



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
Universidade Federal de Alfenas - UNIFAL-MG
Campus Avançado de Poços de Caldas
Rodovia José Aurélio Vilela, nº 11.999 - Cidade Universitária
CEP: 37715-400 - Poços de Caldas/MG



**Universidade Federal de Alfenas (UNIFAL-MG), Campus de
Poços de Caldas
Curso de Especialização em Engenharia de Mineral (CEEM)**

Angelo Ferreira Conti

**TÉCNICAS CUIDADOSAS DE DESMONTE DE ROCHAS
PRÓXIMO A ÁREAS SENSÍVEIS: medidas mitigatórias e
instrumentação**

Poços de Caldas
2023



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
Universidade Federal de Alfenas - UNIFAL-MG
Campus Avançado de Poços de Caldas
Rodovia José Aurélio Vilela, nº 11.999 - Cidade Universitária
CEP: 37715-400 - Poços de Caldas/MG



Angelo Ferreira Conti

TÉCNICAS CUIDADOSAS DE DESMONTE DE ROCHAS PRÓXIMO A ÁREAS SENSÍVEIS: medidas mitigatórias e instrumentação

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) apresentado
à Universidade Federal de Alfenas (UNIFAL-MG)
como parte dos requisitos para a integralização do
curso de Especialização em Engenharia Mineral
(CEEM).

Área de concentração: Lavra

Orientador: Prof.(a) Dr.(a) Luiz Carlos Rusilo

Poços de Caldas

2023





Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal de Alfenas
Biblioteca Campus Poços de Caldas

Conti, Angelo Ferreira.

Técnicas cuidadosas de desmonte de rochas próximo a áreas sensíveis:
medidas mitigatórias e instrumentação / Angelo Ferreira Conti. - Poços de
Caldas, MG, 2023.

100 f. : il. -

Orientador(a): Luiz Carlos Rusilo.

Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em Engenharia de
Minas) - Universidade Federal de Alfenas, Poços de Caldas, MG, 2023.
Bibliografia.

1. Desmontes cuidadosos. 2. Estruturas geotécnicas. 3. Explosivos. 4.
Instrumentações. I. Rusilo, Luiz Carlos, orient. II. Título.

Ficha gerada automaticamente com dados fornecidos pelo autor.





Angelo Ferreira Conti

TÉCNICAS CUIDADOSAS DE DESMONTE DE ROCHAS PRÓXIMO A ÁREAS SENSÍVEIS: medidas mitigatórias e instrumentação

A banca examinadora abaixo-assinada aprova o Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) apresentado à Universidade Federal de Alfenas (UNIFAL-MG) como parte dos requisitos para a integralização do curso de Especialização em Engenharia Mineral (CEEM).

Área de concentração: Lavra



Angelo Ferreira Conti

Técnicas cuidadosas de desmonte de rochas próximo a áreas sensíveis: medidas mitigatórias e instrumentação

A banca examinadora abaixo-assinada aprova o Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) apresentado à Universidade Federal de Alfenas (UNIFAL-MG) como parte dos requisitos para a integralização do curso de Especialização em Engenharia Mineral (CEEM).

Área de concentração: Lavra

Aprovada em: 29 de agosto de 2023

Orientador: Luiz Carlos Rusilo

Instituição: Universidade Federal de Alfenas – UNIFAL-MG

Assinatura:

Examinador 1: Osvail André Quaglio

Instituição: Universidade Federal de Alfenas – UNIFAL-MG

Assinatura:

Examinador 2: Edmo da Cunha Rodovalho

Instituição: Universidade Federal de Alfenas – UNIFAL-MG

Assinatura:



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
Universidade Federal de Alfenas - UNIFAL-MG
Campus Avançado de Poços de Caldas

Rodovia José Aurélio Vilela, nº 11.999 - Cidade Universitária
CEP: 37715-400 - Poços de Caldas/MG



“A mente que se abre a uma nova
ideia jamais voltará ao seu tamanho
original”.

(Richard Feynman)



Curso de Especialização
em Engenharia Mineral



LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Efeito da distância sobre vibrações.....	21
Figura 2 - Ondas de compressão (P) e cisalhamento (S)	23
Figura 3 - Registro de ondas.....	24
Figura 4 - Movimento harmônico da onda.....	25
Figura 5 - Representação gráfica dos limites de velocidade de vibração de partícula de pico por faixas de frequência.....	31
Figura 6 - Curva teórica de recalques em aterros de resíduos sólidos ao longo do tempo.	33
Figura 7 - Esquema da movimentação dos marcos superficiais.	36
Figura 8 - Em A, vista externa do geofone e, em B, vista esquemática, com representação dos eixos ortogonais.	39
Figura 9 - Mapa locacional do município de Biguaçu.	42
Figura 10 - Planta com a locação representativa do Aterro e do Local de detonação....	43
Figura 11 - Mapa geológico.	44
Figura 12 - Detalhe do mapa geológico	46
Figura 13 - Localização das sondagens realizadas na área.	47
Figura 14 - Área do aterro sanitário de Tijuquinhas.....	48
Figura 15 - Disposição instrumentos célula antiga (deposição encerrada).	51
Figura 16 - Disposição instrumentos célula nova (em operação) 17.....	51
Figura 17 - Disposição sismógrafos em um evento de detonação.	55
Figura 18 - Sismograma ilustrativo a ser analisado.....	57
Figura 19 - Equação de atenuação em diagrama log-log.....	66



LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Instrumentação Geotécnica.	52
Quadro 2 - Relação de instrumentos geotécnicos.....	53
Quadro 3 - CME com 95% de precisão na direção SW.....	68
Quadro 4 - Critérios Fator de segurança Aterro.	71





LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Limites de velocidade de vibração de partícula de pico por faixas de frequência.	30
Tabela 2 - Grau de risco para taludes e maciços terrosos.	37
Tabela 3 - Critérios gerais de ação para velocidades de recalques para aterros sanitários.	37



LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRELPE	Associação Brasileira de empresas de limpeza pública e resíduos especiais
ALS	Autopista Litoral Sul
CGRT	Central de gerenciamento de resíduos de Tijuquinhas
CME	Carga máxima por espera
CPRM	Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais
DB	Decibéis
DGSI	<i>Durhan Geo Slope Indicator</i>
FS	Fator de segurança
G	Unidade de medição de aceleração de partícula (gravidade)
GNSS	<i>Global Navigation Satellite System</i>
HZ	Hertz
IPT	Instituto de pesquisas tecnológicas de São Paulo
ISSE	<i>International Society of Explosives Engineers</i>
KG	Quilogramas
KM	Quilometro
MS	Milissegundos
MM/S	Milímetros por segundo
M	Metros
M ²	Metros quadrados
M ³	Metros cúbicos
MNA	Metros nível de água
NBR	Norma Brasileira
NP3y2ft	Complexo águas mornas
PGRT	Parque de gerenciamento de resíduos de Tijuquinhas
PPM	Parte por milhão



PPV	Velocidade deslocamento partícula
Q	Carga de explosivo em quilogramas
RAD	Rocha Alterada Dura
RQD	<i>Rock Quality Designation</i>
RSU	Resíduos sólidos urbanos
SC	Santa Catarina
USBR	<i>United States Bureau of Reclamation</i>
VR	Velocidade resultante deslocamento de uma partícula



LISTA DE SÍMBOLOS

α	Alfa
%	Porcentagem
$\sqrt{}$	Raiz quadrada





SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA	13
2	OBJETIVO	15
2.1	Objetivo geral	15
2.2	Objetivos específicos	15
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
3.1	Desmonte cuidadoso com explosivos	16
3.1.1	Ajustes geométricos em um plano de fogo para desmonte cuidadoso	17
3.1.2	Metodologia <i>linedrilling</i>	18
3.2	Controle de velocidades e vibração	18
3.3	Características das vibrações terrestres	22
3.3.1	Tipos de ondas sísmicas geradas	22
3.3.2	Parâmetros das ondas	24
3.3.3	Atenuação geométrica	26
3.3.4	Amortização inelástica	26
3.3.5	Interação das ondas elásticas	27
3.4	Estimação das leis de vibração	27
3.5	Critérios de prevenção de danos	28
3.5.1	Norma Brasileira (NBR 9653)	28
3.6	Resíduos Sólidos Urbanos (RSU)	32
3.6.1	Instabilidades de um aterro RSU	32
3.7	Instrumentação geotécnica	34
3.8	Mecanismos de monitoramento em aterros sanitários	35
3.8.1	Inspeções visuais	35
3.8.2	Piezômetros	36
3.8.3	Marcos superficiais	36
3.8.4	Pinos de recalque	37
3.8.5	Sismógrafo de Engenharia	38





4	MATERIAIS E MÉTODOS	40
4.1	Métodos aplicados	40
4.2	Objeto de estudo	41
4.3	Geologia regional	43
4.4	Geologia local	46
4.5	Situação operacional do aterro	47
4.6	Monitoramentos praticados	49
4.7	Desmonte de rochas	49
4.7.1	Instrumentação geotécnica de acompanhamento sugeridos	50
4.7.2	Instrumentos assistidos	53
4.7.3	Planejamento do monitoramento sismográfico	53
4.7.4	Equipamentos Utilizados	59
4.8	Configuração dos sismógrafos	59
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	61
5.1	Ajustes dos planos de fogos	61
5.1.1	Variáveis do plano de fogos	61
5.1.2	Explosivos e acessórios	62
5.1.3	Técnicas para mitigação da propagação excessiva do trem de onda	63
5.2	Resultados de sismografia	64
5.3	Resultados das instrumentações	69
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	72
	REFERÊNCIAS	74
	APÊNDICE	78
	ANEXOS	90



RESUMO

A atividade de desmonte de rochas tem papel primário fundamental para as atividades subsequentes de aproveitamento de materiais originados nessa atividade. Na mineração, pode-se aproveitar o material desmontado para beneficiamento. Na construção civil, as escavações com explosivos servem como atividades auxiliares facilitadoras para a implantação de grandes obras de infraestrutura que apresentam adversidades geológicas para escavações totalmente mecanizadas. O presente trabalho tem por objetivo analisar a interação entre a necessidade de uma escavação cuidadosa com a utilização de explosivos nas proximidades de estruturas geotécnicas de acomodação de resíduos sólidos urbanos já implantadas e em implantação; bem como as respostas destas estruturas face a adoção de técnicas mitigatórias de propagação de vibração, atestando as metodologias aplicadas ou refutando-as. A metodologia adotada para obtenção dos dados para análise foi a revisão bibliográfica sobre o tema de desmonte de rochas e vibrações induzidas; o acompanhamento de informações sísmicas dos eventos de detonação e as instrumentações geotécnicas para auscultação das estruturas, devidamente distribuídas na área conforme planejamento abrangente adotado e convencionado entre as partes interessadas. Os resultados demonstraram que não ocorreram alterações abruptas na linearidade dos dados acompanhados ao longo de aproximadamente 300 dias de projeto e 55 eventos-detonação. Atestou-se que as técnicas de desmontes cuidadosos com os adequados controles das variáveis de um plano de fogo possui papel fundamental no êxito dos serviços de escavações cuidadosas em áreas sensíveis, onde estruturas geotécnicas como as assistidas nesse estudo necessitam de indispensável monitoramento e análise geotécnica rotineiras.

Palavras-chave: Desmontes cuidadosos; estruturas geotécnicas; explosivos.



ABSTRACT

The activity of dismantling rocks has a fundamental primary role for the subsequent activities of using materials originated in this activity. In mining, dismantled material can be used for processing. In civil construction, excavations with explosives serve as auxiliary activities that facilitate the implementation of large infrastructure works that present geological adversities for fully mechanized excavations. The objective of this work was to analyze the interaction between the need for careful excavation and the use of explosives in the vicinity of geotechnical structures for the accommodation of urban solid waste already in place and in implementation; as well as the responses of these structures to the adoption of mitigation techniques for vibration propagation - attesting to the applied methodologies or refuting them. The methodology adopted to obtain the data for analysis was the bibliographic review on the topic of rock blasting and induced vibrations; the monitoring of seismic information from detonation events and the geotechnical instruments for sounding structures, duly distributed in the area according to the comprehensive planning adopted and agreed between the interested parties. The results showed that there were no abrupt changes in the linearity of the data monitored over approximately 300 project days and 55 detonation events. It was attested that the techniques of careful dismantling with adequate control of the variables of a fire plan play a fundamental role in the success of a careful excavation in a sensitive area, where geotechnical structures such as those assisted in this study require indispensable monitoring and routine geotechnical analysis.

Keywords: Careful dismantling; geotechnical structures; explosives.



1 INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA

A atividade de desmonte de rochas possui importância imprescindível em uma sequência de etapas necessárias para a obtenção de um produto na mineração e na construção civil. Na mineração, o desmonte de rochas possui relevante contribuição no sucesso das etapas subsequentes de carga, transporte e beneficiamento de minérios. Na construção civil a técnica é empregada em grandes projetos, como exemplo, na abertura de estradas, implantações de túneis, derrocamento subaquático em leito de rios, construções de hidrelétricas e diversas obras de infraestrutura que se utilizam da metodologia para avanços em escavações que devidamente investigadas, apresentam resistência do ponto de vista geológico dificultando e muitas vezes impedindo o bom andamento das escavações mecanizadas de maneira frível.

O desmonte de rocha é definido por Gama (2003), como sendo o conjunto de processos utilizados para proceder à fragmentação de determinado volume de rocha do maciço rochoso; podendo ser dividido em três grandes grupos: desmonte mecânico, hidráulico e com explosivo; logo, esse conceito pode ser estabelecido pela geomecânica do maciço.

No decorrer de uma detonação são produzidos diversos impactos ambientais, os quais podem ser referidos por ordem decrescente de risco (definido em relação à magnitude do impacto e a probabilidade com que o mesmo ocorre): (I) instabilidade ao maciço remanescente; (II) ultralançamento de rochas; (III) vibrações; (IV) ruídos (sobrepressão acústica); (V) produção de poeiras; (VI) gases. Destes, são as vibrações que assumem geralmente maior importância, pois embora sendo a ocorrência com menor potencial de provocar danos graves, é também aquela que se manifesta praticamente sempre que se verificam detonações, devido às energias transmitidas aos maciços rochosos (LOURO, 2009).

Dada a contextualização da importância da atividade de desmonte de rochas e seus impactos na cadeia de necessidades da sociedade, o presente trabalho acadêmico



tem como objeto o estudo de medidas mitigatórias e cuidadosas da atividade de desmonte de rochas para a implantação das obras do futuro contorno viário de Florianópolis- SC; nas proximidades do aterro sanitário de Tijuquinhas, localizado no município de Biguaçu- SC e vizinha à rodovia Governador Mário Covas (BR 101). Por se tratar de uma área de deposição de rejeitos sólidos urbanos (RSU) da região metropolitana de Florianópolis, com classificação do material depositado heterogêneo, as estruturas de acomodação e implantação do aterro possuem requisitos estruturais geotécnicos que devem ser observados regularmente e ao longo das atividades de desmonte de rochas para escavação das áreas de implantação das vias.

O estudo é justificável, pois, se desafia a apresentar as técnicas mitigatórias e cuidadosas adotadas, visando à redução dos níveis de vibrações ao longo dos serviços de desmonte de rochas próximo a essas estruturas que inspiram cuidados geotécnicos, bem como a instrumentação empregada para auscultação criteriosa visando ao acompanhamento regular dos dados gerados em decorrência da atividade, buscando-se assim uma nova prática de emprego desmonte cuidadoso concordante com os limites estabelecidos pelas normas técnicas, adequados e toleráveis pelas estruturas geotécnicas.



2 OBJETIVO

Considerando as perspectivas a serem estudadas, a seguir, são apresentados os objetivos do trabalho acadêmico.

2.1 Objetivo geral

Apresentar metodologias mitigatórias de atenuação de impactos relacionados à vibração, decorrentes da atividade de desmonte de rochas próximas a estruturas geotécnicas sensíveis.

2.2 Objetivos específicos

- Demonstrar técnicas de desmonte cuidadoso e medidas mitigatórias empregadas no projeto;
- Apresentar comportamento do movimento vibratório sobre um maciço rochoso;
- Analisar o comportamento dos dados da instrumentação sísmica e geotécnica face às técnicas empregadas no desmonte;
- Discutir os resultados e a eficácia ou não das técnicas adotadas.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Desmonte cuidadoso com explosivos

Segundo Nieble (2017), os desmontes cuidadosos são utilizados em fundações de hidroelétrica, pontes, taludes de rodovias e túneis. Também são comumente utilizados em zonas urbanas, quando deve-se preocupar com o desconforto das pessoas. Em desmontes subaquáticos, além de pressões hidrodinâmicas e seus efeitos sobre estruturas e a preocupação com a fauna aquática deve ser levada em consideração.

As obras civis em áreas confinadas, em áreas industriais ou em centros urbanos necessitam de procedimentos especiais para a execução de escavações e desmontes de rocha com utilização de explosivos.

Deve-se identificar claramente quais são as limitações impostas pelo meio ambiente circundante, velocidade de vibração, impacto de ar, ultralancamento, etc.

Com o intuito de controlar e prevenir vibrações é necessária a execução de ajustes no plano de fogo e a utilização de artifícios como cobertura na frente a detonar.

Recomenda-se também a adoção de critérios de segurança mais rigorosos e a elaboração de zonas de risco (NIEBLE, 2017).

De acordo com Hartman (1992), o monitoramento e controle dos efeitos das detonações perto de massas rochosas instáveis, instalações ou estruturas depende de duas considerações principais. Primeiro, o diagrama de fogo deve ser planejado de modo a reduzir a carga de explosivos a detonar por evento e também ajustar a sequência de iniciação de modo a reduzir as vibrações resultantes e os demais distúrbios. Em segundo lugar, as cargas de explosivo detonadas por volume de rocha e o padrão de detonação devem ser ajustados para assegurar uma fragmentação adequada. Portanto, ao mesmo tempo, a sequência de iniciação tem que estar separada no tempo, mas não no espaço.

Há um projeto ideal, que atinge ambos os objetivos de controle de distúrbios e produção de fragmentação adequada. Este só pode ser alcançado através de uma compreensão adequada das propriedades físicas da massa rochosa e sua resposta

estrutural frente aos efeitos da detonação e da interação entre a fragmentação da rocha e do desenho do diagrama de fogo.

3.1.1 Ajustes geométricos em um plano de fogo para desmonte cuidadoso

A maioria das variáveis geométricas do diagrama (plano) de fogo possui considerável influência sobre as vibrações geradas. Abaixo segue uma breve descrição das mesmas (JIMENO, 2004).

Afastamento e espaçamento: se o afastamento é excessivo, os gases da explosão encontram resistência para fragmentar e deslocar a rocha e parte da energia do explosivo se transforma em energia sísmica aumentando a intensidade das vibrações. Este fenômeno tem sua manifestação mais clara em desmontes de pré-corte, onde o confinamento é total e se pode registrar vibrações de ordem de até 5 vezes superiores às de um desmonte convencional em banco.

Se a dimensão do afastamento é reduzida, os gases escapam e expandem para frente livre a uma velocidade muito alta, impulsionando os fragmentos de rocha e projetando-os de forma descontrolada, provocando ainda um aumento de ruído e de onda aérea.

Em relação ao espaçamento, sua influência é semelhante ao do parâmetro anterior e inclusive sua dimensão depende do valor do afastamento.

Tamponamento: se a altura do tampão é excessiva, poderão ocorrer problemas na fragmentação, isto devido ao aumento do confinamento, podendo dar lugar a maiores níveis de vibração.

Inclinação dos furos: os furos inclinados permitem um melhor aproveitamento da energia no nível do piso, conseguindo inclusive uma redução das vibrações, isto para desmontes superficiais.

Desacoplamento: relação entre o diâmetro da carga e diâmetro do furo.

Dimensão do desmonte: as dimensões dos desmontes são limitadas, por um lado, pela necessidade de produção, e por outro, pelas cargas máximas operantes determinadas nos estudos de vibração a partir das leis de propagação, tipos de estruturas a proteger e parâmetros característicos dos fenômenos perturbadores.

Uma das etapas fundamentais para o estudo e controle das vibrações geradas nos desmontes por explosivos é a determinação das leis que governam sua atenuação nos distintos meios em que irá se propagar, além de uma adequada análise e conhecimento dos parâmetros que afetam suas características.

3.1.2 Metodologia *linedrilling*

Essa metodologia, segundo Geraldi (2011), consiste em uma técnica de desmonte escultural desenvolvida para se obter as melhores definições de planos de corte de taludes finais e paredes nas áreas de escavações confinadas. Essa metodologia consiste na perfuração preliminar de linhas de furos com espaçamentos reduzidos (entre 0,10 m e 0,20 m) com absoluto controle do paralelismo, acompanhando a linha final de corte.

Uma linha de *linedrilling* bem perfurada pode impedir o avanço das escavações e fragmentação da rocha, pela ação dos explosivos, além da linha limite do corte, o que formaria *overbreaks* indesejáveis. A perfuração linear pode também reduzir substancialmente os níveis de vibração produzidas pelas detonações nos maciços rochosos (GERALDI 2011).

3.2 Controle de velocidades e vibração

O desmonte de rocha com utilização de explosivos gera além da fragmentação e deslocamento do maciço, vibrações sobre o terreno, como um dos principais impactos adversos dessa atividade.

Essas vibrações resultam da energia liberada que não é aproveitada para o desmonte. Cerca de 15% da energia gerada no desmonte é efetivamente utilizada para a fragmentação e deslocamento (NIEBLE, 2011).

Segundo Mancini (1994) apud Santos (2009), o fenômeno físico vibração é um tipo particular de movimento caracterizado por deslocamentos repetidos ao redor de uma posição de repouso.

Para Louro (2009), vibrações são movimentos ondulatórios de um dado material, sólido ou fluído, que foi afastado da sua posição de equilíbrio.

Por tratar-se de oscilação, as vibrações são movimentos periódicos, ou seja, apresentam movimento ou deslocamento que se repete continuamente. As vibrações podem ser simples ou altamente complexas, mas de forma geral ela se comportam como funções senoidais puras de períodos.

Todavia para buscar entender o que são vibrações e como elas são associadas ao processo de desmonte de rocha com uso de explosivos, não se deve restringir o entendimento para o sentido puramente físico e matemático.

As vibrações podem ser de dois tipos, livres e forçadas. Vibrações livres ocorrem quando a perturbação faz parte do sistema, não existindo a influência de forças externas. Em contrapartida, vibrações forçadas são aquelas produzidas pela interferência de forças externas ao sistema. Independentemente do tipo, elas oscilarão numa dada frequência e apresentarão amortecimento devido à absorção de energia pelo atrito e outras resistências.

Para que haja uma vibração é imprescindível a existência de uma massa (que possa ser considerada massa vibratória), um agente perturbador (que retire a massa do equilíbrio) e uma força restauradora (que retorne a massa à posição de equilíbrio).

No desmonte de rocha com uso de explosivos, a massa vibratória seria o maciço rochoso ao redor da área a ser detonada, o agente perturbador seria a onda de choque gerada pela detonação do explosivo e a força restauradora, o comportamento elástico do material.

As vibrações geradas pela detonação não se comportam da mesma forma em todas as situações: elas são amplificadas; atenuadas e alteradas por uma gama muito grande de fatores.

Os níveis de vibração no desmonte de rochas com explosivos podem ser afetados por diversos fatores, tais como afastamento, espaçamento, número de linhas etc.

Alguns autores afirmam que mesmo desmontes planejados identicamente apresentarão resultados diferentes. Mesmo sendo bem semelhantes e mesmo em sendo em áreas vizinhas ou na mesma área, a intensidade de vibrações geradas pode ser drasticamente diferente, tendo em vista que mesmo com o mesmo planejamento, estes encontrarão situações diferentes em campo.

Jimeno (1995) assevera que os fatores que influem nas características das vibrações são os mesmos que determinam o resultado do desmonte de rocha, podendo ser classificados em dois grupos: controláveis e não controláveis. Nas imediações do desmonte, os parâmetros mais significativos estão relacionados ao plano de fogo e sua geometria, já em distâncias maiores, os que predominam estão relacionados com as características geológicas da região. Em maciços rochosos são transmitidas ondas em todas as direções, entretanto estruturas geológicas complicadas podem influenciar a direção de propagação, resultando em diferentes índices de atenuação.

Quando a rocha é recoberta por solo, geralmente, a velocidade de propagação, bem como a sua frequência diminui, enquanto há um significativo incremento na amplitude, aumentando sensivelmente a possibilidade de danos a estruturas.

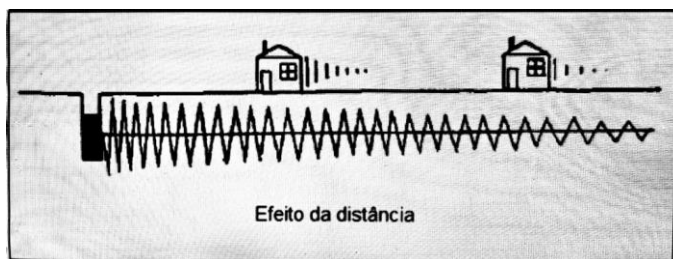
Um dos fatores de maior significância para as vibrações diz respeito à carga de explosivo detonada, denominada carga máxima por espera. É assim chamada pela possibilidade de ser um único furo ou vários furos carregados detonados simultaneamente, num arranjo determinado pelo posicionamento de retardos na amarração dos furos. Sendo chamado nessas situações de carga cooperante.

A carga máxima por espera é diretamente proporcional à intensidade das vibrações.

De forma análoga, a distância também é de grande influência. Quanto menor a distância do local do desmonte, maior intensidade de vibrações, quanto mais distante menor essa intensidade. Resultando que a distância pode ser descrita como inversamente proporcional à intensidade das vibrações. Ressalta-se que a geologia local e a posição de recepção de onda possui relevante influência na relação distância e vibração.

Além da diminuição da quantidade de vibrações, a distância também neutraliza as componentes de ondas de altas frequências. O terreno age como um filtro através do qual apenas as ondas de baixa frequência conseguem atravessar. Isto resulta numa maior concentração de energia nas regiões de baixa frequência conforme a Figura 01 a seguir.

Figura 1 - Efeito da distância sobre vibrações.



Fonte: Jimeno, 2004.

O tipo de explosivo também interfere; quanto maior a pressão de detonação maior será a intensidade das vibrações. Isto é devido a relação existente entre a velocidade de partícula e as tensões induzidas no maciço, que correspondem à relação de impedância.

O tempo é outro fator importante, pois dependendo da disposição dos tempos de retardo é possível que haja interação ou interferências construtivas entre as ondas de choque.

Conforme supracitado, a pequenas distâncias os parâmetros de maior influência são os relacionados ao plano de fogo e sua geometria, tais como o diâmetro de perfuração, a altura da bancada, malha de furação (afastamento x espaçamento), subfuração, tampão, inclinação do furo, acoplamento do explosivo nas paredes do furo, tamanho do desmonte a ser executado etc.

Após a detonação, a onda de choque atinge seu valor máximo sendo reduzida rapidamente até se tornar uma onda elástica com intensidade inferior à resistência à compressão do maciço, não causando qualquer dano material, apenas transportando energia por meio das vibrações.

Durante as vibrações não existem realmente movimentos de massa ou de volume, existe apenas transferência de energia de um ponto para outro. Essa transferência de energia acontece por meio das ondas elásticas que viajam a diferentes velocidades e provocam deformações diferentes no maciço rochoso.

