

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

MARCELO DA SILVA PINA

**ANÁLISE DA EFICIÊNCIA DO DESMONTE DE EXPLOSIVOS COM
USO DE TAMPÃO NÃO CONVENCIONAL RIGIDO DE GESSO**

RECIFE

2017

MARCELO DA SILVA PINA

**ANÁLISE DA EFICIÊNCIA DO DESMONTE DE EXPLOSIVOS COM
USO DE TAMPÃO NÃO CONVENCIONAL RIGIDO DE GESSO**

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

Área de Concentração: Minerais Industriais

Orientador: Prof. Dr. Júlio César de Souza

RECIFE

2017

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

P645a Pina, Marcelo da Silva.
Análise da eficiência do desmonte de explosivos com uso de tampão não convencional rígido de gesso / Marcelo da Silva. - 2017.
123 folhas, il., tabs.

Orientador: Prof. Dr. Júlio César de Souza.
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral, 2017.
Inclui Referências e Anexos.

1. Engenharia Mineral. 2. Desmonte por explosivos. 3. Tampão. 4. Tamponamento rígido. 5. Gesso. 6. Fragmentação de rochas. I. Souza, Júlio César de (Orientador). II. Título.

UFPE

622.35 CDD (22. ed.)

BCTG/2017-320



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MINERAL
PARECER DA COMISSÃO EXAMINADORA
DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**“ANÁLISE DA EFICIÊNCIA DO DESMONTE DE EXPLOSIVOS COM USO DE
TAMPÃO NÃO CONVENCIONAL RÍGIDO DE GESSO”**
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: Minerais Industriais

A comissão examinadora composta pelos professores abaixo, sob a presidência
do **Prof. JÚLIO CÉSAR DE SOUZA**. Considera o aluno

MARCELO DA SILVA PINA, Aprovado.

Recife, 27 de junho de 2017.

Prof. Dr. JÚLIO CÉSAR DE SOUZA

- Orientador - (UFPE) -

Prof. Dr. MÁRCIO LUIZ DE SIQUEIRA CAMPOS BARROS

- Examinador Interno - (UFPE)

Prof. Dr. JAIR CARLOS KOPPE

- Examinador Externo - (UFRGS)

Dedico este trabalho à minha mãe, Marli, que sempre me encorajou a perseverar firme no meu objetivo e viabilizou a realização de mais esta conquista. E ao invisível por ter sido peça fundamental nas minhas vitórias.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais Marli Luiza e Djalma Pina por terem me oferecido os subsídios para meu desenvolvimento pessoal e profissional.

A Pedreira Herval produtora de agregados para a construção civil, que deu a oportunidade tanto para a visita quanto auxílio na coleta dos dados para realização deste trabalho.

Ao meu amigo e orientador: Prof. Júlio César de Souza, pela disposição e parceria de direcionar no mestrado.

Ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mineral da UFPE pela oportunidade de agregar os conhecimentos na área de engenharia mineral.

De uma maneira geral, a todas as pessoas envolvidas e as que contribuíram de alguma forma para a conclusão desse trabalho.

Embora muito se perca, muito resta; e embora
Não sejamos mais fortes como em tempos
passados
Movemos o céu e a terra; o que somos, somos:
Uma só têmpera de corações heroicos,
Enfraquecidos pelo tempo e o destino, mas
fortes em ímpeto
Para lutar, buscar, encontrar, e jamais desistir.
(Alfred Tennyson)

RESUMO

Nesta dissertação, estudou-se um novo método de tamponamento de furos para detonação de explosivos em pedreira de brita utilizando o gesso. Esse método de tamponamento foi comparado com o método habitualmente empregado em pedreiras e minas a céu aberto, os quais fazem uso de materiais inertes de baixa resistência, tais como: pó de perfuração, brita e solo, todos causando perdas de eficiência no desmonte. Os materiais usados no método de tamponamento tradicional oferecem baixa resistência e são facilmente ejetados pela pressão exercida pelos gases logo após a detonação, perdendo-se dessa forma parte da energia disponível para fragmentação da rocha. Neste trabalho foi avaliada a utilização de um tampão rígido feito com gesso para realizar o desmonte de brita com explosivos e utilizadas técnicas de processamento de imagens da pilha desmontada no software Split-desktop para determinar a distribuição granulométrica do material desmontado. Dessa forma pode-se avaliar o grau de fragmentação a partir da distribuição do material desmontado nas diversas faixas granulométricas definidas no software e comparar o desempenho dos dois tipos de tamponamento utilizados (tradicional e gesso). Posteriormente foi realizada uma análise dos custos dos desmontes utilizando-se tampão convencional de brita e o tampão rígido com gesso determinando-se os custos unitários de produção. Foi verificado que utilizando tampão rígido com gesso pode-se obter diversos benefícios como redução na metragem perfurada, obtenção de maior fragmentação, menor custo unitário de produção, ampliação da malha de perfuração, maior volume desmontado por furo detonado, etc. Portanto, o entendimento desses parâmetros e sua influência nos resultados do desmonte com explosivos motivou o desenvolvimento dessa pesquisa, em especial o impacto do tipo de tamponamento sobre a fragmentação e custos unitários de desmonte, a fim de estabelecer um tampão de máxima eficácia uma vez que normalmente utilizam-se tampões ineficientes e de baixo valor agregado no que se refere ao produto final, ou seja, a fragmentação da rocha. Desenvolver um material rígido e robusto, barato e de fácil uso para ser empregue no tampão, com o intuito de torna-lo mais resistente e aumentar o tempo de confinamento dos gases, convertendo isso em maior fragmentação da rocha e obtendo uma melhor eficiência do desmonte e redução dos custos foram os objetivos perseguidos no estudo.

Palavras-chave: Desmonte por explosivos. Tampão. Tamponamento rígido. Gesso.
Fragmentação de rochas.

ABSTRACT

In this dissertation, a new method of stemming holes for detonation of explosives in crushed stone quarry using gypsum was studied. This method of stemming was compared to the method commonly used in quarries and open pit mines, which use inert materials of low resistance, such as: drilling dust, gravel and soil, all of which cause efficiency losses in the clearing. The materials used in the traditional stemming method offer low resistance and are easily ejected by the pressure exerted by the gases shortly after the detonation, thus losing part of the energy available for rock fragmentation. In this work, the use of a rigid gypsum cap was carried out to carry out the dismantling of crushed stone with explosives and the image processing techniques of the disassembled pile were used in the Split-desktop software to determine the particle size distribution of the dismantled material. In this way, it is possible to evaluate the degree of fragmentation from the distribution of the dismantled material in the different grades defined in the software and to compare the performance of the two types of stemming used (traditional and gypsum). Subsequently a simulation of the results of rock dismantling was carried out using conventional cap and the rigid gypsum stem, determining the unit costs of production. It was verified that using rigid gypsum buffer several benefits can be obtained such as reduction in the perforated length, obtaining a greater degree of fragmentation, reduction of the need for crushing, lower unit cost of production, enlargement of the drilling mesh, greater volume dismantled by hole detonated, etc. Therefore, the understanding of these parameters and their influence on the results of the explosive dismantling motivated the development of this research, especially the impact of the type of stemming on the fragmentation and unit costs of dismantling, in order to establish a cap of maximum effectiveness since Inefficient stems and low value-added buffers are usually used for the final product, ie rock fragmentation. Develop a rigid, robust, inexpensive and easy-to-use material to be used in the stem in order to make it more resistant and increase the time of confinement of the gases, converting this into a greater fragmentation of the rock and obtaining a better dismantling efficiency and cost reduction were the objectives pursued in the study.

Keywords: Rock blasting. Rigid stemming. Stem. Rock fragmentation. Gypsum.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Área de estudo (Pedreira Herval – Barreiros – PE)	16
Figura 2: Execução correta da carga de um explosivo a granel em um terreno com bolsões. .	20
Figura 3: Consequências dos desvios dos furos na distribuição do explosivo no volume de maciço rochosos que se pretende desmontar	30
Figura 4: Raio de influência de cada furo ao nível da soleira condicionado pelo desvio dos furos	30
Figura 5: Raio de influência de cada furo ao nível da soleira na situação ideal sem desvios ..	31
Figura 6: Benefícios de uma perfuração alinhada	34
Figura 7: Efeito do diâmetro de perfuração na distribuição dos furos em maciço rochoso fraturado	39
Figura 8: Comportamento das ondas de choque em função da inclinação dos furos	40
Figura 9: Afastamento em furos verticais e inclinados	41
Figura 10: Tipos de tampão empregados nos testes práticos de desmonte com explosivo na Pedreira Herval	47
Figura 11: Fotografia da pilha de material fragmentado nos testes práticos de desmonte com explosivo na Pedreira Herval mostrando a utilização de bolas de basquete como escala.....	52
Figura 12: Fotografia da pilha de material fragmentado nos testes práticos de desmonte com explosivo na Pedreira Herval mostrando o delineamento dos fragmentos através do software Split-desktop.....	53
Figura 13: Distribuição granulométrica do material fragmentado nos testes práticos de desmonte com explosivo na Pedreira Herval obtida no software Split-desktop	53
Figura 14: Plano de fogo do desmonte I com parte de tampão de gesso.....	56
Figura 15: Face da bancada do desmonte I.....	57
Figura 16: Distribuição granulométrica dos resultados do desmonte I com utilização do tamponamento tradicional e tamponamento rígido com gesso	58
Figura 17: Plano de fogo do desmonte II com parte de tampão de gesso	60
Figura 18: Face da bancada do desmonte II	61
Figura 19: Distribuição granulométrica dos resultados do desmonte II com utilização do tamponamento tradicional e tamponamento rígido com gesso	61
Figura 20: Plano de fogo do desmonte III com parte de tampão de gesso.....	63
Figura 21: Face da bancada do desmonte III.....	64
Figura 22: Distribuição granulométrica dos resultados do desmonte III com utilização do tamponamento tradicional e tamponamento rígido com gesso	65
Figura 23: Distribuição granulométrica dos resultados dos desmontes estudados em furos com tamponamento tradicional com brita	67
Figura 24: Distribuição granulométrica dos resultados dos desmontes estudados em furos com tamponamento rígido com gesso	68
Figura 25: Comparação dos resultados dos desmontes estudados em relação aos parâmetros granulométricos P20, P50 e P80.....	69
Figura 26: Plano de fogo com a malha padrão do desmonte I com o método tradicional	70
Figura 27: Plano de fogo com a malha ampliada do desmonte I com o método de gesso	71
Figura 28: Plano de fogo com a malha padrão do desmonte II com o método tradicional	72
Figura 29: Plano de fogo com a malha ampliada do desmonte II com o método de gesso.....	73
Figura 30: Plano de fogo com a malha padrão do desmonte III com o método tradicional.....	74
Figura 31: Plano de fogo com a malha ampliada do desmonte III com o método de gesso	74

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Indicadores geográficos, econômicos e sociais de Barreiros – PE.....	17
Tabela 2 : Erros relacionados aos desvios de furos, causas e medidas saneadoras.....	33
Tabela 3 : Parâmetros do Plano de Fogo utilizado pela pedreira Herval e aplicados no estudo comparativo de eficiência do tamponamento rígido com gesso.....	49
Tabela 4 : Distribuição granulométrica do material presente na pilha resultante do desmonte de explosivo obtida no software Split-desktop mostrando o P20, P50 e P80	54
Tabela 5 : Resultados de distribuição granulométrica em faixas padronizadas no software Split-desktop para os resultados do desmonte I com tamponamento tradicional e tamponamento rígido com gesso	59
Tabela 6 : Determinação dos índices de fragmentação P20, P50 e P80 para o desmonte I com utilização de tamponamento tradicional e tamponamento rígido com gesso	59
Tabela 7 : Resultados de distribuição granulométrica em faixas padronizadas no software Split-desktop para os resultados do desmonte II com tamponamento tradicional e tamponamento rígido com gesso	62
Tabela 8 : Determinação dos índices de fragmentação P20, P50 e P80 para o desmonte II com utilização de tamponamento tradicional e tamponamento rígido com gesso	62
Tabela 9 : Resultados de distribuição granulométrica em faixas padronizadas no software Split-desktop para os resultados do desmonte III com tamponamento tradicional e tamponamento rígido com gesso	66
Tabela 10 : Determinação dos índices de fragmentação P20, P50 e P80 para o desmonte III com utilização de tamponamento tradicional e tamponamento rígido com gesso	66
Tabela 11: Índices técnicos e custos de desmonte para o desmonte I.....	72
Tabela 12: Índices técnicos e custos de desmonte para o desmonte II.....	73
Tabela 13: Índices técnicos e custos de desmonte para o desmonte III	75
Tabela 14 : Relação de preços: Explosivos e Acessórios.....	123

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	JUSTIFICATIVA	14
1.2	OBJETIVO	14
1.2.1	Objetivo Geral	14
1.2.2	Objetivos Específicos	15
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1	LOCALIZAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE PESQUISA	16
2.2	PROPRIEDADES DAS ROCHAS E SUA INFLUÊNCIA NOS RESULTADOS DE DESMONTE.....	17
2.2.1	Densidade	17
2.2.2	Resistência Dinâmica das Rochas	18
2.2.3	Porosidade	19
2.2.4	Fraturamento Natural do Maciço Rochoso	20
2.2.5	Perfuração Específica	22
2.3	PROPRIEDADES DA ROCHA QUE AFETAM A PERFURAÇÃO E O DESMONTE 23	
2.3.1	Dureza	23
2.3.2	Elasticidade	23
2.3.3	Plasticidade	24
2.3.4	Abrasividade	24
2.3.5	Textura	24
2.3.6	Estruturas Geológicas do Maciço Rochoso	25
2.4	PERFURAÇÃO DE ROCHAS	25
2.4.1	Perfuração x Desvio de Furos	28
2.4.2	Influência da Posição Final dos Furos em Relação ao Posicionamento Inicial	29
2.4.3	Tipos de Desvios	32
2.5	DESMONTE DE ROCHAS	35
2.5.1	Desempenho eficiente do desmonte.....	35
2.6	PARÂMETROS DO PLANO DE FOGO.....	38
2.6.1	Diâmetro do Furo	38
2.6.2	Inclinação do Furo	39
2.6.3	Afastamento e Espaçamento	40
2.6.4	Subfuração	41

2.6.5	Tampão	42
2.6.6	Razão de Carga	43
2.7	AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS DE DESMONTE	44
2.7.1	Análise quantitativo visual	44
2.7.2	Método fotográfico	44
2.7.3	Gravação de imagens com câmeras de vídeo	45
3	METODOLOGIA	47
3.1	INTRODUÇÃO	47
3.2	LEVANTAMENTO DE DADOS TÉCNICOS	48
3.3	PLANO DE FOGO DOS DESMONTES	49
3.4	ANÁLISE DA FRAGMENTAÇÃO ATRAVÉS DO TRATAMENTO DE IMAGEM 50	
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	55
4.1	INTRODUÇÃO	55
4.2	ANÁLISE DA FRAGMENTAÇÃO	55
4.2.1	Análise Granulométrica do Desmonte I	56
4.2.2	Análise Granulométrica do Desmonte II	60
4.2.3	Análise Granulométrica do Desmonte III	63
4.2.4	Avaliação dos Desmontes Estudados	67
4.3	COMPARAÇÃO DE CUSTOS UNITÁRIOS DE DESMONTE ENTRE AS TÉCNICAS DE TAMPONAMENTO TRADICIONAL E TAMPONAMENTO RÍGIDO	69
4.3.1	Custo unitário do Desmonte I usando o plano de fogo padrão da empresa e tamponamento com o método tradicional	70
4.3.2	Custo unitário do Desmonte I usando plano de fogo adaptado ao método de tamponamento rígido com gesso	71
4.3.3	Custo unitário do Desmonte II usando o plano de fogo padrão da empresa e tamponamento com o método tradicional	72
4.3.4	Custo unitário do Desmonte II usando plano de fogo adaptado ao método de tamponamento rígido com gesso	73
4.3.5	Custo unitário do Desmonte III usando o plano de fogo padrão da empresa e tamponamento com o método tradicional	74
4.3.6	Custo unitário do Desmonte III usando plano de fogo adaptado ao método de tamponamento rígido com gesso	74
5	CONCLUSÕES	76
	REFERÊNCIAS	78
	ANEXOS	82

1 INTRODUÇÃO

As operações unitárias de lavra constituem-se em perfuração e desmonte, carregamento e transporte, sendo cada uma delas conexas da outra. A lavra tem por finalidade, atender a curva granulométrica solicitada pelo britador primário, de modo a aperfeiçoar o processo de beneficiamento aumentando a eficiência e, reduzindo custos com desgaste e energia. Contudo, todas essas etapas devem propiciar material adequado a etapa jusante, de maneira que toda a cadeia produtiva seja aperfeiçoada, refugo sejam reduzidos e, portanto, obtenha-se menor custo de produção.

Uma fragmentação inadequada influencia diretamente na efetividade da produção uma vez que, há a geração de materiais maiores (*oversizes*) ou muito finos. "Fragmentos muito grandes para serem eficientemente escavados, transportados e processados devem, ou ser tratados como ineficiência do processo ou ser refragmentados por desmonte mecânico, ou por desmonte secundário. Desmonte secundário é tempo consumido, mais caro e mais difícil que o desmonte de rotina" (Scott et al, 1996).

A fragmentabilidade ou a susceptibilidade da massa da rochosa a ser quebrada sob a ação do explosivo é definida como a energia específica limite do explosivo que pode fragmentar a rocha só para separar os blocos ao longo das suas regiões mais fracas, tendenciando uma maior fragmentação. Em outras palavras, a fragmentabilidade significa o equilíbrio limite de um desmonte, a energia mínima de explosivo que pode desintegrar um certo volume de rocha de acordo com as condições existentes campo (Gama, 1995).

Os materiais do tampão convencional são comumente usados devido a disponibilidade próximo, tais como o pó de perfuração e brita, entretanto, esses materiais oferecem uma baixa resistência sendo facilmente ejetados fazendo com que o desmonte perca eficiência, e conseqüentemente produzindo uma fraca fragmentação.

Nessa dissertação, com base nos trabalhos de Cevizci (2012 e 2013), foi desenvolvida uma mistura de gesso e água que irá compor uma fração do tampão, e após um determinado tempo específico essa mistura endurece criando uma área bastante rígida e forte, com isso aumenta-se a resistência do tamponamento. A partir dessa ideia pode-se diminuir o comprimento do tampão e conseqüentemente aumentar a coluna de explosivo, favorecendo

uma melhor fragmentação da rocha, principalmente na região referente ao tampão (alto da bancada). Para aferir os resultados foi usado o processamento por imagem para determinar a distribuição granulométrica do material desmontado e posteriormente foi feita uma análise de custos entre o método de tamponamento convencional e o tamponamento com gesso para estimar e comparar os custos, verificando-se que no tamponamento com gesso foram obtidos ganhos em metros perfurados e redução nos custos com desmonte.

Portanto, há necessidade de se realizar um estudo sobre tamponamento de furos de desmonte e estabelecer um tampão de máxima eficácia uma vez que comumente utilizam-se tampões ineficientes e de baixo valor agregado no que se refere ao produto final: a fragmentação da rocha.

1.1 JUSTIFICATIVA

Desenvolver um material rígido e robusto, barato e de fácil uso para ser empregue no tampão, com o intuito de torna-lo mais resistente, aumentar o tempo de confinamento dos gases, convertendo isso em maior fragmentação da rocha obtendo uma melhor eficiência do desmonte e redução dos custos. Todavia, esse aperfeiçoamento só será possível com a interpretação de dados técnicos como a análise da fragmentação do material desmontado através de fotos e uma estimativa de custos com os parâmetros obtidos em campo.

1.2 OBJETIVO

1.2.1 Objetivo Geral

Avaliar a eficiência no desmonte de rochas utilizando-se o tamponamento rígido não convencional com aplicação de gesso e comparar os resultados da fragmentação da rocha e custos operacionais com o tampão tradicional feito somente com brita.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Determinar a ciclo de operações na perfuração e amarração dos explosivos e acessórios em mineração de brita, os tempos de ciclo e os custos operacionais unitários.
- Avaliar a eficiência do uso de tampão não convencional com gesso em relação à razão de carga, geometria do desmonte, custos unitários de desmonte, fragmentação obtida no material desmontado, ultralançamento e espalhamento da pilha do material desmontado.
- Comparar esses resultados com os resultados de tampão convencional com brita e determinar as vantagens de se utilizar o tamponamento com gesso.
- Determinar as curvas de fragmentação obtidas com o desmonte convencional e o desmonte com tamponamento rígido de gesso através de técnicas computacionais de tratamento de imagens.
- Determinar os custos de operação nos dois sistemas de tamponamento estudados definindo aquele que mostra os melhores resultados econômicos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 LOCALIZAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE PESQUISA

A pedreira Herval, localiza-se no município de Barreiros - PE, distando 102 km de Recife. O acesso à área de estudo é feito pela rodovia PE 060 no sentido de São José da Coroa Grande. Segue-se pela PE-60 até a entrada do município de Barreiros e, após passar pelo Hospital Municipal de Barreiros, a entrada para chegar-se à Pedreira Herval situa-se a cerca de 500 metros onde se toma estrada carroçável a esquerda da rodovia e percorre-se cerca de 1 km até chegar à pedreira (figura 1).

Figura 1: Área de estudo (Pedreira Herval – Barreiros – PE)



Fonte: Google Earth (2017)

A pedreira encontra-se bem localizada e com bons acessos permitindo o escoamento de agregados para toda região de Barreiros e cidades vizinhas, requisito básico para o sucesso deste tipo de empreendimento.

Barreiros é um município brasileiro do estado de Pernambuco. Localiza-se na Mesorregião da Mata Pernambucana e na Microrregião da Mata Meridional Pernambucana.

Situa-se a 13 km de São José da Coroa Grande e 22 km de Rio Formoso. Localiza-se a uma latitude 08° 49' 06" sul e a uma longitude 35° 11' 11" oeste. Localmente ocorrem granitos de idade pré-cambriana inseridos em uma pequena camada de argila.

A tabela 1 sumariza os principais indicadores geográficos, econômicos e sociais do município de Barreiros.

Tabela 1: Indicadores geográficos, econômicos e sociais de Barreiros – PE

Características Geográficas	
Área da unidade territorial 2015	233,379 km ²
População 2010	40.732 hab.
Densidade demográfica	180,42 hab./km ²
Altitude	22 m
Clima	Tropical As'
Relevo	Ondulado forte
Fuso horário	UTC-3
População estimada 2016	42.331 hab.
Indicadores	
IDH-M	0,586 <i>baixo PNUD/2010</i>
PIB	R\$ 259.908 mil <i>IBGE/2012</i>
PIB per capita	R\$ 6.343,38 <i>IBGE/2012</i>

Fonte: Autor (2017)

2.2 PROPRIEDADES DAS ROCHAS E SUA INFLUÊNCIA NOS RESULTADOS DE DESMONTE

As principais propriedades dos maciços rochosos e as influências dessas propriedades nos resultados do desmonte com explosivos é descrita ao longo do presente capítulo.

2.2.1 Densidade

A densidade das rochas (peso específico) está relacionada com os elementos constituintes (minerais) e de sua porosidade possuindo uma boa correlação com sua resistência mecânica do maciço rochoso.

Rochas de baixa densidade se deformam e rompem com uma maior facilidade, demandando um baixo fator energético para prover sua fragmentação. Em contrapartida em

rochas de maior densidade faz-se necessário usar um maior fator energético para que haja uma fragmentação satisfatória (Jimeno, 1982).

Os parâmetros que influenciam diretamente na densidade das rochas são:

- Estado de alteração: o que leva a um aumento de volume dos minerais,
- Porosidade,
- Grau de compactação.

Em certos casos, é possível encontrar uma composição mineralógica e anisotrópica semelhante, e ter uma variação da densidade. Como exemplo o quartzito que pode ser encontrado em regiões onde houve um metamorfismo mais intenso do que em outros lugares, ficando evidente a diferença de densidade de um local para outro.

Aconselha-se tomar as seguintes medidas, para o caso de rochas de alta densidade:

- Aumentar o diâmetro de perfuração, o que permitirá um aumento na pressão dos gases produzidos no interior dos furos;
- Melhorar a eficiência do tamponamento, com o propósito de aumentar o tempo de atuação dos gases, forçando-o a sair pela face livre e não pelo tampão;
- Fazer uso de explosivos mais energéticos.

Em relação a porosidade e compacidade tem-se as seguintes características nas rochas:

- Rochas muito porosas são de baixa densidade;
- Resistência à compressão cresce com a densidade;
- Resistência ao desgaste abrasivo cresce com a densidade;
- Dificuldade de corte cresce com a densidade.

2.2.2 Resistência Dinâmica das Rochas

As rochas mostram-se propensas a se desmontar por explosivo usando como base os parâmetros indicativos de resistência dinâmica à compressão e à tração.

As ondas compressivas avançam do furo em direção à face livre e são refletidas na forma de ondas de tração. Quando a resistência à tração das rochas é vencida pelas ondas de tração, são criadas novas fraturas e gretas, e este processo continua até que a intensidade induzida das ondas compressivas venha progressivamente perdendo força ao longo do maciço.

As discontinuidades são consideradas um plano de fraqueza na rocha, na qual sua presença no maciço torna-o estruturalmente descontínuo e aponta uma menor resistência ao cisalhamento (Fiori & Carmignani, 2015). Segundo Fiori & Carmignani (2015 apud Jennings & Robertson, 1969) os maciços rochosos são em geral heterogêneos e anisotrópicos em virtude dos inúmeros tipos litológicos, frequência de discontinuidades e graus variáveis de alteração.

As discontinuidades do maciço rochoso, tais como: planos de acamamento, porosidade da rocha, famílias de fraturas, diaclases, cavidades no interior do maciço, etc, contribuem consideravelmente para que haja um decréscimo gradativo na energia da onda de choque (atenuação) à medida que as ondas compressivas vão atravessando o maciço. O processo de expansão dos gases logo após a deflagração do explosivo favorece também a abertura das fraturas bem como a projeção dos fragmentos gerados (Hagan, 1983).

2.2.3 Porosidade

É a propriedade das rochas em conter interstícios ou espaços vazios no seu interior (definida pela relação entre o volume dos vazios e o volume total da rocha).

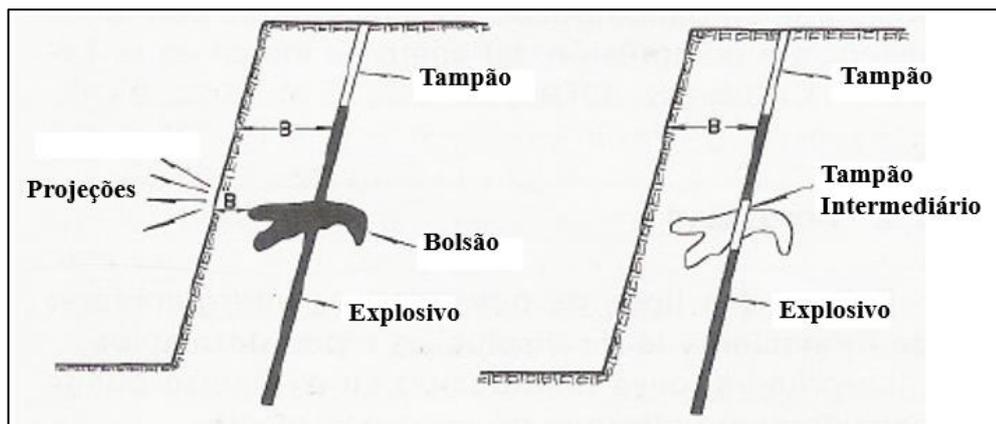
Existem dois tipos de porosidade: a de formação intergranular e porosidade de dissolução. A porosidade intergranular provoca dois efeitos: a atenuação das ondas de choque e a diminuição da resistência à compressão. Esses efeitos são amenizados devido à precária continuidade dentro do maciço rochoso provocando um aumento no material que é triturado oriundo da detonação e, portanto, gerando um aumento na percentagem de finos. A porosidade por dissolução origina-se na circulação de águas subterrâneas dentro da rocha decompondo o material existente e aumentando o grau de meteorização, originando assim, o aparecimento de cavidades. Normalmente esse fenômeno aparece em rochas vulcânicas e em calcários (Jimeno, 2008).

A maior parte dos interstícios ou vazios são pequenos espaços intergranulares, no entanto alguns podem conter estruturas cavernosas ou bolsões, como por exemplo, as rochas vulcânicas a qual durante a sua formação originou espaços ociosos (Ward, 1990).

Quando estes bolsões são atravessados pelos furos e, por conseguinte, são carregados com uma carga (kg/m) maior do que a calculada poderão ocorrer diversos problemas, entre os quais o ultralancamento, principalmente se essas cavidades estiverem próximas a face livre.

Para contornar esse empecilho pode-se fazer uso de técnicas como: o encamisamento dos furos ou tampões dentro dos furos conforme indicado na figura 2.

Figura 2: Execução correta da carga de um explosivo a granel em um terreno com bolsões.



Fonte: Jimeno (2008)

2.2.4 Fraturamento Natural do Maciço Rochoso

A fraturamento natural origina-se nos processos geológicos que atingem as rochas, bem como também, deixa grafado nela todo o registro geológico tais como: o estado de tensões e todo o conjunto que compõe as discontinuidades, em especial os planos de acamamento, planos de falha, as intrusões ígneas e foliação metamórfica.

Todas as rochas apresentam algum tipo de descontinuidade, seja ela microfissuras e/ou macrofissuras, as quais contribuem de maneira determinante nas propriedades físicas e mecânicas das rochas, principalmente em sua resistência, e, conseqüentemente, nos resultados de perfuração e desmonte (Hagan, 1979).

As descontinuidades são superfícies planas e podem ser de distintos tipos: planos de estratificação, planos de laminação e foliação primária, fraturas e juntas, etc. As descontinuidades podem ser abertas, fechadas, ou preenchidas, sendo assim, apresentarão diferentes níveis de transmissão da energia do explosivo ao maciço.

Devido as rochas não constituírem um meio elástico, uma fração da onda de tensão que se propaga através do maciço se converte em calor. A amortização das ondas de tensão produzida pela detonação do explosivo, ou seja, sua atenuação se dará tanto quanto maior forem a porosidade, a permeabilidade, a presença de fraturas e o conteúdo de água existente na rocha. As ondas de choque ao colidirem com as descontinuidades, estes planos de fraqueza geológica funcionarão como uma face livre, refletindo e absorvendo parte dessa energia, dessa maneira, reduzindo a energia liberada pelo explosivo (Hagan, 1983).

A análise estrutural das descontinuidades presentes em um maciço rochoso é de vital relevância, principalmente as orientações das fraturas e o espaçamento das várias famílias de fraturas. Este estudo conduzirá a uma orientação favorável dos desmontes, sucedendo em resultados mais previsíveis (Hoek, 1966).

