

Mestrado em Engenharia de Minas e Geo - Ambiente

***Caraterização e Propostas de Otimização
do Ciclo de Perfuração na Mina da
Panasqueira***

Dissertação de Mestrado

de

António Luís Oliveira Rodrigues

Desenvolvida no âmbito da unidade curricular de Dissertação

realizado em

Beralt Tin & Wolfram (Portugal) S.A.

Orientador na FEUP: **Prof. Alexandre Machado Leite**

Orientador na Beralt Tin & Wolfram (Portugal) S.A.: **Eng. Manuel Pacheco**



Departamento de Engenharia de Minas

Outubro de 2018

Agradecimentos

Chegando ao final de 5 anos torna-se difícil agradecer individualmente a cada pessoa que de alguma forma contribuiu para que este meu percurso na FEUP fosse recheado de conhecimento, amizade e companheirismo.

Ao Professor Alexandre Leite, orientador desta dissertação, e docente de uma mão cheia de cadeiras que tive o prazer de frequentar, obrigado pelos conselhos, pela paciência e por todos os conhecimentos transmitidos.

Ao Eng. Manuel Pacheco, coorientador desta dissertação e diretor técnico da BTW, um muito obrigado pelo apoio, disponibilidade e por todos os conhecimentos transmitidos. Foi uma experiência muito enriquecedora.

Aos Professores do DEM um agradecimento especial, por todos os conhecimentos transmitidos ao longo dos últimos 5 anos, serão certamente essenciais ao longo da minha carreira como Eng. De Minas.

À BTW, na pessoa do Eng. João Pedro Real (Diretor Geral) por me ter proporcionado todas as condições necessárias para a realização desta dissertação e alojamento ao longo dos 2 meses que estive na Mina da Panasqueira. Sem esquecer o Eng. Nelson, o Eng. Luís, o Eng. Pedro, o Filipe, o Sr. Paulo Quintela, a Susana, o Marco e a Sónia que de alguma forma contribuíram para o meu crescimento como futuro Eng. De Minas.

Caros encarregados da mina da Panasqueira, jumbeiros e respetivos ajudantes ao longo de 8 semanas, desci ao fundo da Mina com vocês, são poucas as palavras para vos agradecer a forma como me receberam, ajudaram e me deram ensinamentos que só indo à Mina é que se adquirem.

Amigos de Bragança, companheiros de secundário, de faculdade e do que ainda está para vir, no fim de semana tomamos um café.

“Gang dos discentes” e prezados companheiros de curso, não podia ter pedido mais, foram parte essencial do meu percurso na FEUP e da minha estadia no Porto. Certamente nos veremos em breve, no mundo do trabalho ou nas galerias Paris.

A todos que fizeram parte do GEM-FEUP ao longo dos últimos 4 anos, em especial aos que me acompanharam nos últimos 2 anos. Obrigado por terem acreditado que era possível, fizemos o que se pensava ser impossível. Aos que ficam, continuem na luta e estarei sempre disponível para vos ajudar.

A todos os Professores e colegas da E.T.S.I de Minas y Energia de Madrid, uma palavra muito especial por terem feito da minha aventura de Erasmus uma das experiências mais enriquecedoras do meu percurso académico.

Susana e Céu obrigado por tudo, ensinaram-me mais do que imaginam. São exemplos de superação que certamente levo comigo para a vida.

Ao Francisco e ao Tiago companheiros de dissertação, de debates e de noitadas no cubo, um grande abraço. Reforço o do Tiago por ter sido o companheiro de aventura de dois meses no Alentejo.

Marta a ti, pela amizade, pelo companheirismo e por todo o apoio, foste incansável.

Para o Mário, o Jorge, o Bruno, o Pedro e todos os trabalhadores do Departamento de Enchimento e Serviços da Somincor, um agradecimento especial por todos os ensinamentos transmitidos ao longo do estágio de verão e que me irão ser muito úteis como Eng. De Minas. Alguns deles essenciais na reta final desta dissertação. Inês e Margarida sem vocês, de certeza que não ia ser igual, obrigado por me terem integrado tão bem e pela amizade.

Por fim, mas os mais importantes. Ao meu pai, à minha mãe e à minha irmã que são os meus alicerces, o meu porto de abrigo, o meu orgulho e a minha inspiração. Dizer obrigado é pouco para vocês.

Resumo

Num mundo em que os mercados são cada vez mais competitivos, a caracterização e otimização de processos é uma prioridade para todas as empresas que se destacam nos mercados onde estão inseridas. Ao otimizar é necessário mapear e caraterizar todos os processos da empresa, o que significa conhecer de forma real e analítica todo o funcionamento da organização.

A Mina da Panasqueira já conta com mais de 130 anos de história, tendo tido sempre a capacidade de se adaptar às exigências do mercado e corresponder da melhor forma às flutuações do mesmo. Atualmente, os equipamentos de perfuração mais modernos estão equipados com tecnologia de ponta que lhes permite executar furos com elevada precisão, aumentando de forma considerável a eficiência do processo de perfuração. Contudo, os equipamentos que realizam esta atividade na Mina da Panasqueira são bastante limitados em termos de tecnologia e sistemas de controlo de perfuração.

Os objetivos principais desta dissertação são a caracterização do ciclo de perfuração de produção da mina da Panasqueira e a apresentação de propostas para otimização do mesmo. Com o avançar da dissertação foi lançado um objetivo mais específico por parte da empresa, que consiste na apresentação de propostas de otimização que tenham caráter de implementação simples e imediata. A Mina da Panasqueira apresenta um tipo de perfuração retropercussiva, sendo este um sistema clássico que se baseia no impacto de uma peça de aço (pistão) que golpeia um útil (vara) que por sua vez transmite a energia até ao fundo do furo por meio de um elemento final (bit). A recolha de dados foi realizada ao longo de oito semanas, tendo sido acompanhados os 2 turnos em que decorrem os trabalhos de perfuração ao longo dos 40 dias de trabalho de campo. Os tempos foram contabilizados com recurso ao cronómetro de um telemóvel, que permitiu contar as voltas. O tratamento dos dados foi efetuado com recurso ao Excel, tendo sido utilizadas algumas ferramentas de construção de gráficos, análise estatística descritiva e de organização de dados.

Como forma de conclusão, é possível afirmar que os objetivos propostos inicialmente foram cumpridos, uma vez que foi feita uma caraterização detalhada do ciclo de perfuração de produção da Mina da Panasqueira e foram apresentadas propostas de otimização.

Palavras Chave: Perfuração; Otimização; Caracterização; Panasqueira; Jumbos;

Abstract

In a world where markets are increasingly competitive, process characterization and optimization is a priority for all companies that transcend in the markets in which they are embedded. When optimizing it is necessary to map and characterize all the processes of the company, which means to know in a real and analytical way the whole operation of the organization.

The Panasqueira Mine has more than 130 years of history and has always had the capacity to adapt to the demands of the market and to correspond in the best way to its fluctuations. Nowadays the drilling rigs are equipped with modern technology that allows them to drill holes with high precision, greatly increasing the drilling process's efficiency. However, the equipment that performs this activity in the Panasqueira Mine is quite limited in terms of technology and drilling control systems.

The main objectives of this dissertation are the characterization of the production drilling cycle of the Panasqueira mine and the presentation of proposals for its optimization. With the advancement of the dissertation, a more specific objective was launched by the company, which consists in the presentation of optimization proposals that have a simple and immediate implementation character. The Panasqueira Mine presents a type of retropercussive drilling, which is a classic system that is based on the impact of a piece of steel (piston) that strikes a tool (rod) that in turn transmits the energy to the bottom of the hole through of a final element (bit). The data collection was carried out over a period of eight weeks, following the 2 shifts in which the drilling work was carried out during the 40 days of fieldwork. The times were counted using the stopwatch of a mobile phone, which made it possible to count the laps. The data were processed using Excel, using some graphic construction tools, descriptive statistical analysis and data organization.

As a conclusion, it is possible to claim that the objectives initially proposed were fulfilled, since a detailed characterization of the production drilling cycle of the Panasqueira Mine was made and optimization proposals were presented.

Keywords: Drilling; Optimization; Characterization; Panasqueira; Driller;

Índice

1	Introdução.....	1
1.1	Enquadramento	1
1.2	Objetivos	2
1.3	Apresentação da Beralt Tin & Wolfram Portugal.....	2
1.4	Organização da Tese	3
2	Perfuração Rotopercussiva.....	5
2.1	Propriedades das rochas que afetam a perfuração.....	7
2.1.1	Dureza.....	7
2.1.2	Resistência	8
2.1.3	Elasticidade	8
2.1.4	Plasticidade	9
2.1.5	Abrasividade	9
2.1.6	Textura	10
2.1.7	Estrutura.....	10
2.2	Métodos e Princípios Básicos.....	10
2.2.1	Tipologia de Trabalhos de Perfuração em Desmonte de Rocha com Explosivos	11
2.2.2	Campos de aplicação dos diferentes métodos de perfuração.....	11
2.2.3	Fundamentos da perfuração Rotopercussiva	14
2.2.4	Perfuração com Martelo à cabeça	23
2.2.5	Sistemas de Avanço	26
2.2.6	Velocidade de penetração e velocidade de perfuração	28
2.3	Equipamentos.....	29
2.3.1	Equipamentos para aplicações subterrâneas - Jumbos.....	30
2.4	Acessórios	41
2.4.1	Tipos de Roscas.....	43
2.4.2	Encabadouros	44
2.4.3	Varas	44
2.4.4	Uniões	46

2.4.5	Bits.....	47
2.4.6	Vida útil dos acessórios de perfuração	49
2.4.7	Conservação e Manutenção dos Bits	51
2.4.8	Conservação e Manutenção das Varas	54
2.4.9	Guia para a identificação das causas de rotura dos acessórios de perfuração.....	54
3	A Mina da Panasqueira	57
3.1	Enquadramento Geográfico	57
3.2	Enquadramento Geológico	58
3.3	Mineralogia.....	62
3.3.1	Associações Minerais.....	63
3.3.2	Minérios produzidos.....	64
3.4	Enquadramento Histórico	64
3.5	Estrutura atual da mina.....	66
3.5.1	Áreas de Produção	69
3.5.2	Método de Desmonte	69
3.6	Produção.....	72
3.7	Reservas	73
4	Ciclo de Atividades da Mina da Panasqueira	75
4.1	Marcação do diagrama de fogo	76
4.1.1	Marcação do eixo da frente	76
4.1.2	Marcação do Diagrama de Fogo.....	77
4.2	Perfuração.....	79
4.3	Carregamento e Detonação	79
4.3.1	Detonadores e Explosivos empregues	80
4.4	Saneamento, Limpeza, Remoção e Transporte de material das frentes	81
4.5	Extração	82
4.6	Atividades Auxiliares	83
4.6.1	Sustimento	83
4.6.2	Saneamento	83

4.6.3	Ventilação	84
4.6.4	Drenagem de águas	85
5	Perfuração de Produção - Mina da Panasqueira.....	87
5.1	Equipamentos de perfuração (jumbos)	87
5.1.1	Especificações técnicas dos jumbos	88
5.2	Acessórios de Perfuração.....	95
5.2.1	Encabadouros	96
5.2.2	Varas	96
5.2.3	Uniões.....	97
5.2.4	Bits.....	97
5.3	Equipas de trabalho	99
5.4	Variações do Diagrama de Fogo	99
5.5	Procedimentos de Segurança	101
5.6	Metodologia de Aquisição e Tratamento de Dados	101
5.6.1	Atividades Elementares que compõem a Atividade de Perfuração de Produção	102
5.6.2	Aquisição de dados.....	103
5.6.3	Tratamento de Dados	105
5.6.4	Resultados.....	106
6	Discussão e Conclusões	111
6.1	Propostas de otimização.....	111
6.1.1	Sequência de perfuração e inclinação dos furos	111
6.1.2	Controlo do Comprimento dos Furos das Caldeiras	113
6.1.3	Controlo do Posicionamento do Jumbos	114
6.2	Conclusões	114
6.3	Trabalhos Futuros.....	115
	Referências	117
Anexo 1	Variações do Diagrama de Fogo	119
Anexo 2	Folha de Aquisição de Dados.....	120
Anexo 3	Tabelas de Organização de Dados	121

Anexo 4 Dados e Resultados do Estudo do Comprimento dos Furos de Caldeira 123

Índice de Figuras

<i>Figura 1-1 - Relações intercooperativas entre a Almonty Industries e as suas subsidiárias</i>	<i>2</i>
<i>Figura 2-1- a) Ábaco de Pettifer & Fookes (1994); b) Ábaco de Tsiambaos & Saroglou (2010).....</i>	<i>6</i>
<i>Figura 2-2 - Aumento da área específica mediante a aplicação de explosivos.....</i>	<i>6</i>
<i>Figura 2-3 - Ações básicas dos métodos rotopercussivos e a rotação com tricornes.</i>	<i>12</i>
<i>Figura 2-4 - Campos de aplicação dos diferentes métodos de perfuração.....</i>	<i>13</i>
<i>Figura 2-5 - Ações básicas da perfuração rotopercussiva</i>	<i>14</i>
<i>Figura 2-6 - Níveis de tensões gerados por pistões com a mesma massa por martelos pneumáticos e hidráulicos.</i>	<i>16</i>
<i>Figura 2-7 - Dinâmica da percursão.</i>	<i>16</i>
<i>Figura 2-8 - Perdas de energia nos acoplamentos.</i>	<i>17</i>
<i>Figura 2-9 - Profundidade de penetração em função da forma do botão</i>	<i>18</i>
<i>Figura 2-10 - Pressão de percussão segundo o tipo de rocha</i>	<i>20</i>
<i>Figura 2-11 - Influencia do empuxe sobre a velocidade de penetração.</i>	<i>21</i>
<i>Figura 2-12 - Princípio de limpeza de um furo.....</i>	<i>21</i>
<i>Figura 2-13 - Seção de um martelo hidráulico..</i>	<i>24</i>
<i>Figura 2-14 - Guia Hidráulica telescópica.....</i>	<i>27</i>
<i>Figura 2-15 - Equipamentos de Perfuração..</i>	<i>30</i>
<i>Figura 2-16 - Possibilidades de perfuração transversal de segundo o tipo de braços.....</i>	<i>33</i>
<i>Figura 2-17 - Jumbo em trabalhos de perfuração com cabine elevada e estabilizado com os 4 macacos hidráulicos (Sandvik).....</i>	<i>35</i>
<i>Figura 2-18 - Braço telescópico hidráulico e telescópico.</i>	<i>37</i>
<i>Figura 2-19 - Braços extensível com rotação em linha (Atlas Copco).</i>	<i>38</i>
<i>Figura 2-20 - Acessórios de perfuração.....</i>	<i>42</i>
<i>Figura 2-21 - Tipos e perfis das roscas R, T, C e GD.</i>	<i>43</i>
<i>Figura 2-22 -Encabadouros.....</i>	<i>44</i>
<i>Figura 2-23 - Vara com encabadouro.....</i>	<i>44</i>
<i>Figura 2-24 - Tipos de varas.</i>	<i>45</i>
<i>Figura 2-25 - Tipos de Bits e respetivos componentes.....</i>	<i>48</i>
<i>Figura 2-26 - Exemplos de botões e bits desgastados.....</i>	<i>52</i>

