RELATÓRIO TÉCNICO

ESTUDO DE AVALIAÇÃO DA APLICAÇÃO DE PLUGS DE TAMPÃO NO DESMONTE DE ROCHAS

Agosto, 2021.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 3
1.1. Localização da Pedreira Selecionada para o Estudo 4
2. METODOLOGIA 4
2.1. Testes Propostos e Análise de Dados 4
2.2. Aplicação dos Plugs 5
3. PLANOS DE FOGO 9
4. ANÁLISES E RESULTADOS 11
4.1. Controle de Lançamentos 11
4.1.1. Redução do Comprimento do Tampão 11
4.1.2. Alteração na Geometria da Malha 13
4.2. Análise da Fragmentação 16
4.2.1. Comparação Visual das Pilhas de Material Desmontado 16
4.2.1. Análise Fotogranulométrica das Pilhas 22
4.3. Avaliação da Produtividade dos Equipamento – Carregamento e Transporte 31
4.4. Avaliação de Custos 33
5. CONCLUSÕES 36

1. INTRODUÇÃO

Plugs para tamponamento de furos são acessórios inseridos no meio do material do tampão que tem por finalidade aumentar a eficiência do tampão, introduzindo maior resistência à coluna de material inerte, frente a expansão dos gases gerados pala detonação do explosivo na coluna, proporcionando, desta forma, um maior controle do lançamento de fragmentos de rocha para a atmosfera, devido à redução na ejeção destes gases pelos tampões, bem como proporciona uma melhor fragmentação da rocha, principalmente na região do tampão, visto que, promove a distribuição lateral dos gases entre furos.

Os plugs de tampão foram desenvolvidos na década de 1990, nos Estados Unidos, e vem sendo utilizados no mundo inteiro, porém, apesar de serem conhecidos na indústria de explosivos Brasileira, o custo de importação e conversões monetárias sempre tornou a aplicação deste tipo de acessório inviável para desmontes de rochas em operações de pequeno porte, como pedreiras e obras de construção civil (desmonte urbano). A partir do desenvolvimento de um produto nacional, com custo mais baixo, comparado os produtos importados similares, a viabilidade econômica da aplicação dos plugs para tampão no desmonte de rochas se torna mais atrativa, porém, carecia de estudo que demonstrasse a real efetividade da aplicação os plugs no desmonte de rochas.

O Relatório Técnico descrito a seguir apresenta os resultados obtidos a partir de uma série de testes onde os plugs de tampão fabricados pela TAMPLUG® foram utilizados. Inicialmente, o comprimento do tampão foi reduzido com a aplicação dos plugs, e posteriormente alterações na geometria da malha foi promovida. Foram avaliados em cada detonação o controle de lançamentos de fragmentos de rocha para a atmosfera, com a redução gradativa do comprimento do tampão, a fragmentação da parte superior da pilha e no interior desta, o impacto na produtividade dos equipamentos de carregamento e transporte, bem como no custo das operações de perfuração & desmonte, carregamento e transporte.

A seguir serão descritas a metodologia aplicada nas análises de cada um dos parâmetros descritos acima, controle de lançamentos, fragmentação, produtividade dos equipamentos e custos operacionais, os resultados obtidos e as conclusões obtidas a partir das análises realizadas.

1.1. Localização da Pedreira Selecionada para o Estudo

O estudo proposto foi realizado em uma pedreira de basalto, localizada no Vale do Sinos, região metropolitana de Porto Alegre, no Estado do Rio Grande do Sul. A pedreira fica localizada a aproximadamente 58 km ao norte de Porto Alegre, e a jazida é composta por rocha ígnea, tipo basalto, característico da região da serra Gaúcha.

Para a realização do estudo, duas bancadas na pedreira foram selecionadas, visto que, o avanço da lavra previsto no plano de lavra não possibilitaria realizar todos os testes na mesma bancada. Desta forma, inicialmente foi definido a condução de seis (6) detonações teste, sendo três (3) em cada bancada. No final, uma 7ª detonação foi conduzida com o objetivo de validar os resultados do último teste realizado.

2. METODOLOGIA

2.1. Testes Propostos e Análise de Dados

Para a avaliação dos impactos gerados pela aplicação de plugs no desmonte de rochas, os seguintes testes foram propostos:

- Detonação #1 – Sem plugs, detonação base para comparação;
- Detonação #2 e #3 – Com plugs, redução gradativa do comprimento dos tampões;
- Detonação #4 e #5 – Com plugs, mesmo tampão e alteração na geometria da malha;
- Detonação #6 – Com plugs, redução do tampão, e mesma malha da detonação #5;
- Detonação #7 – mesmos parâmetros da detonação #6, validação dos resultados;

As seguintes análises das detonações foram conduzidas:

- **Filmagem das detonações:** para avaliação do controle de lançamentos;

- **Análise Fotogranulométrica:** fotografias da parte superior da pilha de material desmontado foram obtidas para avaliação da fragmentação do material proveniente da região do tampão, com a redução gradativa do comprimento deste, e posteriormente com a alteração na geometria da malha de perfuração. As fotografias foram analisadas

em programa específico, onde foi possível obter a curva granulométrica com os tamanhos dos fragmentos no topo da pilha, com a porcentagem passante em diversos tamanhos de fragmentos, bem como o tamanho dos fragmentos para porcentagens passantes predeterminadas (tamanho máximo, ou "Top Size"; D80 – 80% passante, D50 – 50% passante etc.);

- **Produtividade dos Equipamentos: a** avaliação da produtividade dos equipamentos é um indicativo da melhoria na fragmentação do material no interior da pilha. A análise de produtividade foi conduzida pela contabilização do número de viagens e volume produzido por dia por caminhão, médias diárias, e por desmonte, bem como as horas trabalhadas dos caminhões e escavadeira;

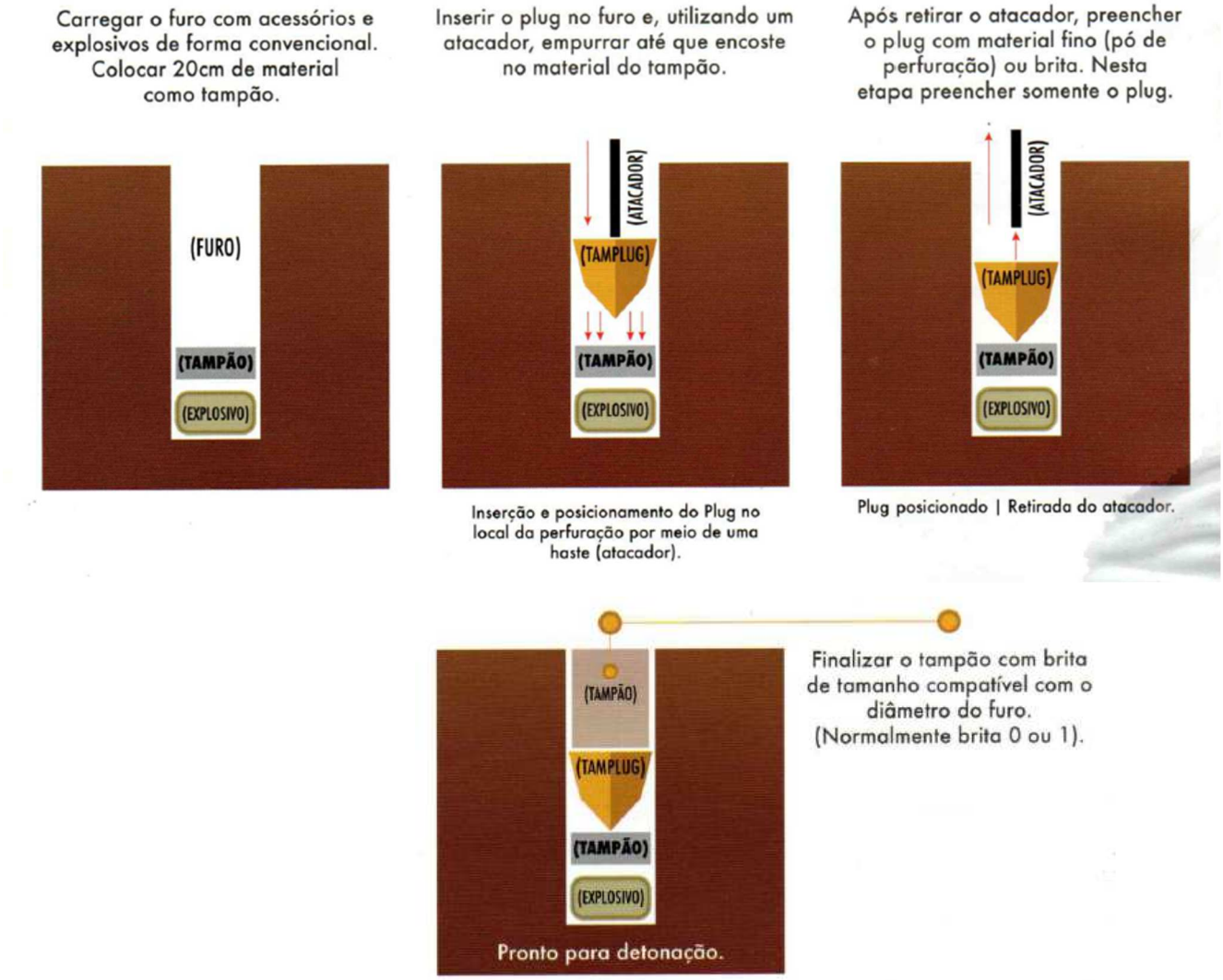
- **Avaliação dos Custos:** definição do custo real do desmonte de rochas para cada teste, incluindo e impacto gerado pelo custo adicional com a aquisição dos plugs, e estimativa dos custos de carregamento e transporte;

2.2. Aplicação dos Plugs

A aplicação dos plugs é realizada no momento da confecção do tampão, após a estabilização da emulsão bombeada, ou da finalização do carregamento com emulsão encartuchada ou ANFO. Antes da introdução do plug no furo, é necessário confeccionar um pequeno tampão entre 20 e 30 cm, de forma que o plug não fique em contato com o explosivo, evitando a queima prematura do plug, conforme mostra a Figura 1 (a). Após esta etapa, o plug é introduzido no furo com o auxílio do atacador (haste de madeira, taquara ou cano PVC) até encostar no tampão inicial, e então o restante do furo é preenchido com o material de tamponamento.

