



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



**GIAN CARLOS ANDRÉ DE MELO**

**DESENVOLVIMENTO DE *SOFTWARE* PARA DETERMINAÇÃO DOS  
PARÂMETROS DA CURVA DE ATENUAÇÃO NO DESMONTE DE ROCHAS**

**Ouro Preto - MG  
2025**

GIAN CARLOS ANDRÉ DE MELO

DESENVOLVIMENTO DE *SOFTWARE* PARA DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS  
DA CURVA DE ATENUAÇÃO NO DESMONTE DE ROCHAS

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

Coorientador: Engo. Dr. Henrique Nogueira Soares

Ouro Preto - MG  
2025

## SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

M528d Melo, Gian Carlos André de.

Desenvolvimento de software para determinação dos parâmetros da curva de atenuação no desmonte de rochas. [manuscrito] / Gian Carlos André de Melo. - 2025.

37 f.: il.: color..

Orientador: Prof. Dr. Elton Destro.

Coorientador: Dr. Henrique Nogueira Soares.

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

1. Desmonte de rochas - Vibração. 2. Ondas sísmicas - Atenuação sísmica. 3. Estatística - Regressão linear. I. Destro, Elton. II. Nogueira Soares, Henrique. III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

CDU 622.235

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



## FOLHA DE APROVAÇÃO

### Autor

Gian Carlos André de Melo

### Título

Desenvolvimento de *software* para determinação dos parâmetros da curva de atenuação no desmonte de rochas

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 29 de outubro de 2025.

### Membros da banca

Prof. Dr. Elton Destro - Orientador (UFOP - Universidade Federal de Ouro Preto)  
Engº. Dr. Henrique Nogueira Soares - Coorientador (Perito do Tribunal de Justiça de Minas Gerais - TJMG)  
Prof. Dr. Carlos Enrique Arroyo Ortiz (UFOP - Universidade Federal de Ouro Preto)  
Engº. de Minas Carlos Alencar Gorges Abreu de Barros (Fast2Mine)

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 01/12/2025.



Documento assinado eletronicamente por **Elton Destro, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 01/12/2025, às 13:36, 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](http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **1024569** e o código CRC **276D72BC**.

Dedico este trabalho à memória de meu pai, Artur, que, mesmo não estando mais presente fisicamente, permanece vivo em mim através dos seus ensinamentos, valores e da forma como me criou. Cada esforço, cada conquista e cada superação que vivi ao longo desta caminhada acadêmica têm a sua marca e são reflexo da base sólida que ele me deu. Este momento é, acima de tudo, para ele, pois foi sua sabedoria, disciplina e amor que me ensinaram a nunca desistir dos meus sonhos. À minha mãe, Maria do Carmo, que sempre acreditou no meu potencial e me deu força em todos os momentos. Aos meus irmãos, Túlio e Natan, companheiros de vida que dividiram comigo apoio e aprendizados. À minha noiva Marina, pelo carinho e incentivo incondicional durante toda a trajetória. E, com todo meu amor, à minha filha Maria Clara, que é minha maior inspiração para seguir em frente, mesmo diante das maiores dificuldades.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus pela saúde e determinação. À minha família, pela compreensão nas horas de ausência e pelo suporte em cada etapa. Aos meus orientadores, Prof. Dr. Elton Destro e Dr. Henrique Nogueira Soares pela dedicação, paciência e direcionamento essencial ao desenvolvimento deste trabalho. Aos professores e colegas da Escola de Minas, que contribuíram para minha formação acadêmica e profissional. À UFOP, que foi mais do que uma instituição de ensino, foi um espaço de crescimento pessoal e intelectual.

*"Mais vale adquirir sabedoria do que ouro; e  
adquirir entendimento é melhor do que a  
prata."*

Provérbios 16:16

## RESUMO

O presente trabalho apresenta o desenvolvimento de um *software* destinado à determinação dos parâmetros da curva de atenuação das vibrações em desmonte de rochas, fundamentado na equação de atenuação de vibração (encontrada na literatura) e na aplicação de regressão linear a dados experimentais. A ferramenta, elaborada na IDE (*Integrated Development Environment* - Ambiente de Desenvolvimento Integrado) Lazarus, com uso da linguagem de programação de computadores Pascal, foi projetada para automatizar cálculos e minimizar erros manuais, permitindo a obtenção direta dos parâmetros  $k$  (constante do maciço),  $m$  (expoente da função de atenuação) e do coeficiente de determinação  $R^2$ , além de gerar gráficos que facilitam as análises que buscam o controle das vibrações. A metodologia adotada incluiu revisão bibliográfica e estudo de normas técnicas como a NBR 9653:2018. Os cálculos realizados evidenciaram a consistência da ferramenta, com valores de  $R^2$  superiores a 0,95, o que demonstra elevado nível de confiabilidade estatística no ajuste da curva de atenuação. Essa precisão reforça a aplicabilidade do programa em condições reais de campo (após a fase de validação do *software*), tanto em ambientes minerários quanto em obras civis que demandam desmontes controlados. Do ponto de vista prático, o *software* permite ao engenheiro de minas simular diferentes cenários de desmonte, estimando previamente a intensidade das vibrações em função da distância e da carga máxima por espera utilizada. Esse recurso possibilita o planejamento de operações mais seguras, a definição de zonas de exclusão e a adoção de estratégias preventivas para mitigar riscos ambientais, sociais e econômicos auxiliando auditorias, processos de licenciamento e comunicação transparente com comunidades e órgãos reguladores. Os resultados obtidos neste trabalho confirmam que o programa desenvolvido não apenas simplifica o processo de determinação dos parâmetros da lei de atenuação, mas, também, que pode se tornar, após a realização dos testes de validação (não realizados neste trabalho), uma ferramenta prática e de grande relevância para a engenharia de minas. Percebe-se, ainda, que a utilização do aplicativo computacional poderá contribuir para a adequação do plano de fogo às normas técnicas e a consolidação de práticas sustentáveis, reforçando a importância do uso de recursos computacionais no apoio à tomada de decisão em projetos de desmonte.

**Palavras-chave:** Desmonte de rochas; Vibrações; Atenuação sísmica; Regressão linear; *Software* Lazarus; NBR 9653:2018

## A B S T R A C T

This study presents the development of a software designed to determine the parameters of the vibration attenuation curve in rock blasting, based on the vibration attenuation equation and the application of linear regression to experimental data. The tool, developed in the IDE (Integrated Development Environment) Lazarus using the Pascal language, was designed to automate complex calculations and minimize manual errors, allowing the direct determination of the parameters  $K$  (rock mass constant),  $m$  (attenuation slope exponent), and the coefficient of determination  $R^2$ , in addition to generating graphs that facilitate vibration analysis and control. The methodology included a bibliographic review, and study of technical standards such as NBR 9653:2018. The calculations performed evidenced the consistency of the tool, with  $R^2$  values higher than 0.95, which demonstrates a high level of statistical reliability in the adjustment of the attenuation curve. This accuracy reinforces the applicability of the program under real field conditions (after the software validation phase), both in mining environments and in civil works that require controlled blasting. From a practical perspective, the software allows mining engineers to simulate different blasting scenarios, estimating in advance the intensity of vibrations as a function of distance and charge used. This feature enables safer operational planning, the definition of exclusion zones, and the adoption of preventive strategies to mitigate environmental, social, and economic risks. Furthermore, the results generated by the tool serve as support for audits, licensing processes, and transparent communication with communities and regulatory agencies. Therefore, the results confirm that the developed program not only simplifies the process of determining the parameters of the attenuation law, but also can become, after carrying out validation tests (not performed in this academic work), a practical, reliable, and highly relevant tool for mining engineering. Its use contributes for ensuring compliance with technical standards, and consolidating sustainable practices, highlighting the importance of computational resources to support decision-making in blasting projects.

**Keywords:** Rock blasting; Vibrations; Seismic attenuation; Linear regression; Lazarus software; NBR 9653:2018

## **LISTA DE FIGURAS**

Figura 1: Monitoramento sismógrafo com quatro sismógrafos.....	25
Figura 2: Tela inicial da IDE Lazarus.....	26
Figura 3: Janelas do ambiente de desenvolvimento integrado da IDE Lazarus. ....	27
Figura 4: Editor de código do Lazarus.....	28
Figura 5: Interface do aplicativo computacional (ATEN) desenvolvido no trabalho.....	29
Figura 6: Interface do aplicativo ATEN com os resultados obtidos. ....	32
Figura 7: Janela Sobre o programa ATEN.....	35

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>12</b>
1.1	Formulação do Problema .....	13
1.2	Justificativa .....	13
1.2.1	Aspectos ambientais.....	13
1.2.2	Aspectos sociais .....	14
1.2.3	Aspectos econômicos .....	14
1.3	Objetivos .....	14
1.3.1	Objetivo Geral.....	14
1.3.2	Objetivos Específicos.....	15
1.4	Metodologia .....	15
1.5	Estrutura do Trabalho.....	16
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>17</b>
2.1	Geração de Ondas .....	17
2.2	Tipos de Ondas.....	17
2.3	Fatores de Atenuação .....	18
2.4	Mecanismos de Atenuação.....	18
2.5	Fatores Geológicos e Geotécnicos .....	19
2.6	Equação Geral da Lei de Atenuação .....	20
2.7	Metodologia de obtenção da Lei de Atenuação .....	21
2.8	Estimativa de $K$ e $m$ por regressão linear .....	22
2.9	Consequências Técnicas e de Segurança .....	23
2.10	Aplicações Práticas .....	23
<b>3</b>	<b>ESTUDO DE CASO: DADOS DA LITERATURA.....</b>	<b>25</b>
3.1	Situação Após o Cálculo – Resultados Obtidos.....	30
3.2	Interpretação e Análise.....	30
3.3	Resultados obtidos .....	31
3.4	Relatórios e Transparência.....	33
3.5	Limitações do Modelo.....	34
3.6	Sobre o software ATEN .....	34
<b>4</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>36</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>37</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O desmonte de rochas com explosivos é uma técnica essencial para a mineração e obras civis, por possibilitar a fragmentação eficiente de grandes volumes de material em pouco tempo e com custos reduzidos. No entanto, os efeitos colaterais decorrentes dessa prática, como o ultra lançamento, a emissão de ruídos e, sobretudo, as vibrações no solo, podem comprometer a segurança de estruturas próximas e a qualidade de vida das comunidades vizinhas. Entre esses impactos, as vibrações se destacam por seu potencial de gerar desconforto social e riscos estruturais, tornando seu estudo indispensável.