A lei de propagação de vibrações reflete a atenuação do efeito do explosivo com a distância. Ela utiliza a carga de espera e a distância escalada como parâmetros principais.

A carga de espera é a carga de explosivo que age separadamente por meio de retardadores que vão desde alguns milissegundos (não menos que 9ms e sua utilização no meio internacional considera que o desmonte é instantâneo) até 100 a 200 ms para retardos de cordel, chegando a 700 ms para os tubos de choque (SNETC).

3.3 Características das vibrações terrestres

A seguir apresentam-se alguns aspectos teóricos a respeito da geração e propagação das vibrações produzidas nos desmontes de rochas, porém é preciso indicar que se trata de uma mera aproximação do problema, pois os fenômenos reais são muito mais complexos devido à superposição de diferentes tipos de ondas e mecanismos modificadores destes.

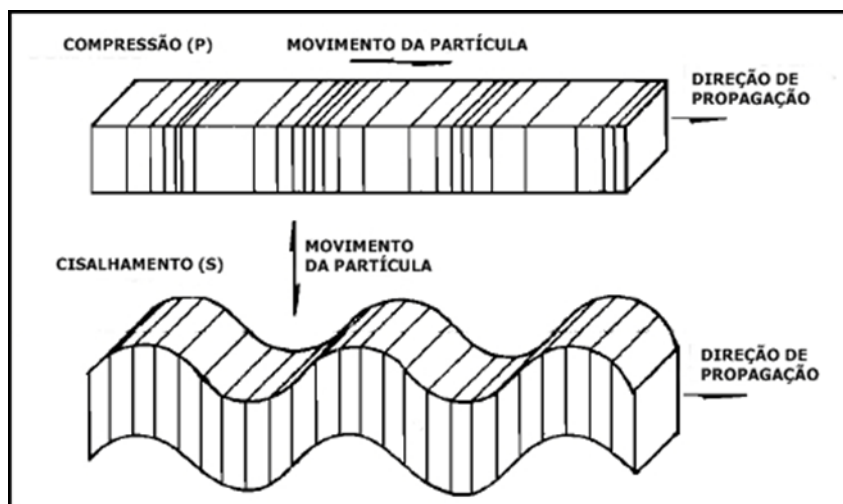
3.3.1 Tipos de ondas sísmicas geradas

Segundo Jimeno (2004), as vibrações dos terrenos geradas nos desmontes por explosivos transmitem-se através dos materiais como ondas sísmicas cuja frente se desloca radialmente a partir do ponto de detonação. As distintas ondas sísmicas se classificam em dois grupos: “ondas internas” e “ondas superficiais”, de acordo com a Figura 2.

O primeiro tipo de onda interna são as denominadas “Primárias ou de Compressão - P”. Estas ondas se propagam dentro dos materiais, produzindo alternadamente compressões e trações; dando lugar a um movimento das partículas na direção de propagação das ondas. São as mais rápidas e produzem troca de volumes, sem troca de forma, no material através do qual se movimentam.

O segundo tipo é constituído das “Ondas Transversais ou de Cisalhamento- S”, que dão lugar a um movimento das partículas perpendicular a direção de propagação da onda. A velocidade das ondas transversais está compreendida entre a das ondas longitudinais e a das ondas superficiais e os materiais submetidos a esses tipos de onda experimentam trocas de forma e não de volume. A representação gráfica das ondas P e S são demonstradas na Figura 2.

Figura 2 - Ondas de compressão (P) e cisalhamento (S)



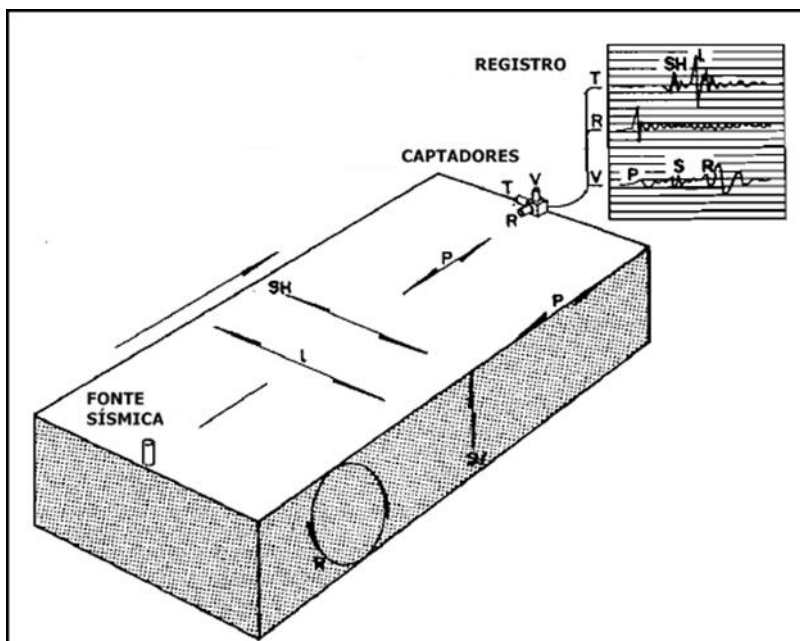
Fonte: Jimeno, 2004.

Ainda, Jimeno (2004) cita que as ondas do tipo superficial, que são geradas pelos desmontes de rochas, são as Ondas Rayleigh-R e as Ondas Love-Q. Outros tipos de ondas superficiais são as ondas Canal e as Ondas Stonelly.

As ondas Rayleigh impõem às partículas um movimento segundo a trajetória elíptica, com um sentido contrário ao de propagação da onda. As ondas Love, mais rápidas que as Rayleigh, dão lugar a um movimento de partículas na direção transversal às de propagação.

Como as ondas viajam com velocidades diferentes e o número de retardos nos desmontes pode ser grande, as ondas geradas se superpõem umas com as outras no tempo e no espaço, resultando movimentos complexos cuja análise requer a utilização de geofones e equipamentos captadores dispostos segundo as três direções: radial, vertical e transversal (Figura 3).

Figura 3 - Registro de ondas.



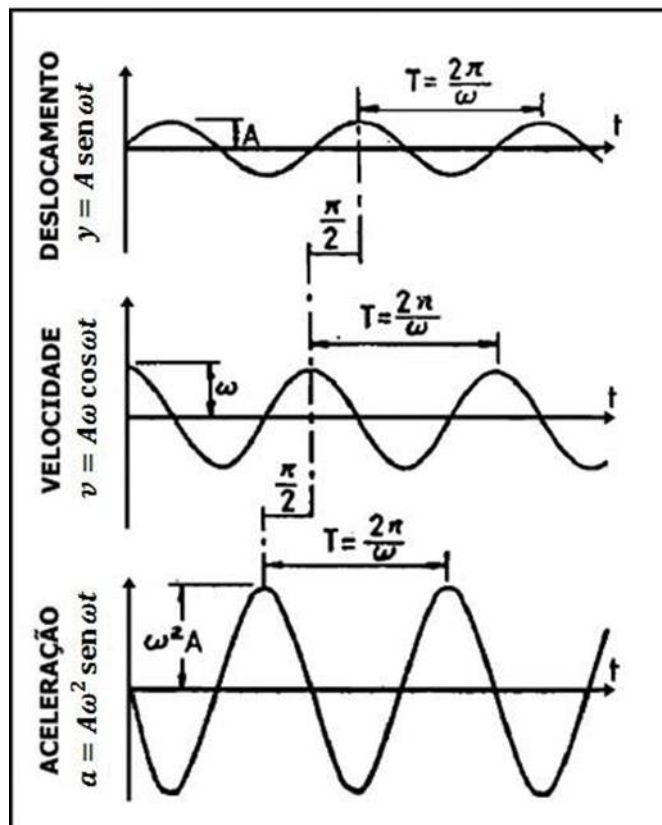
Fonte: Jimeno, 2004.

Segundo Jimeno (2004) apud Miller e Pursey (1955), as ondas Rayleigh transportam entre 70 e 80% da energia total, sendo que no manual de desmonte de Du Point diz-se que estes tipos de ondas dominam o movimento da superfície do terreno a distâncias de detonações de várias centenas de metros, e dado que muitas estruturas e edificações no entorno das explorações se encontram a distâncias superiores à 500 metros, são as ondas Rayleigh as que constituem um maior risco potencial de danos.

3.3.2 Parâmetros das ondas

A passagem de uma onda sísmica por um meio rochoso produz em cada ponto deste um movimento que se conhece por vibração. Uma simplificação para o estudo das vibrações geradas pelos desmontes consiste em considerar estas como ondas do tipo senoidal (Figura 4).

Figura 4 - Movimento harmônico da onda.



Fonte: Person, 1994.

Em que:

ω = Frequência angular;

T= Instante (tempo);

a = aceleração;

A= amplitude;

v = Velocidade;

y = Deslocamento.

Importa então referir sucintamente os parâmetros que caracterizam as ondas (LOURO, 2009, apud BERNARDO, 2004):

Amplitude (A) – magnitude da afetação de uma partícula, a partir da sua posição de repouso (pode ser expressa sob a forma de um deslocamento, de uma velocidade ou de uma aceleração);

Deslocamento (y) – espaço percorrido por uma partícula, quando excitada pela onda;

Velocidade de vibração (v) – deslocamento das partículas, causado pela passagem da onda, por unidade de tempo;

Aceleração (a) – variação da velocidade das partículas, por unidade de tempo;

Período (T) – tempo necessário para completar um ciclo;

Comprimento de onda (λ) – comprimento de um ciclo completo;

Frequência (f) – número completo de oscilações ou ciclos por segundo. A frequência é o inverso do período T .

3.3.3 Atenuação geométrica

A densidade de energia na propagação de pulsos gerados pela detonação de uma carga explosiva diminui conforme as ondas encontram ou afetam maiores volumes de rocha. Dado que as vibrações compreendem uma combinação complexa de ondas, parece lógico considerar certos fatores de atenuação geométrica para cada um dos distintos tipos.

3.3.4 Amortização inelástica

Na natureza, os maciços rochosos não constituem, para a propagação das vibrações, um meio elástico, isotrópico e homogêneo. Pelo contrário, aparecem numerosos efeitos inelásticos que provocam uma perda de energia durante a propagação das ondas, que se soma a devida atenuação geométrica.

São numerosas as causas desta atenuação inelástica, tendo cada uma delas diferentes graus de influência (JIMENO, 2004):

- Dissipação da matriz inelástica devido movimento relativo nas superfícies intercristalinas e planos de descontinuidade;
- Atenuação em rochas saturadas devido ao movimento do fluido em relação à matriz;
- Fluxo no interior das rachaduras;
- Difusão das tensões induzidas por voláteis absorvidos;

- Reflexão em rochas porosas ou com grandes vazios;
- Absorção de energia em sistemas que experimentam trocas de fase etc.

3.3.5 Interação das ondas elásticas

A interação das ondas sísmicas no tempo e no espaço pode dar lugar a uma concentração ou focalização, proporcionando valores de atenuação maiores ou menores que os teoricamente calculados.

A topografia e a geometria das formações geológicas podem conduzir a reflexão e a concentração das frentes de ondas em determinados pontos.

De acordo com o que se precede, com intuito de reduzir os efeitos da transmissão ou os efeitos secundários potenciais nos registros é preciso que as medidas se efetuem no campo direto do desmorte, ou seja, na zona próxima, entre o local de desmorte e as zonas sensíveis onde se quer reduzir os efeitos das vibrações, como instalações e estruturas.

3.4 Estimação das leis de vibração

As rochas não são um meio isotrópico, muitas vezes sendo difícil prever o nível de vibração a uma dada distância, logo a determinação das leis que governam a atenuação das vibrações nos distintos meios em que ela se propaga é essencial para um adequado controle e estudo de suas propriedades, a fim de se evitar quaisquer danos ambientais e sociais.

Na maioria dos casos, a velocidade máxima de partícula (em mm/s) é usada para expressar quais os níveis de vibração que estruturas podem suportar sem sofrerem danos em áreas de detonações. Algumas investigações mostraram que a relação empírica entre velocidade da partícula (v), peso da carga de explosivo (Q) e a distância (D) é:

$$v = \frac{K}{\frac{(D)^\alpha}{Q^{\frac{1}{2}}}} \quad (1)$$

Onde as constantes k e α variam com as condições das fundações, geometria do plano de fogo e tipo de explosivos.

Para usar a equação empírica para prever com segurança o nível de vibração para uma determinada distância, as constantes k e α devem ser determinadas por testes de detonação na vizinhança onde serão realizados os desmontes de rocha, o que permite determinar as propriedades de transmissão da rocha e a carga permitida, assim, qualquer possível dano em estruturas próximas à área podem ser prevenidas.

3.5 Critérios de prevenção de danos

Uma vez conhecida a lei que governa a amortização das ondas sísmicas no meio rochoso, é necessário estimar o grau de vibração máximo que os diferentes tipos de estruturas próximos as áreas de escavação podem tolerar, para que não sofram danos.

A adoção de critérios ou níveis de prevenção das vibrações é frequentemente uma tarefa delicada, que exige o reconhecimento rigoroso dos mecanismos que intervêm nos fenômenos recorrentes das detonações e das respostas das estruturas. Um critério arriscado pode levar a aparição de danos e imperfeições, além de que uma postura conservadora pode dificultar ou inclusive paralisar a atividade mineira (JIMENO, 2004).

A maioria dos países tem normas locais, que especificam legalmente níveis aceitáveis de vibração do solo provocadas por detonações. Estas normas são baseadas em pesquisas que relacionam o pico da velocidade com os dados estruturais (SILVA, 2012).

3.5.1 Norma Brasileira (NBR 9653)

No Brasil, a ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) estabeleceu normas, válidas a partir de 31/10/2005, (revisadas em 2018) através da ABNT NBR 9653 (Norma Brasileira Registrada), para reduzir os riscos inerentes ao desmonte de rocha com uso de explosivos em minerações, estabelecendo os seguintes parâmetros

a um grau compatível com a tecnologia disponível para a segurança das populações vizinhas (SILVA, 2012).

De acordo com a ABNT NBR 9653:2018 podem-se observar as seguintes definições:

a) Velocidade de vibração de partícula de pico: máximo valor instantâneo da velocidade de uma partícula em um ponto durante um determinado intervalo de tempo, considerando como sendo o maior valor dentre os valores de pico das componentes de velocidade de vibração da partícula para o mesmo intervalo de tempo;

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

$$VR = (VL)^{\frac{1}{2}} + (VT)^{\frac{1}{2}} + (Vv)^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

onde:

- VL, VT e VV são respectivamente os módulos de velocidade de vibração de partícula, segundo as direções L - longitudinal, T - transversal e V – vertical;

a) Pressão acústica: aquela provocada por uma onda de choque aérea com componentes na faixa audível (20 Hz a 20.000 Hz) e não audível, com uma duração menor do que 1 s;

b) Área de operação: área compreendida pela união da área de licenciamento ambiental mais a área de propriedade da empresa de mineração.

c) Ultralançamento: arremesso de fragmentos de rocha decorrente do desmonte com uso de explosivos, além da área de operação.

d) Distância escalonada (DE) ou distância reduzida: calculada através da seguinte expressão e usada para estimar a vibração do terreno:

$$v = \frac{D}{\sqrt{Q}} \quad (3)$$

Em que:

- D é a distância horizontal entre o ponto de medição e o ponto mais próximo da detonação, em metros;
- Q é a carga máxima de explosivos a ser detonado por espera, em quilogramas.

e) Desmonte de rocha com uso de explosivos: operação de arrancamento, fragmentação, deslocamento e lançamento de rocha mediante aplicação de cargas explosivas.

Os limites para velocidade de vibração de partícula de pico acima dos quais podem ocorrer danos induzidos por vibrações do terreno são apresentados numericamente na Tabela 1 e graficamente na Figura 5.

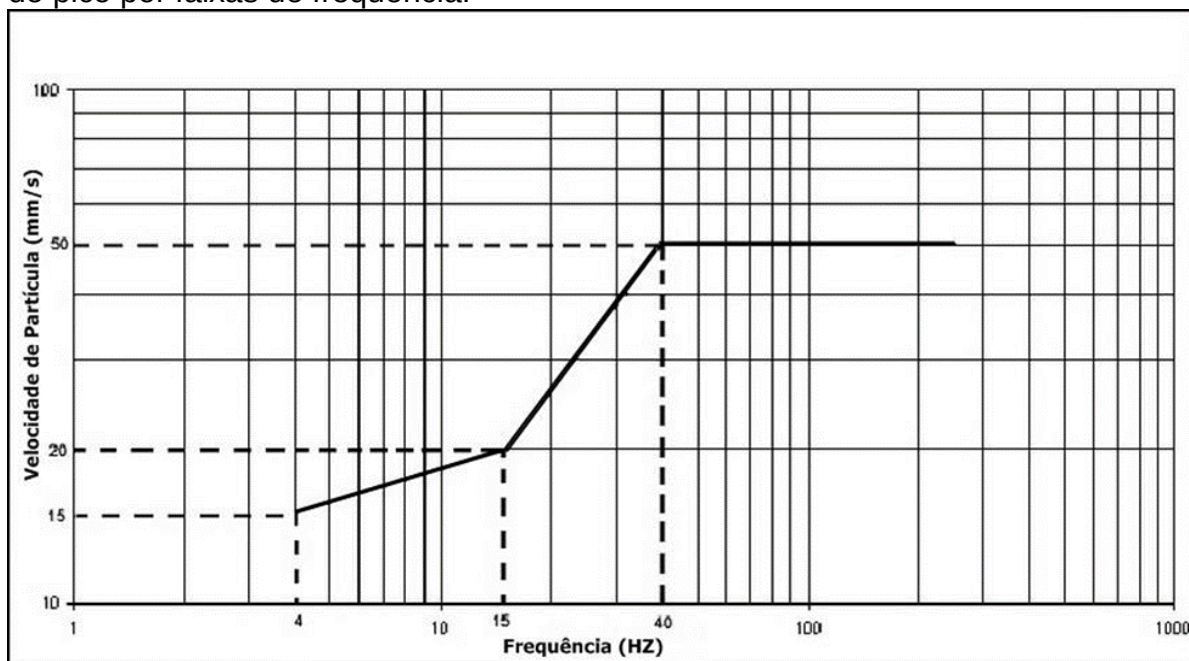
Tabela 1 - Limites de velocidade de vibração de partícula de pico por faixas de frequência.

Faixa de Frequência	Limite de Velocidade de vibração de partícula de pico
4 Hz a 15 Hz	Iniciando em 15 mm/s aumenta linearmente até 20 mm/s
15 Hz a 40 Hz	Acima de 20 mm/s aumenta linearmente até 50 mm/s
Acima de 40 Hz	50 mm/s

NOTA - Para valores de frequência abaixo de 4 Hz deve ser utilizado como limite o critério de deslocamento de partícula de pico de no máximo 0,6 mm (de zero a pico).

Fonte: NBR9653, 2018.

Figura 5 - Representação gráfica dos limites de velocidade de vibração de partícula de pico por faixas de frequência.



Fonte: NBR 9653, 2018.

Situações excepcionais: quando por motivo excepcional, houver o impedimento da realização do monitoramento sismográfico, pode ser considerada atendida essa Norma com relação à velocidade de vibração de partícula de pico, se for obedecida uma distância escalonada que cumpra com as seguintes exigências:

$$DE \geq 40 \text{ m/kg}^{0,5} \text{ para } D \leq 300 \text{ m} \quad (4)$$

Em que:

DE= Distância Escalonada;

D= Distância (m).

Logo entende-se que para uma distância menor ou igual à 300 m; onde há a impossibilidade de captação sismográfica, assume-se que a DE calculada em função à carga explosiva detonada por espera tenha resultado menor ou igual a 40.

3.6 Resíduos Sólidos Urbanos (RSU)

O Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil de 2013, (ABRELPE, 2013, p. 44), indica que do total de resíduos sólidos coletados atualmente, 58,3% são destinados a aterros sanitários, 24,3% para aterros controlados e 17,4% lixões. A geração de resíduos é resultado de basicamente todas as atividades da sociedade contemporânea incluindo desde atividades domésticas corriqueiras até processos industriais complexos. Assim, a gestão dos resíduos gerados diariamente é um problema inerente a todos os municípios.

A disposição inadequada, a falta de um bom sistema de drenagem, a ausência de monitoramento geotécnico, entre outros, constitui fatores que contribuem para a ocorrência de possíveis acidentes de escorregamento em aterros sanitários. Outros fatores que contribuem na insegurança quanto à estabilidade destes corpos são as inúmeras dificuldades técnicas envolvidas na execução de ensaios de campo e laboratório, além da grande heterogeneidade verificada entre os materiais depositados em aterros diferentes ou, mesmo entre porções diferentes de um mesmo aterro.

Os métodos convencionais de cálculo de estabilidade de taludes desenvolvidos na engenharia geotécnica são comumente utilizados em estudos de estabilidade em aterros de resíduos urbanos, por pesquisadores e profissionais especializados. No entanto, estas metodologias de trabalho foram desenvolvidas para estudos em maciços com constituição e comportamento mecânico distintos dos aterros de resíduos urbanos, que possuem comportamento mecânico pouco conhecido, são heterogêneos, anisotrópicos e podem sofrer influência de gases gerados a partir da decomposição dos resíduos.

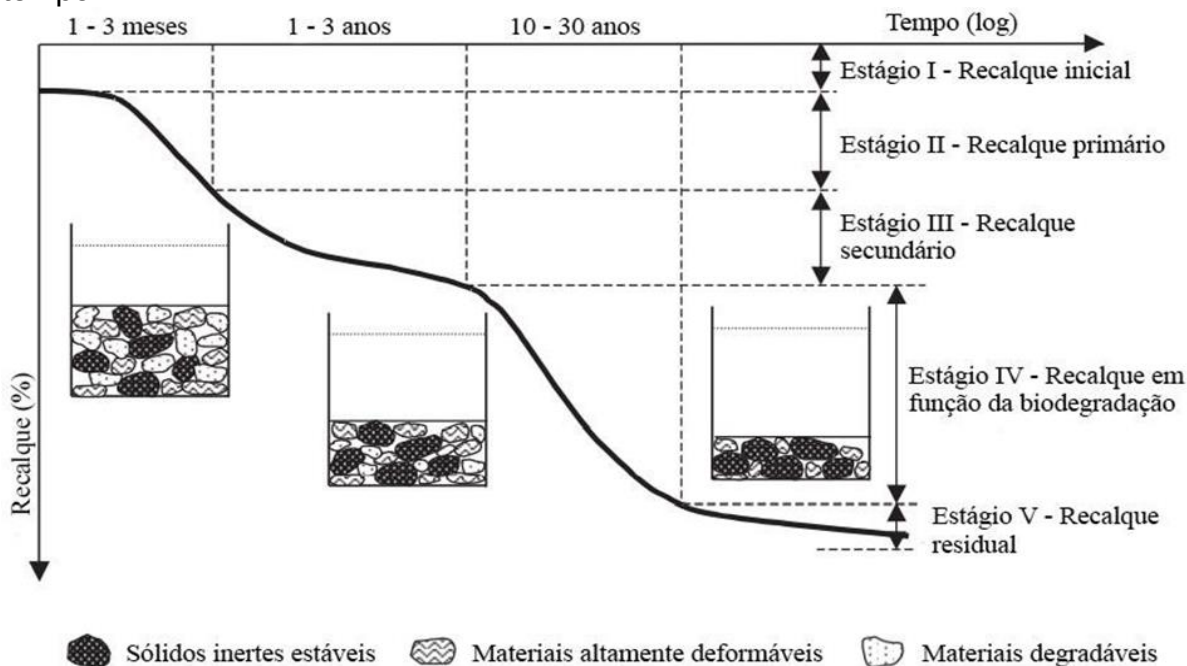
3.6.1 Instabilidades de um aterro RSU

A composição gravimétrica dos materiais é um fator que influencia na dinâmica dos aterros sanitários. No Brasil, a parcela de resíduo orgânico que vai parar nos aterros sanitários é de aproximadamente 50% (BEVENUTTO, 2011). Quanto maior o

percentual de matéria orgânica maior será o deslocamento de massa devido ao processo de biodegradação dos materiais (ALCÂNTARA, 2014; NETO, 2016). A sobrecarga excessiva devido ao grande volume de resíduos depositados diariamente também é responsável por danos estruturais nos maciços.

Os recalques em aterros sanitários ao longo do tempo podem ser significativos, 30 a 40% em relação à espessura inicial do maciço (TEIXEIRA, 2015; LING et al, 1998). O aterro sanitário é projetado para uma vida útil média de 20 anos. Nos dez primeiros anos após seu fechamento é que ocorrem 90% dos recalques totais esperados (GRISOLIA; NAPOLEONI, 1996). Grisolia et al. (1995) descrevem os 5 estágios da variação volumétrica de aterros sanitários, conforme Figura 6.

Figura 6 - Curva teórica de recalques em aterros de resíduos sólidos ao longo do tempo.



Fonte: Grisolia e Napoleoni (1995, apud Liu et al, 2006).

O recalque inicial (estágio I) está relacionado à compressão mecânica instantânea dos materiais e de materiais deformáveis. O recalque primário (estágio II) ocorre com a compressão contínua e rearranjo dos resíduos, sendo normalmente após 30 dias de deposição dos resíduos (SOWERS, 1973). O estágio secundário está associado a deformação mecânica e decomposição inicial da matéria orgânica. Já o

estágio IV e V apresenta índice de recalque em função da decomposição e deformação residual mecânica e biológica. As deformações em aterros sanitários tendem a diminuir ao longo do tempo (LING et al., 1998). As instabilidades podem ser antecipadas por inspeções visuais no aterro e instrumentações geotécnicas adequadas.

3.7 Instrumentação geotécnica

Uma das razões principais para se realizar instrumentações geotécnicas é que, a partir destas, é possível obter-se dados que possam ajudar aos engenheiros nas tomadas de decisão nos diferentes estágios de um projeto. O uso da instrumentação geotécnica não é simplesmente a seleção de instrumentos, senão um processo de engenharia exaustivo, etapa por etapa, começando com a definição de um objetivo e terminando com a implementação ou aplicação dos dados obtidos. Cada etapa é fundamental para o sucesso ou para o fracasso de todo o programa, e os processos de engenharia envolvem a combinação das capacidades dos instrumentos e das pessoas em realizar a análise (DUNNICLIFF, 1988).

Segundo o DGSI (2004), na estabilidade de taludes, a instrumentação pode ser utilizada para:

- Investigação do local, para isto, os instrumentos são utilizados para caracterizar as condições iniciais do local de estudo. Entre os parâmetros mais comuns podem-se encontrar a poropressão, permeabilidade do solo e estabilidade de taludes ou encostas.
- Verificação do projeto, este item refere-se à verificação das suposições do projeto e conferir que o desenvolvimento está sendo como o previsto. Para isto, os dados dos instrumentos da fase inicial do projeto podem revelar a necessidade ou a oportunidade de modificar este nas fases posteriores.
- Segurança, a instrumentação pode fornecer aviso antecipado de falhas iminentes, visando dar tempo para a eventual evacuação da área e para implementar medidas corretivas. O monitoramento da segurança exige uma rápida coleta, processamento e apresentação de dados, de modo que as decisões possam ser feitas imediatamente.

- Execução, os instrumentos são utilizados para monitorar o desempenho em serviço de uma estrutura. Por exemplo, o controle de parâmetros tais como vazão, poro pressão e deformações podem oferecer uma indicação do desempenho de barragens, da mesma forma, o monitoramento de cargas sobre grampos, ancoragens e movimentos dentro de uma encosta pode oferecer uma indicação do desempenho de um sistema de drenagem ou contenção instalado numa encosta estabilizada.

