

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MINERAL

FELIPE FRANÇA SITONIO

AVALIAÇÃO DE PLUGS DE TAMPONAMENTO PARA DETONAÇÃO VISANDO
SEGURANÇA & OTIMIZAÇÃO OPERACIONAL EM DESMONTES A CÉU ABERTO
DE PEDREIRAS LOCALIZADAS EM ÁREAS URBANIZADAS

RECIFE
2017

FELIPE FRANÇA SITONIO

AVALIAÇÃO DE PLUGS DE TAMPONAMENTO PARA DETONAÇÃO VISANDO
SEGURANÇA & OTIMIZAÇÃO OPERACIONAL EM DESMONTES A CÉU ABERTO
DE PEDREIRAS LOCALIZADAS EM ÁREAS URBANIZADAS

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mineral da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mineral.

Área de concentração: Minerais Industriais
Orientador: Prof. Dr. Carlos Magno Muniz e Silva

RECIFE
2017

Catálogo na fonte
Bibliotecária Maria Luiza de Moura Ferreira, CRB-4 / 1469

S623a Sitonio, Felipe França.
Avaliação de *plugs* de tamponamento para detonação visando segurança & otimização operacional em desmontes a céu aberto de pedreiras localizadas em áreas urbanizadas / Tarsila Tenório Luna da Silva. - 2017.
73 folhas, il., tabs.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Magno Muniz e Silva.
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral, 2017.
Inclui Referências.

1. Engenharia Mineral. 2. Tamponamento. 3. Plugues. 4. Pedreira. 5. Detonação. I. Silva, Carlos Magno Muniz e (Orientador). II. Título.

UFPE

622.35 CDD (22. ed.) BCTG/2017-334

FELIPE FRANÇA SITONIO

AVALIAÇÃO DE PLUGS DE TAMPONAMENTO PARA DETONAÇÃO VISANDO
SEGURANÇA & OTIMIZAÇÃO OPERACIONAL EM DESMONTES A CÉU ABERTO
DE PEDREIRAS LOCALIZADAS EM ÁREAS URBANIZADAS

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mineral da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mineral.

Aprovado em: _____

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Carlos Magno Muniz e Silva
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Valdir Costa e Silva
Universidade Federal de Ouro Preto

Prof. Dr. Márcio Luiz Siqueira de Campos Barros
Universidade Federal de Pernambuco

Recife, 23 de Maio de 2017

AGRADECIMENTOS

Agradeço inicialmente às pessoas e entidades que transformaram em realidade a execução do projeto fruto desta dissertação. Em primeiro lugar ao orientador do projeto, o professor Dr. Carlos Magno Muniz e Silva, responsável também pelo Laboratório de Controle Ambiental (*LACAM*), onde obtive todo suporte técnico e acadêmico. Importante também citar o meu querido pai e Engenheiro de Minas João Afonso Ferraz Sitonio, responsável técnico da Pedreira Guarany, onde foram realizados os ensaios que originaram a dissertação. Entre tantos outros colaboradores, posso também citar: Prof. Dr. Valdir Costa e Silva, representando a Valmon Consultoria e Treinamento LTDA, pela realização dos relatórios de fotoanálise; o mestrando em engenharia mineral Saulo Dantas pelo suporte nos estudos sismográficos; a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo aporte financeiro; empregados e terceirizados da empresa *PlugPlus*, responsável pela produção dos plugues de tamponamento utilizados no projeto.

Se faz importante também salientar o suporte de todos os representantes do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral (PPGEMINAS-UFPE), em especial do coordenador Prof. Dr. Júlio César de Souza, da secretaria Edna Araújo e dos docentes vinculados e convidados.

Por último e não menos importante, o apoio e carinho da família nesta longa caminhada: minha mãe, Angela; minha irmã, Camila Sitonio; e Tiago Prince Sales, meu cunhado.

“O duplipensamento indica a capacidade de ter na mente, ao mesmo tempo, duas opiniões contraditórias e aceitar ambas.”

George Orwell, 1948

RESUMO

A variação dos parâmetros de tamponamento e a utilização de dispositivos auxiliares são amplamente utilizados em detonações a céu aberto. O objetivo é otimizar o confinamento do explosivo dentro dos furos, evitando ao mesmo tempo uma fragmentação ineficaz e inconvenientes ambientais. Vários trabalhos já foram realizados no intuito de fornecer informações qualitativas do assunto. A análise de imagens, aliada à simulação de dados e estudos sismográficos demonstram-se métodos eficientes na determinação do plano de fogo, considerando os seguintes aspectos: cominuição, qualidade do maciço remanescente e fatores ambientais. O propósito desta dissertação é avaliar a efetividade dos plugues de tamponamento em diversas situações de desmonte em pedreiras. Uma revisão bibliográfica foi conduzida para a seleção do melhor formato e material do plugue. A metodologia para avaliação foi baseada em filmagens em alta definição onde duas detonações com sistema de iniciação não-elétrico foram estudadas na Pedreira Guarany, situada no Estado de Pernambuco. Com exceção à altura da coluna de tampão e quantidade de furos, os parâmetros do plano de fogo foram mantidos constantes, inclusive o esquema do croqui de amarração. Fotografias das pilhas de desmonte foram processadas no software *SplitDesktop* para análise das curvas de fragmentação. A partir de dados do rompedor hidráulico, efetuou-se uma análise econômica, comparando as operações de cominuição dos fragmentos rochosos. Medições foram realizadas com o auxílio de sismógrafos de engenharia, com o objetivo de relacionar os resultados com a variação nos parâmetros de tamponamento. O estudo indicou excelente retenção gasosa quando se utilizando de plugues de tamponamento. O ultralancamento de rochas considerado prejudicial foi eliminado. Ainda sim, é de extrema importância evitar a redução excessiva na altura da coluna de tampão, com o objetivo de melhorar a fragmentação na área de tamponamento, pois isto deve afetar o controle de ultralancamento e retenção dos gases explosivos, mesmo que usando dispositivos auxiliares de tamponamento.

Palavras-chave: Tamponamento. Plugues. Pedreira. Detonação.

ABSTRACT

Variation of stemming parameters and auxiliary devices are widely explored in open pit mining. The objective is to enhance explosive confinement inside the hole, avoiding poor fragmentation and environmental drawbacks. Several works have been performed to provide qualitative conclusions, mostly because of the difficulty on giving measured results in each blast hole. Nevertheless, video and image analysis supported by data simulations and seismography appears to be effective methods to determine the optimum blasting plan, considering comminution, quality of the remaining rock mass and environmental matters. The purpose of this dissertation is to evaluate the effectiveness of stemming plugs, based on its design, polymer quality and most importantly, its role on several blasting situations. The methodology was based on Full HD film analysis on two bench blasts with non-electrical initiation quarry mining, using the same blast design (except on stemming height). Photos of the muck pile were taken and then processed on *Split Desktop*. Seismographs measured ground vibration and air overpressure to relate the results with variation of stemming height and using of stemming devices. Our analysis indicates excellent gas retention using Stemming Plugs in addition with regular gravel, saving explosive energy and decreasing comminution costs. Nevertheless, it is important to avoid excessive reduction of stemming column height, with the objective of increase rock crushing on the top level of blast holes, because it can affect fly rock control and explosive gas retention, even if using stemming auxiliary devices.

Keywords: Stemming. Plugs. Quarry. Blasting.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 01 – Terminologias utilizadas em desmonte de bancadas	17
FIGURA 02 – Relação entre a razão de carregamento e o WI apresentado	21
FIGURA 03 – Ilustração do processo de fragmentação	23
FIGURA 04 – Direção das vibrações de terreno e a resposta das estruturas.....	27
FIGURA 05 – Representação gráfica dos limites de velocidade de vibração de partícula (pico) por faixas de frequência, conforme NBR 9653	29
FIGURA 06 – Detonação realizada em pedra granodiorítica, no município de Vitória de Santo Antão (Pernambuco). Os plugues para furos de 3” foram instalados apenas na porção localizada à direita da imagem, onde pode-se observar maior atuação da região do tampão	37
FIGURA 07 – Desmonte realizado em mineração de calcário, no município de João Pessoa (Paraíba). os plugues de tamponamento para furos de 3,5” foram instalados apenas na porção direita do desmonte, onde demonstrou alta retenção gasosa	37
FIGURA 08 – Projeto piloto do plugue de tamponamento	38
FIGURA 09 – Design final do plugue de tamponamento	38
FIGURA 10 - Colocação do plugue: passo 1	39
FIGURA 11 – Colocação do plugue: passo 2.....	39
FIGURA 12 – Colocação do plugue: passos 3 e 4.....	40
FIGURA 13 – Localização e vias de acesso da mineração do estudo de caso	41
FIGURA 14 – Fluxograma da Pedreira Guarany.....	42
FIGURA 15 – Amostra de fotografia captada da pilha de material desmontado	43
FIGURA 16 - Modelo de sismógrafo utilizado nas medições	44
FIGURA 17 – Mapa de situação do desmonte e localização dos sismógrafos	45
FIGURA 18 – Brita-25 mm, utilizada no tamponamento das detonações	48
FIGURA 19 – Esquema de amarração das linhas silenciosas	49
FIGURA 20 – Visão lateral da bancada desmontada no dia 03/11/15.....	49
FIGURA 21 – Pilha de minério oriunda do primeiro desmonte.....	50
FIGURA 22 – Captura de frame da filmagem frontal no primeiro desmonte. A iniciação do desmonte foi realizada à direita do vídeo	51
FIGURA 23 – Captura de frame da filmagem traseira no primeiro desmonte. a iniciação do desmonte foi realizada à esquerda do vídeo.....	52

FIGURA 24 – Resumo dos eventos captados na sismografia, e sua comparação em relação aos limites definidos pela United States Bureau of Mine (USBM)	53
FIGURA 25 – Sismograma do primeiro desmonte, captado pelo sismógrafo 8992 ..	54
FIGURA 26 – Sismograma do primeiro desmonte, captado pelo sismógrafo 8993 ..	54
FIGURA 27 – Fotografia utilizada na análise de distribuição granulométrica da pilha de minério do primeiro desmonte	55
FIGURA 28 – Imagem de contorno do primeiro desmonte	55
FIGURA 29 – Curva de distribuição granulométrica do primeiro desmonte	56
FIGURA 30 – Vista lateral da bancada, desmontada em 18/01/2016.....	57
FIGURA 31 – Pilha de minério oriunda do segundo desmonte.....	58
FIGURA 32 - Captura da filmagem traseira no segundo desmonte (a iniciação do desmonte foi realizada à esquerda do vídeo).....	59
FIGURA 33 - Resumo dos eventos captados e limites definidos pela USBM.....	61
FIGURA 34 – Sismograma do sismógrafo 8993 no segundo desmonte	61
FIGURA 35 – Fotografia da análise granulométrica do segundo desmonte	62
FIGURA 36 – Imagem processada, do segundo desmonte	62
FIGURA 37 – Curva de distribuição granulométrica do segundo desmonte	63
FIGURA 38 – Área da falha explosiva	67

LISTA DE TABELAS

TABELA 01 - Relação entre diâmetro de furação e granulometria média da brita em tampão	14
TABELA 02 – Causas de ultralancamento excessivo em minas a céu aberto	24
TABELA 03 – Formas de mitigação do ultralancamento	25
TABELA 04 – Resumo das causas de ruídos em detonações	26
TABELA 05 – Técnicas para controle de ruído.....	26
TABELA 06 – Variáveis para controle de vibração de terreno e suas relevâncias ...	28
TABELA 07 – Comparativo entre os limites de vibração de partícula e frequência em desmontes de rocha com o uso de explosivos das principais normas mundiais.....	29
TABELA 08 - Parâmetros do plano de fogo do dia 03/11/2015, realizado na Pedreira Guarany	50
TABELA 09 – Resumo dos dados sismográficos no primeiro desmonte.....	52
TABELA 10 – Parâmetros da distribuição granulométrica no primeiro desmonte	56
TABELA 11 – Parâmetros do plano de fogo do dia 18/01/2016	58
TABELA 12 - Resumo dos dados sismográficos do segundo desmonte.....	60
TABELA 13 – Parâmetros da distribuição granulométrica no segundo desmonte ...	63
TABELA 14 – Resumo comparativo entre os dois desmontes	64

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	GENERALIDADES	13
1.2	MOTIVAÇÃO E JUSTIFICATIVAS	14
1.3	OBJETIVOS	16
2	REVISÃO DE LITERATURA	17
2.1	DESMONTE EM BANCADAS	17
2.1.1	Conceitos.....	17
2.2	DETONAÇÃO.....	19
2.3	FRAGMENTAÇÃO NO DESMONTE DE ROCHAS COM EXPLOSIVOS	20
2.3.1	Influência do desmonte de rocha nas operações subsequentes	20
2.3.2	Análise da distribuição granulométrica em detonações	22
2.4	ASPECTOS AMBIENTAIS NOS DESMONTES COM EXPLOSIVO EM PEDREIRAS DE ÁREA URBANA	22
2.4.1	Ultralançamento.....	24
2.4.2	Ruído e sobrepressão atmosférica	25
2.4.3	Vibrações de terreno.....	27
2.5	SISMOGRAFIA NO DESMONTE DE ROCHA COM USO DE EXPLOSIVOS	30
2.6	ANÁLISE DE IMAGENS DIGITAIS NO DESMONTE DE ROCHA	33
3	METODOLOGIA	35
3.1	LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO	35
3.2	SELEÇÃO DOS MÉTODOS DE ANÁLISE.....	35
3.2.1	Escolha do acessório auxiliar de tamponamento e metodologia	35
3.2.2	Localização e caracterização da mineração do estudo de caso.....	40
3.2.3	Definição do método de captação de imagens das detonações.....	43
3.2.4	Definição da metodologia da sismografia	44
3.2.5	Escolha do software para processamento das imagens.....	46
3.2.6	Levantamento de dados operacionais posteriores ao desmonte.....	47
4	ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	48
4.1	PRIMEIRO DESMONTE.....	49
4.1.1	Análise do tamponamento no primeiro desmonte.....	51
4.1.2	Relatório sismográfico do primeiro desmonte.....	52
4.1.3	Análise granulométrica do primeiro desmonte.....	55

4.2	SEGUNDO DESMONTE	57
4.2.1	Análise do tamponamento no segundo desmonte	58
4.2.2	Relatório sismográfico do segundo desmonte	59
4.2.3	Análise granulométrica do segundo desmonte	62
4.3	ANÁLISE COMPARATIVA DOS DESMONTES DE ROCHA	64
4.4	ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO DESMONTE DE ROCHA NAS ETAPAS CONSECUTIVAS DE COMINUIÇÃO	66
5	CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	68
	REFERÊNCIAS.....	71

1 INTRODUÇÃO

1.1 GENERALIDADES

O desmonte de rochas na mineração é um processo tecnológico que visa a desagregação do maciço rochoso, e formação de fragmentos de rocha em granulometria satisfatória para alimentação das operações de britagem primária. Uma detonação é considerada satisfatória quando a energia estática e dinâmica produzidas pelo explosivo é suficientemente alta em relação à resistência da rocha, e é confinada por tempo suficiente para promover a formação de teias de fissuras que desagreguem o material (Dobrilovic et al., 2005).

Fragmentação, sopros de ar (sobrepresão atmosférica) e ultralançamentos são variáveis de performance do desmonte que podem ser melhoradas pelo confinamento do explosivo, bem como pelo tempo necessário para prevenir uma fuga precoce dos gases (Little, 1996). Os principais parâmetros de controle de confinamento em uma detonação são a altura da coluna de tamponamento e material utilizado. De acordo com Peter Darling (2011, SME, p. 449), o tamponamento é necessário para confinar a coluna de explosivo, a fim de prevenir a fuga dos gases explosivos e efetividade do desmonte. Se o tampão é ejetado prematuramente, não apenas a energia é desperdiçada, como ruídos sônicos e ultralançamentos são notificados.

O tampão, neste caso, é uma ferramenta de detonação, constituído por material inerte inserido no furo após a matéria-prima explosiva; utilizado com o propósito de confinar o explosivo ou separar cargas de explosivo de uma mesma coluna (Atlas Powder Company, 1987). Não é adequado determinar nenhuma generalização no controle da altura de tamponamento. Ela deve ser baseada no conhecimento da formação geológica local, a razão de carga utilizada e a distância de lançamento de rocha que pode ser tolerada, juntamente com o bom julgamento e experiência. Contudo, o dimensionamento do tampão requerido é comumente calculado em relação à dimensão do afastamento utilizando a seguinte fórmula empírica:

$$\text{Tampão: } H_0 = 0,7B \text{ onde: } B = \text{afastamento.} \quad (1.1)$$

Visando-se obter bons resultados no desmonte, procura-se dosar muito ou pouco tampão em um furo. Pois, é sabido que o ultralançamento e sopro de ar excessivos podem ser causados quando não existe tamponamento suficiente. Por outro lado, um aumento significativo no tampão pode levar a vibrações excessivas que danifiquem o maciço remanescente e pouca fragmentação, sobretudo na altura da coluna do tampão.

