



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS



**DESENVOLVIMENTO DE *SOFTWARE* PARA DETERMINAÇÃO DA CARGA
MÁXIMA POR ESPERA A PARTIR DA EQUAÇÃO DE ATENUAÇÃO E CÁLCULO
DO PLANO DE FOGO**

LAURA FERNANDES DE PINHO CARVALHO

OURO PRETO - MG

Novembro de 2022

LAURA FERNANDES DE PINHO CARVALHO

DESENVOLVIMENTO DE *SOFTWARE* PARA DETERMINAÇÃO DA CARGA MÁXIMA POR ESPERA A PARTIR DA EQUAÇÃO DE ATENUAÇÃO E CÁLCULO DO PLANO DE FOGO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Minas. **Área de concentração:** Lavra de Minas/Desmonte de Rochas

Orientador: Prof. Dr. Elton Destro
(*DEMIN/EM/UFOP*)

OURO PRETO - MG

Novembro de 2022

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

C331d Carvalho, Laura Fernandes de Pinho.

Desenvolvimento de software para determinação da carga máxima por espera a partir da equação de atenuação e cálculo do plano de fogo. [manuscrito] / Laura Fernandes de Pinho Carvalho. - 2022.

45 f.: il.: color., tab..

Orientador: Prof. Dr. Elton Destro.

Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Graduação em Engenharia de Minas .

1. Minas e mineração - Lavra de minas. 2. Desmonte de rochas. 3. Vibração. 4. Software - Desenvolvimento. I. Destro, Elton. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 622.235

Bibliotecário(a) Responsável: Sione Galvão Rodrigues - CRB6 / 2526



FOLHA DE APROVAÇÃO

Autor

Laura Fernandes de Pinho Carvalho

Título

Desenvolvimento de *software* para determinação da carga máxima por espera a partir da equação de atenuação e cálculo do plano de fogo

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Minas.

Aprovada em 07 de novembro de 2022.

Membros da banca

Prof. Dr. Elton Destro - Orientador (UFOP - Universidade Federal de Ouro Preto)
Prof. Dr. Carlos Enrique Arroyo Ortiz (UFOP - Universidade Federal de Ouro Preto)
Eng^o. de Minas Douglas Ribeiro Loureiro (Nitro)

Elton Destro, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 19/01/2023.



Documento assinado eletronicamente por **Elton Destro, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 19/01/2023, às 15:22, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0459049** e o código CRC **89EFB579**.

RESUMO

O uso de explosivos permite que a operação de desmonte seja realizada de forma mais barata e mais eficiente. Entretanto, causa impactos negativos que precisam ser minimizados. Um desses impactos é a vibração, que tem alto potencial de afetar estruturas como edificações e cavernas. A vibração no solo, induzida pelas detonações, é altamente influenciada pela carga máxima por espera. Com o intuito de estimar a carga máxima por espera em cada parte de uma mina situada em Curitiba-PR, este trabalho tem o propósito de desenvolver um aplicativo computacional em que seja possível visualizar (a partir do movimento do mouse) utilizando a equação de atenuação de vibração (baseada na velocidade de pico de partícula) e uma imagem aérea da mina, a carga máxima de explosivo que pode ser detonada por vez sem impactar a gruta localizada na área de lavra. Para desenvolver o *software* foi utilizada a IDE (*Integrated Development Environment* - Ambiente de Desenvolvimento Integrado) Lazarus, na linguagem Pascal. O *software* também determina o plano de fogo e o orçamento da detonação baseado nos preços de explosivos e acessórios praticados no local. O aplicativo cumpre seu propósito de permitir ao usuário saber a carga máxima por espera, em cada área da mina, de forma simples e intuitiva. Além disso, tem recursos que permitem ao usuário testar múltiplos cenários para o plano de fogo, de forma dinâmica, e permite um bom planejamento da operação de desmonte, uma vez que determina a quantidade de explosivo e acessórios necessária para detonar determinado volume de material.

Palavras-chave: Desmonte de Rochas; Vibração; Monitoramento de cavidades; Desenvolvimento de *software*

ABSTRACT

The use of explosives allows a blasting operation with lower costs and higher efficiency. Otherwise, it causes negative impacts that need to be minimized. One of these impacts is the ground vibration, which has great potential to affect structure such as buildings and cave. The ground vibration induced by blasting is highly affected by the maximum charge per delay. In order to visualize the maximum charge per delay in each part of a mine in Curitiba, State of Paraná, this study aims to develop a computational application in which is possible to see, from the mouse movement, using the peak particle velocity (PPV) prediction equation and a georeferenced image of the mine, how many explosive is possible to blast per time, without causing damage to the cave located in the mine. The IDE (Integrated Development Environment) Lazarus was used to create the program, in Pascal programming language. The app also determines the blast design and estimates the cost of the operation, based on the current price of explosives and accessories. The app reaches its goal of allowing the user to know the maximum load per hold according the attenuation law of blasting vibration in a simple and intuitive way. It has resources that allow the user to see multiples scenarios for the blast design dynamically, and allows a good planning of the operation, in terms of amount of explosives and accessories required to blast a certain volume of material.

Keywords: Rock blasting; Ground vibration; Cave monitoring; Software development

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Fluxograma - Operação de desmonte com explosivos.....	14
Figura 2: ANFO granulado.....	15
Figura 3: Emulsão encartuchada.....	15
Figura 4: Emulsão a granel.....	16
Figura 5: Conjunto estopim-espoleta.....	16
Figura 6: Cordel detonante.....	17
Figura 7: Retardos.....	17
Figura 8: Variáveis geométricas do plano de fogo.....	18
Figura 9: Relação entre variáveis geométricas.....	21
Figura 10: Espelhamento esférico.....	26
Figura 11: Sismógrafo de engenharia.....	28
Figura 12: Interface do Lazarus.....	30
Figura 13: Curva de comportamento da vibração.....	32
Figura 14: Principais componentes inseridos nos formulários - aba <i>Standard</i>	34
Figura 15: Principais componentes inseridos nos formulários - aba <i>Additional</i>	34
Figura 16: Ortofoto da mina com delimitação da Gruta (em verde).....	35
Figura 17: Eventos, relacionados à imagem, utilizados no inspetor de objetos.....	36
Figura 18: Campo onde constam os pontos do contorno da gruta e retorna a distância desses pontos ao local do desmonte.....	37
Figura 19: Formulário Carga Máxima por Espera	39
Figura 20: Formulário 2 – Plano de Fogo	41
Figura 21: Formulário 3 – Orçamento	42

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Variáveis geométricas do fogo.....	19
Tabela 2: Relações para cálculo do plano de fogo.....	20
Tabela 3: Relação entre altura da bancada e afastamento.....	21
Tabela 4: Fatores que controlam a vibração.....	25
Tabela 5: Resultados dos desmontes padrão.....	32
Tabela 6: Georreferenciamento da imagem.....	36
Tabela 7: Mensagens retornadas na análise da altura da bancada.....	41

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	10
2. OBJETIVOS	12
2.1. OBJETIVO GERAL	12
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	12
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
3.1. DESMONTE DE ROCHAS.....	13
3.1.1 Explosivos e acessórios.....	14
3.1.2 Plano de fogo.....	18
3.2. EFEITOS DANOSOS DAS DETONAÇÕES	22
3.3. LAZARUS	30
4. METODOLOGIA	31
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	39
6. CONCLUSÕES	43
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	44

1. INTRODUÇÃO

A mineração é uma das atividades de maior relevância para a economia do Brasil. Segundo dados do IBRAM (2022), no ano de 2021 o setor mineral registrou um faturamento de R\$ 339,1 bilhões (excluindo-se petróleo e gás), resultando em uma arrecadação de Compensação Financeira pela Exploração Mineral (CFEM) da ordem de R\$ 10,3 bilhões. Entretanto, muitos são os impactos decorrentes dessa atividade, cujos efeitos são intensificados pela rigidez locacional dos empreendimentos minerários. Sua instalação está sujeita aos diversos fatores que condicionam a existência de um depósito mineral e sua viabilidade econômica. Isso faz com que muitas minas se localizem próximas a áreas urbanas e de proteção ambiental. E, conforme ressalta Oliveira (1997), mesmo áreas de mineração inicialmente localizadas longe de grandes centros, podem ser alcançadas pela ocupação urbana em função de seu crescimento.

Uma das etapas da atividade extrativa é o desmonte da rocha, sendo comum o uso de explosivos quando o maciço possui resistência moderada a alta. De acordo com Nieble (2017), a utilização de explosivos nos desmontes permite uma economia de tempo e recursos, se comparado aos outros métodos de escavação, entretanto, impõe efeitos danosos que devem ser minimizados ou evitados, quando possível. Segundo Dallora Neto (2004), esses impactos estão associados às perdas de energia no processo de detonação da carga explosiva.