Quando possível, o ideal é preencher o plug após o seu posicionamento com material fino, tipo o pó da perfuração, porém em muitas ocasiões, principalmente devido a presença de água no furo, o uso deste material não é viável, então utiliza-se brita ou outro material particulado com maior densidade que a água. É possível também retirar esta água com o auxílio de uma "seringa" construída com canos PVC, a mesma utilizada para retirar o excesso de emulsão bombeada dos furos, facilitando a confecção do tampão e introdução do plug. Na Figura 2, fotografias demonstrando a aplicação do plug e um furo de 3" polegadas (76,2 mm), nos testes realizados na pedreira de basalto, são apresentadas.

Figura 1 – Etapas da aplicação do plug no tampão.



A funcionalidade do plug ocorre durante a expansão do gás gerado pela reação química da detonação do explosivo na coluna. O gás empurra a porção inicial do tampão em direção ao colar do furo e ao pressionar o plug, este se prende a parede do furo, devido a sua forma cônica, e boqueia o movimento do material e evita a ejeção do gás gerado pela reação química da detonação do explosivo, em conjunto com o material do tampão. Este mecanismo resulta da expansão e distribuição lateral dos gases, promovendo uma melhoria na fragmentação da rocha tanto na região do tampão, como em todo bloco sendo desmontado. O bloqueio, ou travamento do tampão também proporciona o controle de lançamentos, visto que a ejeção do material é reduzida, ou evitada, principalmente quando há a presença de água no furo.

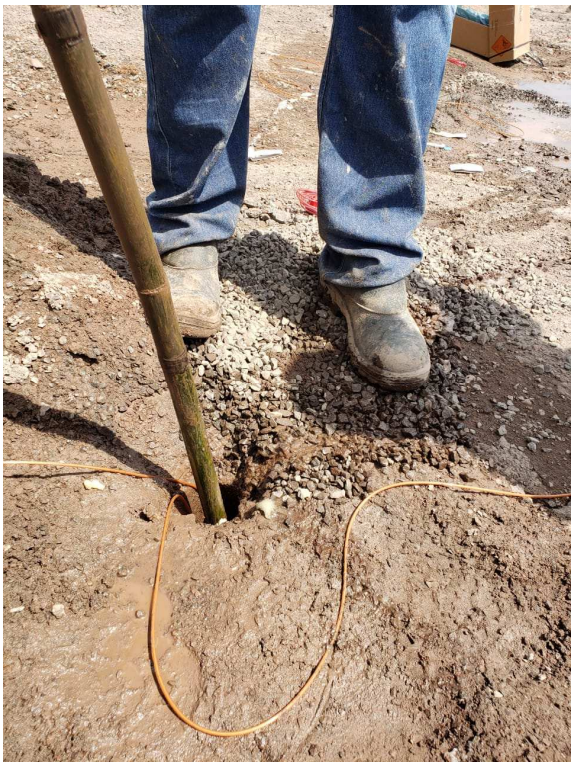
A presença de água no tampão, após o carregamento do furo, antes da finalização do tampão, pode criar um grande problema durante a confecção do tampão e introdução do plug. Com o uso de emulsões bombeadas, a presença de água no tampão, pode resultar no bloqueio do material de tamponamento, antes deste atingir o explosivo, principalmente se a emulsão foi inicialmente muito liquida, o que resulta no aumento da densidade da água (mistura água emulsão), resultando no bloqueio do material de tamponamento.

Para evitar este tipo de ocorrência, recomenda-se utilizar o atacador durante o tamponamento, fazendo com que o material do tamponamento passe pela parte com água com o auxílio do atacador, caso esta não esteja presente em toda a extensão do furo, chegando até o topo da coluna de explosivo. Outra técnica que pode ser adotada é a retirada da água do tampão, utilizando a mesma "seringa" de PVC utilizada para retirada do excesso de emulsão bombeada do furo. Está segunda técnica acaba acarretando maior tempo para finalização dos furos, porém, é mais eficiente na prevenção contra o bloqueio indesejado do material do tampão.

Figura 2 – Fotografias da aplicação dos plugs de tampão em furos de 3”, plug (a), introdução do plug após tampão inicial de 20 a 30 cm (b), posicionamento com o atacador (c), finalização do tampão com brita (d).

(a)

(b)



(c)

(d)

3. PLANOS DE FOGO

Na Tabela 4, os principais parâmetros dos planos de fogo executados em cada detonação realizada durante o estudo são resumidos. O tipo de explosivo utilizado no carregamento dos furos foi à emulsão bombeada, iniciada com reforçadores de 250 g, na primeira escorva no fundo de cada furo, e acessórios não-elétricos na coluna e amarração (sequenciamento da detonação). Reforçadores de 150 g foram utilizados inicialmente como segunda escorva, e posteriormente substituídos por emulsão encartuchada na finalização da coluna de explosivo, antes da execução do tampão. O sequenciamento adotado em todas as detonações (combinação de retardos) foi sempre o mesmo, não apresentando influência nos resultados dos testes realizados.

Tabela 1 – Principais parâmetros dos planos de fogo executados nas detonações testes.

Detonação		**#1**	**#2**	**#3**	**#4**	**#5**	**#6**	**#7**
Bancada		177	177	177	165	165	165	165
Comprimento Furo (L)	(m)	14,3	14,5	13,0	12,4	12,75	14,6	14,5
Afastamento (A)	(m)	2,5	2,5	2,5	2,7	2,8	2,8	2,8
Espaçamento (E)	(m)	4,8	4,5	4,5	4,2	4,0	4,0	4,0
Área Malha	(m^2)	12	11,25	11,25	11,34	11,2	11,2	11,2
Tampão (T)	**(m)**	**2,3**	**2,0**	**1,8**	**1,8**	**1,8**	**1,6**	**1,6**
TAMPLUG		**Não**	**Sim**	**Sim**	**Sim**	**Sim**	**Sim**	**Sim**
Carga Média por Furo (CMF)	(kg)	69,8	70,9	60,5	56,6	60,5	74,7	73,1
Número Total de Furos	(un.)	67	86	90	64	95	90	66
Razão de Carga (RC)	(kg/m^3)	0,473	0,514	0,458	0,436	0,483	0,521	0,519
2ª Escorva*		R-150g	R-150g	Cart.	Cart.	Cart.	Cart.	Cart.

*R-150g = Reforçador 150g; Cart. = Cartucho emulsão

O ajuste na malha realizado inicialmente, entre as detonações #1 e #2, foi solicitação da gerência da pedreira, devido a um ajuste no britador primário, fechamento da abertura da mandíbula, requisitando menor fragmentação do material proveniente da mina. A alteração proposta para o estudo nas primeiras detonações compreendeu a redução gradativa no tampão e avaliação principalmente do lançamento de fragmentos de rochas e o impacto na fragmentação da parte superior da pilha.

Posteriormente, nas detonações #4 e #5, a malha foi ajustada, onde, basicamente, apenas a geometria da malha foi alterada, visto que a área resultante de cada composição (afastamento vs espaçamento) é praticamente a mesma. Na detonação #6, uma nova redução do tampão foi proposta, e após os resultados serem comparados com os demais testes, uma última detonação com os mesmos parâmetros da detonação #6 foi realizada, de forma a validar os resultados obtidos.

As três primeiras detonações foram realizadas na mesma bancada (B177), e as demais na bancada imediatamente abaixo (B165), não havendo alterações com relação a geologia e composição do maciço rochoso. Na Figura 3, uma fotografia em vista ampla das bancadas é apresentada, mostrando onde os testes foram conduzidos com a identificação das bancadas.

Figura 3 – Fotografia das bancadas teste onde o estudo dos plugs foi realizado.

O tampão de 2,3m inicialmente utilizado na bancada 177 era empregado devido a localização de uma residência a aproximadamente 250 m da bancada, e para evitar riscos de ultralançamentos, este comprimento de tampão era utilizado. Porém, a incidência de matacos nos desmontes era muito grande, resultando e custos adicionais com a separação dos blocos grandes e posterior quebra com o auxílio de uma bola de aço, e/ou rompedor hidráulico. Esta separação dos matacos acarretava perdas de produtividade da escavadeira e atraso no ciclo dos caminhões, reduzindo a taxa de alimentação da britagem.