Em relação ao material utilizado, uma prática bastante comum e ineficaz é o uso do pó de perfuração como material de tamponamento, já que possui a vantagem econômica e de logística em relação ao *material britado*, que por sua vez é a opção comprovadamente mais efetiva no confinamento da energia explosiva (Tamrock, 1984). Além da geometria angular da brita, que promove o intertravamento entre os grãos, existe uma relação utilizada para seleção da granulometria do material em relação ao diâmetro do furo. A Tabela 01 demonstra uma relação direta entre o diâmetro do furo e diâmetro médio da brita a ser utilizada, em polegadas:

Tabela 01 - Relação entre diâmetro de furação e granulometria média da brita em tampão.

Diâmetro do furo (“)	Diâmetro da brita (“)
1 ^{1/2}	3/8
2 a 3 ^{1/2}	3/8 a 1/2
4 a 5	5/8
> 5	3/4

Fonte: Adaptado de Atlas Powder, 1987.

1.2 MOTIVAÇÃO E JUSTIFICATIVAS

Pela necessidade de otimização das operações de desmonte, vários trabalhos vêm sendo elaborados com o intuito de avaliar novas opções e determinar a eficiência dos materiais inertes utilizados como tampão. Cevizci (2013) utilizou gesso como material de tampão em detrimento ao pó de perfuração, e como resultado obteve uma redução dos custos de desmonte em 7%, mantendo a mesma fragmentação (com exceção da quantidade de matacões acima de 20 cm, que diminuiu em 6%). Estes resultados foram obtidos através do aumento do espaçamento e diminuição da coluna

de tampão, já que o gesso gerou confinamento mais prolongado do explosivo. Apesar dos resultados satisfatórios, notificou-se uma logística ineficaz, além da impossibilidade de usar este tipo de tamponamento na presença de água.

Já Cancec et al. (2001) realizaram um estudo de tamponamento utilizando “stemming plugs”, um material polimérico de formato cônico utilizado juntamente com o tampão comum que auxilia o aprisionamento do explosivo no interior do maciço. Apesar de gerar um custo adicional direto ao desmonte, foi observado a redução no tempo de carregamento do material desmontado nos caminhões em 8,2%, e melhora na fragmentação de 22%, segundo análise detalhada.

Os avanços tecnológicos nas operações de desmontes de rocha, seja nos sistemas de iniciação, seja na qualidade do explosivo empregado, possibilitaram a otimização dos controles das variáveis operacionais e resultado final do desmonte de acordo com a necessidade dos processos subsequentes. Ainda assim, é possível observar, principalmente em minerações de pequeno porte, certa displicência no que diz respeito ao controle destes parâmetros nas fases de perfuração e carregamento do explosivo.

A importância do tamponamento na qualidade da fragmentação e controle de ultralançamento, vibração e pressão atmosférica em alguns empreendimentos, é completamente negligenciada. Assim, a falta de seleção da altura de tampão ideal, tipo de material inerte utilizado e possíveis reforçadores a serem adicionados, aparentam ser um dos principais causadores de fragmentações ineficazes e onerosas. Tendo em vista que, em tamponamentos subdimensionados, parte relevante dos gases provenientes dos explosivos (produto que representa cerca de 80% no custo total de uma detonação com iniciadores não-elétricos) não permanecem o tempo suficiente no interior do maciço rochoso, torna-se evidente que o processo de otimização econômica e operacional de um desmonte passa pelo conhecimento mais detalhado desses parâmetros.

Pela necessidade de otimizar o tamponamento e ainda sim reduzir ao máximo a altura da coluna de tampão, a algumas décadas o estudo do desenvolvimento de reforçadores que auxiliem o trabalho do tampão vem sendo trabalhado a fundo. Segundo Karakus et al. (2003), os Stemming Plugs, artefatos poliméricos criados com o intuito de otimizar o funcionamento do tampão, foram inicialmente introduzidos na mineração no ano de 1994, por meio de estudos da Universidade de Missouri. A partir

daí, plugues de vários formatos e diferentes tipos de polímeros foram desenvolvidos, bem como trabalhos que determinassem o modo de utilização dos mesmos.

Outrossim, além do exposto, motivaram a presente proposta de Projeto de Dissertação:

- (i) Disponibilidade na literatura acerca de acessórios de explosivos (mais precisamente os materiais de tamponamentos) visando melhorar a prática do desmonte de rochas mais sustentável e seguro, aplicáveis em áreas urbanizadas;
- (ii) Identificação de internalidades ambientais causadas pelo mal planejamento de um sistema de tamponamento pelas minerações localizadas em áreas urbanizadas.

1.3 OBJETIVOS

O presente estudo tem como objetivo geral propor instrumentos e/ou metodologias de seleção criteriosa para os parâmetros de tamponamento e acessórios utilizados em desmonte de rochas, mais precisamente para uso em áreas urbanizadas, onde existe não só a necessidade de melhoria operacional, mas também de um rigoroso controle ambiental. Para tanto, contará com os seguintes objetivos específicos, a saber:

- (i) Levantar junto à literatura nacional e internacional os principais modelos de seleção de tamponamento e avanços tecnológicos na área;
- (ii) Disponibilizar uma literatura atualizada que comprove a eficiência de um tampão realizado em consonância com a sua real importância.

2 REVISÃO DA LITERATURA

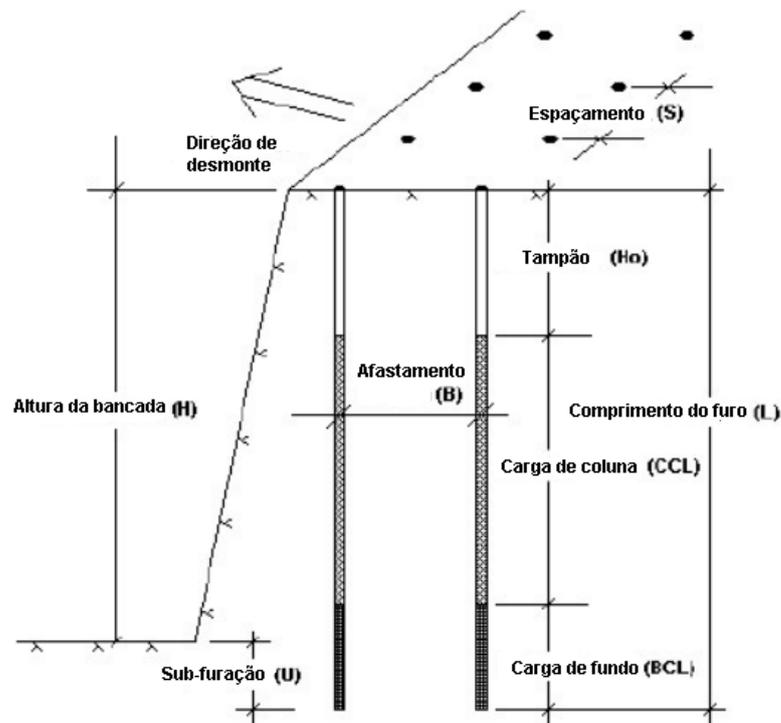
2.1 DESMONTE EM BANCADAS

2.1.1 Conceitos

O propósito de um desmonte com explosivos realizado em bancadas é de promover o fraturamento e movimentação do maciço rochoso intacto para que as posteriores etapas de carregamento, transporte e cominuição aconteçam em total harmonia e de forma eficiente (Demenegas, 2008).

Existem diversos parâmetros que influenciam o resultado da fragmentação em um desmonte em bancada. Entre os mais relevantes, certamente estão as propriedades do maciço rochoso e características geométricas do plano de fogo a serem utilizadas. Podemos citar também o tipo de explosivo e sistema de iniciação, padrão no sequenciamento de iniciação e temporização, entre outros. Na Figura 01, é demonstrada uma visão geral dos parâmetros de um desmonte a céu aberto e suas respectivas terminologias:

Figura 01 – Terminologias utilizadas em desmonte de bancadas.



Fonte: Adaptado de Bergman, 2005.

Afastamento (B): É a distância entre o furo e a face livre ou a distância entre linhas consecutivas.

Espaçamento (S): Distância entre dois furos consecutivos de uma mesma linha.

Carga de fundo (BCL): Terminologia para indicar a carga explosiva utilizada próxima ao pé da bancada, que é geralmente maior, com o intuito de compensar o aumento do confinamento, ou seja, a falta de face livre, evitando o surgimento de repé.

Carga de coluna (CCL): O volume principal de explosivo distribuído ao longo da seção principal do furo perfurado.

Altura da bancada (H): Relativa à distância vertical da crista ao pé da bancada.

Sub-furação (U): A seção do furo que se estende abaixo do pé da bancada. É necessária para se alcançar quebra suficiente próximo ao pé da bancada, e por consequência alcançar uma maior suavidade no piso para a trabalhabilidade da pilha de minério, evitando-se a ocorrência de repés.

Tampão (H₀): A parte do topo do furo, na qual é mantida descarregada de material explosivo, e é preenchida com material inerte, como areia, pó de perfuração ou brita. O tampão existe com o intuito de reduzir o risco de ultralancamento, além de promover a ação da massa gasosa gerada após a detonação.

A *Carga específica* ou *razão de carga (q)* é uma unidade utilizada em desmonte de bancadas para definir a quantidade de material utilizada por unidade de massa ou volume. Neste trabalho, a razão de carga é definida como a quantidade de material explosivo utilizada por metro cúbico de rocha:

$$q = \frac{Q}{B \cdot x \cdot S \cdot x \cdot H} \quad (2.1)$$

Onde:

q:	Razão de carga	(kg/m ³)
B:	Afastamento	(m)
H:	Altura da bancada	(m)
S:	Espaçamento	(m)
Q:	Quantidade total de explosivo por furo	(kg)

O afastamento utilizado em desmonte de bancadas depende de vários fatores, desde o diâmetro do furo, propriedades geomecânicas da rocha, até a densidade do

explosivo. Apesar do valor de afastamento que promoverá a otimização do desmonte necessitar de trabalhos *in loco* para sua determinação, várias formulações empíricas foram criadas com o intuito de dar um embasamento inicial à geometria do plano de fogo. Entre tantos modelos, o proposto por Langefors e Kihlström (1963) ainda é amplamente utilizado para o cálculo do afastamento máximo (B_{max}):

$$B_{max} = \frac{D}{33} \times \sqrt{\frac{p \times E}{c \times f \times \left(\frac{S}{B}\right)}} \quad (2.2)$$

Onde:

B_{max} :	Afastamento máximo	(m)
D:	Diâmetro do furo	(mm)
p:	grau de acoplamento do explosivo	(Kg/dm ³)
E:	Potência relativa do explosivo	(1-1,4)
S/B:	Razão espaçamento/afastamento	
c:	Constante da rocha	
f:	Parâmetro de inclinação	(0,93;1)

2.2 DETONAÇÃO

As operações de desmonte de rocha por bancadas a céu aberto dá-se através de processos cíclicos que compreendem algumas etapas.

A perfuração de rochas, dentro do campo dos desmontes, é a primeira operação a ser efetuada e tem como finalidade realizar furos com distribuição, geometria e diâmetro adequados conforme plano de fogo, para alojar as cargas explosivas e acessórios iniciadores.

O diâmetro do furo depende da finalidade do mesmo. Em furos para detonações, há vários fatores que influenciam a escolha: o tamanho desejado dos fragmentos após a detonação; o tipo de explosivo a ser utilizado; a vibração admissível do terreno durante a detonação, entre outros. Em grandes pedreiras e outras minerações a céu aberto, furos de grande diâmetro apresentam menores custos de perfuração e detonação por metro cúbico ou tonelada de rocha escavada. A seleção

do diâmetro dos furos depende, também, da produção horária desejada, do ritmo da escavação e perfuração, e da resistência da rocha.

Os explosivos industriais possuem um certo grau de estabilidade química que os tornam perfeitamente manuseáveis, dentro de condições normais de segurança. Para desencadear a explosão, é necessário aplicar ao explosivo uma quantidade inicial de energia de ativação, suficientemente capaz de promover as reações internas para sua transformação em gases. Uma vez iniciada, a detonação se propaga através de toda a massa explosiva. Os acessórios de detonação são destinados a provocar estes fenômenos iniciais de uma forma segura. Alguns deles são destinados a retardar a explosão, e estes retardos são determinados baseados principalmente na malha de perfuração e geologia do maciço.

O sequenciamento da detonação dos furos é também parte crucial no planejamento do desmonte, e se realizado de forma correta, irá garantir além de fácies livres para projeção do maciço rochoso, uma geometria adequada da pilha de material desmontado. Desta forma, é possível afirmar que a eficiência da explosão está intimamente ligada ao modo pelo qual foi iniciado (Reis, 1992).

2.3 FRAGMENTAÇÃO NO DESMONTE DE ROCHAS COM EXPLOSIVOS

2.3.1 Influência do desmonte de rocha nas operações subsequentes

O desmonte é o primeiro passo no processo de cominuição da rocha e tem um impacto significativo nas seguintes operações: carregamento, transporte, britagem e moagem. A uniformidade da pilha de minério desmontado beneficia a taxa de escavação, transformando as etapas de carregamento e transporte mais eficientes. O percentual de blocos que não estão dentro dos padrões de carregamento e transporte definem quais recursos serão utilizados a fim de reduzir a sua granulometria.

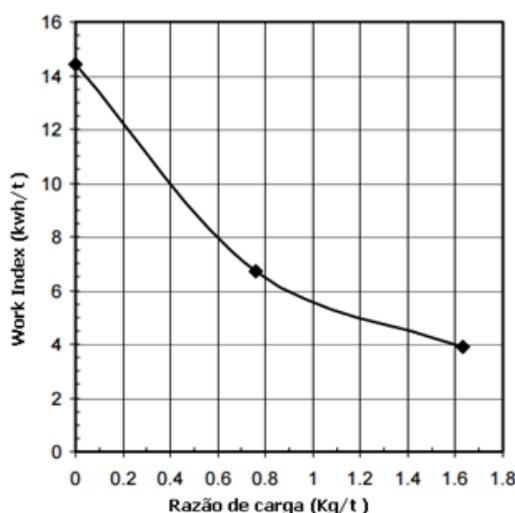
A britagem também é um exemplo de operação que possui um grau de influência altíssimo do desmonte de rocha. A distribuição granulométrica dos fragmentos oriundos da detonação é o parâmetro mais óbvio a ser aprofundado. Uma quantidade exagerada de material grosseiro em uma pilha de minério irá resultar em um aumento no consumo de energia na etapa de britagem, além de reduzir a capacidade de processamento do britador primário, resultando em um processo ineficaz.

Os estudos acerca da influência do desmonte de rocha com o uso de explosivos nas etapas de britagem e moagem vêm evoluindo fortemente nos últimos anos. Segundo Seccatore et al. (2015), um novo conceito de *britabilidade* parte do princípio que a detonação produz dois efeitos no maciço rochoso:

- (i) *Faturamento visível*: A distribuição granulométrica visível a olho nu que é mensurada por meios de análises de imagens ou peneiramento.
- (ii) *Faturamento invisível*: O sistema de microfaturas, invisível ao olho nu, que só é detectado por análises microscópicas e mostram seu efeito direto no consumo de energia necessário para a cominuição em etapas subsequentes. Pode-se dizer que este efeito aumenta a britabilidade do material.

Os estudos relativos aos microfaturamentos de fragmentos rochosos foram introduzidos por Nielsen e Kristiansen (1996), onde eles demonstraram que o aumento na razão de carga explosiva proporciona uma maior presença de micro fraturas no material, resultando em reduções significativas no *Work Index* (WI) de Bond (Bond, 1961), conforme mostrado na Figura 02. Mais adiante, Workman e Eloranta (2009) dissertaram sobre diferentes formas de se alcançar uma maior razão de carga como benefício do posto de vista econômico para a britagem: aumentando a quantidade de explosivo por furo ou variando espaçamento e afastamento.

Figura 02 – Relação entre a razão de carregamento e o WI apresentado.



Fonte: Adaptado de Nielsen e Kristiansen, 1996.

2.3.2 Análise da distribuição granulométrica em detonações

Os métodos de estimativa das curvas de distribuição granulométrica de rochas desmontadas são amplamente estudados com o intuito de prever ou analisar o resultado de detonações a mais de 40 anos. Noren e Porter (1974) introduziram a fotoanálise na mineração, e já se referiam ao formato de “S” (típico de distribuições granulométricas deste gênero) como o das curvas de distribuição resultadas de uma técnica que utilizava fotografia das pilhas de minério, com fotos de amostras aleatórias que eram então projetadas em telas com grades escalonadas.