Um dos impactos de maior relevância, e que está sempre presente nas detonações, é a vibração do solo. As vibrações estão diretamente relacionadas à carga por espera, ou seja, a quantidade de explosivo detonada simultaneamente. Essas vibrações atenuam-se ao longo de sua trajetória (SILVA, 2019), entretanto, o fato de os maciços constituírem meios anisotrópicos e não homogêneos, faz com que a previsão dessa atenuação seja uma tarefa complexa. Somado a isso, tem-se o fato de cada maciço ser único, em termos de litologia e estruturas; dessa forma, a atenuação é particular de cada maciço.

A avaliação da vibração pode ser realizada através da medição da velocidade da partícula de pico (PPV - *Peak Particle Velocity*), a partir de um monitoramento sismográfico das detonações. A partir dos dados desse monitoramento, utilizando métodos de regressão linear, obtém-se a equação de atenuação da onda sísmica naquele maciço. Através disso, é

possível determinar a carga máxima por espera que pode ser praticada em cada área da mina de modo a não impactar as estruturas no entorno.

A aplicação dessa equação em um *software* que traz, ainda, uma imagem da mina, permite uma visualização mais clara das cargas que podem ser utilizadas em cada frente, realiza o plano de fogo, determina o orçamento para detonar determinado volume e auxilia em um bom planejamento da operação de desmonte balanceando os parâmetros técnicos, ambientais e financeiros de uma detonação.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GERAL

Desenvolver um aplicativo computacional que forneça a carga máxima por espera nos diferentes pontos de uma mina utilizando a equação de atenuação do local e uma imagem área da área.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Realizar uma revisão bibliográfica a respeito do desmonte com explosivos, plano de fogo e efeitos adversos das detonações;
2. Discutir a obtenção de uma equação de atenuação a partir de monitoramentos sismográficos dos desmontes;
3. Desenvolver um *software* que, além de determinar o plano de fogo baseado em equações da literatura, forneça a carga máxima por espera utilizando a equação de atenuação;
4. Estimar o orçamento preliminar do desmonte utilizando o aplicativo computacional desenvolvido.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

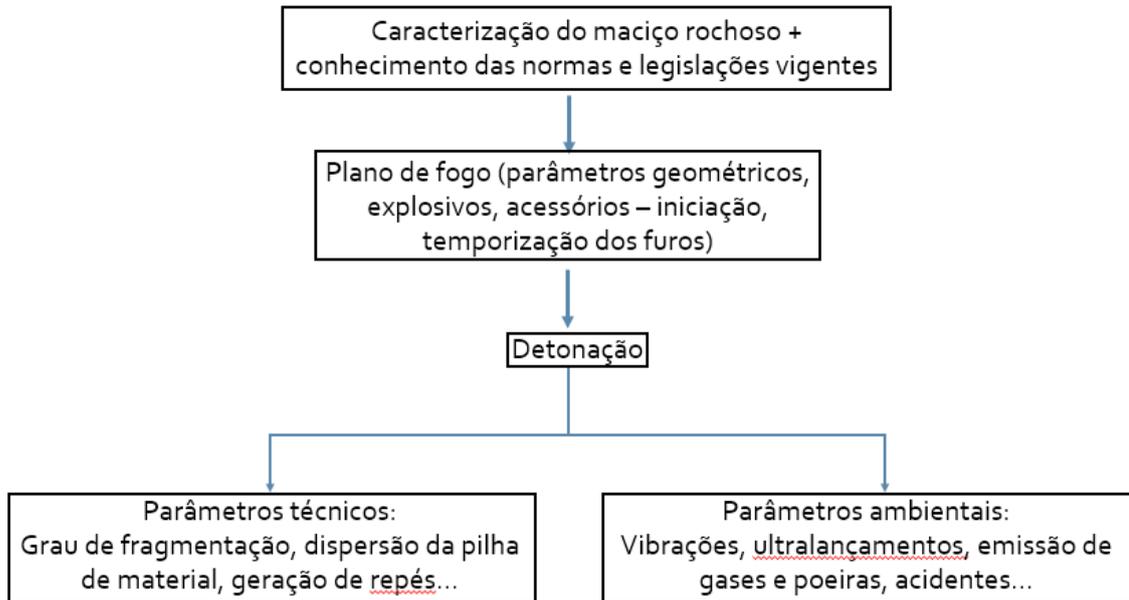
Neste capítulo será apresentada uma revisão bibliográfica a respeito do desmorte com explosivos, plano de fogo, principais efeitos adversos da detonação com enfoque para vibração e como é obtida uma equação de atenuação a partir do monitoramento sismográfico de detonações. Além disso, será apresentada a IDE Lazarus.

3.1. DESMONTE DE ROCHAS

Silva (2019) define o desmorte de rochas como o conjunto de metodologias necessárias para escavar ou fragmentar maciços, de modo a atender projetos de extração mineral ou obras civis. O desmorte pode ocorrer através de técnicas de escavação mecânica ou com o auxílio de explosivos. Essas substâncias permitem, segundo o autor, converter um maciço em fragmentos menores, compatíveis com os equipamentos de transporte e britagem disponíveis, sendo necessários quando a resistência do maciço é superior à indicada para um desmorte mecânico eficiente.

Segundo Sanchidrián e Muñiz (2000) *apud* Borges (2021), a eficiência do desmorte está relacionada à localização das faces livres, ajustes dos parâmetros geométricos do fogo, propriedades dos explosivos, confinamento, método de iniciação, temporização dos furos e o conhecimento do maciço rochoso. Pode-se, portanto, resumir as etapas de uma operação de desmorte com explosivos naquelas discriminadas na Figura 1.

Figura 1: Fluxograma - Operação de desmonte com explosivos.



Fonte: (adaptado de) Borges, 2021.

3.1.1 Explosivos e acessórios

Persson *et al.* (1993) definem explosivos como substâncias capazes de se decompor quimicamente, de forma extremamente rápida, liberando grande volume de gases quentes. Além disso, os autores ressaltam que os explosivos devem possuir estabilidade para não se decompor, espontaneamente, sob a ação de qualquer estímulo como atrito, impacto ou pequenos aquecimentos que podem decorrer do manuseio e transporte.

Hoje em dia, os principais explosivos utilizados são o ANFO e as emulsões. O ANFO (*ammonium nitrate and fuel oil*) granulado (Figura 2) é um explosivo que tem como principais vantagens o fato de ocupar inteiramente o volume do furo e possuir poucos gases tóxicos. Entretanto, sua resistência à água é muito baixa (SILVA, 2019). Nesse contexto, entram as emulsões que, além do nitrato de amônio e óleo diesel, apresentam compostos químicos para estabilizá-las e torná-las resistentes à água (NIEBLE, 2017). Existem no mercado as emulsões encartuchadas (Figura 3) e aquelas que são bombeadas diretamente no furo (Figura 4). As emulsões encartuchadas são vendidas já sensibilizadas, prontas para serem colocadas nos furos. Já as emulsões *a granel* são transportadas até o local da detonação em

em caminhões, e, no momento do bombeamento no furo, são misturadas ao agente sensibilizante e, só então, tornam-se uma substância explosiva (ARAUJO, 2020).

É necessária também a utilização de acessórios que são, segundo Silva (2019), dispositivos para fornecer e transmitir energia para iniciação das cargas explosivas. Dentre os acessórios, destacam-se o estopim e espoleta comum (Figura 5), a espoleta elétrica, cordel detonante (Figura 6), retardos para separar as cargas por espera (Figura 7), tubo de choque (nonel), *booster* (reforçador) e detonador eletrônico.

Figura 2: ANFO granulado.



Fonte: ENAEX, 2022.

Figura 3: Emulsão encartuchada.



Fonte: ENAEX, 2022.

Figura 4: Emulsão a granel.



Fonte: ENAEX, 2022.

Figura 5: Conjunto estopim-espoleta.



Fonte: ENAEX, 2022.

Figura 6: Cordel detonante.



Fonte: ENAEX, 2022.

Figura 7: Retardos.



Fonte: ENAEX, 2022.

