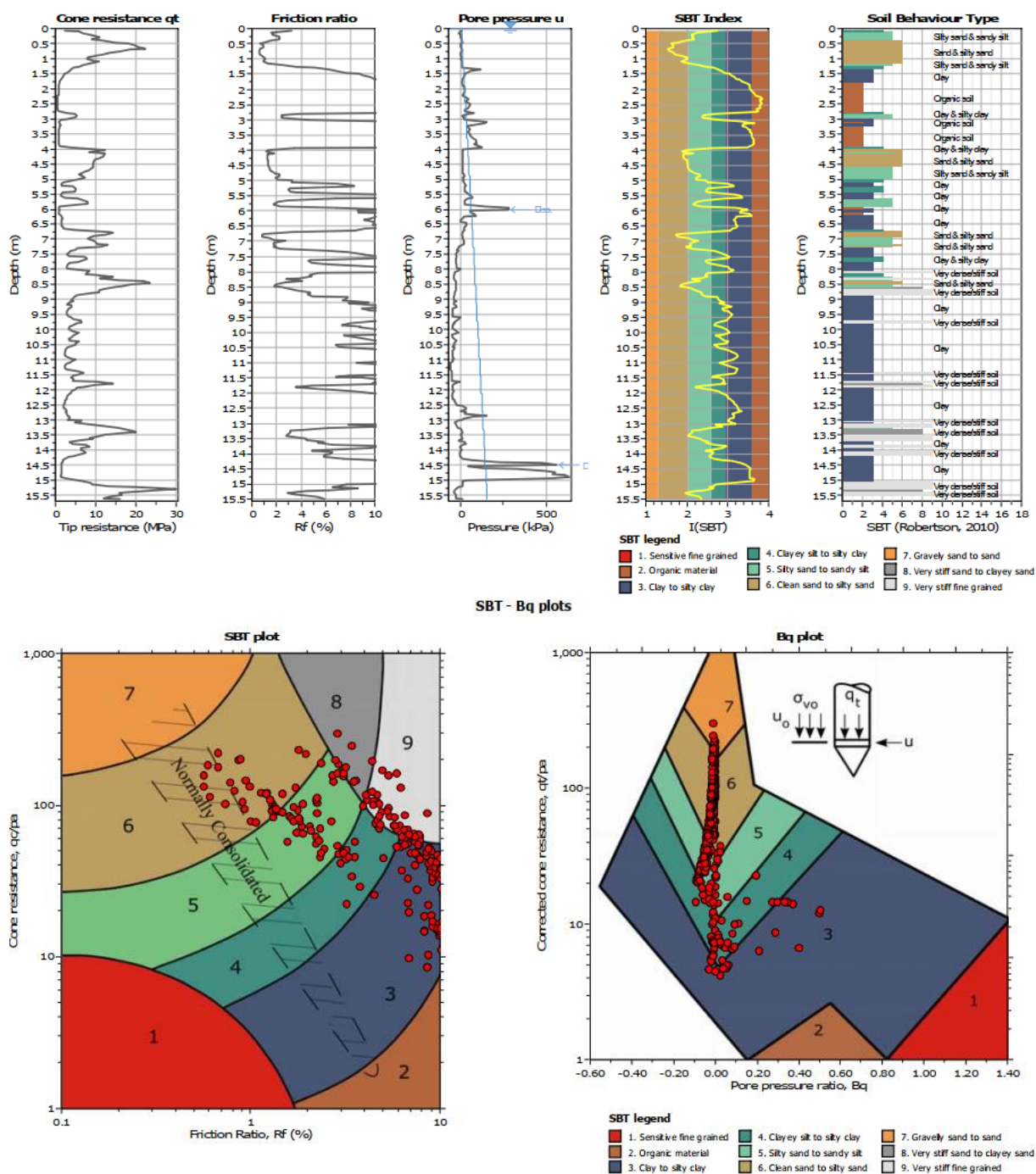


SBT - Bq plots



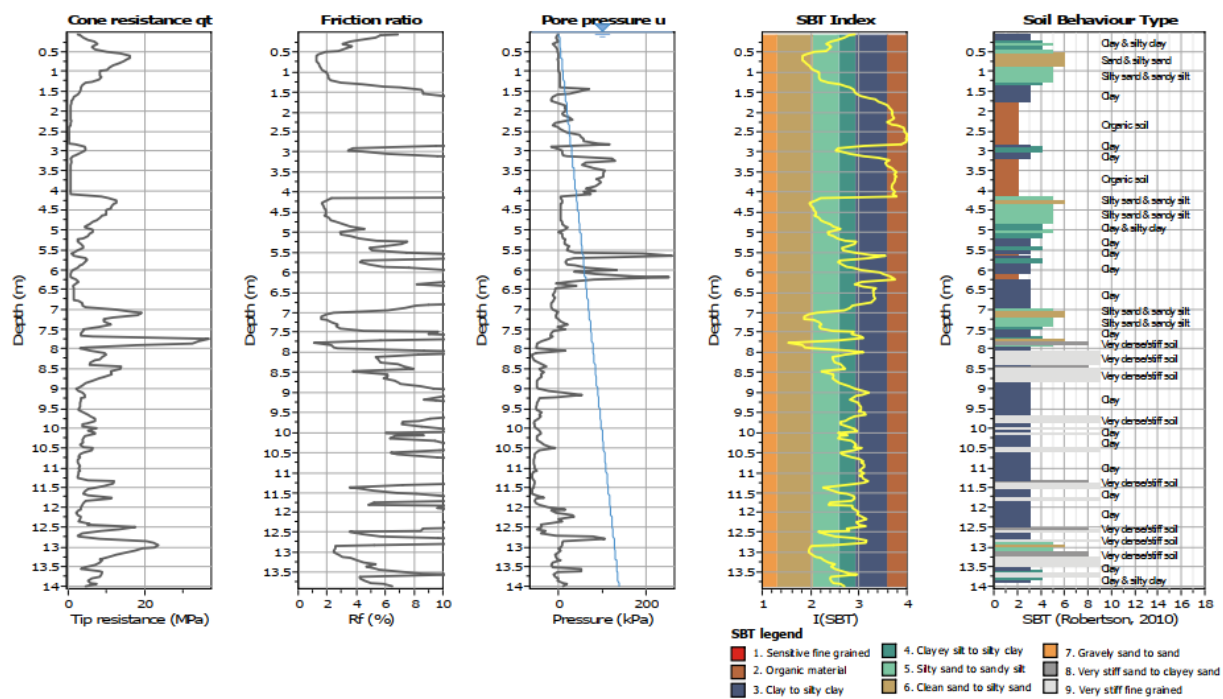
Fonte: Arquivo disponibilizado pela mineradora.