Sang Ho Cho et al. (2003) comenta que esta tendência atual de aprimoramento das técnicas de análises de granulometria é um esforço criado para a adequação de modelos que facilitem a análise sobre a mudança de alguns parâmetros do plano de fogo, criando assim cenários fidedignos e acarretando em otimização dos processos subsequentes. Apesar de dispendiosas, análises de peneiramento de amostras no desmonte ainda são utilizadas para eliminar erros oriundos de análises fotográficas, por conta de suas limitações. A principal delas é em relação às partículas de granulometria fina, que raramente são representadas na averiguação destas imagens, manual ou computadorizada.

Vários modelos matemáticos já foram criados e redeseñolvidos com o intuito de aperfeiçoar a previsão de cenários de desmonte de rocha ou corrigir análises granulométricas por meios fotográficos. Entre os mais impactantes, pode-se citar: modelo de Kuz – Ram e a distribuição Rosin – Rammler (Cunningham, 1983); o recente modelo KCO (Outcherlony, 2005), baseado na função Swebrec.

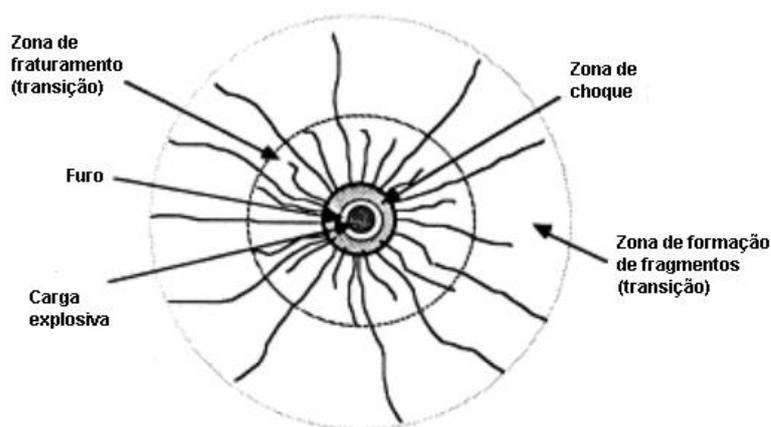
2.4 ASPECTOS AMBIENTAIS NOS DESMONTES COM EXPLOSIVO EM PEDREIRAS DE ÁREA URBANA

O desmonte de rocha por explosivos é a técnica mais aceita e praticada para a quebra de uma rocha. Durante a detonação, uma reação química ocorre, convertendo a energia química do explosivo em energia de choque e energia gasosa. Segundo Dhekne (2015), é estabelecido que aproximadamente apenas 20% da energia é encaminhada para a quebra da rocha, já o restante se manifesta em desperdício de energia. Esta fração de energia dissipa-se, em sua maior parte, através do maciço circundante sob a forma de vibrações, e da atmosfera sob a forma de ruído e

sobreprensão atmosférica. Gera poeira, podendo também ocasionar danos ao maciço remanescente e ultralançamentos. A proximidade de minerações a céu aberto em relação a urbanizações de modo geral faz necessária a mitigação destes impactos ambientais oriundos do desmonte de rocha com explosivos.

Quando uma carga explosiva detona, ondas dinâmicas intensas atuam ao redor dos furos, devido à aceleração súbita do maciço rochoso. A energia liberada pelo explosivo é transmitida ao maciço rochoso como energia de deformação, e a transmissão desta energia é realizada em forma de ondas. A energia carregada por estas ondas quebra a rocha localizada nas vizinhanças dos furos, em granulometrias demasiadamente finas. Esta área é chamada de *zona de choque*. O raio desta zona é de aproximadamente duas vezes o raio do furo. Para além da zona de choque, a energia das ondas é atenuada, causando ainda o fraturamento do maciço rochoso. O gás gerado como resultado da detonação adentra nas fraturas e desloca a rocha, aumentando sua fragmentação. Esta atividade ocorre na *zona de transição*. O raio dela é de cerca de 20 a 50 vezes o raio do furo. Como resultado da sequência de atenuação que acontece na zona de transição, apesar das ondas ainda gerarem fraturamentos de menor extensão, elas não causam deformações permanentes ao maciço rochoso que não estão inseridos na zona de transição. Se estas ondas atenuadas não forem refletidas por uma face livre disponível, elas provavelmente causarão vibrações de terreno. Porém, se existe uma face livre disponível, as ondas são refletidas causando quebras no maciço rochoso, por influência do tensionamento dinâmico. A Figura 03 representa todo este processo.

Figura 03 – Ilustração do processo de fragmentação.



Fonte: Adaptado de Essen et al., 2003.

2.4.1 Ultralaçamento

Conforme relatado por Ferreira et al. (2006), o ultralaçamento de fragmentos rochosos é o que representa maior perigo direto, por conta de sua possibilidade de causar vítimas fatais instantaneamente. Ainda que raros, por razão da alta tecnologia empregada no desenvolvimento da ciência explosiva, seu acontecimento além da área de influência do desmonte deve ser eliminado.

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) define, segundo a norma NBR 9.653, o ultralaçamento como “*arremesso de fragmentos de rocha decorrente do desmonte com uso de explosivos, além da área de operação*” (ABNT, 2015).

A Tabela 02 enumera as principais causas de ultralaçamento, enquanto a Tabela 03 indica atitudes a serem tomadas a fim de mitigar este passivo ambiental.

Tabela 02 – Causas de ultralaçamento excessivo em minas a céu aberto.

Geologia e condições do maciço rochoso	Plano de fogo
<ul style="list-style-type: none"> a. Material alterado no interior do maciço b. Planos de falha c. Fraturamento d. Cavidades 	<ul style="list-style-type: none"> a. Projeto de plano de fogo impróprio b. Confinamento de explosivo ineficaz ou a rápida liberação dos gases explosivos, por conta de exagero na razão de carga c. Afastamento subdimensionado d. Altura de tamponamento subdimensionada e. Material de tamponamento ineficaz f. Temporização imprópria entre linhas g. Sequência de iniciação incorreta

Fonte: Adaptado de Dhekne, 2015.

Tabela 03 – Formas de mitigação do ultralancamento.

Ultralancamento na face da bancada	Ultralancamento no topo da bancada
<p>a. O afastamento deve ser suficiente para conter a energia explosiva</p> <p>b. Isto significa que o afastamento instantâneo ou efetivo deve ser pelo menos 25 vezes maior que o diâmetro do furo</p> <p>c. A quantidade de explosivo por furo deve ser constantemente monitorada a fim de evitar o carregamento de vazios no interior do maciço</p> <p>d. O carregamento explosivo de fissuras, bolsões de argila e planos de fraqueza deve ser evitado. Afastamentos adicionais podem ser necessários se a face encontra-se irregular</p> <p>e. A coluna explosiva pode ser reduzida, evitando assim problemas com o encurtamento do afastamento na região de topo</p> <p>f. Em geral, a razão afastamento/diâmetro do furo de 14,2 ou mais deve limitar a velocidade inicial de ultralancamento em 30 m/s, com um alcance máximo de 90 metros</p>	<p>a. O plano de fogo deve ser otimizado, uma vez que o ultralancamento no topo da bancada é resultado de excesso de carga explosiva ou falta de alívio da mesma, tamponamento ineficaz ou redução no afastamento</p> <p>b. Um tempo de retardo suficiente entre linhas deve ser fornecido, a fim de formar novas faces livres para as linhas consecutivas</p> <p>c. Isto significa que o tempo de retardo deve ser de pelo menos 7 ms por metro de afastamento, para evitar tanto o ultralancamento como "back break". Retardos fora da sequência ideal são ainda piores que retardos subestimados</p> <p>d. A altura da coluna de tampão deve ser de pelo menos 0,7 vezes o afastamento, e a mesma deve ser carregada com material grosseiro de geometria angular, promovendo assim o intertravamento da pressão de gás do explosivo</p> <p>e. As condições para falhas de minas (furos) devem ser extintas, já que são uma das causas principais de ultralancamentos</p> <p>f. Adoção de iniciadores não-elétricos ou eletrônicos</p> <p>g. Quando necessário, promover o abafamento da detonação com pneus, areia e redes de metal ou utilizar acessórios especiais de tamponamento</p>

Fonte: Adaptado de Dhekne, 2015.

2.4.2 Ruído e sobrepressão atmosférica

A sobrepressão atmosférica parte de um impulso transiente que percorre a atmosfera. Muito da sobrepressão atmosférica produzida pelas detonações possui uma frequência abaixo do limite audível de 20 Hz. Este efeito, tanto audível como inaudível, pode fazer vibrar uma estrutura tão impactante quanto as vibrações de terreno.

Eston (1998) define sobrepressão atmosférica como toda propagação de uma onda elástica pelo ar, considerando ruído uma faixa de sobrepressão de frequências

acima de 20 Hz e abaixo de frequências ultra-sonoras, de 20.000 Hz. Considera também o termo ‘sopro de ar’ equivocado, por avaliar que a terminologia implica que houve deslocamento de matéria.

O limite de pressão acústica admitido pela ABNT é de 134 dBL pico no ambiente externo a área de operação da mina, assim entendida como aquela sujeita a concessão, licenciamento ou área de propriedade da empresa. A Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (CETESB) recomenda, com base no projeto de norma *D7.013: Mineração por Explosivos*, de 1992, limite máximo de 128 dBL linear-pico de sobrepressão de ar, medido fora dos limites da propriedade da mineração ou da área por ela ocupada sob qualquer forma, como posse, arrendamento, servidão, concessão e etc. A Tabela 04 indica as possíveis causas de ruído nas detonações, enquanto a Tabela 05 enumera algumas técnicas de mitigação deste passivo ambiental.

Tabela 04 – Resumo das causas de ruídos em detonações.

1. Afastamento subdimensionado	4. Uso de cordel detonante	7. Perfuração mal realizada
2. Geologia adversa	5. Configuração de retardos imprópria ou detonadores ineficazes	8. Seleção incorreta do explosivo
3. Altura insuficiente de tamponamento	6. Sobrequebra de desmontes anteriores	9. Razão de carga excessiva

Fonte: Adaptado de Dhekne, 2015.

Tabela 05 – Técnicas para o controle de ruído.

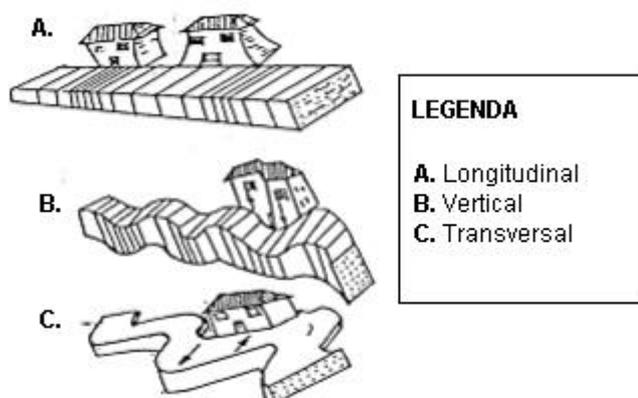
Variável de controle	Grau de relevância		
	Significante	Moderada	Insignificante
Carga máxima por espera	x		
Intervalo dos retardos	x		
Espaçamento e afastamento	x		
Coluna de tampão	x		
Tipo de tampão		x	
Altura da carga e diâmetro do furo			x
Ângulo do furo			x
Direção de iniciação	x		
Carga total			x
Exclusão de cordel detonante	x		

Fonte: Adaptado de Dhekne, 2015.

2.4.3 Vibrações de terreno

As vibrações de terreno causam movimentos em direções distintas: longitudinal, vertical e transversal (Figura 04). Isto pode acarretar na danificação de qualquer estrutura ou do próprio terreno.

Figura 04 – Direção das vibrações de terreno e a resposta das estruturas.



Fonte: Adaptado de Dhekne, 2015.

Apesar da diferença na aceleração, amplitude e velocidade das partículas e suas frequências nas três direções influenciarem no dano causado, normalmente apenas o pico de velocidade de partícula e sua frequência são levados em consideração para avaliar a resposta de uma estrutura. Entretanto, o efeito pode se reduzir apenas ao incômodo causado às pessoas pela sensação de vibração ou tremor das edificações, marcadas algumas vezes pela oscilação ou queda de objetos.

A geração de vibrações no solo é outro importante efeito da utilização de explosivos para o desmonte de rochas e causam um marcante desconforto ambiental para a população circunvizinha. Segundo Dhekne (2015), é impossível prevenir completamente a geração de vibrações do terreno, entretanto os desmontes podem ser projetados a fim de minimizar estes feitos a ponto de contê-los. A Tabela 06 apresenta um resumo dos efeitos de diversos parâmetros de desmonte no controle de vibrações.

Com base em análises realizadas a partir de 1983, a ABNT redigiu e aprovou a norma NBR 9653 (Figura 05), que estabeleceu a velocidade de vibração de partícula (V_r) igual a 15 mm/s como limite máximo de vibração admissível nos arredores da área de operação das pedreiras. A norma também estabelece que não devem ocorrer, de forma alguma, ultralanchamentos de fragmentos e sobrepressões atmosféricas excessivas. Sendo, a partir de 2005, corrigida para levar em consideração as baixas frequências que podem provocar o fenômeno de ressonância.

A Norma Técnica D7.013 da CETESB indica que a velocidade resultante de vibração de partícula (V_r) proveniente das operações de desmonte de rocha com o uso de explosivos não poderá ser superior a 4,2 mm/s – pico, no local de medição.

Tabela 06 – Variáveis para controle de vibração de terreno e suas relevâncias.

Variável de controle	Grau de relevância		
	<i>Significante</i>	<i>Moderada</i>	<i>Insignificante</i>
Carga por espera	x		
Intervalo de retardo	x		
Espaçamento e afastamento		x	
Tamponamento (tipo e quantidade)			x
Altura da carga e diâmetro			x
Ângulo do furo			x
Direção de iniciação		x	
Carga total		x	
Detonação em cordel detonante			x

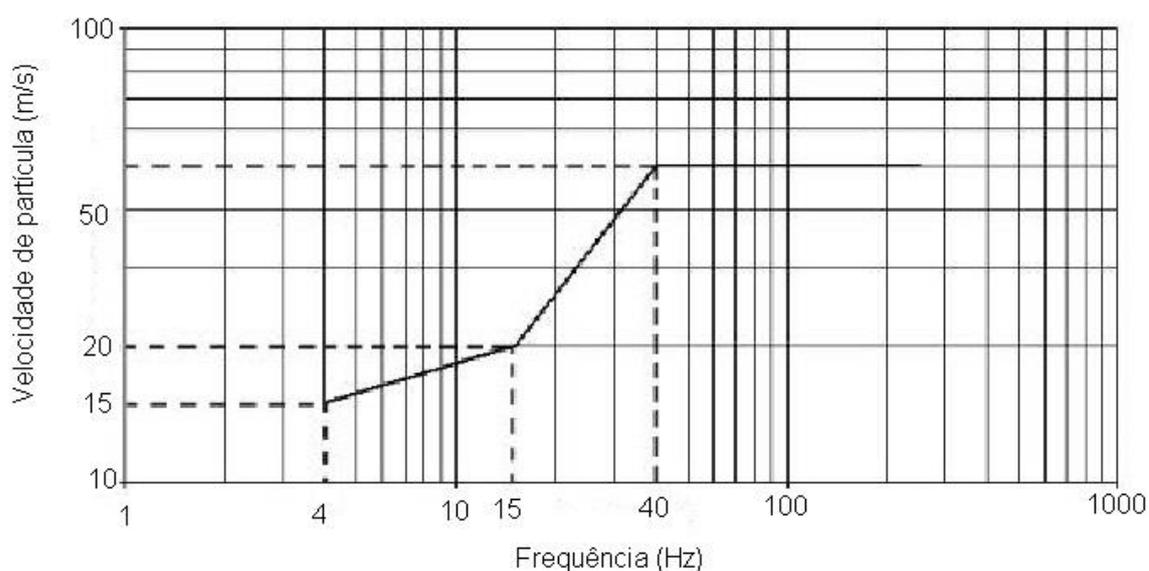
Fonte: Adaptado de Dhekne, 2015.

Langefors e Kihlström (1978), ao estabelecerem seu critério de danos sobre edificações, consideram que um fator decisivo para sua ocorrência é, entre outros, a relação existente entre a frequência natural da edificação e a frequência da vibração a que ela será submetida; consideram ainda que danos podem ser causados por alongamento, cisalhamento e torção, sendo que tais deformações podem ser incrementadas pela superposição de tensões estacionárias preexistentes na edificação, o que implica a adoção de critérios de danos mais conservadores. Deve-se observar ainda o estado de conservação da edificação.

Conforme dissertado por Bacci et al. (2003), embora seja amplamente difundido que, para frequências altas, as estruturas suportam melhor as vibrações, como no caso de estruturas fundadas em rocha localizadas a menos de 300 metros da

detonação (Siskind et al., 1980), as normas brasileiras não tratam da frequência dos fenômenos vibratórios, nem determina os tipos de edifícios afetados pelas vibrações, sendo, desse ponto de vista, deficiente em relação às normas internacionais, conforme resumo da Tabela 07.

Figura 05 – Representação gráfica dos limites de velocidade de vibração de partícula (pico) por faixas de frequência, conforme NBR 9653.