3.8 Mecanismos de monitoramento em aterros sanitários

Alterações geométricas e/ou deslocamentos podem evidenciar instabilidades nos maciços. Para manter as operações produtivas e seguras e evitar riscos devido ao colapso estrutural dos maciços, é essencial que seja realizado o monitoramento detalhado e preciso das superfícies dos aterros (GASPERINI, 2014). Segundo a norma brasileira NBR 11.682 (2009), esse acompanhamento pode ser realizado por inspeção e/ou instrumentação. O monitoramento dos deslocamentos superficiais dos taludes deve ser realizado por meio de levantamento topográfico (ABNT, 2009). Segundo Bevenuto et. al (2019), os dados de deslocamentos topográficos e piezometria são complementares quando associados às inspeções de campo e evidenciam o real comportamento das massas de resíduos. Segundo Alcântara (2014), o acompanhamento dos recalques visa verificar se o deslocamento está numa faixa aceitável.

3.8.1 Inspeções visuais

As inspeções de campo permitem observar a ocorrência de processos erosivos e trincas nos taludes, as condições dos sistemas de drenagem, disposição inadequada dos materiais, animais no local, entre outras incidências (ANDRADES, 2018). O mapeamento do comportamento dos componentes serve para avaliar se existe um padrão de ocorrências que possa indicar possíveis instabilidades nos maciços. Essas inspeções devem ser realizadas em conjunto com outras formas de monitoramento para avaliar os deslocamentos.

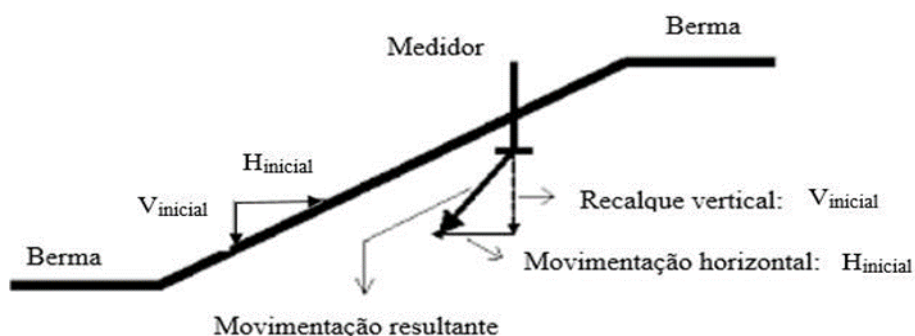
3.8.2 Piezômetros

Os piezômetros têm a função de registrar e medir as pressões dos fluidos resultantes do sistema sólidos/líquidos/gases que se desenvolvem por decomposição da matéria, entradas e saídas de líquidos e gases no maciço ao longo do tempo (BENVENUTTO, 2011). O piezômetro permite medir as alterações internas do maciço.

3.8.3 Marcos superficiais

Os marcos superficiais são estruturas de referência dispostas na superfície do aterro cuja função é monitorar os deslocamentos verticais e horizontais através de levantamento topográfico (ANDRADES, 2018). As análises são realizadas com base nos dados das leituras periódicas das coordenadas e cotas dos marcos e normalmente são coletadas com receptores GNSS (Global Navigation Satellite System) de elevada precisão. Não existe norma ou regulamentação definida a respeito do número de instrumentos que devem ser instalados para a avaliação da estabilidade geotécnica do aterro sanitário. A Figura 7 mostra o posicionamento genérico de um marco superficial (medidor), bem como, o vetor que indica a sua movimentação resultante.

Figura 7 - Esquema da movimentação dos marcos superficiais.



Fonte: Silva (2010).

O entendimento da taxa de ocorrência dos recalques é de suma importância para avaliar o desempenho do projeto e garantir a sua integridade. A velocidade dos deslocamentos é a razão entre um deslocamento parcial e o número de dias entre as duas medições topográficas dos marcos superficiais (BOSCOV, 2008).

A norma brasileira NBR 11.682, sobre estabilidade de Taludes (ABNT, 1992), determina valores de referência para o grau de risco dos deslocamentos verticais em função da velocidade de taludes e maciços terrosos, conforme a Tabela 2. Onde v é a velocidade de deslocamento vertical média (cm/dia).

Tabela 2 - Grau de risco para taludes e maciços terrosos.

Grau de risco	Velocidade média do deslocamento (cm/dia)
Alto	> 2
Médio	$0,1 < v < 2$
Baixo	$< 0,1$

Fonte: Adaptado de ABNT (1992).

Contudo, os deslocamentos em aterros sanitários ocorrem de forma muito mais elevada do que em maciços de solo, devido a heterogeneidade dos materiais (TEIXEIRA, 2015). Nesse sentido, Kaimoto (2008) sugeriu os valores de velocidade verticais para aterros sanitários, conforme Tabela 3.

Tabela 3 - Critérios gerais de ação para velocidades de recalques para aterros sanitários.

Recalque (cm/dia)		
Atenção	Alerta	Intervenção
$2 < v < 4$	$4 < v < 10$	$v > 10$

Fonte: Adaptado de Kaimoto (2008) *apud* Benvenuto (2011).

3.8.4 Pinos de recalque

Os medidores de recalque têm por objetivo averiguar os deslocamentos verticais que ocorrem nos maciços, fundação e taludes. Existem diversos tipos de

instrumentos deste tipo, entre eles os de tubo telescópicos, os tipos USBR, Km e magnético, entre outros. De acordo com Fonseca (2003), os medidores tipo tubo telescópicos desenvolvido pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo (IPT), são os mais utilizados no país. São constituídos de uma série de placas acopladas a hastes ou tubos rígidos de forma que o deslocamento das mesmas fornece referências para as medidas dos recalques.

3.8.5 Sismógrafo de Engenharia

Os sismógrafos são equipados para monitorar a vibração do solo e a pressão acústica. As vibrações do solo são medidas em três direções componentes e a pressão acústica é medida como uma onda de pressão. Cada “evento” de vibração que ativa automaticamente (dispara) o sismógrafo é armazenado digitalmente ou impresso no campo.

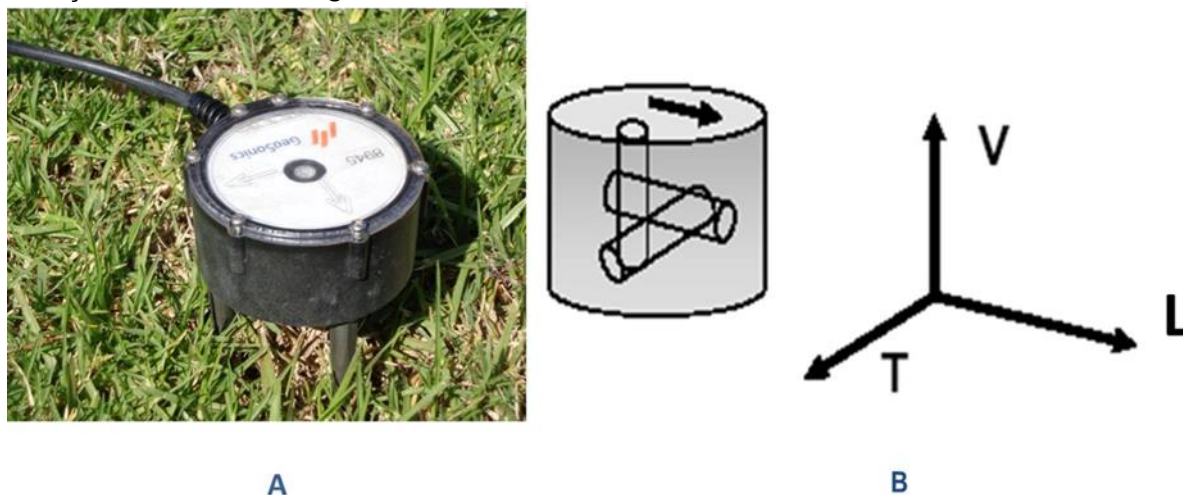
A maioria dos sismógrafos pode ser programada para funcionar como um gravador de forma de onda ou "histograma" de pico. Os registradores de forma de onda devem sempre ser usados para monitorar eventos de vibração induzidos por detonação. Os registradores de forma de onda medem vibrações como históricos de velocidade ao longo de um período de registro finito (por exemplo, 5, 10 ou 20 segundos). Os gravadores de pico medem as vibrações continuamente e relatam o valor mais elevado que ocorre dentro de um intervalo de tempo predeterminado (por exemplo, 5, 10 ou 15 minutos) (ISEE, 2014).

Todos os sismógrafos fabricados atualmente registram e armazenam os dados digitalmente. Algumas unidades têm impressoras para que os resultados possam ser impressos imediatamente no campo para revisão. Unidades sem impressoras devem ter os dados transferidos para um computador, mas também têm a vantagem de uma melhor análise das formas de onda.

É por meio do geofone (Figura 08) que o sismógrafo obtém medidas de vibração em termos de velocidade de partícula (mm/s). O geofone contém três transdutores ortogonais que medem os níveis de vibração em três planos: longitudinal, transversal e vertical, em relação ao local da detonação. O geofone deve ser

direcionado para o local de detonação, observando uma seta na parte superior do mesmo e apontando-a para a fonte de vibração.

Figura 8 - Em A, vista externa do geofone e, em B, vista esquemática, com representação dos eixos ortogonais.



Fonte: Autor, 2023.

Para execução de uma coleta de dados, é preciso acoplar o aparelho corretamente ao solo ou outra superfície, de maneira que ele esteja firmemente fixado e nivelado (há um nível de bolha na parte superior), mas deixando-o solidário ao terreno.

Existem várias maneiras de acoplamento do geofone dependendo da superfície. Em terreno firme e macio, como solo, geralmente utiliza-se pinos de cravação, sendo recomendado enterrar o geofone com uma profundidade de 10 a 20 cm, com um buraco que seja suficientemente grande que não deixe o cabo de conexão dobrar. No entanto, em superfícies duras e/ou resistentes (leitos de rochas, afloramentos ou estruturas) deve-se utilizar algum material colante (como, porexemplo, gesso) para melhor fixação.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Métodos aplicados

De maneira a cumprir com os objetivos propostos para esse trabalho acadêmico, a obtenção e o adequado tratamento dos dados se darão através das seguintes práticas e ações de agrupamento de elementos, a seguir apresentados.

- i. Levantamento bibliográfico e do estado da arte relacionados aos problemas ambientais associados ao desmonte de rochas e formas de controle;
- ii. Reconhecimento e caracterização da área de estudo;
- iii. Seleção dos pontos de monitoramento, de maneira a permitir atender os objetivos propostos, além de alertar para possíveis danos em estruturas geotécnicas próximas das zonas de escavação;
- iv. Monitoramento dos níveis de ruído e vibração;
- v. Levantamento e análise dos planos de fogo praticados;
- vi. Análise e interpretação dos dados obtidos na etapa de monitoramento;
- vii. Relacionamento dos dados obtidos no monitoramento sismográfico com os dados obtidos na instrumentação geotécnica implantada nas estruturas próximas às áreas do desmonte;
- viii. Proposição de ações que permitam a incorporação das técnicas adotadas por meio de inserção destas nos trabalhos futuros de desmonte cuidadoso em áreas sensíveis, de maneira a minimizar os impactos ambientais, bem como otimizar a etapa de desmonte de rochas.

Com a estrutura das coletas e direcionamentos do trabalho acadêmico devidamente definidos, pode-se através dos materiais que serão a seguir apresentados, agrupar, correlacionar e observar um número de informações referente aos monitoramentos sismográficos e instrumentações geotécnica ao longo do projeto que embasem suficientemente de forma robusta e consolidada a análise da hipótese argumentada nos objetivos gerais deste estudo, comprovando a eficácia das técnicas utilizadas ou refutando-as.

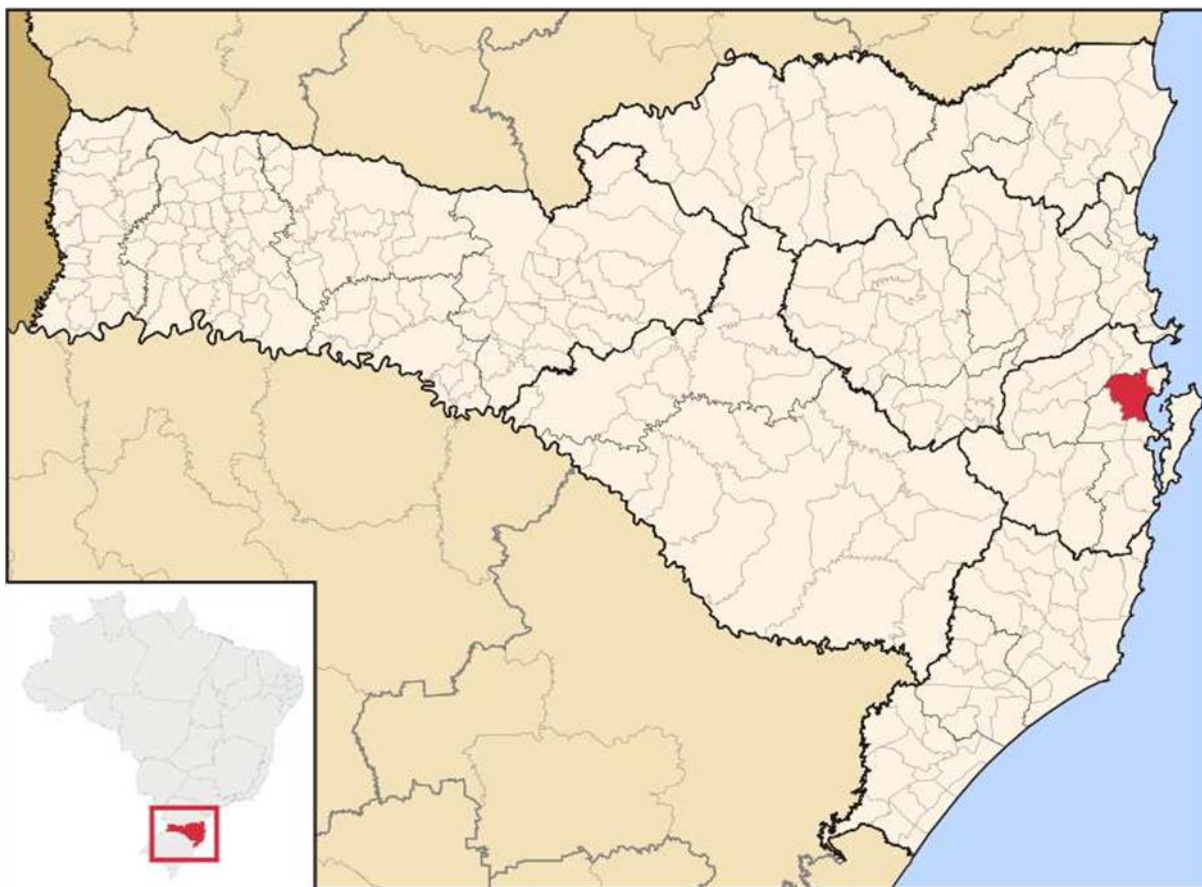
Serão analisados cerca de 55 eventos, praticados entre fevereiro de 2022 e dezembro de 2022, de monitoramento sismográfico de detonação nas proximidades

de células de deposição de resíduos sólidos urbanos próximo ao epicentro das escavações e dados de acompanhamento de aproximadamente 50 leituras dos instrumentos instalados para coleta de informações geotécnicas no Aterro (marcos superficiais, pinos de recalque, piezômetros) durante os eventos de escavação cuidadosa ao longo de 300 dias de projeto.

4.2 Objeto de estudo

O estudo proposto nesse trabalho acadêmico foi realizado com base nos dados coletados durante os serviços de escavação cuidadosa com a utilização de explosivos próximo ao aterro sanitário de Tijuquinhas, localizado no município de Biguaçu, SC, conforme é demonstrado no mapa locacional representado na Figura 09, realizados entre os meses de fevereiro de 2022 e dezembro de 2022.

Figura 9 - Mapa locacional do município de Biguaçu.



Fonte: Autor, 2023.

Nas proximidades do aterro existente no município de Biguaçu – SC, está prevista a construção do Trecho Sul A do Contorno de Florianópolis, que se trata de um novo trecho rodoviário que está sendo implantado para desviar o tráfego de longa distância da região metropolitana da Grande Florianópolis. De acordo com o traçado previsto, será necessária a execução de escavação de trecho em rocha que se encontra próximo do aterro sanitário. A Figura 10, representa em planta a localização do aterro em relação à área onde ocorreram as detonações.

Figura 10 - Planta com a locação representativa do Aterro e do Local de detonação.



Fonte: Google Earth 2023.

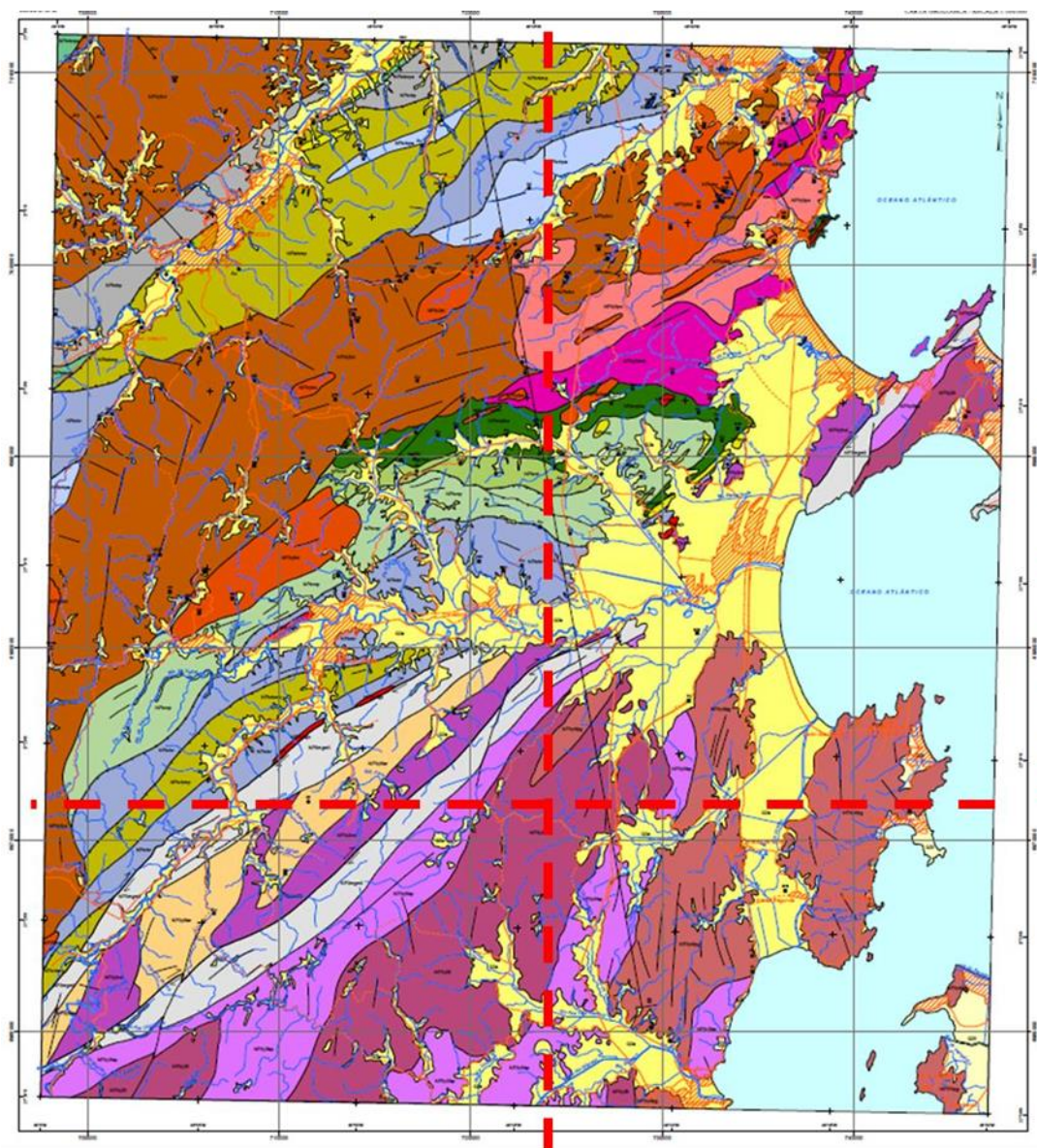
4.3 Geologia regional

Para avaliação do maciço rochoso foi realizada consultou-se o mapa geológico Folha de Brusque SG.22-Z-D-II, escala 1:100.000, 2014, CPRM. De acordo com o mapa, na região da escavação, é observada a seguinte unidade litológica:

NP3y2ft - Complexo Águas Mornas- Granitóides com estrutura augen ou estromática onde neossomas quartzo-monzoníticos, granodioritos e graníticos envolvem mesossomas gnáissicos de composição básico-intermediária predominando anfibolitos, metagabros, metadioritos, hornblendagranodioritos. 615-605Ma (Neoproterozóico – Ediacariano).

Os granitos que compõem a região montanhosa onde será implantado o Contorno de Florianópolis apresentam grande variedade textural, podendo ser equigranulares finos, equigranulares médios a grossos ou porfiríticos. Os cristais de feldspato podem ser euédricos – angulosos – ou mesmo arredondados. A distribuição pode ser verificada nas Figuras 11 e 12.

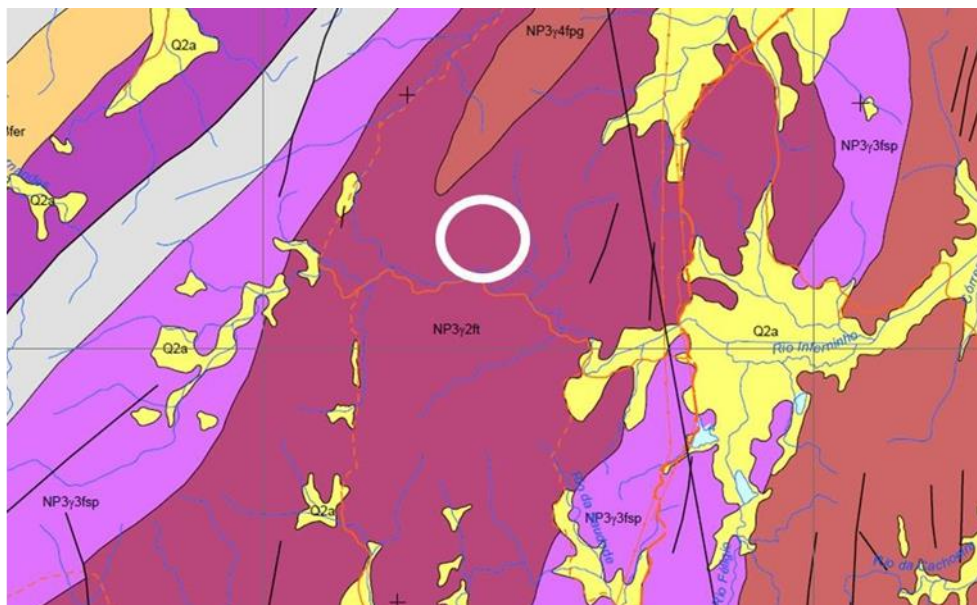
Figura 11 - Mapa geológico.



Fonte: Extraído da Folha Brusque SG.22-Z-D-II, escala 1:100.000. CPRM, 2014.



Figura 12 - Detalhe do mapa geológico

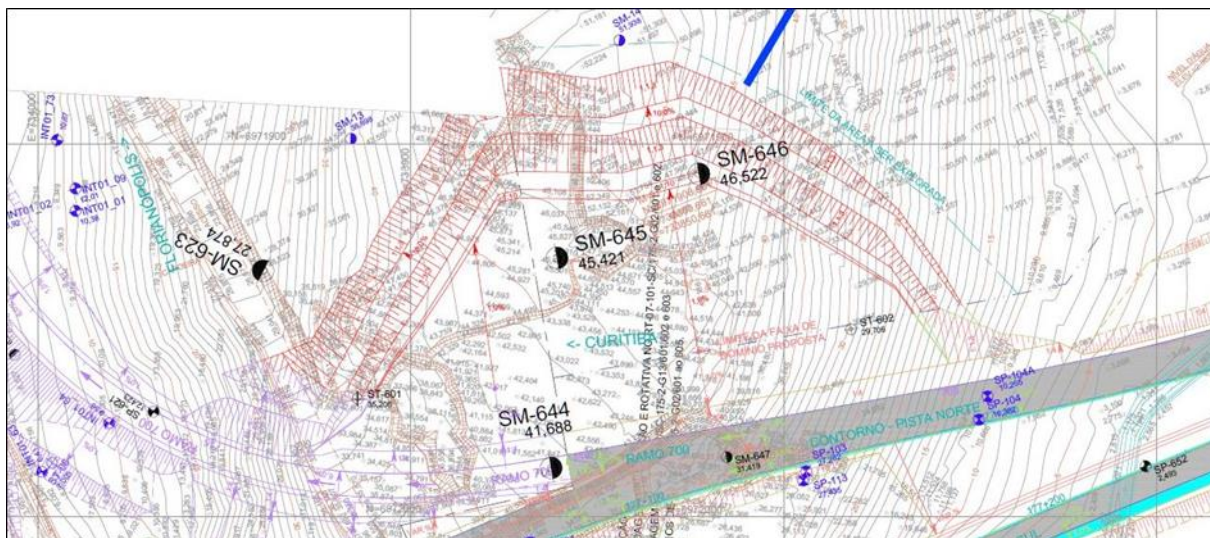


Fonte: Extraído da Folha Brusque SG.22-Z-D-II, escala 1:100.000. CPRM 2014.

4.4 Geologia local

Para melhor entendimento da geologia local, foram executados 04 furos de sondagens mistas em caráter investigativo, com recuperação de amostras, evidenciando a geologia do maciço ao longo do trecho de implantação das escavações para obras do Contorno (Figura 13).

Figura 13 - Localização das sondagens realizadas na área.



Fonte: Autopista Litoral Sul, 2023.

Em resumo, as sondagens indicaram o seguinte quadro geológico a seguir descrito.

- Camadas de solo residual, com coberturas iniciais entre 4,53 m e 5,90 m;
- Alteração de granito a partir de 6 m até 13,05 m; podendo ser classificada como RAD (rocha alterada dura), evidenciando RQD máximo de 55 e fraturado; porém, oferecendo resistência mecânica para escavações de maneira friável;
- A partir dos 15 m, foi observada a presença de granito, rocha magmática, intrusiva de textura fina não metamórfica, média, composta essencialmente pelos minerais de quartzo, mica e feldspato, se apresentando coerente e muito coerente, com recuperação integral e RQD crescente;
- As sondagens foram encerradas com 30 m de profundidade.

4.5 Situação operacional do aterro

O Aterro Sanitário Parque de Gerenciamento de Resíduos Tijuquinhas, objeto de estudo deste trabalho acadêmico, está localizado na Rodovia BR 101, km 177, bairro Areais de Cima, em Biguaçu/ SC. A Figura 14 apresenta uma imagem aérea

do aterro sanitário que é um empreendimento privado, de responsabilidade da ProActiva Ambiental.