A utilização dos plugs foi sugerida a gerência da empresa, visando reduzir estes problemas com grandes fragmentos de rochas e perdas de produção, porém, garantindo a segurança da operação, sem a ocorrência de incidentes de ultralançamentos.

4. ANÁLISES E RESULTADOS

4.1. Controle de Lançamentos

A avaliação do lançamento de fragmentos de rocha para a atmosfera foi conduzida através da análise das filmagens das detonações, onde fotografias sequenciais foram obtidas, nos mesmos instantes (tempo) de detonação, e comparadas, bem como a projeção dos fragmentos, escape de gases, dentre outros paramentos.

4.1.1. Redução do Comprimento do Tampão

Na Figura 4, fotografias das detonações #1, #2 e #3 são comparadas, onde é possível verificar que, mesmo com a redução gradativa do comprimento dos tampões, o lançamento de fragmentos para a atmosfera se manteve semelhante, com uma redução mais significativa no lançamento na detonação #3. As imagens foram extraídas das filmagens das detonações no mesmo instante (tempo) de detonação e ajustadas para que a mesma distância focal.

A alteração inicial na malha, entre a detonação #1 e a detonação #2, poderia resultar em um maior lançamento de fragmentos para a atmosfera, visto que, além de aumentar a razão de carregamento (RC equivalente a quantidade de explosivo por metro cúbico de rocha desmontada), passando de 0,473 kg/m^3, para 0,514 kg/m^3, o tampão foi reduzido, tornando-se um grande potencial para lançamentos. Este fato já demostra que os plugs foram eficientes na contenção dos gases, reduzindo o lançamento de material na detonação #2.

Um dos motivos associados a redução no lançamento durante a detonação #3, além da utilização dos plugs, foi a utilização da emulsão encartuchada como segunda escorva, na finalização do furo, em substituição ao reforçador de 150 g. Esta segunda escorva foi posicionada imediatamente abaixo do tampão, no topo da coluna de explosivo bombeado.

Esta técnica foi utilizada visando evitar a expansão da emulsão bombeada pelo material do tampão, visto que, em muitos casos, mesmo que seja aguardado o tempo necessário para estabilização da emulsão bombeada, esta pode expandir além do esperado, migrando pelo material do tampão (normalmente brita) e reduzir a eficiência deste. Posicionando a segunda escorva no topo da coluna, com cartucho de diâmetro inferior ao do furo, mante-se um espaço entre o cartucho e o furo onde a emulsão bombeada expandir, caso ainda haja reação desta após o tamponamento do furo, não penetrando, desta forma, no material do tamponamento.

Figura 4 – Comparação do lançamento de fragmentos de rocha entre as detonações #1 (a), #2 (b), e #3 (c).

(a) Detonação #1, T = 2,3 m, malha = 2,5 x 4,8 m, 2ª escorva = reforçador 150g.

(b) Detonação #2, T = 2,0 m, malha = 2,5 x 4,5 m, 2ª escorva = reforçador 150g.

(c) Detonação #3, T = 1,8 m, malha = 2,5 x 4,5 m, 2ª escorva = cartucho emulsão.

Analisando a imagem da detonação #3 apresentada na Figura 4, e comparando as demais, fica nítido a influência do emprego dos plugs, aliado a finalização com emulsão encartuchada, na contenção do lançamento de fragmentos de rocha para a atmosfera.

4.1.2. Alteração na Geometria da Malha

Na Figura 5, fotografias das detonações #3, #4 e #5 são comparadas, onde o comprimento dos tampões foi mantido o mesmo (1,8 m), mas a geometria da malha foi alterada. Nas duas primeiras detonações, #3 e #4, observa-se que o lançamento de fragmentos de rocha é mínimo, e na detonação #5, este se apresenta mais proeminente.

Não é possível associar o maior lançamento observado na detonação #5, tão somente a alteração na geometria da malha, visto que, na detonação seguinte, #6, a malha foi mantida a mesma e nova redução do tampão foi promovida, passando de 1,8 m para 1,6 m, e o lançamento de fragmentos para a atmosfera ocorreu com menor incidência, conforme mostra a Figura 6, ondas as detonações #5, #6 e #7 são comparadas. Verifica-se que, o lançamento na detonação #6, de tampão menor que a detonação #5, foi mais contido, ou mais controlado, com exceção de um escape de gases pela face livre, que resultou na projeção horizontal de fragmentos. Este maior controle, indica que a malha não foi o fator responsável pelo maior lançamento ocorrido na detonação #5. Outros elementos, como a presença de água nos furos, e principalmente no tampão, podem ter influenciado no resultado.

Na detonação #7 (Figura 6), verifica-se novamente o lançamento de fragmentos de rocha mais significativo, sendo este associado a presença de água nos furos, e a sobrecarga destes, o que dificultou a confecção dos tampões, reduzindo a eficiência e controle de lançamentos. Na maioria dos furos foi necessário retirar excesso de emulsão para atender ao tampão programado (1,6 m), porém devido a grande quantidade de água nos furos e no tampão, a emulsão ficou misturada com a água, aumentando a densidade e por muitas vezes bloqueando a brita antes do comprimento desejado, resultando em um tampão mais curto. Porém, tanto nesta detonação, como para as demais, os lançamentos observados foram considerados controlados, ou contidos, visto que, ultralançamentos não ocorreram. Os fragmentos ficaram contidos na área da bancada, e imediações, não saindo dos limites da cava, estando de acordo com a Norma Brasileira ABNT NBR 9653:2018, e com o controle esperado pela gerencia da empresa.

Figura 5 – Comparação do lançamento de fragmentos de rocha entre as detonações #3 (a), #4 (b), e #5 (c). Mesmo tampão, 1,8 m, alteração na geometria da malha.

(a) Detonação #3, T = 1,8 m, malha = 2,5 x 4,5 m.

(b) Detonação #4, T = 1,8 m, malha = 2,7 x 4,2 m.

(c) Detonação #5, T = 1,8 m, malha = 2,8 x 4,0 m.

Figura 6 – Comparação do lançamento de fragmentos de rocha entre as detonações #5 (a), #6 (b), e #7 (c).

(a) Detonação #5, T = 1,8 m, malha = 2,8 x 4,0 m.

(b) Detonação #6, T = 1,6 m, malha = 2,8 x 4,0 m.

(c) Detonação #7, T = 1,6 m, malha = 2,8 x 4,0 m.

Na Figura 7, uma fotografia sequencias da detonação #7 são apresentadas, onde é possível verificar que os fragmentos lançados para a atmosfera, não ganham muita altitude e caem nas imediações da bancada desmontada, dentro da área da cava. O mesmo foi observado para as demais detonações realizadas durante o estudo, indicando que o emprego dos plugs de tampão é eficiente no controle de lançamentos, reduzindo significativamente o ultralançamento de fragmentos de rochas, mesmo com a redução no comprimento do tampão.

4.2. Análise da Fragmentação

A análise da fragmentação consistiu na avaliação da fragmentação da porção superior da pilha de material desmontado, cujo material é proveniente do volume de rocha que compreende o tampão. A análise de fragmentação foi conduzida de duas maneiras, sendo uma de forma visual, comparando as fotos de cada pilha, e a outra através da análise fotogranulométrica, técnica que consiste no registro de imagens da pilha de fragmentos, utilizando escalas de comprimento, e/ou dimensões conhecidas, tratadas posteriormente em programa específico.

4.2.1. Comparação Visual das Pilhas de Material Desmontado

Para a avaliação visual das pilhas de material desmontado, as fotografias foram ajustadas para o mesmo tamanho e distância focal, facilitando desta forma a comparação e evitando distorções.

- **Redução gradativa do tampão:** na Figura 8, fotografias das pilhas de material desmontado nas detonações #1, #2 e #3 são comparadas, onde o comprimento do tampão foi reduzido de 2,3 m (#1), para 2,0 m (#2), e posteriormente para 1,8 m (#3), sendo a malha e demais paramentos mantidos, com alteração na segunda escorva na detonação #3. Avaliando as imagens, fica nítida a redução na quantidade de fragmentos grandes (“matacos”) no topo das pilhas com a redução gradativa do comprimento do tampão, sendo que, na detonação #1, a quantidade de matacos é significativa, enquanto na pilha resultante da detonação #2, observa-se uma maior homogeneidade nos fragmentos, porém, ainda com diversos fragmentos grandes. Na pilha produzida pela detonação #3, a quantidade de matacos é muito menor, e o tamanho dos fragmentos é menor, sendo a fragmentação é mais homogênea ao longo de toda a pilha.

Figura 7 – Fotografias sequenciais da detonação #7, evidenciando o controle no lançamento dos fragmentos.

(a) Lançamento inicial observado.

(b) Altitude máxima ganha pelos fragmentos.

(c) Queda dos fragmentos nas imediações da bancada.

Figura 8 – Comparação visual da fragmentação das pilhas de material desmontado.

(a) #1, T = 2,3 m, M = 2,5 x 4,8 m.

(b) Detonação #2, T = 2,0 m, M = 2,5 x 4,5 m.

(c) Detonação #3, T = 1,8 m, M = 2,5 x 4,5 m.