Fonte: ABNT, 2005.

Tabela 07 – Comparativo entre os limites de vibração de partícula e frequência em desmontes de rocha com o uso de explosivos das principais normas mundiais.

Países	Velocidade (mm/s)		Frequência (Hz)	
	Mínima	Máxima	Mínima	Máxima
Alemanha	3	50	<10	100
Estados Unidos	12,7	50	<40	>40
Itália	3	50	<10	100
Suíça	10	90	8	30
França	2,5/4	75/15	<10/4	>10/100
Portugal	2,5	60	<10	>40
Suécia	18	70	<40	>40
Inglaterra	15	50	4	>40
Austrália	2	25	<40	>40
Índia	2	25	<24	>24
Brasil	-	15	-	>40

Fonte: Bacci et al. (2003).

2.5 SISMOGRAFIA NO DESMONTE DE ROCHA COM USO DE EXPLOSIVOS

Segundo a Sociedade Internacional dos Engenheiros de Explosivos (ISEE, 2017), a sismografia no desmonte de rocha é utilizada, além com o objetivo de estabelecer conformidades com as regulamentações federais, estaduais e locais, para avaliar a detonação. A disposição e ajustamento às regras, assim como a avaliação da performance do explosivo, dependem da acurácia na leitura dos níveis de vibração de terreno e sobrepressão atmosférica. Com o intuito de padronizar e garantir a consistência nas leituras sismográficas ao redor do mundo, levando em consideração acima de tudo os mais variados equipamentos utilizados para este fim e as condições encontradas em campo, a ISEE determina alguns critérios a serem seguidos:

- (i) Faz-se imprescindível a leitura do manual de instrução do equipamento, para haver familiaridade com a operação do mesmo;
- (ii) Calibração do sismógrafo: É recomendada uma calibração anual do equipamento;
- (iii) Organização dos parâmetros de entrada da leitura (data, nome do operador, localização, tipo de operação, entre outros);
- (iv) Documentação da locação do equipamento: Isto inclui o tipo de estrutura onde o sismógrafo foi instalado e a localização em relação à estrutura a ser analisada;
- (v) Determinação da distância e localização do aparelho ao desmonte: A distância horizontal entre o sismógrafo e a detonação deve ser conhecida;
- (vi) Captura no ato do desmonte: Quando os sismógrafos são instalados em campo, o tempo gasto deve justificar uma gravação completa do efeito da detonação. Na prática, isto inclui em determinar o nível de disparo do aparelho, baixo o suficiente para captar cada detonação;

- (vii) Captura de todo o histórico da onda propagada: A opção de captura de síntese do evento ou do valor pico, disponível em alguns sismógrafos *não* deve ser utilizado para medir os níveis de vibração em um desmonte;
- (viii) Ajuste da taxa de amostragem: O sismógrafo deve ser programado para gravar o máximo de detalhes do desmonte possível, com o intuito de demonstrar os traços de variação das vibrações. De uma forma geral, a taxa de amostragem deve ser de ao menos 1000 amostras por segundo;
- (ix) Conhecimento do tempo de processamento de dados do sismógrafo e capacidade de armazenamento do mesmo;
- (x) É importante reservar uma quantidade de tempo satisfatória para configurar o aparelho. A maioria dos erros de operação ocorrem provenientes de atrasos na configuração e posicionamento dos sismógrafos;
- (xi) Conhecimento do clima e temperatura.

No que diz respeito ao monitoramento dos eventos de movimentações rochosas, o posicionamento e acoplamento do sensor de vibração são os dois fatores que garantem a eficácia da coleta dos dados. Algumas precauções devem ser tomadas para garantir que isto aconteça:

- (i) Posicionamento do sensor: O mesmo deve ser posicionado na estrutura onde se deseja verificar os níveis de vibrações ou o mais próximo possível, sendo ela uma construção civil ou até mesmo a própria área de lavra de uma mineração. Medição em estradas, passarelas, lajes ou próximos de torres de alta tensão devem ser evitadas. A colocação do sensor deve garantir que os dados obtidos representem os níveis de vibrações recebidos pela estrutura. O sensor deve ser colocado a uma distância de no máximo 3 metros da estrutura ou menos de 10% da distância para o desmonte, o que for menor;

- (ii) Avaliação da densidade do solo: Solos inconsolidados ou formações com descontinuidades podem causar uma influência adversa na acurácia do experimento;
- (iii) O sensor deve estar razoavelmente nivelado em relação ao horizonte;
- (iv) Métodos de aterramento ou fixação: O método preferencial de aterramento, para o caso de instalação em solos, dá-se escavando um buraco de pelo menos três vezes a altura do sensor, fixando firmemente o sensor ao fim do buraco e por fim compactando firmemente o material escavado acima do sensor. A fixação do sensor a uma camada rochosa pode ser alcançada por meio de parafusamento, grampeamento, ou simplesmente aderindo o sensor à superfície rochosa com algum material que o agarre firmemente, como gesso.

Em relação ao monitoramento de sobrepressão atmosférica, principal causador de ruídos em uma detonação, alguns cuidados devem ser tomados para evitar uma captação negligente:

- (i) O microfone deve estar posicionado o mais próximo possível do desmorte, porém em um local seguro em relação a ultralanchamentos;
- (ii) O microfone deve estar posicionado próximo ao geofone, e equipado com o protetor em espuma para eliminar ou reduzir os ruídos provenientes dos ventos e prováveis chuvas;
- (iii) O microfone deve ser posicionado em qualquer altura acima do nível do piso;
- (iv) Se possível, deve-se evitar posicionar o microfone onde hajam barreiras físicas entre o mesmo e o desmorte, como edificações, veículos ou até mesmo outras formações rochosas. Caso isto não possa ser evitado, a distância horizontal entre o microfone e a barreira deve ser maior que a altura desta barreira que se encontra entre o desmorte e o microfone;

- (v) Se o microfone é instalado muito próximo a uma estrutura, a sobrepressão atmosférica poderá refletir nesta superfície, captando assim maiores amplitudes. Ruídos de resposta (feedback) em relação à esta estrutura também poderão ser captados. O fenômeno de reflexão pode ser minimizado ao posicionar o microfone próximo à esquina desta estrutura.

2.6 ANÁLISE DE IMAGENS DIGITAIS NO DESMONTE DE ROCHA

Este método tem o objetivo de medir qualitativamente e quantitativamente o desmonte de rocha, através da utilização de fotografias digitalizadas. Normalmente, a fragmentação obtida no desmonte é avaliada como “satisfatória”, “material fino”, e “material grosseiro”, sendo os dois últimos parâmetros geralmente indesejados (Demenegas, 2008). Estas são distinções feitas por pessoas com relativa experiência, sendo este critério bastante vago e de difícil quantificação. A forma mais confiável de avaliar uma fragmentação de uma detonação é através de peneiramento de toda a pilha de minério, ou ao menos amostras representativas. Contudo, torna-se uma dispendiosa missão, devido ao grande volume de material desmontado nas operações, e o tempo necessário para realizar uma análise de toda a pilha.

A análise de imagens digitais possui diversas vantagens inerentes ao processo (Maerz & Zhou, 1998), como:

- (i) As medições podem ser completamente automatizadas, eliminando várias etapas no processo;
- (ii) Uma grande quantidade de medições pode ser realizada, aumentando assim a confiabilidade através da redução de erros amostrais;
- (iii) É um método que não requer interrupções no processo produtivo de uma mina, a depender do sistema utilizado;
- (iv) Oferece uma maneira de avaliar a distribuição granulométrica de materiais grosseiros, ou matacões.

As desvantagens da análise digital de imagens são relacionadas aos erros inerentes, que podem ser divididos entre as seguintes categorias:

- (i) Erros relacionados ao método de análise de imagens digitais;
- (ii) Erros relacionados ao processo de amostragem;
- (iii) Erros relacionados ao processamento da imagem.

A idéia de que estes erros podem ser minimizados drasticamente é amplamente aceita, através de métodos de amostragem cuidadosos, ambiente apropriado para a captação das imagens e calibração apropriada do software utilizado para tal análise.

Conforme mencionado anteriormente, a análise digital de imagens é um método não intrusivo, ou seja, ele não atrapalha o cronograma dos processos subsequentes ao desmonte da rocha. Fotografias do material são adquiridas e utilizadas como parâmetro de entrada para as análises. Esta imagem é delineada (ou seja, linhas são desenhadas ao longo das fronteiras dos fragmentos individualizados) através de um algoritmo. A granulometria de cada partícula é medida individualmente e uma curva de distribuição é construída. As imagens podem ser realizadas seja por meio de câmeras instaladas nas caçambas dos caminhões de transporte do material, como da própria pilha de minério, ou até mesmo no alimentador do britador primário.

3 METODOLOGIA

A metodologia para a elaboração do presente projeto foi definida conforme a necessidade e disponibilidade de certos métodos e equipamentos. Ela pode ser dividida em:

3.1. LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO

Foi realizado inicialmente um levantamento do estado da arte, nacional e estrangeira, acerca das principais metodologias de tamponamento e análise da eficiência destes métodos, sobretudo nas detonações em bancadas ascendentes à céu aberto. Além disto, foram amplamente estudadas algumas formas de análise de distribuição granulométrica das partículas desmontadas, levando em consideração a disponibilidade de equipamentos, softwares e mão de obra necessários para a realização do projeto.

3.2. SELEÇÃO DOS MÉTODOS DE ANÁLISE

A partir do levantamento bibliográfico, varias possibilidades foram criadas para que um cenário fidedigno pudesse ser criado. Ao longo do projeto, os métodos foram definidos e podem ser divididos conforme a seguir:

3.2.1 Escolha do acessório auxiliar de tamponamento e metodologia

A definição deste parâmetro foi realizada de forma dispendiosa, tendo em vista a pouca ou nenhuma utilização de acessórios auxiliares de tamponamento no desmonte de rocha, sobretudo na região Nordeste do Brasil.

Ao longo da revolução tecnológica no desmonte de rochas, as inovações em confinamento de energia explosiva se mantiveram relativamente estagnadas. Considerando que o valor da matéria explosiva representa em certas situações até 80% do custo total de uma detonação, fica claro que é necessária uma análise quantitativa e qualitativa dos parâmetros de tamponamento em lavra a céu aberto, bem como os acessórios auxiliares a serem utilizados.

Os plugues de tamponamento (Blast Control Plug, Stemming Plugs) foram concebidos e desenvolvidos pelo Dr. Paul Worsey, Pesquisador Senior do Centro de Pesquisas de Mecânica das Rochas e Explosivos, na Universidade do Missouri – Rolla. A patente U.S. #4.754.705 e várias patentes internacionais protegem este produto, utilizado na indústria de mineração desde 1991.

A primeira preocupação relativa ao acessório foi em selecionar um material de fácil aquisição, que exercesse grande resistência em situações de altíssima pressão e temperatura. Após uma revisão de literatura, definiu-se o Poliestireno de Alto Impacto (PSAI) como matéria prima para criação do artefato. Segundo Rovere et al. (2008), o PSAI é uma blenda polimérica de reator produzida por polimerização *in-situ* de estireno em solução com borracha butadiênica. Possui uma matriz rígida e contínua formada por poliestireno grafitizado com domínios elastoméricos dispersos e que são comumente compostos por polibutadieno. Tal estrutura proporciona características específicas para o material, como aumento na resistência ao impacto, alongamento até a ruptura e resistência à fratura quando comparado ao PS puro, características adequadas para a utilização em desmonte de rochas. O nível de degradação do material depende muito da sua composição e estrutura, no caso do PSAI, a degradação se inicia nas ligações duplas do polibutadieno e por reações em cadeia que afeta a matriz de poliestireno. Como consequência da degradação, a característica mais afetada do HIPS é o alongamento até a ruptura, tornando o material menos deformável e mais frágil mecanicamente.

Após a seleção do material, iniciou-se uma criteriosa escolha pela geometria do acessório, levando em conta principalmente as características do polímero e sua atuação direta em detonações. Duas detonações em diferentes minerações a céu aberto foram efetuadas com a utilização do acessório (Figuras 06 e 07), de formato cônico e completamente vazado em seu interior (Figura 08). Nas duas situações, o tamponamento foi realizado com material cominuído, oriundo da própria detonação. O detalhe relevante é que em apenas metade das bancadas foram instalados o dispositivo de auxílio, denominado 'plugue de tamponamento'. Em uma análise qualitativa a partir de filmagens notou-se que, apesar de uma retenção gasosa efetiva, alguns plugues aparentavam terem sido rompidos com certa facilidade, eliminando sua atuação no interior do furo. Pequenas modificações foram realizadas na geometria dos plugues, e o resultado final pode ser visualizado na Figura 09.

Figura 06 – Detonação realizada em pedreira granodiorítica, no município de Vitória de Santo Antão (Pernambuco). Os plugues para furos de 3” foram instalados apenas na porção localizada à direita da imagem, onde pode-se observar maior atuação da região do tampão.



Fonte: Autor, 2015.

Figura 07 – Desmorte realizado em mineração de calcário, no município de João Pessoa (Paraíba). Os plugues de tamponamento para furos de 3,5” foram instalados apenas na porção direita do desmorte, onde demonstrou alta retenção gasosa.



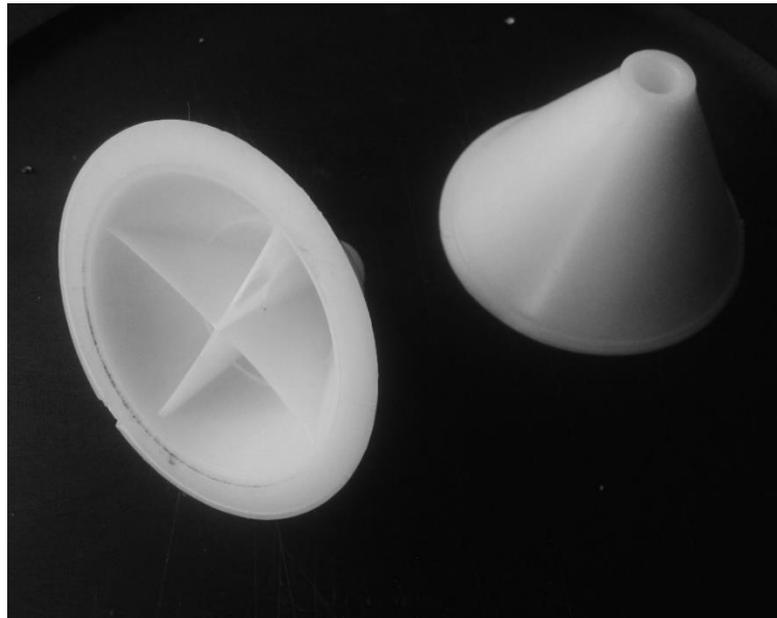
Fonte: Autor, 2015.

Figura 08 – Projeto piloto do plugue de tamponamento.



Fonte: Autor, 2014.

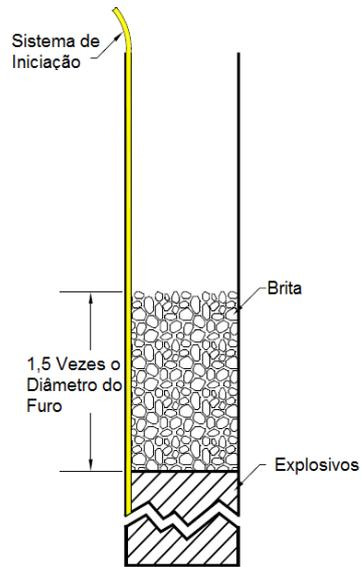
Figura 09 – Design final do plugue de tamponamento.



Fonte: Autor, 2016.

No que diz respeito à aplicação dos plugues, o primeiro passo na utilização é criar uma “cama de amortecimento” entre a coluna explosiva e o plugue (Figura 10). No presente projeto, foi determinada uma cama de 15 centímetros, determinada a partir de sucessivos testes na mesma mineração. Esta altura permite que o dispositivo atue sem ser ejetado, e ao mesmo tempo não esteja em contato direto com a detonação.

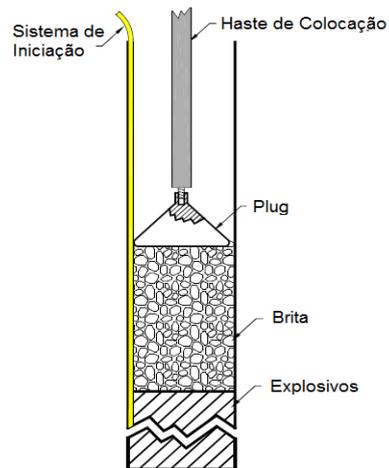
Figura 10 - Colocação do Plugue: Passo 1.



Fonte: Autor, 2016.

Em seguida, o plugue é introduzido no furo com a haste de colocação (Figura 11).