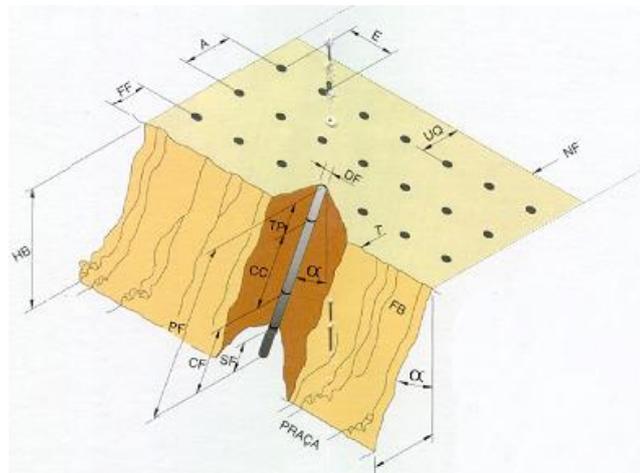
3.1.2 Plano de fogo

Silva (2019) define plano de fogo como o projeto executivo para o desmonte com explosivos. Nele são definidos os parâmetros geométricos da detonação, a quantidade de explosivos a ser utilizada e o sequenciamento dos furos.

3.2.1.1. Variáveis geométricas do plano de fogo

A Figura 8 traz a representação das variáveis geométricas (Tabela 1) do plano de fogo para bancada. Cada um desses parâmetros será descrito a seguir.

Figura 8: Variáveis geométricas do plano de fogo.



Fonte: (adaptado de) Silva, 2019.

Tabela 1: Variáveis geométricas do fogo.

HB	Altura da bancada
A	Afastamento
E	Espaçamento
SF	Subfuração
PF	Profundidade do furo
CC	Carga de coluna
CF	Carga de fundo
DF	Diâmetro do furo
FB	Face da bancada
FF	Furo até face
NF	Nova face (após limpeza)
T	Topo
TP	Tampão
UQ	Ultraquebra
α	Ângulo de inclinação da bancada

Fonte: Silva, 2019.

Existem algumas regras que auxiliam no cálculo dessas relações do plano de fogo, mas, segundo Silva (2019), é necessário aplicar em campo e fazer os ajustes necessários em função dos resultados obtidos, considerando a heterogeneidade dos maciços rochosos, a influência das condições meteorológicas que conferem uma singularidade a cada caso. Essas equações para cálculo do plano de fogo estão apresentadas na Tabela 2, conforme descrito por Silva (2019).

Tabela 2: Relações para cálculo do plano de fogo.

A	Afastamento	Para diâmetros de até 5 mm	Para diâmetros a partir de 5.2 mm		
			Para rochas duras (>120 MPA)	Para rochas médias (70 a 120 MPA)	Para rochas macias (< 70 MPA)
		$A = 0,0123 \left[2 * \frac{\rho_e}{\rho_r} + 1,5 \right] * d_e$	$A = 0,00877 \left[2 * \frac{\rho_e}{\rho_r} + 1,5 \right] * d_e$	$A = 0,00967 \left[2 * \frac{\rho_e}{\rho_r} + 1,5 \right] * d_e$	$A = 0,01053 \left[2 * \frac{\rho_e}{\rho_r} + 1,5 \right] * d_e$
E	Espaçamento	Para rochas duras (>120 MPA) $E = 1,15 * A$	Para rochas médias (70 a 120 MPA) $E = 1,20 * A$	Para rochas duras (>120 MPA) $E = 1,25 * A$	Calcários sem descontinuidades muito espaçadas $E = 2,0 * A$
S	Subfuração	$S = 0,30 * A$			
PF	Profundidade do furo	$P_f = \frac{H_b}{\cos \alpha} + \left[1 - \frac{\alpha}{100} \right] * S$			
Tampão	Tampão	Diâmetro ótimo		Altura do tampão	
		$OT = \frac{D}{20}$		$S = 0,30 * A$	
HCF	Altura da Carga de fundo	$H_{cf} = 0,30 * (P_f - T)$			
HCC	Carga de coluna	$H_{cc} = (P_f - T) - H_{cf}$			
V	Volume de rocha por furo	$V = H_b * A * E$			
PE	Perfuração específica	$PE = \frac{H_F}{V}$			
RL	Razão linear de carregamento	$RL = 0,000785 * \rho_e * d_e^2$			
RC	Razão de carga	$RC_T = \frac{CT}{V}$			
Onde	ρ_e = Densidade do explosivo ρ_r = Densidade da rocha d_e = Diâmetro do explosivo D = Diâmetro do furo H_b = Altura da bancada α = Inclinação do furo				

Fonte: (adaptado de) Silva (2019).

Como pode-se verificar pela Tabela 2, as variáveis geométricas do fogo estão relacionadas entre si. A altura da bancada (HB) corresponde à diferença de cota entre o topo (crista) e a base do talude. Esse parâmetro está condicionado às propriedades geotécnicas do maciço e é limitado pelo alcance dos equipamentos disponíveis à operação. O diâmetro do furo (DF) também está restrito aos equipamentos disponíveis, dessa forma, podem ser considerados como “semi-fixos” (BORGES, 2021). Portanto, a determinação dos demais parâmetros segue a ordem apresentada na Figura 9.

Figura 9: Relação entre variáveis geométricas



Fonte: (adaptado de) Borges, 2021.

O afastamento, via de regra, é o primeiro parâmetro a ser definido. Isso porque, segundo Silva (2019), é um dos parâmetros mais críticos do fogo e, além disso, tanto o espaçamento, quanto a subfuração e o tampão são definidos a partir dele. O afastamento é a menor distância da primeira linha de furos à face livre e a menor distância entre uma linha de furos a outra. Segundo Silva (2019), erros no dimensionamento do afastamento produzem efeitos drásticos no resultado da detonação. Deve-se analisar também a relação entre a altura da bancada e o afastamento conforme a Tabela 3.

Tabela 3: Relação entre altura da bancada e afastamento.

Hb/A	Fragmentação	Onda aérea	Ultralançamento	Vibração	Comentários
1	Ruim	Severa	Severo	Severa	Quebra pra trás. Não detonar. Recalcular o plano de fogo
2	Regular	Regular	Regular	Regular	Recalcular, se possível
3	Boa	Boa	Bom	Boa	Bom controle e boa fragmentação
4	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Não há aumento em benefícios para Hb/A > 4.

Fonte: (adaptado de) Silva, 2019.

O espaçamento corresponde à distância entre furos de uma mesma linha e seu cálculo leva em conta o afastamento e a resistência à compressão da rocha. A subfuração corresponde ao comprimento perfurado abaixo da praça da bancada. É necessária devido ao engastamento da rocha no pé da bancada. A profundidade do furo corresponde ao comprimento total perfurado. Devido ao furo ser inclinado e em função da subfuração, a profundidade do furo é maior que a altura da bancada. A perfuração específica é a relação entre a quantidade de metros perfurados por furo e o volume de rocha por furo.

O tampão corresponde à parte superior do furo que é preenchida com material inerte (SILVA, 2019), visando impedir o escape prematuro dos gases formados no interior do furo (BORGES, 2021).

As cargas de explosivo no furo podem ser divididas em dois tipos: carga de fundo e carga de coluna. A carga de fundo é uma carga reforçada, sendo necessária no fundo onde a rocha é mais presa e menos alterada (Silva, 2019). Já a carga de coluna, que vem acima da carga de fundo, não precisa ser tão concentrada, uma vez que a rocha mais próxima da superfície não está tão confinada. O cálculo da altura recomendada para cada uma dessas cargas foi demonstrado na Tabela 2. A razão linear de carregamento corresponde à quantidade de explosivo por metro de furo. A carga de explosivo é dada pelo produto entre a razão linear e a altura das cargas de fundo e coluna. A razão de carregamento é a quantidade de explosivo necessária para fragmentar 1 metro cúbico, ou 1 tonelada, de rocha.

3.2. EFEITOS DANOSOS DAS DETONAÇÕES

Os efeitos danosos das detonações ocorrem, principalmente, porque apenas parte da energia transmitida ao maciço pelo explosivo é convertida em energia útil, ou seja, promovendo a fragmentação. Segundo Dinis da Gama (1998) *apud* Louro (2009), este valor está entre 5 e 15% da energia liberada pelos explosivos no momento da detonação.

Apesar de esses efeitos danosos das detonações não poderem ser eliminados, deve-se buscar praticar o que Nieble (2017) define como desmonte cuidadoso. Ou seja,

aquele feito de forma controlada, visando não afetar as estruturas vizinhas e o meio ambiente no entorno da operação.

Desse modo, além de avaliar parâmetros técnicos ao planejar uma detonação, deve-se levar em conta as normas e legislação vigentes. No Brasil, há a NBR 9653 (ABNT, 2018) estabelece metodologias para reduzir os riscos envolvidos nas operações com explosivos, especificando parâmetros compatíveis com as tecnologias disponíveis, visando a segurança da população no entorno de obras ou empreendimentos mineiros. No estado de São Paulo, há a norma técnica D7.013 (CETESB, 2015) que determina as condições mínimas exigíveis para a prevenção e controle de impactos ambientais decorrentes da utilização de explosivos e acessórios.