Figura 124 - CPTu 0008A

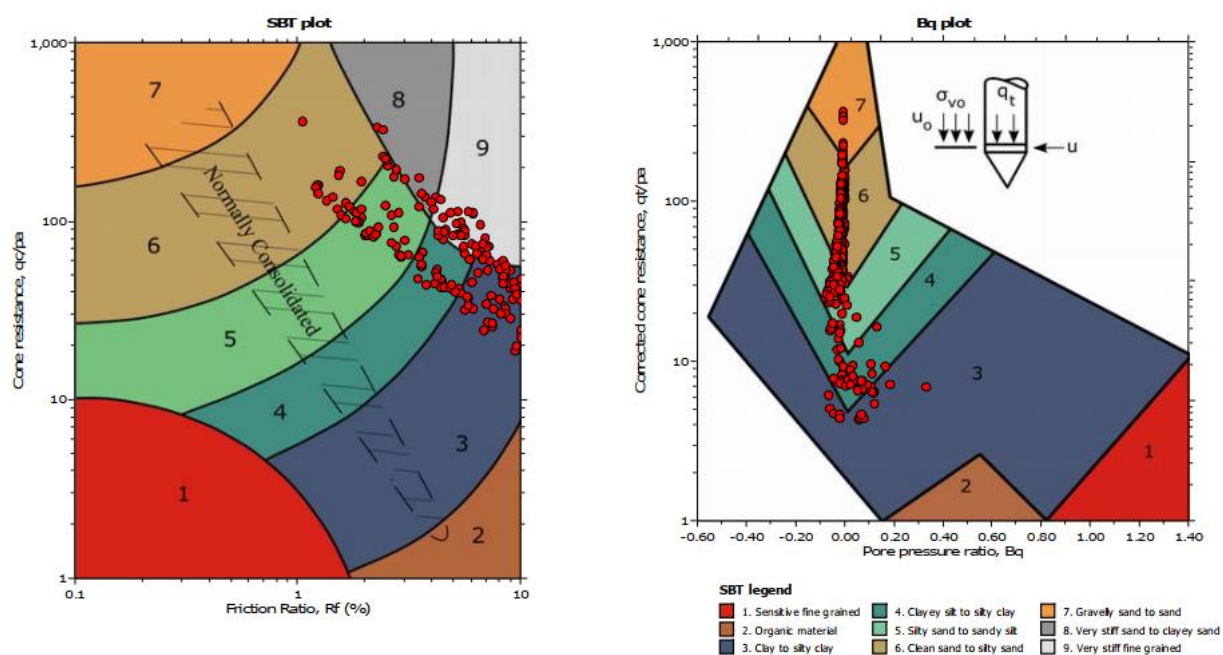


Fonte: Arquivo disponibilizado pela mineradora.