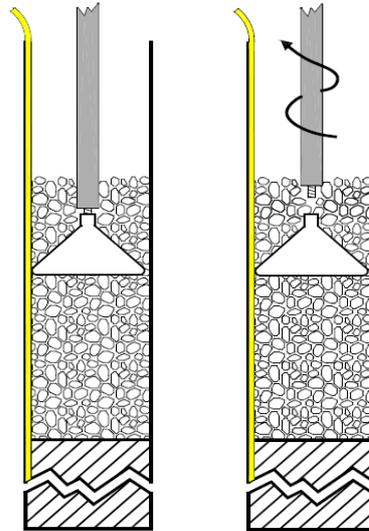
Figura 11 – Colocação do Plugue: Passo 2.



Fonte: Autor, 2016.

A Figura 12 demonstra a finalização da colocação, com a colocação de um sobrepeso de brita e torção da haste, para retirada da mesma e assentamento do plugue.

Figura 12 – Colocação do Plugue: Passos 3 e 4.



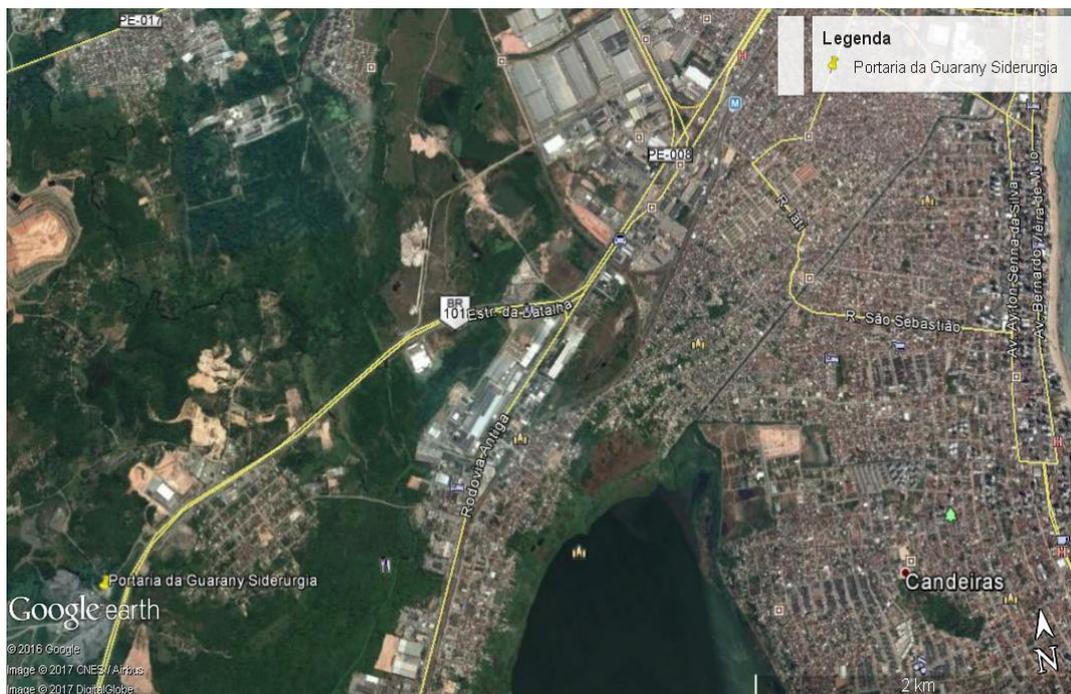
Fonte: Autor, 2016.

3.2.2 Localização e caracterização da mineração do estudo de caso

A Guarany Siderurgia e Mineração S.A, empreendimento mineiro selecionado para o estudo de caso de avaliação dos métodos de tamponamento, fica localizada no Engenho Comporta de Cima, distando aproximadamente 20 km do Recife (Figura 13). O processo de portaria de lavra referente ao Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM) possui a numeração 840.108/2002. O acesso é feito a partir do Recife pela BR-101 Sul, percorrendo 18 km e depois mais 2 km por estrada carroçável de acesso à Vila Comporta.

A mineração oferece boas condições de infraestrutura básica para a metodologia proposta.

Figura 13 – Localização e vias de acesso da mineração do estudo de caso.



Fonte: Google Earth, 2017.

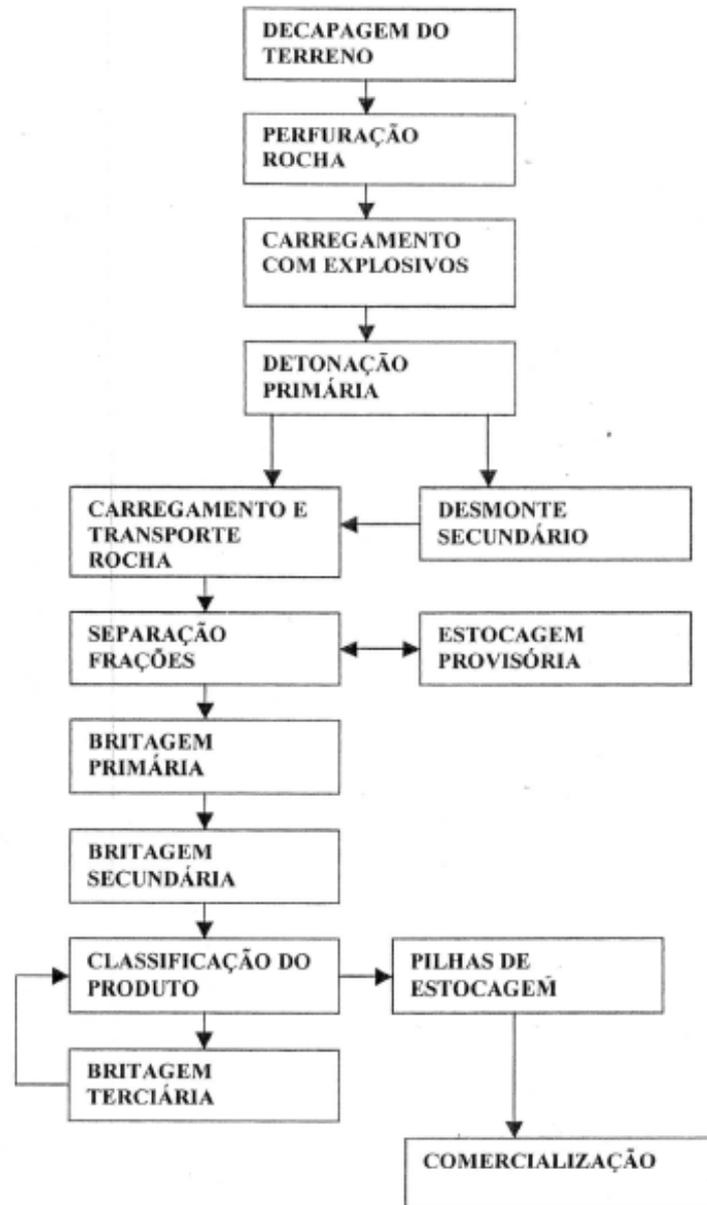
A geologia local faz parte de um extenso maciço granítico de amplitude regional, encontrando-se inserida no Complexo Gnáissico-Migmatíticos indiscriminados de idade Paleoproterozóica, constituindo uma sequência de ortognaisses e migmatitos de composição granítica a tonalítica, compreendendo o embasamento do Terreno Rio Capibaribe.

No interior das áreas em apreço, afloram rochas graníticas, podendo-se observar em cortes de estradas. Nas partes mais altas aparecem materiais areno-argilosos, constituídos pelo manto de intemperismo.

O granito de interesse possui coloração cinza rosado, granulação homogênea, textura granular formada por plagioclásio, quartzo, biotita e minerais máficos. A composição mineralógica é constituída por 70% de k-feldspatos (microclina/plagioclásio), em torno de 20% quartzo 10% de hornblenda e biotita.

Tanto do ponto de vista técnico e econômico, o método de lavra a céu aberto em bancadas em encostas ascendentes se mostra o mais viável com pleno sucesso e segurança garantindo um bom desempenho na produção final do produto. Todas as operações neste plano de lavra são definidas conforme a Figura 14:

Figura 14 – Fluxograma da Pedreira Guarany.



Fonte: Pedreira Guarany, 2016.

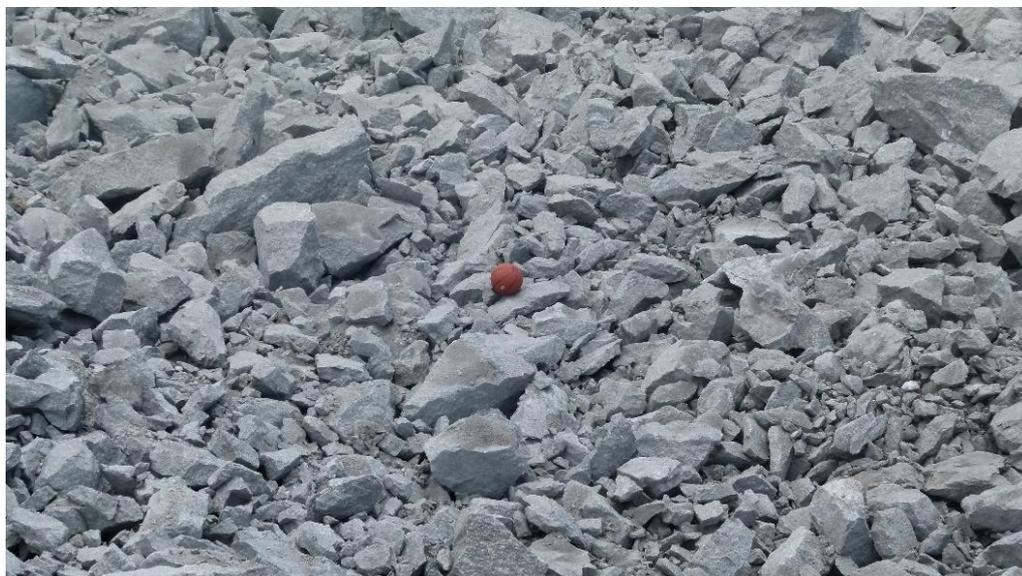
A planta de britagem, localizada na coordenada de Latitude 8°11'23.82"S e Longitude 34°58'33.27"O, DATUM SAD69, é composta por um conjunto, onde o minério proveniente da lavra é despejado no Alimentador 5 x 2 m, posteriormente segue para a Britagem Primária sendo ela composta por um britador C140 (42" x 55") da Metso, onde o material britado com APF de 7" é transportado através de uma Correia Transportadora de 42", onde forma-se uma Pilha intermediária.

3.2.3 Definição do método de captação de imagens das detonações

Duas filmagens do ato de cada detonação, de visão frontal e traseira, e um total de 48 fotografias das pilhas de minério de dois desmontes realizados nos dias 03/11/2015 e 18/01/2016 foram efetuadas. Destas 48, 11 foram selecionadas para serem processadas. O critério para a escolha das imagens a serem analisadas ou descartadas será discutido mais adiante.

As imagens foram adquiridas de uma localização apropriada com uma câmera digital Panasonic Lumix Fz100 com lentes de 25 – 600 mm. As especificações de filmagem em Full HD de 50 telas por segundo auxiliaram na análise de eficiência do tamponamento, furo a furo. As pilhas de minério foram fotografadas com uma resolução de imagem de 4320 x 2432 pixels. Para fins de escala entre os pixels da imagem e a distância física real, uma bola de basquete de diâmetro conhecido foi adicionada na pilha (Figura 15).

Figura 15 – Amostra de fotografia captada da pilha de material desmontado.



Fonte: Autor, 2015.

Das 48 imagens realizadas, nem todas tinham a mesma qualidade. As condições de iluminação e clima têm grande responsabilidade na qualidade final das imagens, e a dinâmica natural destes parâmetros criaram uma variação significativa na qualidade das imagens. O critério de seleção levou em consideração

principalmente a capacidade do software de delinear automaticamente a maior quantidade de fragmentos possíveis automaticamente.

Uma vez que as fotos foram realizadas a céu aberto, as condições de iluminação variaram significativamente. Diferentes intensidades de luz que incidiam na pilha de minério, por vezes eram erroneamente interpretadas pelo software de distribuição granulométrica como as fronteiras dos fragmentos, causando erros de delimitação. Além disto, sombras nos materiais podem ser confundidas como um concentrado de material fino pelo algoritmo. Pelas razões mencionadas, fotografias com iluminação solar direta, onde grandes sombras se apresentaram no material, foram descartadas.

3.2.4 Definição da metodologia da sismografia

Os equipamentos utilizados na obtenção de dados sismográficos analisados neste trabalho, pertencentes ao Laboratório de Controle Ambiental (LACAM), foram:

- (i) 02 (dois) sismógrafos de engenharia modelo SSU 3000 EZ, da fabricante Geosonic Incorporation (Figura 16);

Figura 16 - Modelo de sismógrafo utilizado nas medições.



Fonte: Autor, 2015.

- (ii) 01 (um) GPS, modelo Garmin 650, para possíveis marcações de pontos e determinação da distância entre o mesmo e a detonação em si;
- (iii) Computador para requisição dos dados junto aos sismógrafos.

Uma vez concluída a etapa de coleta de dados, com o auxílio do software *AnalysisNET* (desenvolvido pela própria Geosonic, fabricante dos sismógrafos) é possível manipular os dados e criar relatórios.

A localização dos dois sismógrafos em relação à área de desmonte foi escolhida de forma arbitrária e mantidas fixas nas duas detonações, conforme mostrado na Figura 17:

Figura 17 – Mapa de situação do desmonte e localização dos sismógrafos.



Fonte: Google Earth, 2016.

O objetivo principal da sismografia nos dois eventos é analisar, do ponto de vista operacional, as variações dos parâmetros das ondas vibratórias e sobrepressão atmosférica em cada situação de tamponamento.

Uma vez concluída a etapa de coleta de dados, com o auxílio do software *AnalysisNET* (desenvolvido pela própria Geosonic, fabricante dos sismógrafos) é possível manipular os dados e criar relatórios.

3.2.5 Escolha do software para processamento das imagens

Neste trabalho foi utilizada a versão do programa Split-Desktop (3.1), dos Estados Unidos, pertencente a Valmon Consultoria e Treinamento LTDA.

Segundo Siddiqui et al. (2009), o sistema Split consiste em um processamento de imagem designado para calcular a distribuição de fragmentos rochosos, através de análise digital de imagens em escala de cinza. Estas imagens podem ser adquiridas pela utilização de fotografia digitais, pela captura de quadros em filmagens ou até mesmo por escaneamento de fotografias.

O software Split é resultado de cerca de nove anos de pesquisa e desenvolvimento na Universidade do Arizona. Split-Desktop combina os elementos do software Split com elementos e resultados de pesquisas que foram alimentados como base de dados. Estes estudos foram realizados no Centro de Pesquisa Mineral Julius Kruttschnitt, localizado em Brisbane, Austrália.

Existem dois formatos no sistema Split: o primeiro é totalmente automatizado e opera continuamente a partir de imagens realizadas em uma correia transportadora. A outra, o Split-Desktop, diz respeito a um software que trabalha off-line, ou seja, pode ser operado por imagens salvas e utilizadas posteriormente.

O conteúdo destas imagens podem ser uma pilha de minério, a caçamba do veículo transportador do minério desmontado, uma pilha de lixiviação, correia transportadora, entre outros. Uma vez que as imagens são efetuadas e salvas em um computador, o software possui cinco passos progressivos para analisar cada imagem.

O primeiro passo permite que seja determinada uma escala para cada imagem realizada em campo. O segundo passo é a delimitação dos fragmentos em cada imagem a ser processada. Posteriormente, o software permite a edição dos fragmentos delimitados para garantir a acurácia dos resultados. O quarto passo envolve o cálculo da distribuição granulométrica baseado nos fragmentos delimitados. Por fim, o último passo consiste na representação gráfica da distribuição e vários parâmetros de saída.

3.2.6 Levantamento de dados operacionais posteriores ao desmonte

Com o intuito de relacionar a variação nos parâmetros de tamponamento com a produtividade do empreendimento mineiro, dados da produção do desmonte secundário, efetuado por um rompedor hidráulico foram levantados posteriormente. O objetivo principal foi, adicionalmente à análise de distribuição granulométrica, identificar a variação na britabilidade do material, oriunda de fraturas não visíveis proporcionadas no ato da detonação.

4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos através da utilização da metodologia proposta em dois desmontes de rocha distintos, realizados em uma mesma bancada na Pedreira Guarany.

Em ambos os desmontes, o material inerte utilizado em adição aos plugues de tamponamento foi uma Brita-25 mm (Figura 18), oriunda da própria planta de britagem da Pedreira Guarany. Pelo seu formato e granulometria, permite um intertravamento ideal entre os grãos, maximizando assim o poder de tamponamento da coluna.