Segundo Nieble (2017), os principais efeitos deletérios das detonações são a emissão de gases e poeira, ultralancamento, vibração, danos ao maciço remanescente, impacto de ar e pressão hidrodinâmica. Dentre os efeitos adversos das detonações, as vibrações normalmente assumem maior importância. Apesar do menor potencial de causar danos graves, se comparado ao ultralancamento, por exemplo, a vibração sempre se manifesta nas detonações (LOURO, 2009). Por isso, será discutida com mais detalhe no próximo tópico.

A NBR-9653 define ultralancamento como qualquer projeção de fragmento de rocha além da área operacional do empreendimento, sendo esse, segundo Nieble (2017), o responsável pelo maior número de acidentes fatais nas operações de desmonte. Dentre os fatores que influenciam no ultralancamento, Silva (2019) destaca o tampão insuficiente (muito curto) e com material inadequado, afastamento muito grande ou muito pequeno, tempo de retardo insuficiente ou com dispersão, alto grau de confinamento entre furos e linhas, irregularidade na face da bancada, energia insuficiente ou excessiva, desvios na perfuração e a utilização de explosivo bombeado em rochas muito fraturadas. Segundo Nieble *et al.* (2003) *apud* Nieble (2017), as zonas de ultralancamento podem ser definidas através da Equação 1:

$$ZD = K \times R_c \times D_f^{\frac{2}{3}} \quad (1)$$

Em que:

ZD é a zona de ultralancamento;

K é uma constante relacionada ao tipo de desmorte. Pode assumir os valores de 64 (para desmontes especiais não cobertos), 28 para desmontes não agressivos - tipo 2 e 14 para DNA2 coberto - tipo 3;

R_c é a razão de carregamento (em kg/m^3);

D_f é o diâmetro do furo (em mm).

Outro efeito indesejável das detonações é o impacto de ar, ou seja, uma onda de choque transportada pelo ar que, segundo Nieble (2017), tem duração semelhante à da detonação. Um tamponamento adequado, uso de bons acessórios, diminuição da carga por espera e uma detonação realizada fora de horário de inversões de temperatura auxiliam no controle desse impacto. O autor ressalta ainda que, apesar de indesejável, tem alcance limitado e não representa perigos.

A energia liberada no momento da detonação, além de promover a fragmentação da porção desejada, gera danos ao maciço remanescente em função da ruptura, lançamento e deslocamento dos gases. Esses danos podem provocar problemas de instabilidade, com a formação de blocos que podem vir a cair (NIEBLE, 2017).

3.2.1. Vibração

A fragmentação da rocha requer uma quantidade de energia alta o suficiente para exceder seu limite de elasticidade. Quando isso ocorre, a rocha é submetida à cominuição, e esse faturamento continua até que a energia fique menor que a resistência do maciço. A partir daí, a energia remanescente atravessa o maciço deformando-o sem fragmentar, provocando as ondas sísmicas. Os tipos e características dessas ondas têm forte influência do meio em que se propagam (KLEN, 2010).

A Tabela 4 traz os principais fatores que controlam a vibração no desmorte, bem como a significância com que influenciam. Ressalta-se que os dois últimos fatores,

superfície do terreno e tipo e profundidade do capeamento, não são parâmetros controlados pela operação, mas sim intrínsecos ao maciço. Dessa forma, os esforços para controlar a vibração devem estar concentrados nas outras variáveis.

Uma dessas variáveis é a carga por espera, ou seja, a carga de explosivo que age separadamente, entre os retardos. Como mencionado, os retardos separam a carga total em cargas menores, que atuam de forma independente e, assim, não entram em ressonância construtiva (NIEBLE, 2017), diminuindo a vibração gerada.

Tabela 4: Fatores que controlam a vibração.

Fatores que controlam a vibração	Significante	Moderada	Pequena
Carga por espera	x		
Carga por fogo		x	
Comprimento e diâmetro da carga			x
Engastamento da carga	x		
Razão de carregamento	x		
Afastamento e espaçamento		x	
Inclinação do furo			x
Tampão (comprimento)		x	
Tampão (material)		x	
Intervalo de retardo	x		
Precisão do retardo	x		
Superfície do terreno		x	
Tipo e profundidade do capeamento	x		

Fonte: (adaptado de) Nieble, 2017.

Segundo Klein (2010), as ondas geradas no desmonte propagam-se radialmente a partir do ponto da detonação e as propriedades do maciço, somadas às variáveis do desmonte, determinam os parâmetros das ondas, que são definidas por sua frequência, comprimento de onda, velocidade transversal e amplitude. Quatro tipos de ondas sísmicas geradas nas detonações: ondas P, ondas S, ondas *Rayleigh* e ondas *Love*.

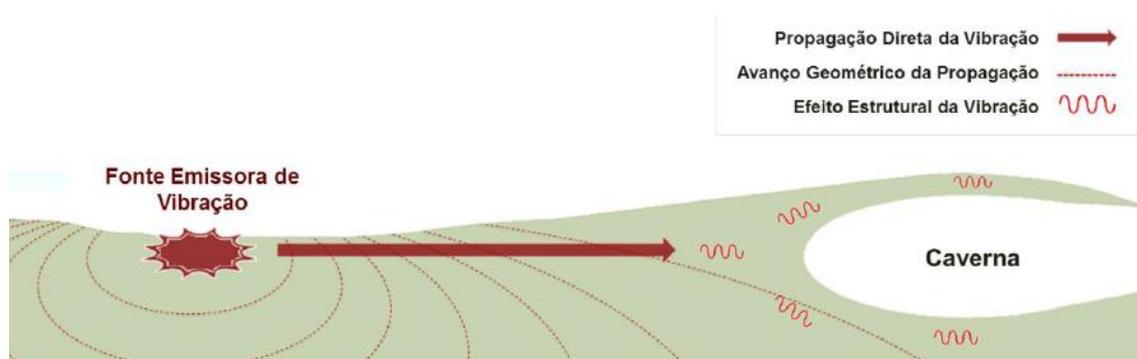
As ondas P são ondas de compressão, o movimento das partículas se dá na mesma direção de propagação da frente de onda. Essas ondas possuem altas velocidades e propagam-se dentro dos materiais, produzindo mudança de volume, mas não de forma. Já nas ondas S, o movimento das partículas é perpendicular à direção de

propagação da frente de onda. Diferentemente das ondas P, as ondas S provocam mudanças de forma, mas não de volume. Como líquidos e gases não suportam esforços de cisalhamento, essas ondas propagam-se apenas em meio sólido. As ondas *Rayleigh* provocam uma trajetória elíptica das partículas, em sentido contrário ao de propagação da frente de onda. Por fim, as ondas *Love*, de maior velocidade que as ondas *Rayleigh*, provocam uma trajetória transversal à direção de propagação das ondas (KLEIN, 2010).

A atenuação das ondas sísmicas pode ser avaliada no tempo e no espaço. Em relação às ondas geradas em uma detonação, considerando um ponto de observação fixo, nos primeiros instantes que seguem a detonação a vibração é máxima e vai se atenuando com o tempo até tornar-se imperceptível. Para efeitos de comparação, a atenuação no espaço, pode ser observada em relação à vibração emitida por equipamentos de carregamento e transporte, por exemplo. Num ponto próximo ao equipamento, a vibração não se altera com o tempo, a atenuação é sentida à medida que se afasta da fonte emissora (PINHO *et al.*, 2016).

Um dos mecanismos de atenuação de onda ao longo de sua propagação pelo terreno é o chamado espelhamento esférico (Figura 10). Ou seja, a energia que, encontrava-se concentrada torna-se rarefeita ao longo da expansão esférica (radial) da frente de onda. Mesmo que a energia permaneça constante, a expansão da área esférica de propagação provoca uma atenuação da onda (PINHO *et al.*, 2016).

Figura 10: Espelhamento esférico.



Fonte: Pinho *et al.*, 2016.

Somado ao espelhamento esférico, tem-se a interação da onda com os aspectos geomorfológicos, topográficos, estratigráficos do local, ou seja, o cenário geomecânico. A presença de estruturas como descontinuidades, por exemplo, tende a propiciar a dispersão da vibração pelo terreno (PINHO *et al.*, 2016). Dessa forma, a maneira como as ondas se atenuam ao longo da sua trajetória é particular de cada terreno e deve ser analisada considerando todas essas variáveis locais.