<i>Figura 2-27 -Medição do desgaste dos botões..</i>	52
<i>Figura 2-28 - Tipos de mós empregues na afiação dos botões..</i>	53
<i>Figura 2-29 - Influência da afiação dos botões.....</i>	54
<i>Figura 3-1 - Mapa de Portugal continental com demarcação da área de concessão</i>	57
<i>Figura 3-2 - Mapa geológico simplificado de Portugal Continental.</i>	58
<i>Figura 3-3 - Carta geológica simplificada da área da concessão.....</i>	59
<i>Figura 3-4 - a) Fotografia de filões pouco possantes b) Fotografia de filão possante.....</i>	60
<i>Figura 3-5 - Filões sub-horizontais em “rabo de enguia”.....</i>	60
<i>Figura 3-6 - Filão de “seixo bravo” intersectado por um filão horizontal mineralizado.....</i>	61
<i>Figura 3-7 - Falhas: a) com preenchimento argiloso (Falha das Lameiras, Nível 1); b) com preenchimento carbonatado e brechóide (Falha 8E, Nível 3), pertencentes ao sistema N-S e NE-SW respetivamente</i>	61
<i>Figura 3-8 - Classificação dos Minerais existentes na Mina da Panasqueira</i>	62
<i>Figura 3-9 - Cavidades nos filões sub-horizontais - “Rotos”.....</i>	63
<i>Figura 3-10 - Paragénese mineral e sequência de deposição.....</i>	64
<i>Figura 3-11 - Planta de desenvolvimento da Mina.....</i>	68
<i>Figura 3-12 - Esquema geral de operações subterrâneas</i>	68
<i>Figura 3-13 - Fases do Método de exploração de Câmaras e Pilares.....</i>	71
<i>Figura 3-14 - Mini - giratória para recuperação de finos.....</i>	71
<i>Figura 3-15 - Produções anuais de concentrados, de 1947 a 2016.....</i>	72
<i>Figura 4-1 - Pontos de identificação do eixo de uma galeria.....</i>	76
<i>Figura 4-2 - Estabilização do arame com recurso a um martelo.....</i>	77
<i>Figura 4-3 - Diagrama de fogo (fan -cut).....</i>	78
<i>Figura 4-4 - Distribuição no diagrama de fogo dos tempos dos detonadores.....</i>	79
<i>Figura 4-5 - Detonadores não-elétricos. Do lado esquerdo detonador com Retardo Millisegundo e do lado direito Retardo Longo</i>	80
<i>Figura 4-6 - Explosivos aplicados nas pegas de fogo</i>	81
<i>Figura 4-7 - Pá carregadora (LHD) Wagner ST7 LP.....</i>	82
<i>Figura 4-8 - Composição de vagões e respetiva locomotiva (à esquerda) e vagões a descarregarem material para a torva principal de minério (à direita).....</i>	83
<i>Figura 4-9 - Atividade de Saneamento.....</i>	84

<i>Figura 5-2 - Dimensões do jumbo da marca Sandvik</i>	<i>89</i>
<i>Figura 5-1 - Dimensões dos jumbos da marca Epiroc.....</i>	<i>89</i>
<i>Figura 5-3 - Dimensões do jumbo da marca Mine Master</i>	<i>90</i>
<i>Figura 5-4 - Sistema de retirada da coluna de perfuração</i>	<i>90</i>
<i>Figura 5-5 - Cabine de um jumbo da Epiroc.</i>	<i>91</i>
<i>Figura 5-6 - Comandos para controlo do braço de perfuração do jumbo da Sandvik</i>	<i>91</i>
<i>Figura 5-7 - Braço de um dos jumbos da Epiroc.....</i>	<i>92</i>
<i>Figura 5-8 - Braço do jumbo da Sandvik</i>	<i>92</i>
<i>Figura 5-9 - Braço do jumbo da Mine Master</i>	<i>93</i>
<i>Figura 5-10 - Martelo Hidráulico Epiroc Modelo COP 1838.</i>	<i>93</i>
<i>Figura 5-11 -Martelo Hidráulico Montabert Modelo HC95 LM.</i>	<i>94</i>
<i>Figura 5-12 - Martelo Hidráulico Sandvik Modelo HLX5</i>	<i>94</i>
<i>Figura 5-13 - Coluna de perfuração utilizada na Mina da Panasqueira.</i>	<i>96</i>
<i>Figura 5-14 - Encabadouro</i>	<i>96</i>
<i>Figura 5-15 - Vara. Fonte: Catálogo Atlas Copco</i>	<i>96</i>
<i>Figura 5-16 - União. Fonte: Catálogo Atlas Copco.....</i>	<i>97</i>
<i>Figura 5-17 -Bits</i>	<i>97</i>
<i>Figura 5-18 - Bits em fim de vida.....</i>	<i>98</i>
<i>Figura 5-19 - Interseção de estruturas filonianas</i>	<i>100</i>
<i>Figura 5-20 - Layout Cronómetro (à esquerda); Layout Google Keep (à direita);</i>	<i>104</i>
<i>Figura 5-21 - Esquema da sequência de perfuração de uma frente (não está à escala).....</i>	<i>107</i>
<i>Figura 5-22 - Gráfico de dispersão do comprimento de furos da caldeira.</i>	<i>108</i>
<i>Figura 6-1 - Proposta de sequência de movimentação do braço do jumbo entre furos</i>	<i>112</i>
<i>Figura 6-2 - Proposta de sequência de movimentação do braço do jumbo entre furos</i>	<i>112</i>
<i>Figura 6-3 - Local para colocação do laser</i>	<i>114</i>

Índice de Tabelas

<i>Tabela 2-1 - Relação entre a Dureza de Mohs e a Resistência à compressão.....</i>	<i>7</i>
<i>Tabela 2-2 - Diâmetros de Perfuração.....</i>	<i>13</i>
<i>Tabela 2-3 - características médias dos martelos hidráulicos</i>	<i>25</i>
<i>Tabela 2-4 - Diâmetro das varas de acordo com a potência do martelo.</i>	<i>25</i>
<i>Tabela 2-5 - Tipos de varas e respetivos diâmetros e comprimentos.....</i>	<i>46</i>
<i>Tabela 2-6 - Diâmetro de varas, bits e comprimento máximos de furos recomendados</i>	<i>46</i>
<i>Tabela 2-7 -Diâmetros adequado das uniões para varas de diferentes tamanhos.....</i>	<i>47</i>
<i>Tabela 2-8 - Tipos de bits recomendados de acordo com o tipo de rocha</i>	<i>49</i>
<i>Tabela 2-9 - Vida útil de acessórios utilizados para perfuração de galerias e túneis</i>	<i>50</i>
<i>Tabela 2-10 - Guia para identificação das causas de rotura dos acessórios de perfuração.....</i>	<i>55</i>
<i>Tabela 3-1 Tabela Resumo das Reservas Provadas e Provadas da Mina da Panasqueira a 30 de setembro de 2016.</i>	<i>73</i>
<i>Tabela 4-1 - Tempo de retardo de detonadores não elétricos</i>	<i>80</i>
<i>Tabela 5-1 - Marcas, e modelos dos jumbos existentes na Mina da Panasqueira.</i>	<i>88</i>
<i>Tabela 5-2 - Velocidades de deslocamento dos jumbos</i>	<i>88</i>
<i>Tabela 5-3 - Especificações técnicas dos martelos dos jumbos da Epiroc.....</i>	<i>93</i>
<i>Tabela 5-4 - Especificações técnicas do martelo do jumbo da Mine Master.....</i>	<i>94</i>
<i>Tabela 5-5 - Especificações técnicas do martelo do jumbo da Sandvik.....</i>	<i>94</i>
<i>Tabela 5-6 - Áreas de cobertura. Fonte: Catálogos das Marcas.....</i>	<i>95</i>
<i>Tabela 5-7 - Características técnicas das varas. Fonte: Catálogo Atlas Copco.....</i>	<i>96</i>
<i>Tabela 5-8 -Características dos bits. Fonte: Catálogo Atlas Copco</i>	<i>98</i>
<i>Tabela 5-9 - Valores Totais dos dados recolhidos</i>	<i>105</i>
<i>Tabela 5-10 - Resultados gerais do ciclo de perfuração para produção.</i>	<i>106</i>
<i>Tabela 5-11 - Posicionamento do jumbo em relação à frente perfurar</i>	<i>106</i>
<i>Tabela 5-12 - Tabela resumo dos resultados dos comprimentos das caldeiras.....</i>	<i>109</i>

Notação e Glossário

m	Metro
s	Segundo
Hz	Hertz
kW	kilowatt
MPa	Megapascais
V	Volts
Db	Decibéis

Lista de Siglas

BTW Beralt Tin & Wolfram Portugal

1 Introdução

1.1 Enquadramento

Num mundo em que os mercados são cada vez mais competitivos, a caracterização e otimização de processos é uma prioridade para todas as empresas que se destacam nos mercados onde estão inseridas. Ao otimizar é necessário mapear e caraterizar todos os processos da empresa, o que significa conhecer de forma real e analítica todo o funcionamento da organização. Ao realizarem-se estas atividades de mapeamento e caraterização de todo o ciclo de trabalho é possível identificar os pontos críticos e falhas existentes no processo e criar propostas de melhoria de execução das atividades.

A Mina da Panasqueira já conta com mais de 130 anos de história, tendo tido sempre a capacidade de se adaptar às exigências do mercado e corresponder da melhor forma às flutuações do mesmo. Tal facto deve-se à procura constante, por parte das equipas técnicas, de oportunidades de melhoria dos processos de todo o projeto. Esta procura constante por oportunidades de melhoria, torna cada vez mais exigente e árdua a tarefa de quem se propõe a apresentar novas propostas de melhorias. Isto implica não só entender de forma aprofundada todo o processo a melhorar, bem como a forma como este condiciona todos os processos a montante e é condicionado pelos que se encontram a jusante.

A fragmentação da rocha é a primeira fase do processo produtivo de uma exploração mineira e pode ser realizada por meios mecânicos ou por aplicação de cargas explosivas. A fragmentação com recurso a explosivos é a técnica mais eficiente quando o objetivo é fragmentar grandes quantidades de rocha em pequenos períodos de tempo. As cargas explosivas necessárias para fragmentar a rocha são alojadas em furos feitos nos maciços com recurso a equipamentos de perfuração. A execução correta dos furos que compõem um determinado diagrama de fogo é um dos fatores determinantes para que os resultados finais do rebentamento de uma pega sejam os desejados. Caso a perfuração não seja efetuada de forma correta, os resultados do rebentamento da pega podem não ser os esperados e todo o ciclo de produção pode ser afetado.

Atualmente, os equipamentos de perfuração mais modernos estão equipados com tecnologia de ponta que lhes permite executar furos com elevada precisão, aumentando de forma considerável a eficiência do processo de perfuração. Contudo, os equipamentos que realizam esta atividade na Mina da Panasqueira são bastante limitados em termos de tecnologia e sistemas de controlo de perfuração, sendo a experiência dos operadores um fator determinante para que esta atividade seja executada de forma correta. Pelo que, a elaboração de trabalhos como o que foi feito ao longo desta dissertação são essenciais para identificar possíveis oportunidades de melhoria e aumentar a eficiência do processo de perfuração.

1.2 Objetivos

Os objetivos principais desta dissertação são a caracterização do ciclo de perfuração de produção da mina da Panasqueira e a apresentação de propostas para otimização do mesmo. Com o avançar da dissertação foi lançado um objetivo mais específico por parte da empresa, que consiste na apresentação de propostas de otimização que tenham caráter de implementação simples e imediata.

1.3 Apresentação da Beralt Tin & Wolfram Portugal

A Beralt Tin & Wolfram (Portugal) s.a. é uma empresa subsidiária da Almonty Industries, uma multinacional mineira especializada na produção de produtos de tungsténio, que e detém 100% da participação da Mina da Panasqueira desde janeiro de 2016.

O grupo Almonty é especializado na aquisição de operações e ativos problemáticos e de baixo desempenho nos mercados de tungsténio, apostando na experiência operacional interna da empresa de forma a beneficiar os mesmos. É considerado um grupo especialista em supervisionar projetos considerados complexos ou difíceis pelos investidores financeiros.

Atualmente o grupo Almonty é detentor de 5 projetos mineiros, *Los Santos Mine* (Salamanca, Espanha), *Almonty Korea Tungsten* e *Almonty Korea Moli* (Sangdong Mine, Coreia do Sul), *Valtreixal* (Puebla de Sanabria, Espanha) e *Mina da Panasqueira* (Covilhã, Portugal). Dos cinco projetos mencionados apenas dois se encontram em fase de exploração, a *Mina da Panasqueira* e a *Mina de Los Santos*.

O esquema que segue ilustra as relações intercooperativas entre a *Almonty Industries Inc.* e as suas subsidiárias.

