

**BRUNO LAZARINI**

**DESENVOLVIMENTO DE PROGRAMA COMPUTACIONAL PARA O  
PROJETO E SIMULAÇÃO DA OPERAÇÃO DE DESMONTE DE  
ROCHA POR EXPLOSIVOS EM OBRAS SUBTERRÂNEAS**

Trabalho de Formatura em Engenharia de  
Minas do curso de graduação do Departamento  
de Engenharia de Minas e de Petróleo da  
Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Cesar Sansone

**São Paulo**

**2015**

TF. 2015  
L 457 d

lycus 2752949

INIBRASA JOURNAL

DEDALUS - Acervo - EPMI



31700010003

#### FICHA CATALOGRÁFICA

**Lazarini, Bruno**

**Desenvolvimento de programa computacional para o projeto e simulação da operação de desmonte de rocha por explosivos em obras subterrâneas / B. Lazarini -- São Paulo, 2015.**

**56 p.**

**Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Minas e Petróleo.**

**1.Galerias 2.Explosivos em minas 3.Desmonte de rochas  
4.Mathematica (Aplicações; Simulação Computacional)  
I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de  
Engenharia de Minas e Petróleo II.t.**

## RESUMO

A técnica denominada “Desmonte por Explosivos” se constitui numa das mais importantes ferramentas para a escavação de rocha em aplicações relacionadas à lavra de minas e à construção civil. Nesta técnica furos dispostos em uma distribuição geométrica conveniente, são carregados com explosivos e detonados em uma sequência pré-determinada, de modo a propiciar uma fragmentação adequada da rocha. O projeto de uma operação de desmonte de rochas por explosivos é denominado “Plano de Fogo”, que é essencial na busca de eficiência da operação de desmonte. Esse planejamento é feito a partir de modelos empíricos, devido à elevada quantidade de fatores envolvidos, de difícil quantificação e análise. O objetivo da pesquisa é desenvolver um programa computacional que utilize um modelo empírico de cálculo específico da literatura para o projeto e a simulação de operações de desmonte subterrâneo a partir de algumas premissas e parâmetros pré-definidos, resultando em estimativas iniciais das principais especificações do projeto e uma representação gráfica do plano de fogo. O programa foi validado a partir de resultados empíricos contidos em fontes de bibliografia e se mostrou útil para avaliações preliminares de diferentes alternativas de projeto e análise de como alguns fatores influenciam no dimensionamento do plano de fogo.

**Palavras-Chave:** Desmonte. Rocha. Explosivos. Subterrâneo. Simulação Computacional.  
Plano de Fogo

## ABSTRACT

The rock blasting technique is one of the most important tools for rock excavation in applications such as mining extraction and civil constructing. In this technique, a series of holes are made in a convenient geometrical pattern, loaded with explosives and blasted in a predetermined sequence. The project of rock blasting is called "Blast Design", which is essential to the pursuit of efficiency in the blasting operation. The calculations for the blast design are based on empirical models, since there are many factors involved, some hard to quantify and analyze. The objective of the research is to develop a software that applies an specific empirical model from the literature to project and simulate underground blasting operations through some premises and predefined parameters, resulting in a initial estimative of the main project specifications and a graphic representation of the blast design. The software was validated by empiric results in bibliographic sources and demonstrated its usefulness to preliminary evaluations of different project alternatives and to analyze how some factors influence the blast design.

**Keywords:** Blasting. Rock. Explosives. Underground. Computational Simulation. Blast Design.

# SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	6
1.1 OBJETIVO.....	8
1.2 JUSTIFICATIVA.....	8
<b>2. REVISÃO DE LITERATURA</b> .....	9
2.1 MECÂNICA DE FRAGMENTAÇÃO .....	9
2.2 DESMONTE SUBTERRÂNEO .....	10
2.3 DIMENSÕES E GEOMETRIA DO TÚNEL .....	11
2.4 EXPLOSIVOS.....	12
2.5 DIÂMETRO, PROFUNDIDADE E CARREGAMENTO DOS FUROS .....	14
2.6 ENCARGO E ESPAÇAMENTO.....	15
2.7 REGIÕES DE DESMONTE .....	16
<b>2.7.1 Furos do Pilão</b> .....	17
2.7.1.1 Pilão em leque .....	18
2.7.1.2 Pilão em cunha .....	18
2.7.1.3 Pilão de furos paralelos .....	19
<b>2.7.2 Furos de contorno</b> .....	21
<b>2.7.3 Furos de expansão</b> .....	22
<b>2.7.4 Furos de levante</b> .....	23
2.8 SEQUÊNCIA DE DETONAÇÃO .....	23
<b>3. MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	25
3.1 SOFTWARE MATHEMATICA .....	25
3.2 MODELO DE DIMENSIONAMENTO .....	25
<b>3.2.1 Profundidade e avanço</b> .....	26
<b>3.2.2 Desvio de perfuração</b> .....	26
<b>3.2.3 Pilão</b> .....	26
<b>3.2.4 Furos de levante</b> .....	30
<b>3.2.5 Furos de contorno</b> .....	31
<b>3.2.6 Furos de expansão</b> .....	32
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	36
<b>5. CONCLUSÕES</b> .....	44
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	45

**APÊNDICE – Código e interface do programa com exemplo calculado..... 46**

## 1. INTRODUÇÃO

O desmonte por explosivos é uma técnica de grande importância de escavação em rochas utilizada tanto para construção civil quanto para lavra de minas a céu aberto e subterrâneas. O processo de desmonte por explosivos consiste na utilização de uma quantidade previamente calculada de explosivos em furos dispostos em uma geometria pré-definida com o intuito de fragmentar um determinado volume de rocha.

O planejamento da operação de um desmonte por explosivos é denominado “Plano de Fogo”. Essa etapa consiste em uma das primeiras etapas da produção efetiva do minério a ser explorado e é essencial para a operação da mina como um todo, pois influencia todos os processos subsequentes ao desmonte.

No plano de fogo, os furos são dispostos em uma distribuição geométrica conveniente e carregados com explosivos selecionados para o tipo de operação, sendo posteriormente detonados em uma sequência bem definida de forma que os seguintes resultados sejam obtidos:

- Fragmentação da rocha adequada que permita o seu eficiente carregamento, transporte, manuseio e beneficiamento;
- Formação de uma pilha de rocha desmontada com formato adequado;
- Danos pouco significativos ao maciço rochoso remanescente;
- Minimização de impactos ambientais;
- Minimização dos custos, inclusive os das operações subsequentes.

Um planejamento ineficiente pode comprometer toda a operação da mina, danificando a estrutura da escavação, aumentando o custo operacional da operação de perfuração e desmonte, aumentando o custo de energia utilizada na cominuição caso a fragmentação não seja adequada, além de outras consequências.

O projeto do desmonte de rochas por explosivos envolve a definição, segundo critérios técnicos e econômicos, de parâmetros como o tipo de explosivo e os acessórios de detonação, as dimensões dos furos, sua distribuição geométrica e a sequência temporal de detonação. Desta forma, um projeto tecnicamente adequado é aquele que maximiza a utilização da energia de detonação, canalizando-a para a fragmentação adequada da rocha (incluída aqui a sua projeção e formação da pilha de rocha desmontada) e preservando a estrutura da escavação. Todavia, sempre uma parcela da energia explosiva produz efeitos indesejáveis

como: vibrações de terreno, alta pressão atmosférica (tanto na faixa audível como na não audível), ultra-lançamento e emissão de material particulado e gases tóxicos. Esses também são fatores a serem considerados no planejamento da operação.

Nas obras de mineração e da construção civil o projeto do plano de fogo se baseia em modelos empíricos de conhecimento, devido principalmente à grande dificuldade na aplicação dos modelos teóricos, em razão da complexidade dos mecanismos físicos atuantes e do grande número de variáveis. Assim, os Planos de Fogo são sucessivamente adaptados às condições particulares do maciço rochoso a ser escavado e às condições operacionais da obra.

Um plano de fogo para ser bem caracterizado, precisa indicar os valores do tipo de pilão, encargo, espaçamento, profundidade dos furos, diâmetro da furação, disposição dos furos, quantidade de furos em cada fogo, tipo de explosivo, peso do explosivo em cada furo (com isto ficam caracterizados a altura da coluna de explosivo e do tampão), razão de carregamento, tipo de acessório usado, sequência de detonação dos furos, esquema de ligação das espoletas ou do cordel detonante, linha de tiro (comprimento e bitola), fonte de energia elétrica, etc.

Na mineração, com a escassez cada vez maior de recursos minerais próximos da superfície e preocupação com o impacto ambiental, a tendência é um crescimento cada vez maior das operações subterrâneas. Dessa forma, o aprimoramento dos projetos de plano de fogo subterrâneo, através do estudo de diferentes alternativas e testes práticos, vai adquirir grande importância para reduzir custos e aumentar a produtividade das operações de mineração. Com essa perspectiva, o foco neste trabalho se concentra no dimensionamento de um plano de fogo de uma frente de galeria subterrânea.

Existem diversos métodos para a realização de uma operação de desmonte subterrâneo com diferentes modelos de cálculo. Para simplificação e praticidade no desenvolvimento do programa computacional foi escolhido um modelo específico para um determinado método de desmonte.

Com a crescente mecanização das atividades de perfuração e busca de maior eficiência e praticidade, a escolha do método tem se concentrado nos “Pilões de Furos Paralelos”, que apresentam maior eficiência e rapidez na execução da perfuração, já que não há necessidade de mudança no ângulo das lanças de perfuração. Essa técnica possui alguns métodos com diferentes geometrias em relação à disposição dos furos, sendo a de quatro seções uma das mais utilizadas. Tendo em vista a maior aplicabilidade e simplicidade nos cálculos do dimensionamento, o modelo escolhido para este trabalho, que será detalhado posteriormente, utiliza como base o método de pilão de furos paralelos com abertura de quatro seções.

## 1.1 OBJETIVO

O objetivo do trabalho proposto é o desenvolvimento de um programa computacional que seja capaz de dimensionar de forma simplificada um projeto de plano de fogo em uma operação de desmonte subterrâneo através de um modelo empírico da literatura. A partir de alguns dados de entrada escolhidos pelo usuário, o programa calcula os principais parâmetros da operação de desmonte de forma a se ter uma estimativa inicial da disposição dos furos, da perfuração necessária e do consumo de explosivos, servindo como uma ferramenta de análise de diferentes alternativas do projeto do plano de fogo.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

Como os softwares utilizados nas empresas de mineração apresentam custo relativamente alto e apresentam certa complexidade na utilização, um software de simples utilização serve de apoio a atividades didáticas em disciplinas de graduação da Escola Politécnica da USP permitindo uma análise simplificada sobre como alguns dos fatores do projeto influenciam no dimensionamento do plano de fogo. Além disso, com uma posterior sofisticação do software, torna-se possível a realização de estudos futuros sobre a otimização do processo de desmonte de rocha por explosivos, conduzindo a análises mais complexas que possibilitem uma melhoria nos resultados do desmonte e redução dos custos gerais da lavra de minas ou de obras em rocha no geral.

## 2. REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 MECÂNICA DE FRAGMENTAÇÃO

O objetivo da detonação é a fragmentação do maciço rochoso em pedaços menores para escavação e transporte do material. A fragmentação da rocha envolve basicamente dois processos: faturamento radial e ruptura por flexão.

A etapa inicial de fragmentação da rocha ocorre devido à formação de uma onda de choque resultante da explosão, que se move a uma velocidade, de 3.000-5.000 m/s, em função da densidade da rocha. Essa onda é responsável pela formação de fraturas radiais na área adjacente ao furo devido a esforços de tração. A onda se propaga até a face livre de rocha, é refletida e retorna ao ponto inicial. Quando a onda de choque passa por um ponto onde há alteração da densidade da rocha, parte dela também é refletida e parte segue até a face livre.

A fragmentação ocorre de forma adequada se há força suficiente na onda de compressão para que esta se propague até a face livre, reflita e retorne ao ponto inicial, superando as resistências à tração da rocha presente na porção intermediária. Os pontos mais afastados da face livre sofrem esforços de tração, causando a formação de pequenas fraturas. Se a energia liberada não é suficiente para a onda de compressão realizar o percurso completo, ocorrerá a formação de “matacos” no desmonte. Se a energia for muito alta, ocorre fragmentação excessiva ocasionando em dificuldades operacionais nas operações subsequentes.

A onda de choque não é efetivamente a responsável pela quebra da rocha, mas é responsável para prover as condições básicas para o processo de desmonte, já que boa parte da energia da onda é dissipada. Segundo Langefors e Kihlstrom (1963), cerca de 3% da energia da onda de choque é efetivamente aproveitada.

Na segunda etapa na fragmentação da rocha ocorre ruptura da rocha por flexão. Esta ocorre pela rápida expansão dos gases formados na explosão, que exercem pressão expandindo as fraturas radiais e fazendo com que elas se propaguem até a face livre pela linha de menor resistência. A pressão aplica uma força que causa a ruptura da rocha por flexão e é responsável pela quebra da rocha na direção perpendicular ao furo. Esse processo funciona como uma ruptura de viga por flexão. Nesse caso o gás exerce a força responsável pela flexão. A partir do entendimento do funcionamento da ruptura de viga por flexão, pode-se notar a influência da relação entre profundidade do furo (comprimento da viga) e encargo

(altura da viga). Segundo Ash e Smith (1976), a relação entre profundidade do furo e encargo que fornece a melhor fragmentação é em torno de 3:1.

## 2.2 DESMONTE SUBTERRÂNEO

A construção de túneis pode ter sido uma das primeiras atividades de engenharia realizada pelos seres humanos e cada vez mais ganha maior importância na engenharia moderna. Com o aumento da população em áreas urbanas, a necessidade de túneis para unidades de armazenamento, transporte de pessoas, água, cabos elétricos e fibras ópticas aumenta gradualmente. Na área de mineração, com a escassez dos recursos perto da superfície e uma necessidade de redução de impacto ambiental, as minas subterrâneas tendem a aumentar cada vez mais. Para essas aplicações o uso do desmonte de rochas por explosivos é essencial.

O desmonte subterrâneo é uma operação bem mais complicada que o desmonte a céu aberto, pois a única face livre é a própria frente de escavação, o que exige um maior consumo de explosivos e uma concentração de carga maior. Como visto anteriormente, a face livre é de extrema importância para a fragmentação da rocha, pois permite a reflexão das ondas de compressão e a ruptura do maciço rochoso. Dessa forma, quanto mais faces livres, mais fácil será a fragmentação e menor a concentração de carga necessária. Além disso, em operações subterrâneas, as restrições em relação à liberação de gases tóxicos são maiores, exigindo uma escolha adequada de explosivos.

A base teórica para desmonte subterrâneo geralmente é baseado numa comparação com desmonte em bancada com a adição de alguns fatores que indicam uma maior necessidade de carga para detonação.

Segundo o Rock Excavation Handbook (1999), os principais fatores que influenciam o desmonte subterrâneo são:

- Dimensões e geometria do túnel;
- Diâmetro e profundidade dos furos;
- Resultados qualitativos desejados;
- Condições geológicas e propriedades mecânicas da rocha;
- Tipos de explosivos disponíveis e meios de detonação utilizados;
- Restrições à vibração;
- Presença de água subterrânea;

- Equipamento de perfuração utilizado.

Cada fator vai influenciar de diferentes formas o dimensionamento do plano de fogo e dependendo da operação cada um vai possuir uma importância relativa diferente. A construção de um modelo de cálculo e de uma rotina computacional que leva em conta grande parte desses fatores é muito complexa e se torna inviável para os objetivos propostos. Para se atingir um dimensionamento com ótimos resultados, são necessárias diversas análises através de extensa experiência prática, que são peculiares para cada obra. Para efeitos deste trabalho alguns dos fatores foram desconsiderados no cálculo do modelo, que em alguns casos podem ser essenciais para a realização de um dimensionamento real, como os aspectos geológicos da rocha escavada. Apesar disso, o modelo aplicado ainda sim possui importância, servindo como um estudo inicial para a estimativa de alguns parâmetros importantes para avaliar diferentes alternativas de projeto.

Os principais parâmetros levados em conta no programa desenvolvido são aqueles utilizados no modelo empírico escolhido, detalhado posteriormente, que incluem principalmente: dimensões do túnel, tipo de explosivo utilizado, diâmetro, disposição e carregamento dos furos.

### 2.3 DIMENSÕES E GEOMETRIA DO TÚNEL

Os túneis podem ser de diversas formas, sendo as principais: quadrada, retangular, circular e “ferradura”. O mais utilizado atualmente para túneis é o formato de “ferradura” e vai ser o caso de estudo deste trabalho. Segundo Hemphill (1981), a razão pela escolha se deve ao fato de o teto formar um arco, que faz com que as tensões se distribuam melhor diminuindo os esforços solicitantes nas extremidades da escavação, permitindo um auto-suporte da estrutura mais eficaz. Além disso, o chão plano permite uma maior facilidade nas operações dos equipamentos. A figura 2.1 representa uma comparação da distribuição de tensões entre dois tipos de escavações (retangular e “ferradura”). Pode-se notar que há uma concentração de tensões maior na escavação retangular, representada pela cor vermelha, devido aos ângulos retos. Na escavação com formato de “ferradura” a distribuição é mais uniforme, garantindo melhor estabilidade à escavação.