3.2.1.1. Vibração e cavidades naturais

Conservar uma caverna implica em garantir o equilíbrio geocológico, sua integridade física e estética e a manutenção da circulação de água e ar, e outros processos evolutivos (SANCHEZ e LOBO, 2016).

As operações de desmonte por explosivo, em função da vibração gerada no momento da detonação, tem forte potencial de afetar cavidades naturais que se situem próximas às frentes de lavra, se não forem monitoradas e controladas. As vibrações podem contribuir para a desestabilização de materiais de cobertura, favorecendo sua migração para o interior de cavidades, ou provocar o desabamento das porções superiores dessas cavidades, provocando o abatimento do terreno em superfície (OLIVEIRA, 1997).

Nesse contexto, as cavidades são consideradas receptores potenciais e a análise de sua segurança deve ter como pilares as características intrínsecas às cavernas, que governam suas fragilidades, e as condições de vibração a que estará sujeita (PINHO *et al.*, 2016).

3.2.2 Estimativa dos níveis de vibração e equação de atenuação

Segundo Bicelli (2014), o monitoramento dos fenômenos sísmicos relacionados às detonações tem o intuito de estimar o impacto ambiental dos desmontes e fornecer os dados para o controle dos níveis de vibração dentro de limites pré-estabelecidos.

Como ressalta Klein (2010), os maciços rochosos não configuram um meio isotrópico, elástico e homogêneo e, por isso, uma previsão teórica confiável dos níveis de vibração em determinado local é difícil. Mas, com um programa de monitoramento de detonações é possível determinar os fatores locais de atenuação, estabelecendo uma correlação entre as amplitudes das vibrações, a massa de explosivos detonada e a distância entre a detonação e o ponto de interesse (DALLORA NETO, 2004). Esse ponto de interesse pode ser desde centros urbanos a fragilidades naturais, como grutas.

Dentre as formas de estimar os níveis de vibração, a utilização da velocidade de partículas é uma das principais (KLEIN, 2010). Segundo Corsby (1998) e Jimeno (1994) *apud* Lima (2000), a velocidade da partícula é proporcional à carga de explosivo detonada e inversamente proporcional à distância.

Um monitoramento sismográfico (Figura 11) consiste na consolidação de diversos aspectos do cenário em que se insere a atividade que se pretende avaliar. O registro da vibração e ruído, se dá a partir da medição em pontos estratégicos, variando-os, de forma que seja possível verificar a atenuação da vibração com a distância.

Figura 11: Sismógrafo de engenharia.



Nos monitoramentos com sismógrafos, são registradas as três componentes ortogonais do movimento ondulatório: longitudinal, transversal e vertical. O maior valor de uma dessas três componentes medido durante um intervalo de tempo é chamado de pico da componente de velocidade de vibração de partícula. Já o máximo valor de pico da componente de velocidade de vibração de partícula, medido em um ponto durante o

mesmo intervalo de tempo, é chamado de velocidade de vibração de partícula de pico (KLEIN, 2010). Esses são os principais parâmetros usados no controle da vibração.

Dessa forma, é possível prever os níveis de pico de vibração através de métodos estatísticos, e a equação que relaciona essas variáveis é como a Equação 2:

$$PPV = a \times DE^{-b} \quad (2)$$

Sendo:

PPV = velocidade de partícula de pico;

DE = Distância escalonada, que representa a correlação entre a distância de monitoramento e a carga máxima por espera. Pode ser determinada através da Equação 3:

$$DE = \frac{D}{\sqrt{CME}} \quad (3)$$

a = fator correspondente à intensidade da energia sísmica transferida para o terreno e propagada para longe da detonação. Relaciona-se com o grau de confinamento da detonação e características do explosivo, como densidade e energia;

b = fator associado às variações litológicas e estruturais do maciço por onde a onda se propaga. Mede a redução da intensidade da velocidade de partículas com o aumento da distância.

Dessa forma, a equação reflete a atenuação do efeito do explosivo com o aumento da distância através, principalmente, da carga por espera e a distância escalonada.

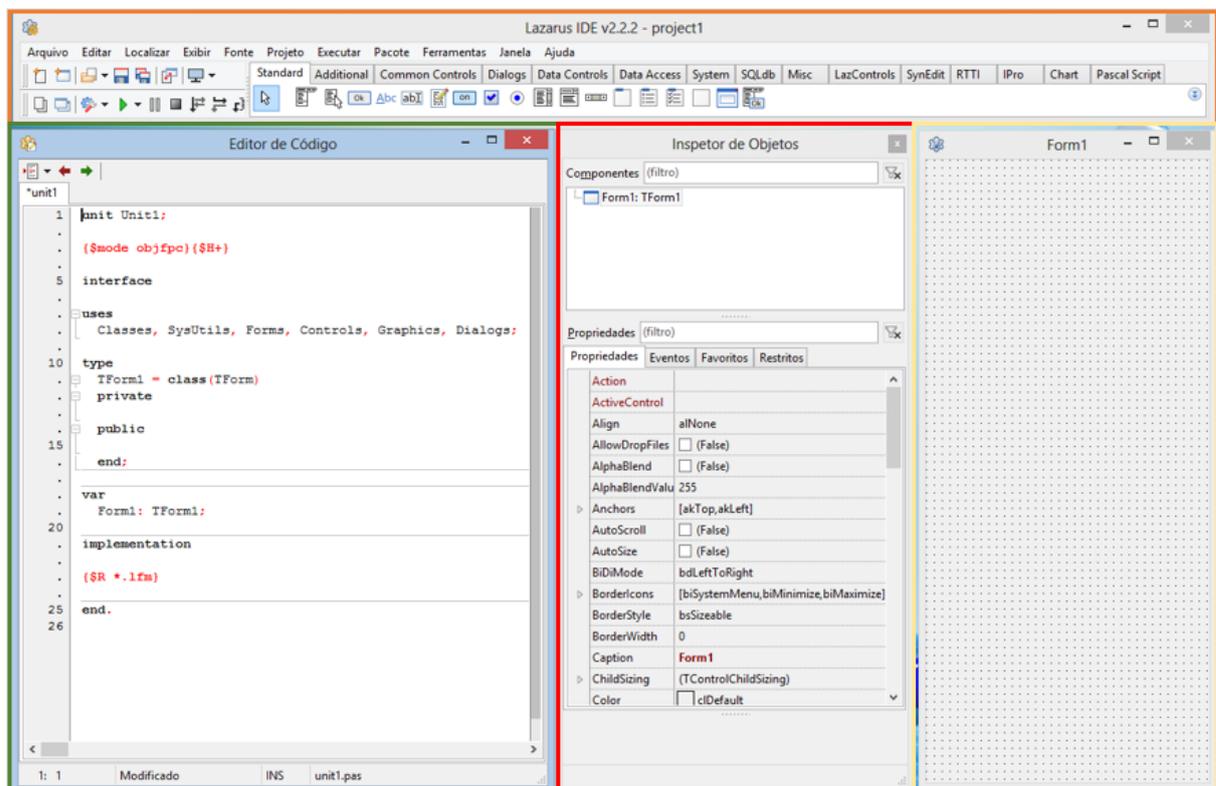
Logo, um programa de monitoramentos sismográficos possibilita, através de uma análise de regressão, desenvolver uma equação probabilística da resposta dos maciços às vibrações geradas pelas detonações (DALLORA NETO, 2004).

3.3. LAZARUS

O Lazarus é uma IDE (sigla para *Integrated Development Environment*), ou seja, Ambiente de Desenvolvimento Integrado, em que a linguagem de programação utilizada é o Pascal. A linguagem Pascal foi desenvolvida entre as décadas de 60 e 70 por Nicklaus Wirth na Universidade Técnica de Zurique na Suíça.

O Lazarus, um software livre, foi criado em fevereiro de 1999, por Cliff Baeseman, Shane Miller e Maichael Hess e, posteriormente, aprimorado por Marc Weustink e Mattias Gaertner (LAZARUS-IDE, c1993-2022). A interface do Lazarus pode ser observada na Figura 12, onde é possível ver o menu (destacado em laranja), o editor de códigos (em verde), o inspetor de objetos (em vermelho) e o formulário no qual é criada toda a interface gráfica (em amarelo).

Figura 12: Interface do Lazarus.



4. METODOLOGIA

Parte do objetivo deste trabalho é o desenvolvimento de um aplicativo computacional para auxiliar no planejamento dos desmontes de uma mina de calcário no estado do Paraná. Para isso, foram utilizados os dados do monitoramento sismográfico de desmontes da mina, bem como a equação de atenuação obtida a partir desse monitoramento. A seguir, será apresentada a metodologia envolvida no monitoramento e na obtenção da equação e, em seguida, o procedimento adotado no desenvolvimento do *software*.