Com a expansão da mineração para áreas cada vez mais próximas de centros urbanos e infraestruturas críticas, cresce a necessidade de monitoramento rigoroso e de ferramentas capazes de prever a propagação das ondas sísmicas. Vibrações excessivas podem resultar em fissuras, processos judiciais, paralisações de atividades e até mesmo acidentes de maiores proporções. Nesse contexto, compreender os mecanismos de atenuação e os fatores que influenciam a propagação das ondas no maciço rochoso é fundamental para garantir operações seguras e sustentáveis.

A Lei de Atenuação das Vibrações surge como ferramenta que permite prever a intensidade das vibrações a partir de parâmetros como carga máxima por retardo (por espera),  $Q_{máx}$ , e distância (D). Entretanto, devido às variações geológicas e operacionais, os parâmetros da lei devem ser ajustados localmente, o que exige campanhas de monitoramento e análises estatísticas. Nesse cenário, o uso de *softwares* especializados pode simplificar cálculos, reduzir erros e otimizar o processo de calibração dos parâmetros.

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um *software* na IDE Lazarus, projetado para calcular de forma automática os parâmetros da curva de atenuação ( $k$  e  $m$ ) e o coeficiente de determinação ( $R^2$ ), a partir de dados experimentais de monitoramento de vibrações. O programa desenvolvido, também, gera gráficos, contribuindo para o planejamento e controle de desmontes. O diferencial da ferramenta está em unir praticidade e acessibilidade, ampliando o alcance da aplicação em contextos acadêmicos e profissionais.

Assim, o presente estudo busca integrar teoria e prática ao disponibilizar uma ferramenta de apoio ao estudante de engenheira de minas, voltada ao controle vibratório e à prevenção de impactos ambientais, sociais e econômicos, contribuindo para tomada de decisões mais seguras e embasadas. Dessa forma, pretende-se contribuir não apenas para a engenharia

de desmonte, mas também para a consolidação de práticas sustentáveis e responsáveis na mineração moderna

## 1.1 Formulação do Problema

O avanço das operações de mineração em direção a áreas urbanas ou próximas a estruturas sensíveis aumenta a preocupação com os impactos gerados pelas vibrações decorrentes de desmontes. Apesar da existência de normas e metodologias consolidadas, como a NBR 9653:2018, a variabilidade geológica e a dificuldade em prever o comportamento vibratório tornam o controle um desafio constante. Surge, então, a necessidade de ferramentas computacionais que permitam calcular de forma prática e confiável os parâmetros de atenuação local.

Portanto, surge um questionamento inevitável: como o estudo e desenvolvimento de um *software* pode auxiliar na determinação dos parâmetros da curva de atenuação, garantindo precisão, confiabilidade e aplicabilidade em campo?

## 1.2 Justificativa

A justificativa para este trabalho está centrada na necessidade de integrar teoria e prática em uma ferramenta acessível ao estudante de engenheira de minas, de forma a otimizar o processo de controle vibratório.

### 1.2.1 Aspectos ambientais

O controle das vibrações decorrentes de desmontes é essencial para a preservação do meio ambiente. Vibrações excessivas podem causar danos a aquíferos subterrâneos, comprometendo a qualidade e a disponibilidade de água para comunidades e ecossistemas. Além disso, podem gerar instabilidade em taludes naturais e artificiais, aumentando o risco de escorregamentos, erosões e processos de instabilidade que comprometem a segurança da atividade mineral e o equilíbrio ambiental. Também é importante destacar que vibrações intensas podem afetar a fauna, especialmente espécies sensíveis a ruídos e tremores, modificando seus hábitos de deslocamento e reprodução. Nesse sentido, a adoção de *softwares* que auxiliam no controle vibratório contribui para práticas de mineração mais sustentáveis, alinhadas às normas ambientais vigentes e às exigências de licenciamento.

### **1.2.2 Aspectos sociais**

As vibrações geradas por desmontes de rochas podem impactar diretamente as comunidades próximas às operações, seja pelo desconforto causado pela percepção dos tremores, seja pelo surgimento de danos em edificações, como fissuras e rachaduras. Tais situações frequentemente resultam em reclamações, desconfiança da população e, em casos mais críticos, em conflitos sociais e processos judiciais contra as empresas. Um controle eficiente das vibrações, por meio de monitoramento e modelagem adequada, reduz o desconforto da população, fortalece a relação de confiança entre empresa e sociedade e demonstra responsabilidade socioambiental. Além disso, práticas transparentes de comunicação, apoiadas em relatórios técnicos claros e fundamentados, aumentam a credibilidade da mineradora junto à comunidade e órgãos fiscalizadores, minimizando riscos de paralisações e embargos.

### **1.2.3 Aspectos econômicos**

Sob a perspectiva econômica, o controle inadequado das vibrações pode gerar prejuízos significativos para uma operação mineral. Desmontes mal planejados acarretam retrabalhos, indenizações a moradores e empresas vizinhas, paralisações judiciais e até a perda de licenças ambientais, aumentando os custos operacionais e reduzindo a produtividade. Em contrapartida, a utilização de ferramentas computacionais que antecipem os impactos vibratórios permite planejar desmontes mais precisos, garantindo maior previsibilidade e eficiência. Esse tipo de tecnologia contribui para a redução de riscos financeiros e otimiza o uso de explosivos, resultando em economia de recursos e aumento da competitividade da empresa. Ademais, ao garantir conformidade com normas técnicas e ambientais, o empreendimento se protege de multas e sanções, assegurando maior estabilidade econômica e continuidade operacional.

## **1.3 Objetivos**

### **1.3.1 Objetivo Geral**

Desenvolver um *software* usando a IDE (*Integrated Development Environment* - Ambiente de Desenvolvimento Integrado) Lazarus para cálculo dos parâmetros da lei de atenuação de vibrações em desmontes de rochas.

### 1.3.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos foram:

- Implementar uma interface gráfica *user friendly* que permita a inserção de dados experimentais de campo, podendo ser utilizada como recurso didático-pedagógico na área de desmonte de rochas.
- Utilizar dados da literatura para o desenvolvimento do aplicativo computacional.
- Automatizar o cálculo dos parâmetros  $K$  e  $m$  da curva de atenuação por regressão linear.
- Avaliar a qualidade do ajuste por meio do coeficiente de determinação  $R^2$ .

### 1.4 Metodologia

Inicialmente, foi realizada uma pesquisa em livros, artigos científicos, dissertações e normas técnicas nacionais e internacionais. Essa etapa permitiu compreender os fundamentos da propagação de ondas sísmicas, os mecanismos de atenuação e a importância da determinação dos parâmetros empíricos da lei de atenuação. Foram analisadas, especialmente, as contribuições de Valdir Costa e Silva (2019), além da norma brasileira NBR 9653:2018.

Posteriormente, foi desenvolvido um *software* utilizando a linguagem de programação de computadores Pascal e o aplicativo Lazarus. A ferramenta foi estruturada para receber como dados de entrada as distâncias dos pontos de medição, as cargas máximas por espera e as velocidades de vibração registradas. A partir dessas informações, o sistema realiza o cálculo da distância reduzida  $\left(\frac{D}{\sqrt{Q}}\right)$ , aplica a regressão linear e determina os parâmetros  $K$  e  $m$  da curva de atenuação, e o coeficiente de determinação  $R^2$  que avalia a qualidade do ajuste da reta de atenuação aos dados de entrada. Foi, também, incorporado recurso gráfico na interface do aplicativo.

Utilizando um conjunto de dados disponíveis na literatura (SILVA, 2019 - capítulo 8.3), o *software* realizou os cálculos dos parâmetros da curva de atenuação, possibilitando comparar os resultados obtidos com os valores de referência, verificando sua consistência.