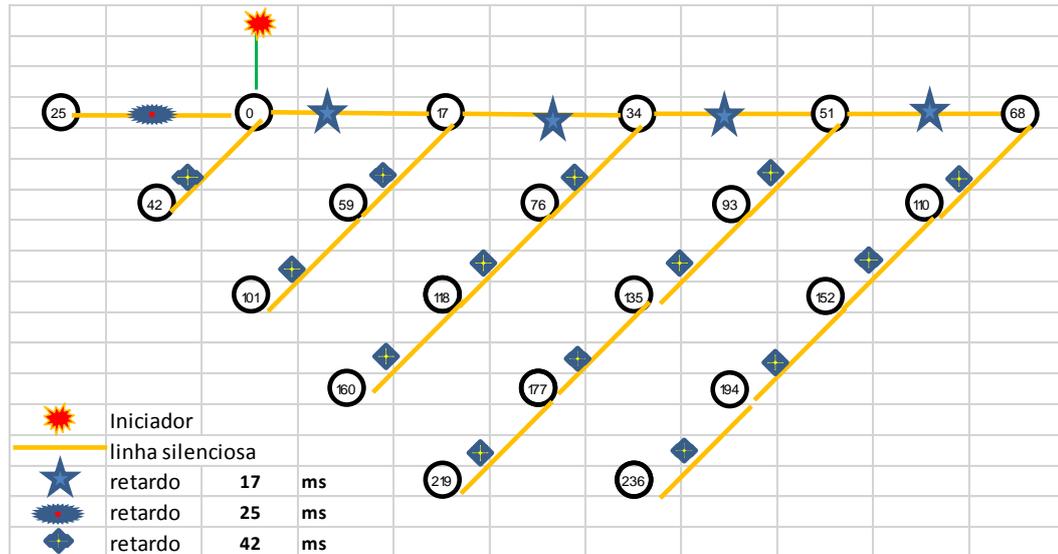
Figura 18 – Brita-25 mm, utilizada no tamponamento das detonações.



Fonte: Autor, 2016.

Em relação à malha de perfuração, os dois desmontes apresentaram o mesmo padrão, diferindo apenas no número total de linhas e furos. O mesmo esquema de amarração de linhas silenciosas foi utilizado (Figura 19).

Figura 19 – Esquema de amarração das linhas silenciosas.



Fonte: Autor, 2017.

4.1 PRIMEIRO DESMONTE

A primeira detonação fruto de análise deste projeto foi realizada no dia 03/11/2015, sob condições climáticas favoráveis, conforme mostrado na Figura 20.

Figura 20 – Visão lateral da bancada desmontada no dia 03/11/15.



Fonte: Autor, 2015.

Com exceção do tamponamento, todos os parâmetros do plano de fogo, bem como o croqui de amarração do desmonte e acessórios utilizados foram selecionados conforme o padrão de operação da Pedreira Guarany, onde o mesmo já se mostrou

bastante efetivo ao longo dos anos. Abaixo, a Tabela 08 apresenta um resumo dos parâmetros do plano de fogo.

Tabela 08 – Parâmetros do plano de fogo do dia 03/11/2015, realizado na Pedreira Guarany.

Diâmetro de furação (")	3,50
Afastamento (m)	2,50
Espaçamento (m)	3,30
Inclinação (graus)	0
Sub-furação (m)	0,85
Tampão (m)	2,50
Número de furos	99
Número de linhas	3
Carga Explosiva	Emulsão Bombeada
Carga máxima por espera (Kg)	74,75
Distância preservada (m)	158,81
Altura média (m)	12,11
Volume por furo (m³)	99,90
Volume total (m³)	9890
Explosivo consumido (kg)	7405,00
Razão de carregamento (kg/m³)	0,749

Fonte: Autor, 2017.

Sob justificativa de se tratar de uma bancada no topo do maciço rochoso, com alta visada e próxima a diversas comunidades urbanizadas, optou-se, adicionalmente à utilização de plugues, uma altura da coluna de tampão de 2,5 m, de mesmo valor do afastamento da malha de perfuração. A Figura 21 demonstra visualmente o resultado do primeiro desmonte.

Figura 21 – Pilha de minério oriunda do primeiro desmonte.



Fonte: Autor, 2015.

4.1.1 Análise do tamponamento no primeiro desmonte

No que diz respeito ao objetivo da coluna de tampão de retardar a fuga dos gases oriundos da detonação, a análise qualitativa das filmagens (Figuras 22 e 23) demonstrou que houve uma alta retenção gasosa, ocasionada pela alta coluna de tampão e utilização dos plugues de tamponamento.

Contudo, também foi notificada uma falha de iniciação do explosivo no segundo furo a ser iniciado, na linha mais próxima à face livre da bancada. Este fato acabou ocasionando uma não-formação de face livre para os furos das linhas sucessoras, causando uma ejeção excessiva da coluna de tampão em pelo menos cinco furos da bancada, formando assim uma cominuição defasada. Entre os fatores que podem ter ocasionado a falha, estão: falha humana na amarração das linhas silenciosas; falha dos dispositivos de iniciação; corte mecânico da linha silenciosa.

Figura 22 – Captura de frame da filmagem frontal no primeiro desmonte. A iniciação do desmonte foi realizada à direita do vídeo.



Fonte: Autor, 2015.

Figura 23 – Captura de frame da filmagem traseira no primeiro desmonte. A iniciação do desmonte à esquerda do vídeo.



Fonte: Autor, 2015.

4.1.2 Relatório sismográfico do primeiro desmonte

Tabela 09 – Resumo dos dados sismográficos no primeiro desmonte.

	SISMÓGRAFO	
	<i>SN 8992</i>	SN 8993
Tempo de gravação (s)	5	3
Distância ao desmonte (m)	539	223
Ativação da sísmica (mm/s)	1,27	1,02
Ativação sonora (db)	100	100
PPV Long. (mm/s)	3,81	4,83
PPV Trans. (mm/s)	1,71	6,03
PPV Vert. (mm/s)	2,67	7,05
Freq. Long. (mm/s)	33,3	27,8
Freq. Trans (mm/s)	50	21,7
Freq. Vert. (mm/s)	29,4	22,7
Velocidade de partícula pico resultante (mm/s)	4,0	7,87
Sobrepresão atmosférica pico (dB)	103	138

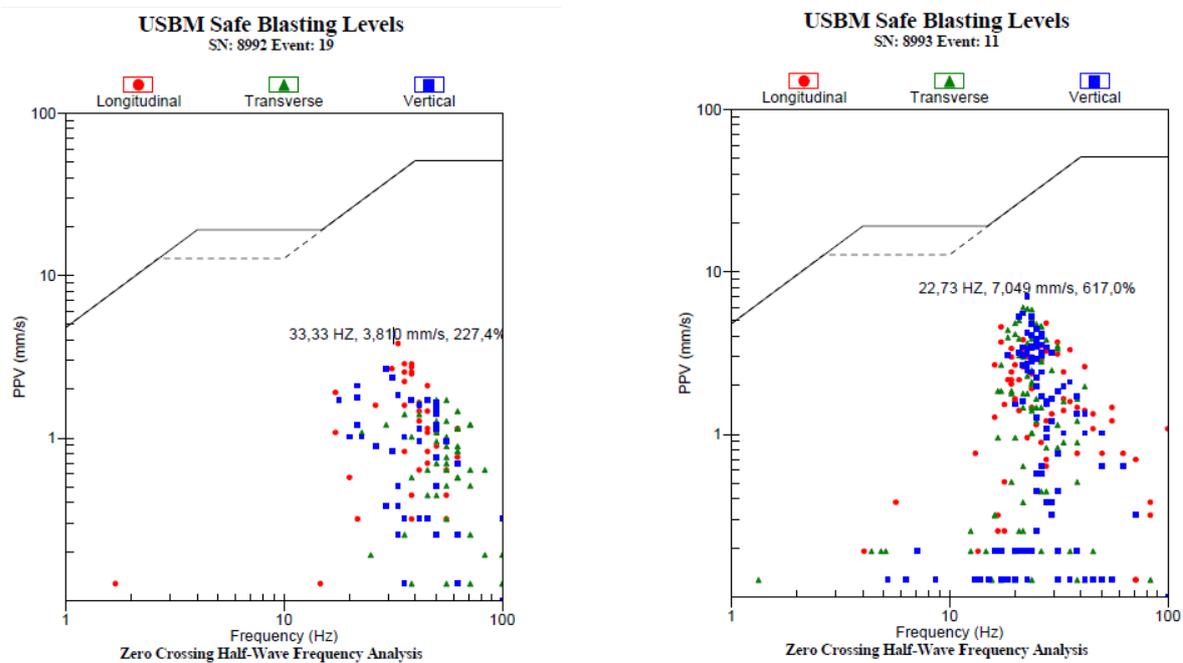
Fonte: Autor, 2017.

Conforme Tabela 09, o valor do vetor resultante de velocidade de partícula atingiu valores máximos de 4,00 mm/s na medição do Sismógrafo 8992 e **7,87 mm/s** na medição do Sismógrafo 8993, abaixo do limite de 15 mm/s determinado pela NBR 9653. Isto demonstra que o plano de fogo do desmonte em questão está adequado para a situação e formação rochosa em questão, no que diz respeito aos níveis de vibração do ponto de vista ambiental.

Em relação aos valores de sobrepressão atmosférica, o mesmo atingiu o valor de 138 dBL no sismógrafo 8993. A NBR 9653 indica um valor máximo de sobrepressão atmosférica da ordem de 134 dBL **fora da área de operação**. Conforme demonstrado na Figura 16, o sismógrafo em questão foi instalado o mais próximo da operação. A comunidade mais próxima desta operação de desmonte encontra-se a cerca de 500 metros de distância, justificando assim o valor aferido como praticável.

A Figura 24 resume os eventos de captação sismográfica do primeiro desmonte.

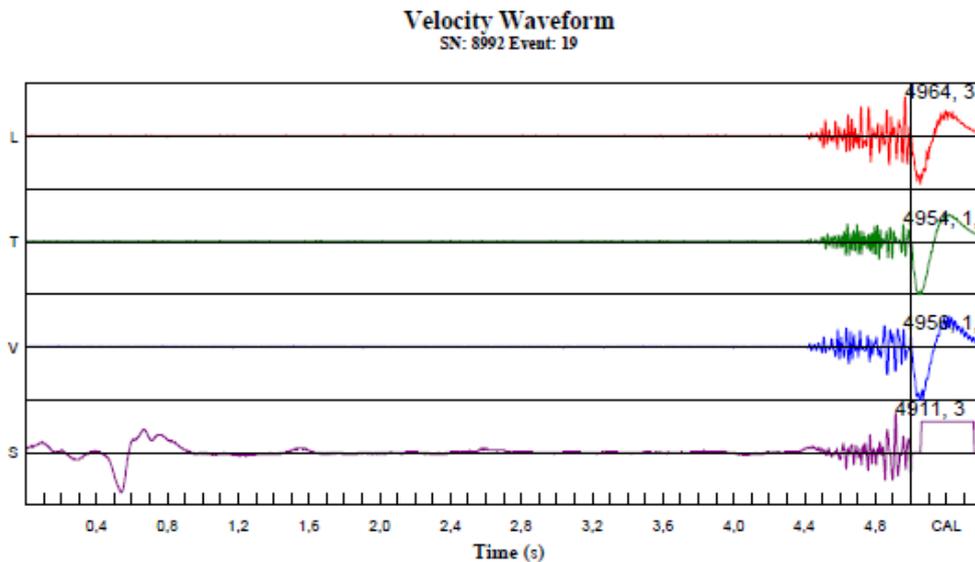
Figura 24 – Resumo dos eventos captados na sismografia, e sua comparação em relação aos limites definidos pela United States Bureau of Mine (USBM).



Fonte: AnalysisNET, 2017.

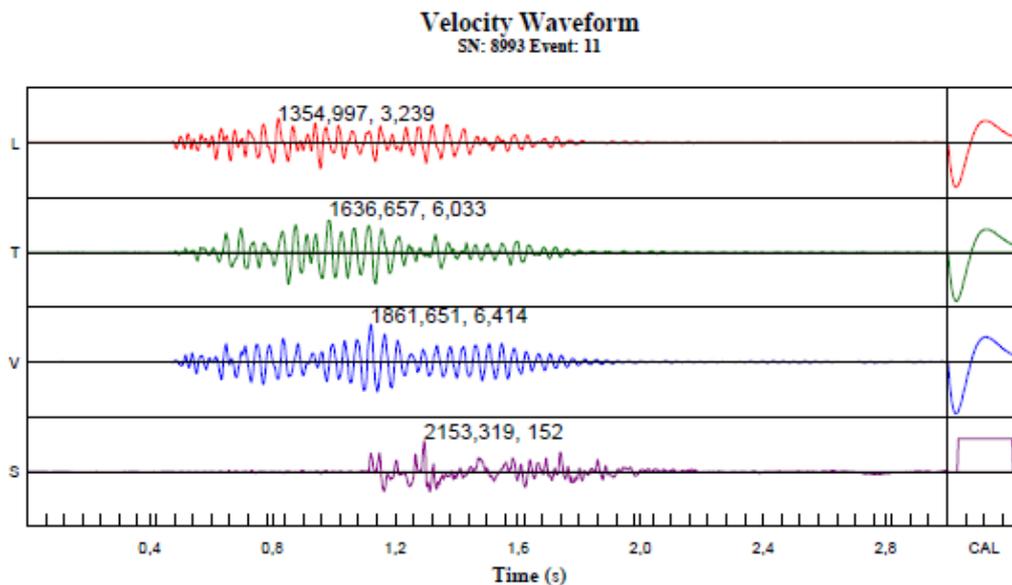
Ao analisar o sismograma do primeiro desmonte captado pelo sismógrafo de número de série 8992 (Figura 25), foi possível observar que houve um disparo prévio no dispositivo, ocasionando uma captação incompleta do evento de desmonte, se comparando à Figura 26, relativa ao sismógrafo 8993. Por este motivo, apenas os dados do sismógrafo de número de série 8993 serão utilizados para a análise final.

Figura 25 – Sismograma do primeiro desmonte, captado pelo sismógrafo 8992.



Fonte: AnalysisNET, 2017.

Figura 26 – Sismograma do primeiro desmonte, captado pelo sismógrafo 8993.



Fonte: AnalysisNET, 2017.

4.1.3 Análise granulométrica do primeiro desmonte

Foram processadas 4 fotografias da pilha obtida dos desmontes da bancada. A Figura 27 mostra detalhes da fragmentação obtida.

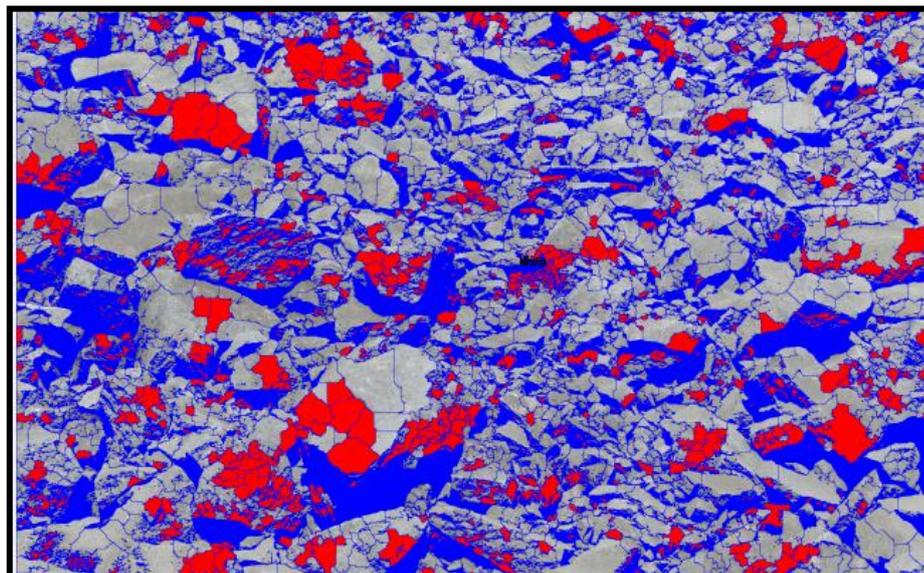
Figura 27 – Fotografia utilizada na análise de distribuição granulométrica da pilha de minério do primeiro desmonte.



Fonte: Autor, 2015.