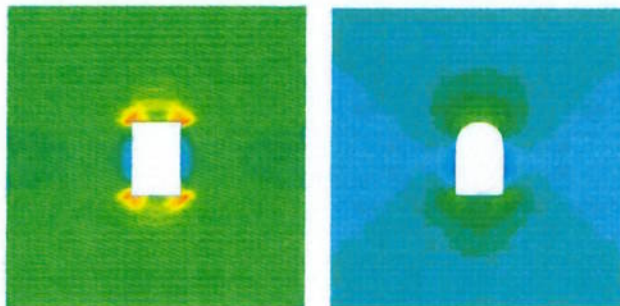


Figura 2.1 – Concentração de tensões em escavações retangulares e em formato de ferradura

A área do túnel influencia diversos fatores no desmonte como: método de perfuração utilizado, quantidade de furos necessários, avanço da escavação, disposição, espaçamento e diâmetro dos furos, carregamento específico, entre outros.

## 2.4 EXPLOSIVOS

Explosivos são substâncias ou misturas de substâncias químicas, que possuem a propriedade de, através de um estímulo conveniente, sofrerem reações químicas numa velocidade muito rápida, transformando-se em gases e liberando grandes quantidades de energia em um intervalo muito curto de tempo. A alta liberação de energia não se deve à energia presente no explosivo, mas sim à velocidade que a reação química ocorre. A explosão pode ser dividida em quatro fases: liberação de gás, calor intenso, elevada pressão e explosão.

A capacidade de fornecer uma enorme quantidade de energia em uma área limitada da rocha é a característica essencial dos explosivos para sua utilização nas escavações.

As principais propriedades dos explosivos são: força (quantidade de energia liberada em relação a um explosivo de nitroglicerina com 100% de força), velocidade de detonação, densidade, resistência à água, resistência ao armazenamento, resistência ao choque, sensibilidade, exsudação (desprendimento de material líquido de sua massa).

Existem diversos tipos de explosivos para diferentes aplicações. Para a escolha do tipo a ser utilizado na operação deve-se analisar alguns parâmetros como: características da rocha, tipo da operação, equipamento de perfuração utilizado, fragmentação desejada, entre outros.

Existem diversos tipos de explosivos utilizados em desmontes subterrâneos. E a escolha em cada caso pode variar de acordo com restrições específicas. Segundo Persson, Holmberg e Lee (1993), o principal fator na escolha é a força de detonação do explosivo, que depende do tipo de explosivo, do método de desmonte utilizado, do material a ser desmontado, entre outros fatores. Para medições precisas seria necessária a realização de

diversos testes que consomem muito tempo e dinheiro. Dessa forma, é necessária uma simplificação para estimativa da força de um explosivo. Um método bastante utilizado é o de Langefors-Kihlstrom, desenvolvido a partir de experimentos empíricos, que resultam na equação (Persson, Holmberg e Lee, 1993):

$$S = \frac{5}{6} \frac{Q_v}{Q_{vo}} + \frac{1}{6} \frac{V}{V_o} \quad (2.1)$$

A variável S se refere à força relativa do explosivo em relação a um explosivo de referência (LFB-dinamite),  $Q_v$  (MJ/kg) é a energia de explosão para 1 kg do explosivo utilizado e V (L) é o volume de gás liberado nas CNTP a partir de 1 kg do explosivo utilizado. Sendo  $Q_{vo} = 5$  MJ e  $V_o = 850$  L. A tabela 2.1 mostra a força de alguns dos explosivos mais utilizados.

Explosive	$Q_v$ (MJ/kg)	V (m <sup>3</sup> /kg)	$s_{LFB}$	$s_{ANFO}$	Density (kg/m <sup>3</sup> )
LFB Dynamite	5.00	0.850	1.00	1.19	1450
Dynamex M	4.7	0.88	0.94	1.13	1400
ANFO	3.91	0.973	0.84	1.00	900
TNT	5.1	0.610	0.97	1.15	1640
PETN	6.38	0.717	1.20	1.43	1670
Nabit	4.42	0.904	0.91	1.08	1200
Gurit A	3.8	0.400	0.71	0.85	1000
NG	6.27	0.716	1.19	1.42	1590
Emulite 150	4.1	0.84	0.85	1.42	1200
Iremite 62	3.75	0.852	0.79	0.94	1180
Iregel RX	2.68	0.941	0.63	0.75	1200
Dynex 205	4.00	0.863	0.84	1.00	1170
"Powergel" 2131	3.29	0.810	0.71	0.84	1150
Kimit 80	4.10	0.74	0.89	1.06	1100
Emulet 20	2.4	1.12	0.61	0.73	220

Tabela 2.1 – Dados de diferentes explosivos, Fonte: Langefors e Kihlstrom (1963)

A tabela serviu de base para os cálculos realizados no programa computacional. Portanto a escolha dos explosivos no trabalho se restringe aos tipos acima.

Outro parâmetro essencial utilizado para os cálculos de dimensionamento referente ao tipo de explosivo é a concentração de carga, que é calculada pela seguinte equação:

$$l = \pi \frac{D^2}{4} \rho \text{ (kg/m}^3\text{)} \quad (2.2)$$

Sendo D (m) o diâmetro do cartucho de explosivo ou do furo caso o explosivo seja bombeável e  $\rho$  (kg/m<sup>3</sup>) a densidade do explosivo.

## 2.5 DIÂMETRO, PROFUNDIDADE E CARREGAMENTO DOS FUROS

O diâmetro dos furos é um fator importante do dimensionamento de um plano de fogo. É determinado pelo equipamento de perfuração utilizado e seu tamanho influenciará na quantidade de furos necessária no desmonte. Quanto maior o diâmetro dos furos, menor a quantidade de furos necessária. Essa diferença não é tão relevante para túneis pequenos, mas se torna significativa para túneis de grandes áreas. A figura 2.2 representa a influência da área e do diâmetro do número de furos necessários. Furos de diâmetro grande podem economizar a perfuração necessária, mas como a quantidade de explosivo carregada por furo é maior, podem ocorrer danos à escavação. Por outro lado, se os furos forem de diâmetro muito pequeno, o risco de desvios de perfuração são maiores e pode ocorrer ruptura das hastes de perfuração. Nas escavações de túneis os diâmetros mais utilizados atualmente variam entre 38 e 51 mm (Rock Excavation Handbook, 1999).

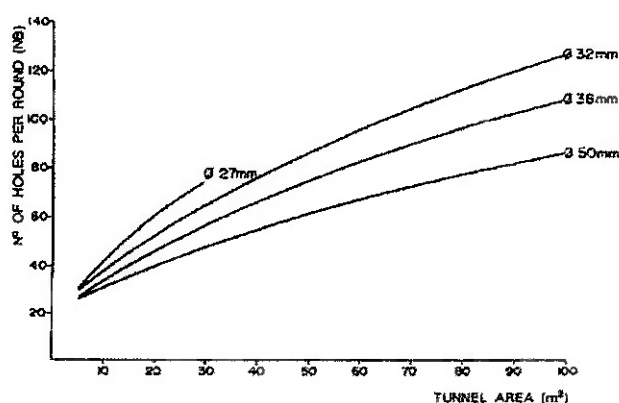


Figura 2.2 – Número de furos x área do túnel para diferentes diâmetros de furos. Fonte: Jimeno C., Jimeno E. e Carcedo (1995).

O carregamento dos furos pode ser dividido em três partes principais: carga de fundo, carga de coluna e tampão. A carga de fundo possui uma razão de carregamento ( $\text{kg/m}^3$ ) maior, pois a rocha a ser detonada está mais confinada. A carga de coluna fica acima da carga de fundo, possui uma razão de carregamento menor e constitui a maior parte do carregamento do furo. Já o tampão consiste na parte que não é carregada com explosivos situada na parte mais próxima da face escavada. É carregada com brita, areia ou outro material com a função evitar liberação excessiva de gases e ultra-lançamento de fragmentos de rocha. Segundo o Rock Excavation Handbook (1999), o diâmetro ideal do material utilizado no tampão é de 0,05 vezes o tamanho do diâmetro do furo. A figura 2.3 representa a distribuição do carregamento de um furo de um desmonte em bancada.

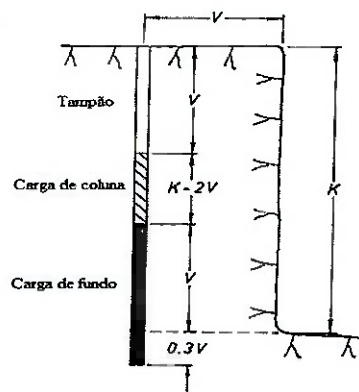


Figura 2.3 – Exemplo do carregamento de desmonte em bancada. Adaptado de Langefors e Kihlstrom (1963).

A profundidade do furo vai ser definida pelo equipamento de perfuração utilizado e pelo diâmetro dos furos. A precisão dos furos é de extrema importância para resultados satisfatórios, pois se os desvios forem muito grandes, toda a operação de desmonte pode ser comprometida. Uma perfuração precisa vai economizar metros de furos e consumo de explosivos, providenciar bons resultados na fragmentação da rocha, na formação da pilha, no nível de vibrações gerado, no nivelamento do chão e na manutenção de um contorno regular das paredes.

Os desvios de perfuração podem ser considerados como a soma de dois desvios:

- Desvio de emboque  $\alpha_1$  (m) causado pelo mau posicionamento da perfuratriz na superfície da rocha;
- Desvio angular  $\alpha_2$  (m/m) causado pelo erro na direção da perfuração inicial.

## 2.6 ENCARGO E ESPAÇAMENTO

O encargo ou afastamento é definido como a menor distância do furo até uma face livre quando o furo é detonado, ou seja, a distância entre diferentes fileiras ou regiões do plano de fogo. A escolha do encargo é uma das mais importantes e primeiras decisões no dimensionamento de um desmonte, pois influencia diretamente na mecânica de fragmentação da rocha e na efetividade do desmonte. Segunda Tatiya (2005), se os encargos forem muito pequenos, ocorrerá ultra-lançamento de rocha, elevados níveis de pressão dos gases e fragmentação excessiva. Se os encargos forem muito grandes, a fragmentação será insuficiente ocasionando a formação de “matacos”, o nível de vibrações será alto, danos podem ocorrer à estrutura ao redor da escavação e poderá ocorrer ultra-lançamento de rocha e elevados níveis de pressão dos gases.

O espaçamento se refere à distância entre furos de mesma fileira ou região. É determinado a partir do encargo calculado e, se mal dimensionado, pode gerar fragmentação inadequada da rocha. Em desmonte de túneis, o espaçamento geralmente varia de acordo com a região da face do túnel em que o furo está localizado. Regiões que exigem carregamento de explosivos menor (furos do teto) ou que apresentam maior resistência ao desmonte devido ao seu posicionamento (furos do chão), necessitam de espaçamentos menores para garantir uma fragmentação adequada.

## 2.7 REGIÕES DE DESMONTE

Para tornar os cálculos do dimensionamento mais fácil a área do túnel é dividida em cinco regiões (Persson, Holmberg e Lee, 1993):

- Furos do pilão;
- Furos de expansão ou realce superior;
- Furos de expansão ou realce lateral;
- Furos de contorno;
- Furos de levante.

Os furos de diferentes regiões exigem abordagens diferentes nos cálculos devido às suas peculiaridades. A figura 2.4 ilustra a divisão de cada região na área do túnel.

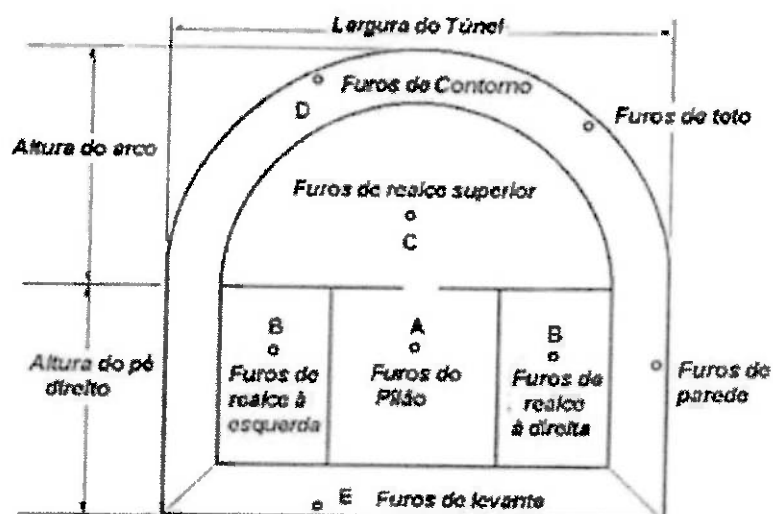


Figura 2.4 – Regiões de desmonte. Fonte: Ayres e Hennies (1997)

### 2.7.1 Furos do Pilão

No desmonte subterrâneo a única face livre disponível é a própria frente da escavação. Para atingir resultados satisfatórios além do maior consumo específico de explosivo e confinamento das cargas, um furo denominado pilão deve ser aberto no qual a rocha em volta deste possa ser quebrada. Esse furo atua como uma nova face livre.

O objetivo do pilão é criar na rocha rigidamente confinada, superfícies livres para permitir a retirada do restante da rocha da seção. Dessa forma, a criação de um pilão apropriado é uma pré-condição para obtenção de uma detonação satisfatória. A escolha do tipo de pilão é determinada pelo tamanho do túnel, pelo equipamento de perfuração disponível e pelo avanço desejado (Persson, Holmberg e Lee, 1993).

O posicionamento do pilão pode influenciar de várias maneiras o resultado do desmonte. Permitindo o controle do tamanho da pilha e da dispersão do material desmontado. Segundo Johansen (2000), o pilão locado na parte baixa da seção diminui a projeção de material e aumenta a altura da pilha. Enquanto um pilão central facilita o posicionamento dos furos adjacentes e aumenta a eficiência do avanço. Em qualquer situação, porém, a recomendação é a da alocação do pilão na zona de menor fissuramento natural da rocha, para que ocorra a maximização do efeito do explosivo. O pilão é normalmente posicionado verticalmente no centro ou na porção lateral da face e horizontalmente na linha central ou um pouco abaixo da linha central do túnel (Rock Excavation Handbook, 1999).

Os pilões podem ser divididos em dois grupos:

- Pilões de furos desviados;
- Pilões de furos paralelos.

Os pilões de furos desviados eram utilizados com maior frequência antigamente, mas tem caído em desuso devido à dificuldade na perfuração dos furos. Segundo C. Jimeno, E. Jimeno e Carcedo (1995), os furos desviados possuem como vantagens o menor consumo de explosivos e a possibilidade de orientar os furos na direção de descontinuidades da seção, facilitando a fragmentação.

Dentre os pilões de furos desviados há dois métodos principais: o pilão em leque e o pilão em cunha.

### 2.7.1.1 Pilão em leque

Era muito utilizado antigamente, mas como exige uma perfuração complicada, atualmente não é muito utilizado. O princípio desse pilão é realizar uma abertura similar à uma trincheira através do túnel. Segundo Johansen (2000), este método é eficiente na quantidade de explosivos utilizada e requer um túnel largo que limita o avanço por detonação. A perfuração assimétrica faz com que o pilão seja menos eficiente quando aplicado com equipamentos modernos de perfuração, mas ainda é utilizado em túneis curtos e com equipamentos de perfuração de pouca profundidade.

### 2.7.1.2 Pilão em cunha

Trata-se de um método tradicional no qual os furos são feitos obliquamente à face do túnel de forma simétrica. Perdeu popularidade com a vasta adoção do uso de pilões de furos paralelos e longos avanços (Rock Excavation Handbook, 1999). O encargo utilizado aumenta com a diminuição dos ângulos de perfuração. Para longos avanços, o método requer maior quantidade de explosivos e perfuração se comparado ao pilão em leque. Necessita de menos metros de furos em relação ao método de furos paralelos. Conseqüentemente, é mais recomendado para túneis largos. Além disso, para túneis estreitos, o avanço pode ser menor que um terço da profundidade do túnel (Rock Excavation Handbook, 1999). A detonação arremessa a rocha fragmentada para mais longe do túnel se comparado a outros métodos, dificultando a realização de limpeza do teto e da face, aumentando o tempo entre os ciclos de desmonte (Johansen, 2000). O lançamento maior também pode causar danos aos dutos de ventilação próximos à face.

A figura 2.5 representa exemplos de perfurações com pilões em cunha e em leque.