## 1.5 Estrutura do Trabalho

O trabalho está estruturado em quatro capítulos principais. No primeiro capítulo, foi feita uma breve introdução ao tema, contendo a formulação do problema, a justificativa, o objetivo geral e os específicos, a metodologia bem como a estrutura do trabalho. No segundo capítulo, foi desenvolvida a revisão bibliográfica, abordando a geração e os tipos de ondas, os fatores e mecanismos de atenuação, a influência de aspectos geológicos e geotécnicos, a equação geral da lei de atenuação e sua metodologia de obtenção, a estimativa dos parâmetros  $K$  e  $m$  por regressão linear, bem como as consequências técnicas e de segurança e as principais aplicações práticas. O terceiro capítulo traz o estudo de caso, no qual o *software* desenvolvido em Lazarus foi aplicado a dados encontrados na literatura, detalhando a situação inicial, o processamento e cálculo dos parâmetros procurados e a interpretação dos resultados. Por fim, o quarto capítulo reúne as considerações finais, destacando a importância da lei de atenuação no planejamento de desmontes, as contribuições do *software* para a previsão e controle das vibrações, os aspectos técnicos, ambientais e sociais envolvidos, além das limitações observadas e recomendações para trabalhos futuros, seguido das referências bibliográficas utilizadas.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Geração de Ondas

A detonação de explosivos em um furo gera uma onda de choque inicial de altíssima pressão que se propaga pelo maciço. Essa onda comprime as partículas da rocha, originando ondas elásticas que transportam energia pelo meio. A maior parte da energia se destina à fragmentação da rocha, mas uma fração significativa é dissipada em forma de vibração.

A magnitude dessas vibrações depende de parâmetros como a quantidade de explosivo por atraso (carga máxima por espera), o confinamento do furo, o diâmetro da perfuração e a geometria do plano de fogo. Carregamentos mal distribuídos ou falta de confinamento adequado podem amplificar significativamente a intensidade da vibração transmitida ao terreno.

A propagação inicial ocorre de forma esférica a partir da fonte, mas rapidamente a energia se distribui de acordo com as características do maciço, refletindo, refratando e se dissipando nas interfaces geológicas. Essa variabilidade explica por que desmontes semelhantes podem gerar diferentes níveis de vibração em pontos distintos.

Portanto, a geração de ondas não depende apenas da carga detonada, mas também da interação complexa entre explosivo, rocha e geometria de detonação. Esse conjunto de fatores justifica a necessidade de monitoramentos em campo (PERSSON,1994)

### 2.2 Tipos de Ondas

As ondas resultantes da detonação se dividem em três grandes grupos: ondas de corpo P e S e ondas de superfície Rayleigh e Love.

As ondas P (primárias) são longitudinais e se propagam por compressão e dilatação, sendo as mais rápidas. Já as ondas S (secundárias) são transversais, propagando-se apenas em sólidos, com movimento perpendicular à direção de propagação. Ambas formam a base das ondas internas do maciço.

As ondas de superfície, por sua vez, são mais lentas, mas transportam grande quantidade de energia por longas distâncias. As ondas de Rayleigh geram movimentos elípticos das partículas, enquanto as de Love provocam movimentos horizontais de cisalhamento. São essas ondas que, em geral, estão mais relacionadas aos danos estruturais percebidos em edificações.

O comportamento combinado desses três tipos de ondas explica a diversidade de efeitos observados em campo e a complexidade do estudo das vibrações (SILVA, 2019).

### **2.3 Fatores de Atenuação**

A propagação das vibrações sofre atenuação por múltiplos mecanismos. O primeiro deles é a atenuação geométrica, que se refere à dispersão natural da energia conforme as ondas se expandem em volumes cada vez maiores. Isso resulta em redução da intensidade vibratória com o aumento da distância.

Outro mecanismo é a atenuação anelástica, que envolve a absorção de energia pelo maciço, convertendo parte da vibração em calor e deformações internas. Esse fenômeno é fortemente influenciado pelo grau de fraturamento, pela saturação e pela resistência das rochas.

Além disso, fenômenos de reflexão, refração e dispersão ocorrem quando as ondas encontram interfaces geológicas. Isso pode gerar concentrações locais de vibração ou, ao contrário, zonas de amortecimento. Essas variações explicam a heterogeneidade observada em monitoramentos reais.

A propagação também é influenciada por condições superficiais, como topografia e presença de estruturas artificiais, que podem amplificar ou reduzir a vibração percebida (USBM RI 8507).

### **2.4 Mecanismos de Atenuação**

A atenuação das vibrações pode ser entendida como o processo de redução gradual da intensidade das ondas sísmicas à medida que se propagam pelo maciço rochoso. Esse fenômeno é essencial, pois explica por que as vibrações mais fortes são registradas nas proximidades da fonte, enquanto em locais mais afastados seus efeitos são muito menos significativos. Dois mecanismos principais estão envolvidos: a atenuação geométrica e a atenuação por dissipação.

A atenuação geométrica decorre da expansão das frentes de onda. Logo após a detonação, a energia é distribuída em esferas concêntricas que se afastam do ponto de origem. À medida que o raio aumenta, a mesma quantidade de energia precisa ocupar um volume maior, resultando em diminuição da amplitude. Esse princípio é universal e independe das características específicas do maciço, sendo comparável ao enfraquecimento do som ou da luz quando se afastam da fonte.

Já a atenuação por dissipação está associada às propriedades físicas e geomecânicas da rocha. Parte da energia vibratória é absorvida e convertida em calor, microfissuras e atrito interno entre partículas e descontinuidades. Em maciços fraturados, a dissipação tende a ser intensa, pois cada descontinuidade funciona como um obstáculo que absorve parte da energia. Em rochas densas e homogêneas, ao contrário, a dissipação é reduzida, permitindo que as ondas percorram maiores distâncias sem perda significativa.

Além desses mecanismos principais, há também os efeitos de reflexão, refração e interferência. Quando as ondas encontram camadas com propriedades diferentes, parte da energia pode ser refletida ou refratada, alterando a direção e a intensidade. Isso gera fenômenos de amplificação localizada ou de redução adicional, contribuindo para a variabilidade observada em campo. Por essa razão, a previsão de vibrações exige a calibração experimental da lei de atenuação em cada localidade. (SILVA, 2019).

## 2.5 Fatores Geológicos e Geotécnicos

Os fatores geológicos desempenham papel determinante na forma como as vibrações se propagam. A litologia, a densidade e a elasticidade da rocha influenciam diretamente a velocidade das ondas e sua capacidade de transmitir energia. Rochas duras, como granitos e basaltos, são altamente eficientes na condução de vibrações, resultando em maiores distâncias de propagação. Já rochas mais brandas ou alteradas tendem a absorver mais energia, promovendo maior atenuação.

Outro aspecto fundamental é o grau de fraturamento do maciço. A presença de juntas, falhas e planos de fraqueza cria múltiplas interfaces de reflexão e dispersão de energia. Em maciços intensamente fraturados, a vibração é rapidamente dissipada, mas de forma irregular, podendo gerar concentrações localizadas em determinadas direções. Essa variabilidade torna mais complexa a aplicação universal da lei de atenuação, reforçando a necessidade de monitoramento específico.

A presença de água no maciço também influencia significativamente. A saturação pode aumentar a transmissão de ondas de compressão, mas também introduz efeitos de amortecimento em descontinuidades preenchidas por fluido. Esse fenômeno pode modificar tanto a velocidade de propagação quanto a taxa de atenuação das vibrações, sendo um fator crítico em desmontes próximos a aquíferos ou barragens.

Por fim, o nível de confinamento do explosivo e a geometria do desmonte afetam a transferência de energia ao terreno. Explosivos detonados em ambientes bem confinados transmitem mais energia ao maciço, enquanto desmontes próximos à superfície tendem a liberar parte da energia em forma de *ar-blast*. Dessa forma, o comportamento vibratório resulta da interação entre propriedades geológicas, parâmetros de projeto e condições operacionais (ABNT NBR 9653:2018).

## 2.6 Equação Geral da Lei de Atenuação

A Lei de Atenuação das Vibrações é expressa por uma fórmula empírica (equação 1), encontrada em Silva (2019):

$$V = K \times \left( \frac{D}{\sqrt{Q}} \right)^{-m} \quad (1)$$

V - velocidade de partícula de pico (PPV, em mm/s);

D - distância entre a fonte e o receptor (em metros);

Q - carga máxima por espera (em kg);

K - constante específica do maciço rochoso;

m - expoente de atenuação (- m = coeficiente angular da curva de atenuação).

Essa equação permite relacionar diretamente a intensidade vibratória com os parâmetros de projeto e as condições locais.

O parâmetro *K* representa o nível de vibração inicial próximo à fonte. Seu valor é fortemente dependente das características do maciço e do plano de fogo. Um valor elevado desse parâmetro indica que o terreno transmite vibrações mais intensas, exigindo maior cautela no planejamento. Já o expoente *m* expressa a taxa de atenuação, ou seja, a rapidez com que a intensidade decai com a distância. Valores altos de *m* indicam forte dissipação, enquanto valores baixos significam propagação mais duradoura.

Para facilitar a obtenção desses parâmetros por meio de regressão linear, a equação pode ser linearizada aplicando logaritmos (equação 2):

$$\log(V) = \log(K) - m \times \log\left(\frac{D}{\sqrt{Q}}\right) \quad (2)$$

que transforma a relação 1 em uma equação linear do tipo  $Y = aX + b$ , sendo:

$\log$  = logaritmo decimal

$Y = \log(V)$

$X = \log(D/\sqrt{Q})$

$b = \log(K)$  (coeficiente linear)

$a = -m$  (coeficiente angular da reta).