- **<u>Alteração na geometria da malha:</u>** na Figura 9, as pilhas provenientes das detonações #3, #4 e #5, são comparadas, onde o comprimento do tampão foi mantido constante, mas a geometria da malha foi alterada, passando de uma malha mais alongada (2,5 x 4,5 m) para malhas mais quadradas (2,7 x 4,2 m e 2,8 x 4,0 m). Observa-se que a geometria mais quadrada da malha proporcionou uma redução no tamanho dos fragmentos da pilha.

- **<u>Redução final do tampão:</u>** Quando mantida a malha da detonação #5, de 2,8 x 4,0 m, e reduzido novamente o tampão, de 1,8 m para 1,6 m, verificou-se uma melhora significativa na fragmentação da parte superior da pilha, onde, praticamente, não é possível identificar matacos, conforme demonstram as fotografias apresentadas na Figura 10. Também é possível perceber que a detonação #7 resultou em uma fragmentação muito próxima da detonação #6, replicando os resultados obtidos com os mesmos paramentos do plano de fogo empregado nas duas detonações.

Figura 9 – Comparação visual da fragmentação das pilhas de material desmontado para as detonações onde a geometria da malha foi alterada, mas o tampão foi mantido o mesmo.

(a) Detonação #3, T = 1,8 m, M = 2,5 x 4,5 m.

(b) Detonação #4, T = 1,8 m, M = 2,7 x 4,2 m.

(c) Detonação #5, T = 1,8 m, M = 2,8 x 4,0 m.

Figura 10 – Comparação visual da fragmentação das pilhas de material desmontado para as detonações onde a geometria da malha foi mantida em 2,8 x 4,0, e o tampão foi reduzido para 1,6 m.

(a) Detonação #5, T = 1,8 m, M = 2,8 x 4,0 m.

(b) Detonação #6, T = 1,6 m, M = 2,8 x 4,0 m.

(c) Detonação #7, T = 1,6 m, M = 2,8 x 4,0 m.

4.2.1. Análise Fotogranulométrica das Pilhas

Na Figura 11, exemplos de imagens utilizadas para a análise de fragmentação são apresentadas, onde duas escalas de tamanho conhecido foram utilizadas. O programa utilizado para tratamento das imagens foi o Wipfrag® da empresa WipWare, onde as fotografias obtidas das pilhas foram processadas, de forma que os contornos de cada fragmentos foram delineados pelo programa, e a partir das escalas o calculou o tamanho de cada fragmento na imagem foi computado. Devido a grande quantidade de vesículas e fraturas nas rochas, muitas imagens foram tratadas manualmente no programa, com a delimitação individual dos contornos dos fragmentos.

A Figura 12 apresenta o relatório produzido pelo programa, com a curva de distribuição granulométrica obtida para cada imagem processada, e os tamanhos dos fragmentos passantes nas diferentes faixas consideradas (D80 = 80% dos fragmentos passantes no tamanho de fragmento apresentado na tabela, D50 = 50% dos fragmentos passantes no tamanho definido). Após a análise de todas as fotografias obtidas para uma pilha, os resultados foram tratados em uma planilha Excel, e uma curva de distribuição granulométrica média para cada detonação foi modelada. Na Figura 13, o gráfico apresentando as curvas granulométricas das imagens obtidas para uma única pilha é apresentado, juntamente com a curva média obtida para esta pilha. Uma vez definidas as curvas granulométricas médias para cada detonação, os resultados das alterações conduzidas nos testes forma comparadas e são apresentadas a seguir:

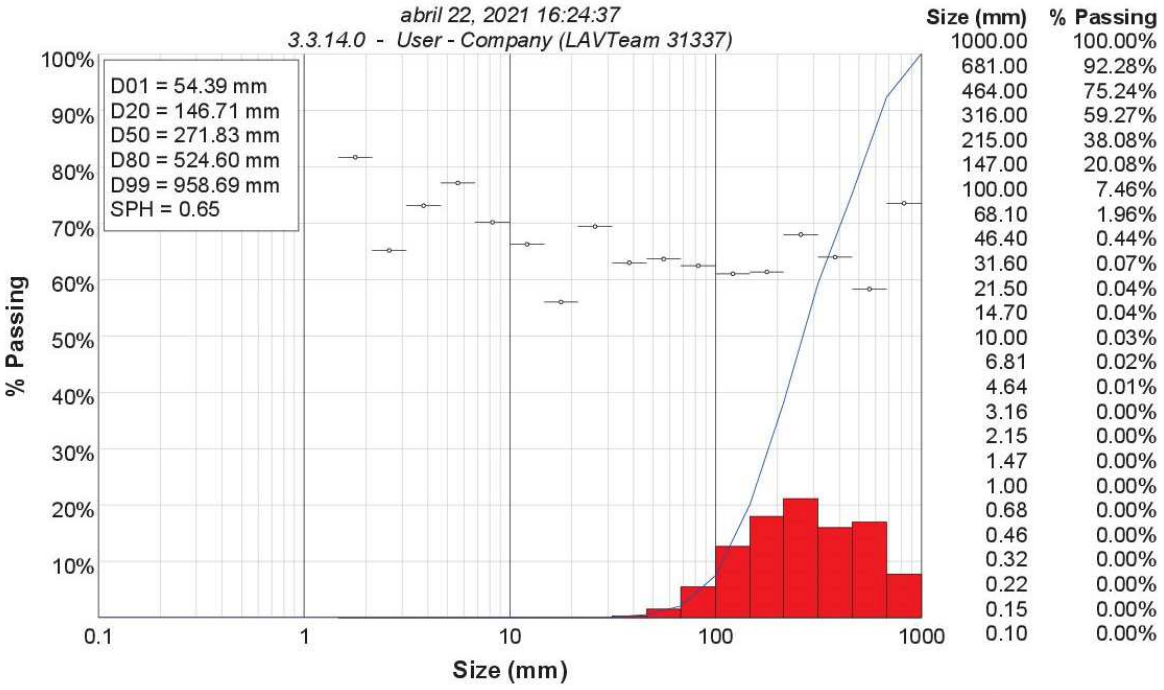
Figura 11 – Exemplo de imagens utilizadas na análise fotogranulométrica, detonação #1 (a), detonação #6 (b).

(a)

(b)

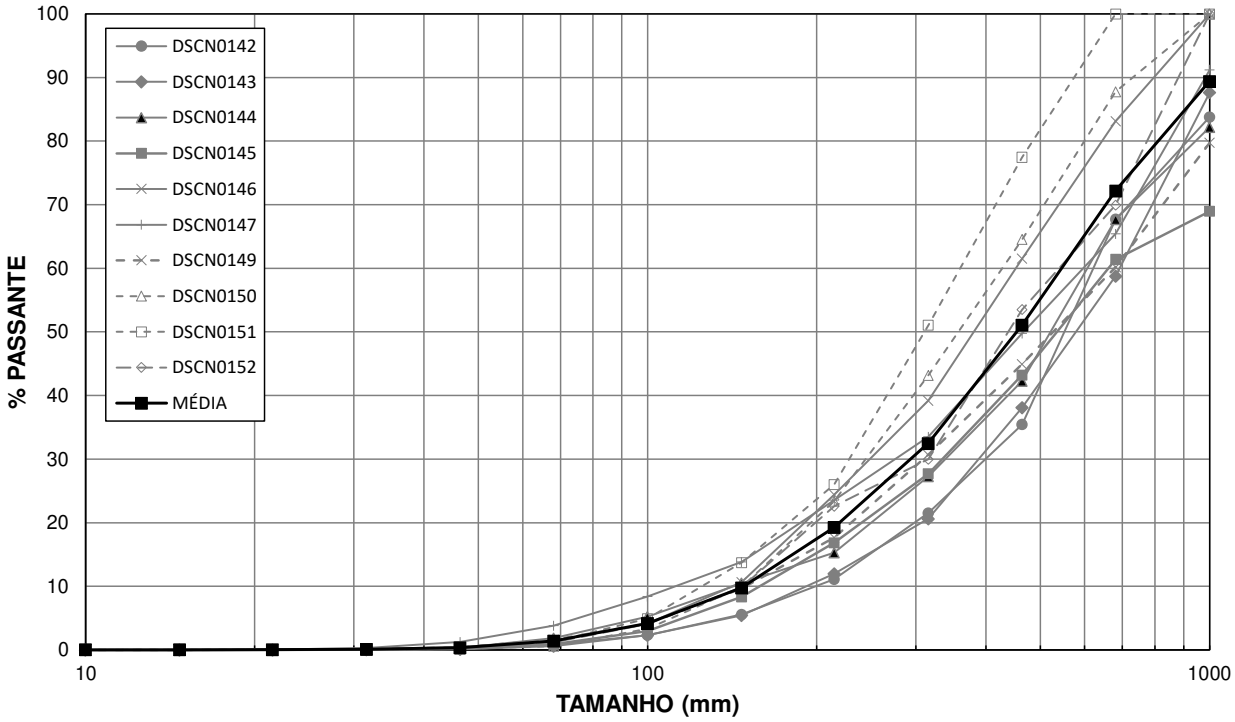
Figura 12 – Exemplo de relatório produzido pelo programa de análise fotogramulométrica, apresentando a curva e tabela com a distribuição granulométrica, as porcentagens passantes para D99, D80, D50, D20, D01, e a imagem com os contornos dos fragmentos delineados.