Figura 125 - CPTu 0008B

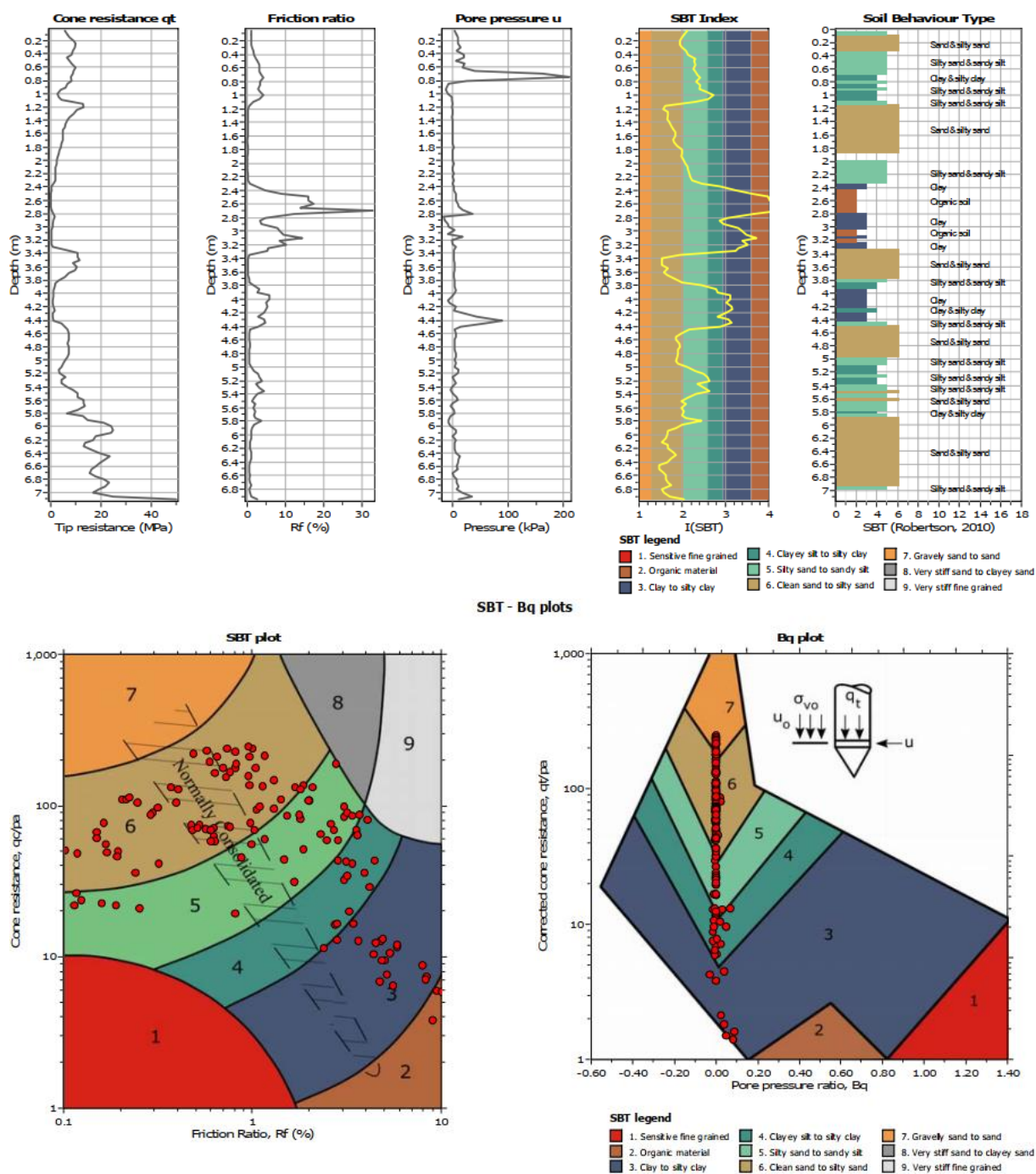


SBT - Bq plots



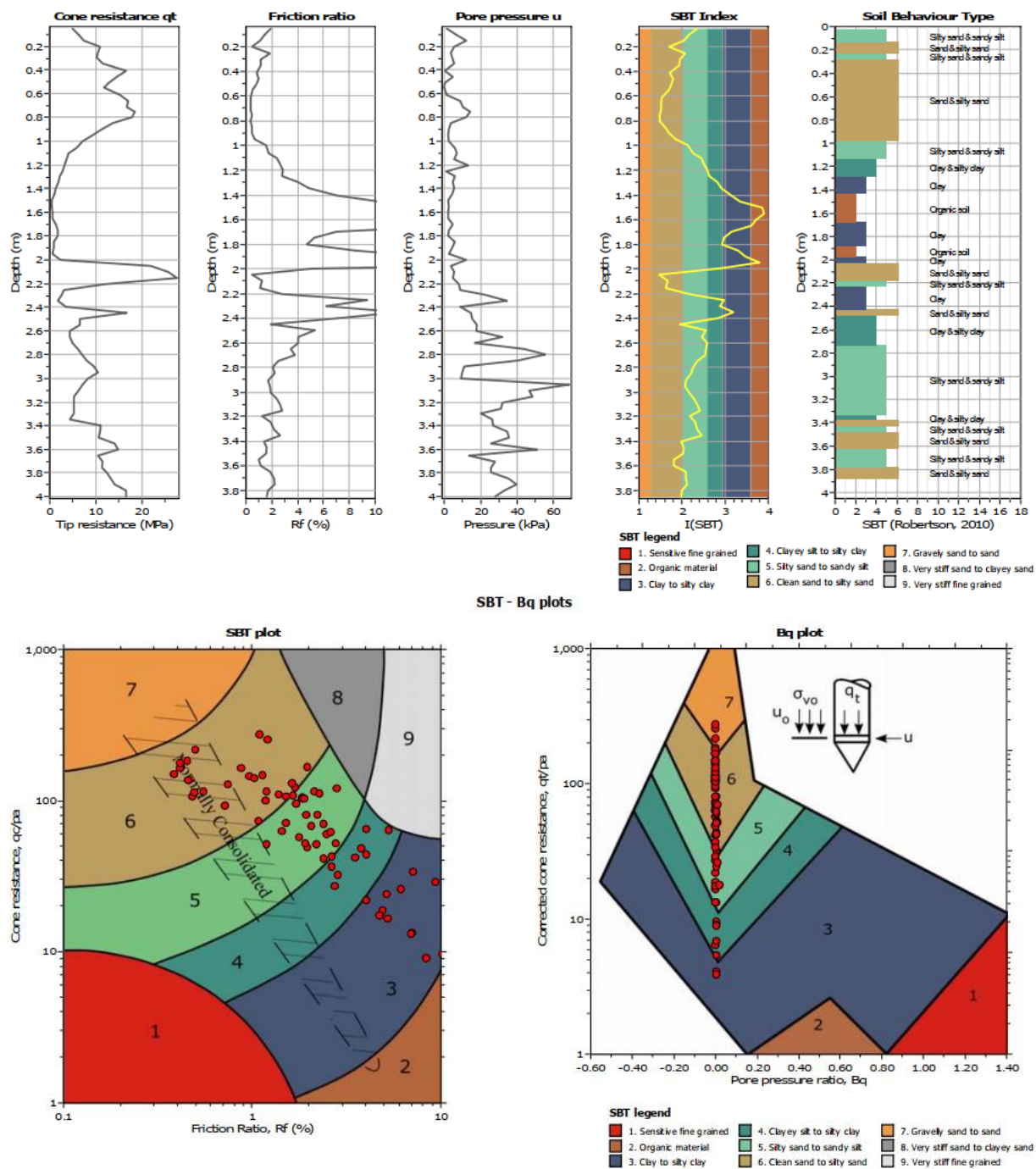
Fonte: Arquivo disponibilizado pela mineradora.

Figura 126 - CPTu 0009



Fonte: Arquivo disponibilizado pela mineradora.

Figura 127 - CPTu 0010A



Fonte: Arquivo disponibilizado pela mineradora.