Essa transformação converte a relação original em uma função linear, em que o intercepto corresponde a  $\log(K)$  e, o coeficiente angular, corresponde a  $(-m)$ . Essa abordagem permite o uso direto de técnicas estatísticas de regressão linear para ajustar dados de campo.

Apesar de sua simplicidade, a equação é altamente eficaz e consolidada em normas técnicas internacionais. No entanto, deve-se enfatizar que os parâmetros obtidos são específicos para cada local. Isso significa que um mesmo valor de carga e distância pode gerar diferentes PPV em regiões distintas, o que reforça a natureza empírica e local da lei (SILVA, 2019).

## 2.7 Metodologia de obtenção da Lei de Atenuação

A determinação da lei de atenuação depende diretamente de campanhas de monitoramento em campo. O processo começa pelo planejamento da coleta de dados, quando são definidos os pontos de medição em locais representativos, considerando distâncias variadas em relação à frente de desmonte. Essa etapa inicial é crítica, pois uma seleção inadequada de pontos pode comprometer a confiabilidade dos parâmetros  $K$  e  $m$  que serão obtidos posteriormente.

Durante os desmontes de teste, são instalados sismógrafos triaxiais calibrados, capazes de registrar as componentes das vibrações (vertical, longitudinal e transversal). É fundamental que o sensor esteja bem acoplado ao solo para evitar distorções na leitura. Os parâmetros registrados incluem a carga máxima por espera ( $Q$  ou  $Q_{\max}$ ), a distância ao ponto monitorado ( $D$ ) e a velocidade de partícula de pico (PPV), além da frequência dominante da vibração.

Após a coleta, os dados são processados matematicamente. O primeiro passo é calcular a distância reduzida, definida como  $\left(\frac{D}{\sqrt{Q}}\right)$ , sendo  $Q = Q_{\text{máx}}$ . Essa variável reúne, em um único termo, as duas grandezas fundamentais do modelo: a distância e a carga. Em seguida, aplica-se a transformação logarítmica, convertendo a equação original em uma forma linear que pode ser ajustada por regressão estatística.

O resultado da regressão fornece os parâmetros  $K$  e  $m$ , específicos para as condições locais do desmonte. Esse procedimento deve ser repetido periodicamente, sobretudo quando há mudanças significativas na geologia, no tipo de explosivo ou na geometria do plano de fogo. A metodologia, portanto, une medições de campo e análises estatísticas para criar um modelo preditivo robusto e confiável (SILVA, 2019).

## 2.8 Estimativa de $K$ e $m$ por regressão linear

O cálculo de  $K$  e  $m$  a partir dos dados de campo é realizado por meio de regressão linear em escala logarítmica. Na prática, constrói-se um gráfico onde o eixo vertical representa  $\log(V)$  e o eixo horizontal representa  $\log\left(\frac{D}{\sqrt{Q}}\right)$ , sendo  $Q = Q_{\text{máx}}$ . A distribuição dos pontos tende a se alinhar em torno de uma reta, cujo intercepto fornece o  $\log(K)$  e, cuja inclinação, é equivalente a “ $-m$ ”.

A precisão desse ajuste depende da quantidade e qualidade dos dados coletados. Um banco de dados amplo, com medições em diferentes distâncias e cargas, tende a produzir parâmetros mais confiáveis. A presença de erros de medição pode distorcer os resultados, sendo recomendável aplicar análises estatísticas adicionais para verificar a consistência dos pontos.

O coeficiente de determinação  $R^2$  é utilizado para avaliar a qualidade do ajuste. Valores próximos de 1 indicam que a regressão explica bem a variabilidade dos dados, enquanto valores baixos sugerem que outros fatores, além da distância e da carga máxima por espera, estão influenciando a propagação das vibrações. Assim, o valor de  $R^2$  funciona como um indicador de confiabilidade do modelo construído.

A regressão linear, portanto, não é apenas um procedimento matemático, mas uma etapa fundamental de calibração. É ela que transforma medições pontuais em uma lei empírica capaz de prever o comportamento vibratório de desmontes futuros, sendo indispensável para o planejamento seguro das operações (SILVA, 2019).

## 2.9 Consequências Técnicas e de Segurança

As vibrações geradas por desmontes podem ter consequências significativas tanto em nível técnico quanto em termos de segurança. Em edificações, os efeitos mais comuns são fissuras em paredes de alvenaria, desprendimento de revestimentos e, em casos extremos, danos estruturais em fundações ou pilares. Embora, muitas vezes, as fissuras sejam apenas estéticas, a percepção de risco por parte dos moradores pode gerar conflitos sociais e demandas legais contra as empresas responsáveis.

Infraestruturas críticas como barragens, túneis, pontes e dutos, apresentam ainda maior vulnerabilidade. Vibrações excessivas podem comprometer a estabilidade de fundações, provocar recalques diferenciais ou afetar o desempenho de materiais de alta sensibilidade, como juntas de dilatação e concretos de idade avançada. Isso exige que limites mais restritivos sejam aplicados a essas estruturas, muito abaixo dos valores tolerados para edificações comuns.

Do ponto de vista social, vibrações perceptíveis frequentemente geram desconforto e insegurança nas comunidades próximas. A sensação de tremor, ainda que abaixo dos limites técnicos de dano, pode ser interpretada como ameaça à segurança das residências, aumentando as reclamações. Esse aspecto demonstra que o controle de vibrações não é apenas uma questão de engenharia, mas também de gestão socioambiental (NBR 9653:2018).

A negligência no controle pode resultar em processos judiciais, multas e até na suspensão das atividades. Assim, a análise das consequências técnicas e de segurança reforça a importância de um monitoramento sistemático, da aplicação da lei de atenuação e do cumprimento rigoroso das normas vigentes, como a NBR 9653.

## 2.10 Aplicações Práticas

A principal aplicação da lei de atenuação está no planejamento de desmontes futuros. Com base nos parâmetros  $K$  e  $m$  obtidos por calibração local, é possível prever a intensidade das vibrações em diferentes distâncias e cargas. Essa previsão permite definir limites para a carga máxima por espera e estabelecer zonas de exclusão, assegurando que as vibrações permaneçam abaixo dos valores normativos.

Em áreas urbanizadas, a lei de atenuação auxilia na compatibilização entre a produção e a convivência com comunidades próximas. Ao prever os níveis de vibração, o engenheiro pode ajustar o plano de fogo para minimizar impactos e comunicar previamente às partes

interessadas que os valores estarão dentro dos limites de segurança. Essa transparência fortalece a relação de confiança entre empresas e sociedade.

Na esfera legal, a aplicação da lei fornece suporte documental para demonstrar conformidade com normas como a NBR 9653:2018. Relatórios técnicos contendo previsões de PPV (Velocidade de Partícula de Pico), comparações com limites normativos e registros de monitoramento funcionam como evidências de responsabilidade técnica e ambiental, protegendo as empresas de litígios.

A lei de atenuação, também, é empregada em estudos comparativos entre diferentes estratégias de desmonte. Ao variar diâmetros de furos, tipos de explosivo ou sequências de ignição, o engenheiro pode analisar a resposta vibratória e escolher a configuração mais eficiente e segura. Assim, além de prevenir danos, a lei se torna um instrumento de otimização operacional (NBR 9653:2018).

### 3 ESTUDO DE CASO: DADOS DA LITERATURA

O presente estudo tem como finalidade utilizar os dados propostos por Silva (2019, capítulo 8.3) diretamente no programa desenvolvido em Lazarus, de modo a verificar a capacidade da ferramenta em calcular os parâmetros da Lei de Atenuação da Velocidade de Vibração. A determinação destes parâmetros motivou o nome dado ao aplicativo computacional desenvolvido: ATEN (de atenuação).

O programa permite inserir distâncias, carga máxima por espera e velocidades registradas em campo, processando automaticamente os cálculos de  $\left(\frac{D}{\sqrt{Q}}\right)$ , ajustando a curva de atenuação e fornecendo os parâmetros característicos do terreno ( $K$  e  $m$ ) e o coeficiente de determinação  $R^2$ .

Na figura 1, tem-se o monitoramento realizado com quatro sismógrafos, posicionados em diferentes distâncias ( $D$ ) da frente de desmonte, obtidos de Silva (2019). Para cada posição, foram registrados os valores de velocidade de vibração ( $V$ ) para uma determinada carga máxima por espera ( $Q = Q_{\text{máx}} = 60 \text{ kg}$ ).