Quando as fraturas tiverem uma direção no sentido da face livre, espera-se que os blocos desmontados sofram um deslizamento, pois a inclinação da descontinuidade favorecerá que os blocos escorreguem no sentido da face livre, fragmentando pouco o bloco de rocha gerando assim uma pilha de fragmentos com tamanhos maiores. Nesse caso essas fraturas determinaram uma ineficiência do plano de fogo, reduzindo o rendimento do processo de fragmentação logo após a detonação.

Em casos em que o maciço encontra-se bastante fraturado, faz-se necessário utilizar menor carga explosiva, ou utilizar explosivos de baixa velocidade, já que a energia liberada pelo explosivo será dissipada pela rede de fraturas (atenuação das ondas de choque e escapamento dos gases) (Bhandari, 1997). Nesses casos o maciço só precisa ser projetado, pois a rocha *in situ* já se encontra praticamente fragmentada e liberada. Em vista disso, há uma tendência em utilizar esquemas de desmonte versáteis, os quais se ajustem as descontinuidades dos maciços e que possam também tirar um melhor proveito delas, demandando assim um conhecimento prévio destas. Como exemplo pode-se definir o sentido

mais favorável ao desmonte para o tipo de material que se pretende obter e tendo em vista o sistema de fraturamento local.

2.2.5 Perfuração Específica

Em geral, a despesa de perfuração de rochas com grandes diâmetros é mais baixa, devido a malha de perfuração ser mais aberta, em relação a perfuração com pequenos diâmetros (malha mais adensada). À proporção que o diâmetro aumenta, menor será a perfuração específica considerando uma mesma carga específica.

Então sob essa visão, fica a cargo da perfuratriz utilizada ser capaz de realizar furos de dimensões maiores encaminhando a um maior volume desmontado com menores custos. É preferível realizar um desmonte com diâmetro maior ao invés de realizar dois desmontes com furos de diâmetro menor para se extrair um mesmo volume desmontado, ou seja, se as condições permitirem (grau de fragmentação e vibrações) deve-se realizar perfuração de diâmetros maiores para ter um ganho extra nos custos, já que haverá uma redução em metros perfurados. No entanto deve-se atentar para que essa economia não seja prejudicada com o aparecimento significativa de matacos, pois desmontes secundários possuem um maior gasto.

2.3 PROPRIEDADES DA ROCHA QUE AFETAM A PERFURAÇÃO E O DESMONTE

2.3.1 Dureza

A dureza de uma rocha é a resistência que o maciço possui a penetração por outro corpo de firmeza mais elevada. A intensidade da dureza de uma rocha é determinada em função da dureza dos minerais constituintes, da capacidade de ligação destes na matriz rochosa, da resistência mecânica e do grau de compactação.

Nas rochas a dureza depende das características cristalinas dos minerais presentes, tamanho dos grãos, quantidade de material cimentante, grau de umidade, e estado de tensão no maciço rochoso (Jimeno, 1986).

2.3.2 Elasticidade

Elasticidade é a propriedade de deformar um corpo sólido quando este está sujeito a ação de forças (cargas) externas, e retorna a sua forma original ao cessar a ação destas forças. As deformações elásticas não dependem do tempo de atuação da carga.

As propriedades elásticas das rochas são caracterizadas pelo módulo de elasticidade “E” e pelo coeficiente de Poisson “ ν ”. O chamado módulo de elasticidade ou módulo de Young é a relação de proporcionalidade entre o esforço aplicado (tração ou compressão) e a deformação produzida por esta força. Dependendo principalmente da composição mineralógica, porosidade, tipo de deformação e magnitude da carga aplicada. (JIMENO, 2003). Por exemplo, uma rocha porosa é bem mais elástica do que uma rocha competente, a porosidade influencia bastante na elasticidade.

Quanto maior o módulo de Young, maior a tensão necessária para o mesmo grau de deformação, e, portanto, mais rígido é o material. Quanto maior é o valor do módulo de Young, menor será a deformação do sólido submetido a uma força constante, ou seja, mais difícil será a fragmentação da rocha.

2.3.3 Plasticidade

A deformação plástica acontece quando as tensões em uma rocha superam os limites de elasticidade ocorrendo assim uma deformação irreversível e permanente, que não desaparece mesmo quando a carga é suprimida.

A composição mineralógica da rocha influencia a sua plasticidade, sendo assim, a plasticidade da rocha diminui com um aumento da quantidade de minerais como o quartzo, feldspato ou outros minerais duros. Em contrapartida as argilas possuem uma elevada propriedade plástica assim como as micas (Jimeno, 1986).

2.3.4 Abrasividade

A abrasividade é a capacidade das rochas em desgastarem a superfície de contato de uma ferramenta mais dura, no processo de atrito durante o movimento.

A taxa de desgaste influi bastante na vida útil dos acessórios de perfuração, atuando como um índice na previsão do afiamento das ferramentas de corte (Jimeno, 1986).

Os fatores que contribuem para uma elevada capacidade abrasiva das rochas são:

- A dureza dos grãos: quanto mais silicosa for a rocha maior será o desgaste provocado;
- A forma dos grãos: grãos mais angulosos são mais abrasivos do que os arredondados;
- Tamanho dos grãos: quanto mais finos forem os grãos maior será a abrasividade;
- Grau de heterogeneidade: Em rochas polimineriais os minerais vão desagregando-se dando origem a uma superfície de maior aspereza como, por exemplo, grãos de quartzo em granito;
- Porosidade: quanto mais porosa for uma rocha menos abrasiva ela será em relação a uma rocha mais densa.

2.3.5 Textura

A textura de uma rocha se refere à estrutura dos minerais constituintes desta, através do aspecto da sua superfície como: o tipo, a forma e tamanho dos grãos, orientação dos

mesmos, a cor e a porosidade presente. Todos esses aspectos influenciam substancialmente no rendimento da perfuração.

Uma rocha com granulação grosseira apresenta maior facilidade de perfuração e menor desgaste das ferramentas de corte do que uma rocha de granulação fina. O grau de interligação entre os grãos minerais influi bastante na perfurabilidade de uma rocha (Jimeno, 1986).

2.3.6 Estruturas Geológicas do Maciço Rochoso

As propriedades estruturais das discontinuidades dos maciços rochosos tais como a direção e mergulho, afetam a linearidade dos furos provocando desvios de perfuração, influenciando, também, os rendimentos da operação de perfuração e a estabilidade da parede dos furos.

Em rochas fraturadas há uma grande tendência de escape do fluido de limpeza do furo pelas fendas das rochas, reduzindo a taxa de penetração, e causando o aprisionamento das ferramentas de perfuração no furo.

2.4 PERFURAÇÃO DE ROCHAS

A perfuração é a operação na qual inicia a preparação da rocha para o desmonte com explosivos, executando-se vários furos no maciço segundo o plano de fogo projetado, com o propósito de que os explosivos possam ser acondicionados em seu interior para posterior detonação.

A perfuração é um dos principais fatores que mais influencia diretamente na operação de desmonte, bem como seu resultado no que tange a fragmentação idealizada para o bom funcionamento das operações subsequentes (carga explosivos-detonação, fragmentação secundária, quando esta se faz necessária, carregamento, transporte e britagem). O êxito destas operações está intrinsecamente ligado à execução/resultado da etapa de perfuração.

A perfuração e o desmonte devem ter como meta a liberação do material *in situ* a fim de que haja uma redução nominal (curva granulométrica ideal) e que atenda as especificações dos processos subsequentes, principalmente as dimensões do britador primário e da caçamba e ou concha dos equipamentos de carregamento e transporte, e também reduzir tanto em quantidade quanto em tamanho os blocos maiores ("*oversizes*"), ou matacos, os quais são submetidos a uma detonação secundária. A intenção desta segunda detonação é reduzir as dimensões desses fragmentos maiores de modo a estarem compatíveis com a abertura do britador primário e operação de carregamento. Esses matacos são novamente perfurados, utilizando martelotes pneumáticos operados manualmente e detonados com uso de explosivos. Alternativamente pode-se empregar rompedores hidráulicos nessa operação. Os *oversizes* são as principais causas na perda de produtividade e engaiolamento dos blocos na etapa de britagem. Logo, otimizar a etapa da perfuração tem implicação direta no sucesso destas etapas posteriores. Um maior controle da perfuração poderá extrair uma maior eficiência do explosivo, melhores rendimentos e menores custos, devendo-se levar em conta que a formação dos operadores deve ser continuada e controlada com rigidez e ter um monitoramento contínuo ao longo do tempo.

Perfuração, carregamento, detonação e fragmentação secundária, esta última quando se faz necessário, representam cerca de 25% dos custos totais de operação e são bem menos onerosas do que as operações de carregamento, transporte e cominuição. Estas operações juntas possuem um impacto bastante considerável na rentabilidade dos processos subsequentes de transformação, bem como também, influenciam bastante no desenvolvimento das etapas a jusante.

A segunda etapa representada pelas operações de carregamento e transporte é a fase mais onerosa no desmonte de rochas, etapa que está associada ao grau de fragmentação do material vindo do desmonte e aos equipamentos utilizados no método de lavra da mina. Conforme o material seja bem fragmentado e uniforme o fator de enchimento será bem melhor ganhando-se tempo e produtividade no carregamento, devido ao fato de que se perderá menos tempo separando os blocos maiores, os quais serão desmontados via fragmentação secundária, gerando também menor dano e desgaste nos equipamentos de carregamento e reduzindo o impacto causado pelo peso excessivo dos blocos de dimensões maiores nos equipamentos de transporte e, conseqüentemente, ocasionando menores custos com manutenções preventivas e corretivas.

Existem fatores externos que podem influenciar prontamente no uso destes equipamentos: a topografia, tipo e espessura do solo, características do material a ser retirado, condições climáticas, capacitação do operador e outras condicionantes que podem interferir nos custos totais de manutenção. Esta etapa é a que mais sofre com as variações inerentes ao setor financeiro tais como: depreciação, mercado, variação do dólar, inflação, combustível, lubrificação, operador, pneus, manutenção; dependendo da localização, dificuldade na reposição de peças e acessórios e demora na entrega do material. Uma medida mitigadora para este caso seria a criação de estoque para a necessidade de manutenção/reposição de peças dos equipamentos sem se preocupar com a logística de entrega do material.

Por representar a segunda operação mais onerosa, a britagem corresponde a cerca de um terço dos custos totais de operação. Dessa forma essa operação possui uma atenção especial nos processos de otimização e avaliação do desgaste, justificado pelo seu elevado peso nos custos operacionais. Por ser a última etapa do processo (no caso de agregados para construção civil), seu aproveitamento/lucratividade está em função da qualidade do material vindo das operações anteriores. O material já desmontado apresenta uma resistência à compressão bem menor do que a rocha *in situ*, visto que estes fragmentos estarão saturados de microfissuras. Quanto maior for a resistência desses fragmentos maior será a influência no consumo de energia no britador primário, demandando assim maior consumo de energia, passando mais tempo na câmara de trituração e aumentando o desgaste dos elementos de britagem em contato com a rocha.

Antes de proceder com a etapa de perfuração, faz-se necessário ter a superfície o mais regular e limpa possível de fragmentos de rocha solta, facilitando o posicionamento e possibilitando uma maior estabilidade da máquina de perfuração e o emboquilhamento para execução do furo. Alguns erros podem acontecer durante esta fase: falta de limpeza da berma, condicionantes oriundas das descontinuidades, erros de marcação do plano de fogo ou a ausência de inspeção dessas marcações, mal posicionamento do equipamento de perfuração e alinhamento da lança, influenciando diretamente os erros de emboque dos furos, as condições do equipamento, etc. Juntamente com os acessórios de perfuração (hastes, bits, luvas, etc.) e eventuais vazamentos no sistema de acionamento (hidráulico ou ar comprimido), são parâmetros que influenciam diretamente na precisão final da perfuração (Forsyth et al., 1995).

Conforme Osen (1985) as maiores vantagens que se pode extrair de um bom projeto de desmonte podem ser totalmente perdidas com uma prática de perfuração ineficaz. Uma perfuração descuidada, ignorando as regras citadas acima, poderá prejudicar severamente o desmonte, chegando até a ter que se abandonar a bancada, acarretando em aumento nos custos, perdas de reserva e desperdício de tempo.

Portanto para se chegar a uma performance desejada no processo de perfuração, os furos devem ser executados segundo as marcações pré-estabelecida metodicamente, bem como sua direção e inclinação devem ser garantidas e realizadas o mais paralelo possível. As marcações dos furos sob a berma, o emboque e a perfuração deveram seguir à risca os dados encontrados no plano de fogo, para se extrair uma maior eficiência da perfuração (Olofsson, 1988).

2.4.1 Perfuração x Desvio de Furos

Os desvios na perfuração são influenciados principalmente pela negligencia em não se levar em conta o estudo das características da rocha (litologia), erros de direção devido a restrições técnica do equipamento (Kutschera & Mann, 2007) e/ou velocidade de avanço muito rápida (Kerber, Tudeshki & Rebehn, 2007). Outro fator que influencia bastante a segurança bem como a produtividade e a eficácia do desmonte é a acuracidade dos furos (Kerber, Tudeshki & Rebehn, 2007).

Conforme Singh (1996), a sinuosidade na etapa de perfuração é a diferença entre a posição planejada e a posição realizada do eixo geométrico do furo. As discrepâncias de emboque e de alinhamento estão associadas a fatores externos ao furo, como por exemplo, a habilidade de um operador em executar um furo, porém a imprecisão referente à trajetória pode ter origem em fatores internos e externos ao furo, por exemplo a heterogeneidade da rocha. Erros de emboque e de alinhamento são fáceis de identificar, observar e entender as causas, todavia erros de trajetória são mais difíceis de analisar e detectar a origem. Os desvios de perfuração podem ser resultantes do estado de tensões atuantes no maciço operante na haste de perfuração. Este esforço tem suas origens em características do equipamento, variáveis operacionais ou em feições geológicas existentes na rocha.

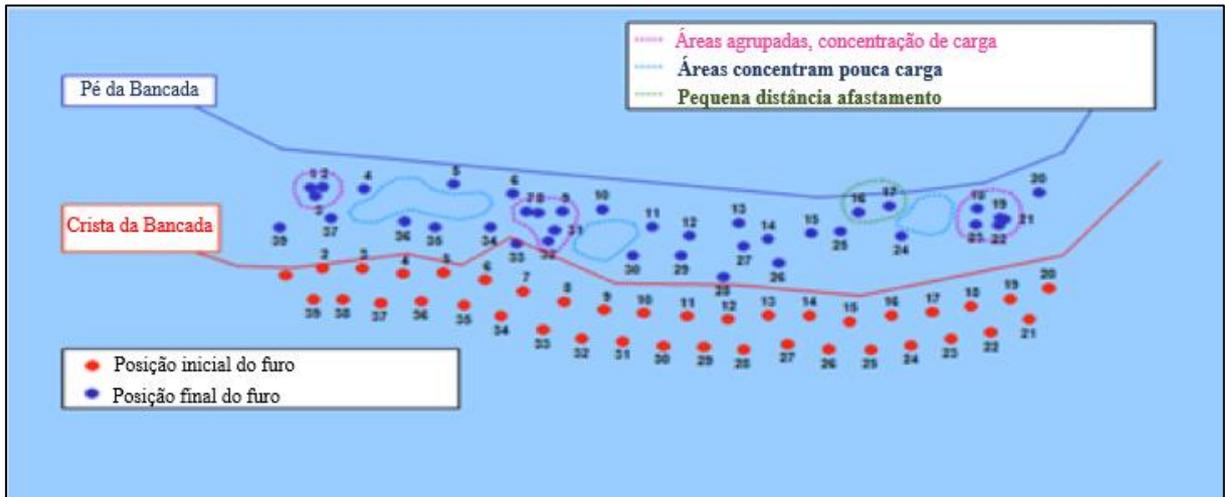
Com incorporação de novos e mais modernos sistemas hidráulicos, a performance dos equipamentos de perfuração rotativa e percussiva está cada vez mais próxima da perfeição. Desvios em excesso produzem uma fraca fragmentação e comprometem a segurança. Além disso, furos desviados oferecem mais resistência ao movimento do material desmontado, reduzem a taxa de penetração, aumentam o ciclo de operação e resultam no aumento dos custos de produção (Sen, 1995).

2.4.2 Influência da Posição Final dos Furos em Relação ao Posicionamento Inicial

Na operação de perfuração deve-se partir do seguinte pressuposto: mesmo sem a influência de qualquer erro humano de perfuração, todos os furos apresentarão desvio, por menor que seja. Sob esta perspectiva a qualidade da execução da perfuração deve ser avaliada seguindo dois aspectos: a posição e a trajetória do furo.

Além de avaliar a competência de um operador em realizar um furo a partir de um ponto inicial planejado (emboque) até a cota final pretendida, é de extrema importância avaliar também a trajetória que ele segue, para ter um melhor entendimento dos erros ou fatores que podem estar na origem do tipo e amplitude do desvio (figura 3). Nesta figura notam-se áreas de concentração dos furos no pé da bancada o que promoveria uma concentração de carga e conseqüentemente problemas de vibração, ultralancamento, ruídos e a pulverização da rocha nessas áreas, além da possível iniciação simultânea de furos que deveriam ser iniciados individualmente, devido à proximidade das cargas de furos adjacentes ou iniciação por simpatia, ocorrendo uma deflagração ou perda da sequência de detonação implicando numa redução do desempenho do explosivo. Outras áreas concentram pouca carga, ou nenhuma, ocasionando a geração de blocos e problemas de repés. Em outras áreas os furos estão tão próximos da face que, ao serem detonados podem provocar problemas de ultralancamento (“*flyrocks*”).

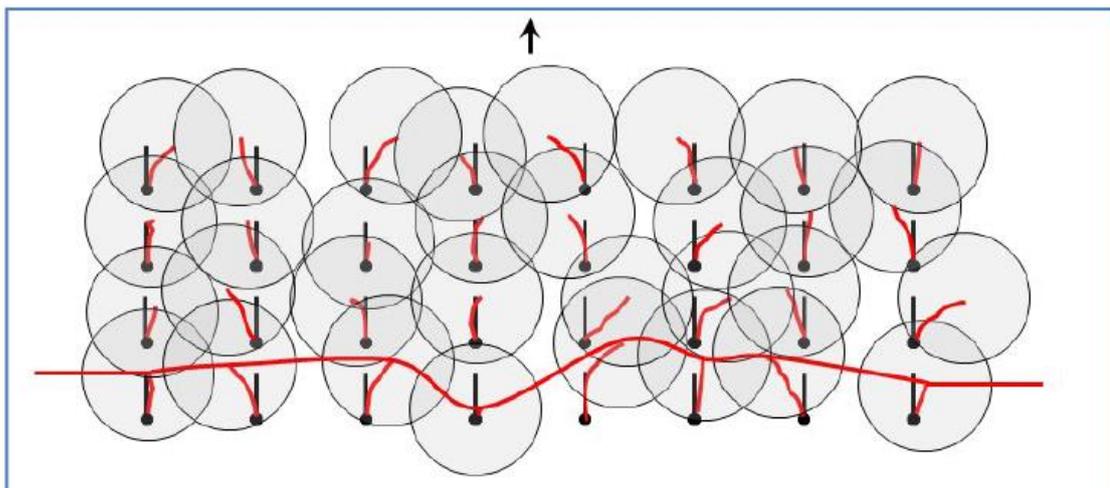
Figura 3: Consequências dos desvios dos furos na distribuição do explosivo no volume de maciço rochosos que se pretende desmontar



Fonte: Adaptado Sandvik-Tamrock, 2009

De acordo com a figura 4, mesmo que os furos estejam bem posicionados na superfície da bancada (segundo uma marcação precisa em relação ao afastamento/espacamento), tal não se confirma tanto em sua trajetória quanto em profundidade, o que será bastante determinante no resultado final do desmonte em relação à fragmentação. A zona de influência de cada furo implicara em vários problemas, conforme explicado no parágrafo anterior.

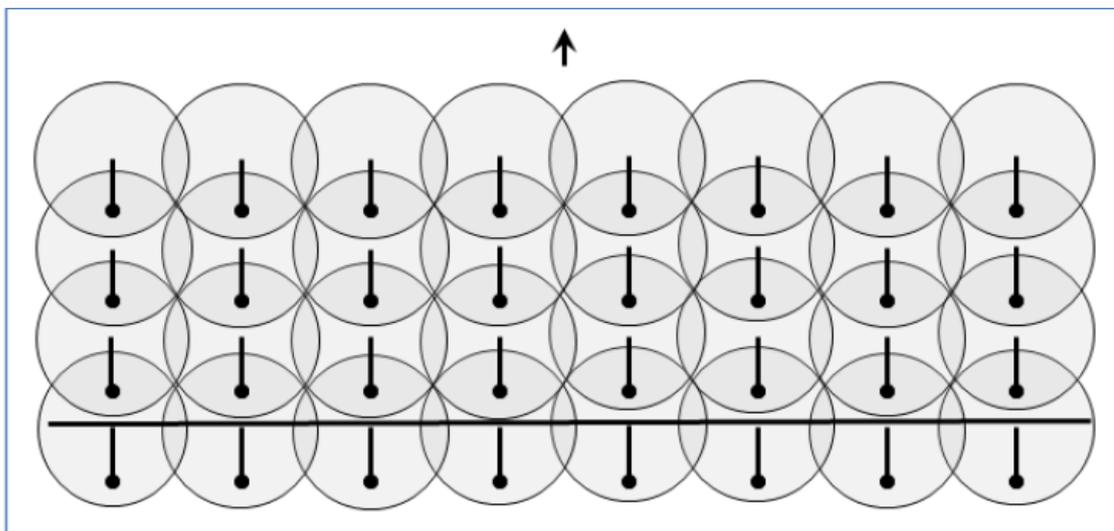
Figura 4: Raio de influência de cada furo ao nível da soleira condicionado pelo desvio dos furos



Fonte: Adaptado de Sandvik, 2006

Conforme a figura 5 todos os furos possuem uma locação inicial e final de acordo com as especificações do plano de fogo. Esta seria a disposição ótima com um raio de influência ideal de cada furo sem desvios ou com desvios admissíveis (máximo de três vezes o diâmetro do furo, segundo Persson et al. 1993). Portanto, haverá uma distribuição espacial das cargas explosivas mais uniforme no interior do maciço rochoso tendo uma influência bastante acentuada sobre os resultados da detonação. Essa configuração a ser obtida na prática da perfuração conduz a uma maximização da fragmentação, sem excesso de finos ou de matacos, redução de irregularidades na plataforma de trabalho, ou seja, implica em ganho de produtividade para uma melhor extração da rocha.

Figura 5: Raio de influência de cada furo ao nível da soleira na situação ideal sem desvios



Fonte: Adaptado de Sandvik, 2006

Em geral, normalmente se confunde desvio de perfuração com erro de perfuração, no entanto são conceitos diferentes. Erro está associado a fatores que podem ser corrigidos ou evitados, como por exemplo, os erros humanos e os equipamentos de perfuração e seus acessórios, enquanto que o desvio está relacionado a fatores os quais não podem ser evitados, como é o caso da anisotropia da rocha *in situ* ou parâmetros geométricos do plano de fogo. Os erros de perfuração podem ser identificados para logo em seguida serem corrigidos e minimizados. Já os desvios de perfuração devem ser estudados para posteriormente serem minimizados ou contornados.

2.4.3 Tipos de Desvios

Os desvios podem ser oriundos de erros na execução da perfuração e/ou erros motivados pelas condicionantes da própria bancada (regularidade e limpeza da bancada) e se relacionam aos seguintes fatores:

- Posicionamento;
- Emboquilhamento;
- Direção;
- Inclinação; e
- Comprimento/Cota.

Existem também desvios associados à anisotropia da própria rocha, bem como as suas características geológicas:

- Flexão – Desvio progressivo, mas constante ao longo do furo;
- Pontual – Desvios pontuais da trajetória do furo inerentes às anisotropias do maciço rochoso.

A tabela 2 a seguir descreve os cinco tipos de erros de perfuração, bem como suas possíveis causas e medidas corretivas ou de mitigação.

Tabela 2 : Erros relacionados aos desvios de furos, causas e medidas saneadoras

ERRO	DESCRIÇÃO	CAUSAS	MEDIDAS CORRETIVAS OU DE MINIMIZAÇÃO
POSICIONAMENTO	Este tipo de erro é o primeiro erro possível de se cometer na execução de um furo. Consiste em não iniciar o furo no ponto previamente marcado.	Técnicas de marcação pouco eficazes e evidentes. A utilização de conjuntos de pedras sobrepostas da própria bancada para a marcação dos furos, sendo passível de deslocamento das mesmas, devido à própria movimentação do carro de perfuração.	Utilização de spray para marcação dos furos, sempre que possível, no próprio maciço. Caso o estado da bancada não permita, deve-se fazer uma marca numa pedra a mais achatada possível de forma a não se deslocar com a movimentação do carro de perfuração.
		A própria marcação da pega não respeita os parâmetros geométricos definidos, afastamento e espaçamento.	Utilização de ferramentas de auxílio, como por exemplo, uma corda para o alinhamento das fiadas e uma fita ou vara graduada para marcação do afastamento e espaçamento. Execução dos furos adotando o sistema GPS.
EMBOQUILHAMENTO	É a zona entre a boca do furo e um comprimento de 1 a 2m de vara introduzida no maciço (dependendo do estado da bancada), ao qual poderá estar associado um erro relacionado com as condicionantes da mesma, como é o caso da regularidade e/ou altura de material partido e solto na superfície.	Bancadas irregulares com regiões de difícil estabilização do carro de perfuração e coluna. Bancadas com elevada altura de material deixado depositado na superfície da bancada para a tornar mais regular.	Limpar a bancada de forma a não ter material partido e/ou solto na sua superfície. Para tal é preciso evitar os excessos ou défices de sub-furação assim como deixar depositado material do próprio desmonte ou depositar material de outra proveniência na bancada para a tornar mais regular.
DIREÇÃO	A direção do furo não está de acordo com o ângulo previamente definido.	Estes tipos de erros estão diretamente ligados com os dispositivos de controle e monitoramento que o equipamento de perfuração dispõe.	Devem-se avaliar sempre os instrumentos de controle e monitoramento que os equipamentos de perfuração dispõem, verificando que tipos de dispositivos comportam, que parâmetros controlam e com que fiabilidade o fazem. No caso dos equipamentos mais antigos, com dispositivos limitados, deve-se ter bastante rigor em relação ao posicionamento do carro e consequentemente da coluna, de forma a minimizar ao máximo os erros de direção e inclinação.
INCLINAÇÃO	A inclinação do furo não está de acordo como ângulo previamente definido.		
COMPRIMENTO/COTA	O comprimento do furo e/ou a cota atingida pelo furo não estão de acordo com o previamente definido.	Este tipo de erro está diretamente ligado com os dispositivos de controle e monitoramento que o equipamento de perfuração dispõe, assim como podem ser gerados pela influência de desvios de perfuração e/ou outros erros de perfuração, como direção e/ou inclinação.	Caso a perfuratriz possua um sistema de controle de cotas, este tipo de erro deixa de existir. Caso o equipamento possua dispositivo de controle de comprimento do furo, deve-se levar em consideração o relevo da superfície da bancada que se pretende desmontar para definir com rigor o comprimento com que cada furo deve ser executado. Nestes casos, a utilização de uma corda esticada e nivelada poderá facilitar a definição do comprimento de cada furo.

Pelo mencionado, fica demonstrado que a execução de uma boa perfuração possui uma importância própria passando pelo desmonte até a fase de transformação final da rocha, os quais se traduzem em uma infinidade de benefícios técnicos/econômicos. As influências e vantagens de uma perfuração correta e sem desvios nas operações subsequentes de desmonte, carregamento, transporte e britagem fica evidente na figura 6, além de mostrar os custos relativos de cada operação.

Figura 6: Benefícios de uma perfuração alinhada



Fonte: Adaptado de Galiza et al., 2011

2.5 DESMONTE DE ROCHAS

2.5.1 Desempenho eficiente do desmonte

O desempenho eficiente do explosivo no desmonte de rochas exige uma utilização eficaz da sua energia. O rendimento eficaz da detonação é alcançado quando os quatro fatores principais são atingidos (ISEE, 2011):

- Distribuição de energia,
- Confinamento de energia,
- Nível de energia, e
- Face.

2.5.1.1 Distribuição de Energia

O primeiro fator de desempenho é a distribuição de energia. A distribuição de energia uniforme na massa rochosa produz uma fragmentação mais homogênea. Cada tipo de rocha requer uma quantidade mínima de energia explosiva para ser desmontada. Outro fator bastante significativo que influi no projeto de desmonte é a perfuração (ISEE, 2011).

O diâmetro do furo limita a quantidade de explosivo e, conseqüentemente, a energia total que pode ser carregado. Furos de menores diâmetros oferecem a vantagem de ter menores cargas por furo sob uma malha mais apertada, conduzindo sob esta ótica a uma distribuição de energia dos explosivos mais uniforme na massa de rocha, o que logicamente, maximizará também a distribuição de explosivo. Este é um método eficaz e alternativo para superar as limitações de desmonte imposta por massas rochosas altamente fraturadas.

Três outros benefícios do uso de furos de pequeno diâmetro são:

- Menor comprimento do tamponamento o que melhora a quebra do topo da bancada,
- Redução das concentrações de energia próximo a superfície da bancada diminuindo o potencial de ultralaçamentos, e
- Menor comprimento de subfuração reduzindo os danos na superfície da próxima bancada (piso da bancada inferior).

Uma grande desvantagem de furos de pequeno diâmetro é quando se pretende alcançar um maior volume de produção de material desmontado, já que esses furos não produzem grandes volumes. Por exemplo, em uma pedreira que deseja produzir grandes volumes de rocha fragmentada para cumprir as metas de produção, furos maiores podem trazer maiores vantagens (Oriard, 2002).

2.5.1.2 Confinamento de Energia

O segundo fator impactante no desempenho eficiente do explosivo é o confinamento de energia. A energia deve ser confinada o suficiente para que os gases da detonação estendam as fraturas e forneçam uma pressão, sem perder prematuramente essa pressão.

Konya (1985) resume o processo de fragmentação e projeção em três fases de detonação: (1) As ondas de choque viajam através do maciço rochoso em todas as direções, criando e estendendo as fissuras pela tensão de compressão e de tração; (2) A pressão crescente dos gases de detonação força os gases para dentro das rachaduras existentes, levando-as a estender e formar uma rede de quebra expandida; e (3) A pressão do gás se expande e faz com que a massa de rocha se submeta a uma flexão, quebrando e se deslocando dentro de alguns milissegundos, dependendo da distância do afastamento. Uma quantidade significativa de fragmentação é gerada durante esta fase final. Se a pressão do gás esvai-se precocemente, devido a um mau confinamento ou um maciço muito fraturado, fazendo com que os gases escapem pelas redes de descontinuidades, a fragmentação esperada pode ser severamente comprometida.