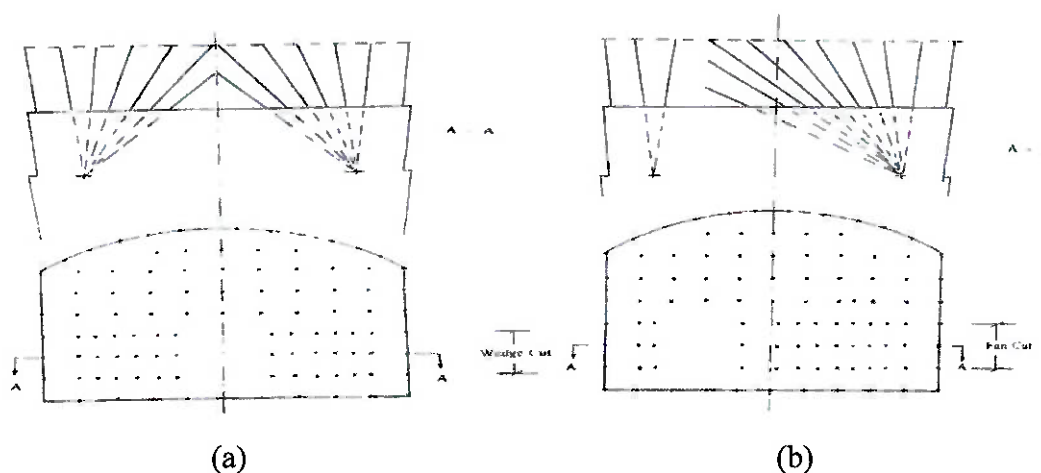


Figura 2.5 – Exemplo de perfuração com pilão em cunha (a) e em leque (b), Fonte: Johansen (2000)

### 2.7.1.3 Pilão de furos paralelos

O método consiste na perfuração de um ou mais furos de grande diâmetro sem carregamento de explosivos. Todos os furos são feitos perpendicularmente à face e paralelos à direção do túnel. A quebra ocorre no vazio formado pelos furos descarregados de diâmetro, em geral, de 76-150 mm. Esse vazio é aberto gradualmente pela detonação sucessiva dos furos adjacentes carregados e rocha pulverizada é arremessada para fora do pilão. Esse método exige um carregamento menor ao longo do comprimento dos furos. Em geral, são utilizados explosivos encartuchados que liberam gases com menores temperaturas. O ANFO também é bastante empregado. O uso de explosivos com velocidade muito alta de detonação podem facilmente causar uma detonação ineficiente (Johansen, 2000).

Os furos de diâmetro maior são perfurados inicialmente como furos piloto de mesmo diâmetro dos furos de produção. Vários furos de grande diâmetro asseguram uma boa fragmentação da rocha ao longo de todo o comprimento do avanço. O avanço desse método, em princípio, independe da seção transversal do túnel. A figura 2.6 representa um exemplo de desmonte com pilão de furos de paralelos.

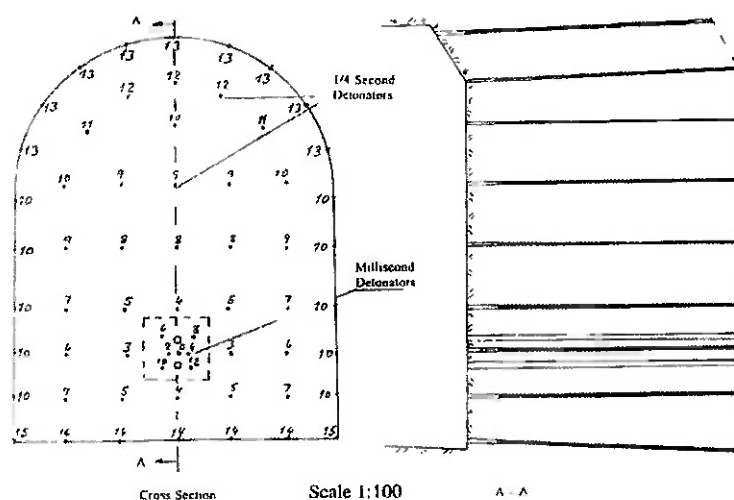


Figura 2.6 – Exemplo de perfuração com pilão de furos paralelos, Fonte: Johansen (2000)

Segundo Johansen (2000), furos paralelos em geral produzem melhor quebra e fragmentação da rocha com menor lançamento de rocha e espalhamento da pilha quando comparado aos outros tipos de pilão. Esse fato reduz o tempo de carregamento e torna mais fácil a limpeza do teto, parede e face.

É necessário que a rocha detonada dentro dos furos vazios tenha espaço suficiente para uma ruptura completa. Tal fato requer uma perfuração de grande precisão e uma seleção de retardos e sequência de detonação bem cuidadosa.

Os parâmetros mais importantes para atingir bons resultados nesses métodos são: diâmetro do furo vazio, encargo utilizado e condições de carregamento (Rock Excavation Handbook, 1999).

Segundo Johansen (2000), as principais vantagens no emprego dos pilões de furos paralelos são:

- Maior avanço por detonação, quando se trabalha com seções de área reduzida;
- Maior eficiência no avanço;
- Maior fragmentação da rocha, facilitando a remoção do material detonado;
- Facilidade de mecanização da furação, em razão do paralelismo dos furos.

Graças a esses fatores, o método de pilão de furos paralelos é o mais utilizado atualmente (Persson, Holmberg e Lee, 1993). Esse método engloba diversos tipos diferentes quanto à disposição dos furos. Segundo Langefors e Kihlstrom (1963), os principais tipos podem ser divididos em 3 grupos:

- Pilão queimado: é um dos métodos mais antigos e ainda bastante utilizado. Os furos são todos realizados com o mesmo diâmetro, onde alguns não são carregados com explosivos e outros com alta concentração de explosivos. A detonação ocorre através dos furos descarregados. Neste método, condições insatisfatórias podem dificultar a fragmentação no fundo do furo produzindo avanço ineficiente. Os avanços são reduzidos e não ultrapassam 2,5 m por ciclo (C. Jimeno, E. Jimeno e Carcedo, 1995).
- Pilão cilíndrico: segundo C. Jimeno, E. Jimeno e Carcedo (1995), independentemente das dimensões do túnel, é o método mais empregado atualmente. A detonação ocorre através de um ou mais furos vazios de forma que conforme as cargas dos furos subsequentes são detonadas, a rocha fragmentada é lançada para fora do pilão. A abertura é alargada sucessivamente e uniformemente ao longo de todo o comprimento do furo. Isso implica que o avanço é restringido apenas pelo desvio dos furos e resulta em avanços maiores que os obtidos no pilão queimado.
- Pilão em cratera: desenvolvido originalmente no Japão, tira proveito do efeito de cratera, produzido por cargas concentradas no fundo dos furos, na face livre mais próxima. É aplicado mais na escavação de poços do que de túneis.

Em cada grupo existem diversos tipos diferentes da disposição dos furos. Cada operação pode exigir um tipo diferente de adaptação dos diversos métodos devido às suas peculiaridades. Abaixo, alguns dos principais tipos utilizados:

- Pilão em espiral ou dupla espiral: a dimensão do encargo vai aumentando conforme a sequência de detonação formando uma espiral.
- Pilão Taby: semelhante ao método de dupla espiral. Avanços menores são obtidos em relação ao método de espiral, mas a mecanização da operação de perfuração é mais fácil.
- Pilão de quatro seções: é o método de pilão cilíndrico mais utilizado, já que é o de maior facilidade na marcação e execução dos furos (C. Jimeno, E. Jimeno e Carcedo, 1995). Um ou dois furos descarregados de diâmetro maior são realizados no centro do pilão. Ao redor desse furo, são feitos quatro ou mais quadriláteros com furos carregados nos vértices. O cálculo para dimensionamento deste método está presente em diversas fontes bibliográficas e é relativamente simples.
- Pilão Coromant: execução de dois furos de igual diâmetro interligados permitindo uma detonação mais eficiente.
- Pilão Fagersta: é um método com disposição mista entre o de quatro seções e espiral. Utilizado em pequenas galerias de perfuração manual.

### **2.7.2 Furos de contorno**

Os furos de contorno são os que estabelecem a forma final do túnel, dispostos com espaçamento reduzido e orientados para o interior do maciço de modo a criar um perfil de "dente de serra" que fornece espaço suficiente à perfuração da nova frente. Esse perfil é formado pelo ângulo de "look-out" ou "offset", que é o desvio dos furos em relação a direção do túnel. Para equipamentos mais modernos de perfuração o "look-out" varia de 0,2-0,4 m (Johansen, 2000). A figura 2.7 mostra o formato de um túnel com o ângulo de "look-out".

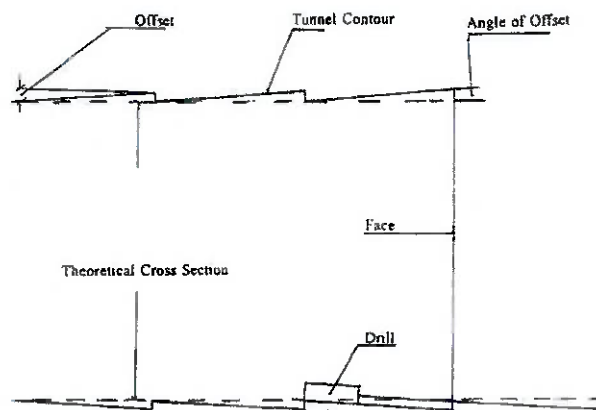


Figura 2.7 – Ângulo de offset na escavação. Fonte: Johansen (2000)

O objetivo da detonação no contorno é preservar o perfil da escavação teórico, reduzir o trabalho de limpeza e preservar a estabilidade da rocha. Esses objetivos são atingidos quando as distâncias dos furos, o carregamento e tipos de explosivos são cuidadosamente ajustados para as condições geológicas da rocha e os furos são feitos com precisão (Johansen, 2000). Segundo o Rock Excavation Handbook (1999), os resultados da detonação dos furos de contorno dependem principalmente da precisão da perfuração. Na região de contorno é possível o emprego de desmonte cuidadoso, de modo a minimizar danos às paredes do túnel.

O desmonte cuidadoso tem o objetivo de distribuir melhor a energia do explosivo que é transmitida ao maciço rochoso pela pressão do gás, de forma a reduzir as tensões e faturamento da rocha remanescente. Os métodos de desmonte cuidadoso consistem na utilização de espaçamentos menores entre os furos e carga de explosivos menor. A utilização destes aumenta o número de furos em torno de 10-15%, mas pode reduzir significativamente a utilização de concreto nas paredes e teto do túnel (Rock Excavation Handbook, 1999).

### 2.7.3 Furos de expansão

Os furos de expansão são furos localizados entre os furos do pilão e de contorno. Segundo o Rock Excavation Handbook (1999), o diâmetro desses furos em geral é de 45-51 mm, a relação espaçamento/encargo é em torno de 1:1,1 e os valores variam de 1,0-1,3 m. Em geral, são carregados com explosivos de alta energia no fundo e com explosivos mais fracos no resto do furo.

### 2.7.4 Furos de levante

Os furos de levante são os furos localizados no chão da escavação. A perfuração e carregamento devem ser feitas de forma precisa para garantir que o chão permaneça plano para operação das máquinas. Exigem concentrações de carga maiores que no teto, pois o ângulo inclinado para baixo dos furos e a quantidade de rocha acima dos furos aumentam a resistência contra a detonação. O espaçamento é aproximadamente o mesmo que dos furos de expansão, mas o encargo é relativamente menor (Rock Excavation Handbook, 1999).

## 2.8 SEQUÊNCIA DE DETONAÇÃO

Segundo Langefors e Kihlstrom (1963), uma alteração que pode parecer insignificante como uma simples mudança na sequência de detonação pode aumentar consideravelmente o avanço da detonação elevando as chances de quebra de forma livre de cada furo individualmente. Como citado anteriormente, a movimentação sem restrições da rocha em torno do furo ao detonar é essencial para uma boa fragmentação.

Os tempos de retardo possuem grande importância na eficiência do desmonte como um todo, influenciando na fragmentação da rocha, formação da pilha, ultra-lançamento da rocha, níveis de vibrações e pressão dos gases gerados. Segundo Lang e Favreau (1972), os tempos de retardo devem possibilitar que os seguintes eventos ocorram sucessivamente:

- Propagação das ondas de compressão do furo até a face livre;
- Reajuste do campo inicial de tensões, devido à presença de fraturas radiais e da reflexão da onda de choque na face livre;
- Aceleração da rocha fragmentada pela ação dos gases.

O sequenciamento ideal de detonação varia de acordo com as peculiaridades de cada operação. Para operações subterrâneas, simplificada, pode-se designar a seguinte sequência para cada região do túnel, de acordo com exemplos de desenhos de desmonte contidas nas fontes bibliográficas consultadas:

1. Pilão
2. Furos de expansão
3. Furos de contorno da parede
4. Furos de contorno do teto
5. Furos de levante

Os intervalos nos furos de pilão devem ser suficientes para que a rocha seja lançada para fora do furo antes que o próximo furo detone. Com intervalos de retardo baixos, obtém-se melhor fragmentação da rocha, mas o avanço é menor e o lançamento de rocha maior. Segundo Johansen (2000), o tempo recomendável para os furos de pilão deve ser entre 50 e 100 milissegundos, sendo que rochas duras exigem intervalos menores. Para os furos de pilão, em geral, são utilizados detonadores com retardo de milissegundos e detonadores com retardo de meio segundo nos furos das outras regiões.

O sequenciamento para os furos de expansão deve ser feito de forma que possibilite a melhor quebra para cada furo separadamente. O retardo deve ser longo o bastante para permitir o movimento da rocha, em torno de 100 e 500 milissegundos (Rock Excavation Handbook, 1999).

Os furos de contorno da parede são detonados com o mesmo retardo para atingir a maior interação possível entre as cargas. O mesmo é aplicado para furos no teto que possuem retardo um pouco maior que os da parede. Devido à maior quantidade de rocha acima dos furos de levante, seria muito difícil a fragmentação dessa região sem que os outros furos estivessem detonados. Dessa forma, os furos de levante em geral são os últimos a serem detonados.

Como dito anteriormente, essa sequência serve apenas como guia e pode variar para diferentes escavações. Pode-se generalizar que os furos de pilão são sempre os primeiros a serem detonados já que são responsáveis pela formação da face livre e os furos de expansão são detonados em sequência. A ordem para o restante dos furos pode variar de caso a caso. Testes experimentais e análise dos aspectos geológicos e outros fatores devem ser realizados para uma busca de um sequenciamento ideal para garantir a eficiência da operação.

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia empregada para o trabalho consiste na escolha de um modelo empírico de cálculo de desmonte subterrâneo através de pesquisa bibliográfica e o desenvolvimento do programa computacional na plataforma de programação escolhida utilizando este modelo. A partir de alguns dados de entrada, o programa calcula os parâmetros do desmonte e apresenta um relatório com os resultados e uma representação gráfica do plano de fogo. Com o programa desenvolvido, três cenários com diferentes dados de entrada são simulados para validação do software a partir da comparação dos resultados obtidos com os resultados esperados contidos em fontes bibliográficas.

#### 3.1 SOFTWARE MATHEMATICA

Para o desenvolvimento e equacionamento do modelo foi escolhido o software Mathematica. Trata-se de um programa de computador desenvolvido por Stephen Wolfram, que utiliza um sistema de álgebra computacional e é utilizado em diversas áreas de conhecimento como engenharia, física, biologia, química, matemática, estatística, etc. É um ambiente que permite a realização de cálculos simbólicos e numéricos dentro de uma estrutura unificada, além de servir como um ambiente de linguagem de programação.

A utilização de sua linguagem é flexível e permite a realização de cálculos de maneira mais simples que as linguagens de programação convencionais como C, C++, Java, etc. Além disso, suas ferramentas de representação gráfica também são de fácil utilização e sua licença é disponibilizada pela Universidade de São Paulo. Assim, a escolha por essa plataforma foi uma boa opção para o tipo de aplicação desejado.

#### 3.2 MODELO DE DIMENSIONAMENTO

O modelo de cálculo empregado no desenvolvimento do programa computacional foi o método contido no livro *Rock blasting and explosives engineering* de Persson, Holmberg e Lee (1993). É aplicado para o dimensionamento de um plano de fogo subterrâneo com o método de pilão de furos paralelos de abertura de quatro seções num túnel em formato de ferradura. O método é baseado em experimentos empíricos, relativamente simples e contém um passo-a-passo objetivo da metodologia de cálculo de cada região da face do túnel. Em seguida, serão descritos os cálculos do método.

### 3.2.1 Profundidade e avanço

O avanço depende do diâmetro do furo vazio do pilão e dos desvios dos furos para os furos de menor diâmetro.

A profundidade pode ser calculada pela equação:

$$H = 0,15 + 34,1\varphi - 39,3\varphi^2 \text{ (m)} \quad (3.1)$$

Onde  $\varphi$  é diâmetro (m) do furo vazio com valores entre 0,05 e 0,25.

Nos casos em que são utilizados dois furos vazios o diâmetro equivalente pode ser calculado por:

$$\varphi = d\sqrt{2} \text{ (m)} \quad (3.2)$$

O avanço deve corresponder ao máximo da profundidade perfurada possível. Por razões econômicas, um avanço menor que 95% da profundidade a operação se torna muito cara. Dessa forma:

$$I = 0,95H \text{ (m)} \quad (3.3)$$

As duas equações são válidas para desvios de perfuração menores que 2%.

### 3.2.2 Desvio de perfuração

O desvio F é calculado a partir de dois desvios:

$$F = \alpha_2 H + \alpha_1 \text{ (m)} \quad (3.4)$$

Onde  $\alpha_1$  (m) é o desvio de emboque e  $\alpha_2$  (m/m) é o desvio angular.