- Ponto 1:  $V_1 = 45 \text{ mm/s}$ ,  $D_1 = 35 \text{ m}$
- Ponto 2:  $V_2 = 23 \text{ mm/s}$ ,  $D_2 = 70 \text{ m}$
- Ponto 3:  $V_3 = 12 \text{ mm/s}$ ,  $D_3 = 105 \text{ m}$
- Ponto 4:  $V_4 = 5 \text{ mm/s}$ ,  $D_4 = 150 \text{ m}$

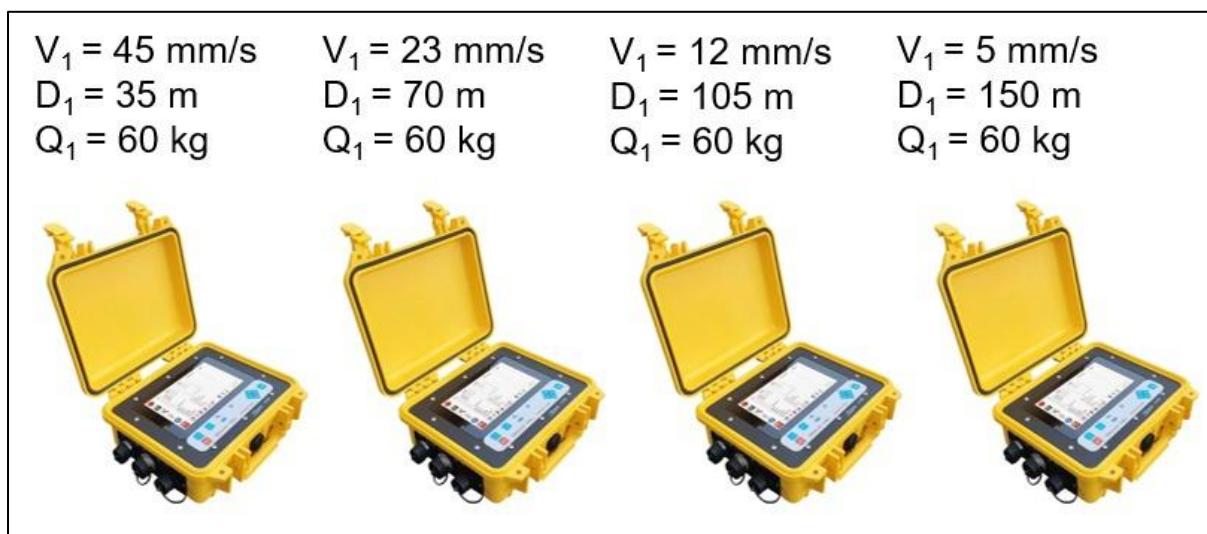


Figura 1: Monitoramento sismógrafo com quatro sismógrafos.

Fonte: Silva, 2019.

O aplicativo computacional desenvolvido neste projeto, denominado ATEN, teve seu código implementado no *software* Lazarus (figura 2), uma IDE (*Integrated Development Environment* - Ambiente de Desenvolvimento Integrado) gratuita e multiplataforma, que se destaca por proporcionar rapidez na criação de aplicações. Essa ferramenta utiliza a linguagem de programação Pascal e conta com uma ampla biblioteca de componentes visuais, o que facilita a programação e criação de interfaces *user friendly*, tornando o processo de desenvolvimento mais ágil e organizado.

O aplicativo Lazarus possibilita o desenvolvimento de *softwares* que podem ser executados em diferentes sistemas operacionais como Windows, Linux e MacOS. Dessa forma, o programador consegue garantir compatibilidade e consistência em seus projetos, reduzindo retrabalho e ampliando a portabilidade das aplicações.



Figura 2: Tela inicial da IDE Lazarus.

Observa-se na figura 3 que a interface do Lazarus foi projetada para facilitar o fluxo de trabalho durante o desenvolvimento de aplicações, oferecendo uma organização clara de suas ferramentas. No lado esquerdo da tela, encontra-se o *Inspetor de Objetos*, responsável por listar todos os componentes adicionados ao formulário, como botões, caixas de texto e rótulos, permitindo uma visualização estruturada da interface gráfica em construção. Logo abaixo, a área de *Propriedades* possibilita a personalização desses componentes, ajustando atributos como dimensões, posição, cores e comportamentos. À direita da janela *Inspetor de Objetos*, ainda na figura 3, está localizado o *Editor de Código*, espaço dedicado à implementação da

lógica da aplicação (o código-fonte). Esse recurso garante a integração direta entre a interface visual e o código implementado, tornando o processo mais intuitivo e eficiente. Dessa forma, o Lazarus proporciona um ambiente unificado, em que o design gráfico e a programação trabalham de maneira complementar, favorecendo a produtividade do desenvolvedor.

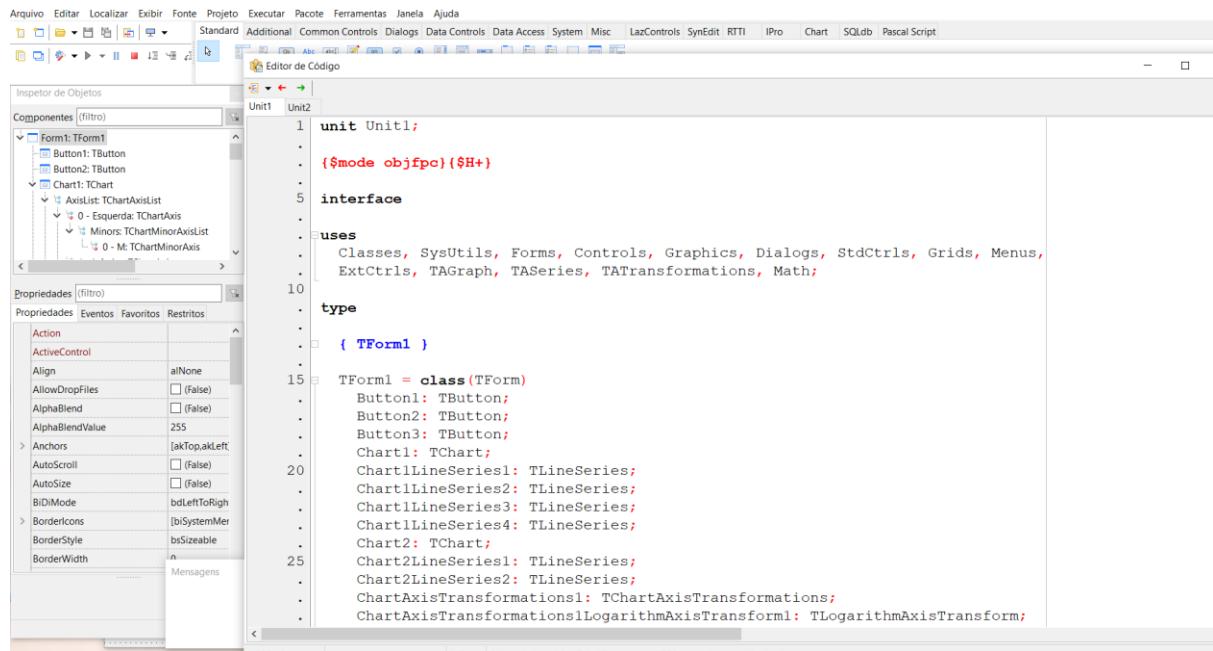
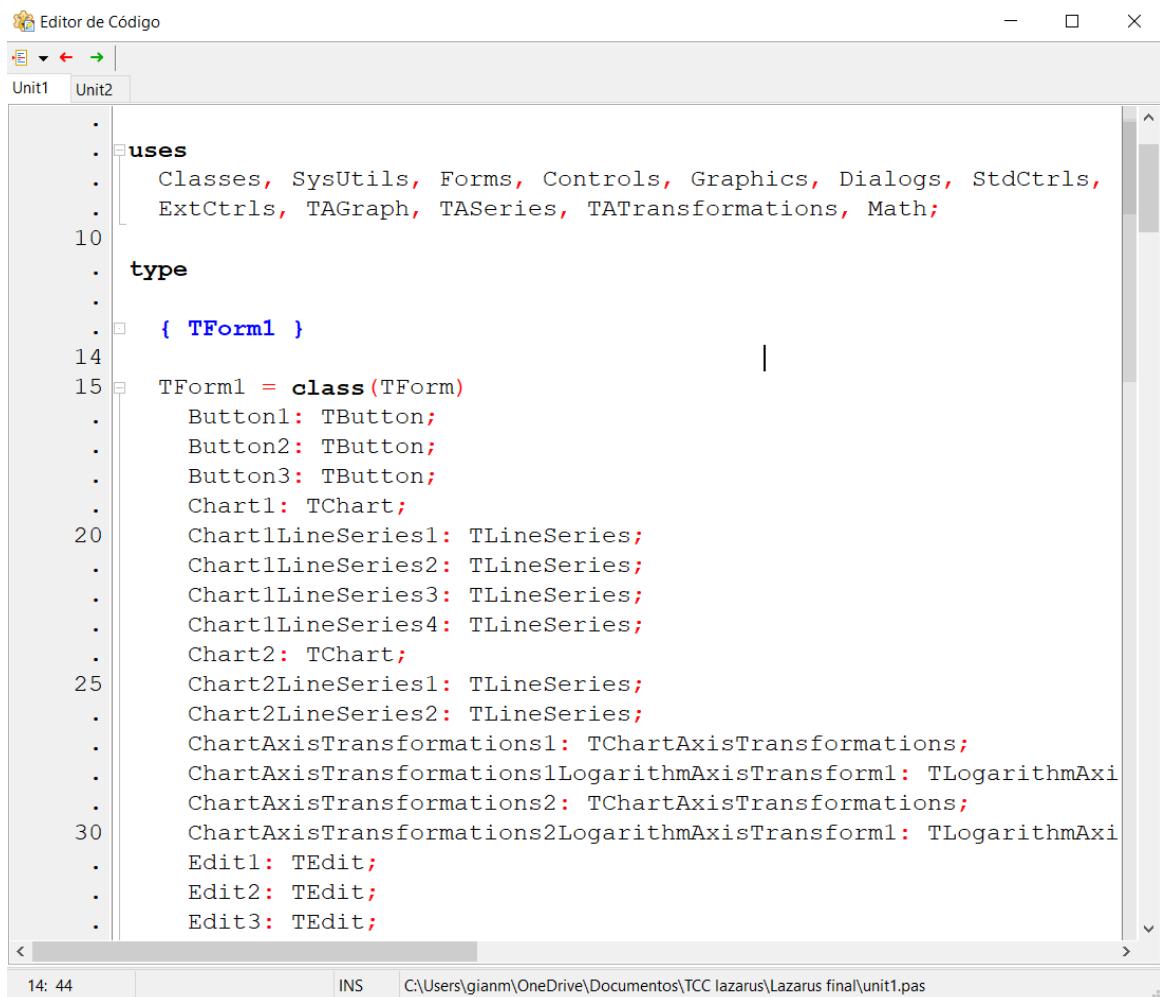


Figura 3: Janelas do ambiente de desenvolvimento integrado da IDE Lazarus.