A energia explosiva segue sempre o caminho de menor resistência. Se a distância da carga ao plano de alívio mais próximo for menor do que o afastamento calculado, o confinamento pode ser perdido. Caminhos de menor resistência são normalmente encontrados em áreas de menor afastamento, zonas geológicas incompetentes, ou áreas com um fraco tamponamento (ISEE, 2011).

2.5.1.3 Nível de Energia

O terceiro fator de desempenho do explosivo é o nível de energia. O nível de energia refere-se à energia explosiva total aplicada à rocha. Cada tipo de rocha requer uma quantidade mínima de energia explosiva para fragmentar e movimentar a massa rochosa.

Considerar a energia de um explosivo, além de sua densidade, é uma maneira útil para comparar explosivos de densidades semelhantes e calcular a energia aplicada a uma unidade de rocha (Postupack, 1999). Em outras palavras pesos iguais de dois explosivos diferentes, podem conter diferentes quantidades de energia. Tendo em vista a gama de fabricantes de explosivos eles têm seus próprios valores de fornecimento de energia por unidade de peso e densidade para os seus produtos. Devem ser tomadas precauções quando se tenta comparar as energias de diferentes tipos de explosivos (por exemplo ANFO contra uma emulsão) uma vez que diferentes tipos de produtos podem conter diferentes quantidades de energia por unidade de massa.

2.5.1.4 Face

A face é uma superfície de rocha que marca a fronteira de um maciço rochoso de propriedades geotécnicas relativamente uniformes. Esta superfície pode ser a face da bancada, a superfície de perfuração (topo da bancada), ou alguma estrutura geológica presente na rocha (fraturas, diques, etc).

Outras características semelhantes como, por exemplo, juntas, falhas, planos de estratificação, danos oriundos da detonação (*overbreaking*) e descontinuidades geológicas, são imperfeições que dividem a massa de rocha e afetam diretamente o rendimento da explosão. Portanto, essas características não estão nas faces livres, porque elas não fazem fronteira com alívio. Estas imperfeições da rocha afetam o resultado da detonação em dois aspectos importantes (ISEE, 2011):

- Freiam o desenvolvimento de fragmentação proveniente da detonação,
- Quando estas descontinuidades são demasiadamente fracas, ou seja, muito fraturadas, permitem caminhos alternativos para a energia escapar prematuramente por essas fendas, reduzindo assim o confinamento.

2.6 PARÂMETROS DO PLANO DE FOGO

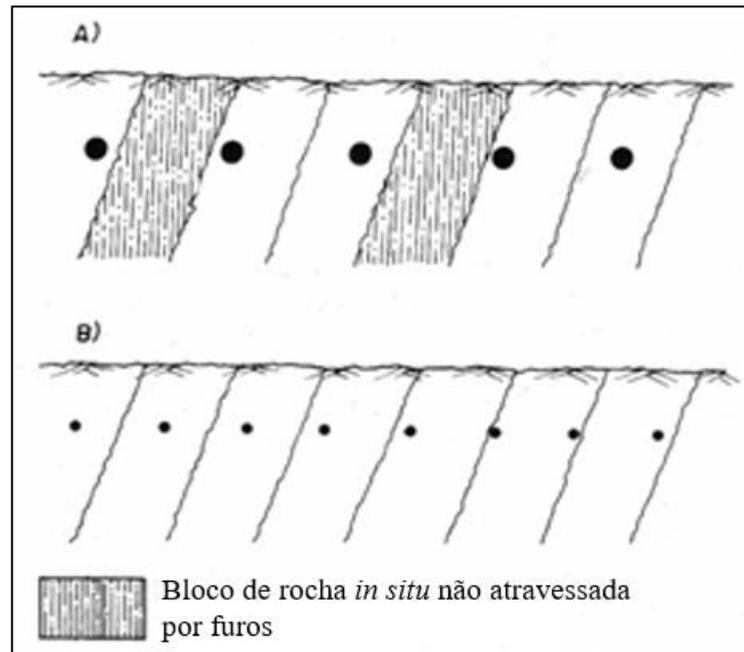
O plano de fogo define os parâmetros projetados para fragmentar a rocha com o uso de explosivos e baseia-se em princípios básicos e parâmetros tecnológicos que serão abordados neste item. Parâmetros ideais são difíceis de estimar inicialmente, pois eles dependem das características específicas da rocha *in situ*. Após a definição do plano de fogo inicial o mesmo deverá ser revisado constantemente a partir de informações obtidas nos desmontes iniciais visando a otimização da operação e da fragmentação da rocha.

2.6.1 Diâmetro do Furo

Na escolha do diâmetro de perfuração deve-se levar em consideração: as características do maciço rochoso (descontinuidades), produção almejada, altura da bancada e o tamanho dos equipamentos de carregamento. Aumentando o diâmetro dos furos e fixando a razão de carga, temos um aumento da malha e redução da metragem perfurada (perfuração específica), obtendo um ganho nos custos de perfuração. Em contrapartida há uma menor distribuição da energia explosiva no maciço rochoso gerando uma fragmentação mais grosseira, aumento nas vibrações e também não é indicado para rochas bem consolidadas (Scott et al, 1996).

Se o diâmetro é grande, e, por conseguinte, tem-se uma malha de perfuração mais espaçada, pode ser que os furos não interceptem as famílias das descontinuidades (figura 7). Estes blocos não serão impactados diretamente pelos efeitos dos explosivos sendo apenas fragmentados pelo choque entre os fragmentos e pela ação da queda por gravidade quando a bancada se projeta. Nesse caso seria interessante ter-se diâmetros menores e com isso uma malha mais adensada com o intuito de que pelo menos um furo intercepte cada bloco proveniente das descontinuidades (bloco de partição), tirando proveito das fraquezas do maciço para se obter uma melhor fragmentação.

Figura 7: Efeito do diâmetro de perfuração na distribuição dos furos em maciço rochoso fraturado



Fonte: Jimeno, 2003

Segundo Jimeno (2003), quando a rocha é mais competente, o ideal seria usar furos de diâmetro menor, uma vez que obter-se-ia um melhor ganho na distribuição da energia explosiva em toda a bancada que será desmontada.

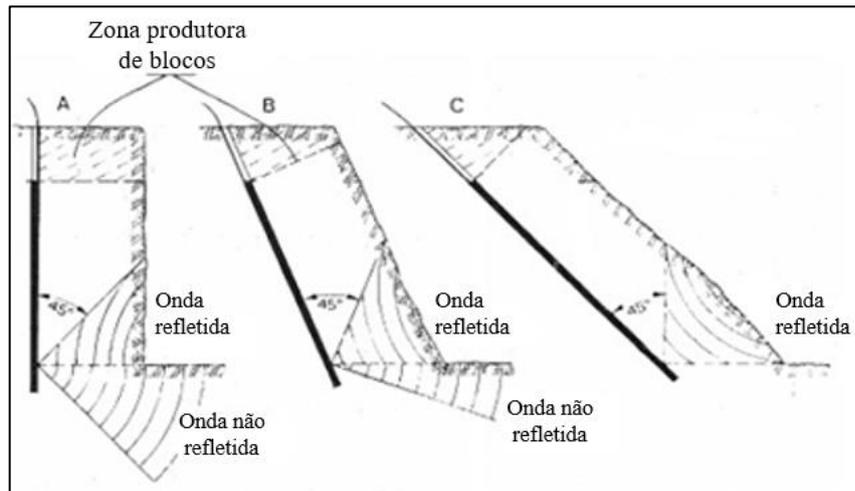
Em geral os custos de perfuração são menores para furos de diâmetro maior. Especificamente para esses diâmetros maiores os custos de perfuração são reduzidos em:

- Perfuração por metro cúbico ou tonelada de rocha desmontada;
- Acessórios de desmonte/detonação (iniciadores, retardos e escorvas);
- Mão de obra para carregamento do fogo.

2.6.2 Inclinação do Furo

Furos inclinados oferecem melhor distribuição da energia do explosivo no maciço rochoso, aumentando a fragmentação no pé da bancada e favorecendo a estabilidade do talude remanescente após a detonação. Segundo Geraldi (2011), quanto maior for a inclinação do furo, menor será a velocidade de avanço da perfuração e maiores os riscos de desvios e acidentes com ferramentas de perfuração.

Figura 8: Comportamento das ondas de choque em função da inclinação dos furos



Fonte: Jimeno, 2003

Vantagens:

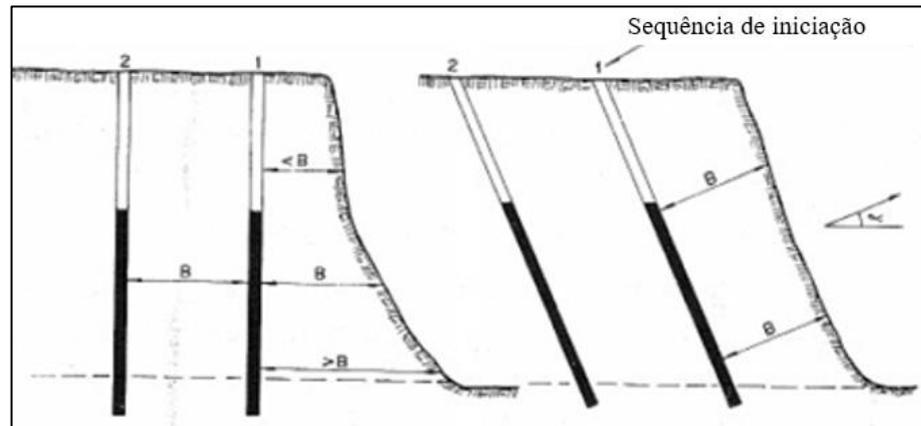
- Melhor fragmentação da rocha, devido ao melhor aproveitamento da energia do explosivo (figura 8);
- Bancadas com a face mais estável devido à inclinação;
- Maior lançamento e melhor formação da pilha, melhorando o desempenho dos equipamentos de carregamento;
- Resulta em uma maior malha de perfuração, e, por conseguinte, uma menor razão de carga;
- Diminuição da intensidade das vibrações;

Desvantagens:

- Maior desgaste dos acessórios de perfuração (punho, bit, broca);
- Quanto maior o comprimento dos furos maior a tendência de desvios;
- Maior possibilidade de ultralancamento;
- Maior custo de perfuração.

2.6.3 Afastamento e Espaçamento

O afastamento é a menor distância entre a face livre da bancada e o furo ou a distância entre linhas da detonação (Figura 9), valor este que deve ser mantido para todas as linhas de detonação (Olofsson, 1990 e Konya, 1995). O espaçamento é a distância entre os furos pertencentes a uma mesma linha de fogo (Olofsson, 1990). Estes parâmetros dependem do diâmetro de perfuração, do tipo de rocha e suas características intrínsecas, das propriedades dos explosivos, da altura da bancada e da pilha de fragmentação pretendida.

Figura 9: Afastamento em furos verticais e inclinados

Fonte: Jimeno, 2003

Em afastamentos maiores os gases liberados na detonação encontraram uma grande resistência para abrir fendas na rocha, transformando parte da energia em energia sísmica aumentando dessa forma a intensidade nas vibrações (Jimeno, 2003). Poderá inclusive favorecer o surgimento de *backbreak* e, devido ao alto grau de confinamento da rocha, poderá gerar repés no piso da bancada inferior. Em afastamentos menores os gases podem escapar precocemente e se expandirem numa velocidade muito grande gerando ultralancamento e provocando aumento no ruído e sobrepressão (Jimeno, 2003).

2.6.4 Subfuração

É o prolongamento do furo ultrapassando a altura da bancada que se faz para retirar a rocha que está mais confinada no fundo do furo e garantir a total remoção da face (Dick et al., 1983; Konya, 1995). Tem como objetivos principais evitar a formação de repés, facilitando as operações de carregamento e evitando gastos desnecessários com o desmonte secundário, deixando uma plataforma mais nivelada. A subfuração serve para facilitar o corte no pé da bancada, impedindo o aparecimento de irregularidades no piso da bancada inferior.

Segundo Hustrulid (1995), o local onde se fará a subfuração, será também o piso da próxima bancada. O excesso de subperfuração pode resultar em:

- Maior custo com perfuração e explosivos, uma vez que se vai perfurar mais do que o calculado;
- Aumento das vibrações;

- Maior fragmentação da superfície da bancada inferior, podendo levar a desvios de furo e até mesmo a perda de furos.

2.6.5 Tampão

A operação de tamponamento corresponde à selagem da parte superior dos furos com material inerte, alojado entre o topo e a coluna de explosiva. O material utilizado para o tamponamento consiste normalmente em terra, areia, pó de perfuração e brita. Segundo Rai et al. (2008), Koppe e Costa (2009) e Dobrilovic et al. (2005), um material mais anguloso e grosseiro, como as britas por exemplo, é mais efetivo para o tamponamento, oferecendo uma maior resistência a ejeção prematura dos gases devido as propriedades de bloqueio do material. Fica evidente a tentativa em se evitar materiais finos tais como: o pó de perfuração, terra ou areia.

A altura do tamponamento é selecionada em função do afastamento e comprimento do furo, e aumenta conforme diminui a competência e a qualidade da rocha. Um estudo geomecânico (bloco de partição) principalmente na parte superior da bancada onde ficara alojado o tampão é bastante interessante, pois se esta parte estiver bem fragmentada a altura do tamponamento possivelmente irá aumentar, já que o material encontra-se solto. Caso esta parte seja bem consolidada então se usará o tampão calculado.

A cada milissegundo em que é aumentada a retenção da energia dos gases tem-se mais trabalho do explosivo na massa rochosa e reduz-se a velocidade e a distância dos fragmentos lançados pela detonação.

O tampão tem a função de confinar os gases provenientes da detonação e com isso transferir o máximo possível da energia do explosivo para o maciço rochoso e reduzir os efeitos indesejados de sopro de ar e ultralaçamentos. Quanto menor for a umidade dentro do furo maior a resistência a ejeção do tamponamento (Tamrock, 1984). Deve-se ter cuidado com a granulometria e o tipo de material utilizado no tampão, pois além de favorecer um melhor confinamento das cargas durante a detonação, este material pode vir a danificar os sistemas iniciadores, o que pode resultar em corte de fogo (Konya e Davis, 1978).

Caso o tamponamento seja menor que o projetado, haverá uma ejeção prematura dos gases gerando, pelo fato do explosivo estar mais próximo da superfície podendo resultar em: ultralancamento, ruído, sobrepressão atmosférica, *backbreak* e perda do gás trazendo uma fragmentação indesejada.

Caso o tamponamento seja maior, a energia explosiva estará mais longe da superfície dificultando a quebra da rocha no topo da bancada, resultando em material mais grosseiro (matacos). Este material estará mais evidente no topo da pilha (Olofsson, 1990; Hustrulid, 1995; Scott et al, 1996). A projeção do material para frente da bancada será menor, tornando a pilha de material mais difícil de ser carregada, registrando um elevado nível de vibrações.

Assim sendo, um tamponamento bem dimensionado promove uma maior eficiência do desmonte. O tamponamento menor é indicado para:

- Furos de menor diâmetro;
- Rochas mais competentes;
- Material de tamponamento cuja resistência à ejeção seja maior;
- Bancadas mais baixas.

2.6.6 Razão de Carga

É a quantidade de explosivo usada para se desmontar um metro cúbico (ou tonelada, termo usado em mineração) de rocha.

A princípio quanto maior for a razão de carga:

- Maior fragmentação;
- Maior projeção da pilha de rocha detonada que se formará na frente da bancada;
- Menores problemas de repé.

2.7 AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS DE DESMONTE

Além da classificação granulométrica do material em peneiras com separação das frações granulométricas, não existe nenhum outro método capaz de avaliar quantitativamente a fragmentação em condições confiáveis.

A distribuição granulométrica constitui um componente básico dentro do processo de otimização do desmonte de rochas e também é o único meio de comparação de fragmentação obtida ao se realizar um estudo de sensibilidade dos parâmetros de projeto (Jimeno, 2003).

Em razão dos elevados custos e tempo para se obter a curva granulométrica através de peneiramento, utiliza-se normalmente na prática os seguintes métodos expeditos:

- Análise qualitativo visual;
- Métodos fotográficos de Análise de Imagens;
- Gravação de imagens com câmeras de vídeo.

2.7.1 Análise quantitativo visual

Este é o método mais extensivamente utilizado e na maioria dos casos é o único que se aplica. Logo após o desmonte o material desmontado é avaliado por um técnico responsável de forma subjetiva. A aplicação desta técnica possui pouco rigor científico e não permite estabelecer uma distribuição de tamanho preciso. Em geral, apenas serve para especialistas terem um primeiro contato com os resultados do desmonte.

2.7.2 Método fotográfico

Este método consiste na eleição aleatória de áreas equivalentes a pelo menos 15% da superfície total, e possui um desvio padrão de $\pm 10\%$ em torno do tamanho médio dos fragmentos. A maior fonte de erro encontra-se no pressuposto de que a distribuição dos fragmentos sobre a superfície da pilha é representativo do volume total da mesma. Por isso é interessante tirar várias fotografias em diferentes tempos de retirada do material desmontado na pilha usando algum objeto de dimensão conhecida como escala, normalmente bolas ou barras de ferro, de modo que estejam dispostos perpendiculares ao eixo ótico, com o intuito de

obter um resultado mais satisfatório e representativo de toda bancada desmontada, deixando a curva granulométrica mais representativa do real.

Este sistema é um dos mais úteis, de execução simples e fornece uma documentação fotográfica para análise e comparação de diferentes desmontes. Os principais inconvenientes são:

- Tempo suficiente para preparo e estudo da pilha de material fragmentado;
- Distorções relacionadas com a distância focal;
- Difícil quantificar os fragmentos menores, ou seja, os finos.

2.7.3 Gravação de imagens com câmeras de vídeo

O estudo das imagens de um desmonte por meio de câmeras de vídeo que gravem em formato de alta velocidade e sensibilidade conduz a obtenção de dois tipos de informação: uma qualitativa e outra quantitativa.

A informação qualitativa refere-se à obtenção de informações relativas a:

- Sequência de detonação de furo a furo;
- Confinamento e ou expulsão do tampão;
- Primeiros movimentos da rocha;
- Trajetória dos fragmentos de rocha;
- Confirmação do correto funcionamento dos acessórios de iniciação.

Por outro lado, a informação quantitativa aborda os seguintes aspectos:

- Tempo de retardo dos acessórios de fundo de carga;
- Duração da retenção dos gases e escape dos mesmos;
- Aceleração e velocidade dos fragmentos;
- Velocidade de elevação do terreno na superfície da bancada;
- Velocidade de ejeção do tampão;
- Tempo de resposta do terreno desde o início da detonação;
- Tempo total de lançamento das projeções;
- Intervalo de deslocamento da rocha fragmentada.

O registro e análise desses dados, junto com o esquema geométrico do desmonte, tipo de explosivo, razão de carga e acessórios de desmonte utilizados são muito úteis para analisar os diversos aspectos do sistema dinâmico da fragmentação que ocorre durante o desmonte de rochas com explosivos, podendo-se obter diversas informações essenciais para avaliação da eficiência obtida no processo, tais como:

- Práticas inadequadas de carregamento e iniciação dos furos;
- Efeito da água, escape dos gases, material do tampão, descontinuidades, etc.;
- Tempo de retardo entre furos e linhas do desmonte apropriado para o bom movimento e fragmentação da rocha;
- Sistemas de escorva ótimas;
- Fontes produtoras de grandes blocos;
- Projeção desejada do material fragmentado;
- Combinação ótima do explosivo-rocha e dimensão do afastamento;
- Geometria da pilha.

A filmagem do desmonte e o posterior estudo das fotografias e cenas em baixa velocidade (quadro a quadro) constituem hoje em dia uma ferramenta imprescindível no campo de engenharia de explosivos.

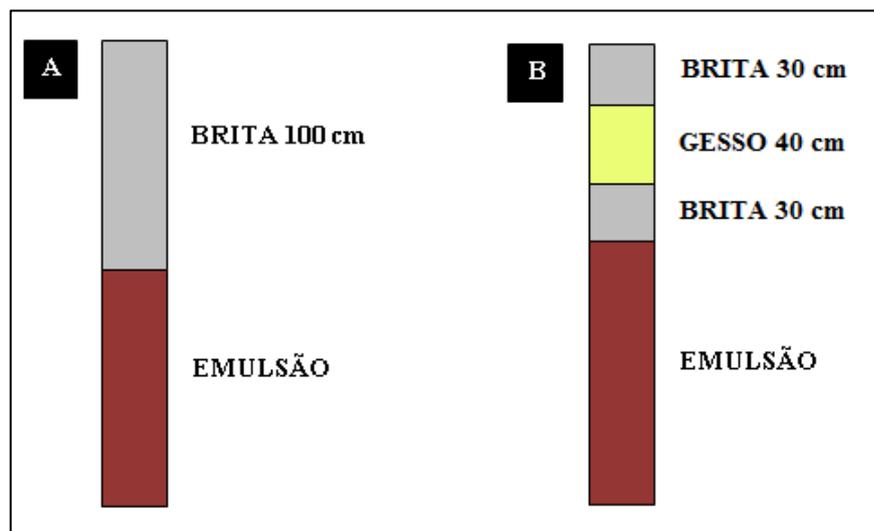
3 METODOLOGIA

3.1 INTRODUÇÃO

A metodologia empregada para o desenvolvimento da parte prática da dissertação consiste na preparação de uma mistura de gesso de pega rápida e água formando uma pasta, a qual é introduzida dentro do furo constituindo uma parte do tampão. Por tratar-se de um material que se torna rígido após a hidratação do gesso, obtém-se um tamponamento que permite reter por um tempo maior de confinamento os gases oriundos da detonação e também oferecer uma maior resistência a ejeção do tampão.

A pasta de gesso e água foi preparada misturando-se 1,5 kg de gesso de pega rápida e 2 litros de água. Esse traço foi determinado a partir dos experimentos de Cevizci (2012 e 2013), resultando em uma configuração dos furos conforme mostrado na figura 10. A cronometragem realizada mostrou que esta mistura endurece em torno de 3 a 5 minutos. Este procedimento foi realizado nos 3 desmontes acompanhados usando sempre uma parte da bancada tamponada pelo método clássico aplicado na Pedreira Herval (usando somente brita), em torno de 60% dos furos, e a outra parte da bancada com furos sendo tamponados com gesso e brita, para fins de comparação dos resultados.

Figura 10: Tipos de tampão empregados nos testes práticos de desmonte com explosivo na Pedreira Herval



Fonte: Autor, 2017

Como o comprimento do tampão aplicado tradicionalmente na pedreira é de 1 m, projetou-se o seguinte fracionamento de tampão para ser empregado neste estudo: 30 cm de brita 12 mm entre o explosivo e a pasta de gesso, depois 40 cm de gesso. Após endurecimento da mistura foi completado o restante do furo (30 cm) com a mesma brita, como mostra a figura 10.. A conferência destas medidas foi feita com o auxílio de uma vara graduada.

3.2 LEVANTAMENTO DE DADOS TÉCNICOS

Para a realização dos testes práticos e a aquisição dos dados de desempenho do tampão com gesso foram feitas 3 visitas a Pedreira Herval para preparação e acompanhamento dos desmontes com explosivo, utilizando os seguintes materiais para confecção do tamponamento, aferição de medidas, registro fotográfico e anotações nas frentes de lavra:

- Uma câmera digital para a obtenção das imagens;
- Duas bolas de basquete que serviram como escala para as fotografias;
- Baldes para facilitar a preparação da mistura;
- Sacos de gesso de “pega” rápida de 1 kg;
- Uma vara graduada para aferir o comprimento do tampão;
- Uma trena para medir os parâmetros e detalhar a geometria do plano de fogo;
- Uma caderneta de campo para registrar as etapas do estudo e qualquer processo na pedreira.

Também foi realizado um estudo dos custos unitários para os três desmontes, simulando que a bancada estivesse toda tamponada da maneira convencional e comparando com o caso onde toda a bancada estivesse tamponada com o gesso, Foram estimados e avaliados os custos unitários de desmonte com explosivos e comparados os resultados em função de: custo com explosivos, acessórios, gesso e perfuração. Os custos referentes a explosivos e acessórios estão presentes nos ANEXOS (tabela 14) e foram fornecidos pela Empresa Elephant Indústria Química EIQ LTDA. Todos os cálculos foram feitos em relação a esses preços e o custo com perfuração específica e mão-de-obra direta foram fornecidos pela Pedreira Herval Ltda. Essa análise será mais bem descrita no capítulo de Resultados e Discussões.

Os parâmetros relacionados ao plano de fogo da pedreira Herval foram definidos no plano de fogo elaborado pelo engenheiro de minas Bruno Cordeiro, responsável técnico da pedreira e a presente dissertação foi desenvolvida a partir desse esquema de desmonte. O projeto e características do Plano de fogo utilizado estão presentes no ANEXO desta dissertação.

3.3 PLANO DE FOGO DOS DESMONTES

O Plano de Fogo padrão utilizado nos desmontes analisados é apresentado a seguir, onde podem ser vistos os principais parâmetros geométricos e técnicos utilizados nos desmontes acompanhados. Os planos de fogo completos dos 3 desmontes acompanhados e as fotos dos resultados da detonação e comparação entre as 2 técnicas de tamponamento estão disponíveis nos Anexos.

Conforme o plano de fogo empregado determinou-se os principais parâmetros empregados nos testes práticos de comparação da eficiência entre o tamponamento padrão da empresa com brita 12 e o tamponamento rígido com gesso que em média são:

- Diâmetro dos furos: 3"
- Malha de furação: 1,5 x 3 m
- Altura da bancada: 10,7 m
- Razão de carga: 1,1 kg/m³
- Tipo de explosivo: emulsão bombeada (ANFO)
- Comprimento tampão: 1 m
- Tipo de tampão: brita 12 mm

A tabela 3 a seguir mostra o Plano de Fogo padrão da empresa Herval, com as especificações técnicas e geométricas utilizadas na prática mineira da empresa, elaborado pelo Engenheiro de Minas Bruno Cordeiro.

Tabela 3 : Parâmetros do Plano de Fogo utilizado pela pedreira Herval e aplicados no estudo comparativo de eficiência do tamponamento rígido com gesso

Plano de Fogo			
Parâmetros Gerais		Cálculo das Cargas	
Diâmetro do furo (pol)	3	Carga de coluna (kg)	53,7
Afastamento (m)	1,5	Quantidade de Explosivo (kg)	2.039
Espaçamento (m)	3	Razão de Carga (kg/m ³)	1,1
Inclinação (graus)	10	Acessórios de Explosivos	
Tampão (m)	1	Tubo de Choque de Fundo (u)	38
Metros Perfurados (m)	405,2	Tubo de Choque de ligação (u)	37
Números total de furos	38	Espoletim (u)	2
Altura da bancada (m)	10,7	Booster (u)	38
Comprimento Médio Furos (m)	11,2		
Material Desmontado			
Volume por Furo (m ³)	48,7		
Volume Total <i>in situ</i> (m ³)	1.851,5		
Volume Total (empolado) (m ³)	2.777,3		
Carga Explosiva		Diâmetro (pol)	Densidade (g/cm³)
Emulsão Bombeada		3	1,15
			RLC (Kg/m)
			5,24

Esses parâmetros foram mantidos iguais nas bancadas desmontadas nos testes comparativos para se ter os mesmos parâmetros básicos de desmonte e poder proceder a análise comparativa entre os métodos de tamponamento, cujos resultados serão expostos no capítulo seguinte.

3.4 ANÁLISE DA FRAGMENTAÇÃO ATRAVÉS DO TRATAMENTO DE IMAGEM

A análise da fragmentação através de imagens obtidas na pilha gerada pelos desmonte realizados tanto do método de tamponamento tradicional quanto com o gesso foi realizada por meio do software *Split-desktop 2.0*, que é um software usado na qualificação e quantificação da fragmentação.

O referido software faz uso de objetos de tamanho conhecido (que servem como escala) para mensurar o tamanho de todos os fragmentos ao seu redor. Esses itens devem ser dispostos perpendicularmente ao eixo ótico para medir com uma maior exatidão os fragmentos que devem ficar dispostos na parte superior e inferior das fotografias (Catasús, 2006). As imagens digitais adquiridas em campo foram então analisadas e processadas para determinação da distribuição do tamanho das partículas nas diversas granulometrias de fragmentação, definindo-se também o P20 (granulometria média dos finos), P50 (granulometria média do desmonte como um todo) e P80 (granulometria média dos grosseiros).

A origem das imagens pode ser uma pilha tanto de minério quanto de estéril, caçamba de caminhão de transporte, ponto de extração, estocagem, correia transportadora ou qualquer outra situação onde imagens claras de fragmentos de rocha podem ser obtidas. Todas as imagens tratadas foram editadas e delineadas manualmente, já que esse procedimento fornece uma maior precisão no resultado final, uma vez que retira os erros cometidos na delimitação automática, tais como: sobre divisão dos blocos e superfícies ocupadas pelos.

Este procedimento permite a obtenção de uma curva granulométrica das pilhas cuja interpretação dos resultados será mostrada no capítulo 4 por intermédio de um gráfico no qual serão comparadas as curvas de fragmentação das pilhas obtidas nos desmontes com tamponamento tradicional e com tamponamento com gesso. Nesta comparação entre as curvas granulométricas resultantes dos dados gerados pelo *Split-Desktop*, 3 pontos essenciais foram identificados: o P20 (malha onde 20% das partículas é passante, de granulometria fina), P50 (granulometria média) e o P80 (malha onde 20% das partículas é retida, de granulometria grosseira). Esses parâmetros P20, P50 e P80 foram utilizados para verificação da eficiência do desmonte comparando-se a fragmentação média nessas faixas granulométricas correspondentes aos finos, grossos e fragmentação total.

As imagens foram obtidas logo após o desmonte e inseridas duas bolas de basquete de diâmetro 24,5 centímetros que serviram de escala para o dimensionamento dos fragmentos. Para alcançar uma maior veracidade de avaliação pelo software, é recomendável tirar o máximo de fotografias possíveis (Catasús, 2006) para que a aferição do material desmontado se torne o mais fiel possível do real. No entanto é interessante obter um conjunto de fotos não só do instante seguinte ao fogo, mas também progressivamente enquanto a etapa de

carregamento é processada, visto que os fragmentos na parte inferior podem ter particularidades diferentes do meio e do topo da pilha. Para este trabalho foram realizadas análises da parte superior da pilha e não houve perturbação gerada pelo processo de carregamento.