Na Figura 14, é possível observar duas áreas distintas do aterro, em uma delas é possível visualizar uma mancha azul, correspondente ao fechamento do aterro com manta, nesta área a deposição de resíduos está encerrada e é denominada por célula antiga. Na área na qual é possível visualizar materiais terrosos, denominada por célula nova, a deposição de resíduos está em andamento.

Figura 14 - Área do aterro sanitário de Tijuquinhas.



Fonte: Google Earth 2023.

O Aterro Sanitário Parque de Gerenciamento de Resíduos Tijuquinhas entrou em operação em 1991. O aterro é utilizado para o depósito de lixo gerado pelos 950.000 habitantes de 21 municípios na área metropolitana de Florianópolis. O local do aterro sanitário abrange uma área total de 200.000 m².

Conforme relatórios internos da gerenciadora do empreendimento, o aterro sanitário entrou em operação em 1991 atingindo em 2004 a altura de 38 m de resíduos. A empresa Proactiva assumiu a operação do aterro sanitário em 2004, operando entre as cotas 38 e 85 m. Para a deposição destes resíduos a

impermeabilização foi realizada com geomembrana aplicada sobre o terreno natural e sobre os resíduos existentes até a cota 38 m.

Para a célula nova, em acordo com a altura prevista em relação aos anos de operação, o planejamento anteriormente proposto para o desenvolvimento foi o seguinte:

- Cota máxima de 35 m no final da fase 2 em setembro de 2021;
- 40 m ao final da fase 3 em maio de 2022; e
- 50 m no final da fase 4 em março de 2023.

4.6 Monitoramentos praticados

São realizadas em ambos os maciços principais do Aterro (célula antiga e célula nova) as atividades programadas relacionadas à inspeção e manutenção, gestão do percolado, gestão do biogás, gestão de águas pluviais e o acompanhamento geotécnico e ambiental.

Ainda, são realizadas leituras semanais dos marcos superficiais instalados na superfície do Aterro, instrumentos estes que tem por finalidade o acompanhamento visual de deslocamentos nos elementos estruturais acomodados (células de deposição).

Também são realizados como medidas cautelares de verificação levantamentos *as built* do aterro, inspeções no maciço e dos elementos acessórios, medições da pluviometria e vazão de chorume.

4.7 Desmonte de rochas

Em fevereiro de 2022 iniciou-se os trabalhos de escavação cuidadosa, no terreno vizinho, ao norte do imóvel do Parque de Gerenciamento de Resíduos Tijuquinhas, atividades de desmonte de rocha, referente as obras do Contorno Viário, de responsabilidade da Autopista Litoral Sul.

Conforme procedimento estabelecido entre Autopista e Proactiva, estes eventos foram acompanhados por meio de monitoramento de vibração e ruído provocados pelas detonações, com o uso de sismógrafos de engenharia instalados

na área do Aterro durante os eventos de detonação. A realização do monitoramento foi de responsabilidade da Autopista com o acompanhamento da Proactiva.

4.7.1 Instrumentação geotécnica de acompanhamento sugeridos

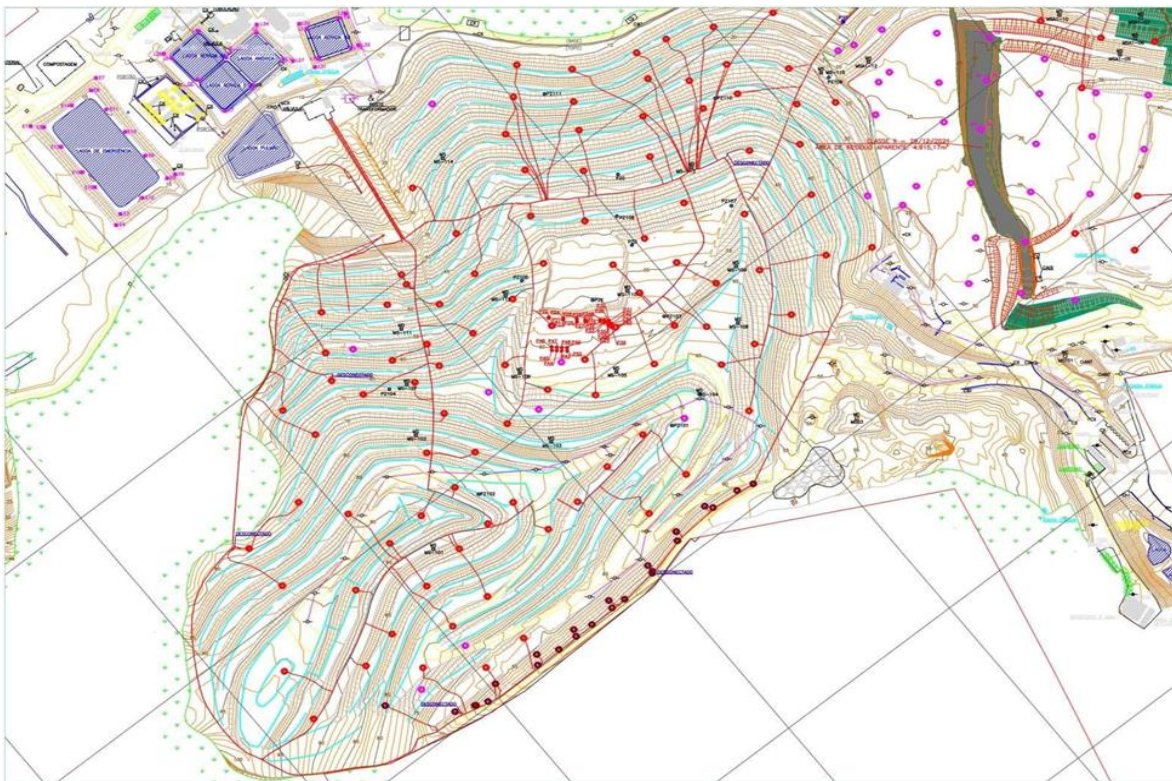
Juntamente com o monitoramento sismográfico durante os eventos de detonação, a empresa executante dos desmontes ofereceu à Autopista Litoral Sul e à Proactiva os serviços de acompanhamento, coleta de dados e agrupamento de informações resultante da leitura em marcos superficiais, pinos de recalques e piezômetros distribuídos nas célula antiga e nova (em operação) no Aterro durante todo o período dos serviços de escavação, serviços estes que chegaram na ordem volumétrica de 200.000 m³ de rocha desmontada com uso de explosivos; isso com o objetivo de observar, interpretar e ajustar os parâmetros dos desmontes visando a não alteração da linearidade dos dados coletados anteriormente às atividades de detonação.

Nesse sentido, o monitoramento de instrumentação geotécnica teve por finalidade a auscultação de parâmetros de estabilidade e comportamento de taludes frente ao desmonte de rocha próximo ao KM 177 do projeto da Autopista Litoral Sul. Este acompanhamento foi realizado com base no projeto de instrumentação vigente internamente praticado pela gestora do aterro, desenvolvido para o local e fornecido pela Proactiva.

A campanha de leituras foi iniciada pela área denominada Ampliação 1. Todos os marcos superficiais instalados pela Proactiva neste local foram monitorados por empresa habilitada para coleta de dados de instrumentos geotécnicos.

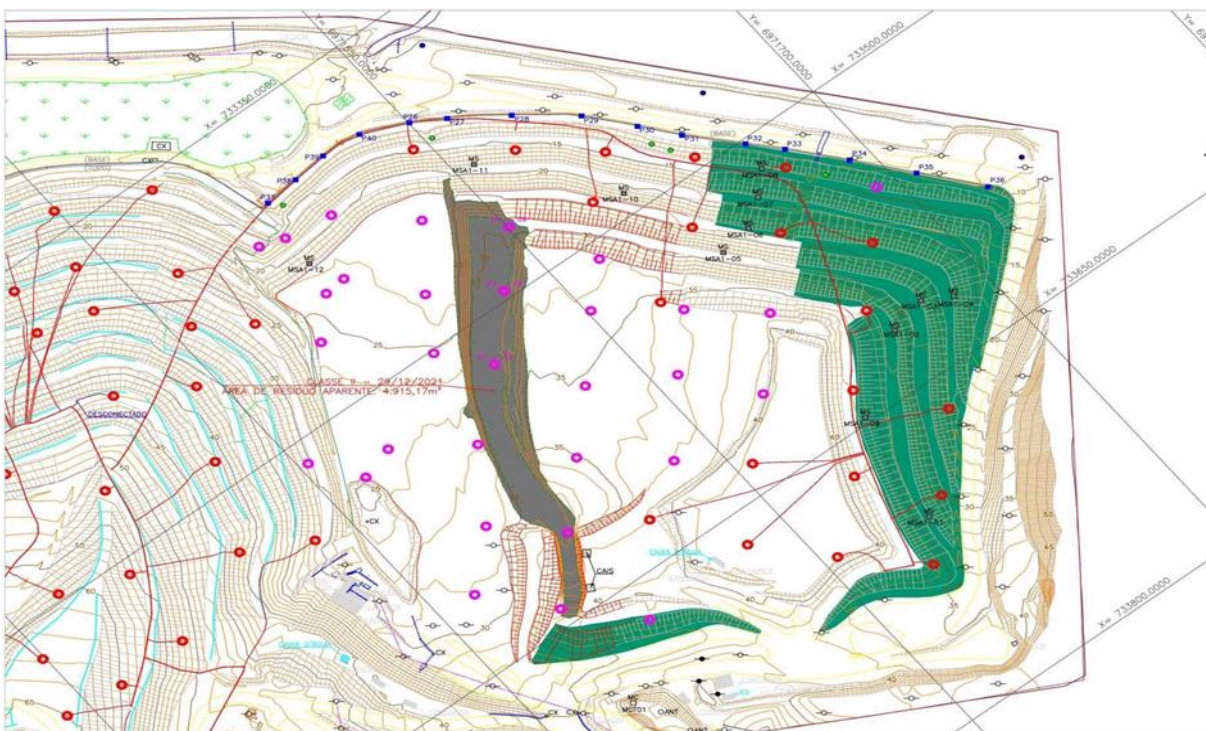
A Figura 15 e 16, mostram em planta a disposição dos instrumentos assistidos nas células antiga e nova.

Figura 15 - Disposição instrumentos célula antiga (deposição encerrada).



Fonte: Proactiva, 2023.

Figura 16 - Disposição instrumentos célula nova (em operação) 17.



Fonte: Proactiva, 2023.

As figuras que representam a distribuição dos instrumentos podem ser interpretadas da seguinte forma:

- Região central das células: Marcos superficiais;
- Bordas/ extremidades das células: Pinos de recalque;
- Pontos dispersos nas células: Piezômetros.

Para a periodicidade das leituras, estabeleceu-se em comum acordo as seguintes diretrizes apresentadas no quadro 1:

Quadro 1 - Instrumentação Geotécnica.

INSTRUMENTAÇÃO GEOTÉCNICA - PIEZÔMETROS, PINOS DE RECALQUE E MARCOS SUPERFÍCIAS
Dias intercalados nas semanas- Segunda a Sexta-feira, dia sim e dia não.
Leitura obrigatório 01 dia antes, antecedendo o evento de desmonte e 01 dia após o evento.

Fonte: Autor, 2023.

Os critérios de avaliação das velocidades verticais diárias foram os mesmos adotados pelo relatório técnico proposto pela Proactiva; fundamentados por Kaimoto (2008), ficando a responsabilidade da Autopista Litoral Sul e a empresa executante do desmonte de rochas analisar os dados coletados; correlacionar com as premissas dos eventos de detonação executados e alterar metodologia dos serviços, caso fosse identificado no relatório periódico de instrumentação geotécnica e anomalias nas leituras praticadas. A Proactiva recebeu os dados coletados durante todo o período de escavação, submetendo a análise de consultores geotécnicos especializados, podendo a qualquer momento se manifestar contrária à qualquer dado discrepante levantado.

4.7.2 Instrumentos assistidos

O quadro 2, apresenta os instrumentos e as quantidades utilizadas para as coletas de leitura:

Quadro 2 - Relação de instrumentos geotécnicos.

<i>Instrumento</i>	<i>Quantidade</i>
Marcos superficiais	27 unidades
Pinos de recalque	15 unidades
Piezômetros	14 unidades

Fonte: Autor, 2023.

Diante da metodologia empregada para a coleta dos dados, foi possível agrupar informações ao longo de aproximadamente 8 meses de projeto. Esses dados serão apresentados na seção de resultados e discussões.

O foco principal de avaliação dessas leituras serão o acompanhamento da linearidade da velocidade de deslocamento vertical diário (em mm/ dia) durante as obras de escavação cuidadosa próximo ao Aterro. Esses dados agrupados fornecerão um panorama do comportamento geotécnico das estruturas ao longo do projeto, apresentando informações em tempo hábil para a adoção de medidas mitigatórias, preventivas e corretivas relacionadas aos eventos de desmonte de rochas e suas variáveis.

4.7.3 Planejamento do monitoramento sismográfico

Para cada plano de fogo executado, adotou-se um número de sete sismógrafos, aparelhos estes necessários para abrangência das estruturas. Esses instrumentos foram dispostos em um raio de alcance linear, a partir do epicentro das detonações, visando à captação de forma mais ampla possível das resultantes de velocidade de deslocamento de partículas e sobre pressão acústica propagas nas

células de RSU assistidas. A seguir, é demonstrada a distribuição adotadas dos sismógrafos durante os eventos de detonação.

- O primeiro aparelho foi instalado na direção entre o ponto de detonação e o ponto mais próximo do aterro sanitário, a aproximadamente 154 metros do epicentro de detonação;
- Outros três aparelhos foram instalados dentro no morro do aterro sanitário. Eles ficaram aproximadamente 440 metros, 391 metros e 352 metros da detonação;
- O quinto sismógrafo foi instalado na área entre a célula nova e a célula antiga do aterro, ficando, aproximadamente, 593 metros da detonação;
- O sexto e sétimo sismógrafos foram instalados na célula antiga do aterro, ficando, aproximadamente, 739 metros e 743 metros da detonação.

A Figura 17, demonstra em planta a distribuição dos sismógrafos no Aterro.

Figura 17 - Disposição sismógrafos em um evento de detonação.



Fonte: Autopista Litoral Sul, 2023.

Em que:

- S1A- Distanciado à 154,8 m do epicentro das detonações;
- S2- Distanciado à 440 m do epicentro das detonações;
- S3- Distanciado à 391 m do epicentro das detonações;
- S4- Distanciado à 352,4 m do epicentro das detonações;
- S5A- Distanciado à 593,1 m do epicentro das detonações;
- S14- Distanciado à 743,7 m do epicentro das detonações.
- S13- Distanciado à 739,00 m do epicentro das detonações.

Tendo em vista objetividade para esse estudo, serão analisados dados dos sismógrafos 02, 03 e 04; com as distâncias aproximadamente de 440 metros, 391 metros e 352 metros respectivamente, mais próximos do epicentro das detonações e na área da célula nova de deposição de RSU, em operação. A coleta de dados nesses 3 aparelhos possibilitará uma análise com maior fundamentação e exatidão; pois o sismógrafo dentro da área do desmonte (SM 01) serve como base para ajustes nas premissas dos planos de fogos, e os sismógrafos S5A, S13 e S14 com as distâncias de 593 m, 739 m, 743 m respectivamente, sequer captaram dados na maioria dos monitoramentos, onde atribui-se isso pelo fato do grande distanciamento do epicentro das detonações.

Os itens que serão analisados nos sismogramas resultantes de cada captação, nas datas dos eventos detonação são apresentados a seguir.

- Velocidade de partícula resultante- PPV (mm/s);
- Frequência associada a velocidade de pico de partícula (Hz);
- Pico de aceleração de partícula (g);
- Tempo de amortecimento da onda propagada (segundos).

A figura 18 apresenta um sismograma simples, para entendimento dos dados captados, conforme programação dos sismógrafos de engenharia.



Figura 18 - Sismograma ilustrativo a ser analisado.



Event Report

Data/Time Vert at 15:31:31 Fevereiro 16, 2023

Numero do Serial BE21401 V 10.72-1.1 Minimate Blaster

Gatilho de disparo Geo: 0.508 mm/s, Mic: 125.0 dB(L)
Escala Geo: 254.0 mm/s

Nivel da Bateria 6.2 Volts
Unit Calibration Junho 16, 2014 by Instantel

Tempo de Gravacao 20.0 seg at 1024 sps

Nome do arquivo W401JWC8.GJ0

Numero do Trabalho: 1

Notas

Cliente: Itaguaí Desmonte de Rocha
Aparelho: Jacminas Engenharia
Obra: Desmonte KM177

Postar notas do evento

Detonação realizada para o desmonte de rocha do KM 177.
Plano de Fogo 063
Sismógrafo instalado no ponto S1A na área do desmonte prox.154m da detonação.

Microfone

PSPL 138.8 dB(L) 174.0 pa.(L) at 0.457 seg
ZC Freq 14 Hz

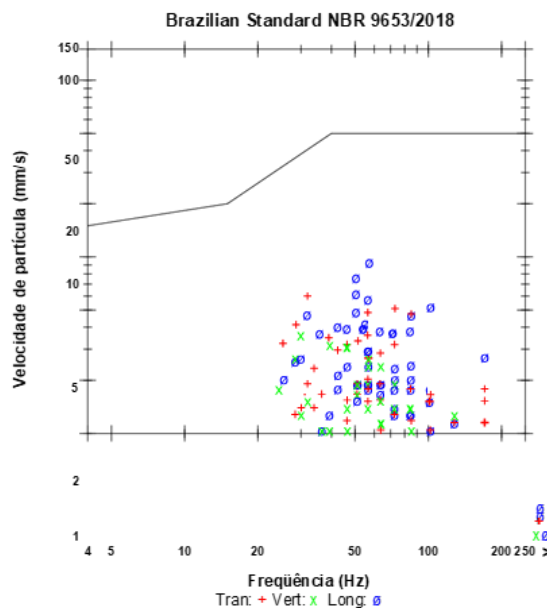
Teste do canal Passado (Freq = 20.1Hz Amp = 385mv)

	Tran	Vert	Long	
PPV	5.969	3.556	9.271	mm/s
PPV (Ponderated)	4.010	2.708	4.526	mm/s
PPV	66.52	62.02	70.34	dB
ZC Freq	32	30	57	Hz
Time (Rel. to Trig)	0.104	0.083	0.124	seg
Pico de aceleracao	0.331	0.172	0.318	g
Pico do deslocamento	0.020	0.018	0.023	mm

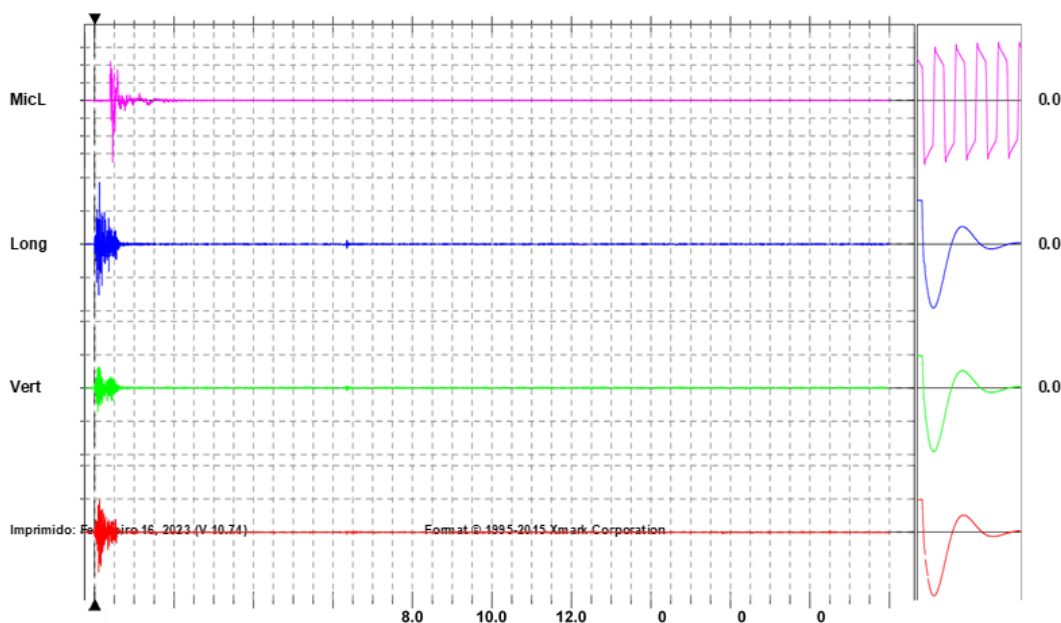
Verificacao do sensor Passado Passado Passado

Frequency	7.3	7.5	7.5	Hz
Overswing Ratio	3.8	3.7	3.7	

Sumario do Pico de Vetor 9.576 mm/s at 0.124 seg



Para freq. < 4 Hz, deslocamento de pico de no máximo 0,6 mm (de zero a pico)



Fonte: Minimate Blaster, Instantel, 2023.



Curso de Especialização
em Engenharia Mineral

4.7.4 Equipamentos Utilizados

Para o monitoramento sísmográfico durante os eventos de detonação no decorrer do projeto, usaram-se 7 sismógrafos de engenharia devidamente calibrados, visando a coleta de registros de vibração e sobre pressão acústica. Os sismógrafos de engenharia utilizados foram os da série Minimate Blaster da Instantel. Os dados obtidos são processados pelo software Blastware da Instantel e foram apresentados através de sismogramas dos eixos longitudinal, vertical e transversal da velocidade de partícula de pico nos três eixos, do deslocamento e aceleração relativos às velocidades de partícula do pico, e das frequências dominantes em cada eixo.

Para as leituras de deslocamentos verticais em marcos superficiais e pinos de recalque, utilizou-se uma Estação Total Eletrônica automática, Trimble S3 com sistema auto-lock, de precisão de medição linear de 2mm + 2ppm e precisão angular de 2". Devidamente calibrado, esse aparelho conta com armazenamento das leituras em memória interna e exportação dos dados em arquivo evitando erros de escrita e de digitação. O procedimento de nivelamento geométrico executado esteve em acordo com a norma de execução de levantamento topográfico da NBR ABNT 13133:1996.

4.8 Configuração dos sismógrafos

O procedimento de fixação e direcionamento do geofone e microfone seguiu instruções contidas na Norma da ABNT NBR 9653:2018. No caso do geofone direcionou-se o equipamento para a fonte causadora da vibração, nivelando e fixando o mesmo ao solo, tornando o solidário ao meio de propagação sem ficar em balanço. No caso do microfone, este foi afastado, no mínimo 0,5 m do piso e 2,0 m de qualquer superfície refletora, como muros, paredes e obstáculos.

Especificações técnicas para medição de vibração:

- Faixa de operação: até 254 mm/s;
- Faixa de frequência: 2 a 250 Hz, dentro de 0 a -3 dB;



- Precisão: $\pm 5\%$ ou $\pm 0,5$ mm/s, o que for maior, entre 4 e 125 Hz;
- Nível de gatilho: 0,125 a 254 mm/s.

Especificações técnicas para medição da pressão acústica:

- Faixa de operação: 88 a 148 em dB (L) linear ou dB (Z) Zero;
- Faixa de frequência: 2 a 250 Hz;
- Precisão: $\pm 10\%$ ou ± 1 dB, o que for maior, entre 4 e 125 Hz;
- Nível de gatilho: 100 a 148 dB (L).



5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste Capítulo são descritos todos os dados obtidos em campo, a análise e interpretação dos mesmos, bem como a revisão dos planos de fogos praticados, que são correlacionados com níveis de ruído e vibração. Da mesma forma, são analisadas as equações de atenuação obtidas utilizando-se a velocidade de partícula de pico. Ainda, são analisados os dados da instrumentação geotécnica acompanhada durante as escavações cuidadosas, com a finalidade de entender o comportamento das estruturas durante os desmontes.

5.1 Ajustes dos planos de fogos

Diante da necessidade de cuidados redobrados do ponto de vista técnico, foram adotadas medidas cautelares em relação às variáveis do plano de fogo, escolha de explosivos-acessórios e inserção de técnicas que mitigassem a transmissão do trem de onda gerada na detonação em direção ao maciço em que os resíduos sólidos urbanos estavam depositados. A seguir, são apresentadas as mudanças praticadas ao longo do projeto.

5.1.1 Variáveis do plano de fogos

- Planejamento e definição das cargas máximas por espera praticadas (CME), em relação às distâncias mais próxima da estrutura assistida pelos sismógrafos de engenharia. Tal cálculo pode ser desenvolvido através das equações (1) e (3) - estimativa das leis de propagação e distância escalonada;
- Adoção de diâmetros reduzidos, na ordem de 64 mm, com o objetivo de restrição de cargas operantes elevadas;
- Melhora na distribuição geométrica dos furos (malha) sobre o maciço a escavar, com a finalidade de melhorar relação entre o afastamento e espaçamento

planejado para os desmontes. Utilização de gabaritos de demarcação topográfica ajustada. Afastamento considerando a densidade do explosivo, densidade da rocha e diâmetro do explosivo. Espaçamento planejado na ordem de 20% a mais que o afastamento;

- Adoção de no máximo 6 linhas de avanço por detonação;
- Adesão de material granular (brita 1) para tamponamento e confinamento adequado da carga explosiva. Pode-se constatar considerável redução de perda de gás e lançamentos fora da área projetada para o desmonte (ultralançamentos);
- Adoção de tampão com altura de 70% das dimensões do afastamento;
- Adoção de subfuração na ordem de 30% da dimensão do afastamento;
- Definição das inclinações aplicadas nas perfurações em favorecimento às descontinuidades dos maciços escavados. Tal metodologia possibilitou maior estabilidade no talude remanescente pós detonação e melhor fragmentação e lançamento da pilha de material desmontado;
- Limitação da altura das bancadas a no máximo 10 m, visando um bom desempenho geométrico da distribuição da perfuração;
- Dimensionamento de volumes dos desmontes por evento em consonância com a necessidade de volumes para destinação nas obras auxiliares do material desmontado; sempre observando os dados de sismografia e instrumentação geotécnica nas estruturas vizinhas. Volumes grandes só seriam escavados caso os dados da instrumentação mostrassem estabilidade na linearidade das leituras coletadas, com limites pré-estabelecidos.

5.1.2 Explosivos e acessórios

- Adoção de emulsões encartuchadas, com densidade de $1,10 \text{ g/cm}^3$, com a utilização de espaçadores inertes (madeiras) e cargas reduzidas nos taludes mais próximos às estruturas;

- Utilização de razões de carga entre 450 e 600 g de explosivo por m³ desmontado;
- Utilização de acessórios não elétricos; tubo de choque de colunas com espoletas de fundo e retardos de superfície multidirecionais, com a utilização de tempos de 9, 17, 25 e 42 ms. A combinação dos tempos (ligações) foi dimensionada em função dos resultados sismográficos. Para cenários de sobreposição de ondas, utilizavam-se tempos mais espaçados, e para cenários de baixa frequência, tempos mais rápidos.
- Sequenciamento de detonação furo a furo, com a CME planejada devidamente respeitada;
- Limitação de carga explosiva máxima por evento de até 2.500 Kg.