Observa-se na figura 4 o código inicial responsável pela configuração dos componentes e variáveis aplicados no plano de fogo. Dentro da estrutura TForm1, são definidos componentes como botões (TButton), gráficos (TChart) e séries de linhas (TLineSeries), que juntos formam uma interface interativa voltada para a inserção e visualização de informações. Essa base permite que o sistema ofereça recursos gráficos e funcionais capazes de apoiar o desenvolvimento do projeto.

Além disso, cada campo de entrada (TEdit) foi projetado para corresponder a parâmetros específicos para o cálculo dos parâmetros da função de atenuação da vibração, como a distância até o ponto monitorado, a carga máxima por espera (na interface,  $Q_{\text{máx}} = Q$ ) e a velocidade de partícula registrada ( $V$ ). Esses dados são fundamentais para a determinação da lei de atenuação e para a execução de simulações que auxiliam no controle dos efeitos vibratórios. Com essa organização, o usuário consegue inserir e ajustar variáveis diretamente na interface, tornando o processo de análise mais prático, dinâmico e eficiente na avaliação do comportamento das vibrações em diferentes condições de desmonte.



```
uses
  Classes, SysUtils, Forms, Controls, Graphics, Dialogs, StdCtrls,
  ExtCtrls, TAGraph, TASeries, TATransformations, Math;
type
  { TForm1 }
TForm1 = class(TForm)
  Button1: TButton;
  Button2: TButton;
  Button3: TButton;
  Chart1: TChart;
  Chart1LineSeries1: TLineSeries;
  Chart1LineSeries2: TLineSeries;
  Chart1LineSeries3: TLineSeries;
  Chart1LineSeries4: TLineSeries;
  Chart2: TChart;
  Chart2LineSeries1: TLineSeries;
  Chart2LineSeries2: TLineSeries;
  ChartAxisTransformations1: TChartAxisTransformations;
  ChartAxisTransformations1LogarithmAxisTransform1: TLogarithmAxisTransform;
  ChartAxisTransformations2: TChartAxisTransformations;
  ChartAxisTransformations2LogarithmAxisTransform1: TLogarithmAxisTransform;
  Edit1: TEdit;
  Edit2: TEdit;
  Edit3: TEdit;
end;
```

Figura 4: Editor de código do Lazarus.

Observa-se, na figura 5, que a interface disponibiliza campos de entrada (TEdit) para a inserção dos principais parâmetros utilizados no cálculo de atenuação da velocidade de vibração, como Distância (D), Carga máxima por espera ( $Q = Q_{\max}$ ) e Velocidade das Ondas de Vibração (V). Esses dados são fundamentais para a execução dos cálculos e podem ser ajustados de forma prática pelo usuário, permitindo maior flexibilidade na análise.

O botão “Calcular” realiza as operações a partir das informações fornecidas, retornando como resultado os valores de  $K$ ,  $m$  e  $R^2$ . À direita da tela, encontra-se o gráfico que representa a Lei de Atenuação da Velocidade de Vibração, enquanto na parte inferior estão dispostos os campos adicionais de entrada, como distância, carga máxima, velocidade e Fator de Segurança (FS). Essa configuração possibilita alterar os valores diretamente, ajustando a reta do gráfico e facilitando a estimativa dos resultados.

Na figura 5 observa-se a interface do programa antes da execução da análise de regressão que será realizada pelo aplicativo. Os dados de entrada fornecidos pelo usuário foram:

- Carga máxima por espera:  $Q = Q_{\text{máx}} = 60 \text{ kg}$
- Pontos de medição contendo:
  - ✓ Distâncias (D) de 35, 70, 105 e 150 metros
  - ✓ Velocidades registradas (V) de 45, 23, 12 e 5 mm/s

A tabela apresenta apenas os valores de  $D$  e  $V$ , acompanhados de uma coluna reservada para  $\left(\frac{D}{\sqrt{Q}}\right)$ , ainda não preenchida. O gráfico à direita encontrava-se “vazio”, não exibindo nem os pontos de medição nem a curva característica da lei de atenuação.

Além disso, os campos destinados à exibição dos parâmetros  $k$ ,  $m$  e  $R^2$  estavam em branco. Ou seja, até este momento, o sistema tinha apenas os dados de entrada, sem, ainda, ter realizado os cálculos da regressão linear que dariam origem à equação ajustada.

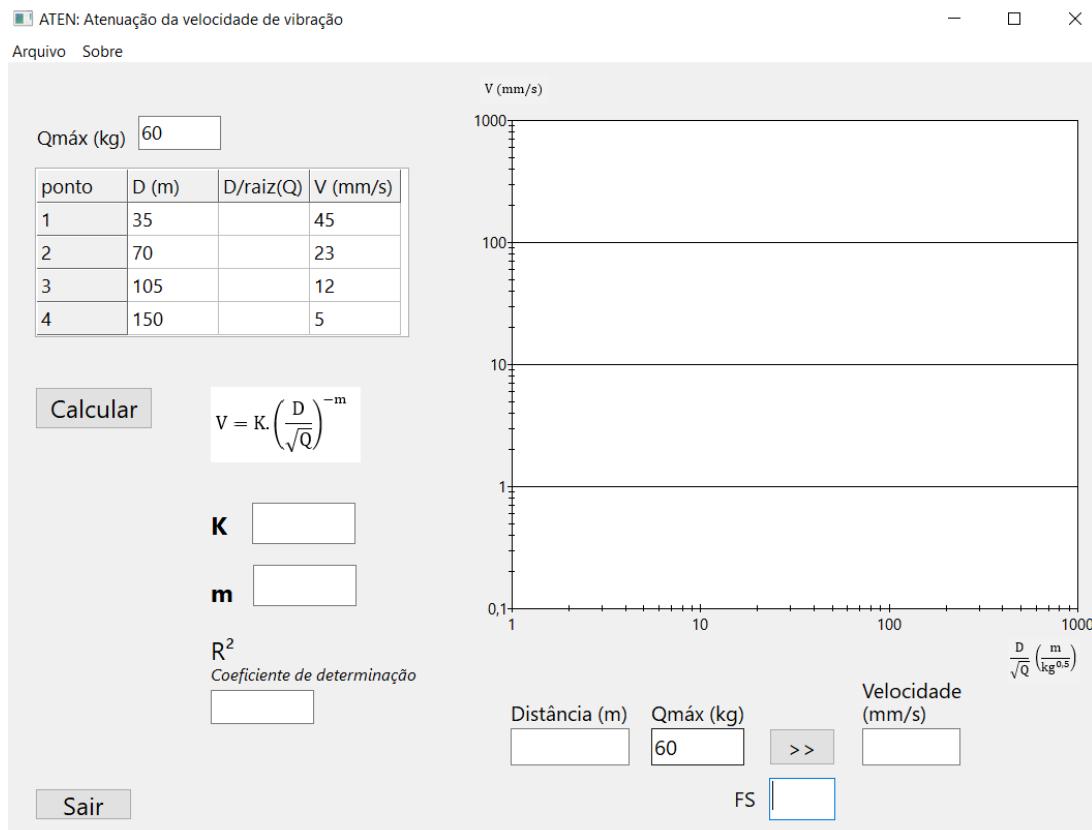


Figura 5: Interface do aplicativo computacional (ATEN) desenvolvido no trabalho.

### 3.1 Situação Após o Cálculo – Resultados Obtidos

Na figura 6, após a ativação do botão “Calcular”, o programa processou os dados e realizou o ajuste da equação de atenuação. O primeiro efeito visível foi o preenchimento automático da coluna  $\left(\frac{D}{\sqrt{Q}}\right)$  na tabela (sendo  $Q = Q_{\text{máx}}$ ), com valores de 4,52; 9,04; 13,56 e 19,36, respectivamente aos pontos de 1 a 4. Esse parâmetro é essencial, pois permite a normalização da distância em função da carga máxima por espera utilizada.

O gráfico à direita do formulário da figura 6 passou a exibir:

- Os pontos de medição, representados por marcadores quadrados.
- A reta de regressão ajustada, traçada com base na equação empírica e nos parâmetros  $K$  e  $m$ .

Nos campos de saída, foram exibidos os seguintes resultados:

- $K = 472,67$
- $m = 1,47$
- $R^2 = 0,9525$

O valor de  $K$  representa a constante local de vibração, que depende das propriedades do terreno e do tipo de explosivo utilizado. Já o expoente  $m$  indica a taxa de atenuação da vibração em função da distância, sendo, neste caso, próximo de 1,5.