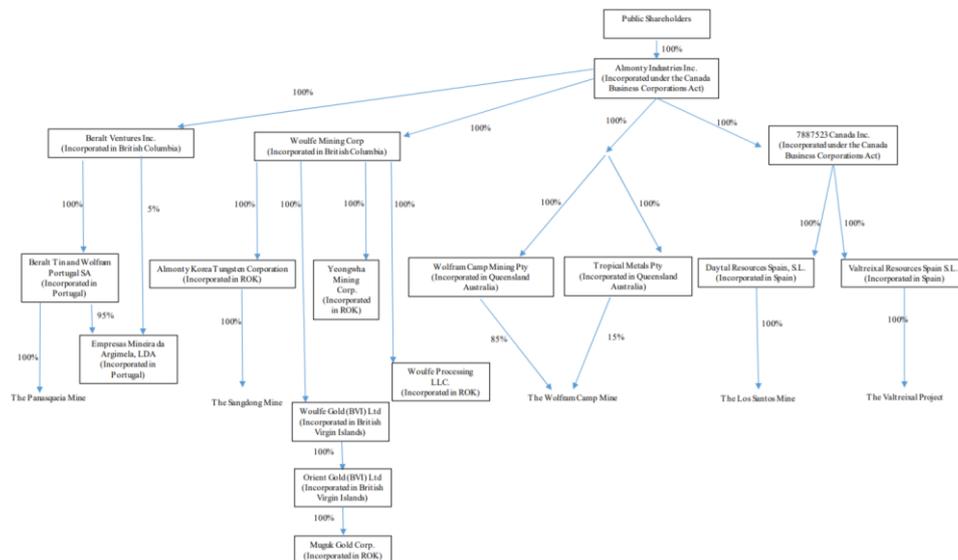


Figura 1-1 - Relações intercooperativas entre a *Almonty Industries Inc.* e as suas subsidiárias (Fonte: *Almonty Industries Inc.*)

1.4 Organização da Tese

- **Capítulo 1** - Enquadramento geral da dissertação, uma breve apresentação da empresa onde foram recolhidos os dados e são identificados os principais objetivos que se pretendem alcançar com este trabalho.
- **Capítulo 2** - Apresentação dos principais conceitos teóricos que estão relacionados com a perfuração rotoperçussiva com martelo à cabeça, com especial foco nos trabalhos subterrâneos. Este capítulo foi escrito tendo como base o “Manual de Perforación, Explosivos y Voladuras - Minería y Obras Públicas” elaborado pelos Engenheiros de Minas Carlos Lopez Jimenos, Emilio Lopez Jimeno e Pilar García Bermúdez.
- **Capítulo 3** - Apresentação geral da Mina da Panasqueira através do enquadramento geográfico, geológico, mineralógico e histórico da Mina. Neste capítulo é feita uma descrição da estrutura da mina e qual o método de desmonte aplicado.
- **Capítulo 4** - Caracterização detalhada das atividades que compõem o ciclo de produção da Mina da Panasqueira.
- **Capítulo 5** - Abordagem detalhada da atividade de perfuração de produção da Mina da Panasqueira. Descrição dos equipamentos de perfuração e dos acessórios utilizados. É feita a divisão da atividade de perfuração de produção em atividades elementares e demonstrada a metodologia aplicada para a aquisição dos dados e respetivo tratamento.
- **Capítulo 6** - Neste capítulo são analisados os resultados obtidos, apresentadas as conclusões e propostas algumas medidas de otimização do processo bem como trabalhos futuros que se podem realizar tendo como base os dados recolhidos.

2 Perfuração Rotopercussiva

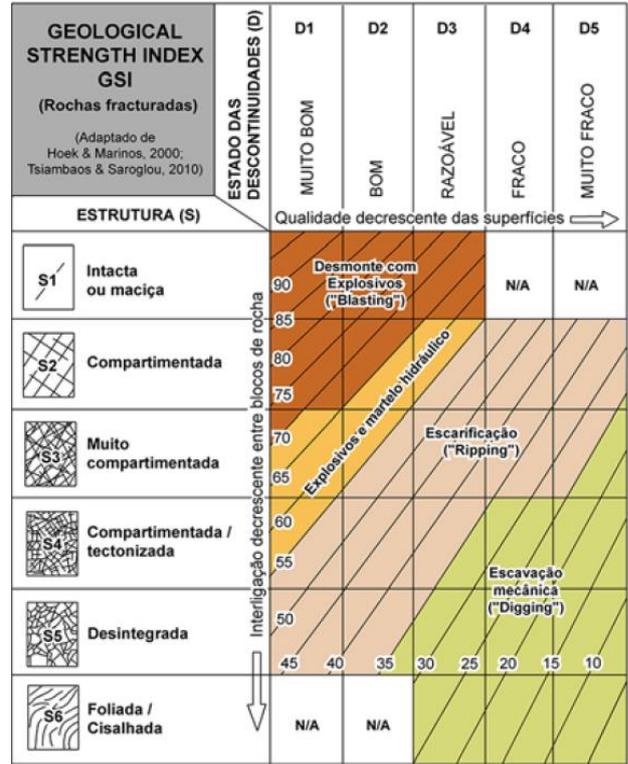
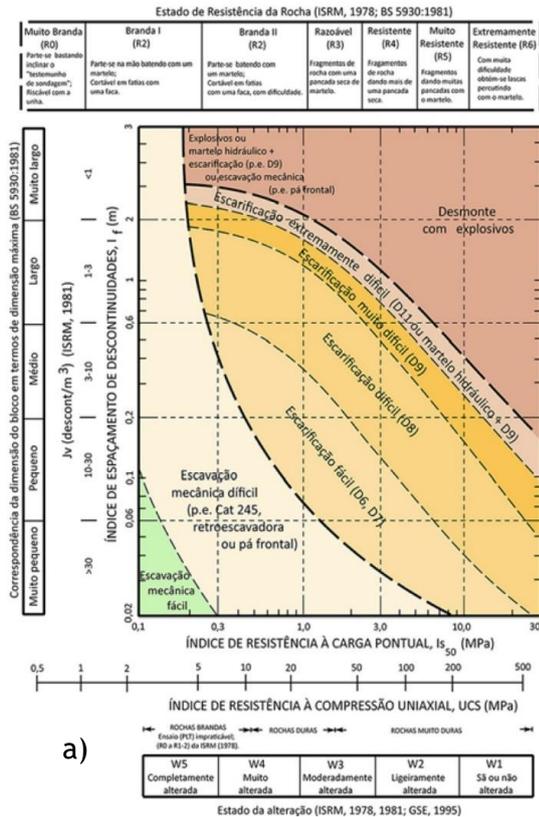
Neste capítulo são abordados vários aspetos teóricos e técnicos sobre a perfuração rotopercussiva, com especial incidência sobre o tipo de trabalhos, equipamentos e acessórios necessários para a execução de projetos civis e mineiros em ambiente subterrâneo. Todo o capítulo foi desenvolvido tendo como base os capítulos 1, 2, 3 e 4 do “Manual de Perforación, Explosivos y Voladuras - Minería y Obras Públicas” (2017) elaborado pelos Doutores e Engenheiros de Minas Carlos López Jimeno, Emilio López Jimeno e pela Doutora Engenheira de Minas Pilar García Bermudez.

Nos projetos de escavação, quer sejam obras públicas ou mineiros é, sempre necessário aplicar uma certa quantidade de energia para fragmentar as rochas até se alcançar uma gama de granulometria desejável.

Dependendo da compacidade ou da resistência das rochas e da existência de descontinuidades nas formações a serem escavadas, pode efetuar-se o arranque da rocha por meios mecânicos ou se necessário com recurso a explosivos nos maciços mais competentes.

A eleição do método de arranque é então umas das primeiras tarefas a realizar, devendo basear-se num reconhecimento dos diferentes tipos de rochas existentes no âmbito espacial do projeto, nas propriedades e características de cada litologia, assim como das descontinuidades que afetam as mesmas (planos de estratificação, diáclases, fissuras, entre outras).

Na figura 2-1 a) encontra-se representado o gráfico de Pettifer e Fookes (1994) (revisto e adaptado por Galiza, *et. al*, 2011) e que de uma forma gráfica permite uma primeira aproximação à eleição do método de arranque, que deverá basear-se sempre numa análise técnico-económica. De notar, que os campos de aplicação de cada método não têm um carácter estático, já que os avanços tecnológicos permitiram desenhar e fabricar equipamentos cada vez mais potentes, robustos, fiáveis e elementos de corte e escarificação mais resistentes ao desgaste, prolongando assim a sua vida útil. Tal facto leva a um aumento do número de trabalhos que determinados equipamentos podem realizar. Em 2010, Tsiambaos & Saraglou propuseram a aplicação do GSI - *Geological Strength Index* para avaliar o tipo de escavabilidade previsível para o maciço, na figura 2-1 é possível visualizar o ábaco proposto adaptado e revisto por Galiza *et. al*, 2011.



Ábaco Tsiambaos & Saroglou (2010) para avaliação da escavabilidade do maciço ($IS_{50} \geq 3MPa$)

Figura 2-1- a) Ábaco de Pettifer & Fookes (1994); b) Ábaco de Tsiambaos & Saroglou (2010);

Fonte: Galiza et. al, 2011

Nos casos em que é necessário aplicar cargas explosivas como fonte de energia para fragmentar a rocha, procura-se incrementar significativamente a superfície específica por unidade de volume, os m^2/m^3 , multiplicando-se geralmente por 200 (figura 2-2).

O consumo de energia é inerente a qualquer processo de fragmentação, sendo que, aplicando explosivos a quantidade de energia consumida é muito menor em relação aos métodos mecânicos. Por esta razão é sempre aconselhável que se avalie desde o ponto de vista técnico-económico todo o ciclo completo de operações com o objetivo de se alcançar o cenário ótimo ou o de menor custo global.

Por outro lado, quando se aplicam estas substâncias químicas (explosivos), que são capazes de libertar razoáveis quantidades de energia durante a sua detonação, é necessário alojá-las previamente em cavidades ou furos feitos na rocha ou no material que se deseja fragmentar.

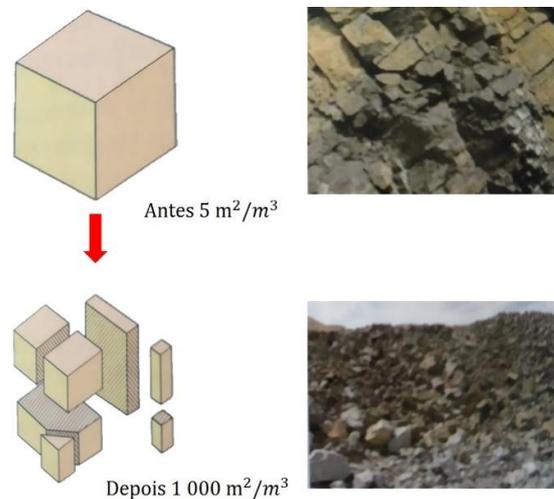


Figura 2-2 - Aumento da área específica mediante a aplicação de explosivos (Adaptado de López Jimeno et. al, 2017)

A perfuração de rocha dentro do campo do desmonte com explosivos é a primeira operação que se realiza e tem como finalidade abrir furos no maciço rochoso com a distribuição espacial e geometria adequada, onde se vão alojar as substâncias explosivas e os acessórios de iniciação.

2.1 Propriedades das rochas que afetam a perfuração

A perfuração para aplicação de explosivos realiza-se quase sempre em massas rochosas, pelo que uma das fases mais importantes quando se projeta um diagrama de fogo é a realização de uma caracterização Geomecânica aprofundada do maciço onde se irão realizar os trabalhos de perfuração.

As principais propriedades das rochas que influenciam os mecanismos de penetração e consequentemente a eleição do método de perfuração são:

- Dureza
- Resistência
- Elasticidade
- Plasticidade
- Abrasividade
- Textura
- Estrutura
- Características de rotura

2.1.1 Dureza

Entende-se por dureza a resistência que uma camada superficial oferece à penetração por outro corpo mais duro. A dureza de uma rocha é definida pela dureza e composição dos minerais que a constituem, pela sua porosidade e grau de humidade, entre outros. A dureza de uma rocha é o principal tipo de resistência a superar durante a perfuração, porque quando se consegue a penetração completa do cortante o resto das ações desenrolam-se mais facilmente.

As rochas são classificadas relativamente à dureza através da Escala de Mohs. Na tabela 2-1 encontra-se explícita a correlação entre a dureza e a resistência à compressão das rochas.

Tabela 2-1 - Relação entre a Dureza de Mohs e a Resistência à compressão (Fonte: López Jimeno et. al, 2017)

Classificação	Dureza Mohs	Resistência à compressão (Mpa)
Muito dura	+7	+200
Dura	6 - 7	120 - 200
Meia dura	4,5 - 6	60 - 120
Meia Branda	3 - 4,5	30 - 60
Branda	2 - 3	10 - 30
Muito Branda	1 - 2	- 10

2.1.2 Resistência

A resistência mecânica de uma rocha pode definir-se como a propriedade de oposição à sua destruição quando sobrecarregada por uma carga exterior, estática ou dinâmica. As rochas apresentam uma resistência máxima à compressão, contudo a resistência à tração é apenas entre 10% a 15% da resistência que apresentam à compressão. Facto que se deve à fragilidade das mesmas, às condições do meio em que se encontram, às suas irregularidades e à pequena coesão entre as partículas constituintes.

A resistência das rochas depende principalmente da sua composição mineralógica. O quartzo apresenta valores de resistência que superam os 500 MPa, enquanto que os valores da resistência dos silicatos ferromagnesianos variam entre os 200 e os 500 MPa e da calcite entre 10 e 20 MPa. Assim, quanto maior for o conteúdo em quartzo mais resistente é a rocha.

A resistência dos minerais também depende do tamanho dos cristais, diminuindo com o aumento do seu tamanho. Esta influência é significativa quando o tamanho dos cristais é inferior a 0,5 mm. Nas rochas a influência do fator tamanho na resistência é menor, devido à intervenção das forças de coesão intercristalinas. Para rochas da mesma litologia a resistência diminui conforme a porosidade aumenta, porque o número de contactos e as forças recíprocas entre as partículas minerais diminuem.

A resistência de rochas anisotrópicas depende do sentido de ação da força. A resistência à compressão das rochas no sentido perpendicular à estratificação ou xistosidade é maior que no sentido paralelo. O quociente entre ambos os valores de resistência costuma variar entre os 0,3 e os 0,8 e só para rochas isotrópicas é que é igual a 1. A resistência de um xisto classificado como duro pode variar entre os 130 e os 210 MPa.

2.1.3 Elasticidade

A maioria dos minerais que constituem as rochas têm um comportamento elasto-frágil, que obedece à Lei de Hooke e que são destruídos quando as tensões superam o seu limite de elasticidade.