5.1.3 Técnicas para mitigação da propagação excessiva do trem de onda

- Nos taludes finais da escavação, próximos às estruturas de deposição de RSU (com distância de aproximadamente 350 a 400 m); empregou-se desmonte escultural (pré-fissuramento), com a utilização de cargas reduzidas aliadas à técnica de *linedrilling*; que consiste em furos próximos (a cada 30 cm) vazios, intercalando os furos carregados. Para essas áreas, ainda foram utilizadas cargas espaçadas e cordel detonante NP 10 dentro do furo, com gramatura reduzida, visando o menor impacto no talude remanescente;
- Estabelecimento de limites para tempo de amortecimento de onda de choque originada nos desmontes e acompanhada via levantamentos sismográficos (≤ 2 segundos) e aceleração de partícula com velocidade de até 0,2 g.

Os resultados referentes às cargas aplicadas de explosivos por metro cúbico desmontado e cargas máximas por espera obtidos através do agrupamento de todas as informações dos fogos realizados no período observado, apresentados no Apêndice A, demonstraram uma primeira concordância e admissibilidade ao planejamento e ajustes nas variáveis de plano de fogo inicialmente propostos para a adequada execução dos desmontes cuidadosos.

Os dados de sismografia e instrumentação geotécnica a seguir apresentados complementarão a análise ou pontuarão maior observância para dados discrepantes, se por ventura obtidos, a partir execução dos serviços de desmonte.

5.2 Resultados de sismografia

Foram realizadas 147 captações com 3 sismógrafos de engenharia distintos e devidamente calibrados em pontos com distância média de 370 a 400 m do epicentro das detonações. Esses pontos foram definidos no planejamento de monitoramento sismográfico anteriormente apresentado. Entende-se que são os pontos que melhor representaram o comportamento das estruturas assistidas. Os dados das 147 captações, referente às faixas obtidas de velocidade de partícula resultante, pressão acústica e frequência associada com a velocidade de partícula são apresentados nos Apêndices B, C, D e E respectivamente, neste trabalho.

Pode-se, através dos resultados de sismografia obtidos ao longo das 147 captações realizar as seguintes verificações:

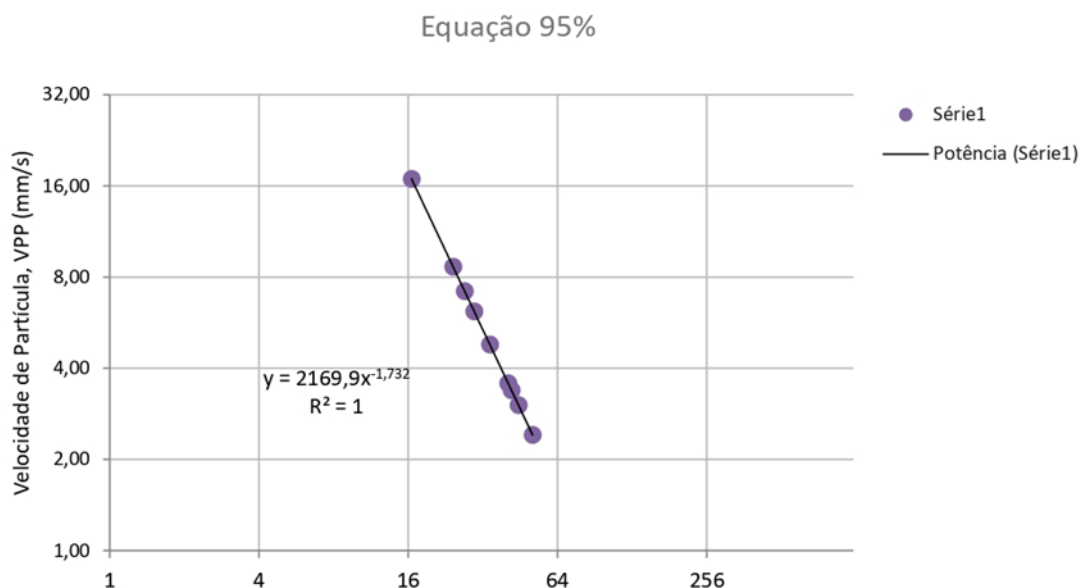
- Os valores de deslocamento de partícula resultante captado nas 3 componentes monitoradas com sismógrafo de engenharia (transversal, longitudinal e vertical) ficaram com valores entre 0,49 e 2,00 mm/s;
- Os níveis de pressão acústica registrados nos eventos oscilaram entre 121 e 136 dB, com registros de eventos que extrapolaram os limites preconizados na norma ABNT NBR 9653:2018. Entretanto, para o objeto de monitoramento do estudo apresentado, entende-se que os níveis de sob pressão acústica fora dos valores recomendados em norma não trazem comprometimentos estruturais. Os níveis preconizados por tal norma, sintetiza a avaliação de níveis de desconforto provocados por atividades de mineração em grandes centros urbanos e bairros demasiadamente habitados e populosos, sendo necessário sua adoção para minimizar os impactos de desconfortos relacionados a ruídos;

- A associação dos valores obtidos das velocidades de deslocamento de partícula em relação às frequências resultantes em cada evento, demonstraram que as vibrações obtidas ficaram dentro dos valores recomendados por norma. Mesmo para frequências em que se obtiveram resultados inferiores à 4 Hz; os valores de vibração não atingiram 0,6 mm/s, conforme recomenda a norma técnica.

Os resultados obtidos nas sismografias indicaram valores de deslocamento de partícula, frequência e pressão acústica concordante com as diretrizes propostas pelas normas que regulam a atividade de desmonte de rochas.

Ainda, pode-se dimensionar, através da equação da atenuação das ondas sísmicas, as cargas máximas por espera admissíveis e compará-las com as praticadas. A partir dos dados levantados com sismografia ao longo das 55 detonações e do registro furo a furo da maior carga detonada por instante, foi possível calcular com satisfatória correlação ($r^2 = 0,78$) a Equação de Atenuação de Ondas Sísmicas no sentido SW (centróide detonação – aterro). A Figura 19 mostra a Equação e o gráfico log- log com 95% de confiança para a determinação da CME a ser empregada nos desmontes. Essa definição visa identificar as vibrações “puras” no terreno e determinar pelo procedimento internacional padrão de geração de Equação de Atenuação com 95% de precisão e respectiva CME.

Figura 19 - Equação de atenuação em diagrama log-log.



Fonte: Autor, 2023.

A equação de confiabilidade (95%) pode ser a seguir representada, após a obtenção dos resultados de sismografia.

$$VP = 2169,9 \left(\frac{D}{Q} \right)^{-1,732} \quad (5)$$

Onde:

Vp – Velocidade de vibração de partícula, em mm/s;

D – Distância, dada em m;

Q – Carga, em kg.



O quadro 3 mostra o resultado à ser obtido para velocidades de vibração de pico (PPV) entre 5 mm/s e 50 mm/s; mediante a previsão de CME de acordo com a equação de 95% de confiabilidade. Nota-se, por exemplo, que a 300 m de distância do aterro visando uma PPV de 5 mm/s máxima, a carga máxima de cada furo (CME) poderia ser dimensionada em 81,13 Kg de emulsão, e assim, sucessivamente para a direção SW.





Quadro 3 - CME com 95% de precisão na direção SW.

PPV(mm/s)	5.0	10.0	15.0	20.0	25.0	30.0	35.0	40.0	45.0	50.0
d(m)										
100	9.01	20.07	32.05	44.67	57.80	71.34	85.24	99.45	113.93	128.67
150	20.28	45.15	72.11	100.51	130.05	160.52	191.79	223.75	256.35	289.50
200	36.06	80.27	128.19	178.69	231.20	285.37	340.95	397.78	455.73	514.68
250	56.34	125.42	200.30	279.20	361.25	445.88	532.74	621.54	712.07	804.18
300	81.13	180.60	288.43	402.05	520.19	642.07	767.14	895.01	1025.39	1158.02

Fonte: Autor, 2023.

As cargas utilizadas por furo se apresentaram bem abaixo das CME calculadas e, portanto, não ofereceram riscos ou potencialidade de danos estruturais, estando em acordo com as normas padronizadoras para as atividades.

5.3 Resultados das instrumentações

O acompanhamento das velocidades de deslocamento vertical, dados em mm/dia, referente às leituras dos marcos superficiais e pinos de recalques distribuídos no Aterro; bem como a observação da variação de níveis de água, dados em m/dia por leitura por piezômetros; foram agrupados em planilhas ao longo do tempo e que, ao serem plotados em gráficos de acompanhamento, tal escolha possibilitou uma melhor visualização do comportamento das estruturas assistidas por esses equipamentos. A representação gráfica geral do acompanhamento dos instrumentos ao longo das escavações cuidadosas para implantação do contorno viário de Florianópolis é apresentada nos Apêndices E, F, G, H, I e J desta monografia.

Cabe ressaltar que conforme a boa e apropriada periodicidade das leituras estabelecidas, os dados eram rotineiramente analisados e as premissas dos planos de fogos alteradas imediatamente de maneira preditiva e preventiva, caso houvesse alguma anormalidade nas leituras.

Os critérios para direcionamento de ações mediante os valores apresentados nas leituras dos deslocamentos obedeceram às indicações do trabalho de Kaimoto(2008); amplamente utilizado para verificações e inspeções do comportamento estrutural de Aterros, conforme anteriormente apresentados neste trabalho acadêmico.

Assim, diante das leituras captadas e do agrupamento dos resultados ao longo das escavações, pode-se realizar as seguintes análises técnicas dos resultados:

- As velocidades de deslocamentos verticais obtida através das leituras dos marcos superficiais mostraram cenários diferentes para as células de RSU com operação encerrada (Célula antiga) e célula em ampliação (Célula nova), a destacar:

A) Observou-se uma manutenção na linearidade dos valores diários de deslocamento nos marcos superficiais instalados na célula antiga e uma maior dinâmica de movimentação na célula em operação.

B) Para as movimentações com maiores valores (célula em operação), pode-se atribuir essas modificações em decorrência da heterogeneidade e anisotropia do material depositado e pelo deslocamento e acomodação natural dos RSU, comportamento esperado para os estágios iniciais de deposição. Notou-se que os eventos de detonação não alteraram a linearidade dos dados observados, não apresentando anomalias antes e pós os eventos de detonação. Nenhuma ação de paralização foi adotada mediante aos resultados obtidos, ficando as áreas assistidas em no máximo análise de atenção ou alerta. A variação diária máxima obtida foi de 7 mm entre uma leitura e outra posterior.

- As leituras dos pinos de recalque não indicaram nenhuma mudança abrupta decorrente dos eventos de detonação, ficando as movimentações verificadas atribuídas somente a dinâmica de acomodação dos RSU em ambas as células. Foram constatadas movimentações diárias médias de 0,15 mm, com valor máximo de 13 mm e vetor resultante médio de 35 mm, considerados absolutamente normais para esse tipo de estrutura assistida;

- Os dados obtidos a partir da leitura dos piezômetros indicaram nenhuma mudança na linearidade dos dados de poropressão em ambas as células. Variações máximas de 0,0018 m, e em alguns instrumentos, ausência de água.

As leituras dos instrumentos e o agrupamento das informações demonstraram que as detonações não influenciaram na linearidade e dinâmica de movimento comportamental dos RSU depositados na célula com operações encerradas e na célula em ampliação, sendo esta, mais próxima do epicentro das escavações.

Corroborando com as análises aqui apresentadas neste tópico, estudos de verificação de fator de segurança e estabilidade realizadas em julho de 2022, praticados por empresa especializada, 5 meses após o início dos desmontes, subdividindo o Aterro por seção de análise (Anexo 1); apresentando assim ensaios e resultados de estabilidade presentes

nos Anexos 2, 3 e 4 deste trabalho. Esse estudo correlacionou os dados de instrumentação geotécnica, sismografia e percolados, indicando situação de estabilidade normal do Aterro no momento da análise. Os critérios de análise adotados foram baseados na norma NBR 11.682:2009 - Estabilidade de encostas. Os valores das diretrizes da análise são apresentados no Quadro 4.

Quadro 4 - Critérios Fator de segurança Aterro.

Nível Critério	Fator de Segurança (FS)	Ações
ADEQUADO	$FS > 1,5$ (**)	Continuidade das ações programadas de rotina
ATENÇÃO	$1,3 < FS < 1,5$	Indica a necessidade de intensificar as ações de monitoramento geotécnico.
ALERTA	$1,1 < FS < 1,3$	Indica a necessidade de aplicar medidas para reduzir as pressões neutras
INTERVENÇÃO	$FS < 1,1$	Situação de emergência. Interditar a área. Aplicar medidas imediatas para alívio de pressão.

(**) = Conforme ABNT – NBR 11.682/09 Estabilidade de encostas.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A atividade de desmonte de rochas, tem papel primário fundamental para as atividades subsequentes de beneficiamento de minérios ou apoio à infraestrutura em setores de extrema relevância na sociedade, onde cita-se a construção civil e a mineração. Tratando-se de uma atividade que, quando bem projetada e dimensionada, traz consigo benefícios como maior rapidez dos serviços, maiores seletividades e melhores aspectos econômicos. No entanto, a atividade de desmonte sem apropriado planejamento geram riscos potenciais com danos irreparáveis ao meio ambiente, materiais e humanos.

Este trabalho avaliou a interação entre a necessidade de execução de desmontes cuidadosos próximos a estruturas implantadas (e em implantação) sensíveis à propagação de vibrações e baixas frequências originadas das atividades de detonação.

Diante disso, estabeleceu-se uma campanha de monitoramento de vibrações e ruídos, onde por meio dos dados obtidos e da análise dos mesmos, puderam ser testados modelos de previsão que oferecessem um maior grau de confiança, obtendo assim uma equação de atenuação para um intervalo de confiança estipulado. Além disso, pode-se fazer um zoneamento de cargas máximas por espera na área de estudo, a partir do modelo de previsão determinado, na qual pode-se constatar que quanto maior a distância a partir do local de detonação, maiores poderiam ser as cargas máximas por espera, possibilitando aferição dos níveis de vibração gerados a partir dessas modelagens matemáticas.

Durante a análise dos dados de vibrações, pode-se constatar que a maior parte deles resultaram em níveis baixos de vibração, influenciados muitas vezes por uma série de fatores como: a geologia local e a distância dos locais de detonação com os pontos de medição, além do plano de fogo empregado.

Quanto aos dados de ruídos (sobrepresão acústica) pode-se observar que a maior parte níveis registrados se mantiveram constantes em um intervalo entre 120 e 140 dB.

As frequências de pico resultantes associadas aos resultados de deslocamento de partícula, foram rotineiramente analisadas e com a adoção da adequação em tempo hábil das premissas dos planos de fogos, pode ser trabalhada a redução de eventos que gerassem baixas frequências, nocivas às estruturas vizinhas.

Observou-se ainda que mesmo com as adversidades geológicas do maciço, identificadas durante as escavações, onde cita-se a complexa geologia local, caracterizada pela presença de um maciço muito fraturado com muitas estruturas geológicas desfavoráveis (falhas, diques, descontinuidades), heterogeneidade litológicas intrudidas em meio ao granito alterado duro, propiciando uma condição potencial de propagação das ondas de vibração, barreiras de atenuação, podendo gerar altos níveis de vibração, os resultados comprovaram que os ajustes nas premissas dos planos de fogos asseguraram uma condição adequada para a execução dos serviços, sem comprometimentos técnicos no projeto.

Somando-se às análises sismográficas, foram agrupados dados de leitura de instrumentos geotécnicos, através de planejamento de instrumentação, para entendimento do comportamento e a respostas das estruturas, durante e após os eventos de detonação. Os resultados obtidos e os estudos de estabilidade principiado destes, demonstraram ao longo do tempo que não ocorreu nenhuma mudança abrupta na linearidade e dinâmica da acomodação dos RSU nas células de deposição.

Assim, entende-se que as técnicas, adequações e instrumentos utilizados para a mitigação dos riscos de danos ocasionados por desmontes mal planejados, objeto de estudo desse trabalho, alcançaram êxito, atestando que o emprego de métodos cuidadosos durante o processo de desmonte de rochas, se faz necessário para casos específicos que inspirem maiores cuidados do ponto de vista geológico e geotécnico (áreas sensíveis).

Portanto, entende-se que os objetivos gerais e específicos propostos para esse estudo foram atingidos, confirmando a hipótese inicialmente dissertada para análise.



REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE LIMPEZA PÚBLICA. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil**. São Paulo, 2013. Disponível em:<<http://abrelpe.org.br/Panorama/panorama2013.pdf>>. Acessado em 17 de abril de 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 9653:2018- Guia para avaliação dos efeitos provocados pelo uso de explosivos nas minerações em áreas urbanas – **Procedimento**. Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8419:1992- **Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos**. Rio de Janeiro, 1992. 7p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 11682:2009 **Estabilidade de encostas**. Rio de Janeiro, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. **ABRELPE: Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil**. Rio de Janeiro, 2018.

ANDRADES, S. A. **Estudo do fator de segurança de um aterro sanitário tipo convencional comparando com um aterro sanitário tipo encosta**. 145p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2018.

AMBCONSULT ESTUDOS E PROJETOS AMBIENTAIS. **Avaliação de estabilidade geotécnica**. Aterro sanitário parque de gerenciamento de resíduos Tijuquinhas. São Paulo, 2022. 151 p. (Série Texto Técnico- TT).

BENVENUTO, C. Monitoramento geotécnico e a estabilidade dos aterros sanitários. **Revista Limpeza Pública**, São Paulo, Edição 77, n. 2, p.28-45. Associação Brasileira de Resíduos Sólidos e Limpeza Pública – ABLP, 2011.

BOSCOV, M. E. G. **Geotecnia Ambiental**. São Paulo: Oficina de Textos. 2008. v. 1. 248p.

CUNHA, Mariana Bonella. **Avaliação de instabilidade em um aterro sanitário**. 2020. 62 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais) – Universidade do Estado de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, Lages, SC, 2020.

DGSI. **Guide to Geotechnical Instrumentation**. Durham Geo Slope Indicator. 2004.

DORNELES, F. T.; SOUZA, L. E. de; OLIVEIRA NETO, R. Controle e previsão de níveis de ruído e vibrações gerados pelo desmonte de rochas com





explosivos. **Revista Monografias Ambientais**, [S. l.], v. 13, n. 4, p. 3639–3648, 2014. DOI: 10.5902/2236130814410. Disponível em: <https://periodicos.ufsm.br/remoa/article/view/14410>. Acesso em: 28 abr. 2023.

DOWNDING, C. H., (1985) “**Blast Vibration Monitoring and Control**”, Northwest University, Ontario, CANADA, 297p.

DUNNICLIFF, J. (1988). **Geotechnical Instrumentation for Monitoring Field Performance**. Wiley Interscience, New York.

FONSECA, Alessandra da Rocha. **Auscultação por instrumentação de barragens de terra e enrocamento para geração de energia elétrica - Estudo de caso das barragens da UHE São Simão**. 2003. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Universidade Federal de Ouro Preto, [S. l.], 2003.

GAMA, C. D. da. **Curso vibrações em geotécnica: geração, monitorização, impactos ambientais, critérios de dano e sua mitigação**. Lisboa: Universidade Técnica de Lisboa, 2003.

GASPERINI, D. et al. Potential and limitation of UAV for monitoring subsidence in municipal landfills. Int. J. **Environmental Technology and Management**, v.17, n.1, 2014.

GERALDI, J. L. P. **O ABC das escavações de rocha**. Editora Interciência. Rio de Janeiro. 2011.

GRISOLIA, M.; NAPOLEONI, Q. **Deformability of waste and settlements of sanitary landfills**. In: Iswa World Congress on Waste Management. 1995.

HARTMAN, H. L.S. M. E. **Mining Engineering Handbook**. 2. ed.. Volume 1. Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc. Colorado, E. U. A., 1992.

ISEE - **INTERNATIONAL SOCIETY OF EXPLOSIVES ENGINEERS**. Blasters' Handbook. 18. ed. Cleveland: ISEE, 2014.

JACMINAS ENGENHARIA. **Relatório de instrumentação geotécnica frente ao desmonte de rocha à ser realizado próximo ao KM 177 no Projeto Litoral Sul - ARTERIS – Biguaçu/SC**. Biguaçu, 2023. 114 p. (Série Texto Técnico- TT). Código interno RT-07-101/SC-000-0-S24/126.

JACMINAS ENGENHARIA. **Relatório de instrumentação geotécnica sismográfica frente às detonações do desmonte de rocha realizado próximo ao KM 177 no Projeto Litoral Sul - ARTERIS – Biguaçu/SC**. Biguaçu, 2023. 25 p. (Série Texto Técnico- TT). Código interno RT-SIS-DES-KM177-063

JIMENO, C. **Drilling and blasting of rocks**. Traduzido por Yvonne Visser de Ramiro. A. A. Balkema/Rotterdam/Brookfield. 1995.



JIMENO, L. C. et al. **Manual de Perforacion y Voladura de Rocas**, 2. ed., Madri, Espanha, Instituto Tecnológico Geominero de España. 2004.

KAIMOTO, L. S. A. **Curso de treinamento sobre Aterros Sanitários – Monitoramento geotécnico e ambiental de Aterros**. Associação Brasileira de Resíduos Sólidos e Limpeza Pública – ABLP, 2008.

KOCHEN, R. **Análise de risco de estabilidade do aterro sanitário de Biguaçu**. Barueri, 2021. 84 p. (Série Texto Técnico, código interno ALS-101SC-175-177-CT0-OUT-RT-Z9-0001-R02).

LING, H. I. et al. Estimation of municipal solid waste landfill settlement. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**. v.124, p.21-28, 1998.

LOURO, Ana Filipa Franco Correia. **Novas formulações para leis de propagação de vibrações, em maciços rochosos, baseadas nas propriedades termodinâmicas dos explosivos**. Lisboa: Universidade Técnica de Lisboa, 2009;

MUNARETTI, Enrique; KOPPE, Jair C. SCHNACK, Pedro J.; COSTA, João F. C. L. **Estudo da atenuação de onda sísmica para construção de depósito de resíduos industriais na Pedreira Expopedras**, Carlos Barbosa, RS. IBRAM, 2006;

NETO, C. L. **A análise do comportamento dos resíduos sólidos urbanos e desenvolvimento de modelos estatísticos para previsão das deformações de aterros sanitários**. 162p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) - Universidade Federal de Campina Grande – UFCG, Campina Grande, 2016.

NIEBLE, C. M. **Desmontes cuidadosos com explosivos, aspectos de engenharia e ambientais**. Editora Oficina de textos. São Paulo – SP. 2017.

NITRO DEMOLIÇÃO LTDA. **Acompanhamento técnico de controle e monitoramento das detonações próximas à central de gerenciamento de resíduos de Tijuquinhas – CGRT – Biguaçu/sc**. Autopista Litoral Sul. Biguaçu, 2022. 27 p. (Série Texto Técnico- TT)

PERSON, P., Holmberg, R. and Lee, J. **Rock Blasting and Explosives Engineering**, RCR Press. [S.l.], 1994.

SANTOS, D. G. **Estudo das vibrações geradas pelo desmonte de rochas com uso de explosivos e a sua relação com as fraturas da pedreira Bangu – RJ**. Trabalho de graduação. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro – RJ. 2009.

SILVA, G. G.. **Desmonte de Rochas de aberturas subterrâneas em zonas sensíveis á vibrações**. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade de Goiás. Goiás, 2013. 58 p.



SILVA, V. C. **Abordagem Quantitativa dos Impactos Ambientais no Desmonte de Rochas**. 1º Curso Sobre Avanços Tecnológicos No Desmonte De Rochas Com Explosivos Em Minas e Obras Cíveis, 2012.

SILVA, V. C.. **Operações Mineiras**. Curso de Mineração 210 pela Escola de Minas (UFOP), 2009.

SOWERS, G.F. Foundation problems in sanitary landfills. *Journal of the Sanitary Engineering Division*, v. 94, n. 1, p. 103-115, 1968.

TEIXEIRA, M. C. **Previsão e monitoramento de recalques em aterros sanitários/ estudo de caso: Central de Resíduos de Recreio – Minas do Leão/RS e São Leopoldo/ RS**. 217p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2015.





APÊNDICE





APÊNDICE A– Dados básicos dos planos de fogos.

Evento	Data	Número de furos	Carga Máxima por espoleta (Kg)	Razão carga (Kg/ m ²)
1	22/02/2022	25	2,7	0,23
2	24/02/2022	60	12,02	0,53
3	03/03/2022	35	7,71	0,39
4	10/03/2022	45	9,64	0,45
5	15/03/2022	75	20,39	0,48
6	17/03/2022	65	10,35	0,42
7	22/03/2022	75	15,14	0,36
8	24/03/2022	65	13,61	0,32
9	29/03/2022	74	11,11	0,37
10	12/04/2022	55	9,46	0,22
11	19/04/2022	45	21,5	0,46
12	26/04/2022	48	19,03	0,39
13	03/05/2022	84	21,39	0,48
14	10/05/2022	47	6,77	0,39
15	17/05/2022	50	11,44	0,34
16	26/05/2022	67	25	0,4
17	02/06/2022	105	21	0,43
18	07/06/2022	76	8,89	0,32
19	09/06/2022	85	10,05	0,48
20	14/06/2022	55	10,88	0,33
21	16/06/2022	40	17	0,37
22	21/06/2022	54	13,64	0,34
23	23/06/2022	67	11,4	0,35
24	28/06/2022	76	11,94	0,34
25	05/07/2022	56	7,22	0,36
26	07/07/2022	45	12,8	0,41
27	12/07/2022	55	12,5	0,38
28	14/07/2022	57	14,44	0,45
29	21/07/2022	85	17,92	0,47
30	26/07/2022	45	5,68	0,31
31	28/07/2022	56	16,11	0,48
32	04/08/2022	78	18,52	0,53
33	08/08/2022	107	17,39	0,47
34	16/08/2022	67	12,5	0,44
35	18/08/2022	54	8,34	0,35
36	23/08/2022	65	16,02	0,35
37	25/08/2022	123	23,24	0,48
38	30/08/2022	134	25,14	0,52
39	01/09/2022	120	26,11	0,59
40	06/09/2022	125	27,98	0,59



41	08/09/2022	100	25	0,59
42	13/09/2022	178	25,55	0,6
43	20/09/2022	134	27,36	0,57
44	23/09/2022	123	25,27	0,54
45	27/09/2022	133	28,06	0,58
46	29/09/2022	132	30,28	0,59
47	04/10/2022	100	23,13	0,57
48	18/10/2022	87	14,79	0,52
49	20/10/2022	56	19,8	0,52
50	27/10/2022	57	12,65	0,56
51	10/11/2022	45	17	0,57
52	17/11/2022	67	19,72	0,58
53	24/11/2022	85	8	0,59
54	08/12/2022	123	10,66	0,57
55	15/12/2022	76	18	0,53

Carga máxima por espera (Kg)

CME máxima	30,28
CME mínima	2,70
CME média	16,17

Razão de Carga (Kg/m³)

RC máxima	0,60
RC mínima	0,22
RC média	0,45





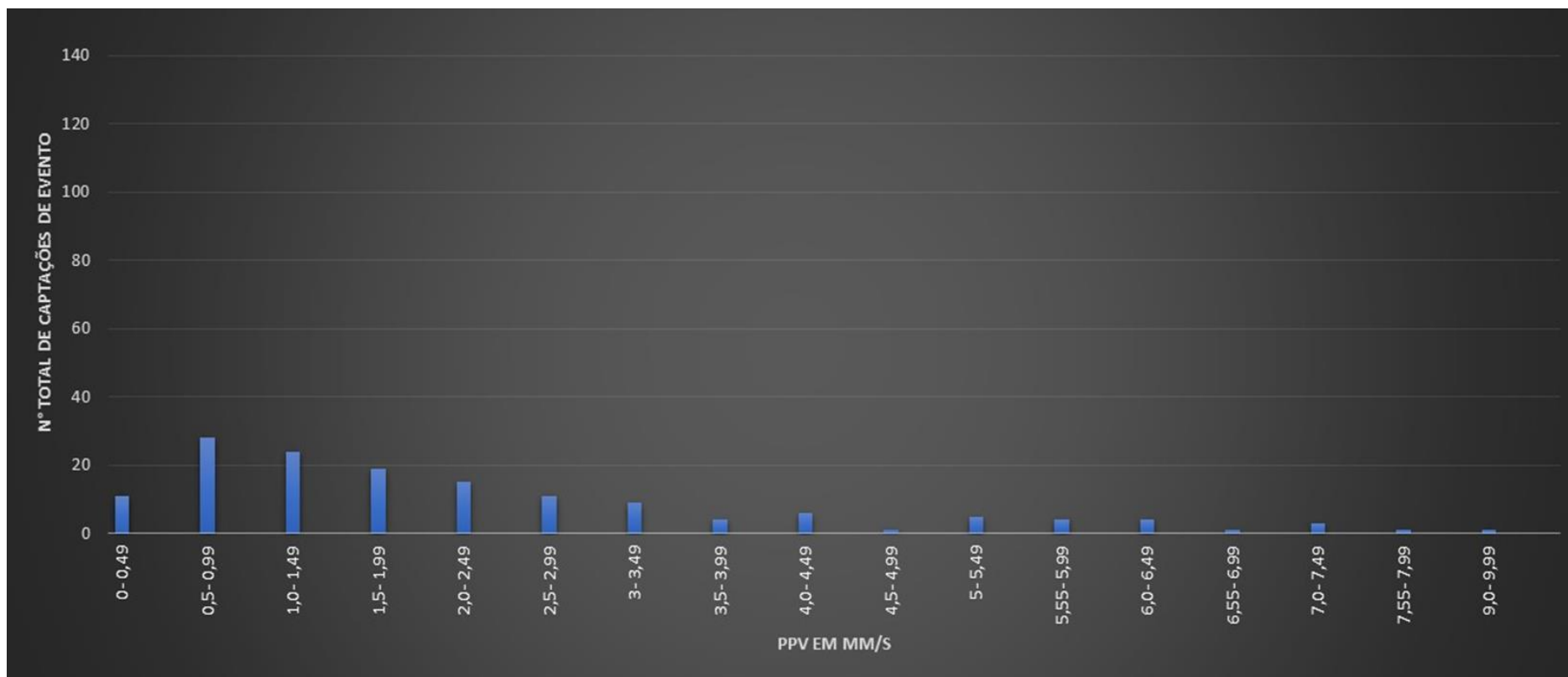
APÊNDICE B– Dados de pressão acústica, ppv e frequências resultantes- S1; S2 e S3.