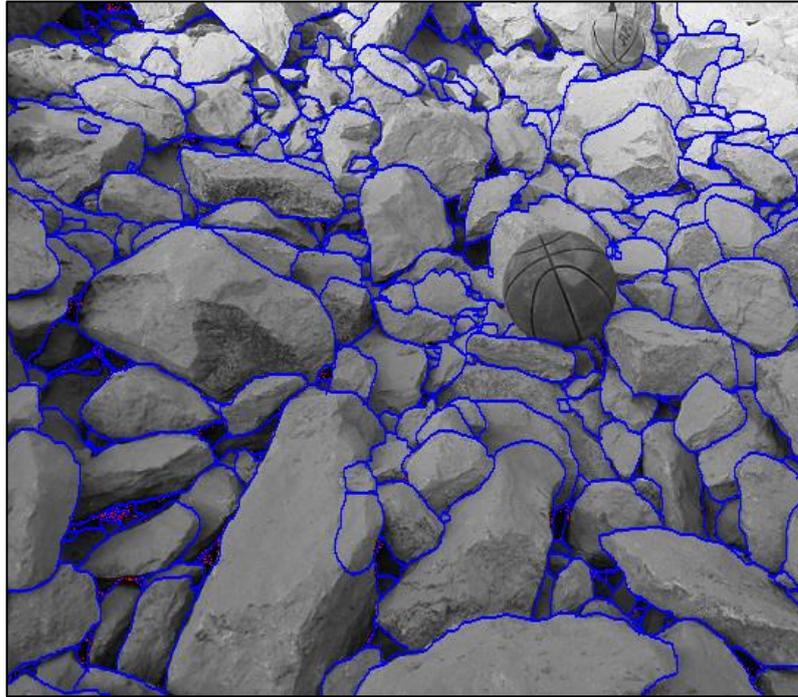
As figuras 11 a 13 e tabela 4 a seguir exemplificam na devida ordem a metodologia utilizada para processamento das fotos obtidas para análise granulométrica, delimitação dos fragmentos por meio do software Split-Desktop e o gráfico e tabela referentes à sua distribuição granulométrica. Os dados completos dos 3 desmontes acompanhados são apresentados no capítulo referente a análise dos resultados.

Figura 11: Fotografia da pilha de material fragmentado nos testes práticos de desmonte com explosivo na Pedreira Herval mostrando a utilização de bolas de basquete como escala



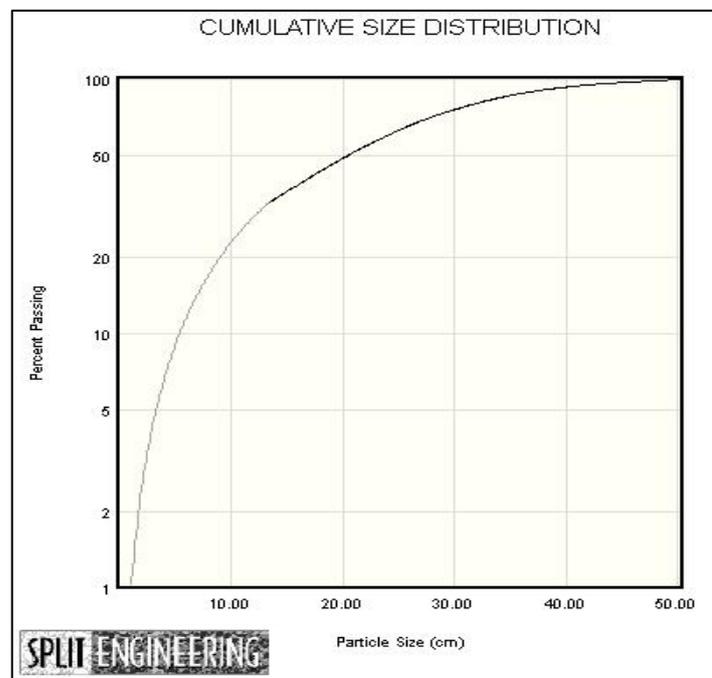
Fonte: Autor, 2017

Figura 12: Fotografia da pilha de material fragmentado nos testes práticos de desmonte com explosivo na Pedreira Herval mostrando o delineamento dos fragmentos através do software Split-desktop



Fonte: Split-desktop 2.0

Figura 13: Distribuição granulométrica do material fragmentado nos testes práticos de desmonte com explosivo na Pedreira Herval obtida no software Split-desktop



Fonte: Split-desktop 2.0

Tabela 4 : Distribuição granulométrica do material presente na pilha resultante do desmonte de explosivo obtida no software Split-desktop mostrando o P20, P50 e P80

size (mm)	%
1905.00	100.00
1270.00	100.00
635.00	100.00
381.00	90.84
254.00	64.12
203.20	49.76
152.40	36.71
101.60	23.29
50.80	9.18
38.10	6.14
25.40	3.45
19.05	2.29
12.70	1.28
9.525	0.85
6.350	0.48
4.750	0.32
1.999	0.09

P20 Size (mm)	90.29
P50 Size (mm)	204.06
P80 Size (mm)	318.07
Top size (mm)	496.45

Fonte: Split-desktop 2.0

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 INTRODUÇÃO

O presente capítulo apresenta os resultados do levantamento realizado na Pedreira Herval em 3 desmontes utilizando-se o tamponamento rígido com gesso em cerca de 40% dos furos carregados podendo-se assim comparar os resultados obtidos com o resultado do tamponamento convencional com brita 12 mm.

Examinando comparativamente os resultados em termos de fragmentação obtida no desmonte nas frações fina (P20), fração grosseira (P80) e da granulometria média do desmonte (P50). A redução na fragmentação indica uma melhoria na eficiência do desmonte obtendo-se uma melhor utilização da energia disponível no explosivo.

A partir dos resultados obtidos e embasando-se novamente nos trabalhos de Cevizci (2012 e 2013), pode-se estimar que a malha de perfuração pode ser ampliada sem prejuízo na fragmentação alcançada, gerando um maior volume por furo executado e, dessa forma obter uma redução nos custos unitários de desmonte. Esse fato é apresentado em uma análise dos custos comparativos onde os parâmetros do plano de fogo foram adaptados para as duas situações: tamponamento tradicional e tamponamento rígido de gesso. Dessa forma pode-se calcular a redução na metragem perfurado e no custo unitário de desmonte conforme apresentado no final desse capítulo.

4.2 ANÁLISE DA FRAGMENTAÇÃO

Foram estudados três desmontes de rocha na Pedreira Herval. No primeiro e terceiro desmonte foi utilizado a emulsão bombeada da Empresa Elephant Industria Química EIQLTDA, enquanto que no segundo desmonte foi utilizada a emulsão encartuchada, também, da mesma empresa fabricante de explosivos. Os acessórios empregados foram retardos com tempos nominais de 17, 25 e 42 milissegundos, utilizados na ligação entre furos (na superfície) e 250 milissegundos, na iniciação da coluna de explosivos acoplada a reforçadores (*boosters*) posicionados no fim de cada furo.

A seguir são descritos os resultados obtidos em termos de distribuição granulométrica do material desmontado, as características técnicas de cada desmonte e a comparação entre os resultados do desmonte com tamponamento tradicional com brita e tamponamento rígido com gesso.

4.2.1 Análise Granulométrica do Desmonte I

Nesse desmonte foram detonados 48 furos, sendo 19 tamponados com gesso e o restante com o tampão normal da empresa (brita 12 mm). Foram utilizados sacos de gesso com um custo unitário de R\$ 1,80 / saco. Em cada furo foi utilizada uma mistura de gesso e água com traço de 1,5 kg de gesso para 2 litros de água, obtendo-se um custo unitário de R\$ 51,3 somente com o gesso, para tamponar todos os furos descritos na figura 14. Nesta bancada constatou-se a presença de uma rocha bastante competente geomecanicamente, com poucas famílias de fraturas, figura 15.

Figura 14: Plano de fogo do desmonte I com parte de tampão de gesso

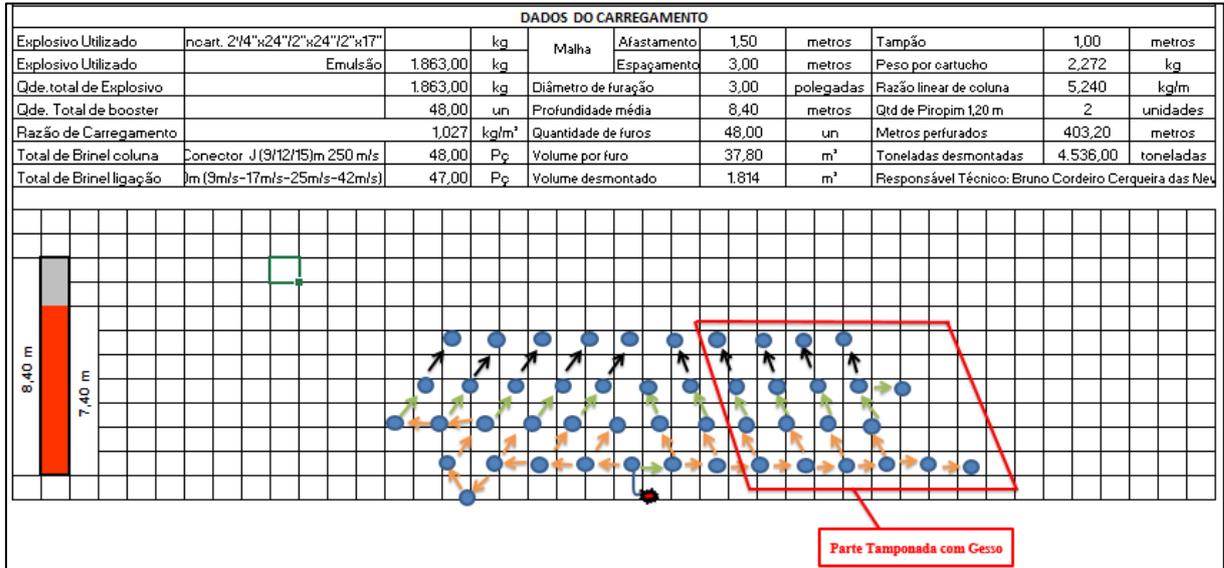
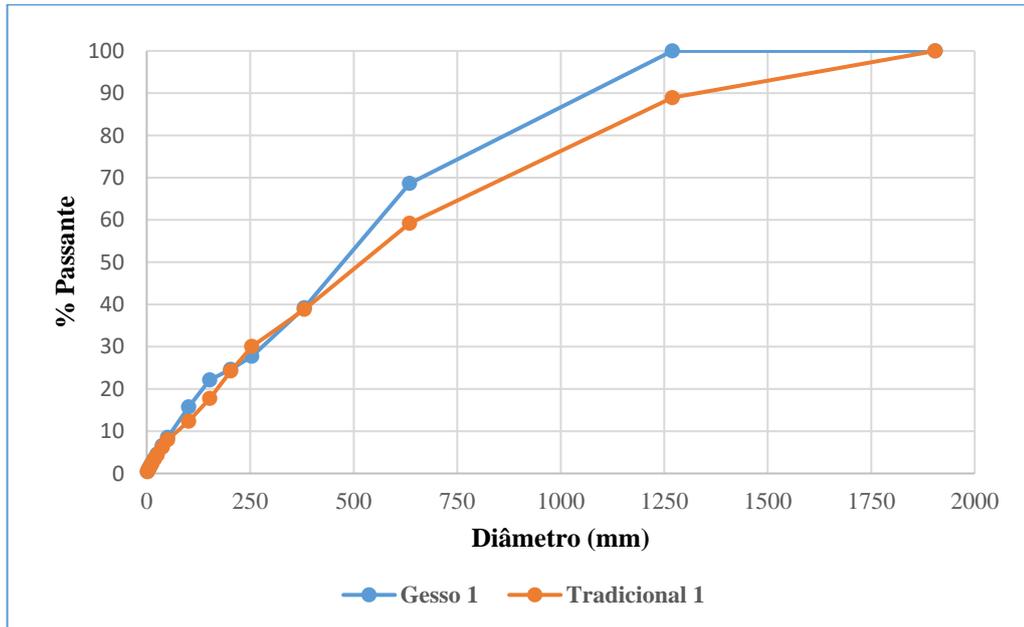


Figura 15: Face da bancada do desmonte I



A figura 16 abaixo refere-se à distribuição granulométrica obtida no desmonte I e foi elaborada a partir dos resultados do processamento de imagens (foram utilizadas 4 fotos para o método de tamponamento com gesso referente ao material desmontado utilizando este mesmo tamponamento, enquanto que para o tradicional foram somente 3 imagens pertinente a fração habitual adotada pela pedreira, essas amostras encontram-se nos ANEXOS) no software *Split-desktop 2.0* cujos valores se encontram na tabela 5. Na figura 16 são mostradas as distribuições granulométricas do material resultante do desmonte através das duas técnicas de tamponamento utilizadas e descritas anteriormente.

Figura 16: Distribuição granulométrica dos resultados do desmonte I com utilização do tamponamento tradicional e tamponamento rígido com gesso



Na figura 16 pode-se notar que até os 40% do passante a fragmentação é bastante semelhante e após os 40% passantes observa-se que a fragmentação foi maior no método de tamponamento rígido com gesso em comparação ao tamponamento tradicional indicando um maior aproveitamento da energia explosiva para o gesso.

Tabela 5 : Resultados de distribuição granulométrica em faixas padronizadas no software *Split-desktop* para os resultados do desmonte I com tamponamento tradicional e tamponamento rígido com gesso

% Passante Gesso	Diâmetro (mm)	% Passante Tradicional
100	1905	100
100	1270	88,94
68,63	635	59,2
39,23	381	38,82
27,72	254	30,07
24,64	203,2	24,24
22,14	152,4	17,74
15,77	101,6	12,37
8,54	50,8	7,98
6,59	38,1	6,2
4,56	25,4	4,33
3,5	19,05	3,35
2,41	12,7	2,32
1,85	9,525	1,79
1,27	6,35	1,24
0,97	4,75	0,96
0,44	1,999	0,43

Tabela 6 : Determinação dos índices de fragmentação P20, P50 e P80 para o desmonte I com utilização de tamponamento tradicional e tamponamento rígido com gesso

	Gesso	Tradicional
P 20 (mm)	133,89	170,35
P 50 (mm)	476,65	526,64
P 80 (mm)	753,92	1010,88

Na fração mais grosseira do material desmontado representado pelo P80 o tamponamento rígido com gesso obteve o valor de 753,92 milímetros enquanto que utilizando-se o tamponamento tradicional esse valor é de 1.010,88 milímetros. A diferença em relação ao resultado do tamponamento tradicional é uma granulometria grosseira cerca de 25,42% menor em média.

Com relação ao P50, houve uma diferença de 9,49% da curva do tamponamento rígido de gesso em relação ao tamponamento tradicional, sendo o P50 para o primeiro de 476,65 milímetros e para o tampão tradicional de 526,64 milímetros.

No tocante a fração granulométrica mais fina representada pelo P20, a variação de valor em referência a curva de fragmentação com tamponamento rígido de gesso e a do tamponamento tradicional foi de 21,40%, apresentando um diâmetro de 133,89 milímetros para o gesso e 170,35 milímetros para o tradicional.

Todos esses parâmetros comprovam que o tamponamento rígido com gesso foi mais eficiente que o tamponamento tradicional com brita gerando um material desmontado de menor granulometria.

4.2.2 Análise Granulométrica do Desmonte II

No desmonte II foram detonados 72 furos, dos quais 28 furos foram tamponados com gesso, gerando um custo de R\$ 75,6 apenas com o gesso, os quais podem ser observados no plano de fogo da figura 17. Essa bancada apresentava-se mediantemente fraturada, tal como pode ser observada na figura 18.

Figura 17: Plano de fogo do desmonte II com parte de tampão de gesso

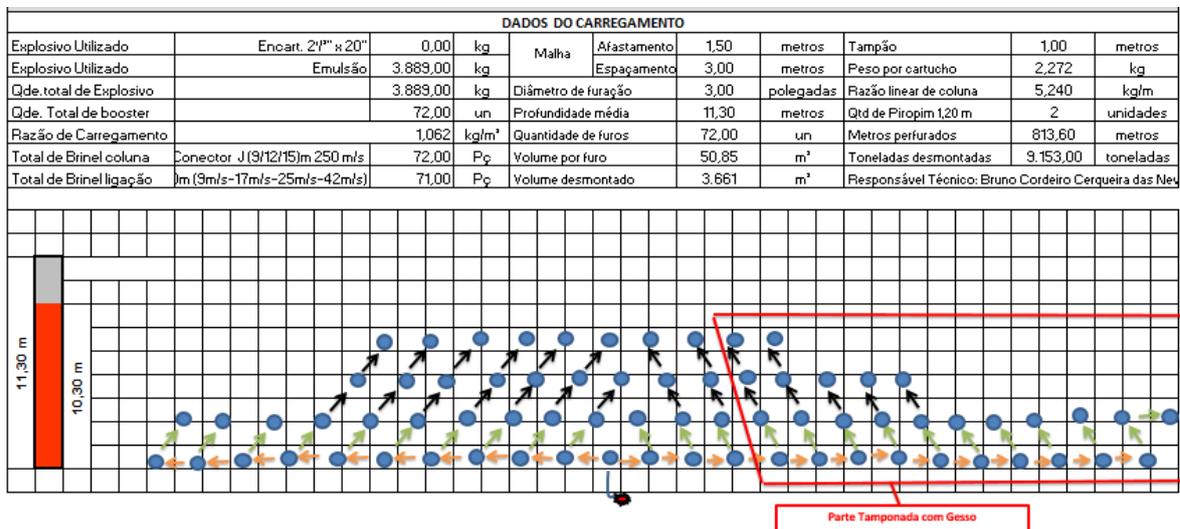


Figura 18: Face da bancada do desmonte II



A figura 19 mostra um gráfico contendo as duas curvas granulométricas do material desmontado cujos dados se encontram na tabela 7, referente ao material desmontado com utilização do tamponamento rígido com gesso e a outra relativa ao tamponamento tradicional obtidas através do tratamento por imagem e processadas (foram utilizadas 4 fotos para o método de tamponamento com gesso, enquanto que para o tradicional foram 5 imagens, essas amostras encontram-se nos ANEXOS) no software *Split-desktop 2.0*.

Figura 19: Distribuição granulométrica dos resultados do desmonte II com utilização do tamponamento tradicional e tamponamento rígido com gesso

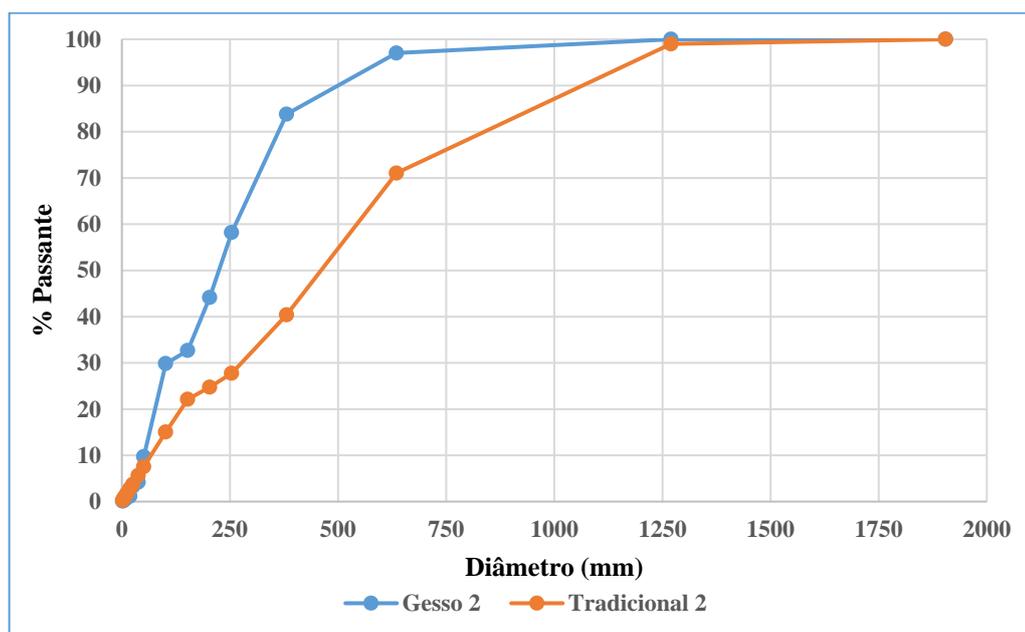


Tabela 7 : Resultados de distribuição granulométrica em faixas padronizadas no software *Split-desktop* para os resultados do desmonte II com tamponamento tradicional e tamponamento rígido com gesso

% Passante Gesso	Diâmetro (mm)	% Passante Tradicional
100	1905	100
100	1270	98,99
97,02	635	71,05
83,79	381	40,4
58,21	254	27,75
44,15	203,2	24,75
32,69	152,4	22,12
29,84	101,6	15,05
9,71	50,8	7,55
4,18	38,1	5,64
3,26	25,4	3,72
1,15	19,05	2,77
1,27	12,7	1,82
0,59	9,525	1,35
0,39	6,35	0,89
0,21	4,75	0,66
0,09	1,999	0,27

Como é mostrado na tabela 7 (em vermelho), nota-se uma diferença bastante clara em termos de diferença de fragmentação. Em uma peneira de diâmetro 635 mm passam 97,02% das partículas para o material resultante do desmonte com tamponamento rígido com gesso, enquanto que usando esta mesma peneira passam apenas 71,05% das partículas para o tamponamento convencional, uma diferença bastante significativa e indicativa da melhor fragmentação do tamponamento rígido com gesso.

Tabela 8 : Determinação dos índices de fragmentação P20, P50 e P80 para o desmonte II com utilização de tamponamento tradicional e tamponamento rígido com gesso

	Gesso	Tradicional
P 20 (mm)	98,59	136,43
P 50 (mm)	254,17	459,57
P 80 (mm)	397,63	729,63

Em alusão ao P80, este parâmetro obteve um valor de 397,63 milímetros para o tamponamento rígido com gesso e para o tamponamento tradicional alcançou o valor de 729,63 milímetros. A diferença de fragmentação utilizando-se tampão rígido com gesso em relação ao método tradicional é de 45,50%.

Relativo ao P50, a diferença de fragmentação com utilização de gesso no tamponamento é de 44,69% em relação ao método convencional, com valores deste parâmetro de 254,17 milímetros no tamponamento rígido com gesso enquanto o tamponamento tradicional foi de 459,57 milímetros.

Com relação ao P20, este índice apresentou um valor de 98,59 milímetros para o tamponamento rígido com gesso e 136,43 milímetros para o tamponamento tradicional, gerando uma diferença de 27,74% em relação ao tamponamento tradicional.

4.2.3 Análise Granulométrica do Desmonte III

O desmonte III foi realizado com 61 furos, sendo que 22 foram tamponados com gesso, com um custo unitário de R\$ 59,4 só com o gesso para executar o tamponamento, o qual pode ser visto no esquema da figura 20. Observou-se em campo que essa bancada estava bastante atingida pelas descontinuidades com um grau de fraturamento elevado (figura 21).

Figura 20: Plano de fogo do desmonte III com parte de tampão de gesso

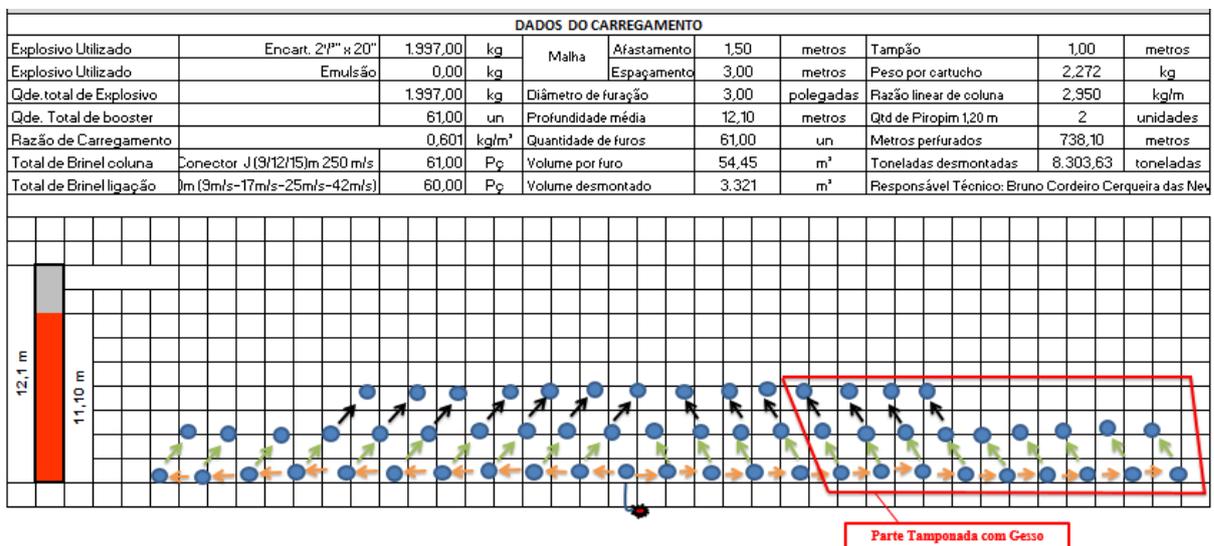
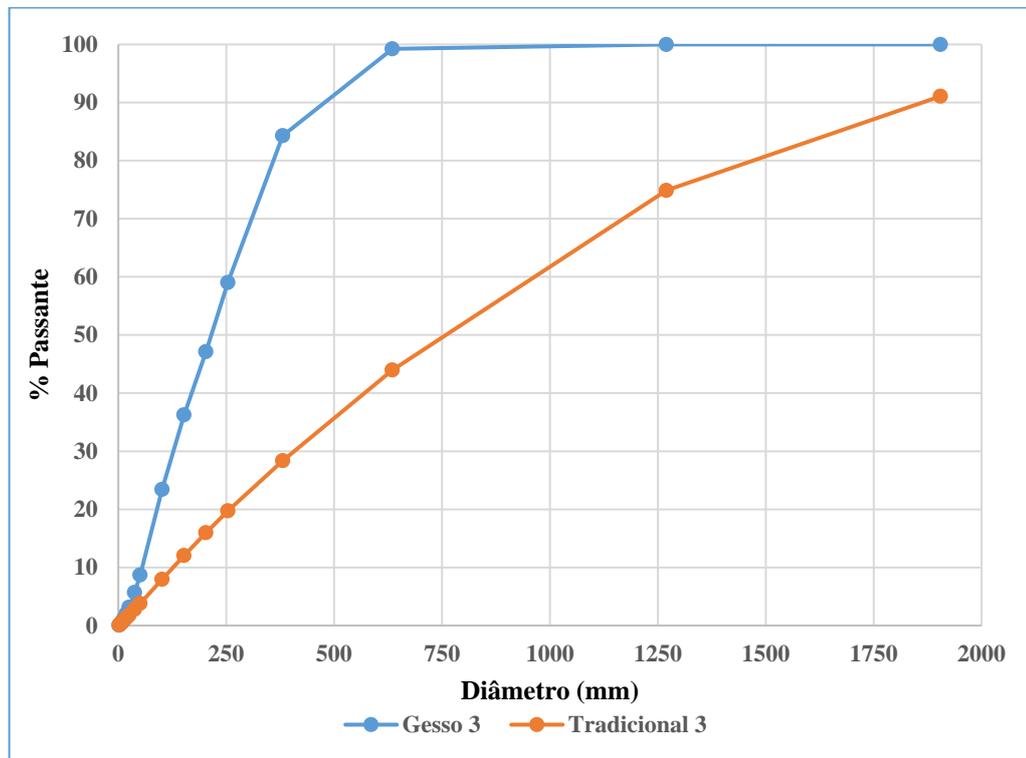


Figura 21: Face da bancada do desmonte III



Analisando a figura 22 nota-se que a curva granulométrica do material desmontado (4 fotos foram utilizadas para o método de tamponamento com gesso, ao passo que para o tradicional foram 5 imagens, essas amostras encontram-se nos ANEXOS) com utilização de tamponamento rígido com gesso foi bastante satisfatória em termos de fragmentação gerando um material desmontado onde o *top size* atingido é bem menor do que o obtido com o método de tamponamento clássico. Outro detalhe mostrado na figura 22 é a distância entre as curvas granulométricas das duas pilhas é considerável, comprovando que houve uma maior fragmentação para o material desmontado utilizando tamponamento rígido com gesso em relação ao material desmontado com o método tradicional de tamponamento.

Figura 22: Distribuição granulométrica dos resultados do desmonte III com utilização do tamponamento tradicional e tamponamento rígido com gesso



Como é mostrado na tabela 9 (em vermelho), nota-se uma diferença muito grande em termos de diferença de fragmentação por fração granulométrica do material desmontado. No intervalo em vermelho o aumento de fragmentação fica mais evidente para o método de tamponamento rígido com gesso em relação ao método de tamponamento clássico com diferenças de fragmentação da ordem de 70%.

Tabela 9 : Resultados de distribuição granulométrica em faixas padronizadas no software *Split-desktop* para os resultados do desmonte III com tamponamento tradicional e tamponamento rígido com gesso

% Passante Gesso	Diâmetro (mm)	% Passante Tradicional
100	1905	91,08
100	1270	74,89
99,24	635	43,98
84,3	381	28,37
59,04	254	19,75
47,13	203,2	15,98
36,25	152,4	12,06
23,44	101,6	7,97
8,71	50,8	3,82
5,72	38,1	2,8
3,15	25,4	1,8
2,06	19,05	1,31
1,13	12,7	0,84
0,74	9,525	0,61
0,41	6,35	0,39
0,27	4,75	0,28
0,07	1,999	0,11

Tabela 10 : Determinação dos índices de fragmentação P20, P50 e P80 para o desmonte III com utilização de tamponamento tradicional e tamponamento rígido com gesso

	Gesso	Tradicional
P 20 (mm)	90,67	257,06
P 50 (mm)	215,49	740,87
P 80 (mm)	354,17	1434,33

Na tabela 10 vemos, com relação ao P80, que esse índice foi de 354,17 milímetros para o tamponamento rígido com gesso e 1.434,33 milímetros para o tamponamento tradicional, uma diferença de 75,31% no grau de fragmentação atingido na fração grosseira do desmonte.

Em relação ao P50, houve uma diferença de 70,91% entre a curva granulométrica do material desmontado com a utilização do tamponamento rígido com gesso em relação ao tamponamento tradicional, sendo o P50 do material desmontado com tamponamento rígido com gesso de 215,49 milímetros enquanto o P50 do material desmontado com o tamponamento tradicional foi de 740,87 milímetros.