DSCN0703



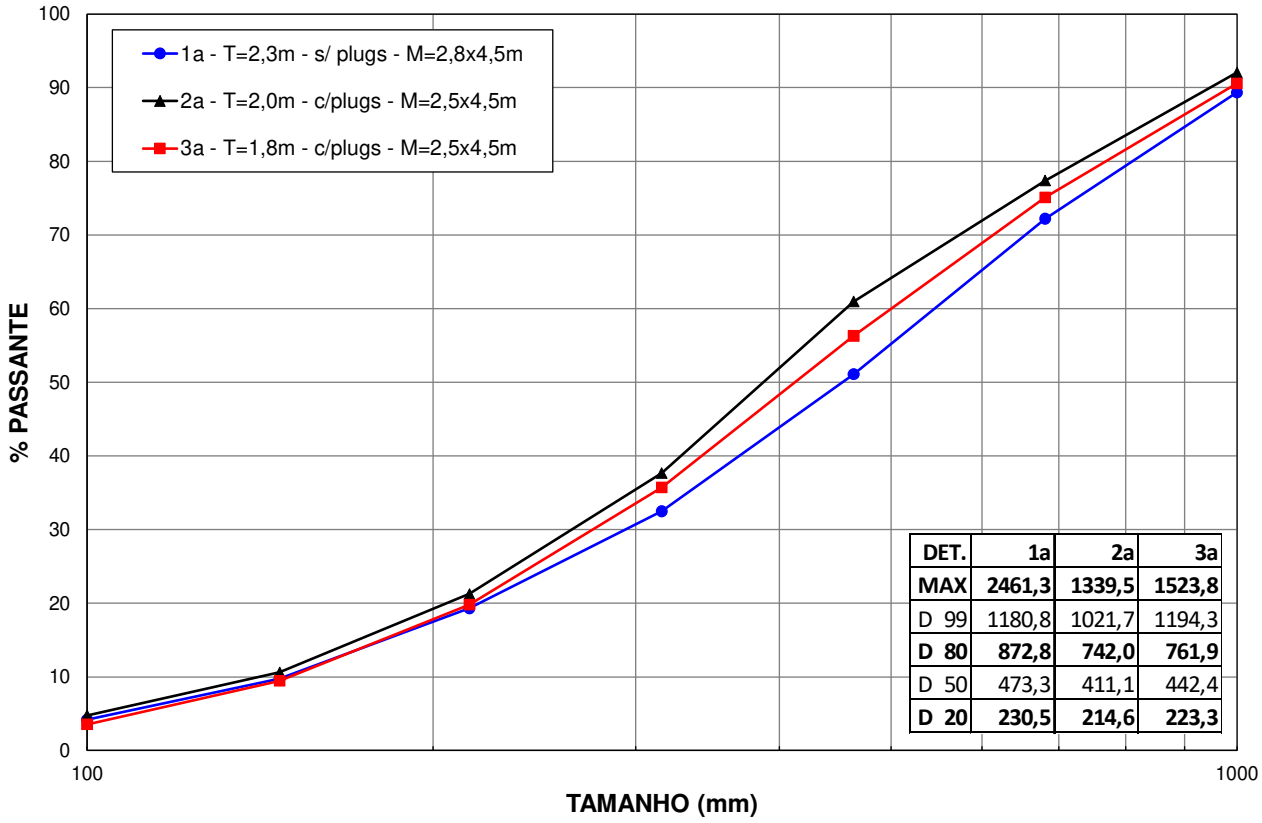
Size (mm)	% Passing
1000.00	100.00%
681.00	92.28%
464.00	75.24%
316.00	59.27%
215.00	38.08%
147.00	20.08%
100.00	7.46%
68.10	1.96%
46.40	0.44%
31.60	0.07%
21.50	0.04%
14.70	0.04%
10.00	0.03%
6.81	0.02%
4.64	0.01%
3.16	0.00%
2.15	0.00%
1.47	0.00%
1.00	0.00%
0.68	0.00%
0.46	0.00%
0.32	0.00%
0.22	0.00%
0.15	0.00%
0.10	0.00%

Figura 13 – Distribuições granulométricas de diversas fotografias de uma única pilha, e curva de distribuição granulométrica média obtida para a pilha.



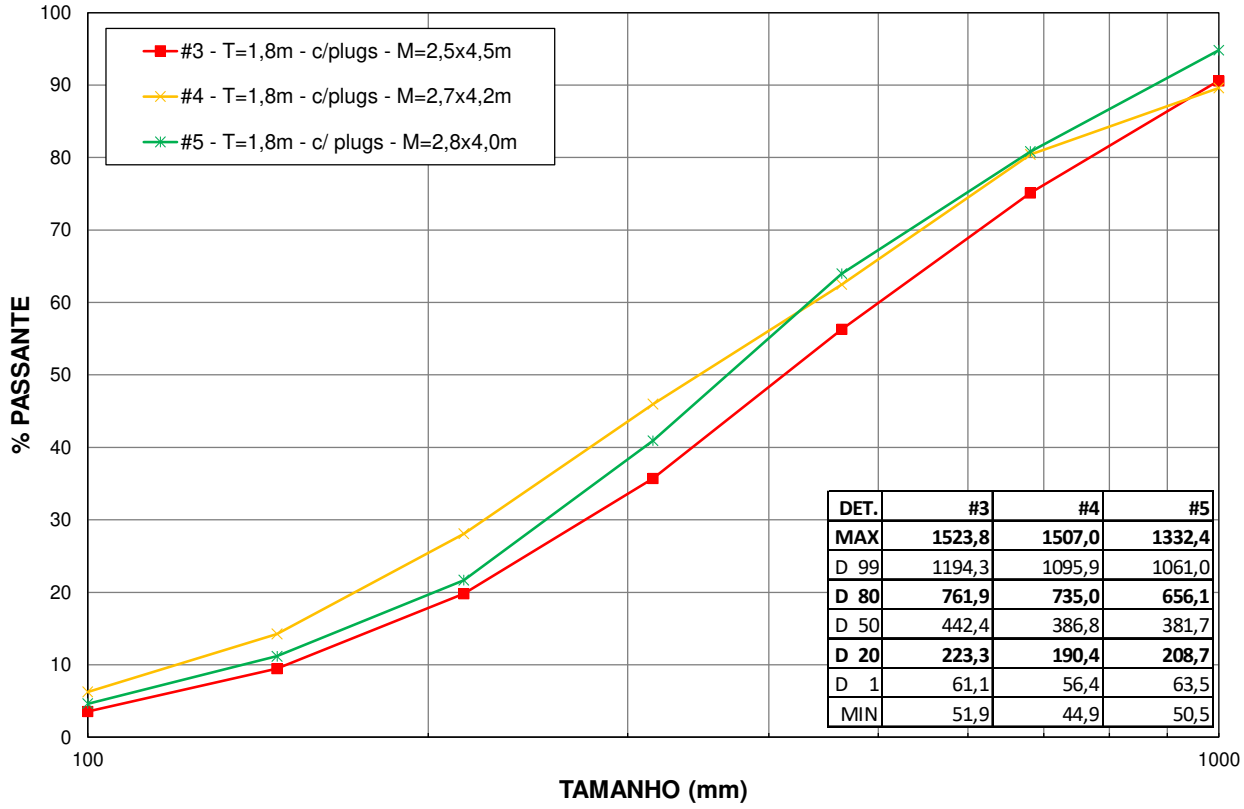
- **<u>Redução gradativa do tampão:</u>** Na Figura 14, as curvas granulométricas das detonações #1, #2, e #3 são comparadas. A redução gradativa no comprimento do tampão proporcionou redução da fragmentação na parte superior da pilha, sendo mais significativa na detonação #2, que apresentou o tamanho de fragmento no qual 80% do material é passante (D80) 15% menor que a detonação #1, e para a detonação #3 o D80 resultante foi 12,7% menor que o D80 para a detonação #1. A redução mais significativa se deu no fragmento de maior dimensão ("Top Size"), onde para a detonação #1, o este foi de 2461,3 mm, enquanto nas detonações seguintes ficou abaixo de 1525 mm, uma redução de 38% na partícula de maior tamanho.

Figura 14 – Comparação entre a distribuição granulométrica das pilhas resultantes das detonações #1, #2, e #3, onde o tampão foi gradativamente reduzido.



- **<u>Alteração na geometria da malha:</u>** na Figura 15, as curvas granulométricas das detonações #3, #4, e #5 são comparadas. Neste caso observa-se uma redução significativa no tamanho dos fragmentos na parte superior da curva granulométrica para as malhas mais quadradas (detonações #4 e #5), onde o D80 foi reduzido em 13,8%, entre a detonação #3 e #5. No caso do Top Size, a redução foi de 12,8%. Comparando a detonação #5 com a #1 detonação, a redução no D80 foi de 24,8%, e no Top Size, de 45,8%, sendo estes valores considerados muito expressivos.