Evento-01 - 22/02/2022				Evento-19 - 09/06/2022				Evento-37 - 25/08/2022			
Sismógrafo	Vel. Resultante (mm/s)	Frequência Resultante (Hz)	Pressão Acústica (dB)	Sismógrafo	Vel. Resultante (mm/s)	Frequência Resultante (Hz)	Pressão Acústica (dB)	Sismógrafo	Vel. Resultante (mm/s)	Frequência Resultante (Hz)	Pressão Acústica (dB)
S2	0,533	21,34	Não captou	S2	0,933	131,3	126,5	S2	0,582	2	122,8
				S3	3,384	28,56	120,3	S3	2,114	26,16	122,2
				S4	1,611	86,69	117,5	S4	2,355	22,25	125,4
Evento-02 - 24/02/2022				Evento-20 - 14/06/2022				Evento-38 - 30/08/2022			
Sismógrafo	Vel. Resultante (mm/s)	Frequência Resultante (Hz)	Pressão Acústica (dB)	Sismógrafo	Vel. Resultante (mm/s)	Frequência Resultante (Hz)	Pressão Acústica (dB)	Sismógrafo	Vel. Resultante (mm/s)	Frequência Resultante (Hz)	Pressão Acústica (dB)
S2	0,783	2	138,6	S2	1,085	128,1	107	S2	0,730	14,19	122,4
S3	0,402	2	123	S3	4,296	30,22	104,2	S3	5,039	70,16	119,3
				S4	2,543	22,06	109,9	S4	1,508	15,69	127,5
Evento-03 - 03/03/2022				Evento-21 - 16/06/2022				Evento-39 - 01/09/2022			
Sismógrafo	Vel. Resultante (mm/s)	Frequência Resultante (Hz)	Pressão Acústica (dB)	Sismógrafo	Vel. Resultante (mm/s)	Frequência Resultante (Hz)	Pressão Acústica (dB)	Sismógrafo	Vel. Resultante (mm/s)	Frequência Resultante (Hz)	Pressão Acústica (dB)
S3	1,205	15,25	117,2	S2	0,833	2	133,8	S2	2,495	149,4	127,6
S4	1,178	12,94	121,5	S3	2,174	42,47	109,2	S3	7,419	28,69	130,4
				S4	1,442	20,28	115,2	S4	4,946	21,88	132,6
Evento-04 - 10/03/2022				Evento-22 - 21/06/2022				Evento-40 - 06/09/2022			
Sismógrafo	Vel. Resultante (mm/s)	Frequência Resultante (Hz)	Pressão Acústica (dB)	Sismógrafo	Vel. Resultante (mm/s)	Frequência Resultante (Hz)	Pressão Acústica (dB)	Sismógrafo	Vel. Resultante (mm/s)	Frequência Resultante (Hz)	Pressão Acústica (dB)
S2	0,783	123,3	131,7	S2	3,051	134	95,9	S2	1,631	120,7	126,2
S3	2,169	39,47	122,4	S3	3,994	28,34	129,7	S3	5,677	29	123,7
S4	1,778	21,34	132,7	S4	1,959	21,97	139,1	S4	5,096	21,03	125,7
Evento-05 - 15/03/2022				Evento-23 - 23/06/2022				Evento-41 - 08/09/2022			
Sismógrafo	Vel. Resultante (mm/s)	Frequência Resultante (Hz)	Pressão Acústica (dB)	Sismógrafo	Vel. Resultante (mm/s)	Frequência Resultante (Hz)	Pressão Acústica (dB)	Sismógrafo	Vel. Resultante (mm/s)	Frequência Resultante (Hz)	Pressão Acústica (dB)
S9	9,559	30,44	138,8	S2	0,524	2	104,2	S2	1,992	15,03	112,3
				S3	2,290	30,97	106	S3	1,787	15,28	116,4
				S4	1,032	18,81	112,8	S4			
Evento-06 - 17/03/2022				Evento-24 - 28/06/2022				Evento-42 - 13/09/2022			
Sismógrafo	Vel. Resultante (mm/s)	Frequência Resultante (Hz)	Pressão Acústica (dB)	Sismógrafo	Vel. Resultante (mm/s)	Frequência Resultante (Hz)	Pressão Acústica (dB)	Sismógrafo	Vel. Resultante (mm/s)	Frequência Resultante (Hz)	Pressão Acústica (dB)
S8	0,402	2,25	130,6	S2	0,959	186,3	135,8	S2	1,769	114,7	127,9
S10	0,421	7,563	126,7	S3	4,269	31,19	127,6	S3	6,171	22,59	120
				S4	3,077	14,59	131,4	S4	5,011	81	125,6
Evento-07 - 22/03/2022				Evento-25 - 05/07/2022				Evento-43 - 20/09/2022			
Sismógrafo	Vel. Resultante (mm/s)	Frequência Resultante (Hz)	Pressão Acústica (dB)	Sismógrafo	Vel. Resultante (mm/s)	Frequência Resultante (Hz)	Pressão Acústica (dB)	Sismógrafo	Vel. Resultante (mm/s)	Frequência Resultante (Hz)	Pressão Acústica (dB)
S5	0,582	12,50	122,4	S2	1,836	37,34	128	S2	3,043	10,5	130,7
S8	0,524	2,00	125,9	S3	1,535	23,59	134,2	S3	6,769	28,28	123,9
Evento-08 - 24/03/2022				Evento-26 - 07/07/2022				Evento-44 - 23/09/2022			
Sismógrafo	Vel. Resultante (mm/s)	Frequência Resultante (Hz)	Pressão Acústica (dB)	Sismógrafo	Vel. Resultante (mm/s)	Frequência Resultante (Hz)	Pressão Acústica (dB)	Sismógrafo	Vel. Resultante (mm/s)	Frequência Resultante (Hz)	Pressão Acústica (dB)
Não houve registro do evento	Não houve registro	Não houve registro	Não houve registro	S2	0,762	205,1	116,7	S2	1,122	168,2	129,1
				S3	2,820	30,84	115,9	S3	3,823	37,56	125,6
				S4	2,603	97,91	117,1	S4	3,391	12,84	131,7
Evento-09 - 29/03/2022				Evento-27 - 12/07/2022				Evento-45 - 27/09/2022			
Sismógrafo	Vel. Resultante (mm/s)	Frequência Resultante (Hz)	Pressão Acústica (dB)	Sismógrafo	Vel. Resultante (mm/s)	Frequência Resultante (Hz)	Pressão Acústica (dB)	Sismógrafo	Vel. Resultante (mm/s)	Frequência Resultante (Hz)	Pressão Acústica (dB)
S2	0,359	2,00	131,2	S2	2,618	85,59	133,5	S2	1,486	97,72	119,8
S3	0,880	14,28	127	S3	5,039	19,41	132,9	S3	7,520	31,69	116,7
S4	1,988	17,03	138	S4	2,088	2	136,8				
Evento-10 - 12/04/2022				Evento-28 - 14/07/2022				Evento-46 - 29/09/2022			
Sismógrafo	Vel. Resultante (mm/s)	Frequência Resultante (Hz)	Pressão Acústica (dB)	Sismógrafo	Vel. Resultante (mm/s)	Frequência Resultante (Hz)	Pressão Acústica (dB)	Sismógrafo	Vel. Resultante (mm/s)	Frequência Resultante (Hz)	Pressão Acústica (dB)
S3	1,114	18,91	119,9	S2	1,704	31,47	110,2	S2	0,852	19,53	114,6
S4	0,950	13,28	118,1	S3	5,953	31,59	112,8	S3	4,364	30,78	113,5
				S4	3,019	18,91	115				
Evento-11 - 19/04/2022				Evento-29 - 21/07/2022				Evento-47 - 04/10/2022			
Sismógrafo	Vel. Resultante (mm/s)	Frequência Resultante (Hz)	Pressão Acústica (dB)	Sismógrafo	Vel. Resultante (mm/s)	Frequência Resultante (Hz)	Pressão Acústica (dB)	Sismógrafo	Vel. Resultante (mm/s)	Frequência Resultante (Hz)	Pressão Acústica (dB)
S2	1,055	193,4	133,8	S3	7,104	28,59	110,2	S2	0,992	10,98	115
S3	2,718	31,38	128,2	S4	3,132	17,84	113,5	S3	4,042	13,28	119
S4	2,543	21,56	132,8								
S5	0,73	2,00	Não captou								
Evento-12 - 26/04/2022				Evento-30 - 26/07/2022				Evento-48 - 18/10/2022			
Sismógrafo	Vel. Resultante (mm/s)	Frequência Resultante (Hz)	Pressão Acústica (dB)	Sismógrafo	Vel. Resultante (mm/s)	Frequência Resultante (Hz)	Pressão Acústica (dB)	Sismógrafo	Vel. Resultante (mm/s)	Frequência Resultante (Hz)	Pressão Acústica (dB)
S2	0,220	2,00	126,7	S2	0,648	129,5	123	S2	0,582	2	131,3
S3	1,251	15,53	123,4	S3	4,072	36,72	123,9	S3	2,845	30,72	127,5
S4	0,976	17,94	123,2	S4	1,981	21,75	133,2	S4	2,682	21,13	130,8
				S5	0,458	4	130,2				
Evento-13 - 03/05/2022				Evento-31 - 28/07/2022				Evento-49 - 20/10/2022			
Sismógrafo	Vel. Resultante (mm/s)	Frequência Resultante (Hz)	Pressão Acústica (dB)	Sismógrafo	Vel. Resultante (mm/s)	Frequência Resultante (Hz)	Pressão Acústica (dB)	Sismógrafo	Vel. Resultante (mm/s)	Frequência Resultante (Hz)	Pressão Acústica (dB)
S2	1,150	17,31	105,5	S2	1,205	153,5	106	S2	0,813	2	120,9
S3	2,689	38,38	104,2	S3	5,778	2	106	S3	6,441	29,25	116,3
S4	1,35	14,94	108	S4	2,788	21,78	109,9	S4	2,304	24,31	123,9
Evento-14 - 10/05/2022				Evento-32 - 04/08/2022				Evento-50 - 27/10/2022			
Sismógrafo	Vel. Resultante (mm/s)	Frequência Resultante (Hz)	Pressão Acústica (dB)	Sismógrafo	Vel. Resultante (mm/s)	Frequência Resultante (Hz)	Pressão Acústica (dB)	Sismógrafo	Vel. Resultante (mm/s)	Frequência Resultante (Hz)	Pressão Acústica (dB)
S3	3,476	40,13	124,3	S2	1,205	2,03	126,5	S3	1,636	43,56	118,1
S4	1,470	15,72	133,4	S3	4,252	77,38	127,6				
				S4	2,443	26,63	128,9				
				S5	0,402	4	130				
Evento-15 - 17/05/2022				Evento-33 - 08/08/2022				Evento-51 - 10/11/2022			
Sismógrafo	Vel. Resultante (mm/s)	Frequência Resultante (Hz)	Pressão Acústica (dB)	Sismógrafo	Vel. Resultante (mm/s)	Frequência Resultante (Hz)	Pressão Acústica (dB)	Sismógrafo	Vel. Resultante (mm/s)	Frequência Resultante (Hz)	Pressão Acústica (dB)
S2	0,861	10,34	117,4	S2	0,898	33,31	122,4	S2	1,063	145,3	121,5
S3	2,338	28,59	110,9	S3	6,087	41,56	119,9	S3	5,221	100,4	119,7
S4	1,205	11,88	117,2	S4	2,403	86,13	126	S4	2,823	133,7	126,6
Evento-16 - 26/05/2022				Evento-34 - 16/08/2022				Evento-52 - 17/11/2022			
Sismógrafo	Vel. Resultante (mm/s)	Frequência Resultante (Hz)	Pressão Acústica (dB)	Sismógrafo	Vel. Resultante (mm/s)	Frequência Resultante (Hz)	Pressão Acústica (dB)	Sismógrafo	Vel. Resultante (mm/s)	Frequência Resultante (Hz)	Pressão Acústica (dB)
S2	0,648	2,00	117,6	S2	0,648	75,03	114,8	S2	0,539	2	128,4
S3	1,704	15,31	114	S3	2,071	35,91	118,5	S3	3,685	37,84	124,7
S4	1,368	15,16	118,1	S4	1,143	27,06	120,7	S4	1,943	71,34	131,7
Evento-17 - 02/06/2022				Evento-35 - 18/08/2022				Evento-53 - 24/11/2022			
Sismógrafo	Vel. Resultante (mm/s)	Frequência Resultante (Hz)	Pressão Acústica (dB)	Sismógrafo	Vel. Resultante (mm/s)	Frequência Resultante (Hz)	Pressão Acústica (dB)	Sismógrafo	Vel. Resultante (mm/s)	Frequência Resultante (Hz)	Pressão Acústica (dB)
S3	2,004	30,63	114,2	S2	0,582	2	117,5	S2	0,813	50,69	128,9
S4	1,024	22,72	125,8	S3	2,400	30,53	117,2	S3	3,304	46,66	130
				S4	1,699	23,66	121,1	S4	2,170	22,03	135,6
				S5	0,180	2,063	126	S5	0,783	3,875	127,4
Evento-18 - 07/06/2022				Evento-36 - 23/08/2022				Evento-54 - 08/12/2022			
Sismógrafo	Vel. Resultante (mm/s)	Frequência Resultante (Hz)	Pressão Acústica (dB)	Sismógrafo	Vel. Resultante (mm/s)	Frequência Resultante (Hz)	Pressão Acústica (dB)	Sismógrafo	Vel. Resultante (mm/s)	Frequência Resultante (Hz)	Pressão Acústica (dB)
S2	1,257	95,28	122,5	S2	1,769	20,5	125,5	S2	1,205	2	137,5
S3	3,996	49,84	124	S3	6,378	36,25	117,6	S3	7,399	30,31	135,2
S4	2,004	69,94	125,2	S4	6,991	20,38	124,7	S4	5,654	20,03	140,1
				S5	0,311	5,219	127,7				
Evento-19 - 07/06/2022				Evento-37 - 23/08/2022				Evento-55 - 15/12/2022			
Sismógrafo	Vel. Resultante (mm/s)	Frequência Resultante (Hz)	Pressão Acústica (dB)	Sismógrafo	Vel. Resultante (mm/s)	Frequência Resultante (Hz)	Pressão Acústica (dB)	Sismógrafo	Vel. Resultante (mm/s)	Frequência Resultante (Hz)	Pressão Acústica (dB)
S2	1,257	95,28	122,5	S2	1,769	20,5	125,5	S2	0,220	2	140,1
S3	3,996	49,84	124	S3	6,378	36,25	117,6	S3	1,295	2	136,7
S4	2,004	69,94	125,2	S4	6,991	20,38	124,7	S4	1,055	16,97	138,3
				S5	0,311	5,219	127,7				



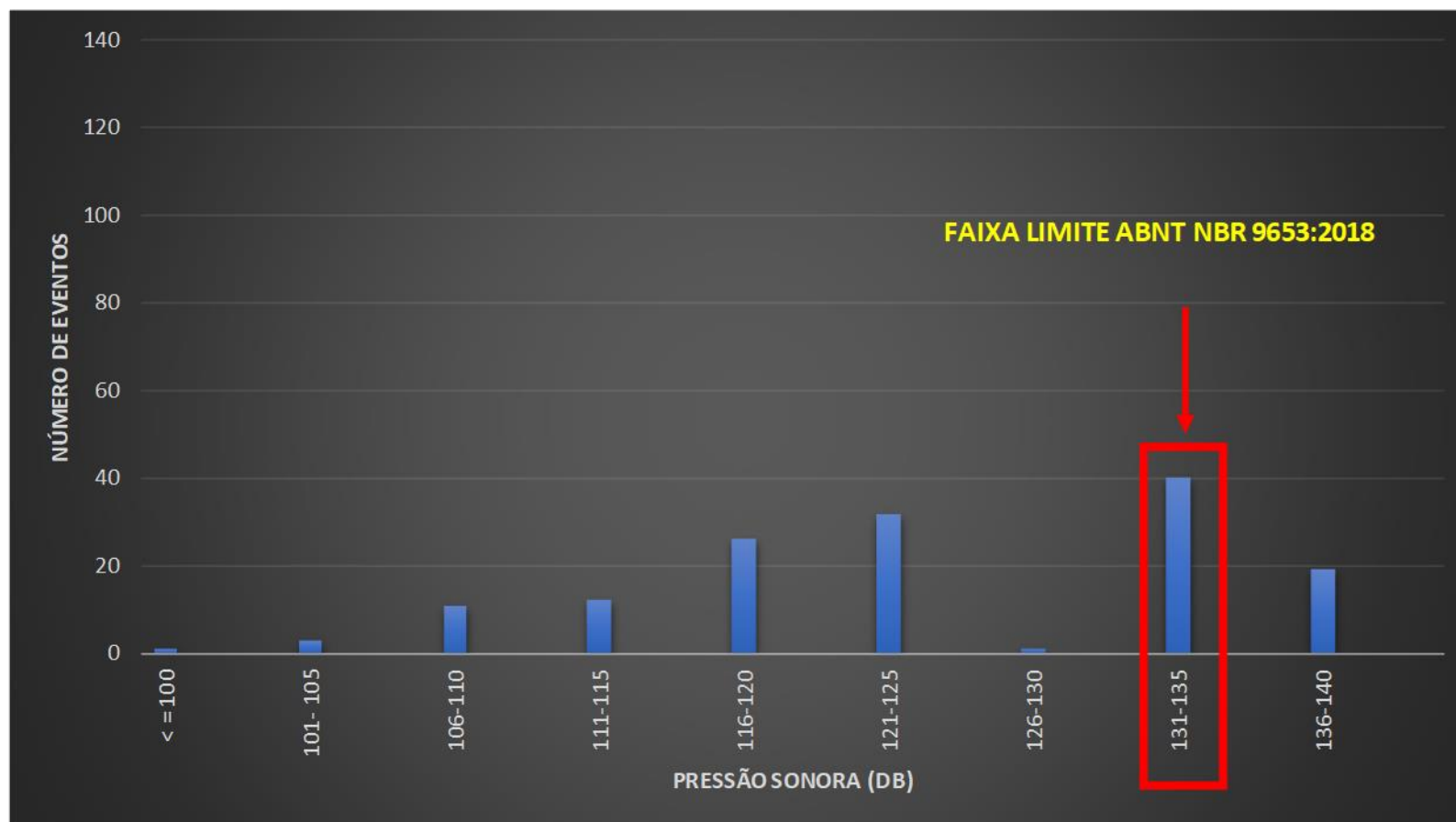


APÊNDICE C– Gráfico número de eventos x velocidades resultantes deslocamento de partícula (ppv)



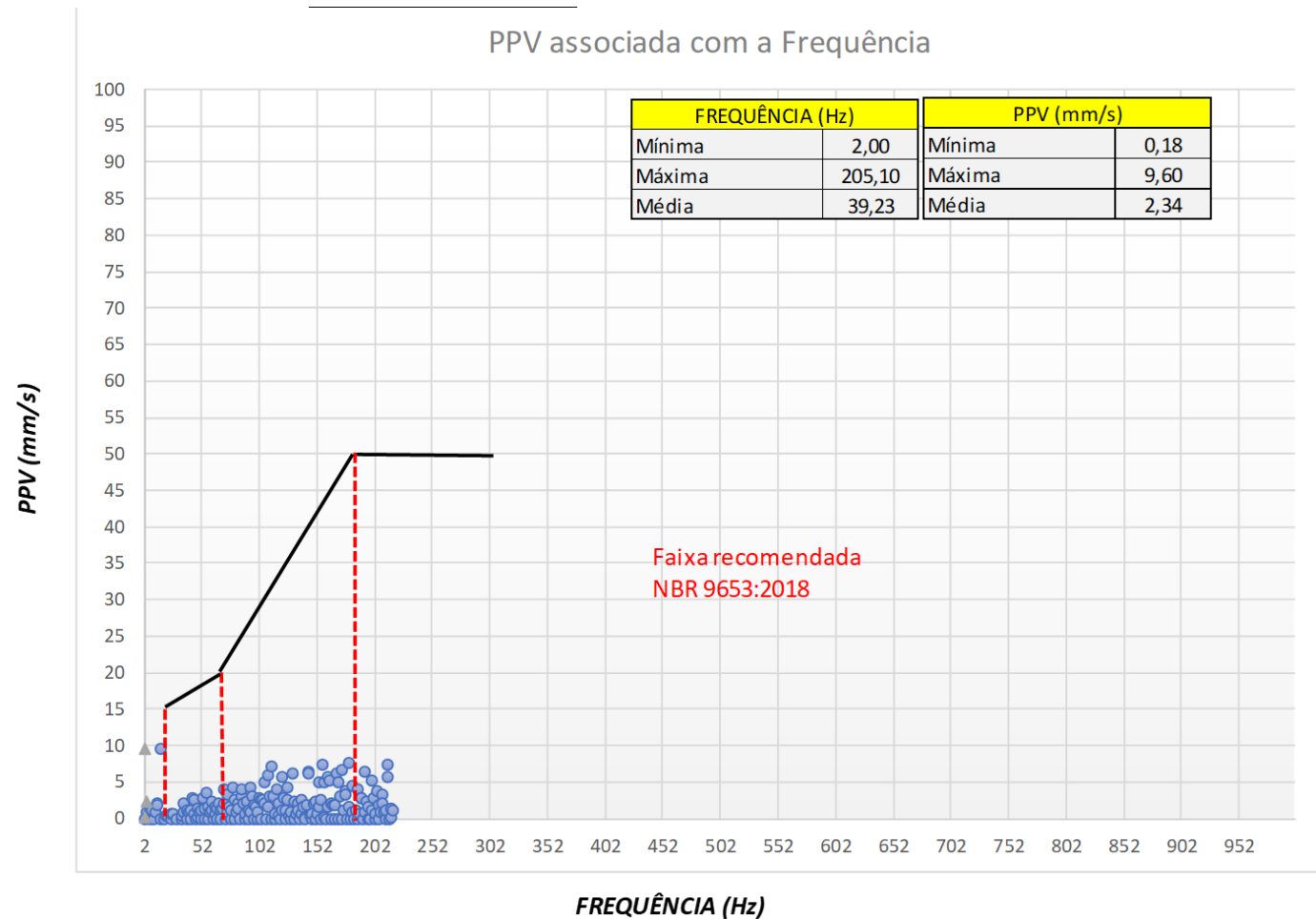


APÊNDICE D– Gráfico número de eventos x níveis de pressão acústica registrados





APÊNDICE E– Gráfico PPV associada com a frequência (resultantes)





APÊNDICE F– Gráfico de acompanhamento marcos superficiais área de ampliação- mais próximo epicentro das detonações