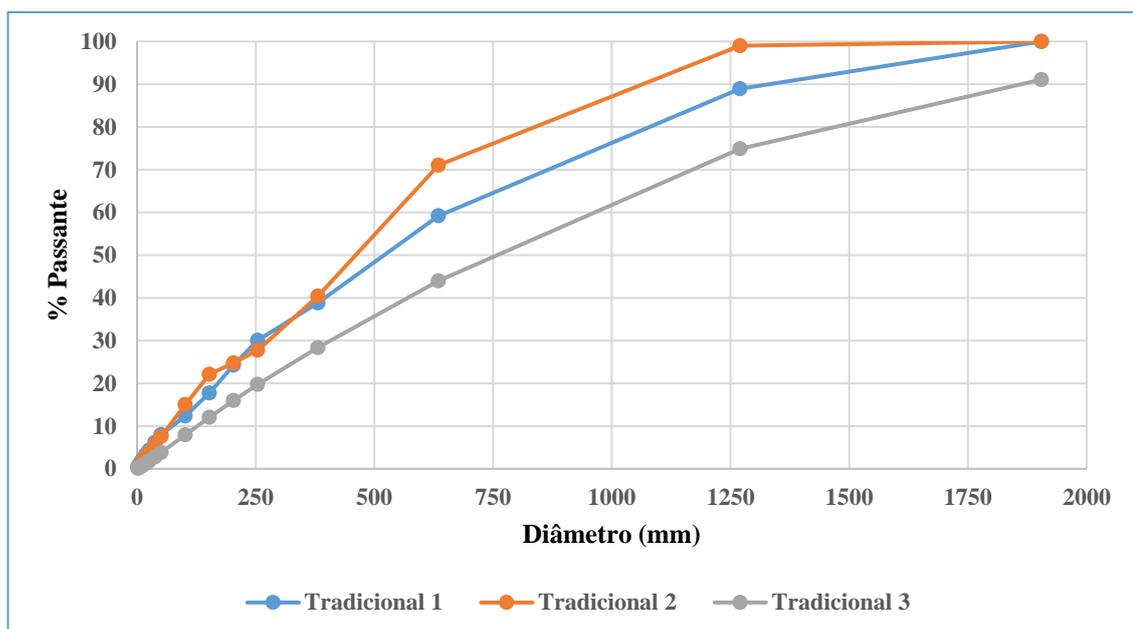
No tocante ao P20, a diferença de granulometria na fração mais fina do desmonte com tamponamento rígido com gesso em relação ao material desmontado com tamponamento tradicional foi de 64,73%, possuindo um diâmetro de 90,67 milímetros para o material desmontado com tamponamento rígido com gesso e 257,06 milímetros para o material desmontado com tamponamento tradicional.

4.2.4 Avaliação dos Desmontes Estudados

O tamponamento tradicional possui pouca resistência a ejeção o que o faz com que a brita utilizada nesse método seja facilmente ejetada com a pressão da detonação, desperdiçando a energia proveniente dos gases, energia esta que poderia ser usada no processo de abertura das fraturas e fragmentação da rocha.

Ao observar a figura 23 onde são mostradas as curvas granulométricas dos três desmontes estudados utilizando-se o tamponamento tradicional, nota-se que não há uma relação clara entre quantidade de discontinuidades e fragmentação. O desmonte 1 foi realizado em rocha mais competente e menos fraturada que os desmontes 2 e 3. O desmonte 3 foi realizado em rocha bastante fraturada. Mesmo assim não se vê uma correlação clara entre o grau de fraturamento do maciço rochoso e a fragmentação da rocha desmontada.

Figura 23: Distribuição granulométrica dos resultados dos desmontes estudados em furos com tamponamento tradicional com brita



Devido ao melhor rendimento da energia dos gases, em rochas mais frágeis e com um maior quantidade de descontinuidades (fraturas), os benefícios em termos de fragmentação tendem a ser bem mais expressivos do que em rochas mais sãs.

A utilização de tamponamento rígido com gesso permite um maior confinamento dos gases possibilitando assim um melhor aproveitamento da energia liberada pelo explosivo no processo de fragmentação da rocha. As bancadas para os ensaios dos desmonte II e III possuíam uma área consideravelmente atingida pela rede de fraturas. Na figura 24 pode-se notar claramente que o tamponamento rígido com gesso possibilitou que os gases atuassem de forma mais intensa sobre as descontinuidades, facilitando a abertura das fraturas e aumentando a fragmentação.

Figura 24: Distribuição granulométrica dos resultados dos desmontes estudados em furos com tamponamento rígido com gesso

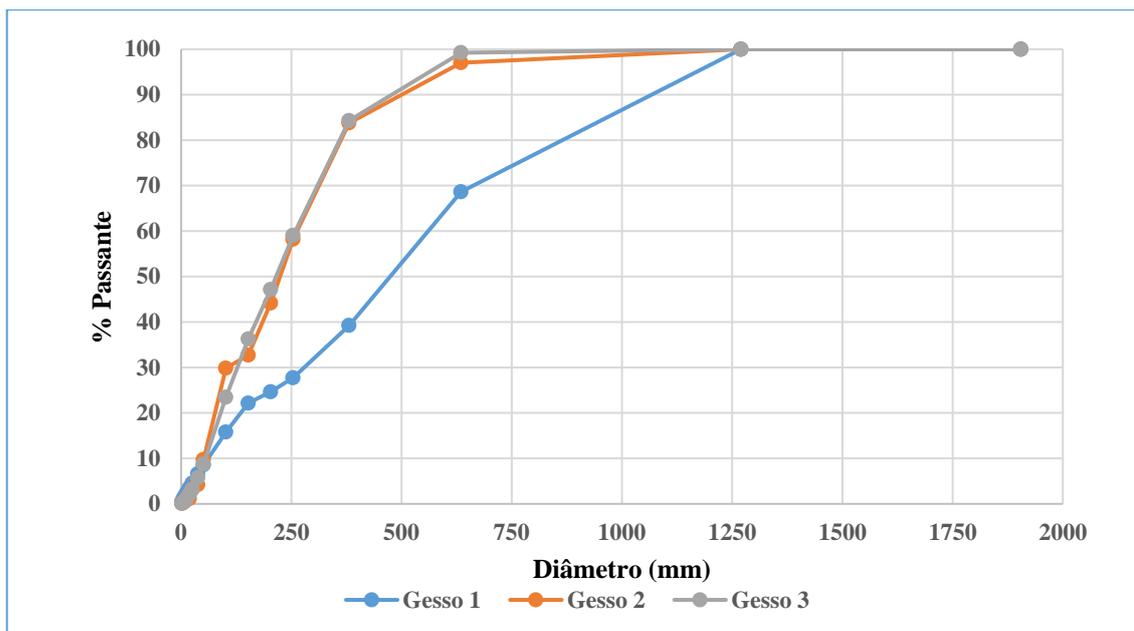
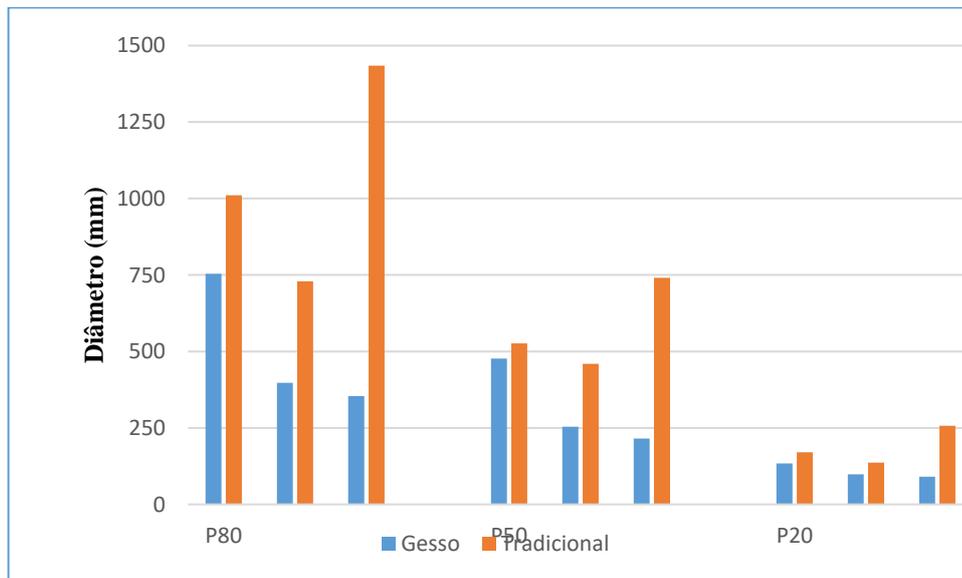


Figura 25: Comparação dos resultados dos desmontes estudados em relação aos parâmetros granulométricos P20, P50 e P80



Avaliando-se o desempenho dos 3 desmontes estudados na Pedreira Herval notou-se que os mesmos melhoraram ao longo do estudo, indicando que o método foi absorvido pelo pessoal local e otimizado nesse período. Em todas as frações granulométricas utilizadas para comparação de resultados (P20, P50 e P80 – figura 25) o método de tamponamento rígido com gesso foi superior ao tamponamento convencional gerando material com granulometria mais reduzida, favorecendo as operações subsequentes de carregamento e britagem.

4.3 COMPARAÇÃO DE CUSTOS UNITÁRIOS DE DESMONTE ENTRE AS TÉCNICAS DE TAMPONAMENTO TRADICIONAL E TAMPONAMENTO RÍGIDO

Nesta etapa de análise considerou-se as mesmas bancadas usadas para a análise granulométrica estimando os custos da bancada sendo tamponada da forma tradicional adotada pela pedreira com tamponamento de brita 12 mm e comparar com a mesma bancada sendo tamponada com o método de tamponamento rígido com gesso. Para esta comparação no método tradicional foram utilizados os parâmetros técnicos e geométricos do Plano de Fogo utilizado pela pedreira e descrito no capítulo anterior, enquanto que para o tamponamento rígido com gesso pode-se modificar o Plano de Fogo sem implicações na fragmentação, resultando em uma malha de perfuração (afastamento e espaçamento) aumentada em 30% e o comprimento do tampão reduzido em 30%.

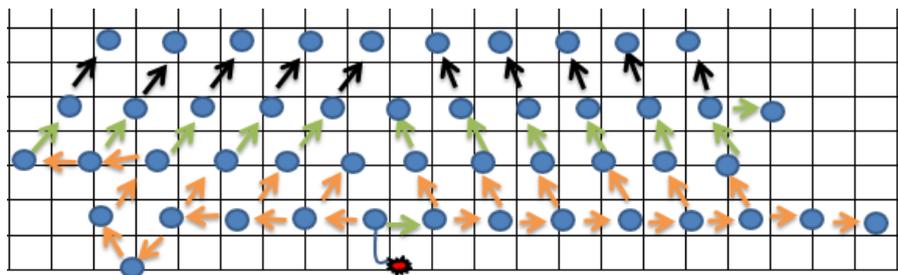
Dessa forma, devido a ampliação da malha de perfuração há uma redução na quantidade de metros perfurados, aumento no volume desmontado por furo e um maior incremento na quantidade de explosivos no topo da bancada, por conta de um tampão mais rígido e robusto, reduzindo-se assim a geração de matações na parte superior da bancada.

Conforme informações do engenheiro de minas Bruno Cordeiro a Pedreira Herval possui um custo unitário de R\$/m 3,63 com perfuração, o cálculo do custo de perfuração segue a seguinte formula: $(3,63 * \text{metros perfurados}) + \text{R\$ } 8.230$ (custos com óleo diesel, graxa, mão de obra e outros insumos). Esses dados foram utilizados para fazer os cálculos nos custos com perfuração em ambas as simulações.

4.3.1 Custo unitário do Desmonte I usando o plano de fogo padrão da empresa e tamponamento com o método tradicional

Para a simulação de custos comparativo entre as duas técnicas de tamponamento foi utilizado o plano de fogo apresentado na figura 26 que corresponde ao tamponamento tradicional da empresa.

Figura 26: Plano de fogo com a malha padrão do desmonte I com o método tradicional

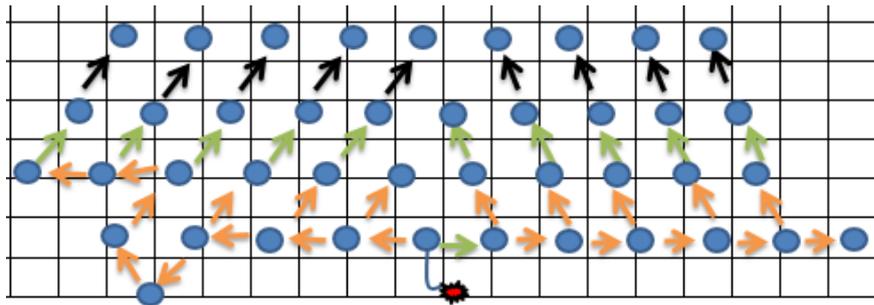


Para o método de tamponamento tradicional foram simulados 48 furos com uma altura da bancada de 8,4 m. O comprimento do tampão é de 1 m e a quantidade de explosivo por furo 38,8 kg resultando numa razão de carga de 1 kg/m^3 . Com relação aos acessórios o custo total foi de R\$ 2.118,96, explosivos R\$ 10.586,41 e R\$ 10.909,30 com perfuração. O volume total desmontado é de $1.814,4 \text{ m}^3$ *in situ* e a perfuração específica de $0,22 \text{ m/m}^3$.

4.3.2 Custo unitário do Desmonte I usando plano de fogo adaptado ao método de tamponamento rígido com gesso

Para a simulação de custos comparativo entre as duas técnicas de tamponamento foi utilizado o plano de fogo apresentado na figura 27 que corresponde ao tamponamento rígido com gesso da empresa.

Figura 27: Plano de fogo com a malha ampliada do desmonte I com o método de gesso



Com o aumento da malha em 30%, a bancada passou a ter 42 furos para o método de tamponamento com gesso e um comprimento do tampão de 70 cm. A quantidade de explosivo por furo foi de 40,4 kg ocasionando em uma razão de carga de 0,6 kg/m³. Com relação aos custos gastou-se com acessórios R\$ 1.666,69, explosivos R\$ 8.555,44, perfuração R\$ 10.338,30 e um custo adicional de R\$ 129,6 com gesso para tamponar todos os 42 furos. O volume desmontado é de 2.683,04 m³ *in situ* e a perfuração específica 0,13 m/m³.

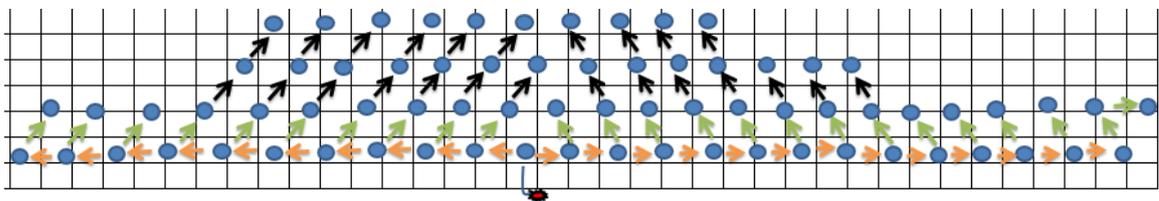
Por conseguinte, o tamponamento rígido com gesso permite uma redução em termos de metros perfurados de 50,4 m (multiplicando a altura da bancada de 8,4 m pelos 6 furos a menos) em relação ao tamponamento tradicional. Isso resulta em cerca de 12,5% a menos em perfuração, obtendo uma economia no custo total de desmonte de R\$ 2.924,65 (custo explosivo + custo acessórios + custo gesso + custo perfuração). Outras vantagens do método de tamponamento rígido com o gesso podem ser observados na tabela 11.

Tabela 11: Índices técnicos e custos de desmorte para o desmorte I

Item	Custo Tradicional	Custo Gesso	Discrepância (%)
Quantidade Explosivos (Kg)	1.997,00	1.614,00	19,2
Custo Explosivo	10.586,41	8.555,44	19,2
Custo Acessórios	2.118,96	1.666,69	21,3
Gesso	-	129,60	-
Custo Perfuração (R\$)	10.909,3	10.338,30	5,2
Custo Total (R\$)	23.614,68	20.609,03	12,4

4.3.3 Custo unitário do Desmorte II usando o plano de fogo padrão da empresa e tamponamento com o método tradicional

Para a simulação de custos comparativo entre as duas técnicas de tamponamento foi utilizado o plano de fogo apresentado na figura 28 que corresponde ao tamponamento tradicional da empresa.

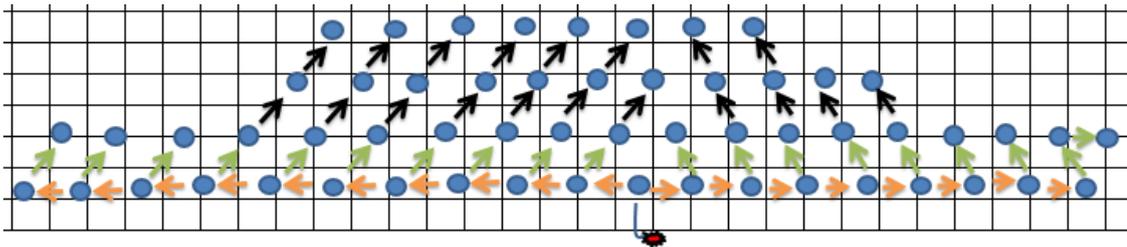
Figura 28: Plano de fogo com a malha padrão do desmorte II com o método tradicional

Para o método de tamponamento tradicional foram realizados 72 furos com uma altura da bancada de 11,3 m, comprimento do tampão de 1 m e a quantidade de explosivo por furo 54 kg, com uma razão de carga de 1 kg/m³. Em relação aos custos o gasto de acessórios foi de R\$ 2.501,65, explosivos R\$ 15.945,98 e perfuração R\$ 11.183,4. O volume total desmontado é de 3.661,2 m³ *in situ* e a perfuração específica de 0,22 m/m³.

4.3.4 Custo unitário do Desmonte II usando plano de fogo adaptado ao método de tamponamento rígido com gesso

Para a simulação de custos comparativo entre as duas técnicas de tamponamento foi utilizado o plano de fogo apresentado na figura 29 que corresponde ao tamponamento rígido com gesso da empresa.

Figura 29: Plano de fogo com a malha ampliada do desmonte II com o método de gesso



Para o método de tamponamento com gesso rígido a simulação da bancada passou a ter 57 furos com comprimento do tampão de 70 cm. A quantidade de explosivo por furo foi de 55,6 kg em uma razão de carga de 0,65 kg/m³. No tocante aos custos o gasto em acessórios foi de R\$ 1.979,8, explosivos R\$ 12.991,59, perfuração R\$ 10.568,08 e um custo de R\$ 153,9 com o gesso para tamponar todos os 57 furos. O volume total desmontado é de 4.898,4 m³ *in situ* e a perfuração específica de 0,13 m/m³.

Logo pode-se concluir que o tamponamento rígido com gesso permite uma redução em termos de metros perfurados de 169,5 m (multiplicando a altura da bancada de 11,3 m pelos 15 furos a menos) em relação ao tamponamento tradicional. Isso resulta em cerca de 20,8% a menos em perfuração, obtendo uma economia no custo total de desmonte de R\$ 3.937,63. Outras vantagens do método de tamponamento rígido com o gesso podem ser observados na tabela 12.

Tabela 12: Índices técnicos e custos de desmonte para o desmonte II

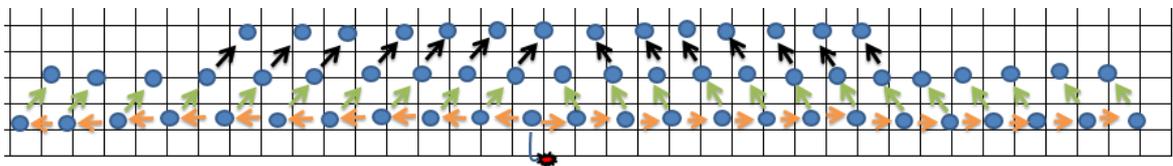
Item	Custo Tradicional	Custo Gesso	Discrepância (%)
Quantidade Explosivos (Kg)	3.889,00	3.169,00	18,5
Custo Explosivo	15.945,98	12.991,59	18,5
Custo Acessórios	2.501,65	1.979,8	20,9
Gesso	-	153,90	-
Custo Perfuração (R\$)	11.183,4	10.568,08	5,5

Custo Total (R\$)	29.631,00	25.693,37	13,3
-------------------	-----------	-----------	------

4.3.5 Custo unitário do Desmonte III usando o plano de fogo padrão da empresa e tamponamento com o método tradicional

Para a simulação de custos comparativo entre as duas técnicas de tamponamento foi utilizado o plano de fogo apresentado na figura 30 que corresponde ao tamponamento tradicional da empresa.

Figura 30: Plano de fogo com a malha padrão do desmonte III com o método tradicional

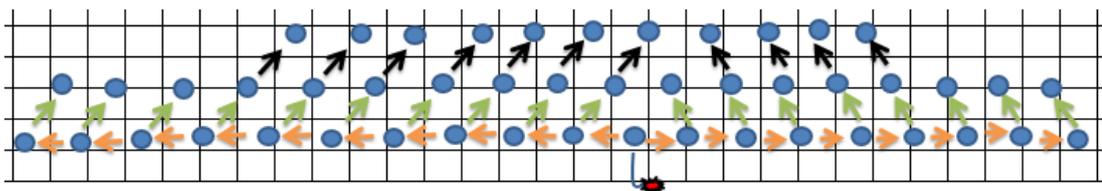


Para o método de tamponamento tradicional foram executados 61 furos com uma altura da bancada de 12,1 m. O comprimento do tampão é de 1 m e a quantidade de explosivo por furo 32,7 kg, definindo uma razão de carga de 0,6 kg/m³. Em relação aos custos o gasto de acessórios foi de R\$ 1.653,73, explosivos R\$ 7.637,56 e perfuração R\$ 9.693,6. O volume total desmontado é de 3.321,5 m³ *in situ* e a perfuração específica de 0,22 m/m³.

4.3.6 Custo unitário do Desmonte III usando plano de fogo adaptado ao método de tamponamento rígido com gesso

Para a simulação de custos comparativo entre as duas técnicas de tamponamento foi utilizado o plano de fogo apresentado na figura 31 que corresponde ao tamponamento rígido com gesso da empresa.

Figura 31: Plano de fogo com a malha ampliada do desmonte III com o método de gesso



Conforme o aumento da malha em 30%, a bancada passou a ter 48 furos para o método de tamponamento com gesso junto com um comprimento do tampão de 70 cm. A quantidade de explosivo por furo foi de 33,6 kg definindo em uma razão de carga de 0,37 kg/m³. Com relação aos custos o gasto com acessórios foi de R\$ 1.435,58, explosivos R\$ 6.953,79, perfuração R\$ 9.510,66 e um custo de R\$ 113,4 com o gesso utilizado para tamponar todos os 48 furos. O volume desmontado é de 3821,30 m³ in situ e a perfuração específica 0,13 m/m³.

Portanto o tamponamento rígido com gesso permite uma redução em termos de metros perfurados de 157,3 m (multiplicando a altura da bancada de 12,1 m pelos 13 furos a menos) em relação ao tamponamento tradicional. Isso resulta em cerca de 21,3% a menos em perfuração, obtendo uma economia de custo no desmonte de R\$ 971,47. Outras vantagens do método de tamponamento rígido com o gesso podem ser observados na tabela 13.

Tabela 13: Índices técnicos e custos de desmonte para o desmonte III

Item	Custo Tradicional	Custo Gesso	Discrepância (%)
Quantidade Explosivos (Kg)	1863	1696	9,0
Custo Explosivo	7637,56	6953,79	9,0
Custo Acessórios	1653,73	1435,58	13,2
Gesso	-	113,4	-
Custo Perfuração (R\$)	9693,6	9510,66	1,9
Custo Total (R\$)	18984,90	18013,43	5,1

Portanto, através desta análise de custos simulando os desmontes realizados na pedreira verificou-se que o método de tamponamento rígido com gesso pode permitir uma redução da razão de carga e da perfuração específica, devido a malha ser mais aberta, ou seja, economias com a perfuração. O tamponamento rígido com gesso pode significar em redução nos gastos com desmonte por volume de rocha desmontada, tornando-o mais econômico.

5 CONCLUSÕES

No desmonte convencional com explosivos o tampão pode ser facilmente ejetado devido à alta pressão produzida pela detonação podendo resultar em ultralançamento de fragmentos (*flyrocks*). Além desse problema uma deficiência no tamponamento pode ocasionar a perda de desempenho na fragmentação devido ao escape precoce dos gases para a atmosfera, implicando em uma fragmentação pobre, especialmente na parte superior da bancada, onde ocorre a formação de matacos. O método de tamponamento rígido com gesso faz com que parte da energia produzida pelo explosivo seja aproveitada de forma mais eficaz devido à maximização do confinamento dos gases da explosão, minimizando os problemas citados acima.

O tampão rígido com gesso mostrou nos testes realizados na pedreira Herval que pode proporcionar uma vedação dos gases da detonação mais eficiente, além de permitir que a carga explosiva esteja mais próxima da superfície, favorecendo uma maior fragmentação, principalmente na região referente ao tampão diminuindo a geração de rochas de grandes dimensões com reflexos na produtividade operacional e no lucro.

Avaliando os resultados fotográficos das pilhas formadas nas detonações e através do tratamento de imagens no software Split-desktop verificou-se que no volume da bancada onde se aplicou o método de tamponamento rígido com gesso houve um aumento expressivo na fragmentação em relação ao método convencional utilizado pela Pedreira Herval. Todos os parâmetros utilizados para comparação obtidos nas curvas de distribuição granulométrica do material da pilha (P80, P50 e P20) indicaram que a fragmentação foi bastante favorecida utilizando-se o tamponamento rígido com gesso, principalmente quando a bancada apresentasse com maior fraturamento natural.

A utilização do gesso como material de tamponamento mostrou nos testes práticos realizados na pedreira Herval que é uma metodologia de fácil aplicabilidade, demanda pouco tempo para ser executada e possui baixo custo operacional, podendo facilmente ser incorporada à rotina do desmonte de rochas com explosivos.

Os testes práticos realizados na pedreira Herval para comparação dos dois diferentes tipos de tamponamento dos furos mostraram que para o método de tamponamento rígido com gesso pode-se obter ganhos relativos à redução nos metros perfurados, diminuição dos custos unitários de desmonte e obtenção de um produto final com maior grau de fragmentação do que o método convencional. Devido à possibilidade de utilização de uma malha de perfuração mais espaçada tem-se também uma diminuição na razão de carga específica (kg explosivo / m³ desmontado) indicando ser mais econômico do que o método convencional de tamponamento.

Em vista dos resultados obtidos pode-se concluir finalmente que a utilização de materiais que permitam aumentar a vedação e a resistência do tampão são de extrema importância para obter-se uma melhor utilização da energia produzida pelo confinamento dos gases reduzindo, assim, a geração de matacos e proporcionando uma maior fragmentação do material desmontado reduzindo, dessa forma, os custos unitários de produção e permitindo um aumento na efetividade do desmonte.

REFERÊNCIAS

Bhandari, S. **Engineering Rock Blasting Operations**. 1997.

Boshoff, D.; Webber-Youngman, R.C.W. Testing stemming performance, possible or not?, **Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy**, Dezembro, 2011.

Catasús, P.S. et. al. **Análisis digital de la fragmentación por voladura en la mina de Sossego (CVRD, Brasil)**. (Tese de Doutorado) - Universidad Politécnica de Madrid. Escola Técnica Superior de Ingenieros de Minas. Madrid, Espanha. 2006.

Cevizci, H.; Ozkahraman, H.T. The effect of blast hole stemming length to rockpile fragmentation at limestone quarries. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, vol. 53, 2012. pp. 32–35.

Cevizci, H. and Ozkahraman, H.T. The effect of plaster stemming to blast fragmentation at clay quarries. **22nd World Mining Congress & Expo. WMC-2011**. vol. 1. pp. 551–554. Istanbul, 2011.

DICK, R.A., et al. **Explosives and Blasting Procedures Manual**. U.S. Bureau of Mines, 1983.

Dobrilovic, M., Ester, Z., Jankovic, B. **Measurement in blast hole stem and influence of stemming material on blasting quality**. In: Rudarsko-geolosko-naftnizbornik v.17, Zagreb. 2005.

Gama, C.D. **A Model for Rock Mass Fragmentation by Blasting**. 8th Congress Rock Mechanics, Tokyo, 1995.

Gama, C.D. **Análisis Volumétrico de Macizos Rocosos Diaclasados para Optimizar la Extracción de Rocas y Minerales**. Madrid, 1994.

Geraldi, J.L.P. **O ABC das Escavações de Rocha**. Rio de Janeiro. Ed. Interciência, 2011.

Hagan, T.N. **The Effects of Some Structural Properties of Rock on the Design and Results of Blasting**. 1979.

Hagan, T.N. **The Influence of Rock Properties of Blasts in Underground Construction**. Portugal, Lisboa, 1983.

Hoek, E. **Rock mechanics an introduction for the practical engineer Parts I, II and III** (April, June and July 1966). Mining Magazine.

Hustrulid, W. **Blasting Principles for Open Pit Mining: General Design Concepts**, v.2, Rotterdam: A.A. Balkema, 1999.

ISEE **Blaster's Handbook**, 18th Edition. 2011.

Jimeno, C.L. et al. **Factores Geomecánicos que influyen en la Selección de Equipos de Arranque em Minería y Obras Públicas – ITGE.** 1986.

Jimeno, E.L. **Influencia de Las Propiedades de las Rocas y Macizos Rocosos en el Diseño y Resultado de las Voladuras.** 1982.

Jimeno, et al. **Manual de Perforacion y Voladura de Rocas.** Madri, 2003.

Konya, C.J.; Davis, J. **The Effects of Stemming consiston Retention in Blastholes,** In: General Proceeding, 4th Annual Conferenceon Explosives & Blasting Technique, p.102-111. New Orleans, LA,USA, 1978.

Konya, C.J. **Blast Design.** Montiville: International Development Corporation, 1995.

Konya, C.J.; Edward J. W. **Surface Blast Design.** Prentice Hall, Englewood Cliffs. 1990.

Koppe, J.C et al. **CETEM - Manual de Agregados para A Construção Civil,** 2009.

Olofsson, S.O. **Applied Explosives Technology for Construction and Mining.** Arla: APPLEPLEX, 1990.

Oriard, L.L. **Explosives Engineering, Construction Vibrations and Geotechnology.** Cleevland, OH, 2002.

Ozkahraman, H.T. Fragmentation assessment and design of blast pattern at Goltas limestone quarry. **International Journal of Rock Mechanics& Mining Sciences** 43, p.628-633. Turkey,2006.

Rai, P.; Ranjan, A. K.; Choudhary, B.S. **Achieving Effective Fragmentation – A case study on the role of the stemming column fragmentation in an overburden sandstone formation.** pp. 1–3. India, 2008.

Scott, A. et al. **Open Pit Blast Desing:** Analysis and Optimisation. Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre, Queensland, 1996.

Tamrock. **Handbook Surface Drilling and Blasting,** 1984.

Ward, R.C.; Robson, M. **Principles of Hydrology 3.** McGraw Hill Book Company. 365p. London, 1990.