Segundo a natureza da deformação, em função das tensões provocadas por cargas estáticas podem considerar-se três grupos de rochas: 1) as elasto-frágeis ou que obedecem à Lei de Hooke; 2) as plástico-frágeis, e cuja destruição ocorre antes da deformação elástica; 3) as altamente plásticas ou muito porosas, cuja deformação elástica é insignificante. As propriedades elásticas das rochas caracterizam-se através do módulo de elasticidade e do coeficiente de Poisson.

A elasticidade relativa das rochas fornece indicações sobre a quantidade de energia necessária para fraturar uma rocha e é aplicável a todos os tipos de rochas. O seu valor pode ser calculado

através do quociente entre o módulo de deformação elástico V_{el} e a resistência à compressão simples.

2.1.4 Plasticidade

Como indicado anteriormente, algumas rochas são destruídas antes de se deformarem elasticamente. Tal deformação inicia-se quando as tensões na rocha excedem o limite de elasticidade. As rochas, enquanto se deformam, vão-se consolidando: para o aumento da deformação plástica é necessário aumentar o esforço.

A plasticidade depende da composição mineral das rochas e diminui com o aumento do conteúdo em quartzo, feldspato e outros minerais duros. As rochas podem ser classificadas segundo a sua plasticidade de acordo com o quociente entre o módulo de deformação total e o módulo de deformação elástico. Este quociente descreve o comportamento plástico das rochas durante os processos de deformação e fracturação.

2.1.5 Abrasividade

A abrasividade é a capacidade que as rochas têm em desgastar a superfície de contacto de outro corpo mais duro durante o processo de fricção.

Os fatores que aumentam a capacidade abrasiva das rochas são os seguintes:

- A dureza dos grãos que constituem a rocha, sendo que as rochas que contêm grãos de quartzo são geralmente mais abrasivas;
- A forma dos grãos. Os grãos mais angulosos são mais abrasivos que os arredondados;
- O tamanho dos grãos;
- A porosidade da rocha que dá lugar a superfícies de contacto rugosas ou concentrações de tensões locais;
- A heterogeneidade. As rochas polimineriais, são mais abrasivas, vão deixando superfícies ásperas com presença de grãos duros, por exemplo, os grãos de quartzo de um granito. Esta propriedade influencia de forma considerável a vida útil dos aços de perfuração.

Para avaliar a abrasividade das rochas existem diversos métodos que se aplicam na prática, entre os quais se destacam os seguintes:

- Índice de abrasividade CERCHAR, CAI;
- Índice de abrasividade $F_{Schimazek}$
- Índice de abrasividade da Rocha, RAI.

O termo abrasividade define o potencial de uma rocha ou solo causar desgaste sobre uma ferramenta ou um útil. Como este potencial depende significativamente das circunstâncias específicas do sistema analisado (tipos de ferramentas, mecanismos de escavação,

temperatura, cargas aplicadas, etc.) deve-se ter em conta que a abrasividade das rochas nunca chegará a ser um parâmetro físico intrínseco.

2.1.6 Textura

A textura de uma rocha refere-se à estrutura e disposição relativa dos grãos de minerais que a constituem. Manifesta-se através do tamanho dos grãos, da forma, da porosidade. Todos estes aspetos têm uma influência significativa no rendimento da perfuração. Por exemplo, se os grãos tiverem uma forma lenticular como num xisto, a perfuração é mais difícil do que se tiverem uma forma arredondada, como um arenito.

Outro parâmetro que também influencia de forma significativa a perfuração é o material que constitui a matriz da rocha. As rochas de densidade baixa e que são, conseqüentemente, mais porosas têm menor resistência à trituração, mas são mais difíceis de perfurar.

2.1.7 Estrutura

As propriedades estruturais dos maciços rochosos, tais como a xistosidade, planos de estratificação, diáclases e falhas, assim como a sua direção e mergulho, afetam a linearidade dos furos, os rendimentos de perfuração e a estabilidade das paredes.

2.2 Métodos e Princípios Básicos

Os sistemas de penetração desenvolvidos até os dias de hoje e classificados por ordem de aplicação são:

- Mecânicos: Percussão, Rotação e Rotopercussão
- Térmicos: Maçarico ou lança térmica, Plasma, Fluido quente e Congelação
- Hidráulicos: Jato de água, Erosão e Cavitação
- Sónicos: Vibrações de alta frequência
- Químicos: Dissolução
- Elétricos: Arco elétrico e Indução Magnética
- Nucleares: Fusão e Fissão

Apesar da enorme variedade de sistemas de penetração de rocha existentes, na indústria extrativa e obras públicas, a perfuração realiza-se atualmente utilizando a energia mecânica. A Mina da Panasqueira não é exceção à regra, sendo a perfuração realizada através de sistemas mecânicos de Rotopercussão. Assim, ao longo deste capítulo serão abordados os fundamentos, os aços de perfuração e os tipos de equipamentos de perfuração utilizados neste tipo de perfuração.

Os componentes principais de um sistema de perfuração são o martelo (rotopercussivo ou rotativo) que é a fonte de energia mecânica, os aços de ligação que são os meios de transmissão dessa energia, o bit que é o dispositivo que exerce a energia sobre a rocha e o fluido de limpeza que efetua a limpeza e evacuação dos detritos produzidos.

2.2.1 Tipologia de Trabalhos de Perfuração em Desmonte de Rocha com Explosivos

A variedade de trabalhos de escavação em que são aplicados explosivos é muito grande, tendo sido desenvolvido um elevado número de equipamentos que dão lugar a dois procedimentos de perfuração:

- Perfuração manual: leva-se a cabo com equipamentos ligeiros manuseados à mão pelos operadores. Utilizam-se em trabalhos de pequena envergadura onde, devido às reduzidas dimensões do local de trabalho, não é possível utilizar outro tipo de equipamentos ou o seu emprego não é viável do ponto de vista económico.
- Perfuração mecanizada: os equipamentos de perfuração são montados sobre chassis; este tipo de equipamentos permite ao operador controlar todos os parâmetros da perfuração a partir de uma posição cómoda e segura. Estes chassis podem ser montados sobre pneus ou lagartas e serem rebocáveis ou automotores.

Por outro lado, os tipos de trabalhos, tanto em obras se superfície como subterrâneas, podem classificar-se da seguinte forma:

- Perfuração de bancadas;
- Perfuração de avanço de galerias ou túneis;
- Perfuração de produção - Este termo utiliza-se nas explorações mineiras, fundamentalmente subterrâneas, para os trabalhos de extração do mineral. Os equipamentos e os métodos variam segundo os métodos de exploração, sendo um fator comum o espaço reduzido disponível nas galerias para efetuar os furos;
- Perfuração de chaminés;
- Perfuração de rochas com recobrimento;
- Sustimento de rochas.

2.2.2 Campos de aplicação dos diferentes métodos de perfuração

Os dois principais métodos mecânicos de perfuração de rochas são os rotopercussivos e os rotativos.

- Métodos rotopercussivos - São os mais utilizados e podem aplicar-se em quase todo o tipo de rochas, variando a localização do martelo (martelo à cabeça ou no fundo do furo).

- Métodos rotativos - Podem ser subdivididos em dois grupos segundo a penetração se realize por trituração, através de tricornes, ou por corte utilizando trépanos ou bits especiais. O primeiro sistema aplica-se em rochas de dureza média-alta o segundo em rochas brandas.

A perfuração rotopercussiva é o sistema mais clássico de perfuração e o seu aparecimento coincide no tempo com o desenvolvimento industrial do século XIX. As primeiras máquinas, protótipos da Singer (1838) e Couch (1848), eram acionadas por vapor. Quando se começou a utilizar ar comprimido como fonte de energia, na construção do túnel de Mont Cenis (1861), é que este sistema evoluiu e passou a ser usado de forma intensiva. Este feito aliado ao aparecimento da dinamite foram os acontecimentos decisivos para o vertiginoso desenvolvimento do desmonte de rochas em minas e obras públicas com recurso a explosivos.

O princípio de perfuração destes equipamentos baseia-se no impacto de uma peça de aço (pistão) que golpeia um elemento (vara) que por sua vez transmite a energia até ao fundo do furo por meio de um elemento final (bit). De acordo com a localização do martelo, os equipamentos rotopercussivos podem dividir-se em dois grupos (figura 2-3):

- Martelo à cabeça - Nestes equipamentos, duas das ações básicas, rotação e percussão, produzem-se fora do furo, sendo a energia transmitida através do encabadouro e da vara até ao bit de perfuração. O acionamento dos martelos pode ser pneumático ou hidráulico.
- Martelo de fundo - A percussão realiza-se diretamente sobre o bit e a rotação efetua-se no exterior do furo. O acionamento do pistão leva-se a cabo com ar comprimido ou com água e a rotação é acionado mediante um motor pneumático ou hidráulico.



Figura 2-3 - Ações básicas dos métodos rotopercussivos e a rotação com tricornes.

Fonte: López Jimeno et. al, 2017

De acordo com a aplicação dos equipamentos em trabalhos a céu aberto ou subterrâneos, as gamas de diâmetro mais comuns podem ser consultadas na tabela 2-2

Tabela 2-2 - Diâmetros de Perfuração. Adpatado de López Jimeno et. al, 2017

Tipo de Equipamento	Diâmetro de perfuração (mm)	
	Céu Aberto	Subterrâneo
Martelo à cabeça	50 - 140	38 - 89
Martelo de fundo	75 - 200	100 - 165

As principais vantagens que a perfuração rotopercussiva apresenta são:

- É aplicável a todo o tipo de rochas, duras ou brandas;
- Apresenta uma ampla gama de diâmetros de perfuração;
- Os equipamentos são versáteis, adaptam-se bem a diferentes trabalhos e têm uma grande mobilidade;
- Podem ser operados por apenas uma pessoa;
- A sua manutenção é fácil e rápida;
- O preço de aquisição não é elevado.

Tendo em consideração a resistência à compressão das rochas e o diâmetro de perfuração, é possível limitar os campos de aplicação dos diferentes métodos, tal como se pode observar na figura seguinte.

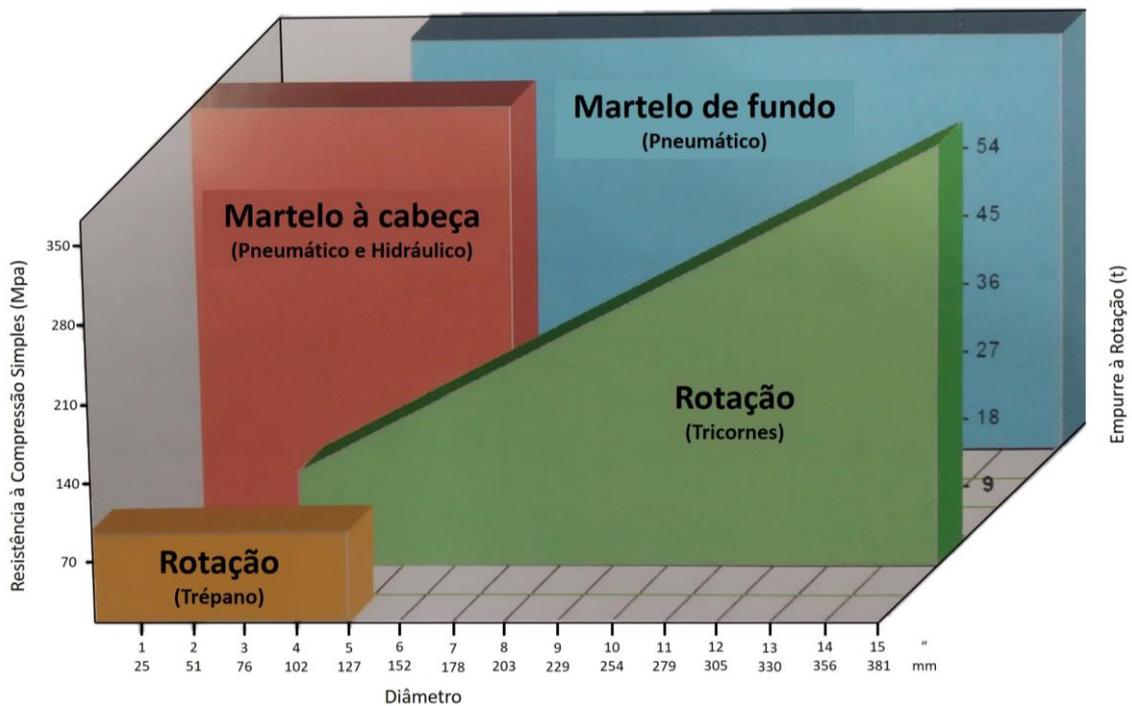


Figura 2-4 - Campos de aplicação dos diferentes métodos de perfuração. Apatado de López Jimeno et. al, 2017

Outros critérios que intervêm na seleção dos equipamentos são: os económicos, o desenho mecânico, a manutenção e serviço, a capacidade operativa, a adaptabilidade aos restantes equipamentos das explorações e as condições da área de trabalho (acessos, tipo de rocha, fontes de energia, entre outros).