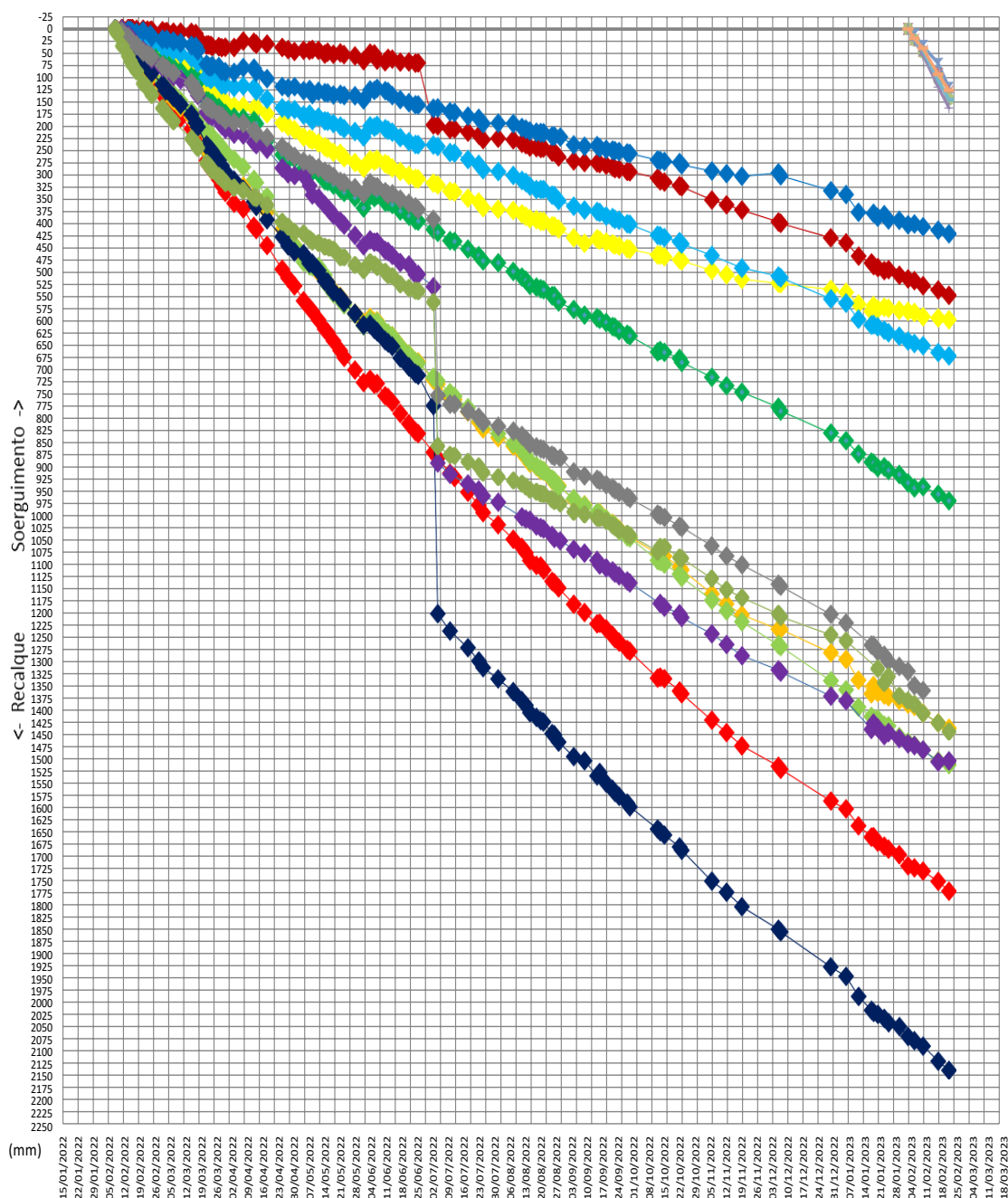
Diagrama Tempo x Recalque

ATERRO SANITÁRIO

MARCOS SUPERFICIAIS

AMPLIAÇÃO 1

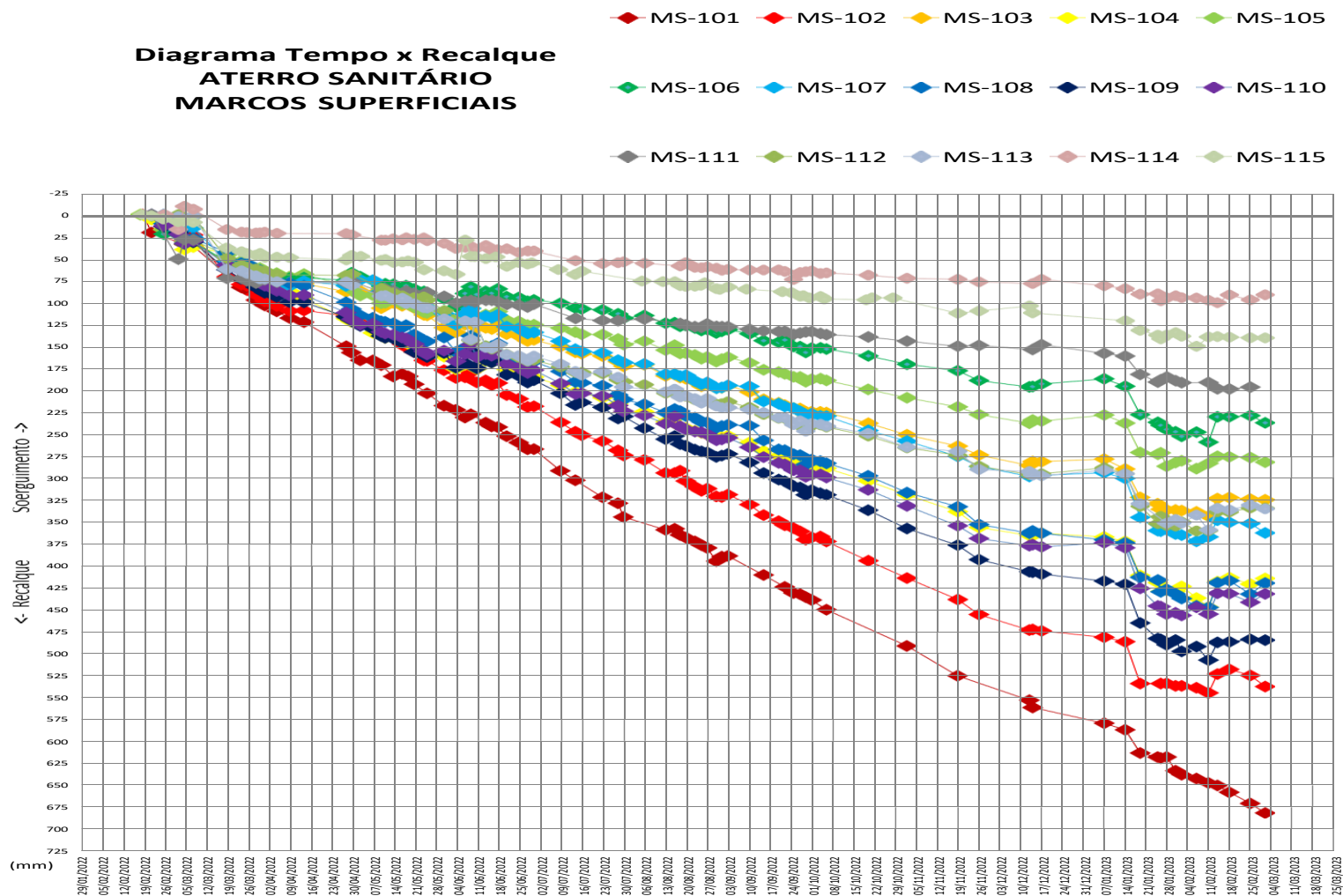
- MSA1-01
- MSA1-02
- MSA1-03
- MSA1-04
- MSA1-05
- MSA1-06
- MSA1-07
- MSA1-08
- MSA1-09
- MSA1-10
- MSA1-11
- MSA1-12
- MSA1-13
- MSA1-14
- MSA1-15
- MSA1-16
- MSA1-17
- MSA1-18





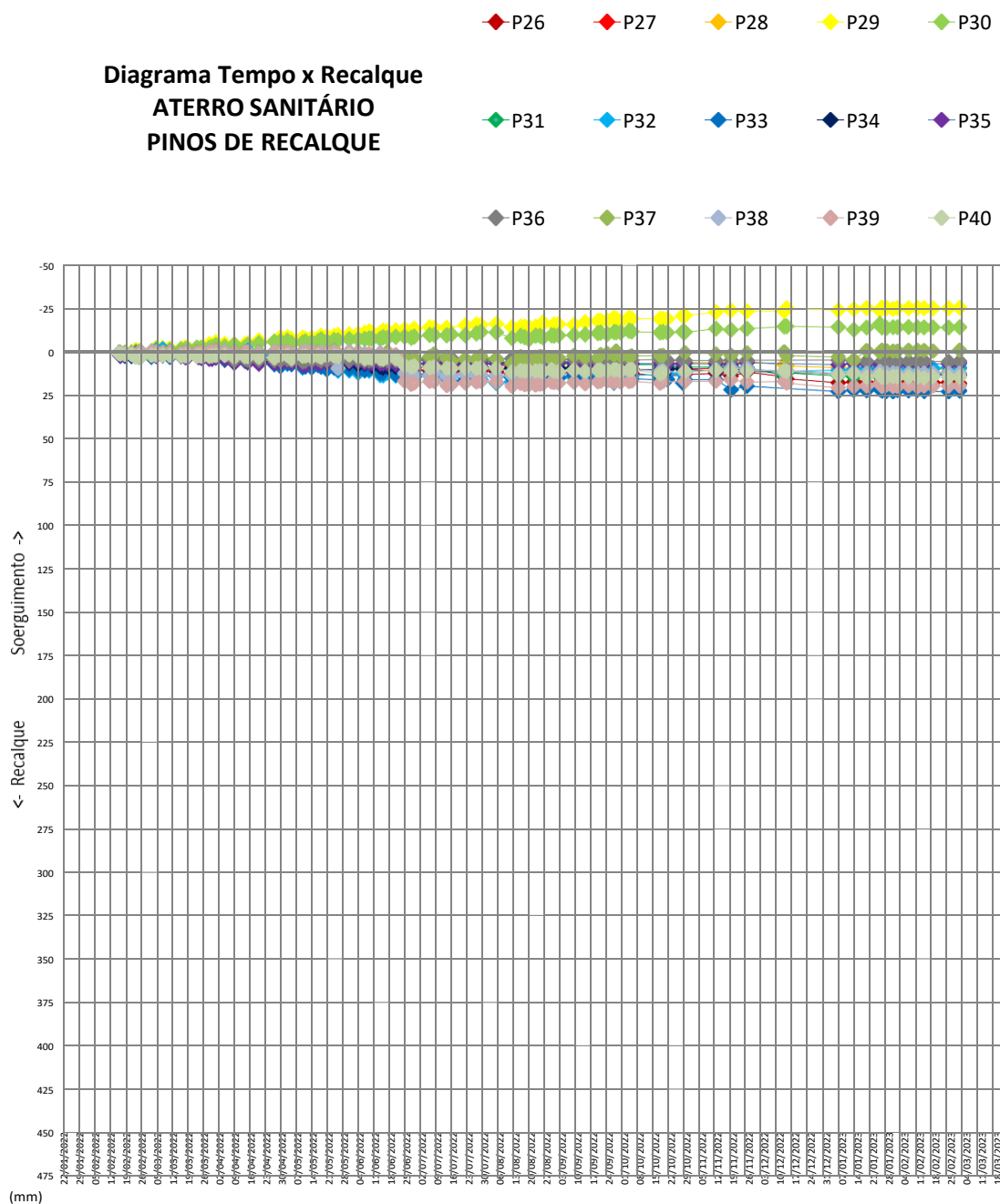
APÊNDICE G – Marcos superficiais RSU já depositados (deposição encerrada)

Diagrama Tempo x Recalque
ATERRO SANITÁRIO
MARCOS SUPERFICIAIS





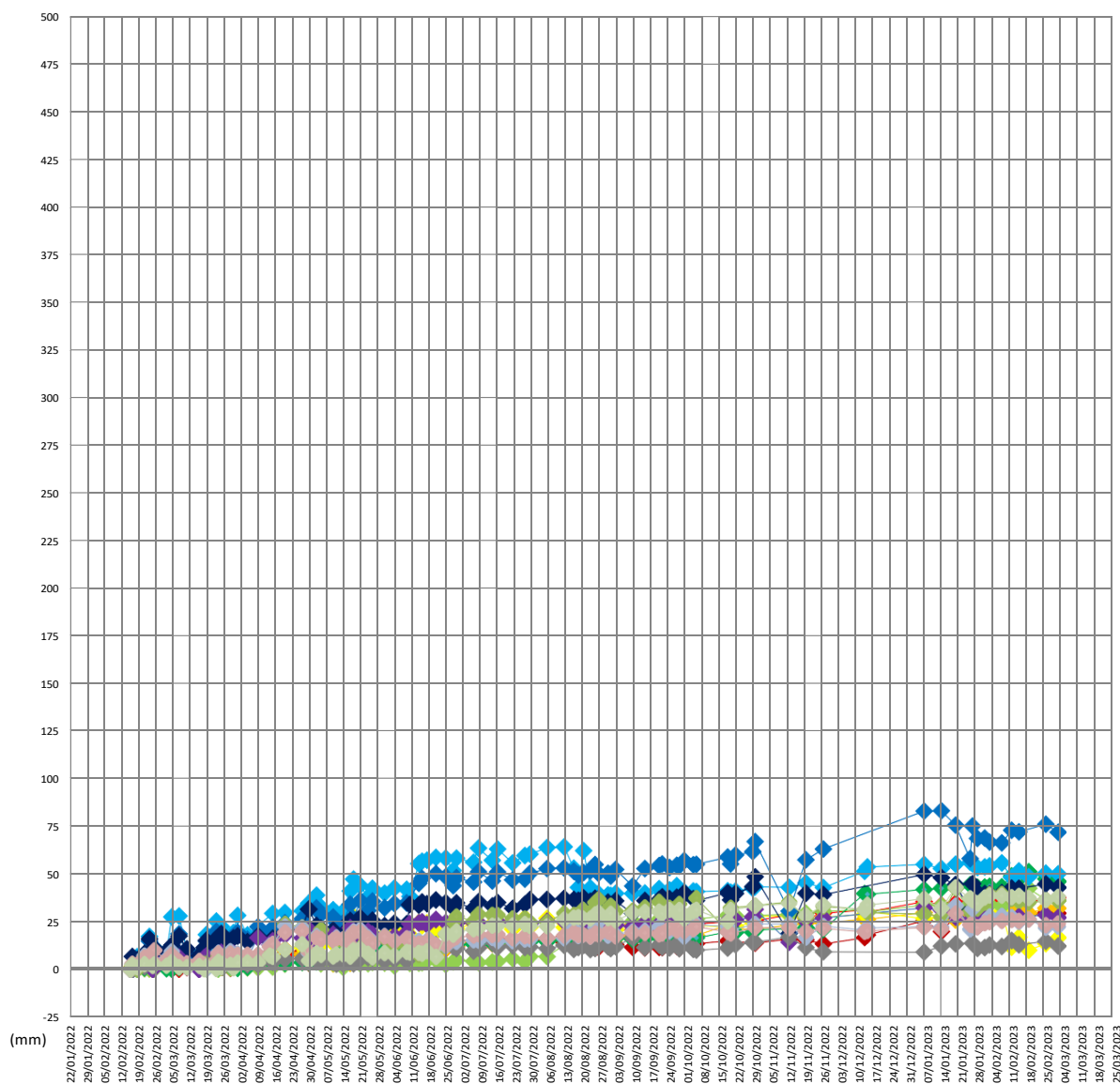
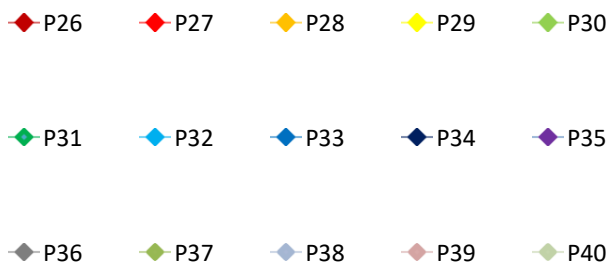
APÊNDICE H– Pinos de recalque – área operações encerradas (célula velha)





APÊNDICE I- Pinos recalque área em expansão- célula nova

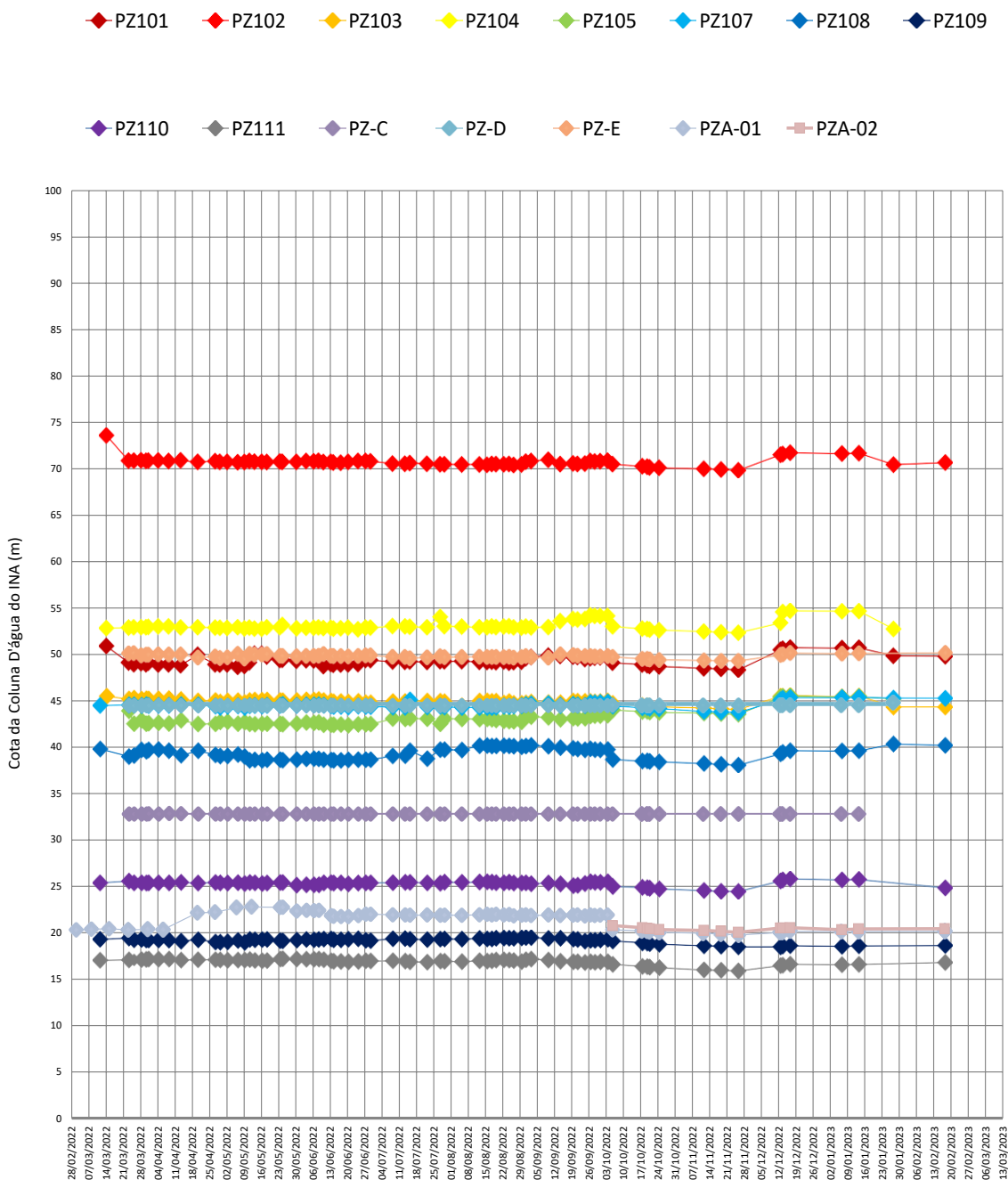
Diagrama Tempo x Recalque ATERRO SANITÁRIO PINOS DE RECALQUE





APÊNDICE J- Monitoramento das poropressões (piezômetros)

Diagrama Tempo x Cota Coluna D'água
ATERRO SANITÁRIO





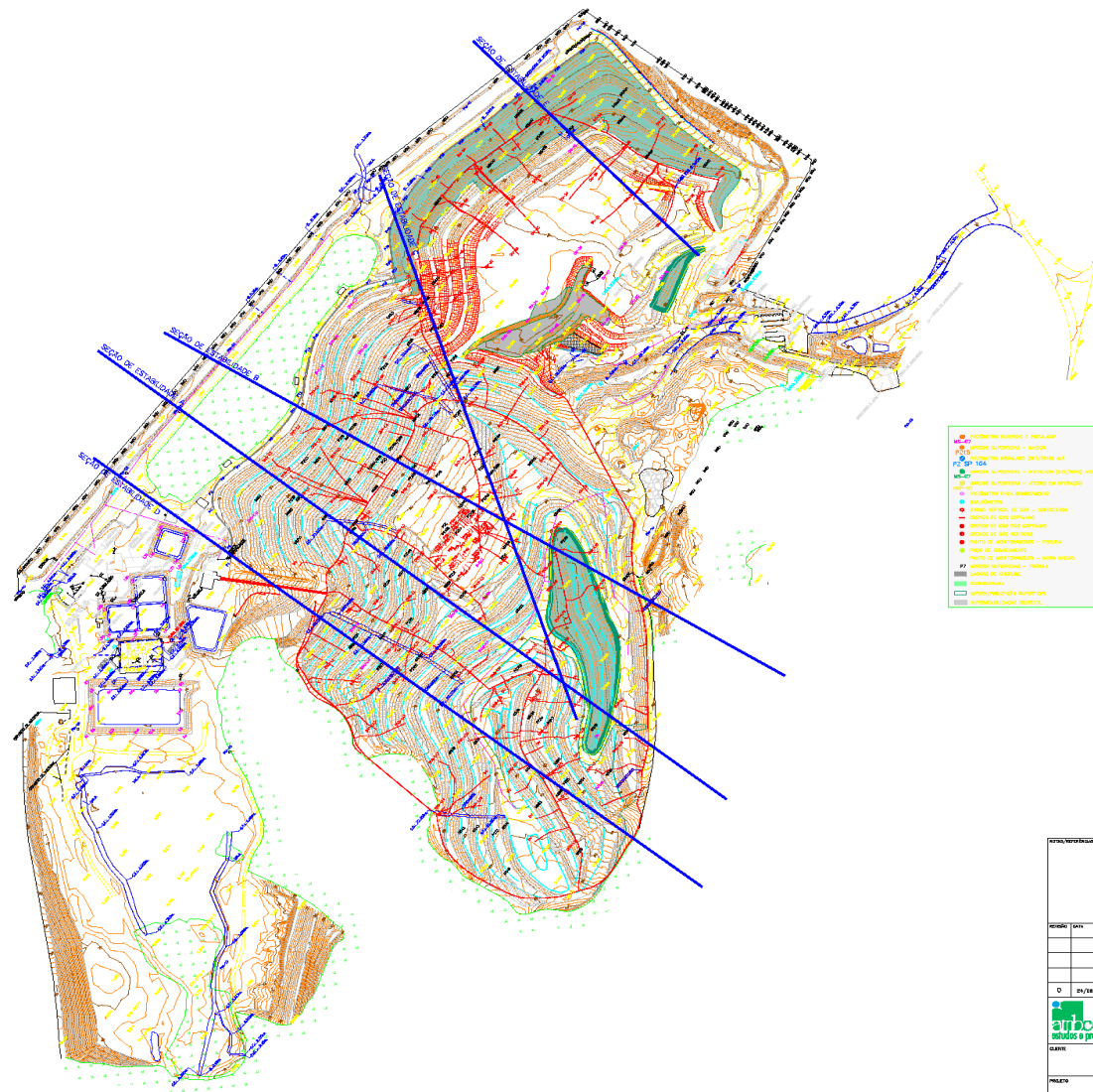
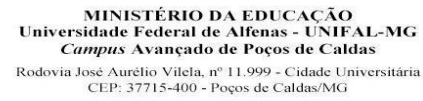
ANEXOS





ANEXO 1– Seções para avaliação de estabilidade



[illegible]