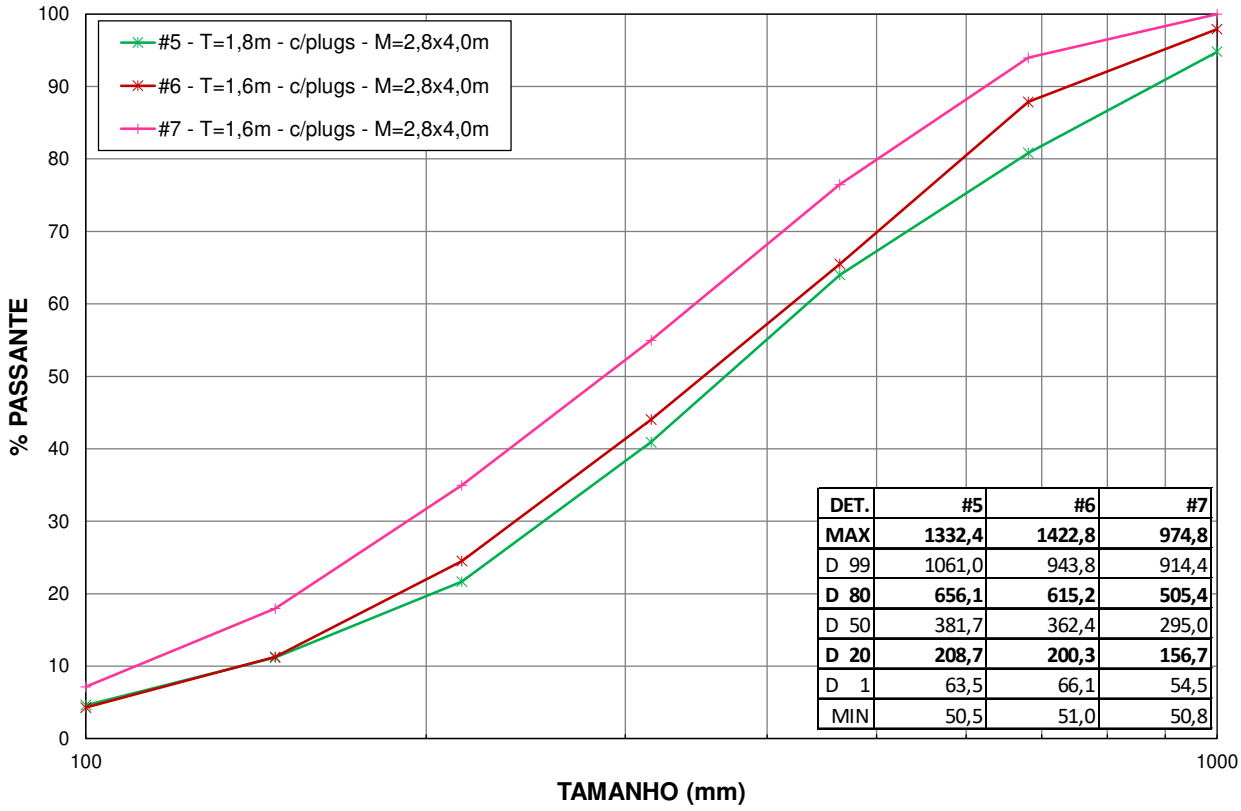
Figura 15 – Comparação entre as distribuições granulométricas das pilhas resultantes das detonações #3, #4, e #5, onde a geometria da malha foi alterada, e o tampão mantido constante.



DET.	#3	#4	#5
MAX	1523,8	1507,0	1332,4
D 99	1194,3	1095,9	1061,0
D 80	761,9	735,0	656,1
D 50	442,4	386,8	381,7
D 20	223,3	190,4	208,7
D 1	61,1	56,4	63,5
MIN	51,9	44,9	50,5

- **<u>Alteração final do tampão:</u>** Comparando as curvas granulométricas das detonações #5, #6, e #7, apresentadas na Figura 16, onde o tampão foi reduzido de 1,8 m para 1,6 m, nas detonações #6, e #7, observa-se nova redução na fragmentação da porção superior da pilha de material detonação, sendo mais significativa na detonação #7. O D80 para a detonação #7 é 13,8% menor que para a detonação #5, e 42,1% menor que a detonação #1. O Top Size da detonação #7 foi reduzido em 27,2% comparado a detonação #5 e em 60,4% quando comparado a detonação #1, ou seja, a partícula de maior tamanho foi reduzida em aproximadamente 1500 mm, e o tamanho da partícula onde 80% do material é passante, foi reduzida em 360 mm.

Figura 16 – Comparação entre as distribuições granulométricas das pilhas resultantes das detonações #5, #6, e #7, onde o tampão foi reduzido de 1,8 m a 1,6 m.

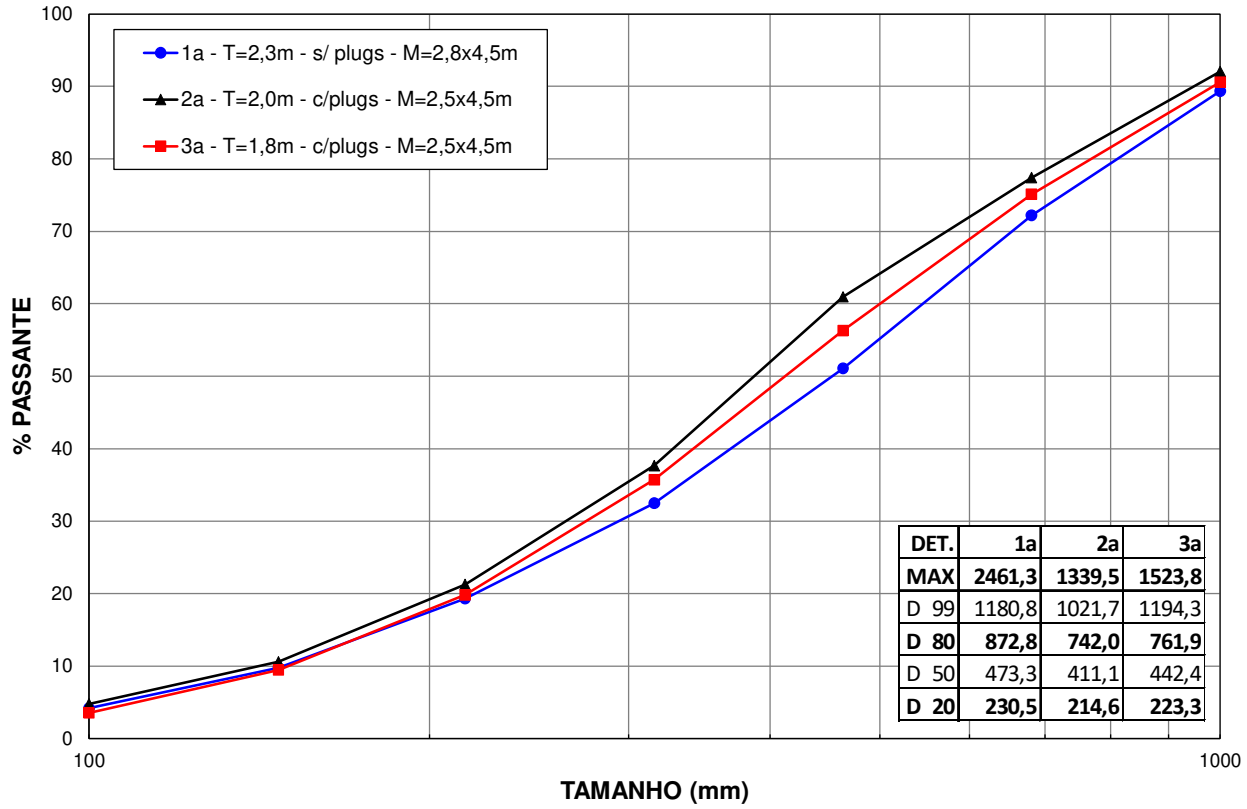


DET.	#5	#6	#7
MAX	1332,4	1422,8	974,8
D 99	1061,0	943,8	914,4
D 80	656,1	615,2	505,4
D 50	381,7	362,4	295,0
D 20	208,7	200,3	156,7
D 1	63,5	66,1	54,5
MIN	50,5	51,0	50,8

Na Figura 17, as distribuições granulométricas para todas as detonações realizadas são comparadas. É notável a redução gradativa na fragmentação da parte superior das pilhas com as alterações propostas em cada detonação. Na Figura 18, um gráfico de colunas compara os tamanhos dos fragmentos para as percentagens passantes em 80%, 50%, e Top Size, onde é possível, novamente, visualizar a redução significativa do tamanho dos fragmentos passante em cada faixa percentual considerada, ao decorrer do estudo, com as alterações executadas no plano de fogo.