O coeficiente de determinação  $R^2 = 0,9525$  demonstra que a regressão apresentou um bom ajuste, indicando que cerca de 95% da variação dos dados experimentais é explicada pela equação ajustada.

### 3.2 Interpretação e Análise

Os resultados mostram um comportamento coerente com a teoria da atenuação sísmica. Observa-se que a velocidade de vibração diminui progressivamente à medida que a distância aumenta, seguindo um padrão exponencial negativo, como previsto pela fórmula.

- No ponto mais próximo (35 m), a velocidade registrada foi relativamente alta (45 mm/s).
- Já a 150 m da fonte, a velocidade caiu para apenas 5 mm/s, evidenciando a dissipação da energia vibratória no maciço rochoso.

A reta ajustada no gráfico evidencia que os dados seguem bem o modelo empírico, com pequena dispersão em torno da curva. Esse comportamento indica que os ensaios experimentais foram consistentes e que a equação obtida poderia ser utilizada para previsões futuras de vibração em condições semelhantes.

O modelo, também, permite estimar a distância segura para que determinada velocidade limite não seja ultrapassada, bem como avaliar a influência da carga máxima por espera no nível de vibração gerado. Isso é extremamente útil em projetos de desmonte controlado, em áreas próximas a comunidades ou estruturas sensíveis.

### 3.3 Resultados obtidos

Observa-se na figura 6 análises das duas situações que evidenciam o potencial da ferramenta desenvolvida. Antes do cálculo, o sistema apenas armazenava os dados de entrada, mas, após a execução, foi capaz de:

1. Normalizar os dados através do cálculo de  $\left(\frac{D}{\sqrt{Q}}\right)$ , sendo  $Q = Q_{\text{máx}}$ .
2. Ajustar a curva de atenuação de acordo com o modelo matemático proposto.
3. Determinar os parâmetros característicos ( $K$  e  $m$ ) do terreno estudado.
4. Avaliar a qualidade do ajuste por meio do coeficiente de determinação  $R^2$ .

Os valores obtidos de  $K = 472,67$  e  $m = 1,47$  revelam características específicas da propagação das vibrações nesse maciço rochoso. O alto valor de  $R^2$  ( $= 0,9525$ ) demonstra, com bases estatísticas, a confiabilidade do modelo, o que reforça sua aplicabilidade em estudos de controle de vibração.

Os cálculos confirmam que o programa não apenas organiza os dados, mas também fornece uma ferramenta prática e confiável para análise de vibrações sísmicas, e que poderá possibilitar ao engenheiro de minas (após a realização de testes adicionais com o uso do aplicativo) prever impactos e adotar medidas preventivas em áreas próximas a operações de desmonte.

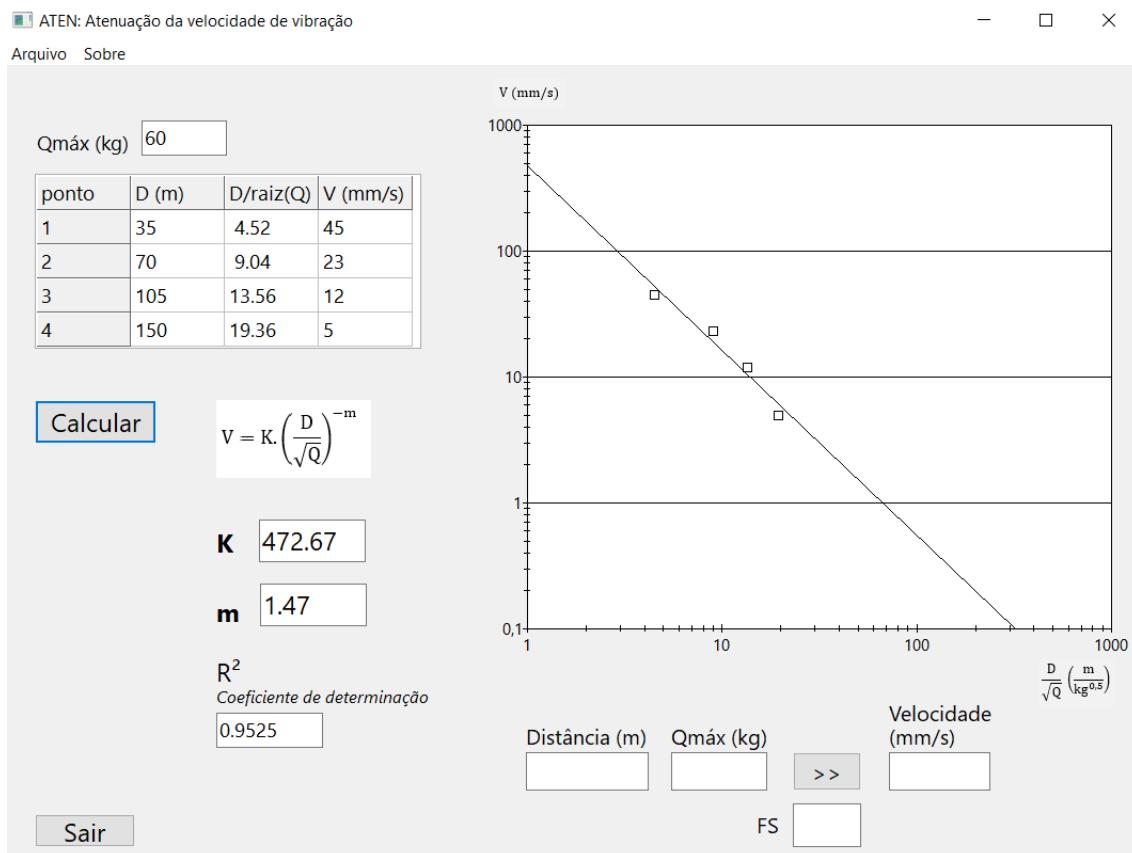


Figura 6: Interface do aplicativo ATEN com os resultados obtidos.

A parte da interface localizada abaixo do gráfico, funciona como um módulo adicional de cálculo para o usuário. Enquanto a tabela e o gráfico mostram os resultados obtidos a partir dos pontos experimentais inseridos, essa seção permite realizar simulações personalizadas com base nos parâmetros da equação ajustada.

- Distância (m): o usuário pode inserir qualquer valor de distância para verificar a velocidade prevista de vibração nesse ponto.
- Qmáx (kg): correspondendo ao valor de Q na equação teórica, este campo permite que seja alterada a carga máxima por espera, permitindo avaliar como a variação deste dado influencia os resultados.
- Velocidade (mm/s): mostra o valor calculado da velocidade correspondente à distância e carga máxima inseridas.
- FS (Fator de Segurança): campo que pode ser usado para aplicar margens de segurança nos cálculos, garantindo que os limites de vibração não sejam ultrapassados em áreas sensíveis.

Assim, o programa não apenas ajusta a curva com base nos dados coletados, mas, também, se torna uma ferramenta preditiva e de apoio ao planejamento de desmontes.

### **3.4 Relatórios e Transparência**

A elaboração de relatórios técnicos é uma etapa indispensável no processo de controle de vibrações. Esses documentos servem não apenas para registrar os resultados de monitoramento, mas também para demonstrar, de forma objetiva e verificável, que os desmontes foram realizados em conformidade com normas e critérios técnicos. Um relatório bem estruturado deve incluir todos os parâmetros operacionais relevantes, como carga máxima por espera (Q), distância até os pontos de medição (D), velocidade de partícula de pico (PPV) e frequência dominante registrada em cada evento.

Além dos dados de entrada, o relatório deve apresentar análises interpretativas. Isso inclui o cálculo dos parâmetros da lei de atenuação ( $K$  e  $m$ ), a representação gráfica dos pontos em escala log-log, a reta de regressão ajustada e o coeficiente de determinação  $R^2$ . Esses elementos fornecem uma visão clara e fundamentada do comportamento vibratório, permitindo comparar os resultados obtidos com os limites estabelecidos pela NBR 9653:2018 e outras normas aplicáveis.

A transparência também desempenha papel estratégico na relação com órgãos reguladores e comunidades afetadas. Comunicar de forma acessível os resultados, seja por meio de reuniões públicas, relatórios resumidos ou canais digitais, aumenta a confiança e reduz o risco de conflitos sociais. Essa prática demonstra compromisso com a responsabilidade técnica e ambiental, reforçando a credibilidade da empresa perante *stakeholders* internos e externos.

Por fim, relatórios consistentes contribuem para a gestão do conhecimento. Ao compilar medições de diferentes campanhas, as empresas constroem um banco de dados histórico que pode ser utilizado para comparações futuras, revisões de parâmetros operacionais e otimização contínua das práticas de desmonte. Dessa forma, a documentação não é apenas uma exigência formal, mas um ativo estratégico para a engenharia.

### 3.5 Limitações do Modelo

Apesar de sua ampla aplicação, a Lei de Atenuação das Vibrações possui limitações que devem ser cuidadosamente consideradas. A principal delas está no caráter empírico do modelo: os parâmetros  $K$  e  $m$  dependem diretamente das condições geológicas, topográficas e operacionais locais. Isso significa que valores obtidos em uma mina não podem ser simplesmente transferidos para outro contexto sem ajustes.