4.1. MONITORAMENTO DOS DESMONTES E OBTENÇÃO DA EQUAÇÃO DE ATENUAÇÃO

A mina em estudo situa-se na região metropolitana de Curitiba-PR, em uma região cárstica, onde a presença de grutas é muito comum. O monitoramento dos desmontes nessa mina teve por objetivo determinar o raio de proteção da gruta, de alta relevância espeleológica, situada na área de lavra, ou seja, determinar o nível de vibração máximo de modo a não impactar a cavidade.

O monitoramento teve início com o acompanhamento dos chamados desmontes-padrão. A cada desmorte foram produzidos boletins de detonação. Esses boletins traziam informações relevantes à obtenção da equação de atenuação como a carga de cada furo, as cargas por espera, o afastamento e espaçamento entre os furos, croqui com a amarração e posicionamento dos retardos. Além disso, os boletins traziam as coordenadas do ponto de monitoramento (local onde foi instalado o sismógrafo) e do desmorte e dados dos explosivos utilizados. Buscou-se, ao longo dos desmontes, variar a posição do sismógrafo em relação às detonações para refinar a equação de atenuação. Esses monitoramentos seguiram o indicado na NBR 9653 (ABNT, 2018) e a vibração foi quantificada pela velocidade do pico de partícula (PPV).

Com os boletins de detonação e a análise do monitoramento sismográfico, construiu-se uma curva de comportamento, resultante do modelo de projeção

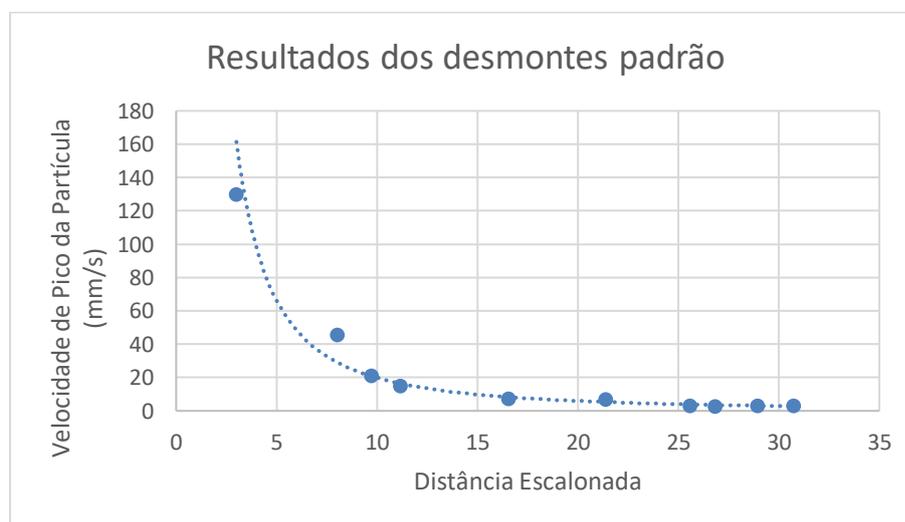
sismográfica. A Tabela 5 traz os resultados de cada um dos desmontes e a Figura 13 apresenta a curva de comportamento.

Tabela 5: Resultados dos desmontes padrão.

Desmorte	Data	Distância (m)	CME (kg)	PPV (mm/s)	DE
1	18/04/2022	309.36	132.72	2.57	26.85
2	28/04/2022	292.12	90.37	3.3	30.73
3	12/05/2022	293.15	131.26	3.3	25.59
4	16/06/2022	257.95	145.5	7.11	21.38
5	20/06/2022	272.8	88.72	3.05	28.96
6	11/07/2022	287.74	301.75	7.37	16.56
7	03/08/2022	123.48	122.47	15	11.16
8	02/08/2022	144.07	218.79	21.3	9.74
9	08/09/2022	29.3	95.28	130	3
10	15/09/2022	75.53	88.72	45.7	8.02

Fonte: (adaptado de) Nitro e Mineral Geologia (2022)

Figura 13: Curva de comportamento da vibração



Fonte: (adaptado de) Nitro e Mineral Geologia (2022)

O critério de segurança para proteção da Gruta Cinco Níveis também seguiu a NBR 9653:2018. Uma vez que a faixa de frequência gerada pelas detonações foi de 17 a

51 Hz e, nessa faixa, a NBR 9653 define um limite de PPV de 15 mm/s para 15 Hz de frequência até 50 mm/s na frequência de 40 Hz (crescendo linearmente), adotou-se o limite de PPV de 20 mm/s.

Para a obtenção da equação de atenuação da onda sísmica, os dados dos desmontes são plotados em um gráfico com ambos os eixos em escala logarítmica. A partir daí, é feita a regressão linear e aplica-se um grau de confiança de 95%, o que gera uma reta. A equação dessa reta (Equação 4) corresponde à lei de atenuação sísmica para aquele maciço.

$$y = 1046,1x^{-1,574} \quad (4)$$

Sendo:

y = Velocidade de Pico da Partícula (PPV - mm/s)

x = Distância escalonada.

Essa equação será utilizada para definição da carga máxima por espera em cada área da mina. O raio de proteção da gruta corresponde ao raio dentro do qual não pode haver nenhum tipo de operação com explosivos. Para o critério de segurança adotado (PPV = 20 mm/s), a partir da aplicação da equação de atenuação, verifica-se que não é permitida qualquer operação utilizando explosivos em um raio de 4 metros da gruta. Entretanto, o levantamento espeleológico da gruta, realizado em 2008, considerou um raio de 36 metros do perímetro da gruta como sua área de influência. Desse modo, foi proposto que se adotasse esse valor (36 metros) como limite operacional.

4.2. DESENVOLVIMENTO DO *SOFTWARE* NO LAZARUS

No Lazarus foram criados três formulários que foram denominados:

- Carga máxima por espera;
- Plano de Fogo;
- Orçamento do desmonte.

Os principais componentes inseridos nos formulários, disponíveis no menu do Lazarus estão destacados nas Figuras 14 e 15, sendo eles:

- Button;
- *Label*;
- *Edit*;
- *ScrollBar*;
- *ListBox*,
- *Combobox*,
- *Image*;
- *StringGrid*.

Figura 14: Principais componentes inseridos nos formulários - aba *Standard*.



Figura 15: Principais componentes inseridos nos formulários - aba *Additional*.



O desenvolvimento do *software* iniciou-se com a seleção de pontos no contorno da “Gruta Cinco Níveis”, que já havia sido mapeada em estudos anteriores. Esses pontos foram selecionados com o auxílio do *software AutoCAD* e suas coordenadas foram importadas para o Lazarus como uma planilha (usando o recurso *StringGrid*), no formulário “Carga máxima por espera”.

Foi calculada a distância entre cada um desses pontos ao local do desmonte (essas distâncias são retornadas em um *ListBox*). Considerando que nenhum ponto da gruta pode ser afetado, a menor das distâncias calculadas foi tomada como a distância da gruta ao desmonte (centroide da detonação). A ortofoto da mina (Figura 16), onde

verifica-se a delimitação da gruta em verde, foi importada para o Lazarus e essa imagem foi georreferenciada utilizando uma relação entre as coordenadas do vértice 1 da imagem, o tamanho real (em metros) e o tamanho da imagem em *pixels* (Tabela 6).

Com a imagem georreferenciada foi possível retornar ao usuário as coordenadas do local do desmorte, a distância desse local à gruta e a carga máxima por espera nesse local. Depois de inserir a imagem, é possível utilizar os eventos localizados no Inspetor de Objetos (Figura 17) para determinar algumas ações. Com o uso do evento “*on mouse move*”, à medida que o usuário movimenta o cursor do mouse, todos esses parâmetros são, automaticamente, atualizados, permitindo uma visualização dinâmica de quanto explosivo por espera pode-se utilizar em cada uma das áreas da mina.

Ressalta-se que a carga máxima por espera foi calculada utilizando a Equação 4, com $PPV=20$ mm/s. O evento “*on click*” permite que, ao clicar com o mouse no local desejado para detonação, a distância à gruta e a carga máxima por espera fiquem fixadas. Além dos eventos mencionados, utilizou-se o “*on leave*” para que, quando o cursor do mouse “deixasse” a imagem, não fosse mostrada nenhuma coordenada.