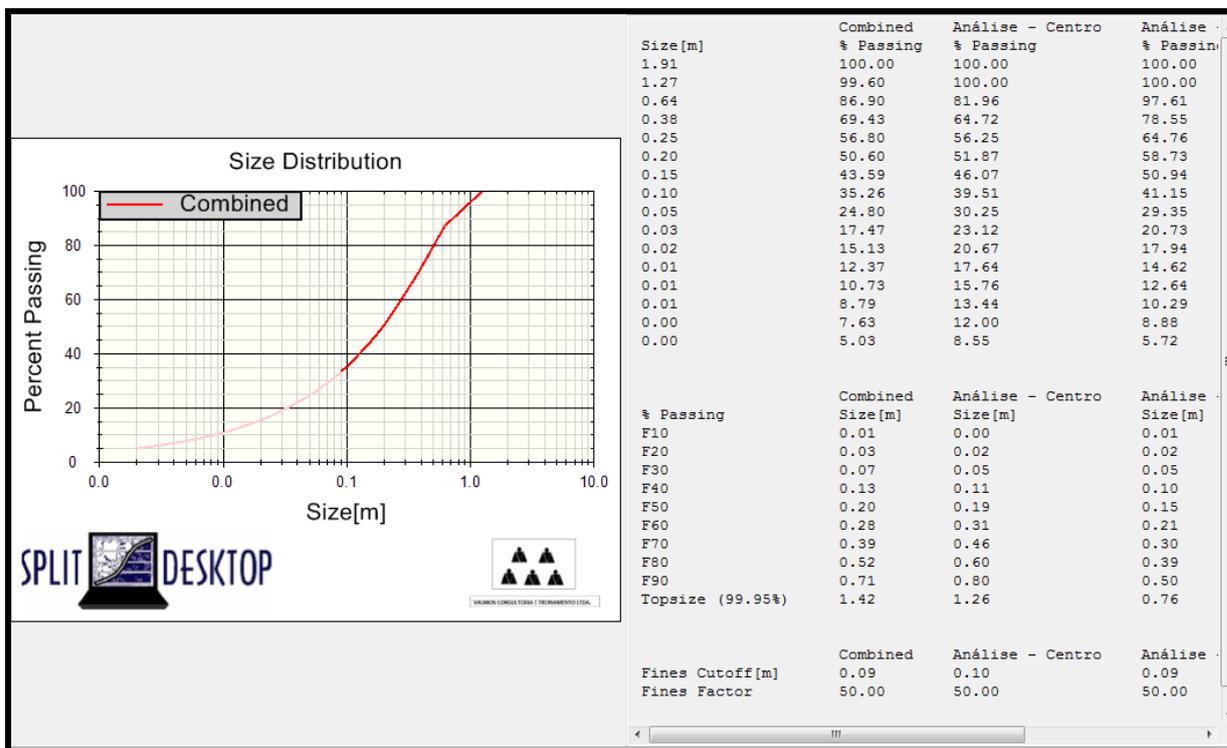
A Figura 28 apresenta o contorno e contagem dos blocos, enquanto a Figura 29 exibe a curva de distribuição granulométrica aferida no desmonte.

Figura 28 – Imagem de contorno do primeiro desmonte.



Fonte: SplitDesktop, 2016

Figura 29 – Curva de distribuição granulométrica do primeiro desmorte.



Fonte: SplitDesktop, 2016.

Na Tabela 10 é possível observar os parâmetros fundamentais da curva de distribuição granulométrica obtida para a pilha de fragmentos decorrente de todas as quatro fotografias utilizadas na análise da pilha do desmorte.

Tabela 10 – Parâmetros da distribuição granulométrica no primeiro desmorte.

Max (m)	F10 (m)	F30 (m)	F50 (m)	F70 (m)	F90 (m)	% < 110 cm
1,42	0,01	0,07	0,20	0,39	0,71	95

Fonte: Autor, 2017

Observa-se que 90% dos fragmentos ficaram abaixo de 71 cm. 50% dos fragmentos ficaram acima e abaixo dos 20 cm.

Baseado nas fotografias enviadas e na Figura 28, aproximadamente, 95% dos fragmentos ficaram com um comprimento compatível com o tamanho ideal dos fragmentos rochosos, ou seja, 80% da abertura máxima do britador (<1,1 m).

4.2 SEGUNDO DESMONTE

A segunda detonação fruto da análise deste projeto foi realizada no dia 18/01/2016, em condições climáticas menos favoráveis em relação ao primeiro desmonte, devido à nuvens esparsas e pequena formação chuvosa. Ainda sim, foi possível realizar a etapa de carregamento conforme os padrões de segurança e operação (Figura 30).

Figura 30 – Vista lateral da bancada, desmontada em 18/01/2016.



Fonte: Autor, 2016.

Conforme mostrado na Tabela 11, algumas modificações no plano de fogo em relação da o primeiro desmonte podem ser observadas. A primeira delas, diz respeito à coluna de tampão, reduzida em 35 centímetros. Um número maior de furos, justificando a adição de duas linhas ao desmonte também pode ser notificado, além da redução da altura média da bancada fruto de acidente demográfico natural. O resultado da detonação pode ser visualizado na Figura 31.

Tabela 11 – Parâmetros do plano de fogo do dia 18/01/2016.

Diâmetro de furação (")	3,50
Afastamento (m)	2,50
Espaçamento (m)	3,30
Inclinação (graus)	0
Sub-furação (m)	0,85
Tampão (m)	2,15
Número de furos	162
Número de linhas	5
Carga Explosiva	Emulsão Bombeada
Carga máxima por espera (Kg)	67,90
Distância preservada (m)	151,36
Altura média (m)	11,14
Volume por furo (m³)	91,89
Volume total (m³)	14885
Explosivo consumido (kg)	11000,04
Razão de carregamento (kg/m³)	0,739

Fonte: Autor, 2016.

Figura 31 – Pilha de minério oriunda do segundo desmonte.

Fonte: Autor, 2016.

4.2.1 Análise do tamponamento no segundo desmonte

A redução na coluna de tampão afetou diretamente no que concerne à ejeção gasosa nos furos. Qualitativamente, pode-se afirmar que o tampão se comportou de

forma ligeiramente ineficaz para os seus propósitos (Figura 32). Apesar disto, ultralançamentos excessivos não foram notificados. Conforme analisado na filmagem, não houve nenhuma falha de iniciação. Devido às más condições climáticas, não foi possível a instalação da câmara frontal do desmante.

Figura 32 - Captura da filmagem traseira no segundo desmante (a iniciação do desmante foi realizada à esquerda do vídeo).



Fonte: Autor, 2016.

4.2.2 Relatório sismográfico do segundo desmante

Por conta de certos inconvenientes ao longo das instalações dos sismógrafos, apenas o sismógrafo 8993 pôde ser utilizado durante a análise do segundo desmante. Pela sua proximidade à área de desmante e localização favorável, os resultados e discussão dos níveis de vibração e sobrepressão atmosférica foram satisfatórios e os resultados não serão afetados. O resumo dos dados encontram-se na Tabela 12:

Tabela 12 – Resumo dos dados sismográficos do segundo desmonte.

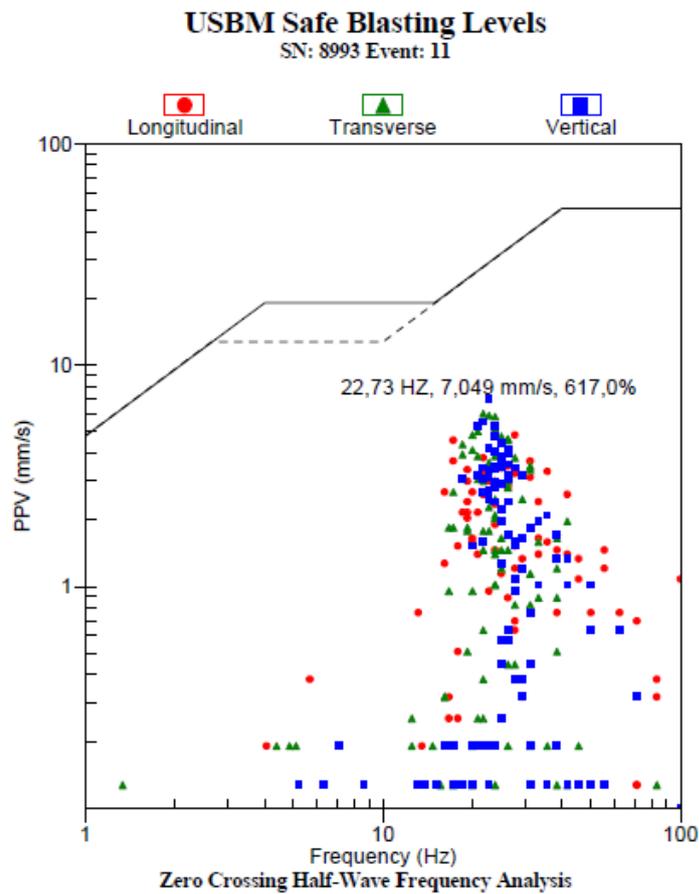
	SISMÓGRAFO
	8993
Tempo de gravação (s)	3
Distância ao desmonte (m)	220
Ativação da sísmica (mm/s)	1,02
Ativação sonora (db)	100
PPV Long. (mm/s)	7,37
PPV Trans. (mm/s)	5,33
PPV Vert. (mm/s)	7,43
Freq. Long. (mm/s)	125
Freq. Trans (mm/s)	38,5
Freq. Vert. (mm/s)	50
Velocidade de partícula pico resultante (mm/s)	9,27
Sobrepresão atmosférica pico (dB)	138

Fonte: Autor, 2017.

O valor do vetor resultante de velocidade de partícula atingiu valores máximos de **9,27 mm/s** na medição do Sismógrafo 8993. Ainda que tenha havido um aumento de 18% em relação ao primeiro desmonte, ainda se encontra abaixo do limite de 15 mm/s determinado pela NBR 9653. Isto demonstra que o plano de fogo do desmonte em questão ainda se encontra adequado para a situação e formação rochosa em questão, no que diz respeito aos níveis de vibração do ponto de vista ambiental.

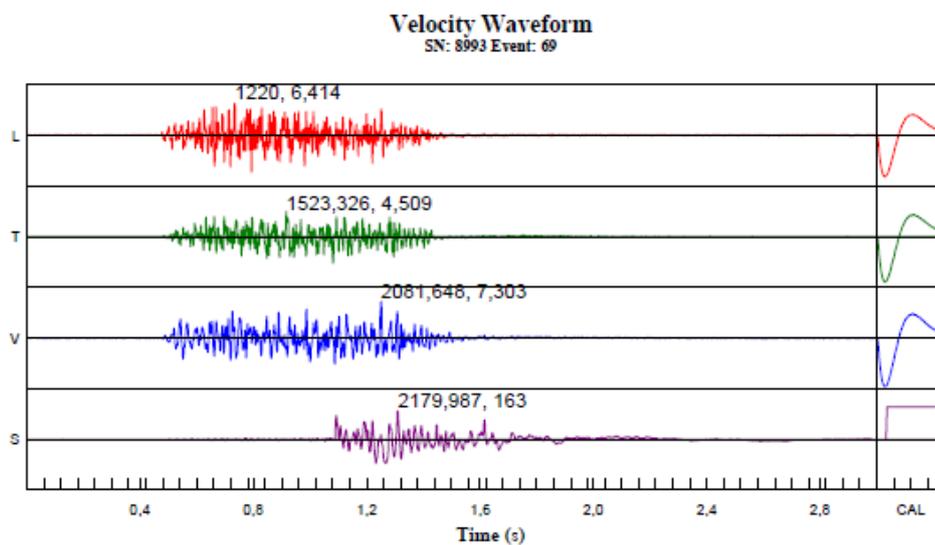
Em relação aos níveis de sobrepressão atmosférica, o mesmo também atingiu o valor de 138 dBL no sismógrafo 8993. A NBR 9653 indica um valor máximo de sobrepressão atmosférica da ordem de 134 dBL **fora da área de operação**. Conforme demonstrado anteriormente, o sismógrafo em questão foi instalado o mais próximo possível, visando a integridade do equipamento, da operação de desmorte determinado pela NBR 9653, justificando assim o valor aferido. A Figura 33 apresenta um resumo dos eventos captados na segunda detonação pelo sismógrafo 8993, e a Figura 34 o respectivo sismograma:

Figura 33 - Resumo dos eventos capturados e limites definidos pela USBM.



Fonte: AnalysisNET, 2017.

Figura 34 – Sismograma do sismógrafo 8993 no segundo desmonte.



Fonte: AnalysisNET, 2017.

4.2.3 Análise granulométrica do segundo desmonte

Foram processadas 7 fotografias da pilha obtida do segundo desmonte realizado na Pedreira Guarany como análise do projeto (Figura 35).

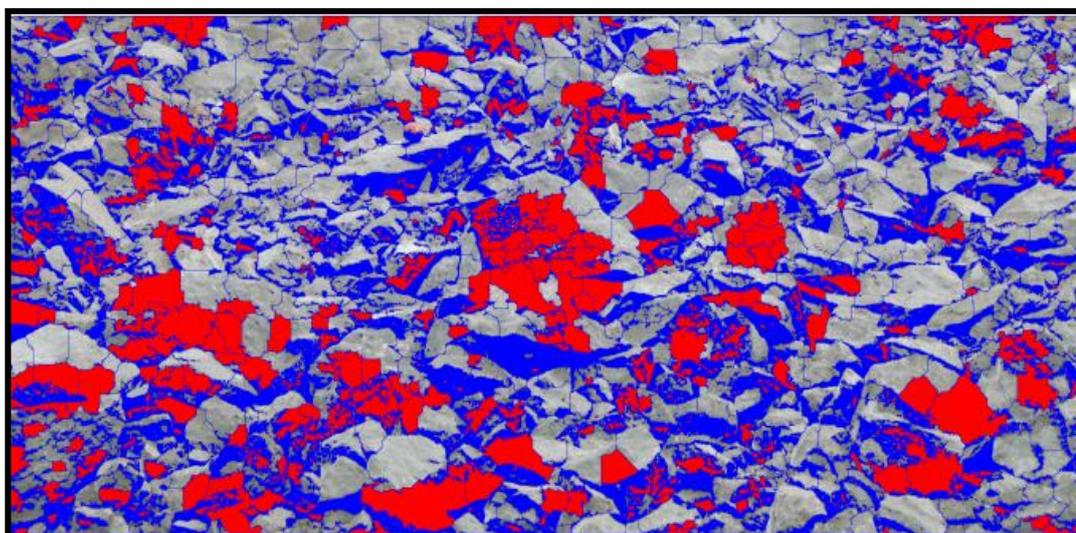
Figura 35 – Fotografia da análise granulométrica do segundo desmonte.



Fonte: Autor, 2017.

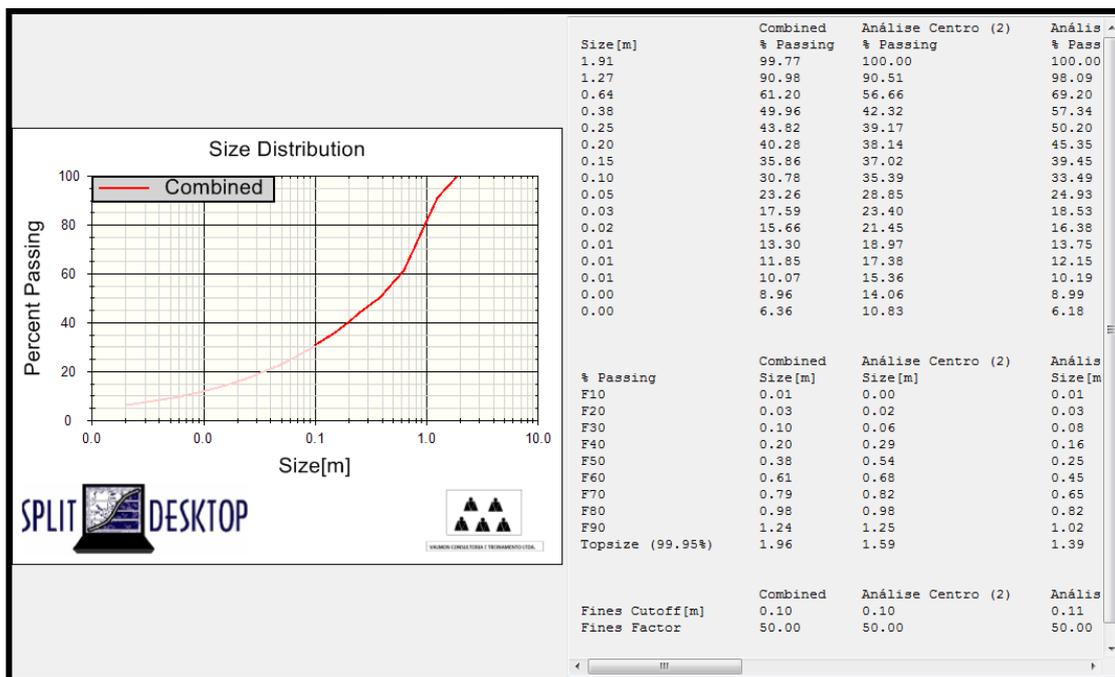
A Figura 36 apresenta o contorno e contagem dos blocos, enquanto a Figura 37 exibe a curva de distribuição granulométrica aferida no desmonte.

Figura 36 – Imagem processada, do segundo desmonte.



Fonte: SplitDesktop, 2016.

Figura 37 – Curva de distribuição granulométrica do segundo desmonte.



Fonte: SplitDesktop, 2016.

Na Tabela 13 é possível observar os parâmetros fundamentais da curva de distribuição granulométrica obtida para a pilha de fragmentos decorrente de todas as sete fotografias utilizadas na análise da pilha do desmorte.

Tabela 13 – Parâmetros da distribuição granulométrica no segundo desmorte.