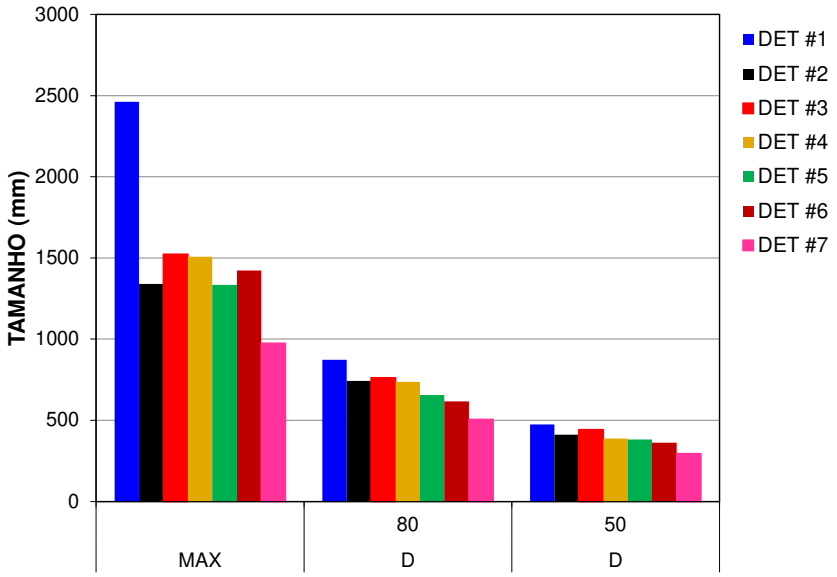
As análises de fragmentação, tanto visual, quanto pelo método de análise fotogranulométrica, demonstram que a redução no comprimento do tampão contribuiu significativamente para a redução do tamanho dos fragmentos na parte superior da pilha de material desmontado, e praticamente eliminou os matacos gerados nas detonações. É de conhecimento geral que a redução do tampão resulta em uma melhor fragmentação na parte superior da pilha, mas realizar este processo com maior segurança torna-se a maior vantagem da aplicação dos plugs para tampão, evitando ultralançamentos, ou conforme demonstrado para as detonações #6 e #7, promovendo um maior controle no lançamento.

Figura 17 – Comparação entre todas as distribuições granulométricas das pilhas resultantes das detonações realizadas durante o estudo.



DET.	1a	2a	3a
MAX	2461,3	1339,5	1523,8
D 99	1180,8	1021,7	1194,3
D 80	872,8	742,0	761,9
D 50	473,3	411,1	442,4
D 20	230,5	214,6	223,3

Figura 18 – Gráfico de colunas comparando o tamanho de fragmento passante para Top Size, D80 e D50.



Quando analisados em conjunto os resultados de fragmentação obtidos para cada detonação realizada e o controle de lançamentos, observa-se que, mesmo com a redução significativa do comprimento do tampão, de 70 cm, o lançamento de fragmentos é considerado controlado para todas as detonações, visto que ultralançamentos não foram observados, e neste caso considera-se ultralançamento, o arremesso de fragmentos a uma distância superior a um raio de 300 m da bancada, provocada pela ejeção em alta velocidade dos gases pelos tampões, o que não foi observado durante as detonações realizadas.

As alterações na geometria da malha de perfuração também resultaram na redução significativa na fragmentação da rocha, onde a malha com geometria mais quadrada, apresentou um tamanho de fragmentos menor e com uma distribuição mais homogênea na parte superior da pilha, do que a malha alongada, historicamente empregada no desmonte de rochas em pedreiras de basalto.

4.3. Avaliação da Produtividade dos Equipamento – Carregamento e Transporte

Para avaliar o impacto das alterações propostas pelo estudo de aplicação dos plugs na fragmentação no interior da pilha de material desmontado, a análise da produtividade dos equipamentos envolvidos no carregamento e transporte do material desmontado para a britagem foi conduzida. Em tese, a redução do tamanho dos fragmentos, não só na parte superior da pilha, mas principalmente no interior desta, proporciona um aumento na produtividade dos equipamentos, visto que, a escavadeira não perde tempo separando matacos e/ou material de grandes dimensões, que posteriormente são quebras com bola de aço pela própria escavadeira ou rompedor hidráulico, e os caminhões não ficam parados aguardando estas demoras (interrupções) da escavadeira.

Optou-se por analisar o impacto das alterações propostas na fragmentação do interior da pilha desta forma, e não através da análise fotogranulométrica, pois, em primeiro lugar, ao escavar a pilha o ângulo da pilha material não fica propicio e seguro para a realização das fotografias em qualidade adequada e com segurança para o técnico responsável, e em segundo lugar, para não causar maiores impactos à produção, devido as paradas que seriam necessárias para a obtenção as fotos.

Na Tabela 2, os dados de produtividade dos caminhões são apresentados, onde é informado o número da detonação, o tampão empregado, a malha, a área da malha, a produção realizada para cada desmonte, o número total de dias de produção, a média de viagens por dia e a diferença percentual comparando cada detonação com a detonação base (#1).

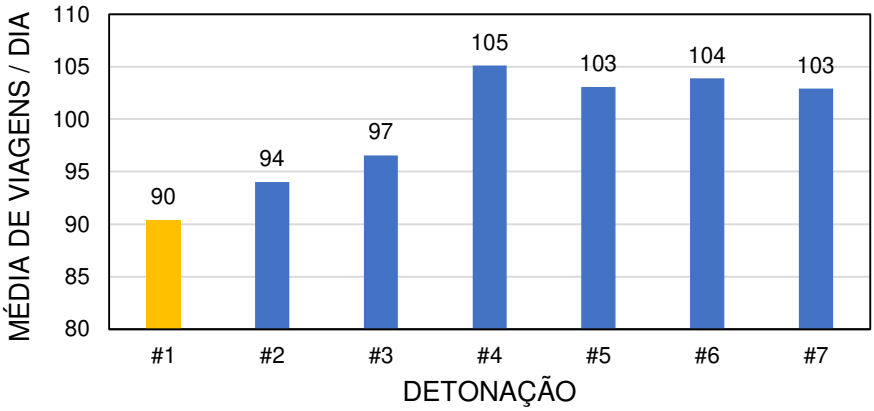
A empresa opera com caminhões 6 x 4, com carga efetiva de 19 t (peso médio medido na balança). A frota responsável pelo carregamento e transporte é composta por 3 caminhões e uma escavadeira de 36 t. A distância de transporte entre as bancadas onde os testes foram realizados e a moega na britagem primária é de 560 m, para a bancada 177, e 520 m para a bancada 165, não sendo considerada uma diferença significativa na distância, ao ponto de impactar significativamente na produtividade dos caminhões.

Na Figura 19, o número médio de viagens por dia é apresentado em forma de gráfico de colunas, sendo possível observar mais claramente a evolução na produtividade dos caminhões com as alterações realizadas em cada detonação. Os impactos gerados pela aplicação dos plugs de tampão e as alterações na malha de perfuração são resumidos da seguinte forma:

Tabela 2 – Dados da produtividade dos caminhões para cada detonação teste realizada.

Detonação	Tampão	Malha			Área Malha	Produção Mensal	Dias de Produção	Viagens/ Dia	Diferença % Vgs / Dia
		A		E					
	(m)	(m)		(m)	(m^2)	(t)			
#1	2,3	2,8	x	4,5	12	25764	15	90	
#2	2,0	2,5	x	4,5	11,25	33934	19	94	4,0%
#3	1,8	2,5	x	4,5	11,25	49533	27	97	6,8%
#4	1,8	2,7	x	4,2	11,34	31958	16	105	16,3%
#5	1,8	2,8	x	4,0	11,20	39159	20	103	14,0%
#6	1,6	2,8	x	4,0	11,20	33554	17	104	14,9%
#7	1,6	2,8	x	4,0	11,20	23465	12	103	13,8%

Figura 19 – Número médio de viagens executadas por dia, para cada detonação.



- **<u>Redução gradativa do tampão:</u>** avaliando o gráfico apresentado na Figura 19, percebe-se que, a redução do tampão nas três detonações iniciais promoveu aumento gradativo no número médio de viagens executadas por dia, indicando que a redução na fragmentação observada no topo da pilha se propagou para o restante desta.

- **<u>Alteração na geometria da malha:</u>** um aumento significativo no número médio de viagens por dia entre as detonações #3 e #4 é observado, sendo este aumento associado a alteração na geometria da malha, além da redução na quantidade de matacos na parte superior da pilha, promovida pela aplicação dos plugs de tampão. O aumento no número de viagens diário confirma o observado na análise de fragmentação, que a redução do tamanho dos fragmentos não ocorreu somente no topo da pilha, mas em toda sua extensão, resultando em impacto significativo na produção diária da pedreira. Apesar da detonação

#4 ser realizada em bancada diferente das anteriores, a distância menor de transporte não resultaria no impacto no número de viagens verificado.

- **Redução final do tampão:** a última alteração realizada no comprimento do tampão, de 1,8 m para 1,6 m, não resultou em alteração na produtividade média diária, aparentemente, apesar da fragmentação do material estar menor e mais homogênea, conforme apresentam os dados das análises de fragmentação.

A produção mensal da pedreira é de aproximadamente 35.000 t, com os ganhos em produtividade dos caminhões (aumento do número médio de viagens por dia), foi possível estimar que o número de dias necessários de produção para atingir o volume mensal reduziu em 2,5%. Ou seja, para a detonação #1, eram necessários 20,4 dias para atingir a produção mensal de 35.000 t, para as detonações #2 e #3, os dias de produção necessários foram reduzidos para 19,3 dias, em média, e a partir da detonação #5, foram necessários 17,8 dias para atender o volume programado de produção mensal, sendo uma redução de 2,6 dias, comparado a primeira detonação. Este ganho permitiu a redução de hora extra, principalmente nas manutenções da planta de britagem, normalmente realizadas aos sábados e domingos, passando a ser realizadas as sextas e sábados.

4.4. Avaliação de Custos

O custo de aquisição dos plugs para tampão representa aproximadamente 1% do custo total do desmonte, ou seja, para um desmonte com custo de R$ 60.000,00, seriam gastos cerca de R$600,00 reais com plugs para tampão. Mas o retorno com a aplicação deste acessório é muito significativo, conforme demonstrado pelas análises apresentadas.