### 3.2.3 Pilão

A Figura 3.1 representa o posicionamento dos furos do pilão e os encargos utilizados:

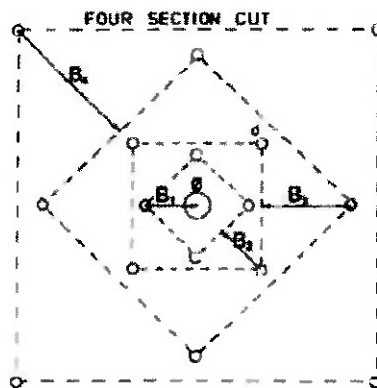


Figura 3.1 – Área do pilão de quatro seções. Fonte: Persson, Holmberg e Lee (1993).

a. Cálculo do 1º quadrilátero:

O encargo máximo  $B_{máx}$  não deve exceder 1,7 vezes o diâmetro do furo vazio para que haja uma fragmentação eficiente da rocha, como podemos visualizar na figura 3.2.

$$B_{máx} = 1,7\varphi \text{ (m)} \quad (3.5)$$

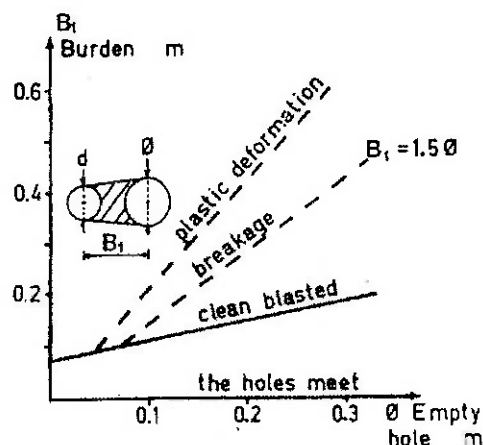


Figura 3.2 – Resultados de desmonte com diferentes encargos e diferentes diâmetros de furo vazio.

Fonte: Langefors e Kihlstrom (1963).

Quando o desvio é menor que 1%, pode-se considerar o encargo como:

$$B_1 = 1,5\varphi \text{ (m)} \quad (3.6)$$

No caso do desvio ser maior que 1% o encargo deve ser reduzido, levando-se em conta o desvio total de perfuração.

$$B_1 = 1,7\varphi - F \text{ (m)} \quad (3.7)$$

A concentração de carga no 1º quadrilátero é calculada a partir da relação obtida por Langefors e Kihlstrom (1963) para diâmetro do furo igual 0,033 m.

$$l = 1,5 \left(\frac{B}{\varphi}\right)^{1,5} \left(B - \frac{\varphi}{2}\right) \left(\frac{kg}{m}\right) \quad (3.8)$$

Para o cálculo considerando diferentes diâmetros, tipo do explosivo e o material da rocha uma equação mais geral foi elaborada:

$$l = 55d \frac{\left(\frac{B}{\varphi}\right)^{1,5} \left(B - \frac{\varphi}{2}\right) \left(\frac{c}{0,4}\right)}{S_{ANFO}} \left(\frac{kg}{m}\right) \quad (3.9)$$

Onde  $d$  (m) é o diâmetro do furo,  $c$  ( $kg/m^3$ ) é uma constante da rocha e  $S_{ANFO}$  representa a força do explosivo relativa ao ANFO.

A constante da rocha  $c$  é utilizada para medir a influência da rocha no desmonte. Segundo Langefors e Kihlstrom (1963), o valor de  $0,4 \text{ kg/m}^3$  é um bom ponto de partida para os cálculos para vários tipos de desmonte e é aplicado no mundo inteiro com resultados satisfatórios.

Para cálculo de  $S_{ANFO}$ , basta dividir a força do explosivo  $S$ , calculada a partir da equação 4.1, por  $0,84$ , que é o  $S_{LFB}$  do ANFO segundo a tabela 1. Assim:

$$S_{ANFO} = \left(\frac{5}{6} \frac{Qv}{Qv_0} + \frac{1}{6} \frac{V}{V_0}\right) \left(\frac{1}{0,84}\right) \quad (3.10)$$

Os furos do pilão devem ser ter um comprimento de tampão de 10 vezes o diâmetro dos furos.

$$ht = 10d \text{ (m)} \quad (3.11)$$

E o número de cartuchos de explosivos pode ser calculado por:

$$NC_{exp} = \frac{(H-ht)}{L_{exp}} \quad (3.12)$$

Onde  $L_{exp}$  (m) é o comprimento do cartucho de explosivo.

O lado do primeiro quadrilátero  $A_1$  é obtido por:

$$A_1 = \sqrt{2}B_1 \text{ (m)} \quad (3.13)$$

Esse  $A_1$  deve ser reduzido devido ao desvio da perfuração. Assim:

$$A'_1 = \sqrt{2}(B_1 - F) \text{ (m)} \quad (3.14)$$

A figura 3.3 representa os encargos e lados práticos.

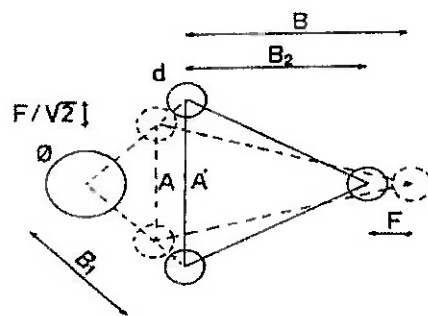


Figura 3.3 – Representação dos encargos e lados práticos. Fonte: Persson, Holmberg e Lee (1993).

b. Cálculo do 2º, 3º e 4º quadriláteros:

Assumindo que há uma pré-seleção dos explosivos disponíveis, pode-se calcular a concentração de carga através da equação 2. E para encontrar B do quadrilátero utiliza-se a fórmula:

$$B = 8,8 \times 10^{-2} \left( \frac{(A_{n-1})^2 l_{SANFO}}{d c} \right)^{1/2} (m) \quad (3.15)$$

Esse encargo máximo é calculado para os diferentes explosivos disponíveis. O explosivo escolhido é o de maior carga e que garante um encargo que satisfaça as duas condições citadas abaixo.

O encargo prático deve levar em conta o desvio da perfuração:

$$B_n = B - F (m) \quad (3.16)$$

Para os encargos  $B_2, B_3$  e  $B_4$ , há duas restrições a serem levadas em conta.

- I.  $B_n < 2 A_{n-1}$ , para que não ocorra deformação plástica. Se essa condição não for garantida, deve-se escolher um explosivo com menor concentração de carga.
- II.  $B_n > 0,5 A_{n-1}$ .

Os lados dos quadriláteros A2, A3 e A4 são obtidos por:

$$A_n = \sqrt{2} \left( B_n + \frac{A_{n-1}}{2} \right) (m) \quad (3.17)$$

Esses valores devem ser reduzidos devido ao desvio da perfuração. Assim:

$$A'_n = \sqrt{2} \left( B_n + \frac{A_{n-1}}{2} - F \right) (m) \quad (3.18)$$

O cálculo do comprimento do tampão e número de cartuchos de explosivos é equivalente ao cálculo feito no 1º quadrilátero.

### 3.2.4 Furos de levante

A figura 3.4 mostra os encargos e espaçamentos dos furos de levante.

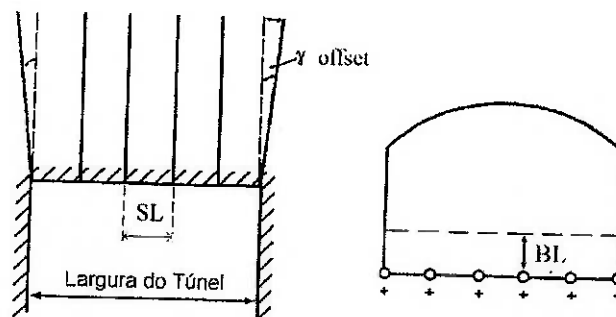


Figura 3.4 – Parâmetros dos furos de levante. Adaptado de Persson, Holmberg e Lee (1993).

O encargo para os furos de levante é calculado pela equação abaixo. Em geral, utiliza-se a concentração de carga do explosivo mais potente disponível.

$$B = 0,9 \sqrt{\frac{L_{SANFO}}{c' f \left(\frac{S}{B}\right)}} \quad (m) \quad (3.19)$$

Onde  $c'$  é a constante da rocha corrigida,  $f$  o fator de fixação e  $S/B$  a relação entre espaçamento e encargo.

O encargo deve ser menor que  $0,6H$  para satisfazer a equação acima. Caso seja maior, a concentração de carga deve ser diminuída de forma a satisfazer a condição.

A constante corrigida pode ser calculada por:

$$c' = c + 0,05, \text{ se } B > 1,4 \text{ m} \quad (3.20)$$

$$c' = c + \frac{0,07}{B}, \text{ se } B < 1,4 \text{ m}$$

O fator de fixação é utilizado para levar em conta a dificuldade de fragmentação da rocha de acordo com a resistência que é imposta aos furos. Ele é empregado no cálculo de desmonte em bancada a céu aberto e em geral varia de 0,75 a 1. No caso de desmonte subterrâneo em que a resistência à quebra é bem maior, o fator de fixação é maior. Nos furos de levante, adota-se  $f$  é igual a 1,45.

A equação 5.19 é válida se os furos de levante forem feitos num padrão quadrado, ou seja, a relação  $S/B$  (espaçamento/encargo) deve ser igual a 1. Para os furos de levante, deve

ser considerado o ângulo de “offset” ou “look-out”, que dependerá do equipamento disponível e da profundidade do furo.

O número de furos pode ser calculado por:

$$N_{fL} = n^{\circ} \text{inteiro} \left( \frac{L+2H \operatorname{sen} \gamma}{B} + 2 \right) \quad (3.21)$$

Onde L (m) é a largura do túnel, H (m) é a profundidade dos furos e  $\gamma$  ( $^{\circ}$ ) o ângulo de “look-out”.

O espaçamento entre os furos é dado por:

$$S_L = \frac{(L+2H \operatorname{sen} \gamma)}{N-1} \text{ (m)} \quad (3.22)$$

Como os furos são feitos com ângulo de “look-out” o espaçamento deve ser corrigido para um espaçamento prático.

$$S'_L = S_L - H \operatorname{sen} \gamma \text{ (m)} \quad (3.23)$$

Da mesma forma, o encargo prático vale:

$$B'_L = B - H \operatorname{sen} \gamma - F \text{ (m)} \quad (3.24)$$

Os furos de levante são carregados com uma carga de fundo mais potente e que possui comprimento de:

$$h_{cf} = 1,25 B_L \text{ (m)} \quad (3.25)$$

O comprimento do tampão é o mesmo dos furos de pilão. A carga de coluna pode ser carregada com 70% da carga de fundo ou dependendo do caso, com a mesma carga. Seu comprimento pode ser calculado por:

$$h_{cc} = H - h_b - 10d \text{ (m)} \quad (3.26)$$

### 3.2.5 Furos de contorno

Os furos de contorno são de extrema importância para preservar a forma do túnel e garantir a estabilidade da escavação. Para evitar a utilização de suportes, em geral, recomenda-se a aplicação de um desmonte cuidadoso no teto. A concentração de carga deve ser baixa para não gerar grandes danos às rochas.

a. Furos de contorno do teto:

O espaçamento nos furos do teto e o encargo podem ser calculados por:

$$S_{CT} = k d (m), \text{ com } 15 < k < 16 \quad (3.27)$$

$$B = \frac{S_{CT}}{0,8} (m) \quad (3.28)$$

O encargo prático levante em conta os desvios e ângulo de “look-out” vale:

$$B_{CT} = B - H \operatorname{sen} \gamma - F (m) \quad (3.29)$$

O número de furos é dado por:

$$N_{fCT} = n^{\circ} \text{inteiro} \left( \frac{\text{Carco}}{S_{CT}} + 2 \right) \quad (3.30)$$

Onde Carco (m) é o comprimento do arco do teto.

Nos furos de contorno todo o furo é preenchido com a mesma carga sem tampão para que toda a superfície seja quebrada e a forma do túnel se mantenha constante.

b. Furos de contorno da parede:

Os furos de contorno da parede são posicionados de acordo com o espaço disponível após o cálculo dos encargos dos furos do teto e do chão. A altura remanescente da parede pode ser calculada por:

$$Hr_{CP} = Hp - B_L - B_{CT} (m) \quad (3.31)$$

Onde Hp (m) é a altura da parede.

Diferentemente do desmonte cuidadoso realizado no teto, nos furos de contorno da parede o desmonte é feito de forma normal. Para o cálculo do encargo, o método é o mesmo empregado nos furos de levante com alteração no fator de fixação para  $f = 1,2$ , já que a resistência à quebra é menor, e na relação S/B que passa a ser 1,25. O encargo prático é calculado da mesma forma, assim como os comprimentos das cargas.

O número de furos e o espaçamento ajustado destes valem:

$$N_{fCP} = n^{\circ} \text{inteiro} \left( \frac{Hr_{CP}}{B_{CP} 1,25} \right) + 2 \quad (3.32)$$

$$S_{CP} = \frac{Hr_{CP}}{N_{fCP} - 1} (m) \quad (3.34)$$

### 3.2.6 Furos de expansão

Os furos de expansão são os últimos a serem calculados e seu posicionamento vai depender do espaço restante na frente de escavação, respeitando as distâncias de encargo das outras regiões. Os cálculos do encargo e comprimentos de cargas são os mesmos dos furos de

levante. O fator de fixação permanece 1,45 e a relação S/B passa a ser 1,25 para os furos laterais. Para os furos superiores a relação S/B permanece 1,25, mas o fator de fixação passa a ser 1,2 devido à gravidade agir a favor da detonação. Algumas alterações nos cálculos foram feitas em relação ao método original para melhor automatização do programa e simplificação dos cálculos.

a. Furos de expansão laterais:

A largura remanescente para os furos laterais pode ser calculada por:

$$Lr_{EL} = L - 2 B_{CP} - A_4 \text{ (m)} \quad (3.35)$$

Onde L (m) é a largura da escavação.

A partir da largura remanescente pode-se calcular o número de linhas verticais de furos que podem ser posicionadas ao lado do pilão:

$$N_{LV} = n^{\circ} \text{ inteiro } \left( \frac{Lr_{EL}}{B_{EL}} \right) \quad (3.36)$$

O número de furos em cada linha vertical é calculado por:

$$N_{fLV} = n^{\circ} \text{ inteiro } \left( \frac{A_4}{B_{EL}} + 1 \right) \quad (3.37)$$

Onde  $B_{EL}$ (m) é o encargo prático dos furos de expansão laterais.

O espaçamento ajustado vale:

$$S_{ES} = \frac{A_4}{N_{fLV}-1} \text{ (m)} \quad (3.38)$$

O número total de furos de expansão lateral é:

$$N_{FEL} = N_{LV}N_{fLV} \quad (3.39)$$

b. Furos de expansão superiores

Para os furos superiores a altura remanescente é calculada considerando como altura total apenas a altura da parede para efeitos de simplificação:

$$Hr_{ES} = H_p - A_4 - B_L \text{ (m)} \quad (3.40)$$

O número de linhas horizontais pode ser calculado por:

$$N_{LH} = \text{int} \left( \frac{Hr_{ES}}{B_{ES}} \right) + 1 \quad (3.41)$$

Onde  $B_{ES}$  (m) é o encargo prático dos furos de expansão superiores.

O número de furos em cada linha horizontal é dado por:

$$N_{fLH} = \text{int} \left( \frac{L-2 B_{CP}}{B_{ES} 1,25} \right) + 2 \quad (3.42)$$

O espaçamento deve ser ajustado para os furos ficarem distribuídos uniformemente.

$$S_{ES} = \frac{L-2 B_{CP}}{N_{fLH}-1} \text{ (m)} \quad (3.43)$$

E o número total de furos de expansão superiores é:

$$N_{FEL} = N_{LH} N_{fLH} \quad (3.44)$$

Com isso se concluem todos os cálculos de todas as regiões de desmonte do túnel pelo método.

O intuito do programa é permitir o dimensionamento para diferentes escavações de forma simples e sem grande rigor para adquirir um conhecimento inicial dos principais parâmetros de desmonte. Um código que automatiza toda a representação dos furos pode se tornar bem complexo de implementar levando-se em conta todos os fatores, e não é o objetivo deste trabalho.

Dessa forma, algumas simplificações foram adotadas para simplificação da automatização do posicionamento e representação gráfica dos furos. Os desvios angular, de emboque e o ângulo de “offset” foram considerados desprezíveis de forma a simplificar o cálculo e a representação do posicionamento dos furos na frente da escavação de forma automatizada. O cálculo do posicionamento dos furos de expansão, como descrito acima, foi modificado um pouco do método original. Os furos de expansão superiores só serão dispostos até a área retangular da escavação, ou seja, a distância ideal do encargo dos furos de levante pode não ser respeitada em alguns casos como em frentes com alturas de arco elevadas. Como a gravidade favorece a fragmentação da rocha nessa área, é uma simplificação válida. Além disso, o furo vazio do pilão ficará disposto sempre no centro do eixo horizontal da escavação.

Os dados de entrada fornecidos pelo usuário do programa são:

- Largura do túnel L (m);
- Altura das paredes do túnel  $H_p$  (m);
- Altura do arco do túnel  $H_{arc}$  (m);
- Diâmetro do furo vazio do pilão  $\phi$  (m)
- Diâmetro dos furos d (m);
- Constante da rocha c ( $\text{kg/m}^3$ );
- Tipo de explosivo;
- Diâmetro dos cartuchos de explosivos  $\phi_{Exp}$  (m);

- Comprimento dos cartuchos de explosivos (m);

Após os cálculos da disposição dos furos e seus respectivos carregamentos em cada região, são apresentados os principais parâmetros do desmonte que resultam dos cálculos do modelo. Dentre esses parâmetros estão:

- Número de furos por região e total do desmonte;
- Carregamento em cada furo e total por região;
- Número de cartuchos de explosivos utilizados por região;
- Área da frente a ser escavada;
- Carregamento específico do desmonte;
- Consumo total de explosivos;
- Profundidade dos furos;
- Avanço do desmonte;
- Metragem total a ser perfurada;

A partir da representação dos furos e desses parâmetros calculados, conclui-se o dimensionamento do plano de fogo. Dessa forma, a partir das saídas do programa, pode-se realizar uma análise criteriosa para estudo de diferentes alternativas de projeto e obter uma estimativa inicial de todos os recursos necessários para os ciclos de desmonte.