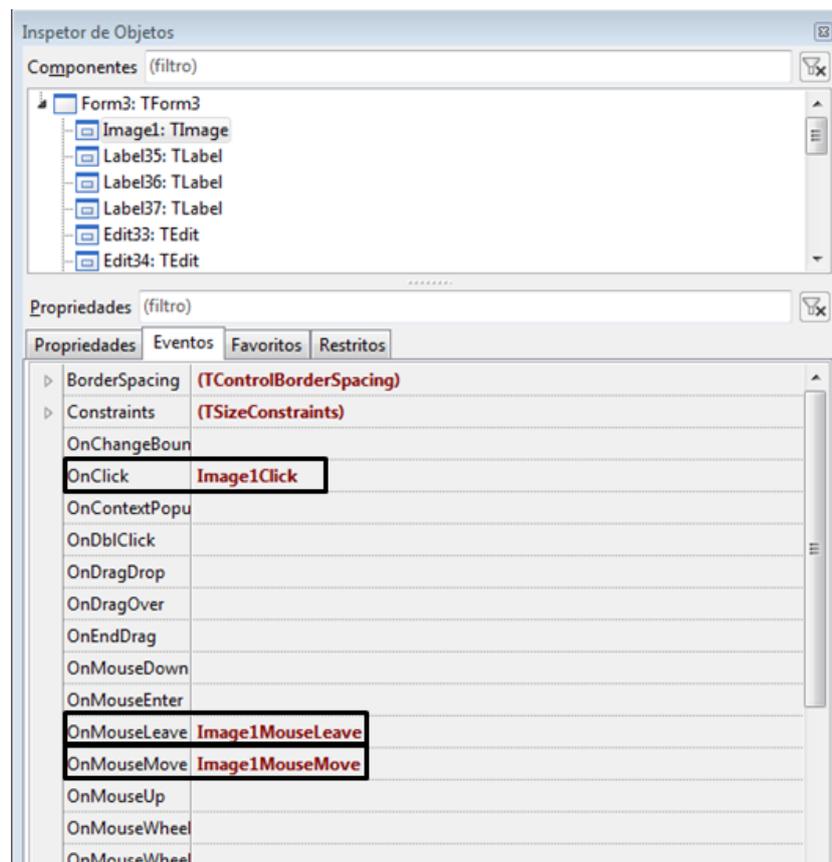
Figura 16: Ortofoto da mina com delimitação da Gruta (em verde).



Tabela 6: Georreferenciamento da imagem.

Vértice 1 da imagem	Leste	Norte
	679029	7208395
Dimensões em metros	681	726
Dimensões em pixels	561	597
Coordenadas em cada ponto da imagem	$679029+681*X/561$	$7208395-726*Y/597$

Figura 17: Eventos, relacionados à imagem, utilizados no inspetor de objetos.



A Figura 18 apresenta o local na interface do programa onde são mostradas as coordenadas do contorno da gruta (*StringGrid*) e, ao lado, o *ListBox* que retorna a distância do ponto do desmonte a cada um desses pontos no contorno da gruta. Em função de um contrato de confidencialidade, as coordenadas desses pontos ficarão omitidas.

Figura 18: Campo onde constam os pontos do contorno da gruta e retorna a distância desses pontos ao local do desmonte.

Ponto	Leste (m)	Norte (m)
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		
8		
9		
10		

Distâncias do ponto do desmonte aos pontos da gruta



O segundo formulário é denominado plano de fogo. Para alternar entre o formulário 1 e o 2 foi inserido um “botão” que, além de abrir o formulário 2, importa para a área do cálculo do plano de fogo a carga máxima por espera fixada no formulário 1, para que essa possa ser utilizada no cálculo do número de retardos que serão necessários na detonação. Os dados a serem inseridos para cálculo do plano de fogo são os seguintes:

- Altura da bancada;
- Densidade da rocha;
- Diâmetro do Furo;
- Inclinação do furo;
- Resistência à compressão da rocha;
- Volume que deseja desmontar;
- Diâmetro dos explosivos (de fundo e coluna);
- Densidade dos explosivos (de fundo e coluna);
- Tipo do explosivo (se bombeado, granulado ou encartuchado – nesse campo foi inserido um *ComboBox*, onde o usuário pode apenas selecionar, sem a necessidade de digitar);

- Propriedades como altura e massa unitária dos cartuchos – campos que só devem ser preenchidos no caso de emulsão encartuchada.

Com esses parâmetros inseridos, para cálculo do plano de fogo foi inserido outro botão. Também é calculada a análise da razão entre altura da bancada e afastamento, que é um ponto crítico conforme descrito no Capítulo 3, e a previsão de ultralaçamento.

Além dos parâmetros geométricos do fogo e da determinação da quantidade de explosivos necessária, o programa faz uma estimativa da quantidade necessária de cordel detonante e do número de retardos necessários. Ressalta-se que os retardos não servem apenas para atender à carga máxima por espera. A amarração e sequenciamento dos furos deve ser definida considerando as especificidades de cada detonação. Desse modo, para fins de estimativa, o número de retardos calculado pelo *software* corresponde ao necessário para atender essa carga máxima por espera e dois a mais, para que atender possíveis necessidades da amarração. A estimativa da quantidade de cordel detonante foi feita baseada na profundidade dos furos e no espaçamento entre eles.

No plano de fogo foram inseridos “*scroll bars*” que permitem ajustes tanto no afastamento quanto na profundidade do tampão. Ao variar esses parâmetros com o *scroll bar*, as demais variáveis são recalculadas. Essa ferramenta é útil caso algum dos resultados fornecidos inicialmente pelas equações seja considerado insatisfatório e o usuário deseje conhecer outros cenários. Colocou-se os “*scroll bars*” especificamente nesses parâmetros porque, como visto no Capítulo 3, as demais variáveis são calculadas em função do afastamento. Além disso, o tampão tem um papel importante no controle de efeitos danosos, como o ultralaçamento, portanto, pode ser interessante verificar, por exemplo, o que acontece com a previsão de ultralaçamento caso a profundidade do tampão seja aumentada ou diminuída.

O terceiro formulário corresponde a uma área para cálculo do orçamento do desmonte. O programa retorna os custos com explosivos, cordel, retardos e o conjunto estopim-espoleta. Esse orçamento é dito preliminar porque o *software* não contempla as especificidades da amarração.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 19 mostra o Formulário 1, denominado “Carga máxima por espera”. No retângulo em azul na imagem encontram-se as coordenadas dos pontos retirados do contorno da gruta. No retângulo em vermelho, as coordenadas do local do desmorte, definido a partir do movimento do mouse ao longo da imagem. O retângulo em laranja apresenta as distâncias desse ponto (Local do Desmorte) aos pontos do contorno da gruta. No retângulo destacado em verde, verifica-se a “Distância do local do desmorte à gruta”, que corresponde à menor das distâncias calculadas e, abaixo, a carga máxima por espera para essa distância, calculada com a Equação 4, apresentada no Capítulo 4. Ao lado, verificam-se dois *edits* que retornam esses valores de distância e carga máxima por espera quando o usuário clica com o *mouse* em um ponto específico. Indicado pela seta azul, encontra-se o botão “Enviar para o plano de fogo”. Esse botão abre o formulário 2 (Plano de Fogo) e envia para esse segundo formulário o valor da carga máxima por espera fixado para que possa ser usado nos cálculos subseqüentes.

Figura 19: Formulário **Carga Máxima por Espera**.

Local do desmorte

Leste (m)	Norte (m)
679258	7208138

Distância do local do desmorte à gruta (m) 222 222

Carga Máxima por Espera (kg) 357 357

Coordenadas UTM - 22 S (DATUM SIRGAS 2000)

Enviar para o plano de fogo

Movimentar o mouse ao longo da imagem para selecionar o local do desmorte. Clicar sobre o ponto para fixar o valor da distância e CME

Ponto	Leste	Norte
1	679489	7208123
2	679490	7208124
3	679492	7208124
4	679493	7208123
5	679493	7208122
6	679482	7208104
7	679481	7208103
8	679479	7208103
9	679478	7208104
10	679478	7208106

Distâncias do ponto do desmorte aos pontos da gruta

231
232
234
235
236
227
226
224
223
222

A Figura 20 mostra o segundo formulário, onde o plano de fogo é calculado. No retângulo em azul, encontra-se a área destinada à entrada de dados. Indicado pela seta vermelha, encontra-se um *ListBox* onde o usuário escolhe o tipo de explosivo (podendo selecionar entre encartuchado, bombeado e granulado). Ao lado, indicado pela seta em verde, encontram-se os campos para inserir as dimensões dos cartuchos, que devem ser preenchidos apenas se o explosivo selecionado for do tipo “Encartuchado”. Indicado pela seta azul, está o botão “Calcular”. Ao pressionar o botão, o plano de fogo é calculado.