Outro ponto relevante é a dispersão natural dos dados de vibração. Mesmo em desmontes realizados em condições semelhantes, observa-se variação significativa nos valores de Velocidade de Partícula de Pico registrados. Isso ocorre devido à complexidade dos fenômenos físicos envolvidos, como reflexão e refração em descontinuidades, variações na qualidade do acoplamento dos sensores e condições ambientais no momento da detonação. Essa variabilidade exige a adoção de margens de segurança nos cálculos preditivos.

Além disso, a lei não contempla, de forma explícita, fatores como a frequência dominante da vibração ou o efeito da sobreposição de ondas em sequências de detonação. Embora esses aspectos possam ser parcialmente inferidos a partir do monitoramento, a equação isoladamente não é suficiente para capturar toda a complexidade do fenômeno. Por isso, sua aplicação deve ser complementada com análises espectrais, simulações numéricas ou estudos específicos para estruturas críticas.

Essas limitações reforçam a necessidade de encarar a lei de atenuação como uma ferramenta de apoio, e não como verdade absoluta. O engenheiro responsável deve interpretar os resultados com senso crítico, ajustando-os ao contexto local e combinando-os com outras técnicas de análise para garantir a confiabilidade das decisões tomadas.

### 3.6 Sobre o *software* ATEN

Mais informações sobre o aplicativo computacional desenvolvido podem ser vistas na figura 7.

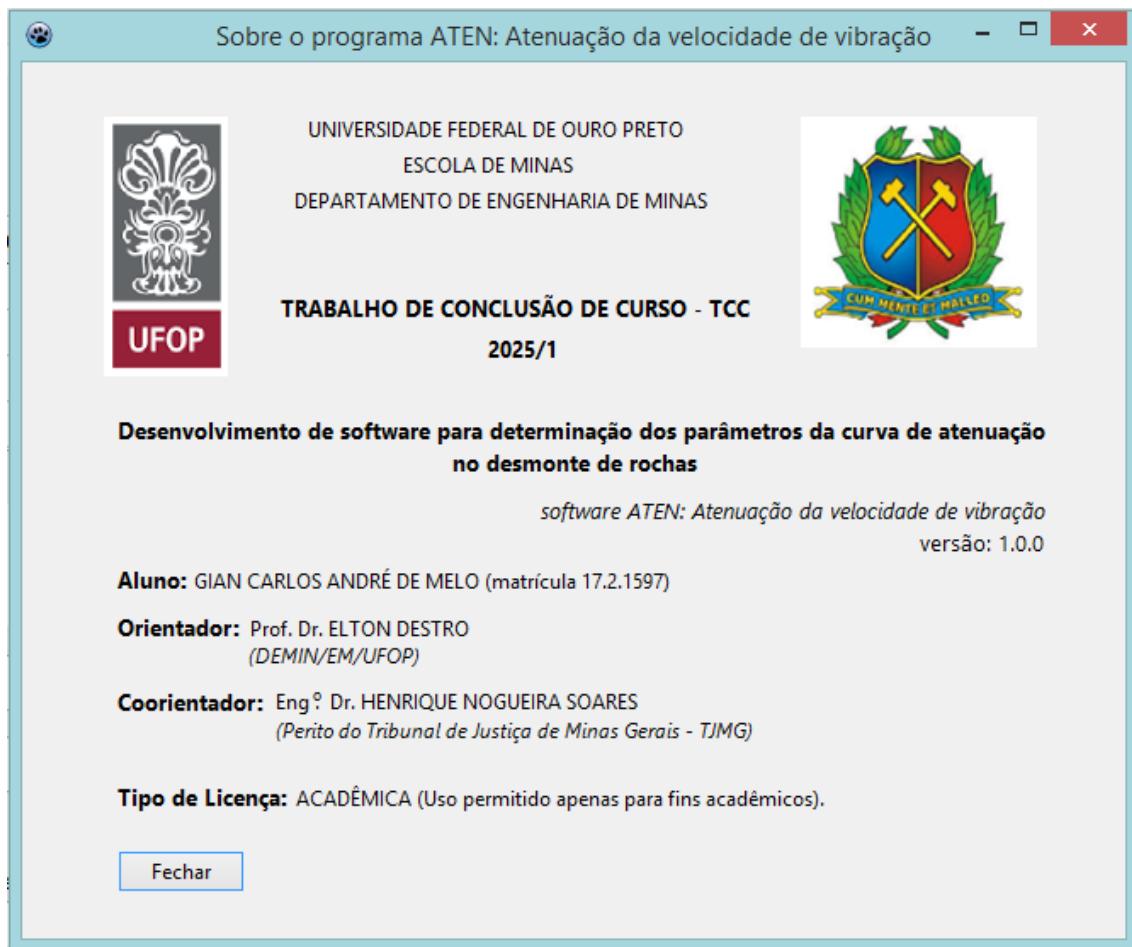


Figura 7: Janela Sobre o programa ATEN.

## 4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A Lei de Atenuação das Vibrações consolidou-se como um dos pilares da engenharia de desmonte de rochas. Sua formulação simples e de fácil aplicação oferece aos engenheiros uma ferramenta poderosa para prever a intensidade das vibrações geradas por explosivos, permitindo a elaboração de planos de fogo que conciliem eficiência operacional e segurança estrutural. Ao traduzir fenômenos físicos complexos em uma equação prática, a lei se tornou indispensável no planejamento de desmontes.

O trabalho detalhou os fundamentos físicos da propagação de ondas, os mecanismos de atenuação e os fatores geológicos que influenciam o fenômeno, ressaltando a importância do cálculo correto das vibrações. Foram discutidos os procedimentos de monitoramento, a aplicação da regressão linear para estimativa dos parâmetros  $K$  e  $m$  e a análise do coeficiente de determinação  $R^2$  como indicador da confiabilidade do modelo, utilizando os resultados fornecidos pelo *software* ATEN desenvolvido neste trabalho. A IDE Lazarus foi utilizada para a implementação do código relativo ao aplicativo computacional desenvolvido.

Também foram exploradas as consequências técnicas e sociais das vibrações não controladas, destacando os riscos a edificações, infraestruturas críticas e à aceitação pública das operações. Estratégias de controle, como a redução da carga máxima por atraso, o uso de retardos adequados e a melhoria do confinamento, foram apresentadas como formas práticas de minimizar impactos. Além disso, ressaltou-se a importância dos relatórios técnicos e da transparência no relacionamento com comunidades e órgãos reguladores.

Conclui-se que, embora a lei de atenuação seja empírica e apresente limitações, sua correta aplicação, combinada com monitoramento sistemático e boas práticas de engenharia, garante previsibilidade, conformidade normativa e aceitação social. Dessa forma, ela se mantém como ferramenta essencial para o desenvolvimento seguro e sustentável de projetos de mineração e infraestrutura.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT NBR 9653:2018 – Vibrações - **Avaliação dos efeitos em edificações.**

BACCI, D. de la C. *et al.* **Principais normas e recomendações existentes para o controle de vibrações provocadas pelo uso de explosivos em áreas urbanas (Parte I e II).** REM, 2005.

CASTRO, R. F. G. **Equação de carga-distância e uso como ferramenta para controle de vibrações no desmonte de rocha por explosivos.** USP, 2018.

CETESB. Norma Técnica D7.013 – **Avaliação e monitoramento das operações de desmonte de rocha com uso de explosivo na mineração: Procedimento.** São Paulo, 2015.

COSTA, J. H. R. **Previsão de vibrações usando redes neurais artificiais no controle de desmonte de rochas.** ITV, 2019.

COSTA, Valdir *et al.* **Desmonte de rochas.** Oficina de Textos, 2019.

DORNLES, F. T. **Controle e previsão de vibrações e ruídos gerados por desmonte de rochas com explosivos.** UNIPAMPA, 2019.

DOWDING, C. H. **Blast vibration monitoring and control: A thirty-year perspective.** In: ARMA US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium. ARMA, 1999. p. ARMA-99-0045.

FONTANELLI, F. *et al.* **Diagnóstico e modelos de previsão de níveis de ruído e vibrações gerados por desmonte de rochas.** UFSM.

LIMA, F. V. **Controle de Vibrações no Desmonte de Rocha.** UFG.

NETO, D. **Análise das vibrações resultantes do desmonte de rocha.** UNESP.

PERSSON, P. A., Holmberg, R., Lee, J. (1994). **Rock Blasting and Explosives Engineering.**

QUEIROZ, Danilo Miranda Ribeiro; DE VILHENA COSTA, Leandro. **CONTROLE DE VIBRAÇÃO EM DESMONTES DE ROCHAS NA REGIÃO METROPOLITANA DE CURITIBA: DESAFIOS E SOLUÇÕES.** REVISTA FOCO, v. 18, n. 2, p. e7873-e7873, 2025.

SEQUÊNCIA ENGENHARIA. **Normas de monitoramento de vibrações no Brasil.**

TAVARES, L. F. **Estudo de caso em uma pedreira de gnaisse no estado de Goiás: desmonte de rocha e limites de vibração.** UFG.

USBM RI 8507 – **Structure Response and Damage Produced by Ground Vibration from Surface Mine Blasting.**

ZORZAL, C. B. *et al.* **Predição de vibrações induzidas por desmontes de rochas.** Revista Research, Society and Development, 2022.