#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com o método descrito, foi realizado o equacionamento de todos os cálculos do modelo no software Mathematica e a escrita do código de programação para automatização dos cálculos e geração dos resultados. No apêndice constam figuras com o código do programa e a interface geral com um exemplo calculado.

Para uma validação do programa computacional foram realizados três testes com diferentes dados de entrada para comparação dos parâmetros gerais calculados pelo programa com alguns resultados empíricos esperados contidos em fontes bibliográficas. Três parâmetros de grande importância do desmonte que apresentam resultados experimentais em função da área do túnel nas fontes consultadas são: carregamento específico ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ), número total de furos e perfuração específica ( $\text{m}/\text{m}^3$ ). As figuras 4.1 a 4.3 representam os gráficos desses parâmetros em função da área do túnel.

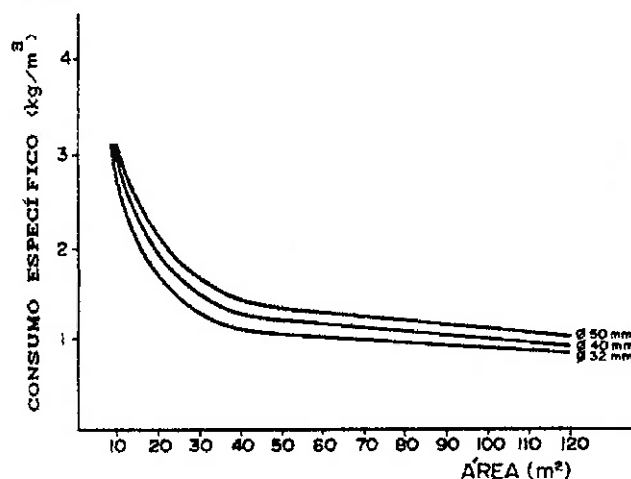


Figura 4.1 – Carregamento ou consumo específico em função da área do túnel. Fonte: Adaptado de C. Jimeno, E. Jimeno e Carcedo (1995).

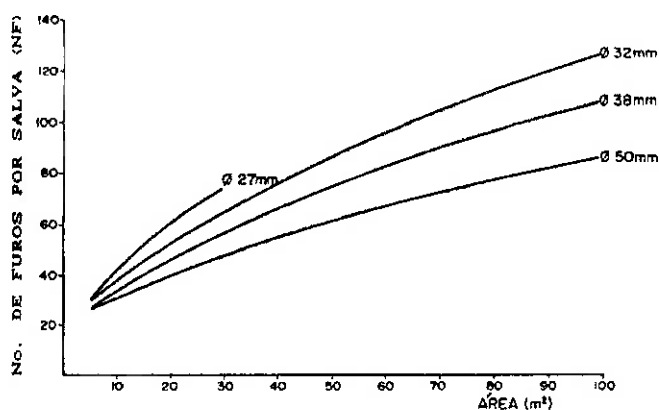


Figura 4.2 – Número de furos em função da área do túnel. Fonte: Adaptado de C. Jimeno, E. Jimeno e Carcedo (1995).

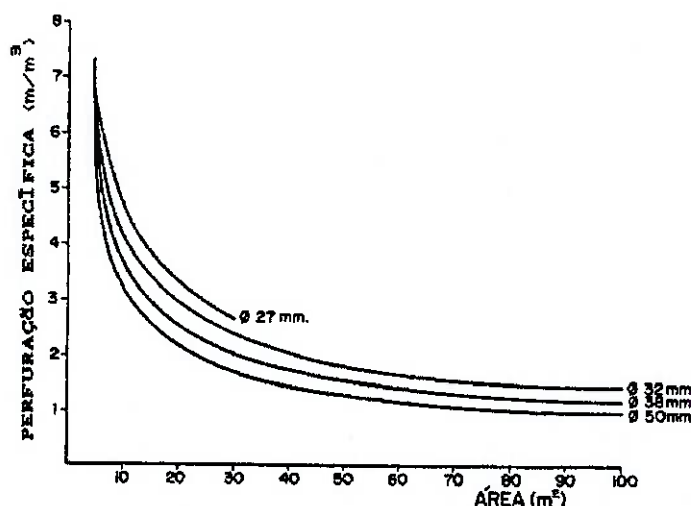


Figura 4.3 – Perfuração específica em função da área do túnel. Fonte: Adaptado de C. Jimeno, E. Jimeno e Carcedo (1995).

A partir dos gráficos, as curvas foram recriadas no software Microsoft Excel a partir de alguns pontos das curvas e equações aproximadas das curvas foram encontradas a partir do recurso de linha de tendência no Excel. A tabela 4.1 apresenta as equações obtidas de cada curva para os diferentes valores de diâmetro.

Carregamento Específico	
Diâmetro (mm)	Equações (Polinômio de 5º grau)
32	$y = -0,000000002x^5 + 0,000000901x^4 - 0,000129521x^3 + 0,008922873x^2 - 0,297981556x + 4,974584031$
40	$y = -0,000000002x^5 + 0,000000901x^4 - 0,000129521x^3 + 0,008922873x^2 - 0,297981556x + 4,974584031$
50	$y = -0,000000001x^5 + 0,000000447x^4 - 0,000071266x^3 + 0,005566354x^2 - 0,217483260x + 4,750328786$
Número de furos	
Diâmetro (mm)	Equações (Polinômio de 2º grau)
32	$y = -0,004874385x^2 + 1,507134715x + 24,070715405$
38	$y = -0,004316692x^2 + 1,289578616x + 21,676799472$
50	$y = -0,003096479x^2 + 0,950148617x + 21,866133$
Perfuração Específica	
Diâmetro (mm)	Equações (Potência)
32	$y = 13,894936637x^{-0,512204611}$
38	$y = 13,842347340x^{-0,554151318}$
50	$y = 13,529349371x^{-0,594939573}$

Tabela 4.1 – Equações das curvas para cada diâmetro.

Com o programa desenvolvido foram simulados três cenários variando alguns parâmetros, dentre eles a área de escavação. As figuras 4.4 a 4.12 apresentam os dados de entrada utilizados e os resultados gerados pelo programa incluindo os parâmetros gerais calculados e a representação gráfica do plano de fogo.

## ^ DADOS DE ENTRADA

```

lr[3273]=
L = 6; (*Largura do túnel em m*)
Hp = 6; (*Altura das paredes do túnel em m*)
Harc = 0.8; (*Altura do arco em m*)
φ = 0.102; (*Diâmetro do furo vazio em m*)
d = 0.038; (*Diâmetro dos furos em m*)
c = 0.4; (*Constante da rocha*)
Explosivo = Emulite150; (*Tipo do explosivo*)
φExp = {0.025, 0.030, 0.04};
(*Diâmetro dos Cartuchos de explosivos em m*)
LExp = 0.6; (*Comprimento dos cartuchos em m*)

```

Figura 4.4 – Dados de entrada do 1º caso simulado no programa.

## Parâmetros Gerais

Área da escavação: 39.2451 m<sup>2</sup>  
 Volume da escavação: 126.343 m<sup>3</sup>  
 Avanço do ciclo de desmonte: 3.05836 m  
 Número total de furos: 66  
 Profundidade dos furos: 3.21932 m  
 Metragem a ser perfurada: 212.475 m  
 Perfuração Específica: 1.68174 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>  
 Consumo total de explosivos: 159.462 kg  
 Carregamento específico: 1.26214 kg/m<sup>3</sup>

Figura 4.5 – Parâmetros calculados do 1º caso simulado no programa.

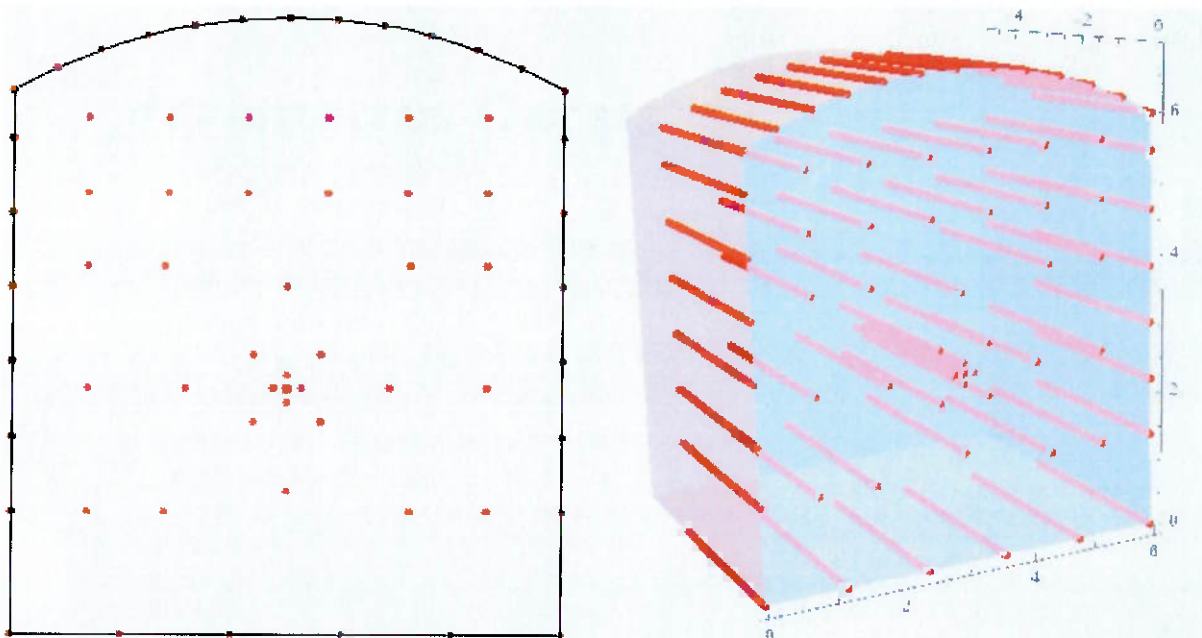


Figura 4.6 – Representação gráfica do plano de fogo do 1º caso simulado no programa.

## ^ DADOS DE ENTRADA

```

In[0002] = L = 10; (*Largura do túnel em m*)
           Hp = 6; (*Altura das paredes do túnel em m*)
           Harc = 1.2; (*Altura do arco em m*)
           phi = 0.125; (*Diâmetro do furo vazio em m*)
           d = 0.038; (*Diâmetro dos furos em m*)
           c = 0.4; (*Constante da rocha*)
           Explosivo = LPBDynamite; (*Tipo do explosivo*)
           phiExp = {0.025, 0.030, 0.04};
           (*Diâmetro dos Cartuchos de explosivos em m*)
           LExp = 0.6; (*Comprimento dos cartuchos em m*)
  
```

Figura 4.7 – Dados de entrada do 2º caso simulado no programa.

## Parâmetros Gerais

Área da escavação: 68.0914 m<sup>2</sup>  
 Volume da escavação: 259.641 m<sup>3</sup>  
 Avanço do ciclo de desmonte: 3.60852 m  
 Número total de furos: 91  
 Profundidade dos furos: 3.79844 m  
 Metragem a ser perfurada: 345.658 m  
 Perfuração Específica: 1.33644 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>  
 Consumo total de explosivos: 287.213 kg  
 Carregamento específico: 1.11047 kg/m<sup>3</sup>

Figura 4.8 – Parâmetros calculados do 2º caso simulado no programa.

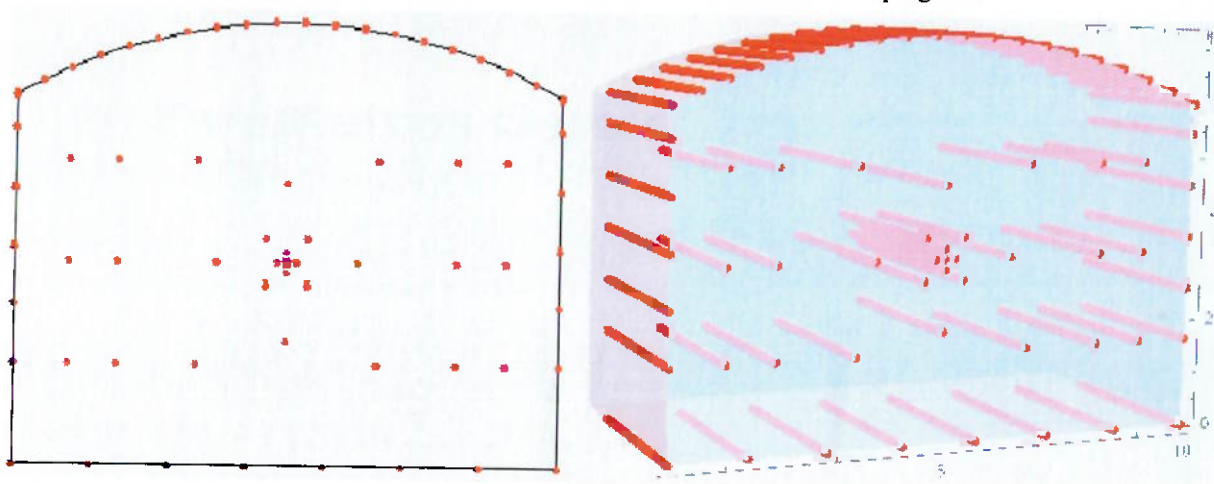


Figura 4.9 – Representação gráfica do plano de fogo do 2º caso simulado no programa.

## ^ DADOS DE ENTRADA

```

t[47*2]=
L = 4.5; (*Largura do túnel em m*)
Hp = 4.5; (*Altura das paredes do túnel em m*)
Harc = 0.8; (*Altura do arco em m*)
phi = 0.1; (*Diâmetro do furo vazio em m*)
d = 0.038; (*Diâmetro dos furos em m*)
c = 0.4; (*Constante da rocha*)
Explosivo = GuritA; (*Tipo do explosivo*)
phiExp = {0.025, 0.030, 0.04};
(*Diâmetro dos Cartuchos de explosivos em m*)
LExp = 0.6; (*Comprimento dos cartuchos em m*)
  
```

Figura 4.10 – Dados de entrada do 3º caso simulado no programa.

## Parâmetros Gerais

Área da escavação: 22.7096 m<sup>2</sup>  
 Volume da escavação: 71.9214 m<sup>3</sup>  
 Avanço do ciclo de desmonte: 3.00865 m  
 Número total de furos: 53  
 Profundidade dos furos: 3.167 m  
 Metragem a ser perfurada: 167.851 m  
 Perfuração Específica: 2.33391 m<sup>3</sup>.m<sup>3</sup>  
 Consumo total de explosivos: 109.349 kg  
 Carregamento específico: 1.52039 kg.m<sup>3</sup>

Figura 4.11 – Parâmetros calculados do 2º caso simulado no programa.

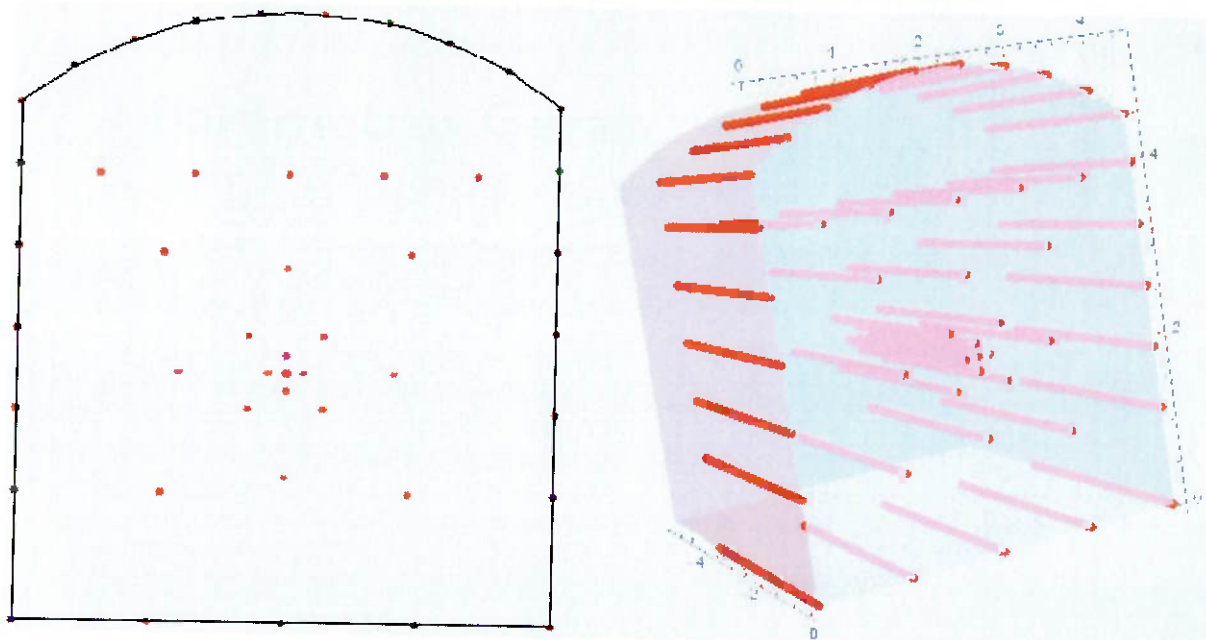


Figura 4.12 – Representação gráfica do plano de fogo do 3º caso simulado no programa.