2.2.3 Fundamentos da perfuração Rotopercussiva

A perfuração rotopercussiva baseia-se na combinação das seguintes ações (figura 2-5):

- Percussão - Os impactos produzidos pelos golpes do pistão originam ondas de choque que se transmitem até ao bit através da vara (com martelo à cabeça) ou diretamente sobre ele (com martelo de fundo);
- Rotação - Com estes movimentos faz-se girar o bit para que os impactos se produzam sobre a rocha em distintas posições;
- Empurre - Para manter o contacto entre o bit e a rocha exerce-se uma força de empuxe sobre a coluna de perfuração;
- Limpeza - O fluido de limpeza permite extrair os detritos do fundo dos furos;

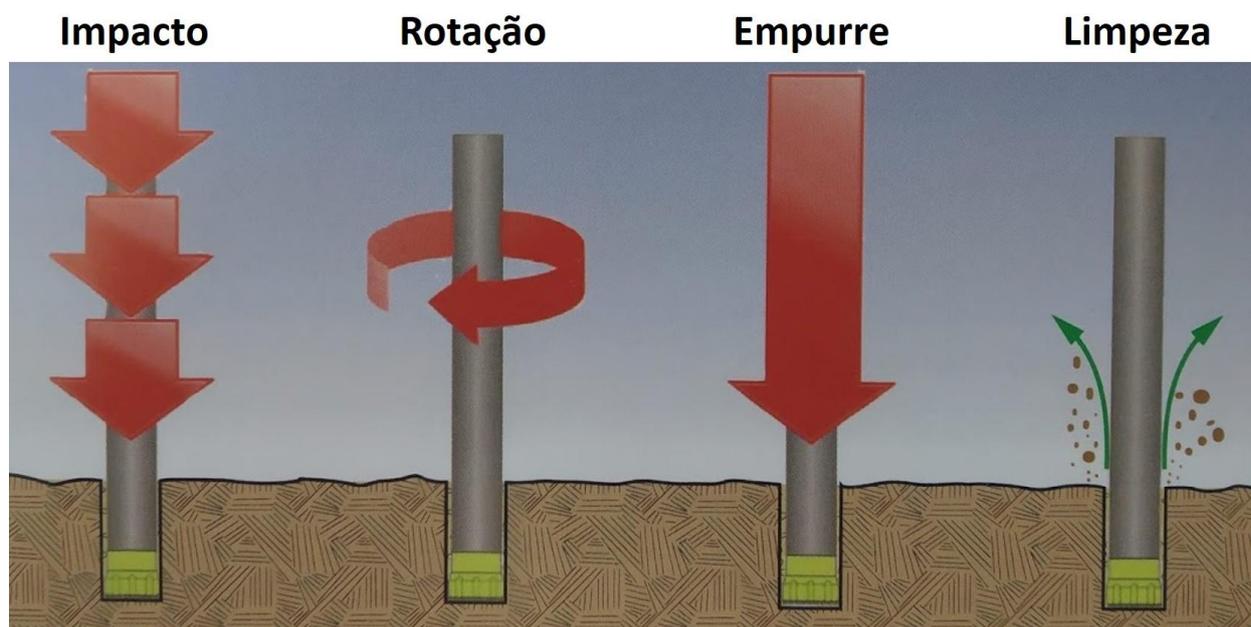


Figura 2-5 - Ações básicas da perfuração rotopercussiva. Aptado de López Jimeno et. al, 2017.

Um sistema de perfuração rotopercussiva é constituído por quatro componentes principais. Estes componentes estão relacionados com a utilização da energia aquando do ataque à rocha:

- O movimento do pistão dentro do martelo é o primeiro passo que se leva a cabo e converte a energia, desde a sua forma original (hidráulica, pneumática ou elétrica), em energia mecânica, que atua no sistema;

- O encabadouro transmite a energia de impacto do pistão para a vara. Adicionalmente é subministrado um efeito giratório ao encabadouro;
- A coluna de perfuração transmite a energia de impacto e a rotação;
- O bit aplica a energia mecanicamente, atacando a rocha de forma a conseguir a penetração;

Na perfuração com o martelo à cabeça, a energia é transmitida desde o martelo através do encabadouro, da vara e do bit até à rocha, onde é responsável pela destruição da mesma.

Nos martelos hidráulicos, os pistões golpeiam os encabadouros entre 50 a 60 vezes por segundo, ou seja, com uma frequência de 50 a 60 Hz, se bem que já existem no mercado martelos com frequências de golpe de mais de 100 Hz.

Quando o pistão embate no encabadouro é gerada, teoricamente, uma onda de choque ou de tensão que tem uma forma retangular e o dobro da longitude do pistão. A amplitude da onda de tensão depende da velocidade do pistão no momento de impacto e da relação das secções transversais do pistão e da vara. A onda de choque propaga-se pela vara a grande velocidade, superior a 5 000 m/s, de maneira que e teoricamente, para uma coluna de perfuração com 10 m, ao final de 2 ms a onda de tensão alcança a rocha.

Para calcular a potência obtida por um martelo, deve-se multiplicar a energia contida na onda de choque pela frequência de golpeio do pistão. Normalmente essa potência expressa-se em kW. Assim, dois martelos com a mesma potência nominal podem ter características operativas distintas.

As ondas de choque que geram os martelos pneumáticos e os hidráulicos têm formas diferentes, o que faz com que as varas utilizadas com martelos hidráulicos durem muito mais tempo que as usadas com martelos pneumáticos. Esta diferença está relacionada com o facto de o pico de tensão da onda de choque dos martelos hidráulicos ser menor que o pico gerado pelos pneumáticos e porque martelos pneumáticos precisarem de pistões com secções transversais muito menores (6 a 8 bar) que os martelos hidráulicos (150 a 250 bar). A geometria dos pistões hidráulicos faz com que as ondas de tensão sejam mais largas e aplanadas.

Para além do que foi dito anteriormente é também preciso ter em atenção que uma pressão de impacto maior, uma maior longitude e um menor peso do pistão dão lugar a uma velocidade mais elevada.

Na figura Seguinte estão representados os níveis de tensão gerados por três pistões diferentes que têm a mesma massa, mas geometrias diferentes e pressões de trabalho distintas. As pressões menores e as amplitudes das ondas de choque menores são obtidas com pistões que apresentam um desenho mais uniforme e que trabalham a pressões mais elevadas.

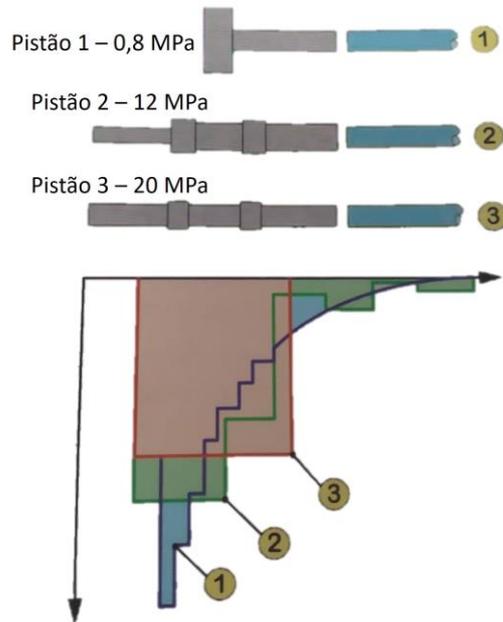


Figura 2-6 - Níveis de tensões gerados por pistões com a mesma massa por martelos pneumáticos e hidráulicos.

Adaptado de López Jimeno et. al, 2017

Quando um martelo converte a energia original em energia mecânica que se propaga até à rocha produzem-se algumas perdas de energia: compressão das varas, flexão das varas, deformação elástica e fricção das uniões, roçamento interno no martelo, calor, fricção lateral dos detritos resultantes da perfuração, desgastes e ruído (figura 2-7).

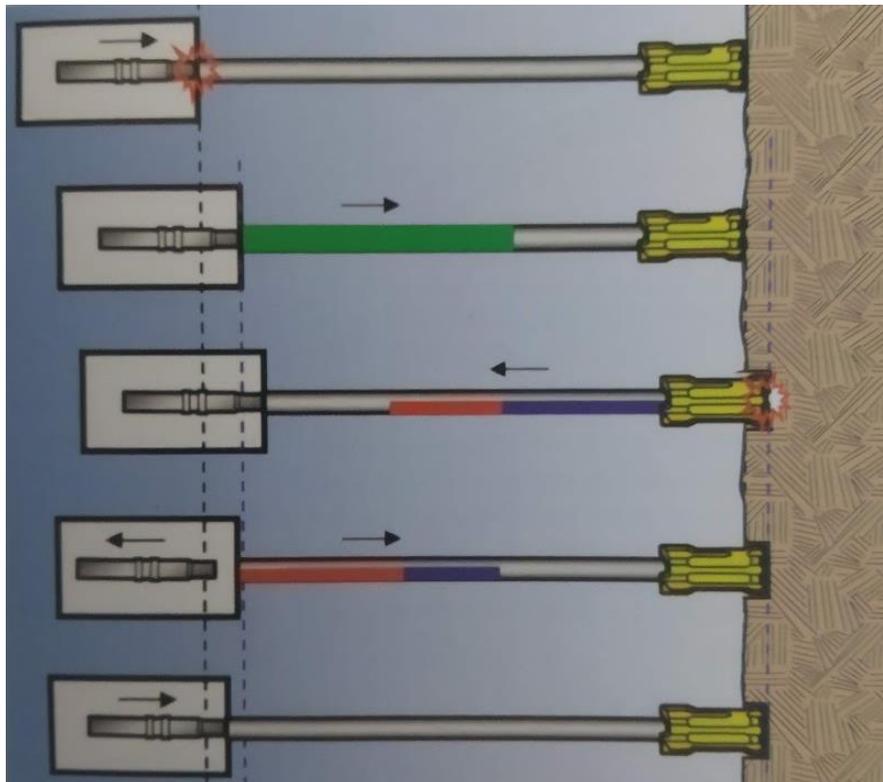


Figura 2-7 - Dinâmica da percussão. Fonte: López Jimeno et. al, 2017

As ondas de choque perdem, no caso de um acoplamento feito com uma união convencional, entre 6 a 10 % da sua energia quando viajam ao longo da coluna de perfuração. Quando se utilizam uniões integradas, ou seja, uniões com rosca macho-fêmea, perde-se entre 3 a 5%. Estas perdas devem-se, parcialmente, às diferentes secções das varas e dos encabadores e ao contacto imperfeito ente os extremos das varas, sendo esta a principal causa de perdas de energia. No caso de se utilizarem tubos em vez de varas, as perdas rondam os 2 a 3% (figura 2 - 8).

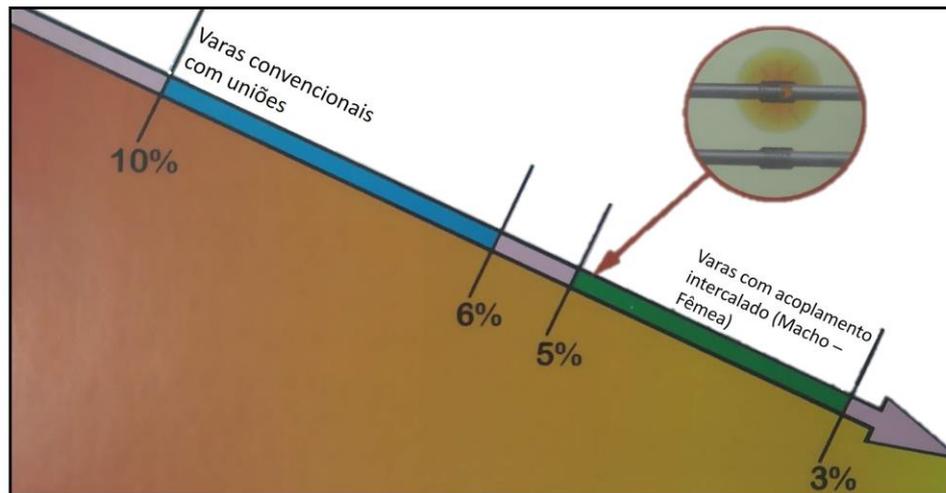


Figura 2-8 - Perdas de energia nos acoplamentos. Adaptado de López Jimeno et. al, 2017

Por outro lado, quando a onda de choque alcança o bit, os botões tendem a penetrar a rocha triturando-a. A eficiência de um bit nunca alcança os 100%, pelo que parte da energia é refletida em direção ao martelo em forma de ondas. Estas ondas podem ser de compressão ou de tração. São refletidas ondas de tração quando o bit tem uma forma pontiaguda, quando ondas de choque possuem uma energia muito elevada, ou quando há um mau contacto com a rocha. Quando se produz um mau contacto entre o bit e a rocha, a perda de energia ocorre no próprio bit. Quando os bits estão desgastados ou se têm ondas de choque com baixa energia, geram-se ondas de compressão que são refletidas. Ambos os tipos de ondas geram danos nas varas, acoplamentos e martelos, razão pela qual se aplicam sistemas de amortecimento nos martelos.

O processo de corte/trituração das rochas, através do qual se consegue o avanço através deste sistema de perfuração, divide-se em quatro fases:

- Zona triturada - Quando o botão do bit começa a “morder” a superfície da rocha a força aumenta devido à carga aplicada e o material deforma-se elasticamente. Formam-se de forma quase imediata irregularidades na superfície de contacto e desenvolve-se uma zona de rocha triturada por baixo dos botões. A zona de rocha triturada compreende numerosas microfissuras que pulverizam a rocha em partículas muito pequenas. Cerca

de 70 - 80% do trabalho consome-se na formação de uma zona triturada que por sua vez transmite a componente principal da força à rocha.

- Formação de gretas - Com o continuar do processo, começam a formar-se direções dominantes de gretas de crescimento restringidas por um limiar de energia e pela forma da ferramenta de penetração. As localizações dominantes quando se empregam botões produzem-se fora da zona de contacto com direção descendente e para fora.
- Propagação das gretas - Quando é ultrapassado o limiar de energia produz-se uma propagação rápida e espontânea das gretas. A uma profundidade menor que a dimensão do contacto, o valor das tensões é menor que o valor das tensões necessárias para manter o crescimento, pelo que, as gretas voltam a estabilizar-se.
- Formação de lascas - Quando a carga produzida sobre a rocha alcança um valor suficiente para que esta se fracture começam a formar-se lascas através da propagação lateral das gretas, desde a parte inferior da ponta da ferramenta de perfuração até à sua superfície. Estas lascas, são denominadas por superficiais, formando-se uma cratera.

Cada vez que se forma uma lasca, a força cai de forma temporária e deve subir novamente para níveis superiores para voltar a formar outras lascas. Facto que se deve ao confinamento produzido pela rocha (os botões vão-se enterrando).

Esta sequência repete-se com a mesma frequência que os impactos produzidos pelo pistão sobre o sistema que transmite a energia até à rocha. Se se aplica o botão numa nova superfície através da rotação do bit o botão penetra a rocha com uma força similar à da formação da primeira lasca.

A forma do botão influencia a quantidade de energia necessária para penetrar a rocha. Na figura seguinte pode-se observar a diferença de penetração ente um botão balístico e um esférico (figura 2-9).