ANEXO A - PLANOS DE FOGO DA PEDREIRA HERVAL LTDA

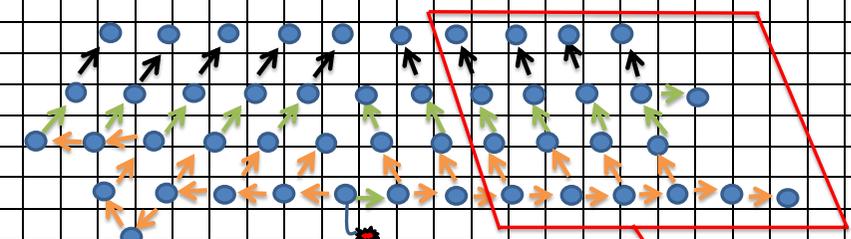
PLANO DE FOGO - DESMONTE I

 		PLANO DE FOGO					Nº 096			
Empresa: PEDREIRA HERVAL LTDA			Local: RODOVIA PE-60 KM 75, BARREIROS-PE		Data: 05/08/2016					
Área Detonada: MINA 1										
DADOS DO CARREGAMENTO										
Explosivo Utilizado	Encart. 2 1/4"x24"/2"x24"/2"x17"		kg	Malha	Afastamento	1,50	metros	Tampão	1,00	metros
Explosivo Utilizado	Emulsão	1.863,00	kg		Espaçamento	3,00	metros	Peso por cartucho	2,272	kg
Qde. total de Explosivo		1.863,00	kg	Diâmetro de furação	3,00	polegadas	Razão linear de coluna	5,240	kg/m	
Qde. Total de booster		48,00	un	Profundidade média	8,40	metros	Qtd de Piropim 1,20 m	2	unidades	
Razão de Carregamento		1,027	kg/m³	Quantidade de furos	48,00	un	Metros perfurados	403,20	metros	
Total de Brinel coluna	Conector J (9/12/15)m 250 m/s	48,00	Pç	Volume por furo	37,80	m³	Toneladas desmontadas	4.536,00	toneladas	
Total de Brinel ligação	6,0m (9m/s-17m/s-25m/s-42m/s)	47,00	Pç	Volume desmontado	1.814	m³	Responsável Técnico: Bruno Cordeiro Cerqueira das Neves			

8,40 m

7,40 m

Tampão de 1,00 m



- EXEL 09 ms = 00 Pçs
- EXEL 17 ms = 24 Pçs
- EXEL 25 ms = 13 Pçs
- EXEL 42 ms = 10 Pçs
- EXEL 25m 250 ms = 00 Pçs
- INICIADOR

Parte Tamponada com Gesso

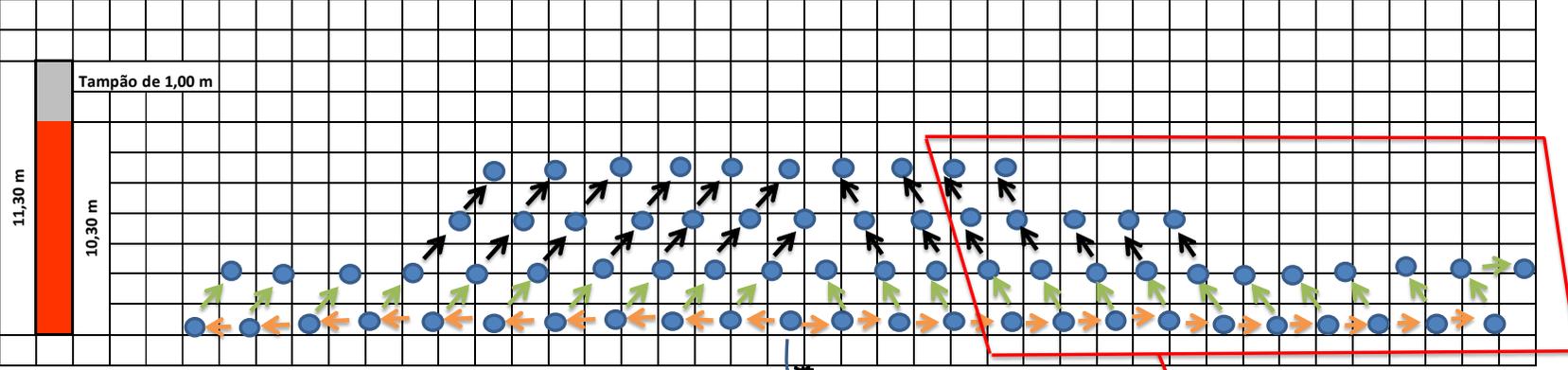
PLANO DE FOGO – DESMONTE II



PLANO DE FOGO

Nº 127

Empresa: PEDREIRA HERVAL LTDA	Local:	RODOVIA PE-60 KM 75, BARREIROS-PE	Data: 27/10/2016
Área Detonada: MINA 1			
DADOS DO CARREGAMENTO			
Explosivo Utilizado	Encart. 2" / 2" x 20"	0,00 kg	Afastamento 1,50 metros
Explosivo Utilizado	Emulsão	3.889,00 kg	Espaçamento 3,00 metros
Qde. total de Explosivo		3.889,00 kg	Diâmetro de furação 3,00 polegadas
Qde. Total de booster		72,00 un	Profundidade média 11,30 metros
Razão de Carregamento		1,062 kg/m³	Quantidade de furos 72,00 un
Total de Brinel coluna	Conector J (9/12/15)m 250 m/s	72,00 Pç	Volume por furo 50,85 m³
Total de Brinel ligação	4,0m (9m/s-17m/s-25m/s-42m/s)	71,00 Pç	Volume desmontado 3.661 m³
			Tampão 1,00 metros
			Peso por cartucho 2,272 kg
			Razão linear de coluna 5,240 kg/m
			Qtde de Piroxim 1,20 m 2 unidades
			Metros perfurados 813,60 metros
			Toneladas desmontadas 9.153,00 toneladas
			Responsável Técnico: Bruno Cordeiro Cerqueira das Neves



Tampão de 1,00 m

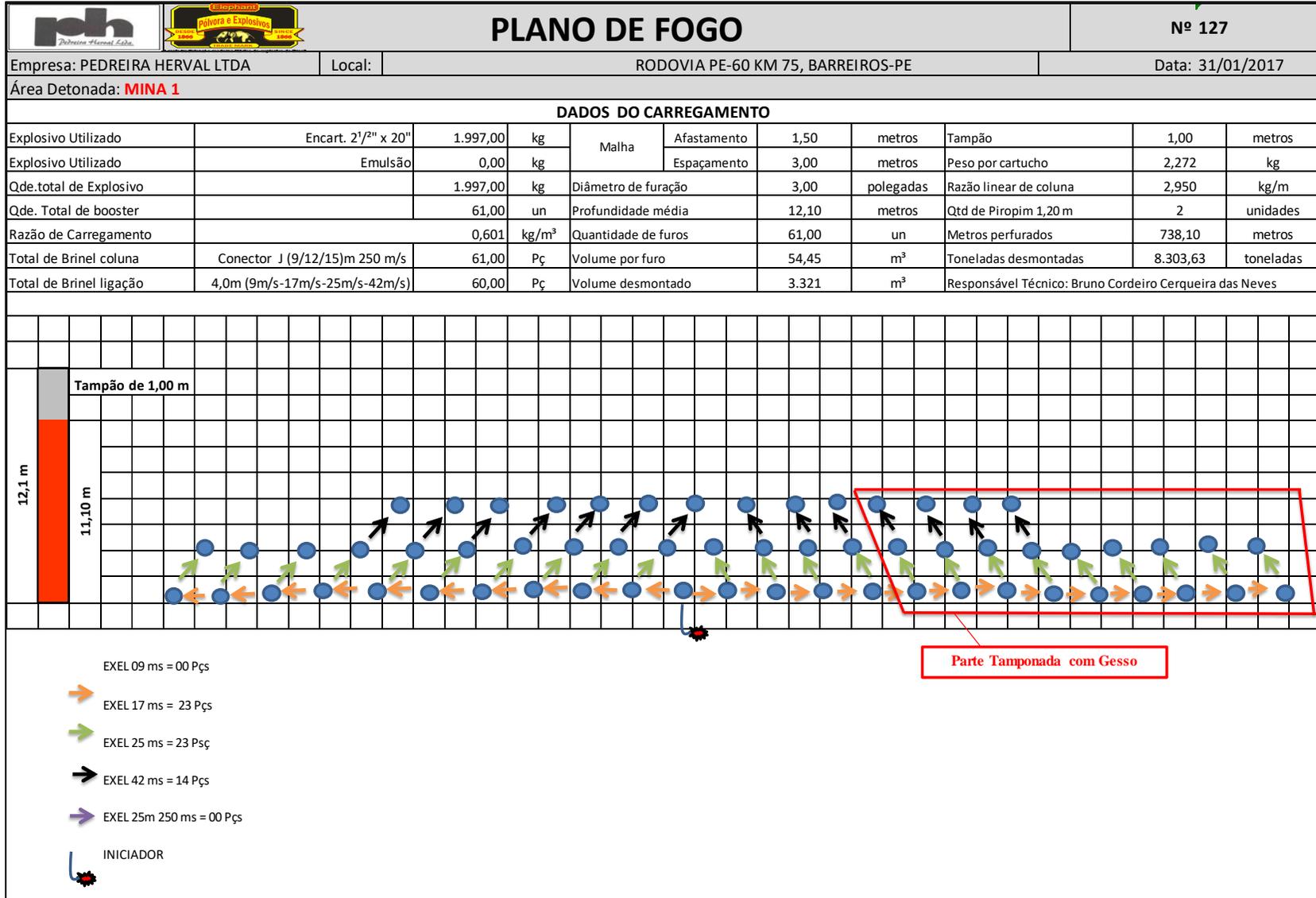
11,30 m

10,30 m

Parte Tamponada com Gesso

- EXEL 09 ms = 00 Pçs
- EXEL 17 ms = 26 Pçs
- EXEL 25 ms = 24 Pçs
- EXEL 42 ms = 24 Pçs
- EXEL 25m 250 ms = 00 Pçs
- INICIADOR

PLANO DE FOGO – DESMONTE III



ANEXO B - PROCESSAMENTO DE IMAGENS

Desmonte I – Tamponamento com gesso

As figuras 32 a 34 mostram respectivamente a primeira foto captada com o tamponamento de gesso para análise granulométrica, a delimitação da mesma através do programa Split-Desktop e o gráfico referente a sua distribuição granulométrica.

Figura 32: Imagem 1 do desmonte 1



Figura 33: Imagem 1 delimitada do desmonte 1

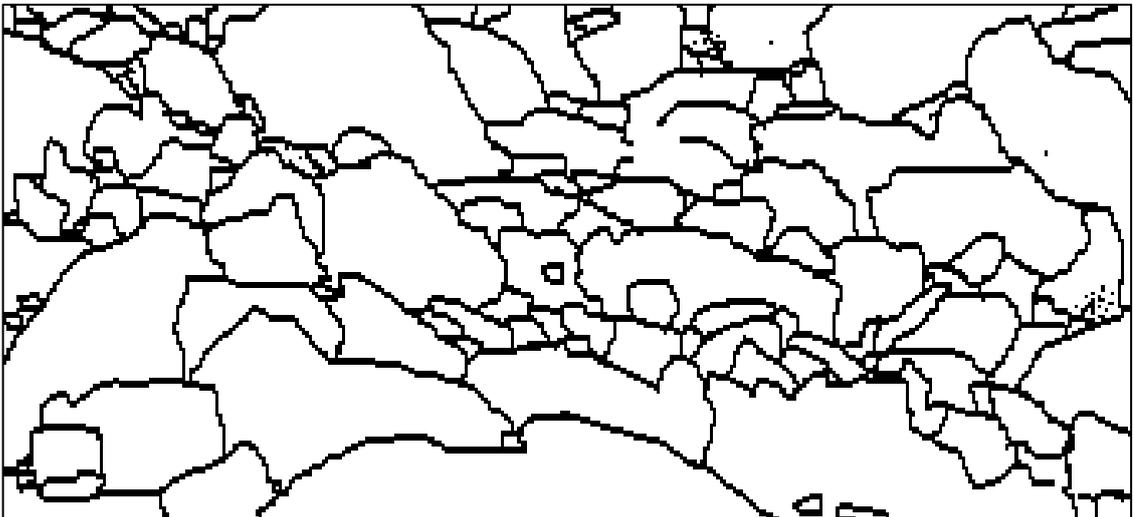
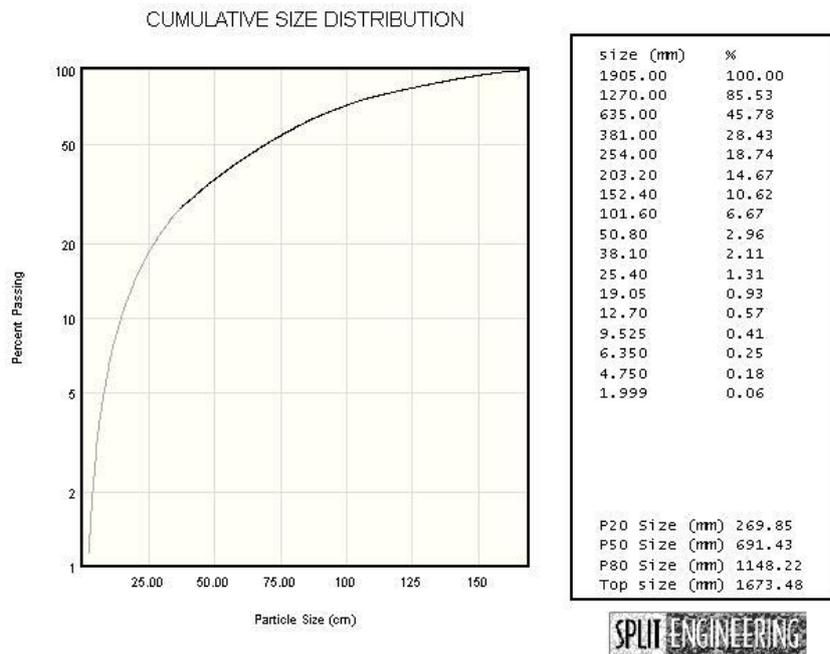


Figura 34: Análise da distribuição granulométrica Imagem 1 do desmonte 1



As figuras 35 a 37 mostram respectivamente a segunda foto captada com o tamponamento de gesso para análise granulométrica, a delineação da mesma através do programa Split-Desktop e o gráfico referente a sua distribuição granulométrica.

Figura 35: Imagem 2 do desmonte 1



Figura 36: Imagem 2 delineada do desmonte 1

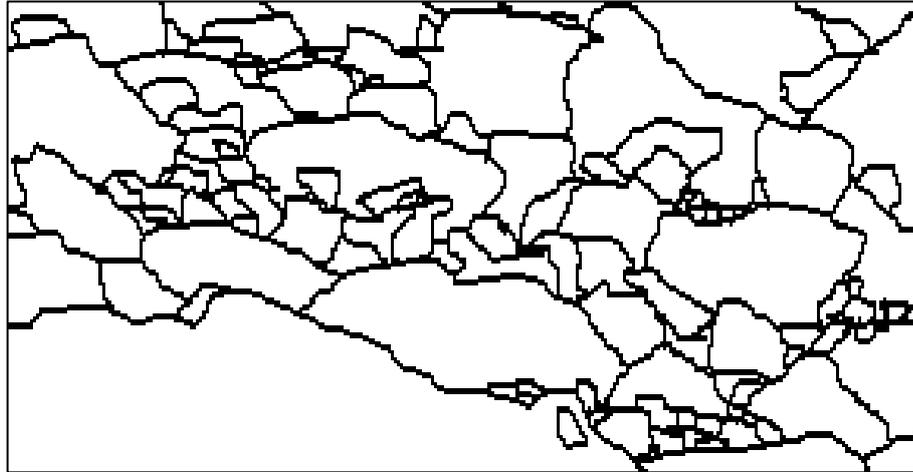
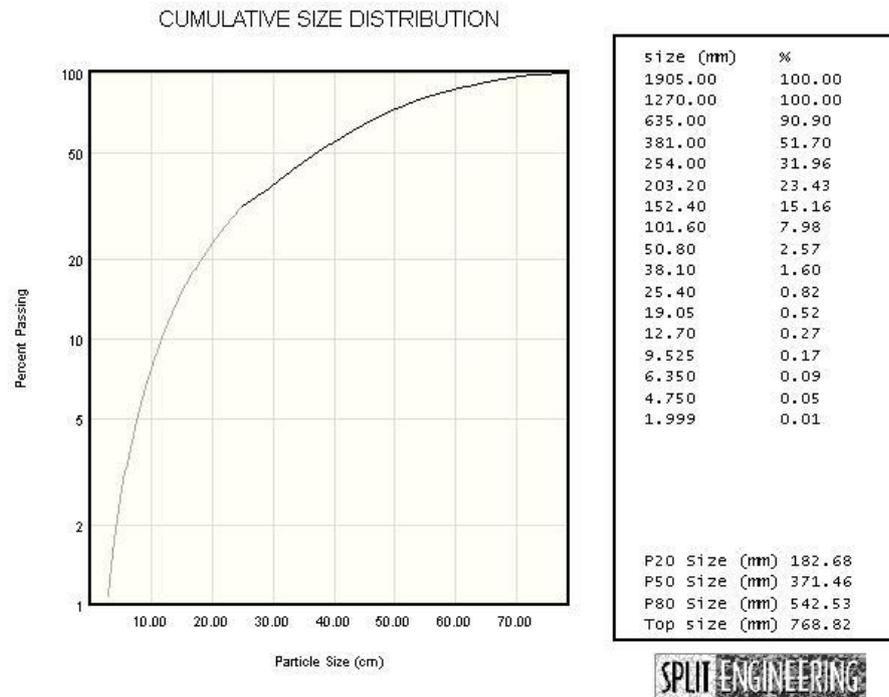


Figura 37: Análise da distribuição granulométrica Imagem 2 do desmonte 1



As figuras 38 a 40 mostram respectivamente a terceira foto captada com o tamponamento de gesso para análise granulométrica, a delimitação da mesma através do programa Split-Desktop e o gráfico referente a sua distribuição granulométrica.

Figura 38: Imagem 3 do desmonte 1



Figura 39: Imagem 3 delineada do desmonte 1

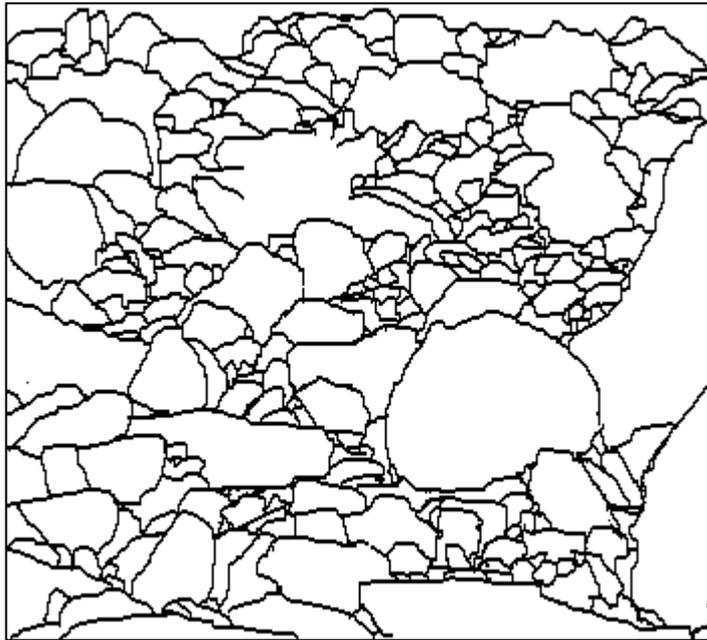
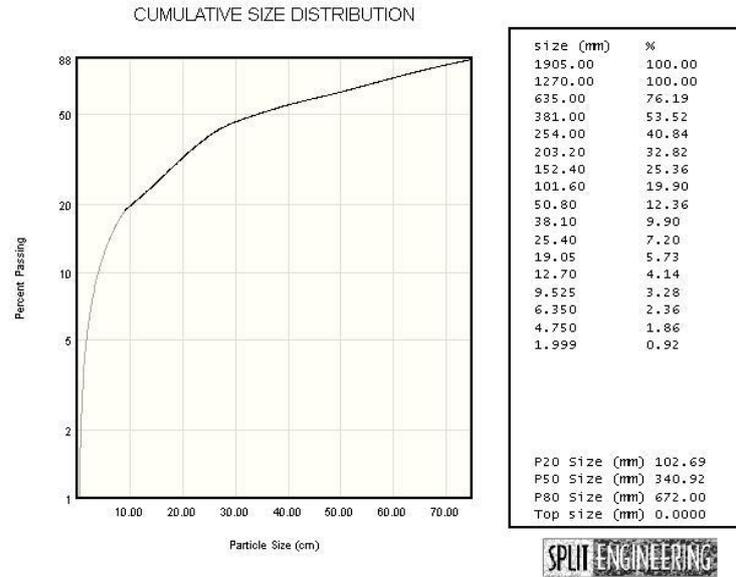


Figura 40: Análise da distribuição granulométrica Imagem 3 do desmonte 1



As figuras 41 a 43 mostram respectivamente a quarta foto captada com o tamponamento de gesso para análise granulométrica, a delineação da mesma através do programa Split-Desktop e o gráfico referente a sua distribuição granulométrica.

Figura 41: Imagem 4 do desmonte 1



Figura 42: Imagem 4 delineada do desmonte 1

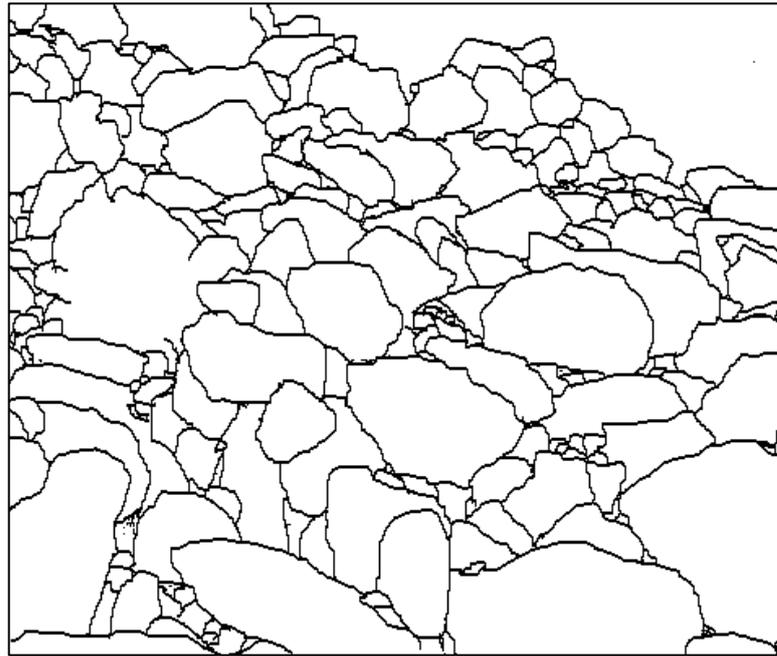
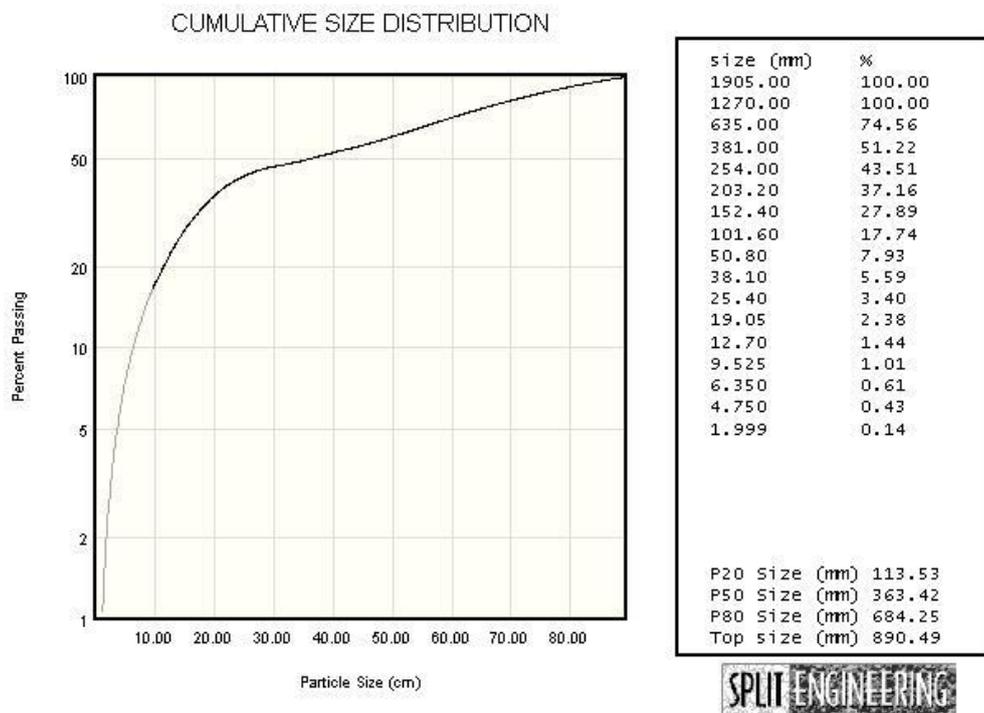


Figura 43: Análise da distribuição granulométrica Imagem 4 do desmonte 1



Desmorte I – Tamponamento tradicional

As figuras 44 a 46 mostram respectivamente a primeira foto captada com o tamponamento tradicional para análise granulométrica, a delimitação da mesma através do programa Split-Desktop e o gráfico referente a sua distribuição granulométrica.

Figura 44: Imagem 1 do desmorte 1 tradicional



Figura 45: Imagem 1 delimitada do desmonte 1 tradicional

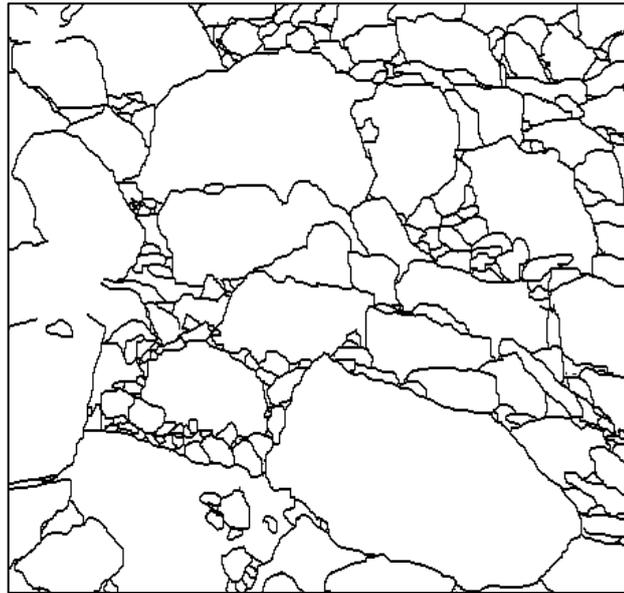
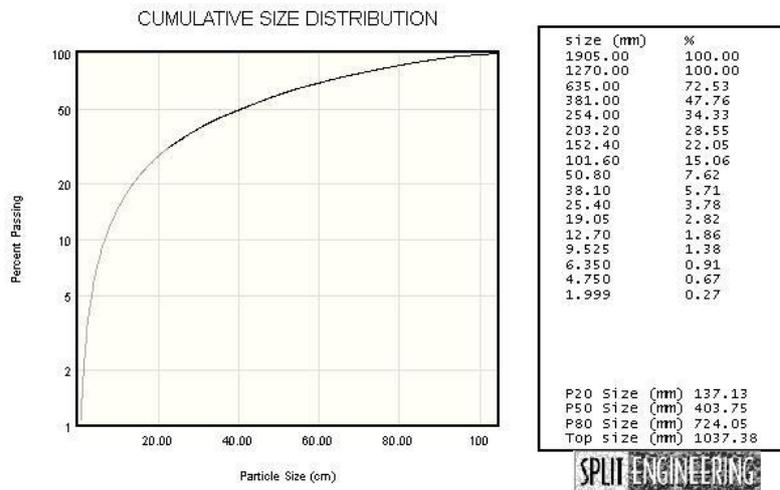


Figura 46: Análise da distribuição granulométrica Imagem 1 do desmonte 1 tradicional



As figuras 47 a 49 mostram respectivamente a segunda foto captada com o tamponamento tradicional para análise granulométrica, a delimitação da mesma através do programa Split-Desktop e o gráfico referente a sua distribuição granulométrica.

Figura 47: Imagem 2 do desmorte 1 tradicional



Figura 48: Imagem 2 delimitada do desmorte 1 tradicional

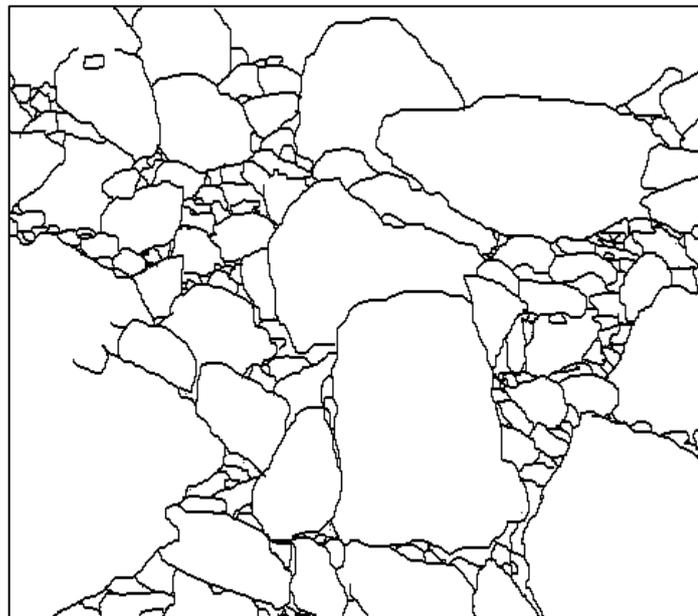
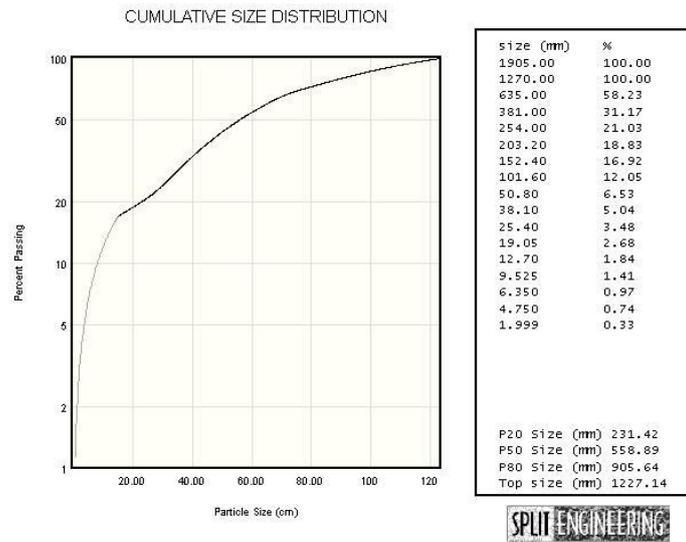


Figura 49: Análise da distribuição granulométrica Imagem 2 do desmonte 1 tradicional



As figuras 50 a 52 mostram respectivamente a terceira foto captada com o tamponamento tradicional para análise granulométrica, a delineação da mesma através do programa Split-Desktop e o gráfico referente a sua distribuição granulométrica.