Durante o estudo, dois aumentos nos custos de explosivos e acessórios ocorreram, impactando em mais de 6,6% no custo da operação de desmonte de rochas. As alterações realizadas no plano de fogo resultaram, em média, em um aumento de 2% no custo do desmonte, sendo este custo dependente do volume desmontado, visto que, o custo de aplicação dos explosivos e acessórios são fixos, independentemente do tamanho do desmonte. No final, com os aumentos ocorridos nos explosivos e acessórios, bem como aplicação, o custo da operação de perfuração e desmonte de rochas teve aumento de aproximadamente 12,4%, comparando a detonação #1 e a #7.

Foi possível quantificar também os custos com carregamento e transporte, a parti do custo horário dos equipamentos envolvidos na atividade. O custo por tonelada de rocha (R$/t, custo unitário) para cada detonação realizada foi calculado, e então os custos por tonelada total (custo total unitário) para as operações de perfuração & desmonte, carregamento, e transporte foram definidos. Comparando as últimas três detonações com a detonação base (#1), verificou-se uma redução de aproximadamente 16% no custo total unitário da rocha (média das três últimas detonações), resultante das melhorias promovidas pela aplicação dos plugs e das alterações na geometria da malha.

Na Tabela 3, a variação percentual no custo de cada operação (desmonte, carregamento, transporte e total) para cada detonação são apresentadas. Os valores percentuais apresentados representam a diferença percentual entre o custo por tonelada de rocha para cada detonação em relação a detonação base.

Tabela 3 – Comparação da variação percentual dos custos (R$/t) para cada detonação com a detonação base (detonação #1).

Detonação	Transporte	Carregamento	Desmonte	Total
#2	-30,3%	-18,8%	-0,8%	-18,4%
#3	-10,9%	-12,0%	-10,7%	-11,1%
#4	-18,2%	-17,7%	3,5%	-11,5%
#5	-27,9%	-18,6%	1,9%	-16,5%
#6	-30,2%	-24,8%	2,4%	-18,9%
#7	-25,8%	-21,7%	12,4%	-13,2%

A aplicação dos plugs nas detonações #2 e #3, onde o tampão foi reduzido e os demais parâmetros do plano de fogo foram mantidos, rendeu uma redução no custo total unitário das operações (desmonte, carregamento e transporte) entre 11,1% e 18,4%. As alterações na geometria da malha, nas detonações #4 e #5, resultaram em uma economia entre 0,4% e 6,0%, além da economia inicial gerada pela redução dos tampões. Essa diferença percentual foi computada comparando as detonações #4 e #5, com custo total unitário da detonação #3. A alteração final no comprimento do tampão, inicialmente, resultou em uma redução do custo de 3%, comparada a detonação #5, porém, na detonação #7, o custo foi 4% maior, resultando em um aumento do custo de 0,5%, em média.

Observa-se que o impacto maior de redução nos custos ocorreu na operação de transporte, onde uma redução média de 28% é observada para as últimas 3 detonações realizadas, comparando com a detonação base (#1). Na operação de carregamento, a redução do custo foi de aproximadamente 22%. Por fim, mesmo com o aumento no custo da operação de desmonte, superior a 12% para a última detonação teste realizada, o emprego dos plugs para tampão e as alterações realizadas na geometria da malha, resultaram em uma redução superior a 13% no custo total das operações de desmonte, carregamento e transporte, sem considerar as reduções nos custos de britagem e manutenção (principalmente com a redução de horas extras).

De forma a quantificar os valores percentuais apresentados, assumindo um custo total das operações de desmonte, carregamento e transporte, equivalente a R$10,00 e a distribuição percentual do custo entre as operações conforme apresentado na Tabela 4, a redução no custo total por tonelada de rocha é de aproximadamente R$ 1,11. Considerando a produção mensal de 35.000 t, a redução de custo mensal seria de R$ 38.850,00, chegando a **R$ 466.200,00** em um ano de operação.

Tabela 4 – Quantificação das variações percentuais, assumindo o custo total de R$10,00 para as operações de Desmonte, Carregamento e Transporte.

Descrição	Transporte	Carregamento	Desmonte	Total
Percentual do custo total	37,5%	24,3%	38,2%	100%
Custo por tonelada	R$ 3,75	R$ 2,43	R$ 3,82	R$ 10,00
Redução Custo %	-28%	-22%	12,4%	-11%
Redução Custo R$/t	-R$ 1,05	-R$ 0,53	R$ 0,47	-R$ 1,11
Custo Final após Estudo	R$ 2,70	R$ 1,90	R$ 4,29	R$ 8,89

5. CONCLUSÕES

O estudo realizado permitiu avaliar o impacto gerado pela aplicação de plugs de tampão na operação de desmonte de rochas em uma pedreira de basalto. Foram avaliados parâmetros como o controle de lançamentos de fragmentos de rocha, pela avaliação das filmagens das detonações, análise da fragmentação na parte superior da pilha de material desmontado, através de avaliação visual e da técnica de análise fotogranulométrica, e avaliação da fragmentação no interior da pilha, pela análise da produtividade dos equipamentos envolvidos na operação de carregamento e transporte. Por fim o custo unitário de cada operação, desmonte de rochas, carregamento, e transporte, foi avaliado para cada detonação teste realizada e comparado com a detonação base. As seguintes conclusões foram obtidas a partir das análises realizadas:

- A utilização de plugs de tampão promoveu a redução na ejeção de gases pelos tampões e projeção de fragmentos de rochas para a atmosfera, além da bancada e/ou da cava, resultando em um maior controle de lançamentos;
- Devido ao maior controle de lançamento resultante da utilização dos plugs, foi possível reduzir, com segurança o comprimento dos tampões, até um valor considerado seguro e ideal para o controle adequação do lançamento e fragmentação da rocha;
- A fragmentação da parte superior da pilha foi reduzida com a aplicação dos plugs, sem alterações na malha, entre 12,7% e 15%, para o tamanho de partícula onde 80% do material é passante (D80), e em 38% para a partícula de maior tamanho (Top Size);
- A alteração na geometria da malha resultou em redução do tamanho da partícula D80 em 13,8%, e Top Size em 12,8%, comparando a detonação anterior. Em relação detonação base, #1, a redução em D80 foi de 24,8%, e Top Size de 45,8%;
- A alteração final do tampão resultou em redução no tamanho da partícula D80 de 13,8%, e Top Size de 42,1%, comparado a detonação anterior. Quando comparada a detonação base, #1, a redução no tamanho da partícula D80 foi de 42,1%, equivalente a mais de 360 mm de redução no tamanho do fragmento. Para o Top Size, a redução no tamanho da partícula comparada a detonação anterior foi de 27,2%, mas quando comparada a detonação base, #1, a redução chegou a 60,4%, compreendendo uma redução no tamanho da partícula de maior tamanho de aproximadamente 1500 mm (1,5 m);
- O ganho na produtividade dos caminhões (aumento no número de viagens por dia) decorrentes da aplicação dos plugs e redução gradativa dos tampões foi de 6,8%. Posteriormente, com a alteração na geometria da malha e nova redução do tampão, o aumento na produtividade dos caminhões equivalente a 14,4%, em média;

- Este aumento de produção diária, proporcionou a redução no número de dias necessários para atender a produção programada, sendo possível atingir a meta estipulada com 2,6 dias de antecedência;
- Este adiantamento de produção permitiu a redução de custos de mão de obra de manutenção, visto que, estas passaram a ser realizada as sextas e sábados, onde antes ocorriam aos sábados e domingos;
- Os ganhos obtidos no custo total unitário da rocha, considerando os custos de desmonte, carregamento e transporte, pela aplicação dos plugs de tampão e redução do comprimento deste, foi de 11,1 %, chegando 13,2% no final do estudo, após todas as alterações serem realizadas;
- Considerando, por exemplo, um custo unitário para as operações de desmonte, carregamento e transporte de R$10,00, a economia resultante da aplicação dos plugs pode chegar a R$465.000,00 em um ano. Com base na economia obtida com a alteração na geometria da malha (otimização do desmonte de rochas) e economia anual é estimada em R$ 560.000,00;

Por fim, o estudo apresentado demostrou que a aplicação de plugs para tampão no desmonte de rochas trás excelentes benefícios para a operação, e com baixo custo de investimento, aproximadamente 1,0% do custo total da operação desmonte de rochas (perfuração e desmonte). Os principais benefícios envolvidos na aplicação dos plugs de tampão no desmonte de rochas são listados a seguir:

- Baixo custo de investimento;
- Controle de lançamento de fragmentos de rocha;
- Aumento da segurança da operação;
- Redução do comprimento do Tampão;
- Redução da fragmentação da pilha;
- Aumento da produtividade dos equipamentos de carregamento e transporte;
- Redução dos custos de operação.

Ivoti, 22 de agosto de 2021.

Dr. Vitor Luconi Rosenhaim

Engenheiro de Minas

Sismica Engenharia

Sócio Proprietário

CREA RS 130897

ISEE 200501576

Análises Fotogranulométricas

Leonardo Silva Pretto

Engenheiro de Minas

LSP Engenharia de Mineração

Proprietário

CREA RS 244197