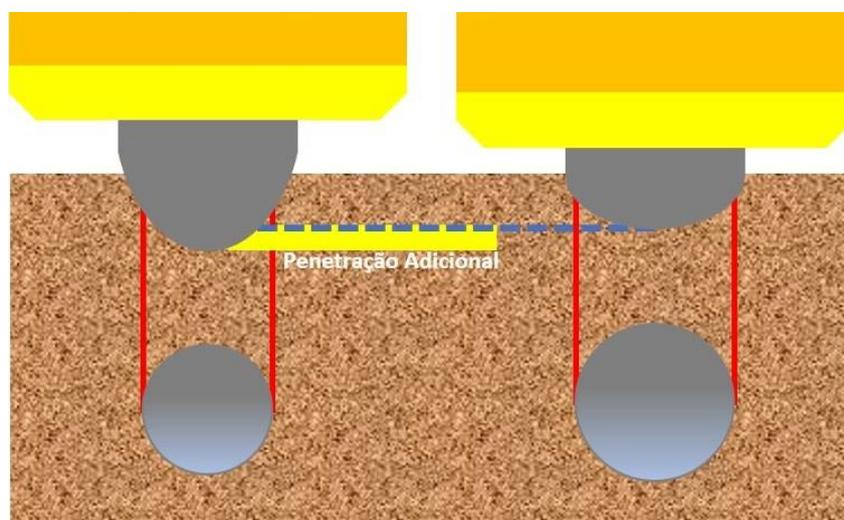


Figura 2-9 - Profundidade de penetração em função da forma do botão. Aptado de López Jimeno et. al, 2017

O rendimento de este processo aumenta proporcionalmente com o tamanho das lascas de rocha que se libertam.

2.2.3.1 Percussão

A energia cinética (E_c) do pistão transmite-se desde o martelo até ao bit, através da vara e encabadouro, em forma de onda de choque. O deslocamento desta onda realiza-se a alta velocidade e a sua forma depende fundamentalmente do desenho do pistão.

Quando a onda de choque alcança o bit, uma parte da energia transforma-se em trabalho o que faz o bit penetrar e a restante é refletida e retrocede através da vara e encabadouro. A eficiência desta transmissão é difícil de avaliar, porque depende de muitos fatores tais como: o tipo de rocha, a forma e dimensão do pistão, as características da vara e encabadouro, o desenho do bit, entre outros. Para além dos fatores mencionados também é necessário ter conta que nos pontos de união entre varas por meio de uniões existem perdas de energia por reflexão e roçamentos que se transformam em calor e desgaste nas roscas.

Nos martelos de fundo a energia do pistão é transmitida diretamente sobre o bit, pelo que, o rendimento é maior.

Nos sistemas de perfuração rotopercussiva a potência de percussão é o parâmetro que mais influencia a velocidade de penetração. A energia libertada pelo golpe de um martelo pode estimar-se a partir de qualquer uma das seguintes expressões:

$$E_c = \frac{1}{2} m_p \cdot v_p^2$$

$$E_c = p_m \cdot A_p \cdot I_p$$

Sendo:

m_p = Massa do Pistão

A_p = Superfície da face do pistão

v_p = Velocidade máxima do pistão

I_p = Curso do pistão

p_m = Pressão do fluído de trabalho (óleo ou ar) dentro do cilindro

A potência de um martelo (P_M) calcula-se através da multiplicação da energia de golpe pela frequência de impacto (n_g):

$$P_M = E_c \cdot n_g \text{ onde } n_g = K \cdot \left(\frac{p_m \cdot A_p}{m_p \cdot I_p} \right)^{\frac{1}{2}}$$

$$P_M = K \cdot \frac{(p_m \cdot A_p)^{\frac{3}{2}} \cdot I_p^{1/2}}{m_p^{1/2}}$$

O mecanismo de percussão consome entre 80 a 85 % da potência total do equipamento.

Na figura seguinte é possível observar como varia a pressão de percussão segundo o tipo de rocha.

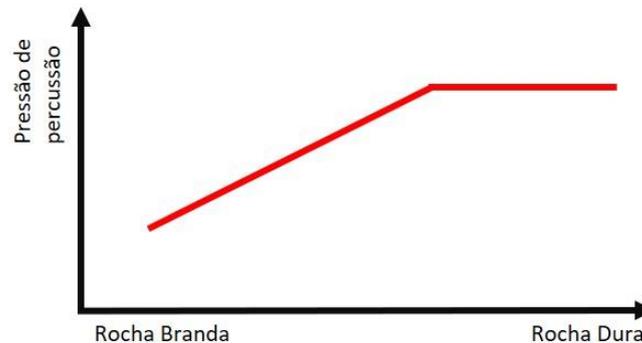


Figura 2-10 - Pressão de percussão segundo o tipo de rocha. Adaptado de López Jimeno et. al, 2017

2.2.3.2 Rotação

O movimento de rotação, que faz girar o bit entre impactos sucessivos, tem como missão fazer com que este atue sobre pontos diferentes da rocha no fundo do furo. Para cada tipo de rocha existe uma velocidade ótima de rotação para a qual se produzem os detritos de maior tamanho ao aproveitar a superfície livre do furo que se cria em cada impacto.

Para bits de botões de 51 a 89 mm as velocidades de rotação variam entre 40 e 60 r/min, com ângulos entre botões de 5° e 7°. Quanto maior for o diâmetro do bit menor será o valor da velocidade de rotação.

2.2.3.3 Empuxe

A energia gerada pelo sistema de impacto do martelo deve transmitir-se até à rocha, pelo que é necessário que o bit se encontre em contacto permanente com o fundo do furo. Isto consegue-se através da força de empuxe subministrada por um motor ou cilindro de avanço, que deve adequar-se ao tipo de rocha e ao bit.

Um empuxe insuficiente tem os seguintes efeitos negativos: reduz a velocidade de penetração, produz um maior desgaste das varas e das uniões, aumenta a perda de aperto entre o encabadouro, uniões e varas e aumenta a temperatura dos mesmos. Mas, caso o empurre seja excessivo a velocidade de perfuração diminui, desenroscar as varas e uniões é mais difícil, o desgaste dos bits aumenta, o torque de rotação, as vibrações no equipamento e o desvio dos furos também aumentam.

Como se sucede com a rotação, esta variável não influencia de forma direta a velocidade de penetração (figura 2-11).

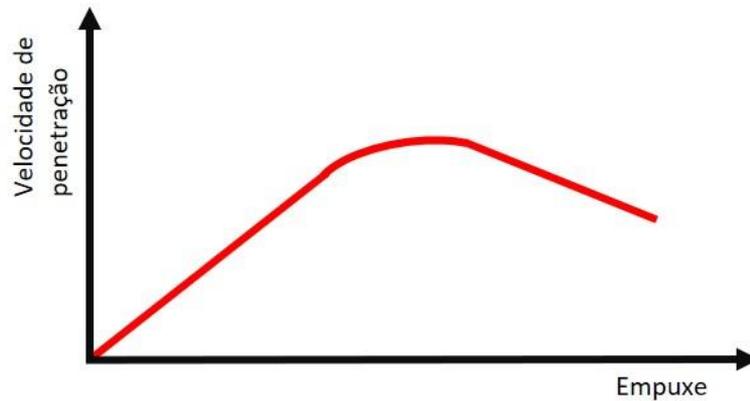


Figura 2-11 - Influencia do empuxe sobre a velocidade de penetração. Adptado de López Jimeno et. al, 2017

2.2.3.4 Limpeza

Para que a perfuração seja efetua de forma eficaz, é necessário que o fundo dos furos se mantenha constantemente limpo através da remoção dos detritos gerados logo após a sua formação. Se isto não se realiza será consumida uma grande quantidade de energia na trituração dessas partículas, traduzindo-se em desgastes excessivos, perdas de rendimentos e o risco de encravamento dos bits e varas aumenta consideravelmente.

A limpeza dos furos é efetuada por um fluído (água, ar ou espuma) que é injetado até ao bit através dos orifícios centrais existente nos encabadouros e varas. Por sua vez os bits apresentam múltiplos orifícios de forma a evacuar o fluído de forma eficiente. As partículas produzidas são evacuadas pelo espaço livre existente entre as paredes do furo e a vara (ver figura 2-12).

O sistema de limpeza com água é o mais aplicado em perfuração subterrânea de forma a evitar a produção de pó, mas quando comparado com o sistema de ar o seu rendimento é 10 a 20 % menor.

A velocidade ascensional da água deve estar compreendida ente 0,4 e 1 m/s. Para estes casos, as pressões estão limitadas entre 0,7 e 1 MPa para evitar que a água entre para o martelo. Um fator que é necessário ter em conta para estimar qual o caudal de fluído para a limpeza ser efetuada de forma

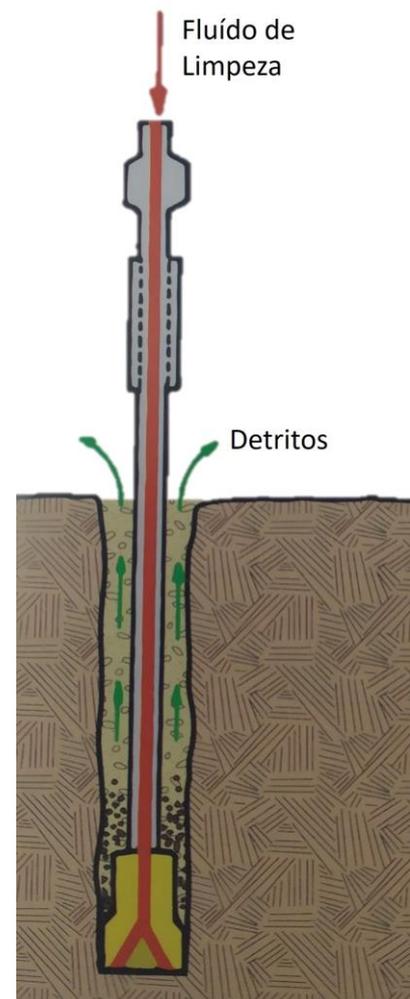


Figura 2-12 - Princípio de limpeza de um furo. Adaptado de López Jimeno et. al, 2017

eficiente, é as perdas de carga que se verificam devido aos diâmetros reduzidos dos orifícios centrais das varas e encabadouros.

2.2.3.5 Problemas habituais na perfuração rotopercussiva

Neste subcapítulo são referidos alguns dos principais problemas associados à perfuração rotopercussiva.

a) Percussão

Demasiado elevada

Rotura dos botões do bit;

Rotura das varas e encabadouros;

Demasiado baixa

Velocidade de penetração baixa;

Desgaste excessivo dos botões (devido à rotura da rocha por rotação);

A velocidade de penetração deve ser medida tendo em conta a velocidade de penetração máxima e a economia de aços de perfuração.

b) Empuxe

Demasiado elevado

Problemas com a limpeza dos furos;

Desgaste acelerado do corpo e dos botões dos bits;

Aumento dos desvios dos furos;

Problemas no desacoplamento;

Deformações nos componentes da coluna de perfuração e rotura de encabadouros;

Demasiado baixo

Desprendimento dos botões;

Baixa velocidade de penetração;

Afrouxamento dos acoplamentos e desgaste excessivo das roscas;

Má transmissão da energia.

c) Rotação

Demasiado elevada

Remoagem dos detritos e baixa velocidade de penetração;

Desgaste excessivo dos bits;

Dificuldade em desacoplar os componentes;

Demasiado baixa

Velocidade de penetração baixa;

Perdas de energia por remoagem.

d) Limpeza

Demasiado elevada

Perdas de energia desnecessárias pelo compressor (limpeza com ar);

Entrada de água no martelo, caso a limpeza seja feita com água, e a selagem esteja deteriorada;

Demasiado baixa

Velocidade de penetração baixa, porque ocorre remoagem dos detritos;

Desgaste do bit;

Encravamento dos bits;

2.2.4 Perfuração com Martelo à cabeça

Este sistema de perfuração é o mais clássico e convencional, ainda que o seu emprego por acionamento pneumático foi limitado pelos martelos de fundo e pelos equipamentos rotativos. A aparição dos martelos hidráulicos na década de setenta do século passado fez ressurgir de novo este método, complementando-o e ampliando o seu campo de aplicação.

Como foi referido anteriormente, atualmente estão disponíveis no mercado dois tipos de martelos: os pneumáticos e os hidráulicos. A diferença mais importante entre ambos os sistemas é que o sistema pneumático é alimentado por ar comprimido, gerado por um compressor acionado por um motor diesel ou elétrico e no sistema hidráulico os componentes são acionados por óleo que é subministrado por um grupo de bombas sobre o qual atua um motor.

Nesta dissertação apenas serão abordados de forma mais detalhada os martelos hidráulicos, porque os jumbos de perfuração existentes na Mina da Panasqueira estão equipados com este tipo de martelos. Para os interessados em aprofundar um pouco mais os seus conhecimentos sobre o sistema pneumático aconselha-se a leitura do subcapítulo 5.1 que se encontra inserido no capítulo 2 do manual referenciado no início deste capítulo.

2.2.4.1 Martelos hidráulicos

No final dos anos 60 início dos anos 70, ocorreu um grande avanço tecnológico na perfuração de rochas devido ao desenvolvimento dos martelos hidráulicos.

Na figura seguinte é possível observar os principais constituintes de um martelo hidráulico, sendo feita em seguida uma breve descrição de cada um.

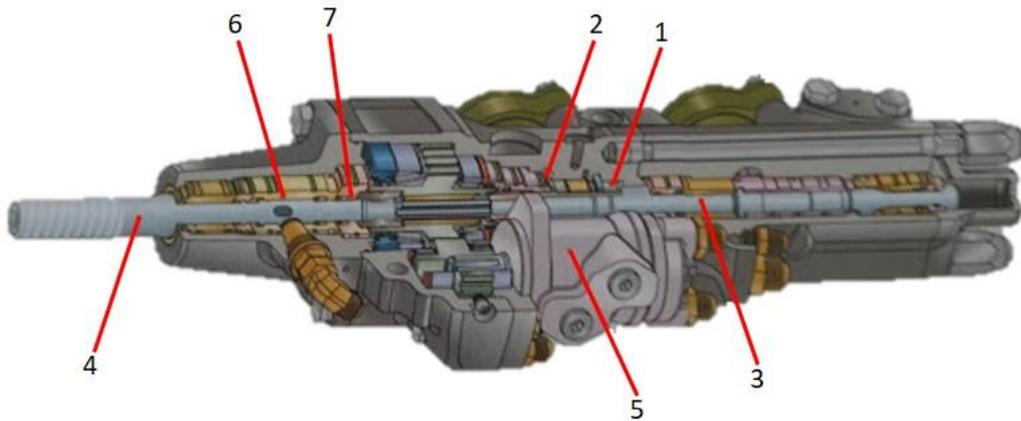


Figura 2-13 - Seção de um martelo hidráulico. Adaptado de López Jimeno et. al, 2017.

1 - Pistão de amortecimento - Pressiona o encabadouro, a coluna de perfuração, a vara e o bit contra a rocha para que as barras se mantenham devidamente apertadas entre percussões.