Com os resultados gerados, foi feita uma comparação entre os parâmetros do programa e os resultados esperados, que foram calculados pelas equações da tabela 4.1 substituindo a variável “x” pelos valores de área de cada caso simulado. Para valores altos da área do túnel a aproximação do polinômio de 5º grau obteve desvios grandes em relação às curvas de carregamento específico. Dessa forma foi realizada uma interpolação simples no 2º caso para encontrar o carregamento específico da curva, ao invés da equação polinomial. A tabela 4.2 e as figuras 4.13 a 4.15 apresentam as comparações dos resultados e os desvios calculados.

1º Caso			
Área da escavação (m <sup>2</sup> )		39,25	
Diâmetro dos furos (mm)		38	
Diâmetro do furo vazio (mm)		102	
Parâmetro	Resultados esperados	Resultados Calculados	Desvio
Carregamento específico (kg/m <sup>3</sup> )	1,26	1,26	0,17%
Número de Furos	66	66	0,00%
Perfuração específica (m/m <sup>3</sup> )	1,81	1,68	7,16%
2º Caso			
Área da escavação (m <sup>2</sup> )		68,09	
Diâmetro dos furos (mm)		38	
Diâmetro do furo vazio (mm)		125	
Parâmetro	Resultados esperados	Resultados Calculados	Desvio
Carregamento específico (kg/m <sup>3</sup> )	0,97	1,11	14,30%
Número de Furos	89	91	1,71%
Perfuração específica (m/m <sup>3</sup> )	1,33	1,34	0,13%
3º Caso			
Área da escavação (m <sup>2</sup> )		22,71	
Diâmetro dos furos (mm)		38	
Diâmetro do furo vazio (mm)		100	
Parâmetro	Resultados esperados	Resultados Calculados	Desvio
Carregamento específico (kg/m <sup>3</sup> )	1,76	1,52	13,43%
Número de Furos	49	53	8,75%
Perfuração específica (m/m <sup>3</sup> )	2,45	2,33	4,85%

Tabela 4.2 – Comparação dos resultados calculados e esperados para os três casos simulados.

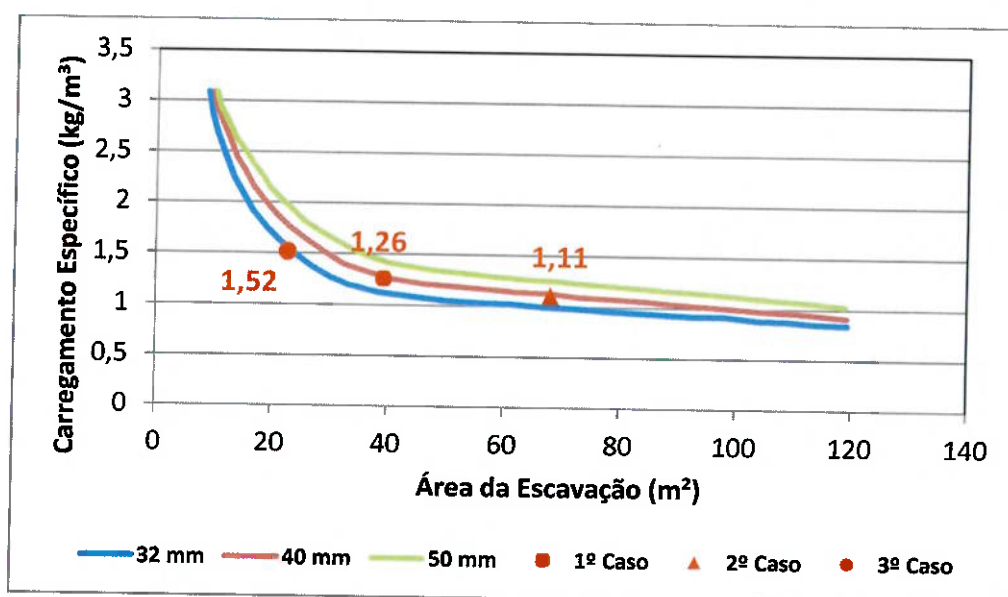


Figura 4.13 – Gráfico das curvas de carregamento específico e resultados calculados para os três casos simulados.

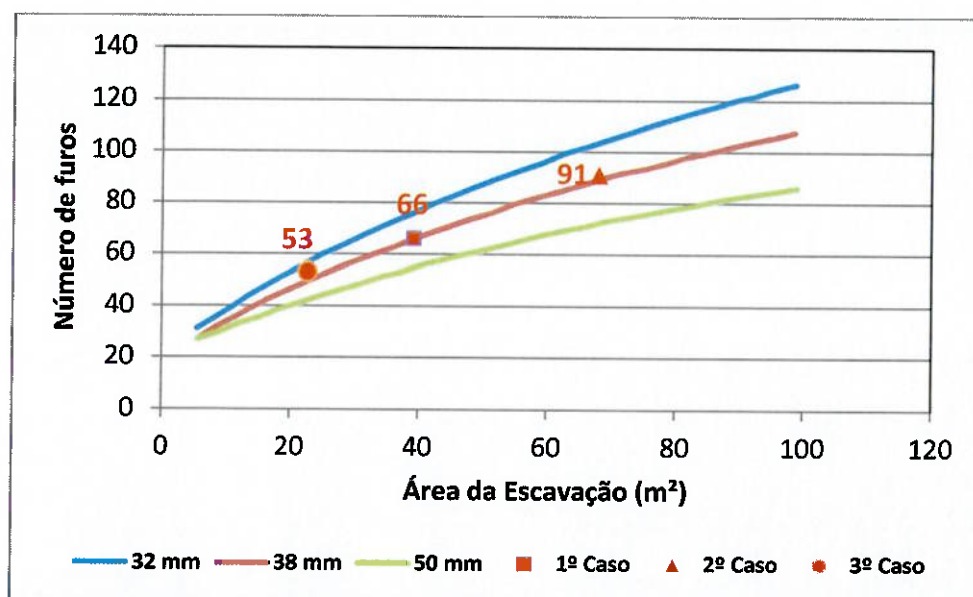


Figura 4.14 – Gráfico das curvas de número de furos e resultados calculados para os três casos simulados.

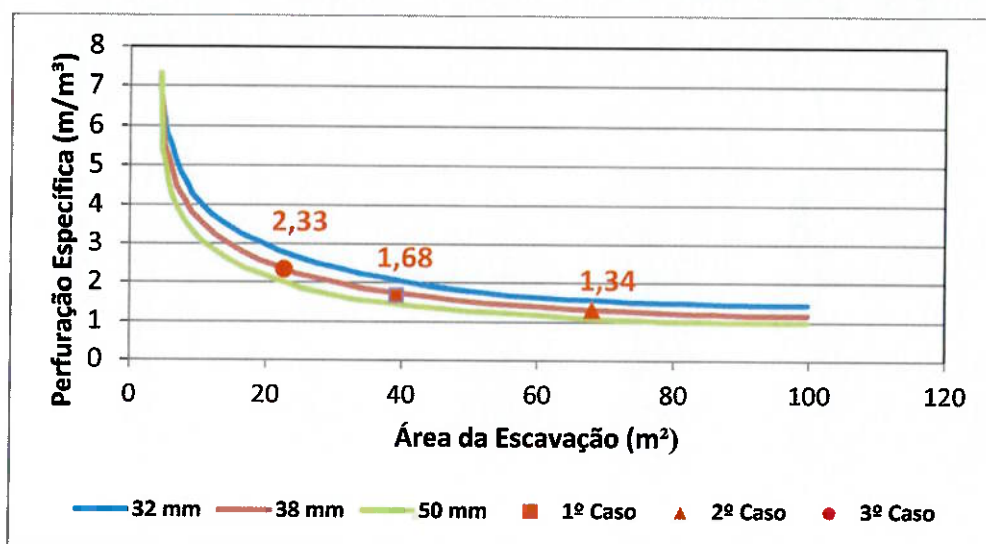


Figura 4.15 – Gráfico das curvas de perfuração específica e resultados calculados para os três casos simulados.

Os parâmetros encontrados apresentaram desvios relativamente baixos em relação aos valores esperados, todos menores que 15%, o que valida preliminarmente o método utilizado. No gráfico do carregamento específico, a curva de 40 mm foi considerada aproximadamente a mesma de 38 mm. Como esperado, com um aumento da área do túnel, há um aumento na necessidade de número de furos e uma queda no carregamento específico e na perfuração específica. Em alguns casos, os desvios obtidos podem ser significantes devido às outras variáveis que influenciam o desmorte, como diâmetro dos furos e do furo vazio, tipo de explosivo utilizado, entre outras. Escavações de área menor podem exigir explosivos menos potentes ou diâmetros de furos menores para atingir bons resultados. Por exemplo, a utilização do mesmo explosivo e do mesmo diâmetro do furo vazio em escavações de áreas

bem diferentes podem ocasionar em desvios altos em relação às curvas esperadas. Dessa forma, cada caso simulado teve parâmetros diferentes, mantendo-se constante o diâmetro dos furos e variando a área, o tipo explosivo e o diâmetro do furo vazio.

Com a validação realizada podem ser feitas diversas análises para um mesmo projeto, variando o diâmetro dos furos, tipo de explosivo ou a constante “c” da rocha para avaliar o impacto de cada variável no dimensionamento do plano de fogo. Se no 1º caso simulado a resistência da rocha fosse maior com uma constante “c” no valor de 0,55 e mantendo-se todas as outras variáveis constantes, pode-se simular o efeito de tal mudança no dimensionamento do plano de fogo. A figura 4.16 mostra as entradas e saídas no programa de exemplo acima.

## ^ DADOS DE ENTRADA

```

[0000] = L = 6; (*Largura do túnel em m*)
Hp = 6; (*Altura das paredes do túnel em m*)
Harc = 0.8; (*Altura do arco em m*)
φ = 0.102; (*Diâmetro do furo vazio em m*)
d = 0.038; (*Diâmetro dos furos em m*)
c = 0.55; (*Constante da rocha*)
Explosivo = Emulite150; (*Tipo do explosivo*)
φExp = {0.025, 0.030, 0.04};
(*Diâmetro dos Cartuchos de explosivos em m*)
LExp = 0.6; (*Comprimento dos cartuchos em m*)
  
```

### Parâmetros Gerais

Área da escavação: 39.2451 m<sup>2</sup>  
 Volume da escavação: 126.343 m<sup>3</sup>  
 Avanço do ciclo de desmonte: 3.05836 m  
 Número total de furos: 33  
 Profundidade dos furos: 3.21932 m  
 Metragem a ser perfurada: 267.204 m  
 Perfuração Específica: 2.11492 m m<sup>2</sup>  
 Consumo total de explosivos: 190.495 kg  
 Carregamento específico: 1.50777 kg m<sup>3</sup>

## ^ DADOS DE ENTRADA

```

[0000] = L = 6; (*Largura do túnel em m*)
Hp = 6; (*Altura das paredes do túnel em m*)
Harc = 0.8; (*Altura do arco em m*)
φ = 0.102; (*Diâmetro do furo vazio em m*)
d = 0.038; (*Diâmetro dos furos em m*)
c = 0.4; (*Constante da rocha*)
Explosivo = Emulite150; (*Tipo do explosivo*)
φExp = {0.025, 0.030, 0.04};
(*Diâmetro dos Cartuchos de explosivos em m*)
LExp = 0.6; (*Comprimento dos cartuchos em m*)
  
```

### Parâmetros Gerais

Área da escavação: 39.2451 m<sup>2</sup>  
 Volume da escavação: 126.343 m<sup>3</sup>  
 Avanço do ciclo de desmonte: 3.05836 m  
 Número total de furos: 66  
 Profundidade dos furos: 3.21932 m  
 Metragem a ser perfurada: 212.475 m  
 Perfuração Específica: 1.68174 m m<sup>2</sup>  
 Consumo total de explosivos: 159.462 kg  
 Carregamento específico: 1.26214 kg m<sup>3</sup>

Figura 4.16 – Dados de entrada e saída para análise da influência da constante “c” da rocha.

Pode-se notar que, como esperado, quanto maior a resistência da rocha, serão necessários mais furos, maior consumo de explosivos e conseqüentemente, maior carregamento específico e perfuração específica, resultando em maiores custos na operação. Cenários deste tipo e diversas outras análises podem ser simuladas de forma simples no programa. É claro que para se realizar uma análise mais detalhada para seleção da melhor alternativa, vários outros fatores devem ser levados em conta, como os custos da perfuração e explosivos, se a rocha é adequada para utilização de explosivos mais potentes, etc. Porém, para se realizar testes rápidos dos principais parâmetros que influenciam o dimensionamento, o programa atende ao que foi proposto.

## 5. CONCLUSÕES

Este trabalho teve como objetivo o desenvolvimento de um programa computacional que utiliza um modelo de cálculo empírico para dimensionamento do plano de fogo de um desmonte subterrâneo. O foco era obter uma ferramenta simples para avaliar superficialmente como alguns parâmetros influenciam no dimensionamento e fazer uma estimativa inicial dos recursos necessários para a operação de desmonte.

O programa foi desenvolvido no software Mathematica e o modelo utilizado é o demonstrado em Persson, Holmberg e Lee (1993), que se aplica ao método de pilões de furos paralelos com abertura de quatro seções. Algumas simplificações foram adotadas e modificações foram feitas no modelo para que os resultados fossem mais facilmente automatizados.

Os resultados dos parâmetros calculados pelo programa foram próximos dos resultados empíricos esperados para os exemplos escolhidos, o que valida o modelo para análises de como cada fator impacta no dimensionamento do plano de fogo. Foi possível obter uma ideia dos recursos necessários para cada ciclo de desmonte e avaliar diferentes cenários para um determinado projeto, como o impacto da resistência da rocha no dimensionamento do plano de fogo, por exemplo.

Dessa forma, os resultados deste trabalho atenderam às expectativas iniciais. Fica claro que o modelo é simplificado e não pode ser comparado aos softwares existentes utilizados na indústria. Existe uma quantidade enorme de variáveis que podem influenciar no desmonte e é necessário um programa extremamente complexo para levar em conta grande partes delas. Além disso, cada operação possui características bem peculiares e melhorias na eficiência na operação de desmonte são atingidas após muita experiência prática. Entretanto, é possível realizar análises rápidas de como os principais parâmetros vão afetar o plano de fogo, demonstrando utilidade principalmente para fins didáticos em disciplinas de graduação, se tornando uma ferramenta para desenvolvimento de outras pesquisas. Para desenvolvimento futuro também podem ser inclusos os custos operacionais e outras variáveis para avaliar de forma mais criteriosa as melhores alternativas para um determinado projeto.

## REFERÊNCIAS

- ASH R.L.; SMITH N.S.: **Changing Borehole Length to Improve Breakage: A Case History, Proc. Second Conf. Explosives and Blasting Techniques**, Society of Explosives Engineers, Louisville, 1976.
- Britanite: **Noções Básicas sobre aplicação de explosivos.**
- COOPER, PAUL W.: **Explosives engineering**, 1996.
- GUSTAFSSON, R.: **Blasting technique**, 1981.
- HEMPHILL, GARY B.: **Blasting Operations**, 1981.
- HENNIES, W. T.; AYRES DA SILVA, L. A.: **Vias subterrâneas em rocha - escavação por explosivos**. São Paulo: EPUSP, 1997.
- JIMENO, C.; JIMENO, E.; CARCEDO, F. J. **Drilling and blasting of rocks**. Rotterdam: A.A. Balkema, 1995.
- JOHANSEN, J. **Modern trends in tunnelling and blast design**. Rotterdam: A.A. Balkema, 2000.
- KONYA CALVIN J.; WALTER EDWARD J.: **Rock Blasting and Overbreak Control**, 1991.
- LANG, L.C.; FAVREAU, R.F. **A modern approach to open pit design and analysis**, 1972.
- LANGFORS, U; KIHLMSTROM B. **The modern technique of rock blasting**, 1963.
- MORIN, MARIO A. **Underground Hardrock Mine Design and Planning – A system's perspective**, Queens University, 2001.
- PERSSON, P.; HOLMBERG, R.; LEE, J. **Rock blasting and explosives engineering**. Boca Raton, FL: CRC Press, 1993.
- RAMULU, M. **Special Tunnel Blasting Techniques for Railway Projects**, 2012.
- Sandvik Tamrock: **Rock Excavation Handbook**, 1999.
- TATIYA, R. **Civil Excavation and Tunneling: A Practical Guide**, 2005.