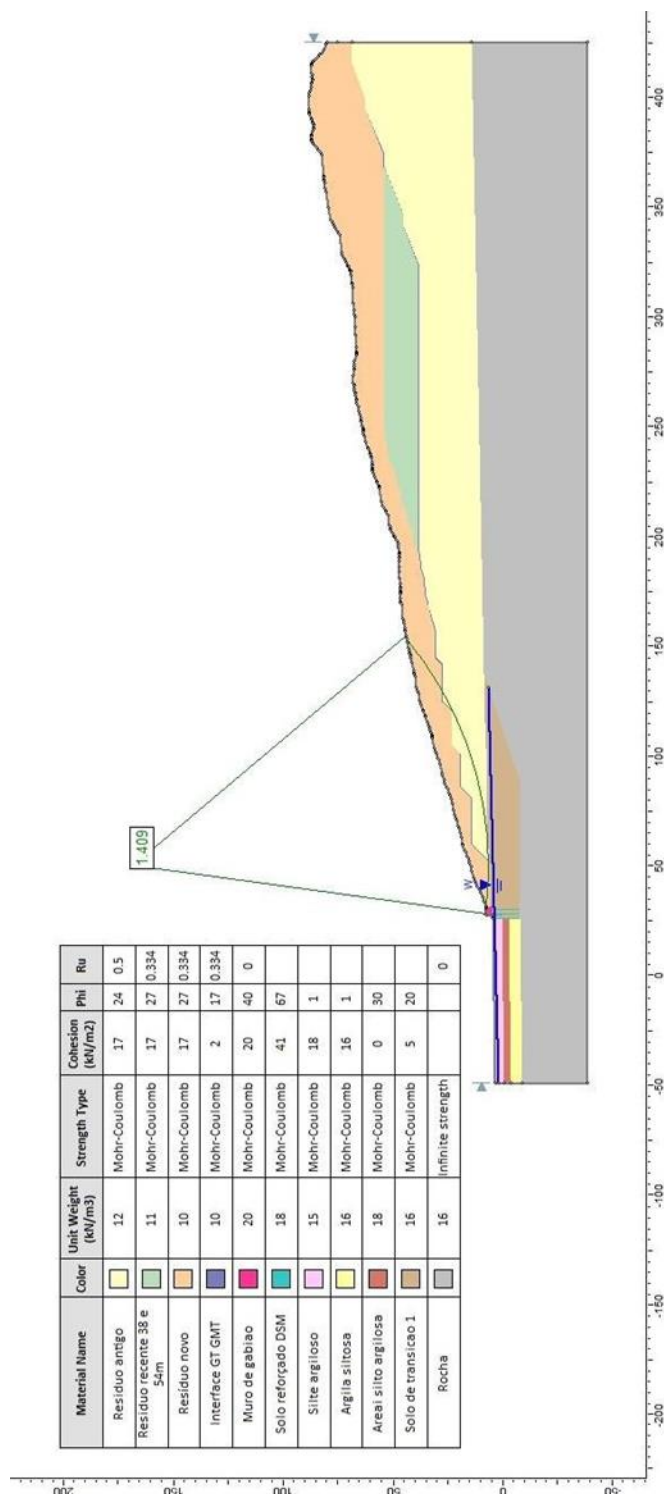


ANEXO 2—Resultados das análises de estabilidade



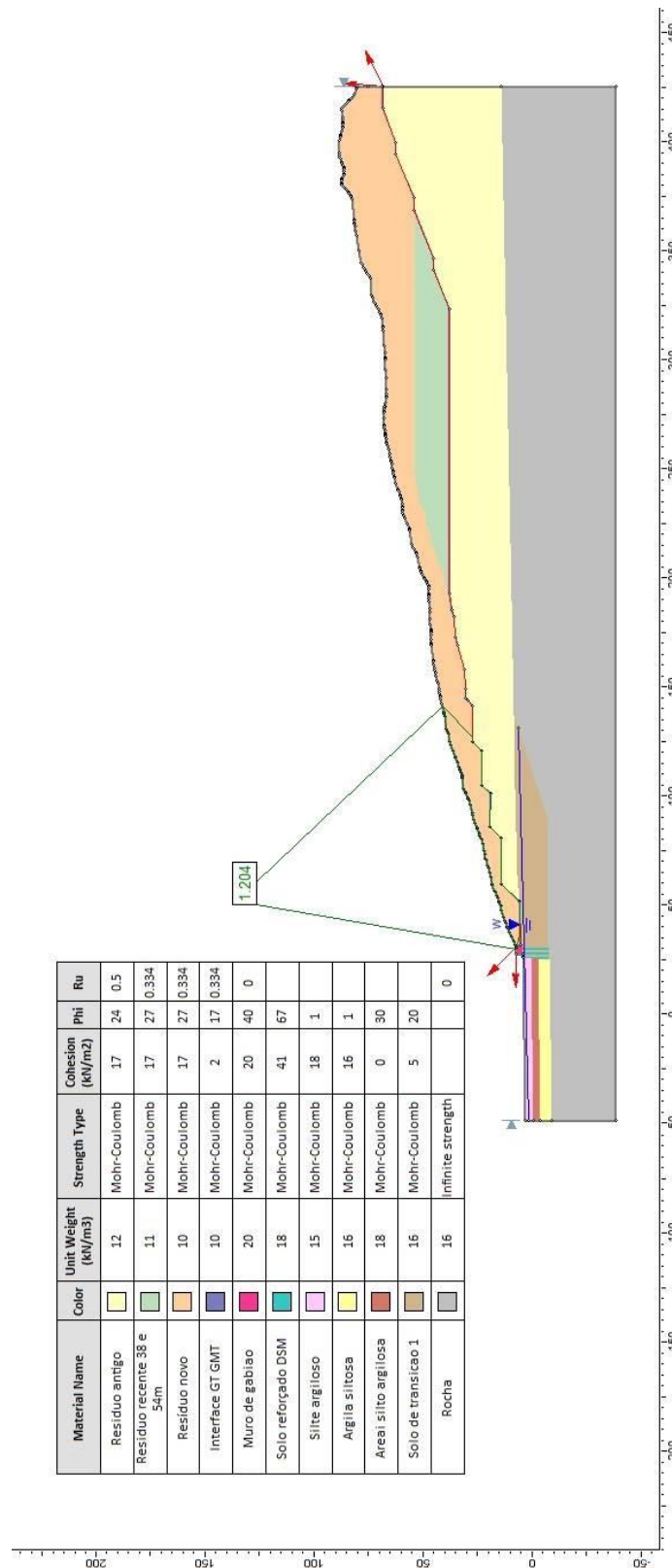


Seção A –Circular



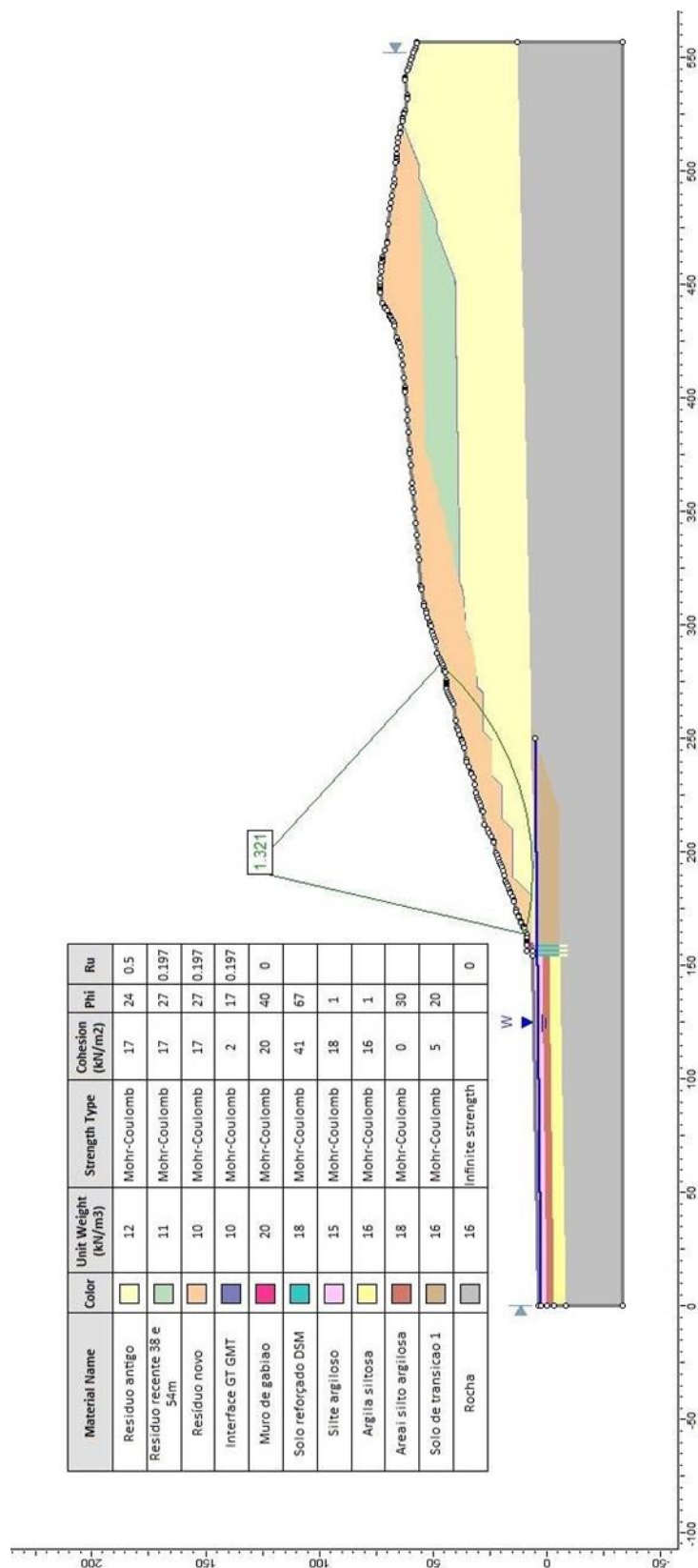


Seção A –Não Circular (Contato)



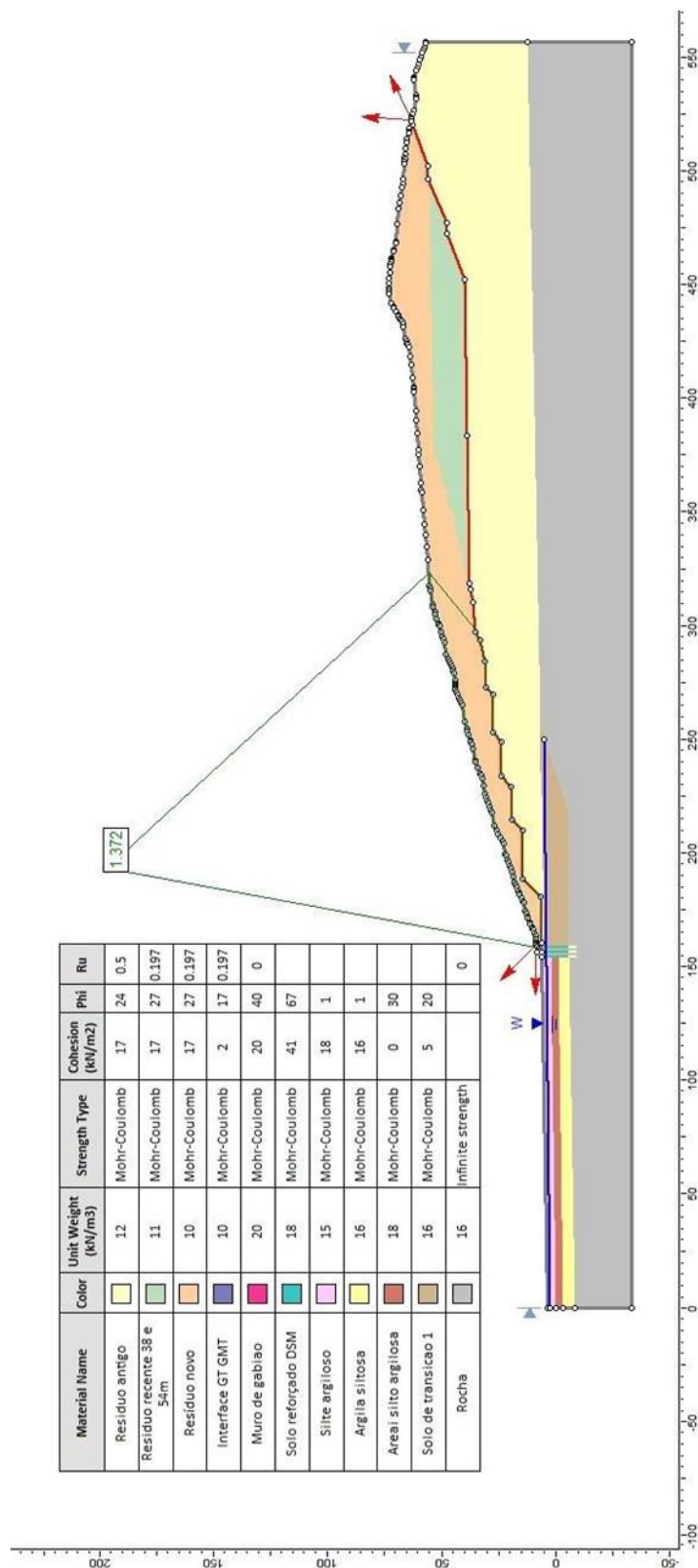


Seção B-Circular



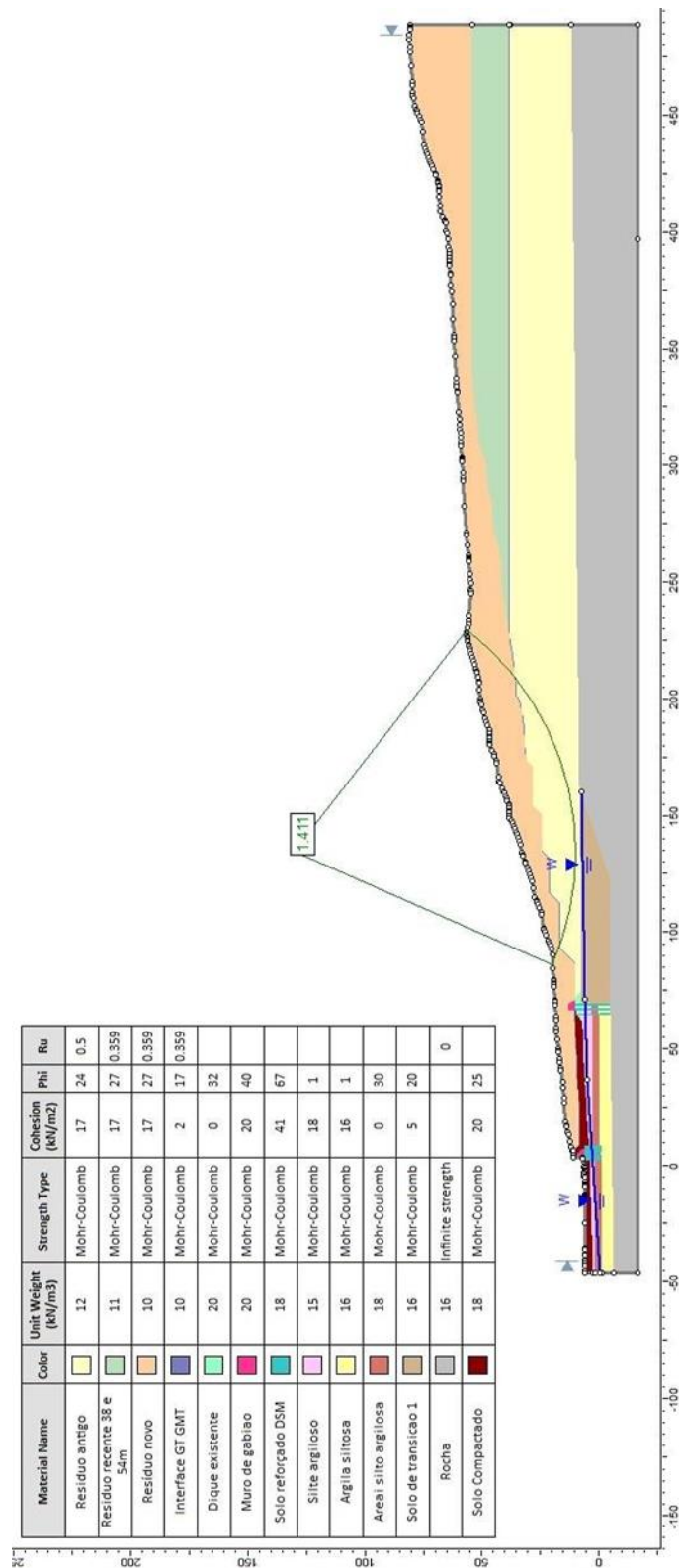


Seção B-Não Circular (Contato)



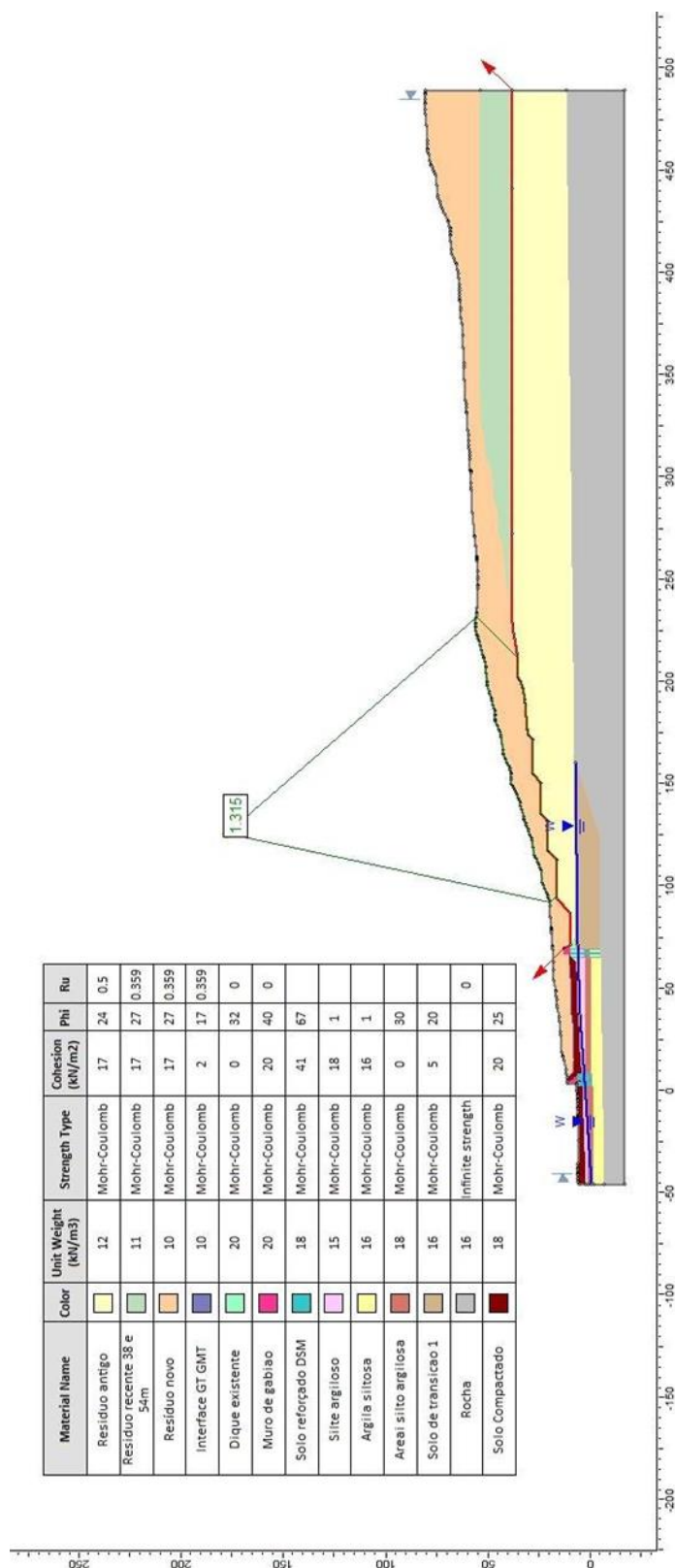


Seção C-Circular



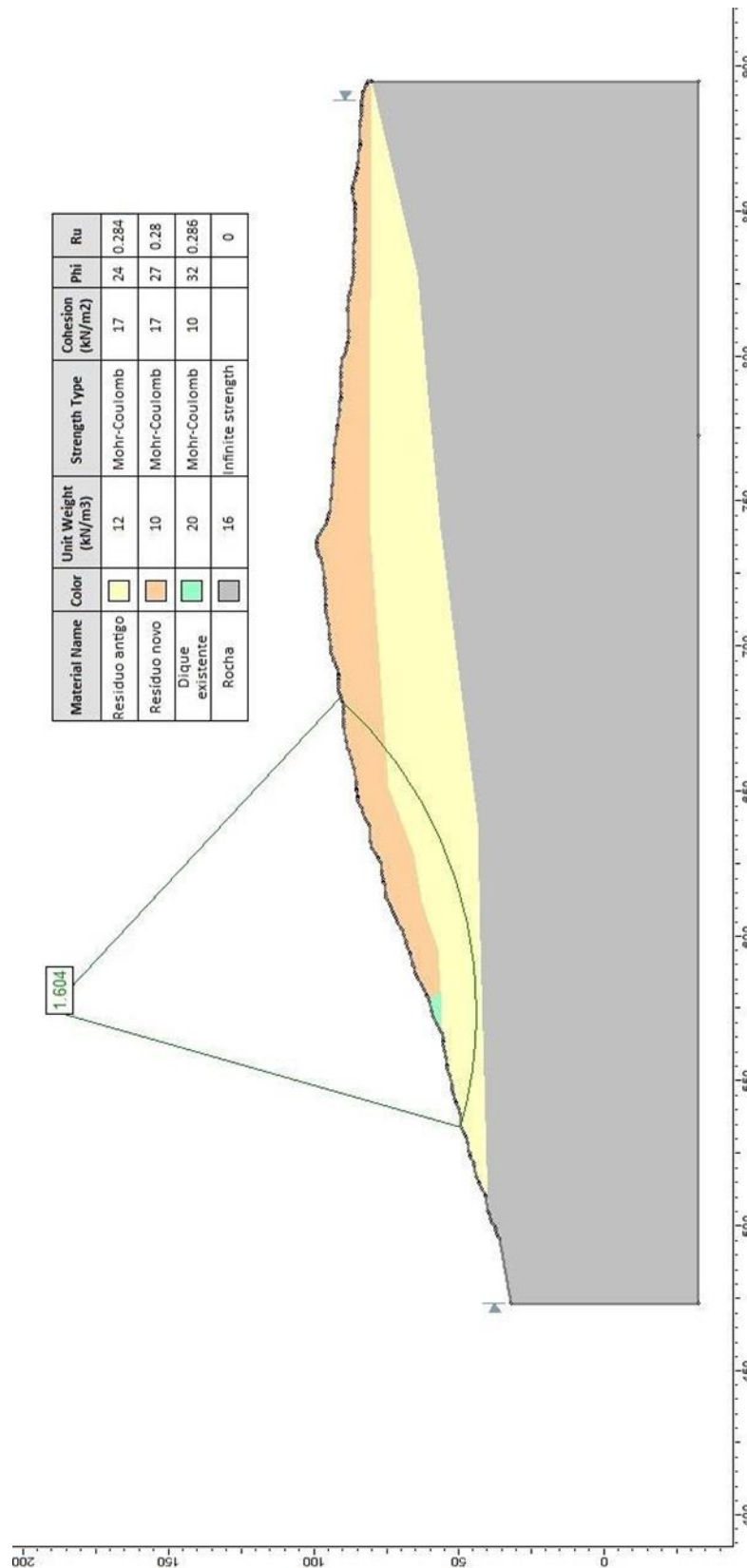


Seção C–Não Circular (Contato)



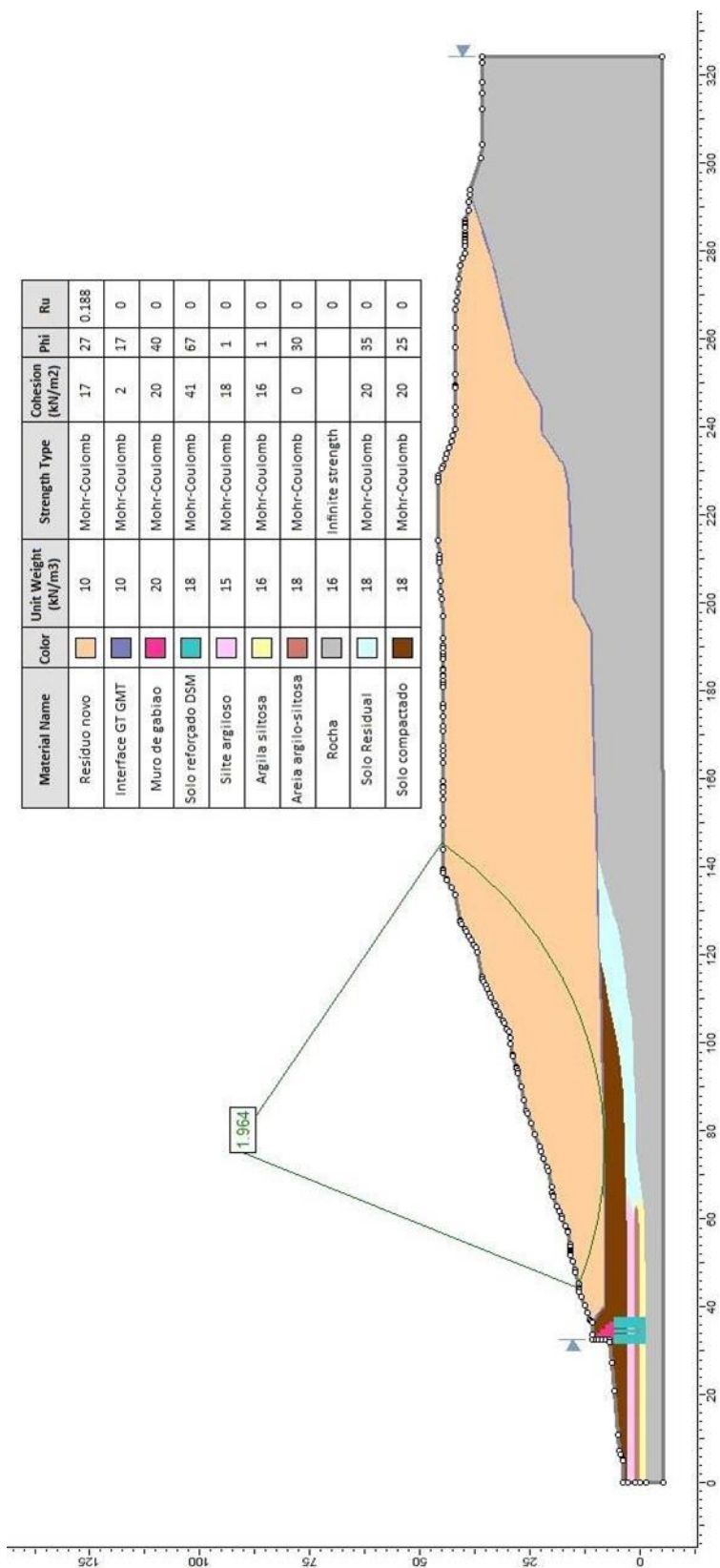


Seção D-Circular



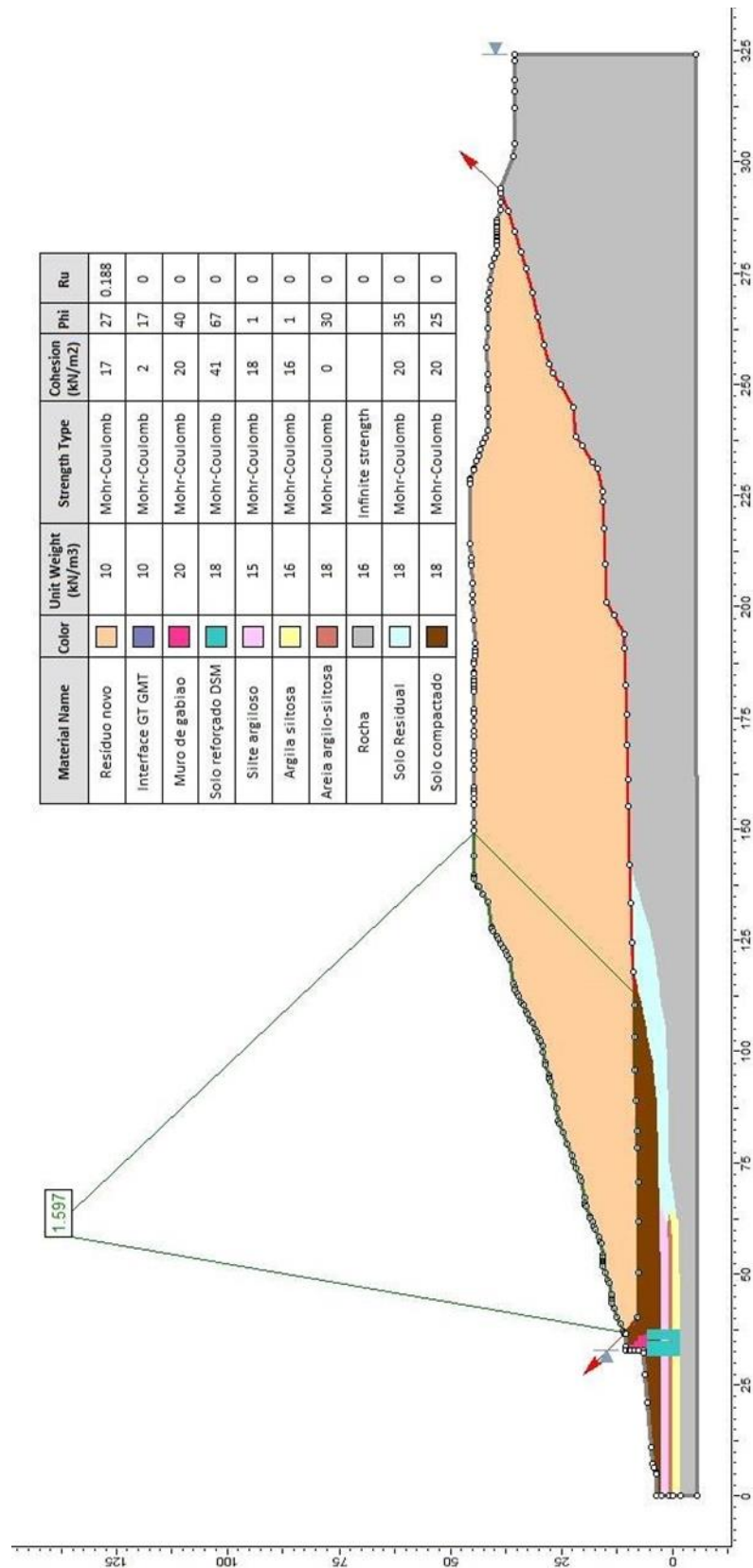


Seção E – Circular





Seção E- Não Circular (Contato)





ANEXO – Resultado das análises de estabilidade (valores médios mensais)

Seção	Situação	Resíduo Aterro Novo	Resíduo Aterro Antigo	Fator de Segurança (FS)	Superfície Crítica
A	Encerrado - Julho/2022	0,334	0,5	1,409	Resíduo
	Encerrado - Julho/2022	0,334	0,5	1,205	Contato GT/GMB
B	Encerrado - Julho/2022	0,197	0,5	1,321	Resíduo
	Encerrado - Julho/2022	0,197	0,5	1,383	Contato GT/GMB
C	Encerrado - Julho/2022	0,359	0,5	1,407	Resíduo
	Encerrado - Julho/2022	0,359	0,5	1,314	Contato GT/GMB
D	Encerrado - Julho/2022	0,280	0,280	1,604	Resíduo



ANEXO – Resultado das análises de estabilidade– valor médio – aterro em operação

Seção	Situação	Análise	rU Resíduo Aterro Novo	Fator de Segurança (FS)	Superfície Crítica
E	Em operação desde Setembro/2019	Circular	0.188	1.963	Resíduo
	Em operação desde Setembro/2019	Não Circular - Contato GT/GMB Texturizada	0.188	1.618	Contato GT/GMB