Max (m)	F ₁₀ (m)	F ₃₀ (m)	F ₅₀ (m)	F ₇₀ (m)	F ₉₀ (m)	% < 110 cm
1,96	0,01	0,10	0,38	0,79	1,24	80

Fonte: Autor, 2017.

Observa-se que 90% dos fragmentos ficaram abaixo de 1,24 m. 50% dos fragmentos ficaram acima e abaixo dos 38 cm.

Baseado nas fotografias enviadas e na Figura 36, é seguro afirmar que aproximadamente 80% dos fragmentos ficaram com um comprimento compatível com o tamanho ideal dos fragmentos rochosos, ou seja, 80% da abertura máxima do britador (<1,1 m).

4.3 ANÁLISE COMPARATIVA DOS DESMONTES DE ROCHA

A Tabela 14 demonstra o resumo comparativo de alguns parâmetros de entradas e resultados obtidos das duas detonações, a fim de averiguar um padrão nos resultados, que servirão como base para uma análise sobre a efetividade dos processos de cominuição posteriores ao desmonte na operação da mina.

Tabela 14 – Resumo comparativo entre os dois desmontes.

		PRIMEIRO DESMONTE	SEGUNDO DESMONTE
	Data	3/11/2015	18/1/2016
<i>Plano de Fogo</i>	Altura da coluna de tampão (m)	2,5 (1 A)	2,15 (+/- 0,85 A)
	Número de furos	99	162
	Número de linhas	3	5
	Carga máxima por espera (kg)	74,75	67,9
	Altura média (m)	12,11	11,14
	Volume por furo (m ³)	99,9	91,89
	Volume total (m ³)	9890	14885
	Razão de carregamento (kg/m ³)	0,749	0,739
<i>Sismógrafo 8993: Dados</i>	Distância ao desmonte (m)	223	220
	PPV Longitudinal (mm/s)	4,83	7,37
	PPV Transversal (mm/s)	6,03	5,33
	PPV Vertical (mm/s)	7,05	7,43
	Frequência Longitudinal (mm/s)	27,8	125
	Frequência Transversal (mm/s)	21,7	38,5
	Frequência Vertical (mm/s)	22,7	50
	Velocidade de partícula pico resultante (mm/s)	7,87	9,27
	Sobrepresão atmosférica pico (dB)	138	138
<i>Análise de distribuição granulométrica</i>	Diâmetro máximo de fragmento	1,42	1,96
	F 10 (m)	0,01	0,01
	F 30 (m)	0,07	0,1
	F 50 (m)	0,2	0,38
	F 70 (m)	0,39	0,79
	F 90 (m)	0,71	1,24
	% < 110 cm	95	80

Fonte: Autor, 2017.

No que diz respeito ao confronto entre os valores obtidos nos dois desmontes, algumas puderam ser observadas:

- (i) Por conta da maior altura da coluna de tamponamento, o primeiro desmonte apresentou uma retenção gasosa na região do tampão significativamente mais efetiva que a segunda detonação;
- (ii) O aumento no número de linhas não parece ter influenciado na qualidade do desmonte, uma vez que os retardos de 42 ms utilizados entre linhas garante a formação da face livre;
- (iii) A redução da carga máxima por espera ocorreu pois a diferença entre as alturas médias entre os desmontes foi maior de que a altura da coluna de tampão;
- (iv) Em relação aos picos de velocidade de partícula aferidos pelo sismógrafo 8993, a variação notificada não parece ter sido afetada pela variação do tamponamento com significância;
- (v) O aumento significativo nas frequências captadas no ato desmonte pode ser reflexo de uma cominuição defasada no topo da bancada, conforme mencionado por Lynch (2006);
- (vi) A fuga dos gases na região de tamponamento no segundo desmonte não afetou os níveis de sobrepressão atmosférica;

Para a análise de distribuição granulométrica, as fotografias da área onde ocorreu a falha do desmonte foram eliminadas. Como resultado, a previsão de uma melhor curva de distribuição granulométrica para o primeiro desmonte, onde houve uma melhor atuação do explosivo, sobretudo na área de tamponamento, foi confirmada.

4.4 ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO DESMONTE DE ROCHA NAS ETAPAS CONSECUTIVAS DE COMINUIÇÃO

Posteriormente a data de cada desmonte, um acompanhamento mais específico da etapa de desmonte secundário do material detonado foi realizada, com o intuito de relacionar a britabilidade do material com a eficácia do tamponamento no desmonte.

Na Pedreira Guarany, o desmonte secundário é realizado por um rompedor hidráulico HB 4100 acoplado a uma Liebherr 954. Sua função na operação é de reduzir a granulometria de matacões indesejados, ainda que estejam relativamente dentro dos padrões de alimentação do britador primário.

Dentre as 26.505,20 toneladas de minério desmontado na primeira detonação, cerca de 950 fragmentos rochosos foram separados da pilha de minério para desmonte secundário (6% do total). A produtividade diária nesta operação ficou em torno de 258 rompimento de matacões por dia. O rompedor hidráulico operou 29,34 horas para realizar esta tarefa. Pelo fato de haver outras frentes de lavra na mineração, o rompedor não se mostrou ocioso ao fim da operação. Uma análise do custo de operação do rompedor hidráulico foi realizada como medida de acompanhamento do próprio empreendimento, onde foi levado em consideração dados como custo de mão-de-obra, combustível, manutenção e reposição de peças, entre outros. O custo desta operação girou em torno de 0,26 R\$/tonelada para o primeiro desmonte.

Já no segundo desmonte, das 39.893,07 toneladas de minério desmontado, 4,4%, ou 1047 unidades, foram realocados para a área de desmonte secundário. Com um tempo total de 29,20 horas para finalizar a cominuição dos matacos e uma taxa de 287 matacões por dia, o custo de produção da operação nesta etapa girou em torno de 0,17 R\$/tonelada.

Apesar dos valores indicarem uma melhor produtividade do rompedor hidráulico para a pilha de minério oriunda do segundo desmonte, é importante salientar que os dados de produção do rompedor hidráulico levaram em consideração os fragmentos localizados na área do primeiro desmonte onde houve falha explosiva (Figura 38). Este fato certamente acarretou em um aumento significativo no percentual de matacões na pilha e defasagem na produtividade do rompedor, tendo em vista que o material possuía baixa britabilidade a altíssima granulometria.

Figura 38 – Área da falha explosiva.



Fonte: Autor, 2016.

5 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho busca apresentar uma metodologia de análise de métodos de tamponamento, por meio de análises de imagens e utilização de softwares e equipamentos específicos das análises de operações minerárias de desmonte de rocha. É sabido, que mesmo com um grande avanço tecnológico, o setor de mineração ainda se encontra um pouco limitado para alguns fins.

O conhecimento das vibrações produzidas e as propriedades geomecânicas do maciço rochoso em qual se está trabalhando, aliado à uma criação de curva distribuição granulométrica e análise de filmagens do desmonte, ajudam a criar um cenário fidedigno dos parâmetros, facilitando suas alterações para o objetivo de cada operação mineira.

Baseado nos dados de instrumentação obtidos em campo no ato do desmonte e posterior a este, foi realizada uma análise detalhada de cada ponto da metodologia proposta, podendo assim tomar tais conclusões:

- (i) Pode-se afirmar, de acordo com a revisão bibliografia e as análises realizadas nos desmontes explicitados nas Figuras 06 e 07, que a utilização de sistemas auxiliares de tamponamento (tal como os plugues) otimizam a retenção gasosa no interior do furo, maximizando o poder de fragmentação e reduzindo principalmente os níveis de ultralancamento, desde que o funcionamento deste dispositivo seja previamente comprovado para diferentes situações de desmonte;
- (ii) O negligenciamento ou subdimensionamento dos parâmetros de tamponamento, visando principalmente o aumento da razão de carga no furo, poderão ocasionar um desmonte defasado pela não utilização da razão de carga maximizada presente em cada furo, além de inconvenientes ambientais;
- (iii) Conforme dissertado por Cancec et al. (2001), as relações empíricas de tamponamento servem de base para a determinação do valor da altura de tampão. Porém as análises contínuas dos resultados dos desmontes são necessárias para a determinação de valores ótimos

e tomada de decisão relativa aos materiais utilizados, sobretudo na área de tampão;

- (iv) Para um melhor julgamento e melhor atuação da carga explosiva em um desmonte, a utilização da espoleta eletrônica em detrimento às linhas silenciosas torna-se indispensável. Apesar da análise comparativa dos desmontes realizados na Pedreira Guarany indicar certa consonância com vários trabalhos já realizados, como Karakus et al. (2003), no que diz respeito ao aumento da fragmentação quando se obtém um tamponamento efetivo, os resultados podem ter sido afetados por erros inerentes de dispersão nos dispositivos não-elétricos. Um claro exemplo desta situação é a falha de iniciação explosiva ocorrida em um dos desmontes;
- (v) Seguindo a linha de Langefors e Kihlstrom (1978), pode-se afirmar que a variação no número de linhas na malha de perfuração tenha causado diferentes situações no desmonte de rocha. O aumento no número de linhas, de três (para o primeiro desmonte) para cinco (segundo desmonte), tende a proporcionar um maior engaste nas últimas linhas, criando uma predisposição a vibração e deslocamento de ar. Contudo, alterações sensíveis nos níveis de vibrações não foram notificadas, por conta da utilização de retardos de 42 ms entre linhas;
- (vi) Entre 2015 e 2016, a situação econômica, sobretudo na construção civil brasileira, era de queda abrupta nos níveis de produção. Isto justifica a pequena quantidade de amostras de ensaios realizados na mineração objeto de estudo desta dissertação. Um maior espaço amostral seria necessário para criação de cenários mais fidedignos, e de relações matemáticas entre os demais parâmetros de detonação;
- (vii) Apesar de um maior confinamento explosivo ter ligação direta com os níveis de britabilidade dos agregados rochosos de uma pilha de minério oriunda de detonação (Seccatore et al, 2015), não foi possível determinar uma relação direta entre a altura da coluna de tampão e o parâmetro em questão. O material grosseiro localizado na área da pilha do primeiro desmonte onde ocorreu a falha de iniciação foi misturado aos demais, acarretando num mal julgamento da britabilidade relativa entre os desmontes.

Este estudo teve como objetivo chamar a atenção para a consequência da alteração dos parâmetros de tamponamento no desmonte de rocha à céu aberto. Por outro lado, alguns métodos podem ser melhorados para maior eficácia das análises dos eventos. Desta forma, este estudo recomenda que trabalhos futuros sejam desenvolvidos com vistas a:

- (i) Realizar análises da efetividade no tamponamento no interior de cada furo;
- (ii) Realizar um maior número de amostras de detonações, nas mais diferentes situações e em diferentes tipos de rocha;
- (iii) Criar novos artefatos auxiliares de tamponamento, com a finalidade de melhorar a eficácia da coluna de tampão;
- (iv) Estudos mais detalhados dos parâmetros geomecânicos da rocha, para fins de utilização de modelos matemáticos que auxiliem na análise do desmonte, como a função Swebrec (Outcherlony, 2005);
- (v) Analisar comparativamente a efetividade do tampão em desmontes com a utilização de linhas silenciosas em detrimento às espoletas eletrônicas.

REFERÊNCIAS

- ATLAS POWDER COMPANY, **Explosive and rock blasting**. Dallas, Vol. 1, 1987.
- ABNT. **NBR 9.653. Guia para avaliação dos efeitos pelo uso de explosivos nas minerações em áreas urbanas**. São Paulo, 11 p., 2005.
- BACCI, D.C, LANDIM, P.M.B, ESTON, S.M, IRAMINA, W.S. **Principais normas e recomendações existentes para o controle de vibrações provocadas pelo uso de explosivos em áreas urbanas – Parte II**. REM – Revista Escola de Minas. Vol. 56. 131-137 p.
- BOND, F.C. **Crushing and grinding calculations, as discussed in Bemrose, C.R. and Bridgewater, J**. Powder Technology, 1987.
- CANCEC, Arturo; GALLARDO, Nasslo; Gutierrez, MANUEL. **The importance of the explosive confinement**, 27th Annual ISEE Conference on Explosives and Blasting Technique, 2001.
- CETESB. **Avaliação e monitoramento das operações de desmonte de rocha com uso de explosivo na mineração: procedimento**. São Paulo, 8 p., 2015.
- CEVIZCI, H. **A new stemming application for blasting; A case study**. Parte I. REM - Revista Escola de Minas. Vol. 66, n. 4, p. 51 - 57, 2013.
- CUNNINGHAM, C. V. B. **The Kuz-Ram model for prediction of fragmentation from blasting**. Proceedings 1st International Symposium for Fragmentation by Blasting, Sweden, p. 439 – 454, 1983.
- DARLING, Peter. **SME Mining Engineering Handbook**. 3ed, p. 499, 2011.
- DEMENEGAS, V. **Fragmentation analysis of optimized blasting rounds in the Aitik mine: effect of specific charge**. Master Thesis, Luleå University of Technology, 2008.
- DHEKNE, P. Y. **Environmental impacts of rock blasting and their mitigation**. International Journal of Chemical, Environmental & Biological Sciences. Vol. 3, 2015.
- DOBRILOVIC, M.; ESTER, Z.; JANKOVIC, B. **Measurement in blast hole stem and influence of stemming material on blasting quality**. Rudarsko-geološko-naftni zbornik. Vol. 17, p. 47 - 53, 2005.
- ESSEN, S.; ONEDERRA, I.; BILGIN, H.A. **Modelling the size of the crushing zone around a blast hole**. International journal of rock mechanics and mining sciences, Vol. 40, p. 485 – 495, 2003.
- ESTON, S.M. **Uma análise dos níveis de vibração associados a detonações**. Teste – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. 125 p., 1998.

FERREIRA, G. C.; DAITX E. C.; DALLORA NETO, C. **Impactos ambientais associados a desmonte de rocha com uso de explosivos**. Revista Geociências – UNESP. Vol. 25, p. 467-473, 2006.

INTERNATIONAL SOCIETY OF EXPLOSIVES ENGINEERS'S STANDARDS COMMITTEE. **ISEE field practice guidelines for blasting seismographs**. Cleveland, Ohio, 2015.

KARAKUŞ, D.; ONUR, A. H.; KONAK, G.; KÖSE, H. **Application of stemming plugs and a case study in a limestone quarry**. International Mining Congress and Exhibition of Turkey-IMCET, 2003.

LANGFORS, U; KIHLLSTROM, B. **The modern technique of rock blasting**. Wiley, New York, p. 405, 1963.

LANGFORS, U; KIHLLSTROM, B. **Rock Blasting**. Almqvist & Wiksel Forlag AB Stockholm, p. 438, 1978.

LITTLE, T.N.; MURRAY, C.E. **The development and trialling of a cement grout blast hole stemming**. Rock Fragmentation by Blasting. Vol. 1, p. 331 – 341, 1996.

LYNCH, R. A.; MALOVICHKO, D. A. **Seismology and slope stability in open pit mines**. International Symposium on Stability of Rock Slopes in Open Pit Mining and Civil Engineering. South Africa, 2006.

MAERZ, N. H.; ZHOU, W. **Optical digital fragmentation measuring systems – Inherent sources of error**. Fragblast, The International Journal for Blasting and Fragmentation, Vol. 2, No. 4, p 415-431, 1998.

NOREN, C.H.; PORTER, D.D. **A comparison of theoretical explosive energy and energy measured underwater with measured rock fragmentation**. Proc. 3rd International Congress of Rock Mechanics, Vol. 2B, p. 1371-1376, 1974.

OUTCHERLONY, F. **The Swebrec function: linking fragmentation by blasting and crushing**. Mining Technology Transactions of the Institute of Mining And Metallurgy, 2005.

HO CHO, S.; NISHI, M.; YAMAMOTO, M.; KANEKO, K. **Fragment size distribution in blasting**. Materials Transactions Journal. Vol. 44, no. 5, p. 951-956, 2003.

ROVERE, J.; CORREA, C.A.; GRASSI, V.G.; DAL PIZZOL, M.F. **Caracterização morfológica do poliestireno de alto impacto (HIPS)**. Polímeros, Vol. 18, no. 1, 2008.

SECCATORE, J.; HUERTA, J.R.; SADAQ, G.; CARDU, M.; GALVÃO, F.; FINOTI, L; REZENDE, A; BETTENCOURT, J; DE TOMI, G. **The influence of charge distribution on the grindability of the blaster material**. 11th International Symposium on Rock Fragmentation By Blasting, 2015.

SILVA, V. C. **Apostila do curso de desmonte e transporte de rocha**. Departamento de Engenharia de Minas da Escola de Minas da UFOP, 2009.

TAMROCK. **Handbook on surface drilling and blasting**. Painofaktorit, Finland, p. 308, 1984.

WORKMAN, I; ELORANTA, J. **Effects of blasting on crushing and grinding efficiency and energy consumption**. Proceedings 35th Annual Conference on Explosive and Blasting Technique – ISEE, 2009.