Abaixo, no retângulo em laranja, são retornados os valores calculados para o plano de fogo. Indicado pelo retângulo preto, está a carga máxima por espera, enviada do formulário 1. Nos retângulos em roxo estão os “*scroll bars*” que permitem ajustar o afastamento e a altura do tampão, de modo que, ao movimentar o *scroll* para definir um novo valor para essas variáveis, as demais são automaticamente recalculadas. No retângulo em amarelo, o programa retorna o número de cartuchos – caso o explosivo selecionado tenha sido do tipo “Encartuchado”. Indicada pela seta preta, tem-se a análise da altura da bancada em relação ao afastamento. Dependendo do valor da razão Altura da bancada por Afastamento, o programa retorna uma mensagem para o usuário (Tabela 7).

No retângulo em cinza encontram-se dois botões: “Ir para Carga Máxima por Espera” e “Enviar para Orçamento”. Ao clicar no primeiro botão, o formulário 1 é aberto e o usuário pode selecionar um outro local para realizar o desmonte. Ao clicar no segundo botão, os valores de “Carga de fundo”, “Carga de Coluna”, “Número de Retardos Necessários” e “Quantidade de Cordel Detonante” são enviados para o formulário 3 (Orçamento).

Figura 20: Formulário 2 – Plano de Fogo.

Plano de Fogo
Entrada de dados

Altura da bancada	12	Diâmetro do explosivo (fundo)	75	→ Para emulsão encartuchada	
Densidade da rocha	3	Diâmetro do explosivo (coluna)	75	Altura do cartucho (mm)	Massa do cartucho (g)
Diâmetro do furo	76	Densidade do explosivo (fundo)	1	Tipo do Explosivo (fundo)	
Inclinação do furo	20	Densidade do explosivo (coluna)	1	Tipo do Explosivo (coluna)	
Resistência a compressão da rocha	200	<input type="button" value="Calcular"/>			
Volume a ser desmontado	3000				

Resultados

CARGAS

Carga Máxima por Espera	357	Altura da carga de fundo		Para emulsão encartuchada Número de cartuchos (fundo) <input type="text"/> Número de cartuchos (coluna) <input type="text"/>
Afastamento	<input type="text"/>	Carga de fundo		
Espaçamento	<input type="text"/>	Altura da carga de coluna		Ir para "Carga Máxima por Espera" <input type="button" value="Enviar para 'Orçamento'"/>
Subfuração	<input type="text"/>	Carga de coluna		
Profundidade do furo	<input type="text"/>	Carga total por furo		
Razão linear de carregamento	<input type="text"/>	Razão de carga		
Tampão	<input type="text"/>	Perfuração específica		
Diâmetro ótimo do tampão	<input type="text"/>	Volume de rocha por furo		
Análise altura da bancada		Número de furos		
Previsão de ultralargamento		Carga total	Edit34	
Furos cobertos	<input type="checkbox"/>	Número de retardos necessários		
Furos não cobertos	<input type="checkbox"/>	Quantidade de Cordel Detonante		

Tabela 7: Mensagens retornadas na análise da altura da bancada.

Hb/A	Mensagem
Até 1	Não detonar
Entre 1 e 2	Recalcular, se possível
Entre 2 e 4	Bom
Igual a 4	Excelente
Maior que 4	Bancada alta

O formulário “Orçamento” retorna os valores de explosivos, cordel detonante, retardos e conjunto estopim-espoleta, importados do Formulário “Plano de Fogo”. A partir dessas quantidades de cada item, ao clicar no botão “Calcular Valores (R\$)”, o programa retorna o valor (em R\$) correspondente às quantidades de explosivo, cordel, retardos e conjunto estopim-espoleta. Também há um botão para retornar ao formulário anterior caso o usuário deseje ver outros cenários. Ao clicar no botão “Calcular Total (R\$)”, o programa mostra a soma desses valores para o usuário.

Figura 21: Formulário 3 – Orçamento.

Orçamento prévio

	Quantidade	
Explosivo (Fundo)	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Explosivo (Coluna)	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Cordel detonante	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Retardos	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Conjunto estopim-espoleta	<input type="text"/>	<input type="text"/>

6. CONCLUSÕES

Assim como as demais operações dentro de uma mina, as atividades utilizando explosivos devem ser feitas de forma racional, buscando um bom equilíbrio entre os parâmetros técnicos e ambientais. Para isso é importante o conhecimento aprofundado do maciço rochoso, das propriedades dos explosivos e acessórios pretendidos para o uso e uma malha adequada. Também devem ser conhecidos todos os fatores limitantes e fragilidades situadas no entorno para que a atividade cause o mínimo de impacto possível.

No local em estudo, a presença de uma cavidade na área de lavra levou à necessidade de um monitoramento sismográfico para obtenção de uma equação de atenuação e definição dos limites operacionais na mina.

A aplicação dessa equação em um *software*, permite ao usuário que visualize os diferentes setores da mina e saiba com qual carga máxima por espera pode trabalhar em cada um deles, de forma dinâmica e simplificada. Além disso, no mesmo aplicativo é possível calcular o plano de fogo. Como foi discutido em capítulos anteriores, os resultados obtidos através dessas relações para cálculo do plano de fogo devem ser sempre avaliados, uma vez que os maciços são únicos e mesmo as condições meteorológicas do dia podem influenciar no resultado da detonação. O *software* desenvolvido não leva em consideração as especificidades da amarração.

O software cumpre seu propósito, permitindo estabelecer, de forma dinâmica e com precisão as cargas máximas por espera, dentro dos limites operacionais definidos pela legislação vigente e estudos feitos na área, mas não dispensa uma avaliação por parte do profissional responsável pela operação de desmonte, que deve propor os eventuais ajustes para chegar ao melhor cenário possível. Além disso, ao permitir um cálculo do orçamento da detonação, auxilia no planejamento físico-financeiro da operação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

BICELLI, L. A. **Determinação da equação de atenuação de vibrações gerada por desmontes de rocha**. 2014. 45 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará, Campus Universitário de Marabá, Instituto de Geociências e Engenharias, Faculdade de Engenharia de Minas e Meio Ambiente, Curso de Engenharia de Minas e Meio Ambiente, Marabá, 2014.

BORGES, B. S. **Análise do Índice de Suscetibilidade ao Desmonte com Explosivos para Melhoria do Plano de Fogo**. Orientador: José Soutelo Soeiro. 2021. 90 p. Teses (Mestrado em Engenharia e Minas e Geo-Ambiente) - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2021.

CETESB - COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL - **Norma D7.013** - Avaliação e monitoramento das operações de desmonte de rocha com uso de explosivo na mineração: Procedimento. São Paulo: 1992. 7 p.

DALLORA NETO, C. **Análise das Vibrações Resultantes do Desmonte de Rocha em Mineração de Calcário e Argilito Posicionada Junto à Área Urbana de Limeira (SP) e Sua Aplicação Para a Minimização de Impactos Ambientais**. Orientador: Gilda Carneiro Ferreira. 2004. 82 f. Teses (Mestrado em Geociências) - Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2004. Louro 2009.

KLEN, A. M. **Aplicação da técnica de simulação para análise da superposição de ondas sísmicas geradas em desmonte de rocha pela dispersão dos tempos de retardo utilizando o método de Monte Carlo**. 2010. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Minas. Universidade Federal de Ouro Preto.

LOURO, A. **Novas formulações para leis de propagação de vibrações, em maciços rochosos, baseadas nas propriedades termodinâmicas dos explosivos**. 2009. Tese de Doutorado. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Minas. Instituto Superior Técnico-Universidade Técnica de Lisboa.

NIEBLE, C. M. **Desmontes Cuidadosos com Explosivos**: Aspectos de Engenharia e Ambientais. 1. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2017. 128 p. v. 1.

OLIVEIRA, L. M. **A gestão de riscos geológicos urbanos em áreas de carste**. 46 p. Monografia (Especialista em Gestão Técnica do Meio Urbano). Curitiba: GTU/PUC/UTC, 1997.

SILVA, V. C. e. **Desmonte de Rochas**. 1ª ed., São Paulo: Oficina de Textos, 2019. 335 p. v. 1.

PERSSON, P. A.; HOLMBERG, R.; LEE, J. **Rock blasting and explosives engineering**. 1st ed. CRC Press, 1993. 560 p. v.1.

PINHO, M. et al. **Sismografia aplicada à proteção do patrimônio espeleológico: contribuição técnica à análise de estudos ambientais**. Brasília: ICMBio, 2016a. 47p.

SÁNCHEZ, L. E. e LOBO, H. A. S. **Guia de boas práticas ambientais na mineração de calcário em áreas cársticas**. 2016.