2 - Câmara de amortecimento - As ondas refletidas pela rocha são absorvidas e convertidas em calor que por sua vez é absorvido pelo sistema hidráulico.

3 - Pistão de impacto - Tem a mesma área de seção transversal que as varas para transmitir a energia com a máxima eficiência.

4 - Encabadouro - Adapta-se de forma exata ao pistão de impacto para que a energia seja transmitida com a máxima eficiência.

5 - Motor de rotação - Reversível. Mais de 200 Nm

6 - Câmara de limpeza - Com uma pressão de varrimento de mais de 10 bar.

7 - Junta de selagem - Evita o retrocesso do martelo.

Na tabela 2-3 encontram-se resumidas as principais características médias dos martelos hidráulicos. Segundo o valor da potência gerado pelo martelo seleciona-se o diâmetro das varas. Na tabela 2-4 é possível consultar os diâmetros das varas recomendáveis de acordo com a potência do martelo

Tabela 2-3 - características médias dos martelos hidráulicos. Adaptado de López Jimeno et. al, 2017.

Pressão de trabalho (MPa)	7,5 - 25
Potência de impacto (kW)	6 - 30
Frequência de golpeio (golpes/min)	2 000 - 5 000
Velocidade de rotação (r/min)	0 - 500
Torque máximo (Nm)	100 - 1 800
Consumo relativo de ar (m ³ /min cm diâmetro)	0,6 - 0,9

Tabela 2-4 - Diâmetro das varas de acordo com a potência do martelo. Adaptado de López Jimeno et. al, 2017

Diâmetro das varas (mm - polg)	Potência do martelo (kW)
25,4 - 1	8 - 12
31,7 - 1 ^{1/4}	10 - 14
38,1 - 1 ^{1/2}	14 - 16
44,5 - 1 ^{3/4}	16 - 18
50,8 - 2	18 - 22
60 - 2,4	25 - 30

As principais razões pelas quais se afirma que a perfuração hidráulica é uma melhoria tecnológica sobre a perfuração pneumática são as seguintes:

- Menor consumo de energia: as perfuradoras hidráulicas trabalham com fluidos a pressões muito superiores às acionadas pneumáticamente e as quedas de pressão são muito menores. A energia é utilizada de forma mais eficiente, sendo apenas necessário por metro furado 1/3 da energia consumida pelos equipamentos pneumáticos.
- Menos custos em acessórios de perfuração: A transmissão de energia nos martelos hidráulicos efetua-se por meio de pistões mais alongados e de diâmetro mais reduzido comparativamente aos pistões dos martelos pneumáticos. O desgaste gerado nas varas depende da sua secção e do tamanho do pistão de golpeio, porque a forma da onda de choque produzida pelos martelos hidráulicos é muito mais limpa do que a produzida pelos martelos pneumáticos. Estes produzem níveis de tensão muito elevados e que são a origem do desgaste do aço e de uma série de ondas secundárias de baixa energia. Na prática é possível comprovar que a vida útil das varas aumenta cerca de 20 % se aplicadas em perfuradoras hidráulicas.

- Maior capacidade de perfuração: Devido a uma transmissão mais eficiente de energia e à forma da onda, as velocidades de penetração das perfuradoras hidráulicas são entre 50 a 100 % superiores às dos equipamentos pneumáticos.
- Melhores condições ambientais: Os níveis de ruído de uma perfuradora hidráulica são sensivelmente menores em relação aos gerados por uma perfuradora pneumática, devido à ausência do escape do ar. Principalmente, no campo das baixas frequências, onde os protetores auriculares não são tão bons. Nos trabalhos subterrâneos não são produzidas nuvens de água e óleo, o que melhora o ambiente e a visibilidade dos operadores.
- Maior elasticidade da operação: é possível variar a partir dos comandos do equipamento a pressão de acionamento do sistema, a energia debitada por golpe e a frequência de percussão.
- Maior facilidade para a automatização: os equipamentos com sistemas hidráulicos estão muito mais aptos para a automatização de operações, tais como, a troca de varas.

Contudo, para adquirir um equipamento com sistema de perfuração hidráulico é necessário fazer um investimento inicial superior e as reparações são mais complexas e dispendiosas o que requiere uma maior organização e formação do pessoal da manutenção.

2.2.5 Sistemas de Avanço

Como indicado anteriormente, para se obter um rendimento elevado no processo de perfuração os bits devem estar em contacto com a rocha e na posição adequada no momento em que o pistão transmite a sua energia mediante o mecanismo de impacto. Para que isto seja possível, o bit deve ser empurrado com uma força, que oscila entre os 3 e os 5 kN, para os equipamentos mais pequenos, e até aos 15 kN para os equipamentos de maiores dimensões.

Os sistemas de avanço existentes são os seguintes:

- Empurradores;
- Guias de cadeia;
- Guias de parafusos;
- Guias de cabos;
- Guias hidráulicas;

Os sistemas de empuxe telescópicos utilizam-se tanto para perfuração de furos horizontais como para a perfuração de furos verticais, sendo estes últimos denominados por empurradores de coluna.

Denominam-se por guias os elementos retilíneos sobre os que os quais se movem, acoplados a uns suportes, os martelos à cabeça; estes elementos encontram-se instalados nos braços dos jumbos.

2.2.5.1 Guias

O sistema de empuxe mediante guias mantém a vara em contacto com o martelo através do encabadouro e a vara em contacto com o bit, que por sua vez entra em contacto com a rocha durante a perfuração. Um sistema ótimo de avanço deve estar em equilíbrio com a dinâmica de percussão do martelo e da coluna de perfuração, e deve cumprir com as exigências das mais variadas aplicações de perfuração.

Os sistemas de guia utilizados nas unidades de perfuração mecanizada podem ser constituídos por um motor hidráulico e uma corrente, por um parafuso ou por um cilindro hidráulico e um cabo de aço.

Atualmente o avanço mediante cilindro hidráulico e cabo é o mais utilizado, porque permite aplicar uma força de empuxe constante e estável sobre o martelo durante a perfuração.

2.2.5.1.1 Guias Hidráulicas

As guias hidráulicas podem ser simples ou telescópicas, e podem ser feitas de aço ou, como para os equipamentos de interior, a partir de longarinas de alumínio o que as torna mais rígidas e leves ao mesmo tempo.

Os martelos são montados sobre um suporte que é acionado por um cilindro hidráulico, que o faz deslizar ao longo da guia por meio de um cabo. As guias contam com suportes que servem de guia às varas e que evitam a flexão das mesmas (figura 2-14).

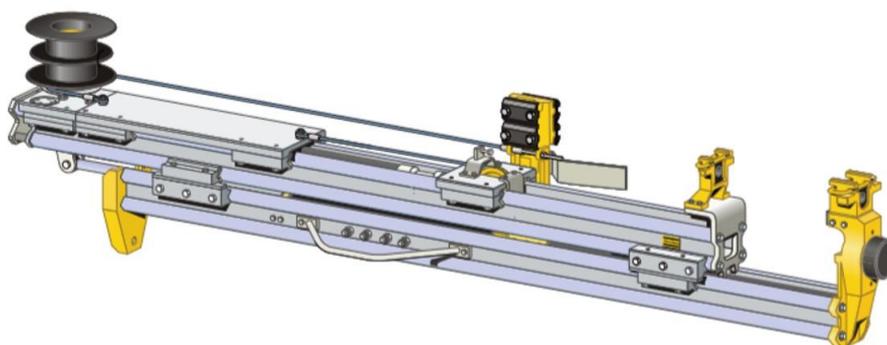


Figura 2-14 - Guia Hidráulica telescópica. Fonte: Catálogo Atlas Copco.

Durante a perfuração, as mangueiras hidráulicas permanecem estiradas e sem estrangulações, porque as mesmas são conduzidas por um carroto que se move à mesma velocidade que o martelo.

Nos equipamentos de interior as guias são mais ligeiras que as utilizadas em unidades a céu aberto, e dispõem de um sistema de avanço na parte posterior das mesmas para evitar os golpes.

Para além dos centralizadores finais, têm também centralizadores centrais para diminuir as deformações das varas de grande longitude e de seção pequena. Para que não seja necessário adicionar varas para a realização de uma pega, estes tipos de guias chegam a ter comprimentos superiores a 4,20 metros.

O controlo das guias pode ser automático com detenção da perfuração quando se alcança uma determinada profundidade, ou quando o martelo terminou o seu percurso sobre a guia. Normalmente também é incorporado um sistema de paralelismo automático de forma a eliminar os desvios causados por erros de angulação e dispositivos de emboquilhamento a meia potência.

Os jumbos de interior têm um perfil baixo para que possam realizar corretamente os furos de contorno, sem uma inclinação excessiva. Por esta razão, os sistemas de rotação dos martelos costumam movimentar-se na direção oposta à dos martelos utilizados em explorações a céu aberto, ficando dentro das guias.

2.2.6 Velocidade de penetração e velocidade de perfuração

2.2.6.1 Velocidade de penetração

A velocidade de penetração que um equipamento rotopercussivo pode alcançar depende dos seguintes fatores:

- Características Geomecânicas;
- Potencia de percussão do martelo;
- Diâmetro do furo;
- Empuxe sobre o bit;
- Longitude da perfuração;
- Limpeza do fundo do furo;
- Desenho do equipamento e condições de trabalho;
- Eficiência da operação;

Para um determinado equipamento pode prever-se a velocidade de penetração através dos seguintes procedimentos:

- Extrapolar dos dados obtidos em outras condições de trabalho;
- Com fórmulas empíricas;
- Mediante ensaio de laboratório sobre amostras representativas;

Este último procedimento é o mais fiável e rigoroso.

Apesar de se ser possível prever qual a velocidade de penetração apenas tendo em conta as propriedades mecânicas, para uma maior exatidão é necessário ter em consideração que os fatores geológicos por vezes são mais decisivos que os mecânicos.

Os aspetos geológicos mais importantes são os seguintes:

- Anisotropia - Orientação das descontinuidades em relação á direção de ensaio ou da perfuração;
- Espaçamento entre descontinuidades;
- Composição mineral;
- Volume de poros;

A velocidade de penetração quando se realiza perfuração com martelos de fundo é praticamente constante.

2.2.6.2 Velocidade média de perfuração

A velocidade média alcançada por uma perfurada durante um certo período de trabalho depende, para além da eficiência da organização, dos seguintes fatores:

- Comprimento dos furos;
- Tempo de manobras;

O comprimento dos furos a realizar é que define o número de varas e uniões necessários, fator que afeta os ritmos de avanço visto que existem perdas de energia devidas à falta de rigidez dos acoplamentos e à fricção interna.

Os tempos mortos ou não produtivos derivados de movimentações do equipamento entre furos, posicionamento e emboquilhamento, troca e retirada de varas, limpeza dos furos e encravamentos devem ser tidos em conta no cálculo da velocidade perfuração.

2.3 Equipamentos

Consoante o tipo de trabalho, a céu aberto ou subterrâneo, de desmonte de rocha em que se apliquem explosivos, os equipamentos de perfuração e conseqüentemente os sistemas de montagem são distintos.

Na figura 2-15 encontram-se discriminados pelo tipo de aplicação os equipamentos atualmente disponíveis.

É importante destacar que algumas destas unidades podem realizar vários métodos de perfuração diferentes, ou seja, estarem munidos de um martelo de fundo ou um de um martelo à cabeça, sendo que o seu especto exterior por norma é muito similar.



Figura 2-15 - Equipamentos de Perfuração. Aptado de López Jimeno et. al, 2017.

De forma a ir de encontro aos objetivos desta dissertação, neste subcapítulo apenas serão abordados os tipos de equipamentos de perfuração utilizados em trabalhos subterrâneos.

2.3.1 Equipamentos para aplicações subterrâneas - Jumbos

Os equipamentos de perfuração que mais se utilizam em trabalhos subterrâneos são os seguintes:

- Jumbos para abertura de túneis ou galerias, explorações por *cut and fill*, câmaras e pilares, entre outras.
- Perfuradoras de furos longos em leque aplicados no método de câmaras por subníveis.
- Perfuradoras de furos longos paralelos para sistemas de crateras invertidas e camaras por bancadas.

Os jumbos podem estar equipados com um ou vários martelos e as principais aplicações em trabalhos subterrâneos são as seguintes:

- Avanço de túneis e galerias;
- Bancadas com furos horizontais e verticais;
- Perfuração transversal;
- Colocação de parafusos e perfuração para sustimento;

Atualmente o número de fabricantes deste tipo de equipamentos é bastante reduzido, destacando-se os europeus, particularmente os nórdicos.

Os componentes básicos deste tipo de equipamentos estão muito estandardizados, sendo os principais componentes os seguintes: o sistema de movimentação e a estrutura, o sistema de acionamento, a cabine, os braços, as guias e os martelos.

Devido ao design modular e à estandardização anteriormente referida é possível distinguir os seguintes componentes básicos:

- Sistema de perfuração (martelos de perfuração, guias, braços de perfuração e braço da cesta auxiliar);
- Veículo transportador (estrutura, sistema de movimentação, motor, transmissão e cabine);
- Sistema Elétrico (motores, transformador, enrolador do cabo, bateria, proteções, controlos e indicadores);
- Sistema Hidráulico (bombas, depósito de óleo, refrigerador, filtros, uniões e mangueiras);
- Sistemas de ar e água;
- Sistema de controlo (painel de controlo, sensores e sistemas de diagnóstico);
- Software de gestão (controlo de processo de perfuração, registo de parâmetros de perfuração e avaliação, sistema de informação e comunicação e perfilómetro);

O equipamento adquirido deve ser capaz de executar de maneira eficiente as tarefas de perfuração e adaptar-se às condições das diferentes frentes, às variações geológicas e aos diferentes cumprimentos dos furos das pegas.

Na maioria dos casos, no mesmo projeto, é necessário realizar diferentes tarefas, pelo que, durante a sua vida útil um jumbo pode ter que desempenhar diversas tarefas em diversas obras ou projetos.