Figura 50: Imagem 3 do desmonte 1 tradicional



Figura 51: Imagem 3 delineada do desmonte 1 tradicional

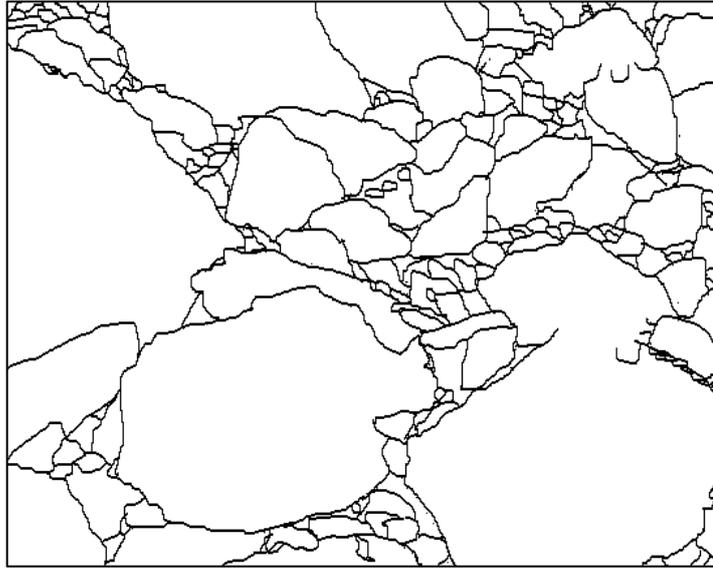
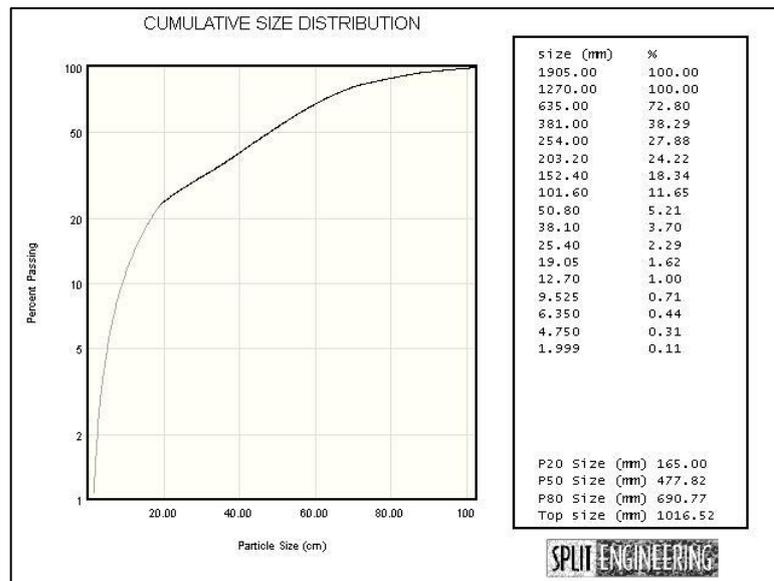


Figura 52: Análise da distribuição granulométrica Imagem 3 do desmonte 1 tradicional



Desmorte II – Tamponamento com gesso

As figuras 53 a 55 mostram respectivamente a primeira foto captada com o tamponamento de gesso para análise granulométrica, a delimitação da mesma através do programa Split-Desktop e o gráfico referente a sua distribuição granulométrica.

Figura 53: Imagem 1 do desmorte 2 com gesso



Figura 54: Imagem 1 delimitada do desmorte 2 com gesso

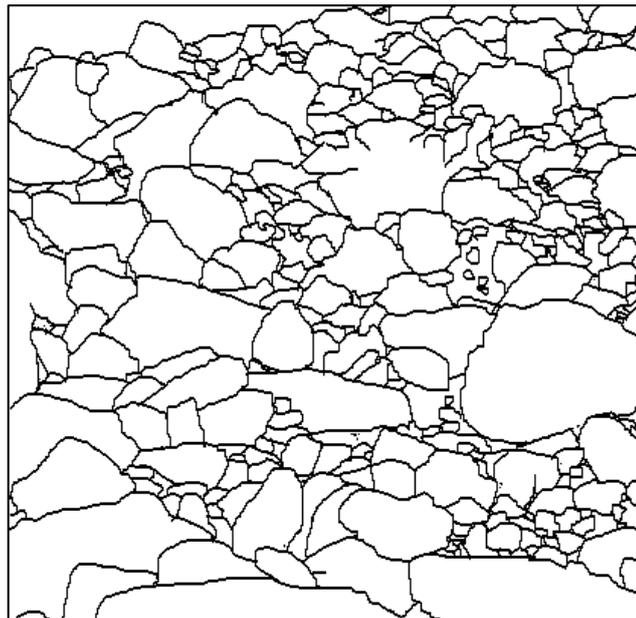
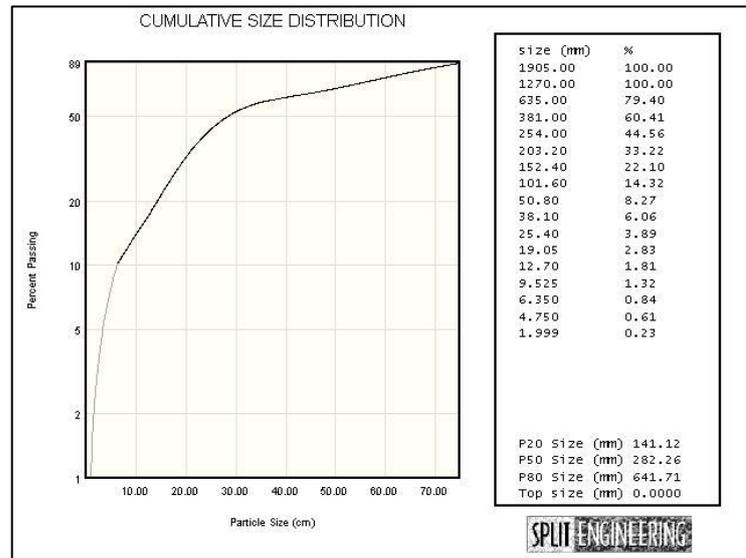


Figura 55: Análise da distribuição granulométrica Imagem 1 do desmonte 2 com gesso



As figuras 56 a 58 mostram respectivamente a segunda foto captada com o tamponamento de gesso para análise granulométrica, a delimitação da mesma através do programa Split-Desktop e o gráfico referente a sua distribuição granulométrica.

Figura 56: Imagem 2 do desmonte 2 com gesso



Figura 57: Imagem 2 delineada do desmorte 2 com gesso

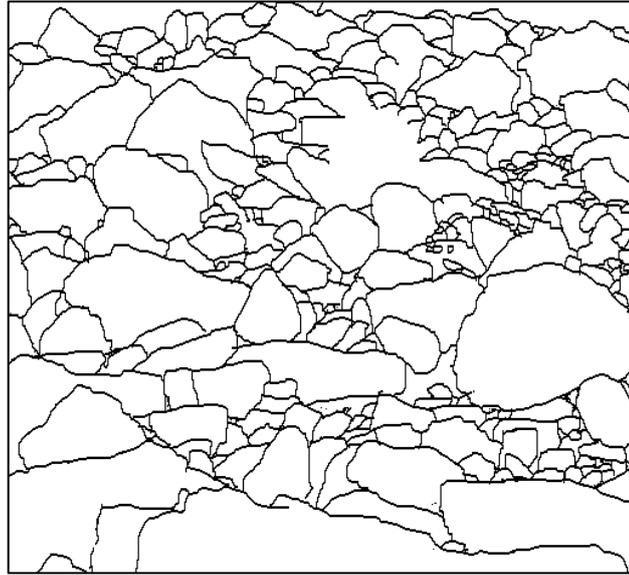
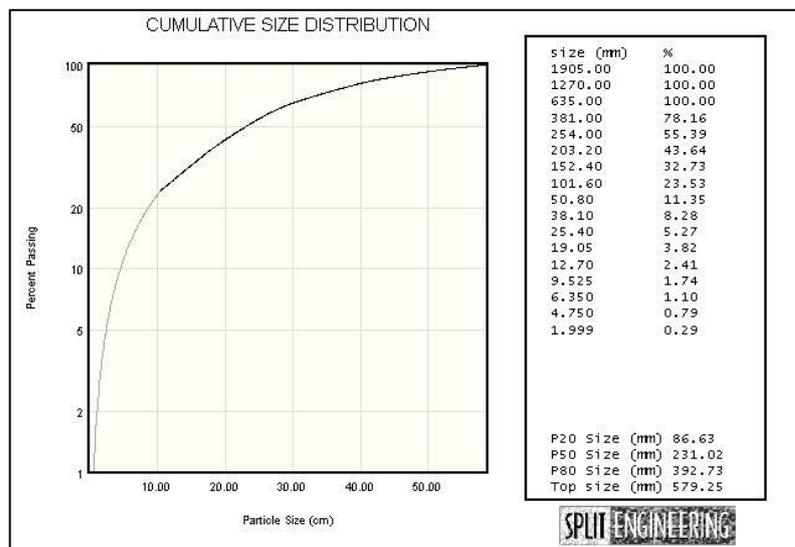


Figura 58: Análise da distribuição granulométrica Imagem 2 do desmorte 2 com gesso



As figuras 59 a 61 mostram respectivamente a terceira foto captada com o tamponamento de gesso para análise granulométrica, a delineação da mesma através do programa Split-Desktop e o gráfico referente a sua distribuição granulométrica.

Figura 59: Imagem 3 do desmonte 2 com gesso



Figura 60: Imagem 3 delineada do desmonte 2 com gesso

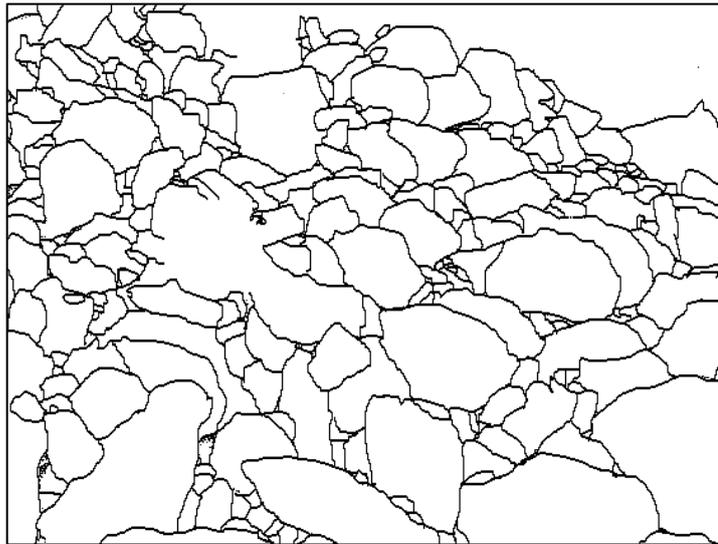
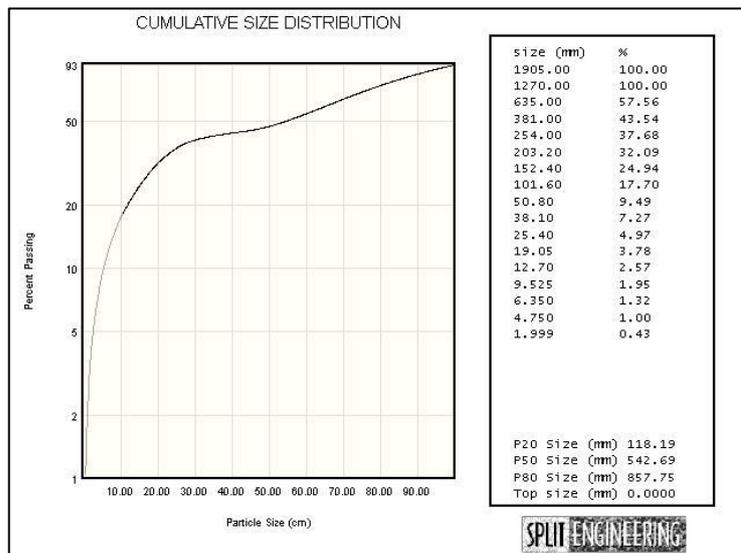


Figura 61: Análise da distribuição granulométrica Imagem 3 do desmonte 2 com gesso



As figuras 62 a 64 mostram respectivamente a quarta foto captada com o tamponamento de gesso para análise granulométrica, a delineação da mesma através do programa Split-Desktop e o gráfico referente a sua distribuição granulométrica.

Figura 62: Imagem 4 do desmonte 2 com gesso



Figura 63: Imagem 4 delineada do desmonte 2 com gesso

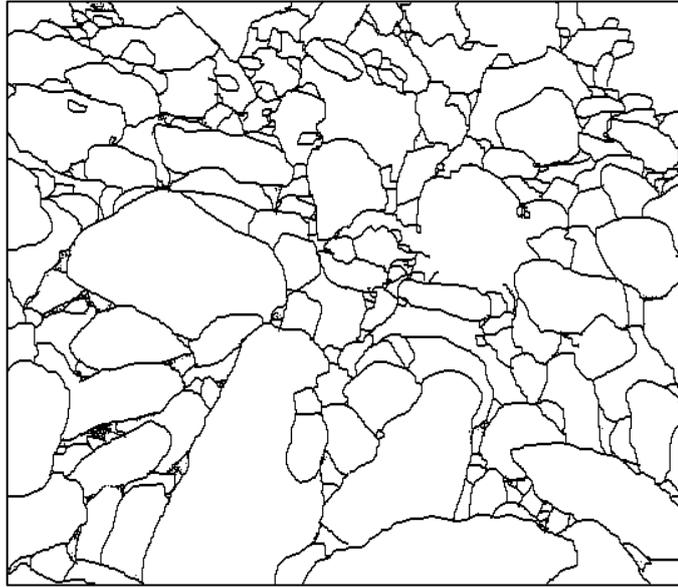
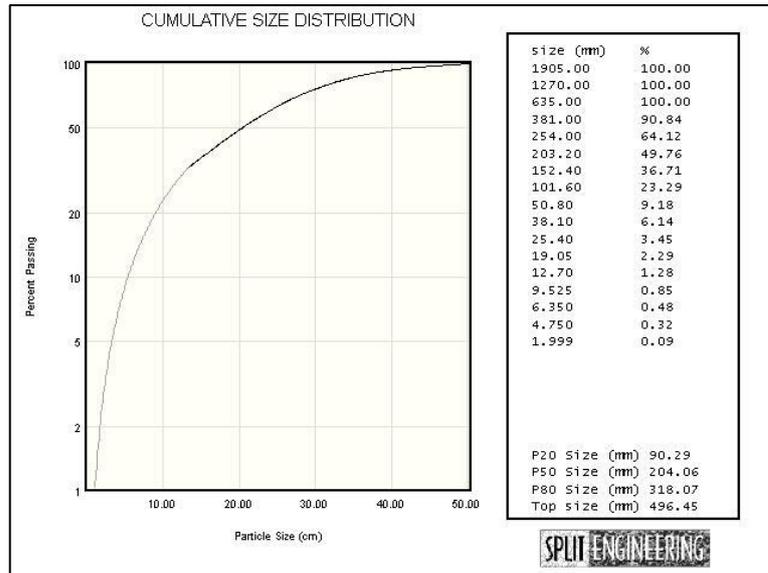


Figura 64: Análise da distribuição granulométrica Imagem 4 do desmonte 2 com gesso



Desmonte II – Tamponamento tradicional

As figuras 65 a 67 mostram respectivamente a primeira foto captada para análise granulométrica, a delimitação da mesma através do programa Split-Desktop e o gráfico referente a sua distribuição granulométrica.

Figura 65: Imagem 1 do desmonte 2 tradicional



Figura 66: Imagem 1 delineada do desmonte 2 tradicional

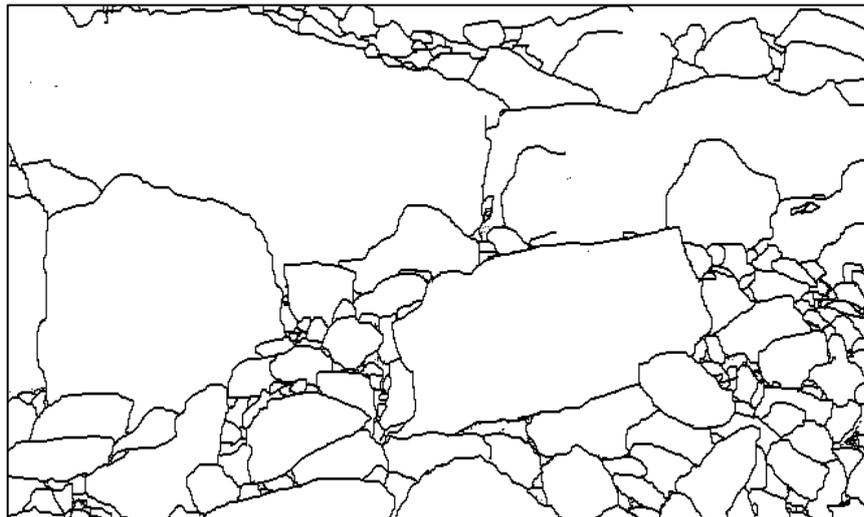
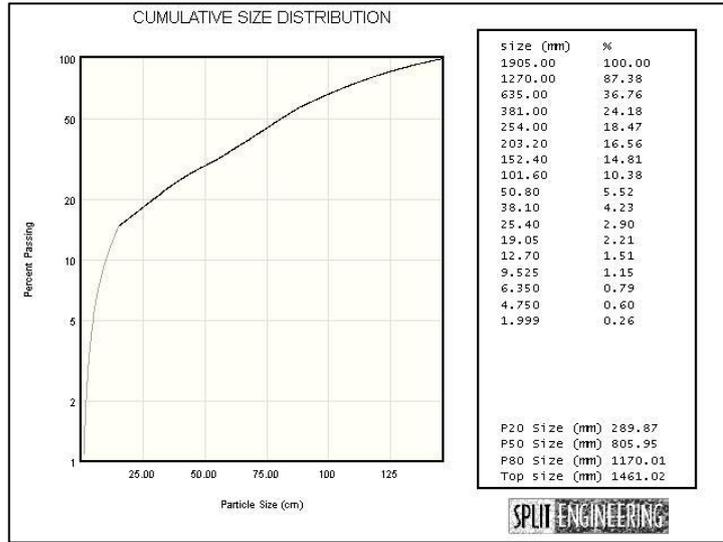


Figura 67: Análise da distribuição granulométrica Imagem 1 do desmante 2 tradicional



As figuras 68 a 70 mostram respectivamente a segunda foto captada com o tamponamento tradicional para análise granulométrica, a delineação da mesma através do programa Split-Desktop e o gráfico referente a sua distribuição granulométrica.

Figura 68: Imagem 2 do desmante 2 tradicional



Figura 69: Imagem 2 delineada do desmorte 2 tradicional

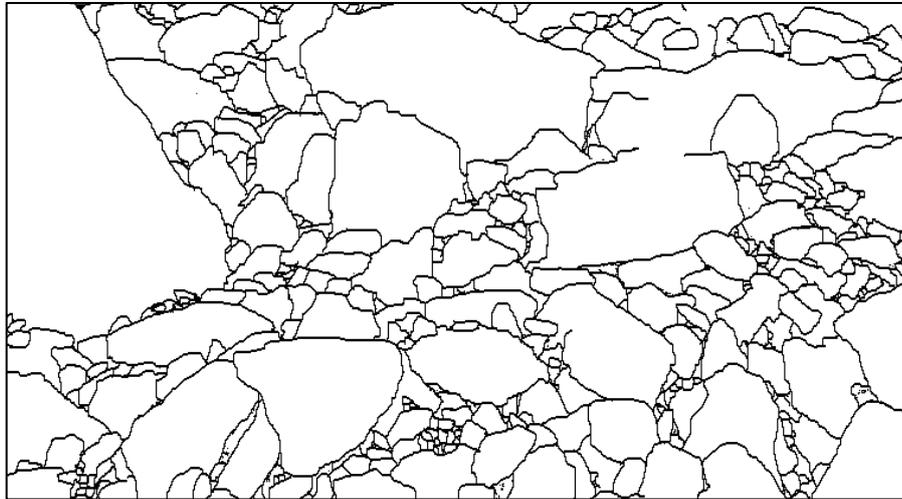
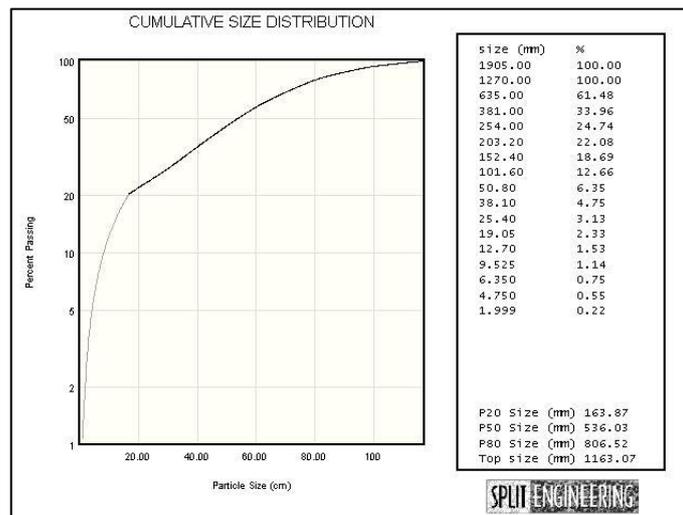


Figura 70: Análise da distribuição granulométrica Imagem 2 do desmorte 2 tradicional



As figuras 71 a 73 mostram respectivamente a terceira foto captada com o tamponamento tradicional para análise granulométrica, a delimitação da mesma através do programa Split-Desktop e o gráfico referente a sua distribuição granulométrica.

Figura 71: Imagem 3 do desmante 2 tradicional



Figura 72: Imagem 3 delineada do desmante 2 tradicional

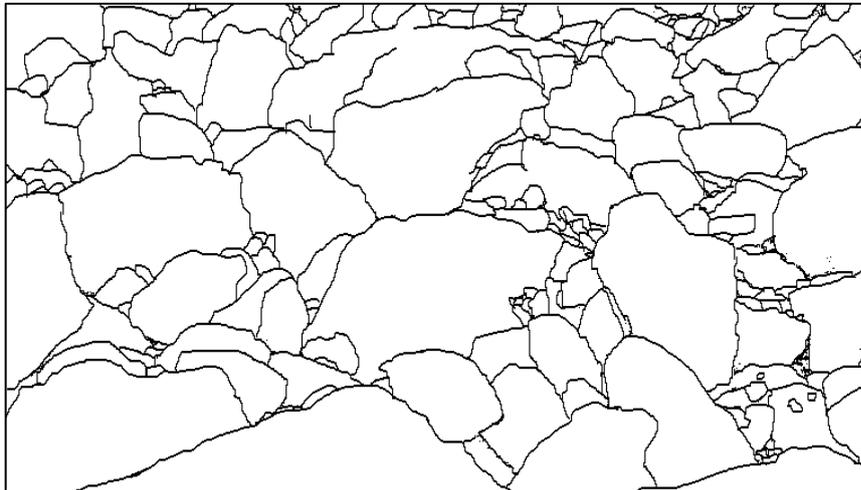
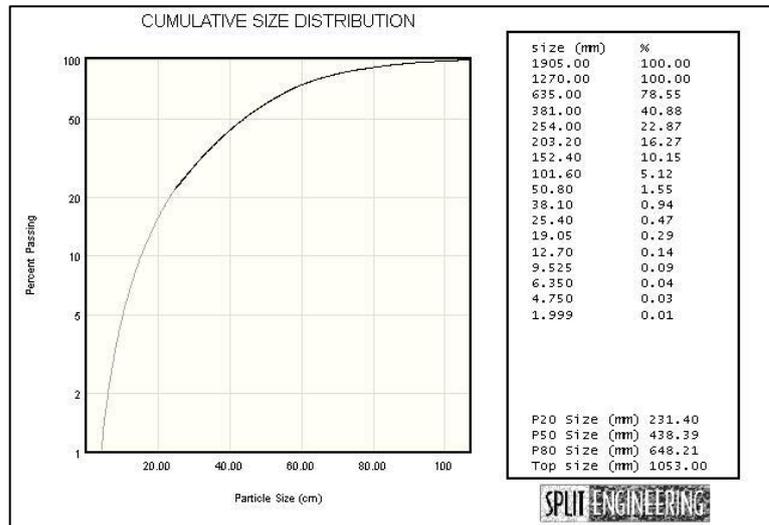


Figura 73: Análise da distribuição granulométrica Imagem 3 do desmante 2 tradicional



As figuras 74 a 76 mostram respectivamente a quarta foto captada com o tamponamento tradicional para análise granulométrica, a delimitação da mesma através do programa Split-Desktop e o gráfico referente a sua distribuição granulométrica.

Figura 74: Imagem 4 do desmante 2 tradicional



Figura 75: Imagem 4 delimitada do desmante 2 tradicional

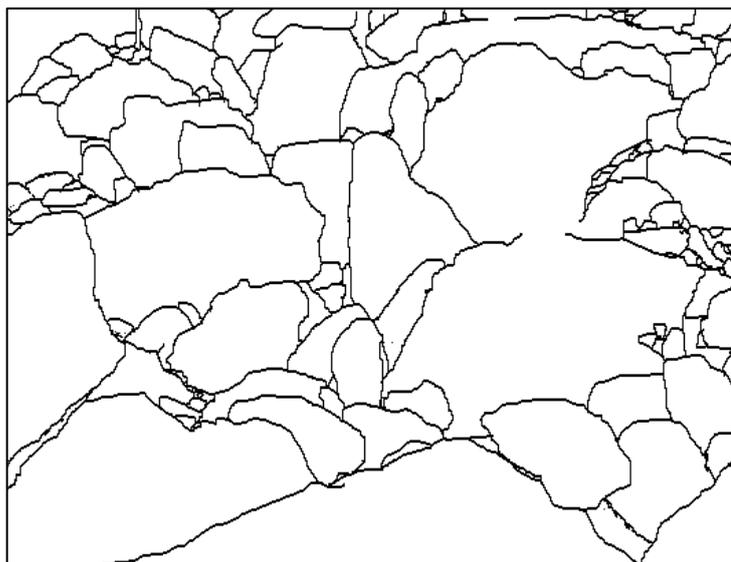
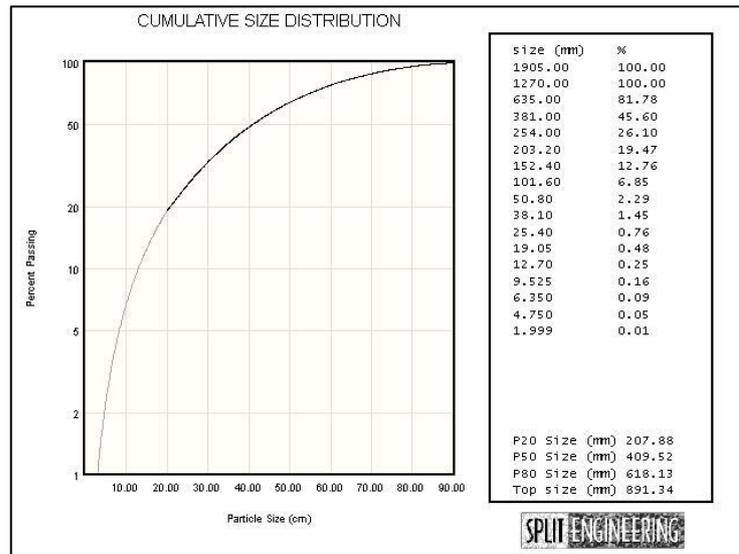


Figura 76: Análise da distribuição granulométrica Imagem 4 do desmonte 2 tradicional



As figuras 77 a 79 mostram respectivamente a quinta foto captada com o tamponamento tradicional para análise granulométrica, a delineação da mesma através do programa Split-Desktop e o gráfico referente a sua distribuição granulométrica.

Figura 77: Imagem 5 do desmonte 2 tradicional



Figura 78: Imagem 5 delineada do desmonte 2 tradicional

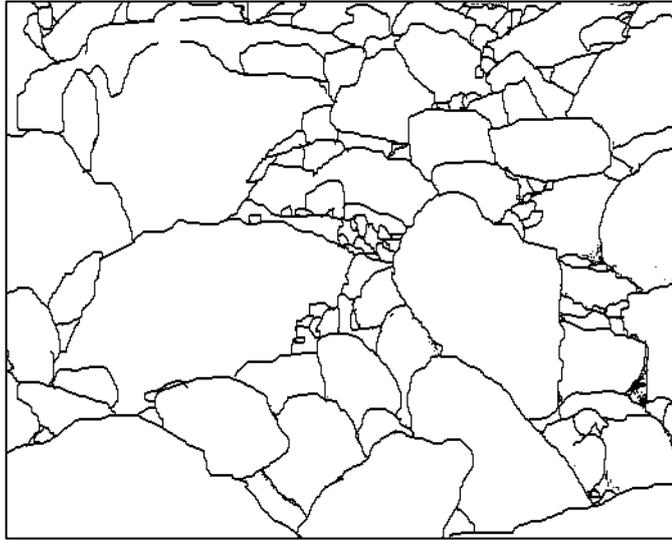
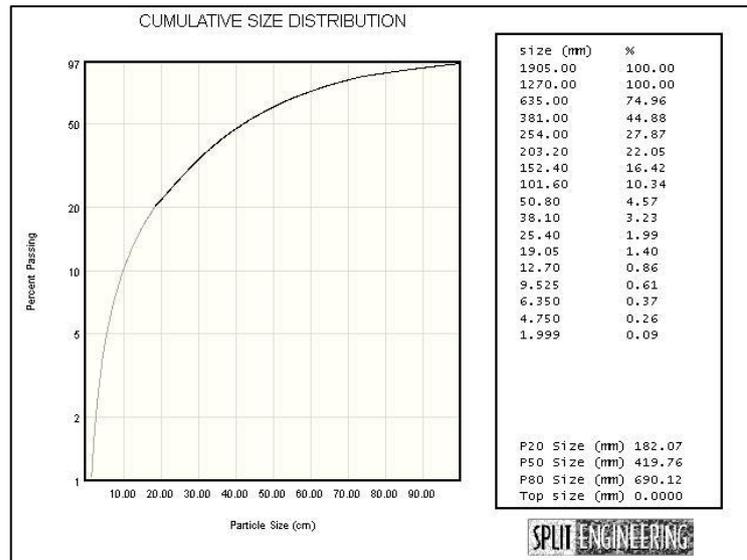


Figura 79: Análise da distribuição granulométrica Imagem 5 do desmonte 2 tradicional



Desmonte III – Tamponamento com gesso

As figuras 80 a 82 mostram respectivamente a primeira foto captada com o tamponamento de gesso para análise granulométrica, a delimitação da mesma através do programa Split-Desktop e o gráfico referente a sua distribuição granulométrica.