## APÊNDICE – Código e interface do programa com exemplo calculado

```

PLANO DE FOGO PARA
TÚNEIS
PILÃO DE QUATRO SEÇÕES

Resolver ;

r[32474]= Remove["Global *"]

ARREDONDAMENTO

r[32472]= Arr[x_, n_] := If[FractionalPart[x*10^n] < 0.5, N[ $\frac{\text{IntegerPart}[x*10^n]}{10^n}$ ],
N[ $\frac{\text{IntegerPart}[x*10^n] + 1}{10^n}$ ]]

```

Figura 1 – Código do programa com função de arredondamento.

```

DADOS DE ENTRADA

r[32473]= L = 6; (*Largura do tunel em m*)
Hp = 6; (*Altura das paredes do túnel em m*)
Harc = 0.8; (*Altura do arco em m*)
phi = 0.102; (*Diâmetro do furo vazio em m*)
d = 0.038; (*Diâmetro dos furos em m*)
c = 0.4; (*Constante da rocha*)
Explosivo = Emulite150; (*Tipo do explosivo*)
phiExp = {0.025, 0.030, 0.04};
(*Diâmetro dos Cartuchos de explosivos em m*)
LExp = 0.6; (*Comprimento dos cartuchos em m*)

```

Figura 2 – Interface do programa com exemplo de dados de entrada

### ^ RELAÇÃO DE FORÇA DO EXPLOSIVO RELATIVA AO ANFO

```

r[32477]= Qvo = 5; (*Valor liberado na decomposição de 1kg de Dinamite-LFB*)
Vgaso = 0.85; (*Volume de Gas Liberado na decomposição de 1kg de Dinamite-LFB*)
SLFBanfo = 0.84; (*Força relativa h. explosivo em relação ao ANFO*)
If[Explosivo == LFBdynamite, {Qv = 5, Vgas = 0.850, dExp = 1450}];
If[Explosivo == DynamexM, {Qv = 4.7, Vgas = 0.88, dExp = 1400}];
If[Explosivo == ANFO, {Qv = 3.91, Vgas = 0.973, dExp = 900}];
If[Explosivo == TNT, {Qv = 5.1, Vgas = 0.610, dExp = 1640}];
If[Explosivo == PETN, {Qv = 6.38, Vgas = 0.973, dExp = 1670}];
If[Explosivo == Nabit, {Qv = 4.42, Vgas = 0.904, dExp = 1200}];
If[Explosivo == Garita, {Qv = 3.8, Vgas = 0.4, dExp = 1000}];
If[Explosivo == NG, {Qv = 6.27, Vgas = 0.716, dExp = 1590}];
If[Explosivo == Emulite150, {Qv = 4.1, Vgas = 0.84, dExp = 1200}];
If[Explosivo == Iremite62, {Qv = 3.75, Vgas = 0.852, dExp = 1180}];
If[Explosivo == IregelRX, {Qv = 2.68, Vgas = 0.941, dExp = 1200}];
If[Explosivo == Dynex205, {Qv = 4, Vgas = 0.863, dExp = 1170}];
If[Explosivo == Powergel2131, {Qv = 3.29, Vgas = 0.81, dExp = 1150}];
If[Explosivo == Kimit60, {Qv = 4.1, Vgas = 0.74, dExp = 1100}];
If[Explosivo == Emulet20, {Qv = 2.4, Vgas = 1.12, dExp = 220}];

SLFB =  $\frac{5 Qv}{6 Qvo} + \frac{Vgas}{6 Vgaso}$ ; (*Relação de força do explosivo em relação à Dinamite-LFB*)
Sanfo =  $\frac{SLFB}{SLFBanfo}$ ; (*Relação de força do explosivo em relação ao ANFO*)

```

Figura 3 – Código do programa com cálculo da força do explosivo.

## ^ CONCENTRAÇÃO LINEAR DE CARGA

```

[32492] = 
$$lExp = \pi \left( \frac{\phi Exp}{2} \right)^2 dExp;$$

(*Concentração linear de carga dos cartuchos*)

```

## ^ AVANÇO

```

[32493] = 
$$H = 0.15 + 34.1 \phi - 39.3 \phi^2;$$
 (*Profundidade da perfuração*)

```

```

[32494] = 
$$Ia = 0.95 H;$$
 (*Avanço do desmonte*)

```

Figura 4 – Código do programa com cálculo da concentração linear e avanço.

## ^ PILÃO - PRIMEIRO QUADRILÁTERO

```

[32495] = 
$$B1 = 1.5 \phi;$$
 (*Encargo recomendável para desvios menores que 1%)

```

```

[32498] = 
$$l1 = 55 d \left( \frac{B1}{\phi} \right)^{1.5} \left( B1 - \frac{\phi}{2} \right) \left( \frac{c}{0.4} \right) \left( \frac{1}{Sanfo} \right);$$

(*Concentração linear de carga requerida*)

```

```

[32497] = 
$$deltal1 = lExp - l1;$$
 (*Seleção de carga mais próxima*)

$$l1 = l1 + \text{Min}[deltal1];$$


```

```

[32499] = 
$$ht = 10 d;$$
 (*Comprimento do tampão*)

```

```

[32500] = 
$$A1 = \sqrt{2} B1;$$
 (*Distância entre furos*)

```

```

[32501] = 
$$NCexp1q = \frac{H - ht}{lExp};$$
 (*Número de cartuchos de explosivos*)

$$NCexp1q = \text{Arr}[NCexp1q, 1];$$


```

```

[32503] = 
$$lfuro1q = NCexp1q lExp l1;$$
 (*Carga de explosivo por furo*)

```

```

[32504] = 
$$lTotal1q = 4 lfuro1q;$$
 (*Carga total*)

```

Figura 5 – Código do programa com cálculo do 1º quadrilátero do pilão.

## ^ PILÃO - SEGUNDO QUADRILÁTERO

```

[32505] = 
$$B2 = 0.088 \sqrt{\frac{A1 lExp Sanfo}{d c}};$$
 (*Encargo máximo*)

```

```

[32506] = 
$$Bx2 = \text{Select}[B2, x \leq (2 * A1) \&];$$

(*Seleção de B2 de acordo com as restrições*)

$$B2 = \text{Max}[Bx2];$$
 (*Escolha do maior encargo que atende as restrições*)

```

```

[32508] = 
$$l2 = ((B2 / 0.088)^2 * (d c) / (A1 Sanfo));$$

(*Concentração linear de carga selecionada*)

```

```

[32509] = 
$$ht = 10 d;$$
 (*Comprimento do tampão*)

```

```

[32510] = 
$$A2 = \sqrt{2} \left( B2 + \frac{A1}{2} \right);$$
 (*Distância entre furos*)

```

```

[32511] = 
$$NCexp2q = \frac{H - ht}{lExp};$$
 (*Número de cartuchos de explosivos*)

$$NCexp2q = \text{Arr}[NCexp2q, 1];$$


```

```

[32513] = 
$$lfuro2q = NCexp2q lExp l2;$$
 (*Carga de explosivo por furo*)

```

```

[32514] = 
$$lTotal2q = 4 lfuro2q;$$
 (*Carga total*)

```

Figura 6 – Código do programa com cálculo do 2º quadrilátero do pilão.

## ▲ PILÃO - TERCEIRO QUADRILÁTERO

r[32516]=	$B3 = 0.088 \sqrt{\frac{A2 \text{LExp Sanfo}}{d c}} ; (*\text{Encargo máximo} *)$ $Bx3 = \text{Select}[B3, \# \leq (2 * A2) \&];$ (*Seleção de B3 de acordo com as restrições*) $B3 = \text{Max}[Bx3]; (*\text{Escolha do maior encargo que atende às restrições} *)$
r[32518]=	$l3 = ((B3 / 0.088) ^ 2) * ((d c) / (A2 \text{Sanfo}));$ (*Concentração linear de carga selecionada*)
r[32519]=	ht = 10 d; (*Comprimento do tampão*)
r[32520]=	$A3 = \sqrt{2} \left( B3 + \frac{A2}{2} \right); (*\text{Distância entre furos} *)$
r[32521]=	$NCexp3q = \frac{H - ht}{LExp}; (*\text{Número de cartuchos de explosivos} *)$ $NCexp3q = \text{Arr}[NCexp3q, 1];$
r[32522]=	lfuro3q = NCexp3q LExp l3; (*Carga de explosivo por furo*)
r[32524]=	lTotal3q = 4 lfuro3q; (*Carga total*)

Figura 7 – Código do programa com cálculo do 3º quadrilátero do pilão.

## ▼ PILÃO - QUARTO QUADRILÁTERO

r[32525]=	$B4 = 0.088 \sqrt{\frac{A3 \text{LExp Sanfo}}{d c}} ; (*\text{Encargo máximo} *)$ $Bx4 = \text{Select}[B4, \# \leq (2 * A3) \&]; (*\text{Seleção de B3 de acordo com as restrições} *)$ $B4 = \text{Max}[Bx4]; (*\text{Escolha do maior encargo que atende às restrições} *)$
r[32526]=	$l4 = ((B4 / 0.088) ^ 2) * ((d c) / (A3 \text{Sanfo})); (*\text{Concentração linear de carga selecionada} *)$
r[32528]=	ht = 10 d; (*Comprimento do tampão*)
r[32530]=	$A4 = \sqrt{2} \left( B4 + \frac{A3}{2} \right); (*\text{Distância entre furos} *)$
r[32531]=	$NCexp4q = \frac{H - ht}{LExp}; (*\text{Número de cartuchos de explosivos} *)$ $NCexp4q = \text{Arr}[NCexp4q, 1];$
r[32532]=	lfuro4q = NCexp4q LExp l4; (*Carga de explosivo por furo*)
r[32534]=	lTotal4q = 4 lfuro4q; (*Carga total*)

Figura 8 – Código do programa com cálculo do 4º quadrilátero do pilão.

## ^ FUROS DE LEVANTE

n[32535]=	$lL = \text{Max}[lExp];$ (*Maior concentração linear de carga disponível*) $f = 1.45;$ (*Fator de fixação*) $BL = 0.9 \sqrt{\frac{lL \text{ Sanfo}}{c f}};$ (*Encargo dos furos de levante*)
n[32538]=	$ccor = \text{If}[BL \geq 1.4, c + 0.05, c + \frac{0.07}{BL}];$ (* $B \geq 1.4: c + 0.05,$ $B < 1.4: c + \frac{0.07}{B}$ - Constante da rocha corrigida*)
n[32539]=	$BL = 0.9 \sqrt{\frac{lL \text{ Sanfo}}{ccor f}};$ (*Encargo dos furos de levante corrigido*)
n[32540]=	$NfL = \text{IntegerPart}[\frac{L}{BL} + 2];$ (*Número de furos de levante*)
n[32541]=	$SL = \frac{L}{NfL - 1};$ (*Espaçamento dos furos de levante*)
n[32542]=	$hcfl = 1.25 BL;$ (*Comprimento da carga de fundo*) $hccl = H - hcfl - 10 d;$ (*Comprimento da carga de coluna*)
n[32544]=	$NCexpcfl = \frac{hcfl}{lExp};$ (*Número de cartuchos de explosivos na carga de fundo*) $NCexpcfl = \text{Arr}[NCexpcfl, 1];$
n[32546]=	$NCexpccl = \frac{hccl}{lExp};$ (*Número de cartuchos de explosivos na carga de coluna*) $NCexpccl = \text{Arr}[NCexpccl, 1];$
n[32548]=	$lLcc = \text{Extract}[lExp, \{2\}];$ (* Seleciona o explosivo com concentração de carga intermediária*)
n[32549]=	$lfuroL = (NCexpcfl lExp lL) + (NCexpccl lExp lLcc);$ (*Carga de explosivo por furo*)
n[32550]=	$lTotalL = NfL lfuroL;$ (*Carga total*)

Figura 9 – Código do programa com cálculo dos furos de levante.

## ▼ FUROS DE CONTORNO DO TETO

l= 32551 =	SCT = 15 d; (*Espaçamento dos furos de contorno no teto com k=15*)
l= 32552 =	BCT = 0.8 SCT; (*Encargo dos furos de contorno no teto*)
l= 32553 =	ICT = 90 d <sup>2</sup> ; (*Concentração linear de carga recomendada*)
l= 32554 =	ICT = Min [lExp]; (*Menor concentração linear de carga disponível*)
l= 32555 =	$\text{Carc} [L, \text{Harc}_c] := \frac{(4 \text{Harc}_c^2 + L^2) \text{ArcSin} \left[ \frac{4 \text{Harc}_c L}{4 \text{Harc}_c^2 + L^2} \right]}{4 \text{Harc}_c};$ /*Comprimento do arco dados a largura da seção L e a altura do arco Harc_c*) Carco = Carc [L, Harc_c]; (*Comprimento do arco do teto*)
l= 32557 =	NfCT = IntegerPart $\left[ \frac{\text{Carco}}{\text{SCT}} + 2 \right]$ ; (*Número de furos de contorno no teto*)
l= 32559 =	SCT = $\frac{\text{Carco}}{\text{NfCT} - 1}$ ; /*Espaçamento dos furos de contorno no teto ajustado*)
l= 32556 =	NExpCT = $\frac{H}{\text{lExp}}$ ; (*Número de cartuchos de explosivos*) NExpCT = Arr [NExpCT, 1];
l= 32561 =	lfuroCT = NExpCT lExp ICT; (*Carga de explosivo por furo*)

Figura 10 – Código do programa com cálculo dos furos de contorno do teto.

## ▼ FUROS DE CONTORNO DAS PAREDES

l= 32562 =	HrCP = Hp - SCT - BL; (*Altura remanescente da parede para os furos de contorno*)
l= 32564 =	ICP = Extract [lExp, {1}]; (*Concentração linear de carga mínima*) f = 1.2; (*Fator de iteração*) SB = 1.25; (*Relação espaçamento/encargo*) $\text{BCP} = 0.9 \sqrt{\frac{\text{ICP Sanfo}}{c f \text{SB}}};$ (*Encargo dos furos de contorno das paredes*) $\text{ccor} = \text{If} [\text{BCP} \geq 1.4, c + 0.05, c + \frac{0.07}{\text{BCP}}];$ $\text{BCP} = 0.9 \sqrt{\frac{\text{ICP Sanfo}}{\text{ccor} f \text{SB}}};$ (*Encargo corrigido dos furos de contorno da parede*)
l= 32574 =	NfCP = IntegerPart $\left[ \frac{\text{HrCP}}{\text{BCP SB}} + 2 \right]$ ; (*Número de furos de contorno por parede*) NfCPT = 2 NfCP; (*Número total de furos da parede*)
l= 32572 =	SCP = $\frac{\text{HrCP}}{\text{NfCP} - 1}$ ; /*Espaçamento dos furos de contorno das paredes*)
l= 32573 =	hcfCP = 1.25 BCP; (*Comprimento da carga de fundo*) hccCP = H - hcfCP - 10 d; (*Comprimento da carga de coluna*)
l= 32575 =	$\text{NExpfCP} = \frac{\text{hcfCP}}{\text{lExp}};$ /*Número de cartuchos de explosivos na carga de fundo*) NExpfCP = Arr [NExpfCP, 1];
l= 32577 =	$\text{NExpccCP} = \frac{\text{hccCP}}{\text{lExp}};$ /*Número de cartuchos de explosivos na carga de coluna*) NExpccCP = Arr [NExpccCP, 1];
l= 32576 =	ICPcc = Extract [lExp, {2}]; (*Seleciona o explosivo com concentração de carga intermediária*)
l= 32580 =	lfuroCP = (NExpfCP lExp ICP) + (NExpccCP lExp ICPcc); (*Carga de explosivo por furo*)
l= 32581 =	lTotalCP = NfCPT lfuroCP; (*Carga total*)

Figura 11 – Código do programa com cálculo dos furos de contorno da parede.

## ▼ FUIOS DE EXPANSÃO LATERAIS

001000	LrEL = L - A4 - 2 BCP ; (*Largura remanescente para os furos laterais *)
001001	f = 1.45 ; (*Fator de segurança *) SB = 1.25 ; (*Relação espessura / sobrecarga *) BEL = 0.9 $\sqrt{\frac{LExp \text{ Sanfo}}{c f SB}}$ ; (*Encargo dos furos de expansão laterais *) DeltaBEL = LrEL - BEL ; DeltaBEL = Select [DeltaBEL , # > 0 %] ; DeltaBEL = Max [DeltaBEL ] ; BEL = LrEL - DeltaBEL ; If [LrEL < BEL , BEL = ((L - A4) / 2) - BCP , BEL = LrEL - DeltaBEL ] ; (* Seleção do encargo que atende a restrição da largura remanescente *) If [LrEL < (B4 / 2) , lEL = 0 , lEL = $\frac{(BEL)^2 c f SB}{(0.9)^2 \text{ Sanfo}}$ ] ; ccor = If [BEL ≥ 1.4 , c + 0.05 , c + $\frac{0.07}{BEL}$ ] ; BEL = 0.9 $\sqrt{\frac{lEL \text{ Sanfo}}{ccor f SB}}$ ; (*Encargo corrigido dos furos laterais de expansão *) If [LrEL < (B4 / 2) , BEL = 0 ] ;
001007	If [BEL = 0 , NLV = 0 , If [ (LrEL / 2) < 2 BEL , NLV = 1 , If [ IntegerPart [ $\frac{LrEL}{BEL}$ ] = 1 , NLV = IntegerPart [ $\frac{LrEL}{BEL}$ ] , NLV = IntegerPart [ $\frac{LrEL}{BEL}$ ] + 1 ] ] ; (*Número de linhas verticais dos furos laterais *)
001008	If [BEL = 0 , NFLV = 0 , NFLV = IntegerPart [ (A4 / (1.25 BEL)) ] + 1 ] ; (*Número de furos por linha vertical *)
001009	If [BEL = 0 , SEL = 0 , SEL = $\frac{A4}{NFLV - 1}$ ] ; (*Espaçamento dos furos de expansão laterais ajustado *)
001010	NFEL = 2 NLV NFLV ; (*Número total de furos laterais de expansão *)
001011	hcfEL = 1.25 BEL ; (*Comprimento da carga de fundo *) If [BEL = 0 , hccEL = 0 , hccEL = H - hcfEL - 10 d ] ; (*Comprimento da carga de coluna *)
001012	NCexpfEL = $\frac{hcfEL}{LExp}$ ; (*Número de cartuchos de explosivos na carga de fundo *) NCexpfEL = Arr [NCexpfEL , 1] ;
001013	NCexpccEL = $\frac{hccEL}{LExp}$ ; (*Número de cartuchos de explosivos na carga de coluna *) NCexpccEL = Arr [NCexpccEL , 1] ;
001014	If [BEL = 0 , lELcc = 0 , lELcc = Min [LExp] ] ; (* Seleciona o explosivo com menor concentração de carga *)
001015	lfuroEL = (NCexpfEL LExp lEL) + (NCexpccEL LExp lELcc) ; (*Carga de explosivo por furo *)
001016	lTotalEL = NFEL lfuroEL ; (*Carga total *)

Figura 12 – Código do programa com cálculo dos furos de expansão laterais.