Figura 80: Imagem 1 do desmonte 3 com gesso



Figura 81: Imagem 1 delimitada do desmonte 3 com gesso

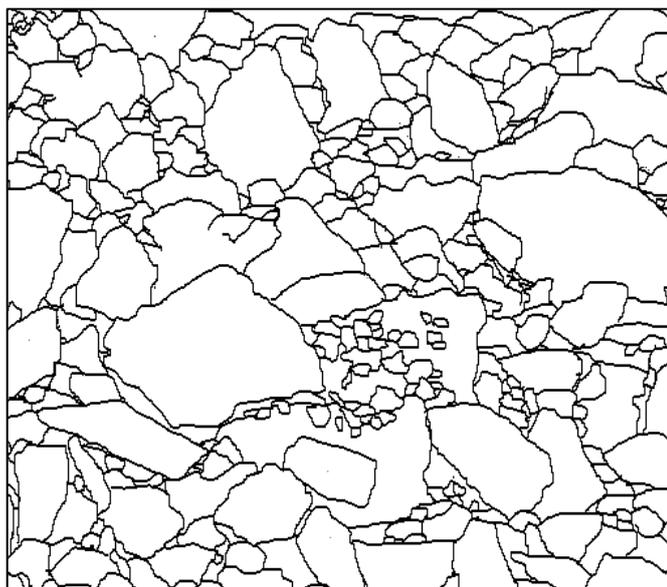
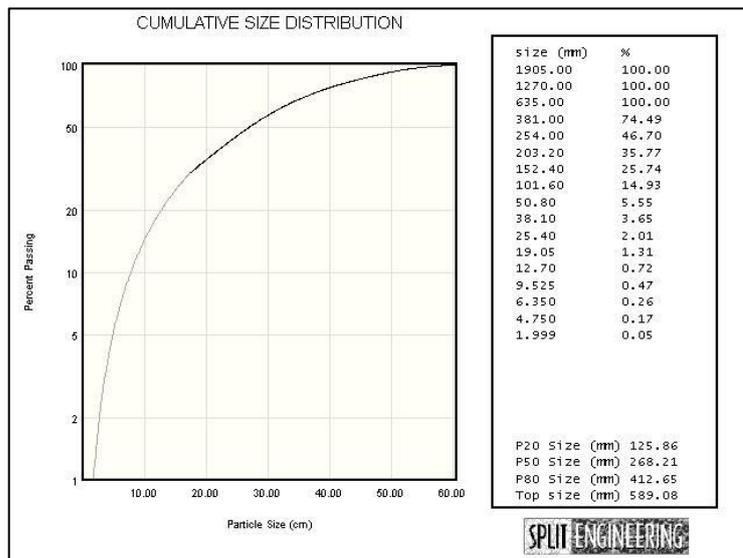


Figura 82: Análise da distribuição granulométrica Imagem 1 do desmante 3 com gesso



As figuras 83 a 85 mostram respectivamente a segunda foto captada com tamponamento de gesso para análise granulométrica, a delineação da mesma através do programa Split-Desktop e o gráfico referente a sua distribuição granulométrica.

Figura 83: Imagem 2 do desmante 3 com gesso



Figura 84: Imagem 2 delineada do desmonte 3 com gesso

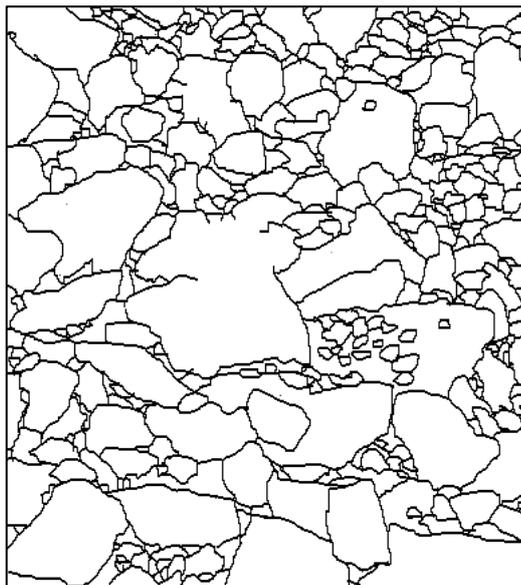
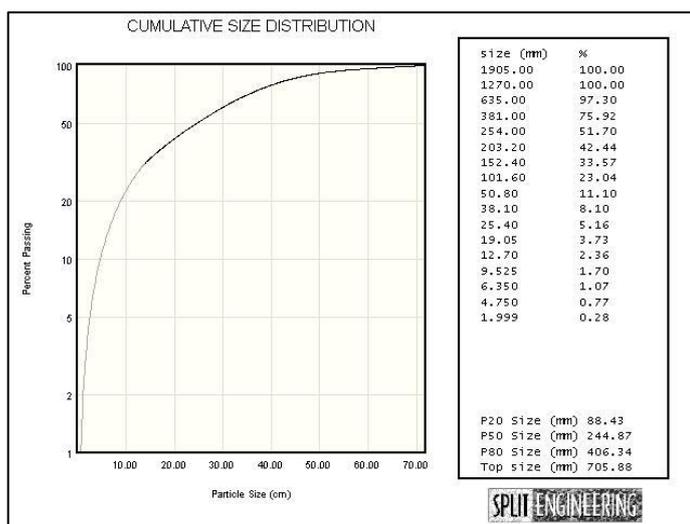


Figura 85: Análise da distribuição granulométrica Imagem 2 do desmonte 3 com gesso



As figuras 86 a 88 mostram respectivamente a terceira foto captada com tamponamento de gesso para análise granulométrica, a delineação da mesma através do programa Split-Desktop e o gráfico referente a sua distribuição granulométrica.

Figura 86: Imagem 3 do desmonte 3 com gesso



Figura 87: Imagem 3 delineada do desmonte 3 com gesso

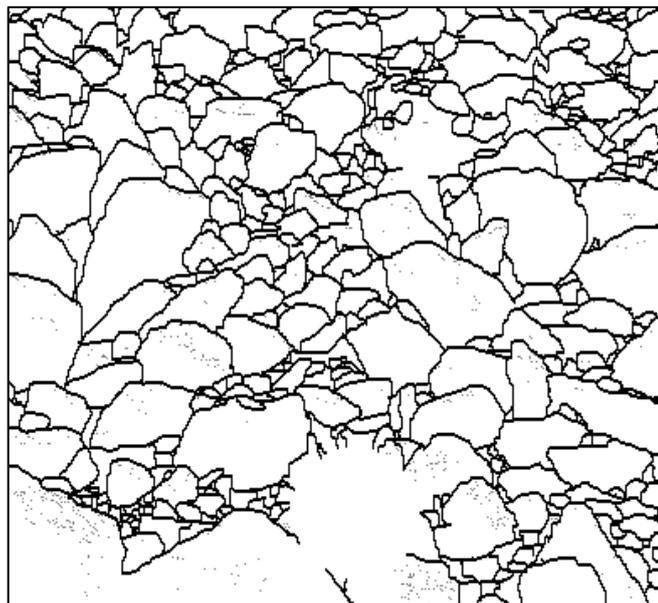
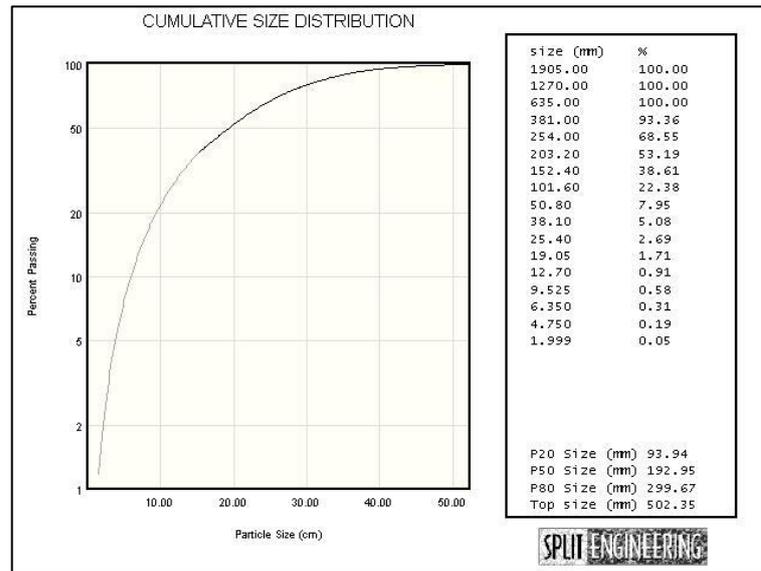


Figura 88: Análise da distribuição granulométrica Imagem 3 do desmante 3 com gesso



As figuras 89 a 91 mostram respectivamente a quarta foto captada com tamponamento de gesso para análise granulométrica, a delimitação da mesma através do programa Split-Desktop e o gráfico referente a sua distribuição granulométrica.

Figura 89: Imagem 4 do desmonte 3 com gesso

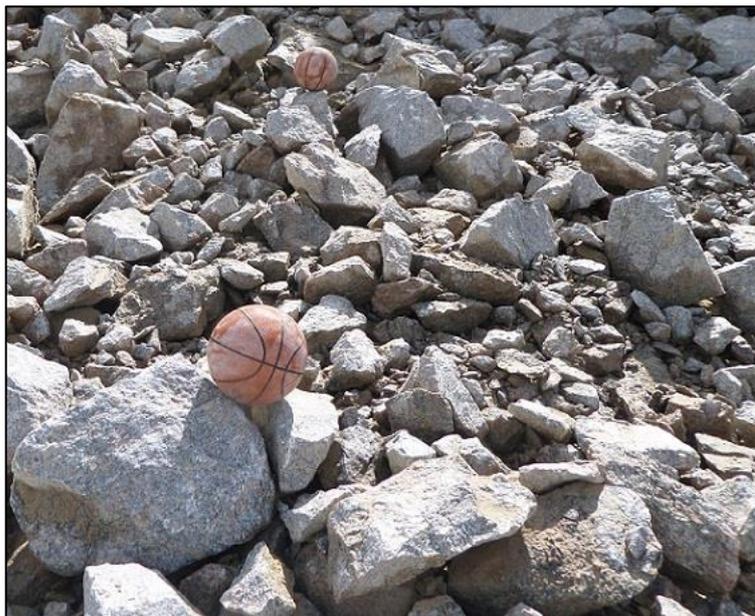


Figura 90: Imagem 4 delineada do desmonte 3 com gesso

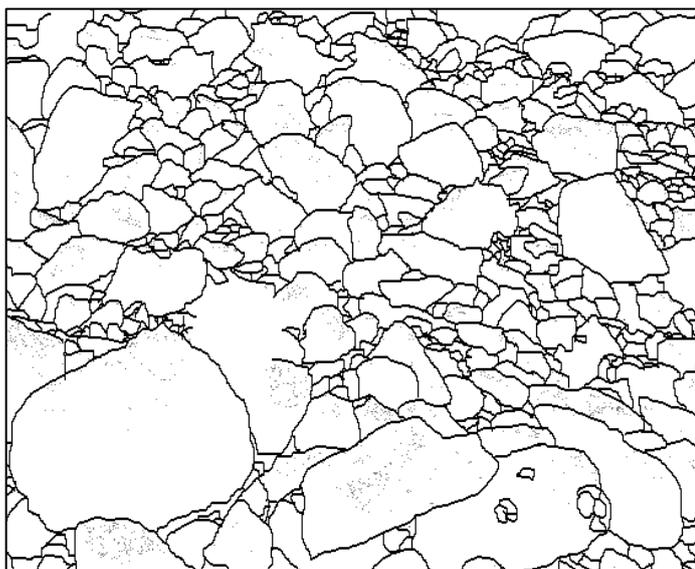
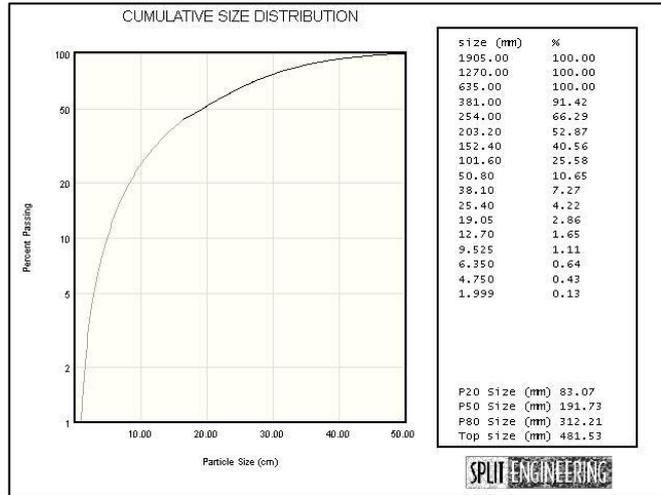


Figura 91: Análise da distribuição granulométrica Imagem 4 do desmonte 3 com gesso



Desmorte III – Tamponamento tradicional

As figuras 92 a 94 mostram respectivamente a primeira foto captada com o tamponamento tradicional para análise granulométrica, a delineação da mesma através do programa Split-Desktop e o gráfico referente a sua distribuição granulométrica.

Figura 92: Imagem 1 do desmorte 3 tradicional



Figura 93: Imagem 1 delineada do desmonte 3 tradicional

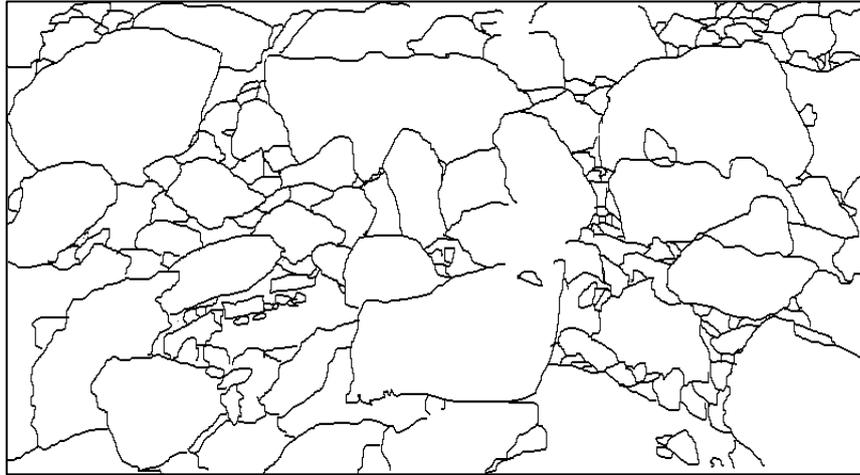
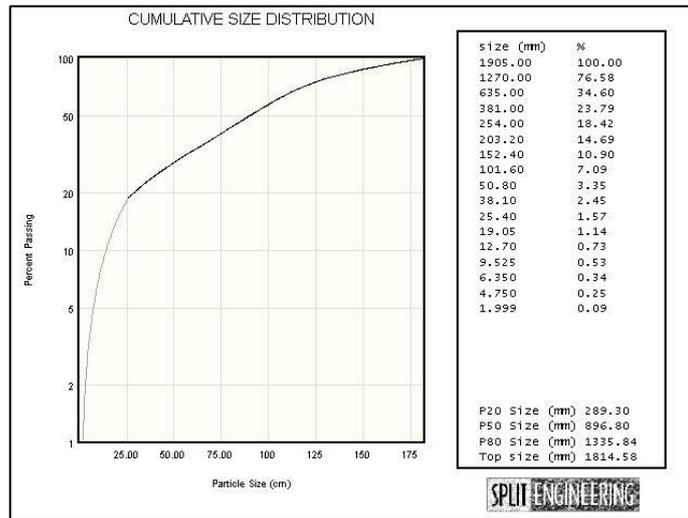


Figura 94: Análise da distribuição granulométrica Imagem 1 do desmonte 3 tradicional



As figuras 95 a 97 mostram respectivamente a segunda foto captada com o tamponamento tradicional para análise granulométrica, a delimitação da mesma através do programa Split-Desktop e o gráfico referente a sua distribuição granulométrica.

Figura 95: Imagem 2 do desmonte 3 tradicional



Figura 96: Imagem 2 delimitada do desmonte 3 tradicional

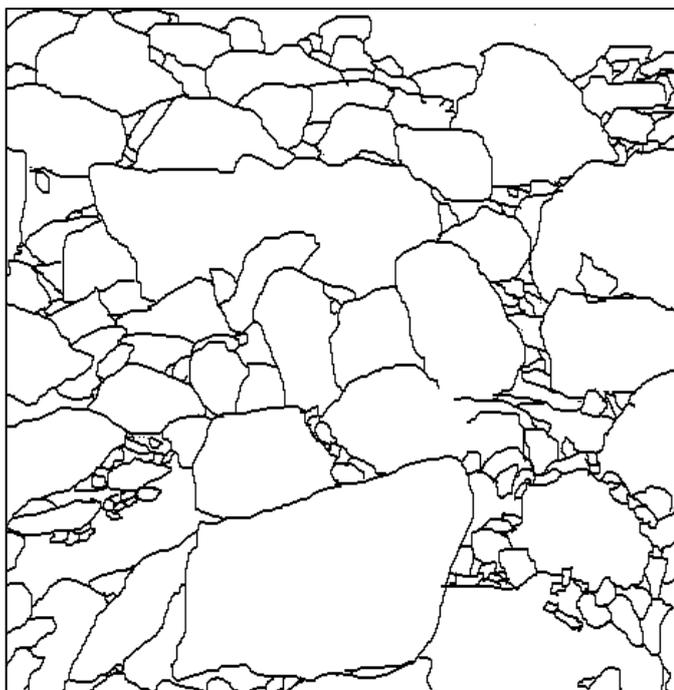
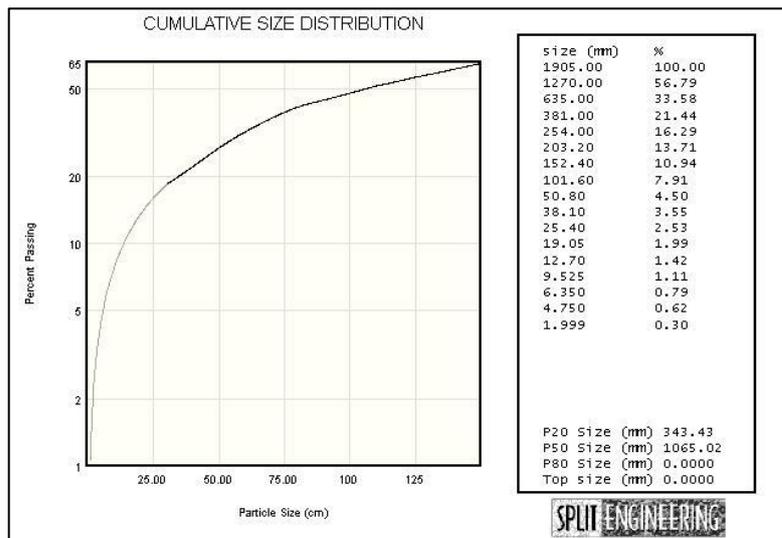


Figura 97: Análise da distribuição granulométrica Imagem 2 do desmonte 3 tradicional



As figuras 98 a 100 mostram respectivamente a terceira foto captada com o tamponamento tradicional para análise granulométrica, a delineação da mesma através do programa Split-Desktop e o gráfico referente a sua distribuição granulométrica.

Figura 98: Imagem 3 do desmonte 3 tradicional



Figura 99: Imagem 3 delineada do desmonte 3 tradicional

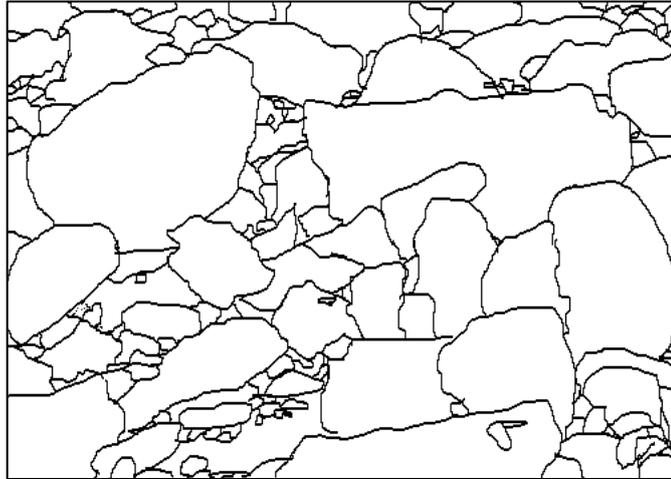
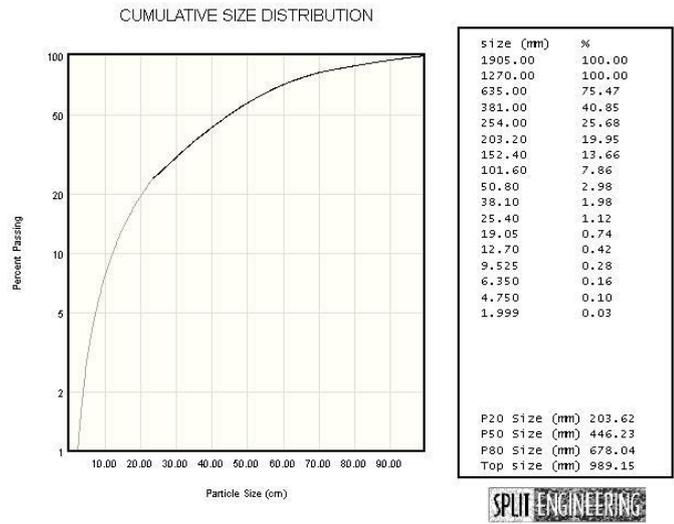


Figura 100: Análise da distribuição granulométrica Imagem 3 do desmonte 3 tradicional



As figuras 101 a 103 mostram respectivamente a quarta foto captada com o tamponamento tradicional para análise granulométrica, a delimitação da mesma através do programa Split-Desktop e o gráfico referente a sua distribuição granulométrica.

Figura 101: Imagem 4 do desmorte 3 tradicional



Figura 102: Imagem 4 delimitada do desmorte 3 tradicional

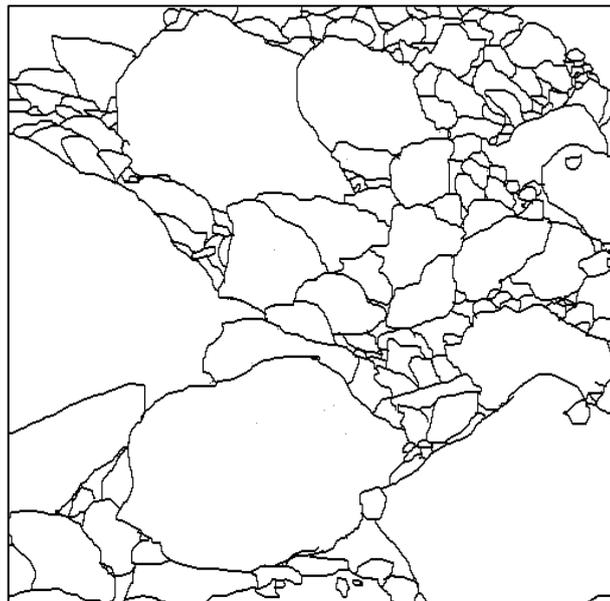
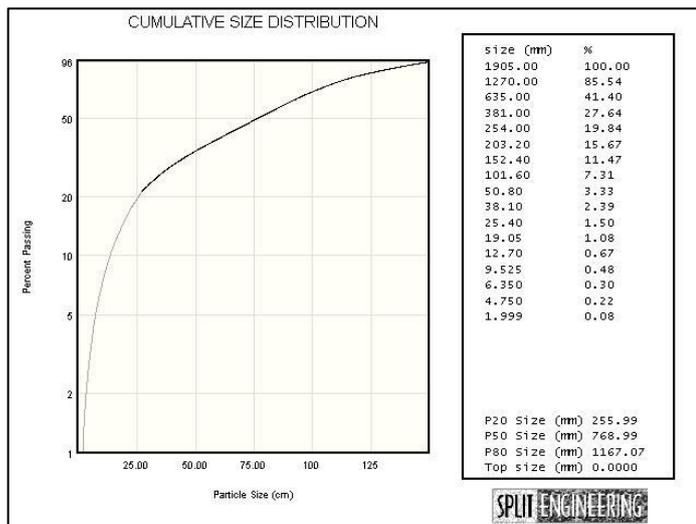


Figura 103: Análise da distribuição granulométrica Imagem 4 do desmonte 3 tradicional



As figuras 104 a 106 mostram respectivamente a quinta foto captada com o tamponamento tradicional para análise granulométrica, a delineação da mesma através do programa Split-Desktop e o gráfico referente a sua distribuição granulométrica.

Figura 104: Imagem 5 do desmonte 3 tradicional

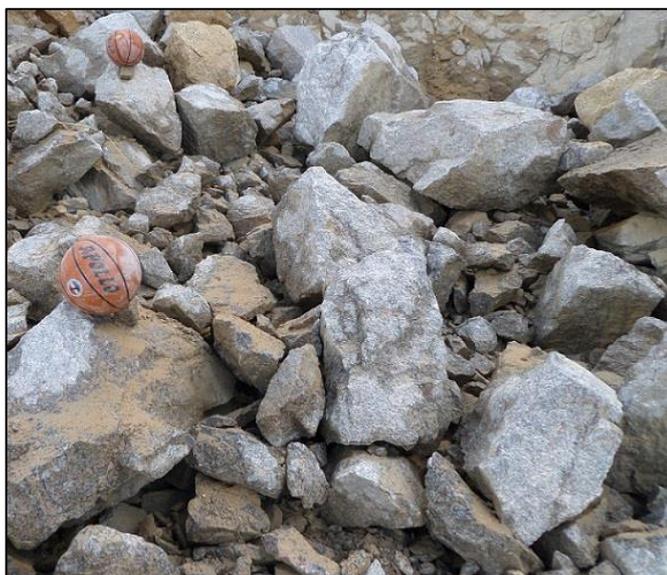


Figura 105: Imagem 5 delineada do desmonte 3 tradicional

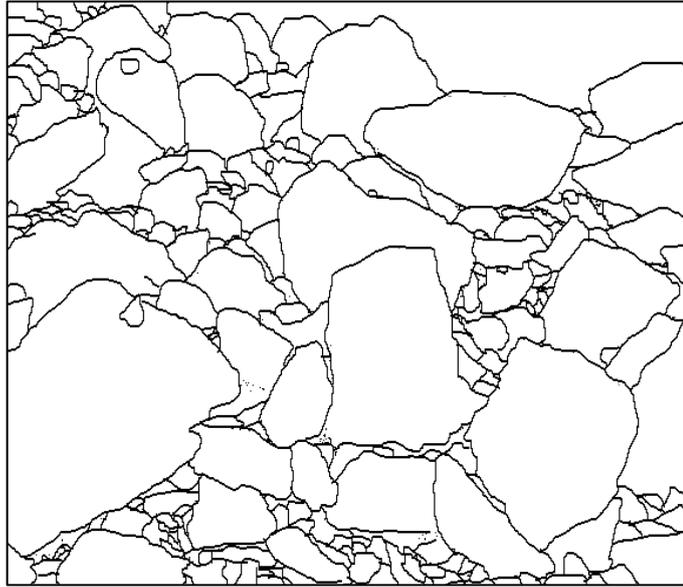


Figura 106: Análise da distribuição granulométrica Imagem 5 do desmonte 3 tradicional

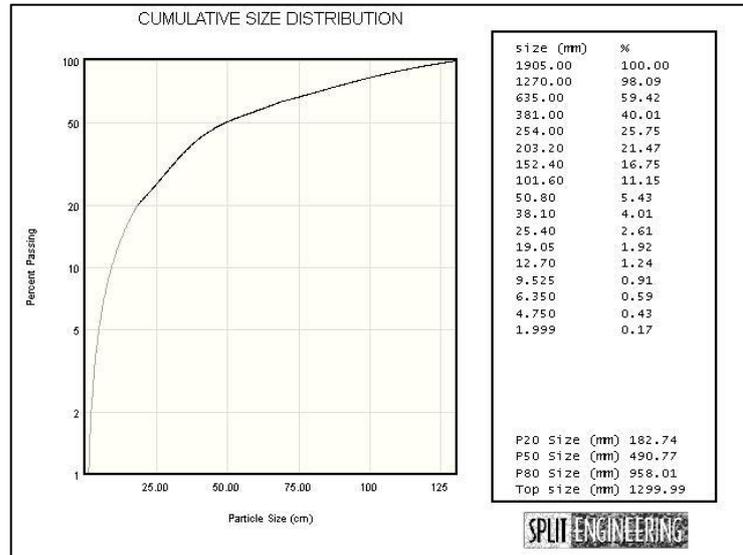


Tabela 14 : Relação de preços: Explosivos e Acessórios

 EIQU ELEPHANT INDUSTRIA QUIMICA LTDA RELAÇÃO DE PREÇOS: ACESSÓRIO, BOOSTER E CORDEL DETONANTE CLIENTE:		
Produto	VALOR FINAL VENDA	IPI
Exel MS Conec. 9ms	13,40	
Exel MS Conec. 17ms	13,40	
Exel MS Conec. 25ms	13,40	
Exel MS Conec. 42ms	13,40	
Exel MS Conec. 75ms	13,40	
Exel MS Conec. 100ms	13,40	
Booster 150g	10,68	
Exel HDT 4m 17ms	11,03	
Exel HDT 4m 25ms	11,03	
Exel HDT 4m 42ms	11,03	
Exel HDT 6m 17ms	11,68	
Exel HDT 6m 25ms	11,68	
Exel HDT 6m 42ms	11,68	
Exel CA 6m 250ms	10,96	
Exel CA 6m 275ms	10,96	
Exel CA 9m 250ms	12,70	
Exel CA 12m 250ms	12,81	
Exel CA 15m 250ms	13,08	
Exel CA 18m 250ms	14,18	
Exel CA 21m 250ms	15,26	
Exel CA 25m 250ms	16,27	
Cordel NP3	0,67	
Cordel NP5	0,75	
Cordel NP10	0,88	
Iniciador Exel Lead In Line 300m	161,99	
Iniciador Exel Lead In Line 500m	254,40	
Espoletopim 1.20m	3,90	20,0%
Encartuchado elegal 2"	5,80	5,0%
Encartuchado elegal 1"	6,40	5,0%
Granulado elegran BD	4,30	5,0%

Fonte: Elephant Indústria Química Ltda.