## ▼ FUROS DE EXPANSÃO SUPERIORES

```

012800) HRES = Hp - A4 - BL: (*altura remanescente para os furos superiores *)
012801) f = 1.2: (*Fator de (LxLx,lv *)
012802) SB = 1.25: (*Relação espaçamento /encargo *)
012803) BES = 0.9 * sqrt(LExp Sanfo / (c * f SB)): (*Encargo dos furos de expansão superiores *)
012804) DeltaBES = HRES - BES;
012805) DeltaBES = Select [DeltaBES, # > 0 0];
012806) DeltaBES = Max [DeltaBES];
012807) BES = HRES - DeltaBES: (*seleção de encargo que atende a restrição da altura remanescente *)
012808) If [HRES < 0.5 BES, LES = 0, LES = (BES)^2 * c * f SB / (0.9)^2 Sanfo];
012809) ccor = If [BES > 1.4, c + 0.05, c + 0.07 / BES];
012810) BES = 0.9 * sqrt(LES Sanfo / ccor * f SB): (*Encargo corrigido dos furos superiores de expansão *)
012811) If [HRES < 0.5 BES, BES = 0];
012812) If [BES = 0, NLH = 0, If [HRES < 2 BES, NLH = 1, If [IntegerPart [HRES / BES] = 1, NLH = IntegerPart [HRES / BES], NLH = IntegerPart [HRES / BES] + 1]];
012813) If [(NLH BES) > HRES, NLH = NLH - 1]:
012814) (*Número de linhas horizontais para os furos de expansão *)
012815) If [BES = 0, NFLH = 0, NFLH = IntegerPart [L - 2 BCP / 1.25 BES] + 2]: (*Número de furos por linha horizontal *)
012816) If [BES = 0, SES = 0, SES = L - 2 BCP / NFLH - 1]: (*Espaçamento dos furos de expansão superiores ajustado *)
012817) NRES = NLH NFLH: (*Número total de furos superiores de expansão *)
012818) hcfES = 1.25 BES: (*coeficiente de carga de fundo *)
012819) If [BES = 0, hccES = 0, hccES = H - hcfES - 10 d]: (*Comprimento da carga de coluna *)
012820) NcexpcfES = hcfES / LExp: (*Número de cartuchos de explosivos na carga de fundo *)
012821) NcexpcfES = Arr [NcexpcfES, 1];
012822) NcexpccES = hccES / LExp: (*Número de cartuchos de explosivos na carga de coluna *)
012823) NcexpccES = Arr [NcexpccES, 1];
012824) If [BES = 0, NLH = 0, LEScc = Min [LExp]]: (*seleciona o explosivo com concentração de carga intermediária *)
012825) lfuroES = (NcexpcfES * LExp * LES) + (NcexpccES * LExp * LEScc): (*Carga de explosivos por furo *)
012826) lTotales = NRES * lfuroES: (*Carga total *)

```

Figura 13 – Código do programa com cálculo dos furos de expansão superiores.

## PARÂMETROS FINAIS

```

012827) RaioCirc = sqrt((Harc^2) + (L/4)^2) / 2 Harc: (*Raio da circunferência do arco do teto *)
012828) theta = 2 ArcSin [L / (2 RaioCirc)]: (*Ângulo do arco *)
012829) AreaT = (L Hp) + (pi * (RaioCirc^2) * theta) / 2 - (L (RaioCirc - Harc)): (*Área de escavação *)
012830) VolumeT = AreaT H: (*Volume da escavação *)
012831) CarregamentoT = lTotal1q + lTotal2q + lTotal3q + lTotal4q + lTotalL + lTotalCT + lTotalCP + lTotalEL + lTotalES: (*Carregamento total *)
012832) CarregamentoSpec = CarregamentoT / VolumeT: (*Carregamento específicos *)
012833) NTfuros = 17 + NFL + NCT + NCP + NEL + NES: (*Número total de furos *)
012834) PerfuracTotal = (NTfuros H): (*Perfuração total *)
012835) PerfuracEspec = PerfuracTotal / VolumeT:
012836) (*Perfuração específica *)

```

Figura 14 – Código do programa com cálculo dos parâmetros finais.

# Relatório dos Cálculos

## Furos do Pilão

### 1º Quadrilátero

```
Print["Encargo B1 = ", B1, " m"]
Print["Distância A1 = ", A1 " m"]
Print["Concentração de carga L1 = ", L1 " kg/m³"]
Print["Número de furos = 4"]
Print["Número de cartuchos por furo = ", NCexp1q]
Print["Carga de explosivo por furo = ", lfuro1q, " kg"]
Print["Carga Total = ", lTotal1q, " kg"]
```

Encargo B1 = 0.153 m  
 Distância A1 = 0.216375 m  
 Concentração de carga L1 = 0.589049 kg m<sup>3</sup>  
 Número de furos = 4  
 Número de cartuchos por furo = 4.7  
 Carga de explosivo por furo = 1.66112 kg  
 Carga Total = 6.61447 kg

### 3º Quadrilátero

```
Print["Encargo B3 = ", B3, " m"]
Print["Distância A3 = ", A3 " m"]
Print["Concentração de carga L3 = ", L3 " kg/m³"]
Print["Número de furos = 4"]
Print["Número de cartuchos por furo = ", NCexp3q]
Print["Carga de explosivo por furo = ", lfuro3q, " kg"]
Print["Carga Total = ", lTotal3q, " kg"]
```

Encargo B3 = 0.753676 m  
 Distância A3 = 1.58371 m  
 Concentração de carga L3 = 1.50796 kg m<sup>3</sup>  
 Número de furos = 4  
 Número de cartuchos por furo = 4.7  
 Carga de explosivo por furo = 4.25246 kg  
 Carga Total = 17.0098 kg

### 2º Quadrilátero

```
Print["Encargo B2 = ", B2, " m"]
Print["Distância A2 = ", A2 " m"]
Print["Concentração de carga L2 = ", L2 " kg/m³"]
Print["Número de furos = 4"]
Print["Número de cartuchos por furo = ", NCexp2q]
Print["Carga de explosivo por furo = ", lfuro2q, " kg"]
Print["Carga Total = ", lTotal2q, " kg"]
```

Encargo B2 = 0.409664 m  
 Distância A2 = 0.732353 m  
 Concentração de carga L2 = 1.50796 kg m<sup>3</sup>  
 Número de furos = 4  
 Número de cartuchos por furo = 4.7  
 Carga de explosivo por furo = 4.25246 kg  
 Carga Total = 17.0098 kg

### 4º Quadrilátero

```
Print["Encargo B4 = ", B4, " m"]
Print["Distância A4 = ", A4 " m"]
Print["Concentração de carga L4 = ", L4 " kg/m³"]
Print["Número de furos = 4"]
Print["Número de cartuchos por furo = ", NCexp4q]
Print["Carga de explosivo por furo = ", lfuro4q, " kg"]
Print["Carga Total = ", lTotal4q, " kg"]
```

Encargo B4 = 1.10931 m  
 Distância A4 = 2.68724 m  
 Concentração de carga L4 = 1.50796 kg m<sup>3</sup>  
 Número de furos = 4  
 Número de cartuchos por furo = 4.7  
 Carga de explosivo por furo = 4.25246 kg  
 Carga Total = 17.0098 kg

Figura 15 – Código do programa com relatório de saída dos furos de pilão.

## Furos de Levante

```
Print ["Encargo BL = ", BL, " m"]
Print ["Espaçamento SL = ", SL, " m"]
Print ["Concentração de carga (coluna - fundo) = ", lLcc, "-", L1 " kg/m³"]
Print ["Número de furos = ", NFL]
Print ["Número de cartuchos por furo (coluna - fundo) = ", NCexpccL, "-", NCexpcfL]
Print ["Carga de explosivo por furo = ", lfuroL, " kg"]
Print ["Carga Total = ", lTotalL, " kg"]
```

Encargo BL 1.37473 m  
 Espaçamento SL 6  
 5 m  
 Concentração de carga (coluna fundo) 0.84823 1.50796 kg/m<sup>3</sup>  
 Número de furos 6  
 Número de cartuchos por furo (coluna fundo) 1.9 2.9  
 Carga de explosivo por furo 3.59084 kg  
 Carga Total 21.545 kg

Figura 16 – Código do programa com relatório de saída dos furos de levante.

## Furos de Contorno

### Furos de Contorno do Teto

```

l-[32959]= Print ["Encargo BCT = ", BCT, " m"]
Print ["Espaçamento SCT = ", SCT, " m"]
Print ["Concentração de carga LCT = ", LCT, " kg/m³"]
Print ["Número de furos = ", NICT]
Print ["Número de cartuchos por furo = ", NCexpCT]
Print ["Carga de explosivo por furo = ", lfuroCT, " kg"]
Print ["Carga Total = ", lTotalCT, " kg"]

```

```

Encargo BCT 0.456 m
Espaçamento SCT 0.523376 m
Concentração de carga LCT 0.589049 kg/m³
Número de furos 13
Número de cartuchos por furo 5.4
Carga de explosivo por furo 1.90852 kg
Carga Total 24.8107 kg

```

### Furos de Contorno da Parede

```

l-[32996]= Print ["Encargo BCP = ", BCP, " m"]
Print ["Espaçamento SL = ", SCP, " m"]
Print ["Concentração de carga (coluna-fundo) = ", lCPcc, "-", lCP, " kg/m³"]
Print ["Número de furos = ", NICPT]
Print ["Número de cartuchos por furo (coluna-fundo) = ", NCexpccCP, "-", NCexpcfCP]
Print ["Carga de explosivo por furo = ", lfuroCP, " kg"]
Print ["Carga Total = ", lTotalCP, " kg"]

```

```

Encargo BCP 0.81954 m
Espaçamento SL 0.82038 m
Concentração de carga (coluna fundo) 0.84823 0.589049 kg/m³
Número de furos 12
Número de cartuchos por furo (coluna fundo) 3.1.7
Carga de explosivo por furo 2.12764 kg
Carga Total 25.5317 kg

```

Figura 17 – Código do programa com relatório de saída dos furos de contorno.

## Furos de Expansão

### Furos Laterais de Expansão

```

l-[32973]= Print ["Encargo BEL = ", BEL, " m"]
Print ["Espaçamento SL = ", SEL, " m"]
Print ["Concentração de carga (coluna-fundo) = ", lELcc, "-", lEL, " kg/m³"]
Print ["Número de furos = ", NEL]
Print ["Número de cartuchos por furo (coluna, fundo) = ", NCexpccEL, "-", NCexpcfEL]
Print ["Carga de explosivo por furo = ", lfuroEL, " kg"]
Print ["Carga Total = ", lTotalEL, " kg"]

```

```

Encargo BEL 0.738578 m
Espaçamento SL 1.34362 m
Concentração de carga (coluna fundo) 0.589049 0.589049 kg/m³
Número de furos 6
Número de cartuchos por furo (coluna, fundo) 3.2 1.5
Carga de explosivo por furo 1.66112 kg
Carga Total 9.9667 kg

```

### Furos Superiores de Expansão

```

l-[32982]= Print ["Encargo BES = ", BES, " m"]
Print ["Espaçamento SL = ", SES, " m"]
Print ["Concentração de carga (coluna-fundo) = ", lEScc, "-", lES, " kg/m³"]
Print ["Número de furos = ", NES]
Print ["Número de cartuchos por furo (coluna, fundo) = ", NCexpccES, "-", NCexpcfES]
Print ["Carga de explosivo por furo = ", lfuroES, " kg"]
Print ["Carga Total = ", lTotalES, " kg"]

```

```

Encargo BES 0.81954 m
Espaçamento SL 0.872184 m
Concentração de carga (coluna fundo) 0.589049 0.589049 kg/m³
Número de furos 12
Número de cartuchos por furo (coluna, fundo) 3.1.7
Carga de explosivo por furo 1.66112 kg
Carga Total 19.9334 kg

```

Figura 18 – Código do programa com relatório de saída dos furos de expansão.

## Parâmetros Gerais

```

In[32937]= Print ["Área da escavação : ", AreaT , " m2"]
Print ["Volume da escavação : ", VolumeT , " m3"]
Print ["Avanço do ciclo de desmonte : ", Ia , " m"]
Print ["Número total de furos : ", NTFuros ]
Print ["Profundidade dos furos : ", H , " m"]
Print ["Metragem a ser perfurada : ", PerfuracTotal , " m"]
Print ["Perfuração Específica : ", PerfuracEspec , " m/m3"]
Print ["Consumo total de explosivos : ", CarregamentoT , " kg"]
Print ["Carregamento específico : ", Carregamentoespec , " kg/m3"]

```

```

Área da escavação: 39.2451 m2
Volume da escavação: 126.343 m3
Avanço do ciclo de desmonte: 3.05836 m
Número total de furos: 66
Profundidade dos furos: 3.21932 m
Metragem a ser perfurada: 212.475 m
Perfuração Específica: 1.68174 m/m3
Consumo total de explosivos: 159.462 kg
Carregamento específico: 1.26214 kg/m3

```

Figura 19 – Código do programa com relatório dos parâmetros finais calculados.

## Representação Gráfica

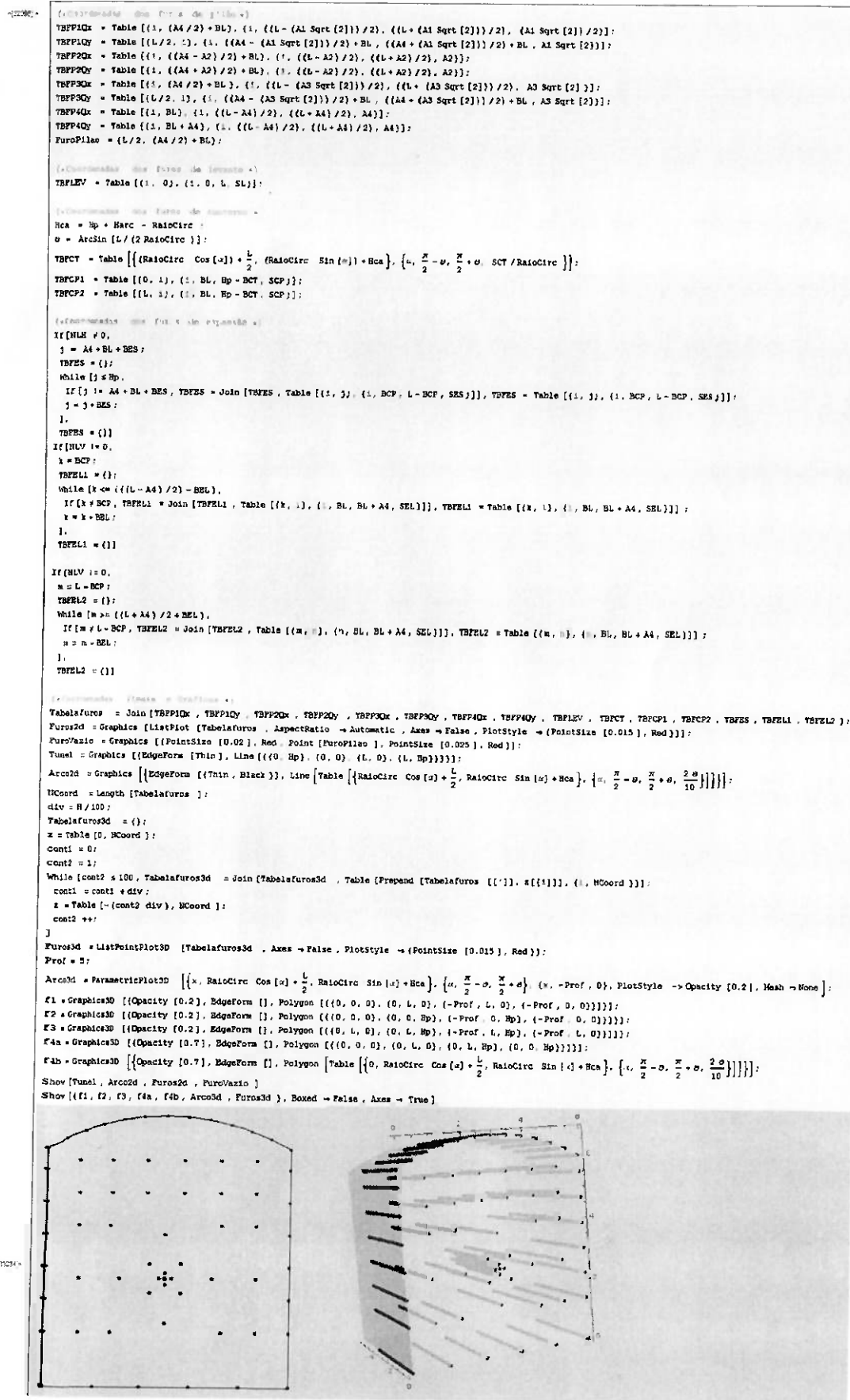


Figura 20 – Código do programa com cálculo das coordenadas e representação gráfica.