As condições de trabalho de podem variar nos seguintes aspetos:

- Seções diversas das galerias ou túneis a executar, tanto em área como em geometria.
- Curvatura do traçado em planta de um túnel e intersecção com outras escavações.
- Gradientes do layout do túnel em termos de elevação.
- Comprimento do túnel e distâncias de deslocamento;
- Características dos maciços rochosos a desmontar;
- Diâmetro e comprimento dos furos das pegas;
- Programação do ciclo de trabalho;
- Trabalhos auxiliares necessários;

2.3.1.1 Meio de locomoção

Atualmente os equipamentos de perfuração que se utilizam em projetos subterrâneos são quase todos autopropulsados, sendo que em alguns casos muito específicos ainda se utilizam unidades rebocáveis. Os meios de locomoção dos equipamentos autopropulsados são carris, lagartas ou pneus.

Os jumbos sobre carris, hoje em dia em desuso, eram utilizados em trabalhos com as seguintes características: galerias com grandes comprimentos e de seção reduzida, locais com ventilação

reduzida e onde os equipamentos de remoção do material desmontado também se movimentavam sobre carris.

Os equipamentos que se movimentam sobre lagartas são utilizados, principalmente, em túneis e galerias de seção reduzida, que apresentam declives acentuados (15° a 20°), tenham poucas curvas e em que o piso esteja em más condições.

Normalmente estes equipamentos estão equipados com um ou dois braços, sendo o seu principal campo de aplicação o avanço em galerias de seção reduzida.

Hoje em dia o meio de locomoção mais utilizado é sobre pneus, devido à grande mobilidade que oferece, pela resistência às águas corrosivas e pelo desgaste reduzido sobre pisos irregulares. Com este tipo de equipamentos podem alcançar-se velocidades de deslocamento entre os 10 km/h e os 15 km/h em pisos horizontais e entre 3 e 5 km/h em rampas com inclinações de 14 % ou 8° , respetivamente. Normalmente a inclinação máxima que os equipamentos a pneus conseguem vencer é 28% (equivalente a 15°).

2.3.1.2 Chassis

Atualmente é possível encontrar no mercado jumbos articulados ou rígidos. Os jumbos articulados apresentam uma articulação central com ângulos, por exemplo, de $\pm 37^\circ$. No chassi traseiro estão montados todos os equipamentos de acionamento e transmissão, bombas hidráulicas, travões, depósitos de combustível, enrolador do cabo elétrico, entre outros componentes. No chassi da frente estão instalados a cabine do operador e as articulações dos braços do jumbo.

As unidades de maior tamanho normalmente possuem um chassi rígido com diretriz do eixo traseiro, de por exemplo, $\pm 41^\circ$. Este tipo de desenho condiciona os ângulos de curvatura e, conseqüentemente, os trabalhos em curva, tal como se pode observar na figura 2-16.

Na maior parte dos casos estes equipamentos possuem tração às 4 rodas, com uma certa oscilação do eixo traseiro de aproximadamente 8° . Para além dos travões de serviço estes equipamentos possuem travões de emergência e de estacionamento.

Dentro do sistema elétrico, que em norma funciona a tensões baixas (por exemplo 24 V) esta máquinas contam com as luzes de deslocação, trabalho e de travagem. Bem como a buzina e o dispositivo de alarme de marcha atrás.

Estes equipamentos são munidos de extintores em lugares de fácil acesso, e alguns destes equipamentos também já estão equipados com sistemas centralizados de deteção e extinção de incêndios.

A capacidade de um jumbo poder realizar trabalhos transversais ao túnel principal ou galerias, não depende só do tipo de chassi, depende também do tipo de braços que tem instalado (figura 2-16).

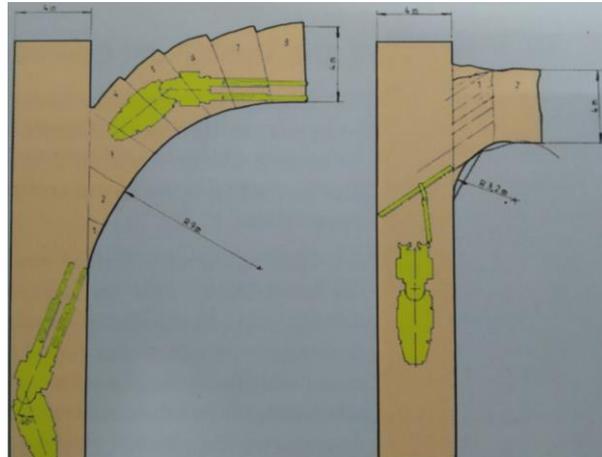


Figura 2-16 - Possibilidades de perfuração transversal de segundo o tipo de braços. Aptado de López Jimeno et. al, 2017.

2.3.1.3 Acionamento e Componentes Auxiliares

Em norma as fontes de energia dos jumbos são de dois tipos, diesel e elétrica, sendo que a maior parte dos equipamentos estão equipados com as duas.

Os motores a diesel servem para acionar o sistema de locomoção, normalmente com transmissão hidrostática, mas também pode acionar todos os componentes de perfuração, bombas hidráulicas, bombas de água, compressores, etc. Este sistema utiliza-se em projetos de pequena envergadura e quando não existem problemas de ventilação das frentes.

Na maioria dos casos o motor a diesel é utilizado apenas para deslocar os equipamentos das oficinas ou do exterior até às frentes de trabalhos e para movimentações entre frentes. Sendo o motor elétrico empregue no acionamento de todos os componentes do sistema de perfuração.

Os motores a Diesel, em qualquer caso, têm que cumprir com a normativa vigente (Tier) no que diz respeito às emissões e é normal contar com um catalisador de escape, silenciador e filtro de partículas. Consoante o modelo, as potências variam entre os 110 e os 170 kW.

Os motores elétricos costumam ter potencias que variam entre os 80 kW e os 300 kW, sendo que alguns equipamentos estão munidos com motores que ultrapassam os 300 kW. O número de motores pode variar entre 1 e 4 de acordo com o modelo.

O equipamento elétrico conta com todo um conjunto de elementos de controlo automático, dos quais vale a pena destacar: pressão de água de limpeza dos furos, pressão do ar de lubrificação, dos encabadouros, temperatura do óleo hidráulico, nível do óleo hidráulico,

bloqueio do filtro de óleo, voltagem da alimentação, carga de cada motor elétrico, comprimento do cabo disponível no enrolador, sistema de iluminação, entre outros.

O sistema hidráulico é constituído pelas bombas, que são acionadas pelos motores elétricos, e por todo um conjunto de dispositivos e elementos de regulação e controlo. Alguns dos dispositivos mais habituais são os seguintes: emboquilhamento automático, paragem e retirada automática da coluna de perfuração, dispositivo anti-arranque e controlo da roldana de varas para adicionar ou retirar as varas de perfuração da coluna.

Para além dos componentes já referidos, é importante referir também o enrolador da mangueira de água, o suporte para as varas de perfuração, a bomba hidráulica para a instalação de parafusos de sustimento e o sistema de alimentação de água e ar para a cesta auxiliar.

2.3.1.4 Cabine do Operador

As cabinas de operação onde se encontram os painéis de controlo podem ser abertas ou fechadas. Independentemente serem abertas ou fechadas, têm todas os sistemas de proteção ROPS e FOPS. As cabines fechadas por norma são insonorizadas e climatizadas.

Os jumbos mais modernos contam com cabines mais confortáveis para os operadores. Para além de serem cada vez mais seguras, contam com um acento fixo para o trabalhador, um acento opcional para as deslocações, um painel de controlo, sistema de pressurização e de ar condicionado.

O nível de insonorização é tão elevado que se o ruído no exterior é de, por exemplo, 214 dB, no interior é apenas de 74 dB.

Os equipamentos de maior envergadura, devido ao tamanho e ao número de braços com que estão equipados, são providos de cabines que podem ser elevadas, mediante um sistema hidráulico. Segundo os fabricantes podem conseguir-se elevações até 1 m, 1,10 m possibilitando ao operador uma visão completa sobre a frente de trabalho (figura 2-17).

2.3.1.5 Macacos Hidráulicos

Quando estes equipamentos chegam as frentes de trabalho, são estabilizados mediante macacos hidráulicos, situados na parte dianteira e traseira do chassi. Desta forma consegue-se um posicionamento preciso do equipamento e evitam-se transmissões desnecessárias de esforços (figura 2-17).



Figura 2-17 - Jumbo em trabalhos de perfuração com cabine elevada e estabilizado com os 4 macacos hidráulicos (Sandvik). Fonte: Aptado de López Jimeno et. al, 2017.

2.3.1.6 Enrolador do Cabo de Alimentação

Como referido anteriormente, à exceção do deslocamento até às frentes de trabalho, o acionamento dos jumbos é totalmente elétrico. Para tal é necessária a criação de infraestruturas elétricas adequadas até uma certa distância das frentes de trabalho.

Para a alimentação de energia, os jumbos contam com um enrolador de cabo interior ou exterior, de diâmetro até 1800 mm e com uma capacidade para armazenar mais de 200 metros de cabo elétrico. As tensões de alimentação habituais são de 380, 690 e 1 000 V, sendo as últimas duas as mais utilizadas.

Nos equipamentos de menores dimensões o acionamento do carreto é manual, enquanto que nos jumbos médios ou grandes o acionamento da recolha do cabo é automático, sendo aplicada uma força constante de forma a evitar tensões mecânicas perigosas. Durante o desenrolar do cabo é pratica comum deixar a roldana girar livremente.

É normal a alimentação ser de alta tensão, conectando-se a alguma linha da rede de distribuição existente nas proximidades, posteriormente chega até um transformador que pode encontrar-se no interior ou exterior do túnel, por exemplo. Neste caso o transformador deve ser movido a cada 500 ou 700 metros de avanço.

O transformador anteriormente citado permite reduzir a tensão até aos níveis desejados (380, 690 e 1 000 V). O comprimento máximo destes cabos não costuma superar os 700 m, permitindo quebras de tensão entre o transformador e o ponto de conexão ao jumbo da ordem dos 7%. Voltagens mais elevadas permitem trabalhar com cabos mais ligeiros e baratos para uma determinada potência, contudo é necessário adotar medidas de segurança reforçadas.

Para além dos componentes referidos anteriormente, a instalação também deve ter ligações terra e dispositivos contra sobretensões, com o objetivo de proteger os operadores e de evitar danos nos equipamentos por deterioração dos cabos.

2.3.1.7 Braços de perfuração

Os braços de perfuração dos jumbos modernos são acionados hidráulicamente, existindo uma grande variedade de desenhos. Do número de cilindros e movimentos do braço depende a cobertura ou a seção transversal ao eixo do túnel/galeria sobre a qual se pode perfurar e as possibilidades de trabalho dos jumbos. Por este motivo, uma eleição correta dos braços é um aspeto muito importante, sobretudo em obra pública, já que os trabalhos a realizar são muito variados.

Basicamente existem três tipos de desenho: giro na base, em linha e do tipo tripé.

Os braços do tipo tripé têm como vantagem permitir alcançar uma grande precisão na realização de furos paralelos e perpendiculares à frente. Na figura 2-18 podem observar-se os componentes principais de um dos tipos deste braço, com os pontos de fixação, as cabeças, dispositivos de rotação e os cilindros de acionamento.

Também é comum disporem de um mecanismo de rotação da guia que se monta sobre os braços, cobrindo 360°, este especto permite minimizar os ângulos de divergência e sobre escavação, principalmente na realização de furos de contorno, porque é possível aproximar muito o martelo dos hasteais dos túneis/galerias.

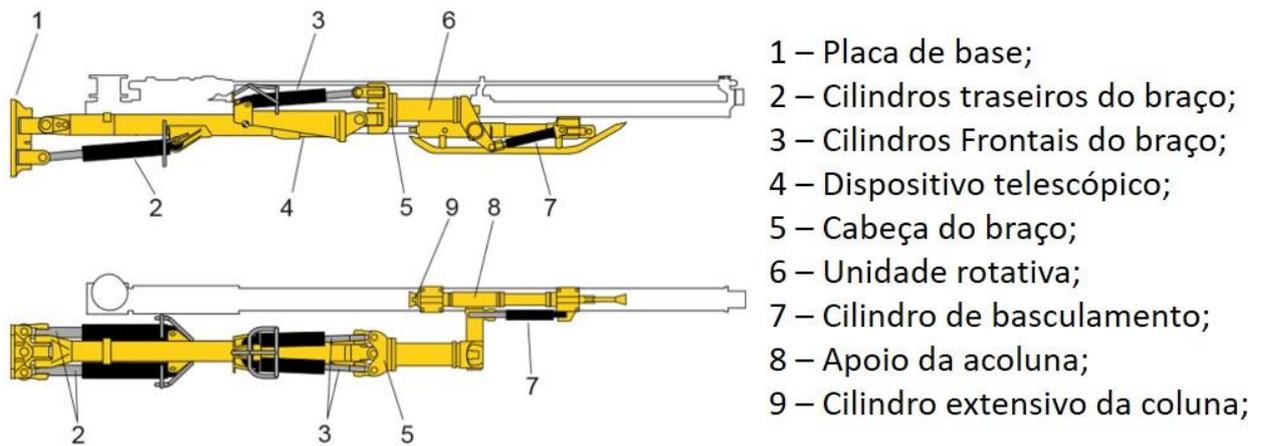


Figura 2-18 - Braço telescópico hidráulico e telescópico. Fonte: Atlas Copco

Na figura 2-19 é possível observar os tipos de trabalhos que é possível realizar com este tipo de braços:

- Para a execução dos furos do teto

- 1 - Basculamento da guia até estar posicionada verticalmente;
- 2 - Rotação da guia;
- 3 - Direcionamento do Braço;
- 4 - Posicionamento com o cilindro telescópico do braço;

- Para a perfuração de furos verticais de uma bancada

- 1 - Rotação da guia 180°;
- 2 - Basculamento da guia até estar colocada verticalmente;
- 3 - Direcionamento do braço;
- 4 - Posicionamento com o cilindro telescópico do braço;

- Realização de galerias transversais:

- 1 - Rotação da guia 90°
- 2 - Basculamento da guia 90°
- 3 - Elevação ou descida do braço até à posição adequada;
- 4 - Posicionamento com o cilindro telescópico do braço;

O número e dimensão dos braços de um jumbo são selecionados em função do avanço requerido, da secção do túnel/galeria e controlo da perfuração para evitar a sobre-escavação.

Em teoria, um aumento do número de braços deve dar lugar a um incremento proporcional da capacidade de perfuração; contudo, na prática, isto depende de se fazer um uso ótimo de todos os braços. A perfuração com um jumbo de vários braços implica normalmente algumas sobreposições ou tempos de espera, por vezes de alguns minutos.

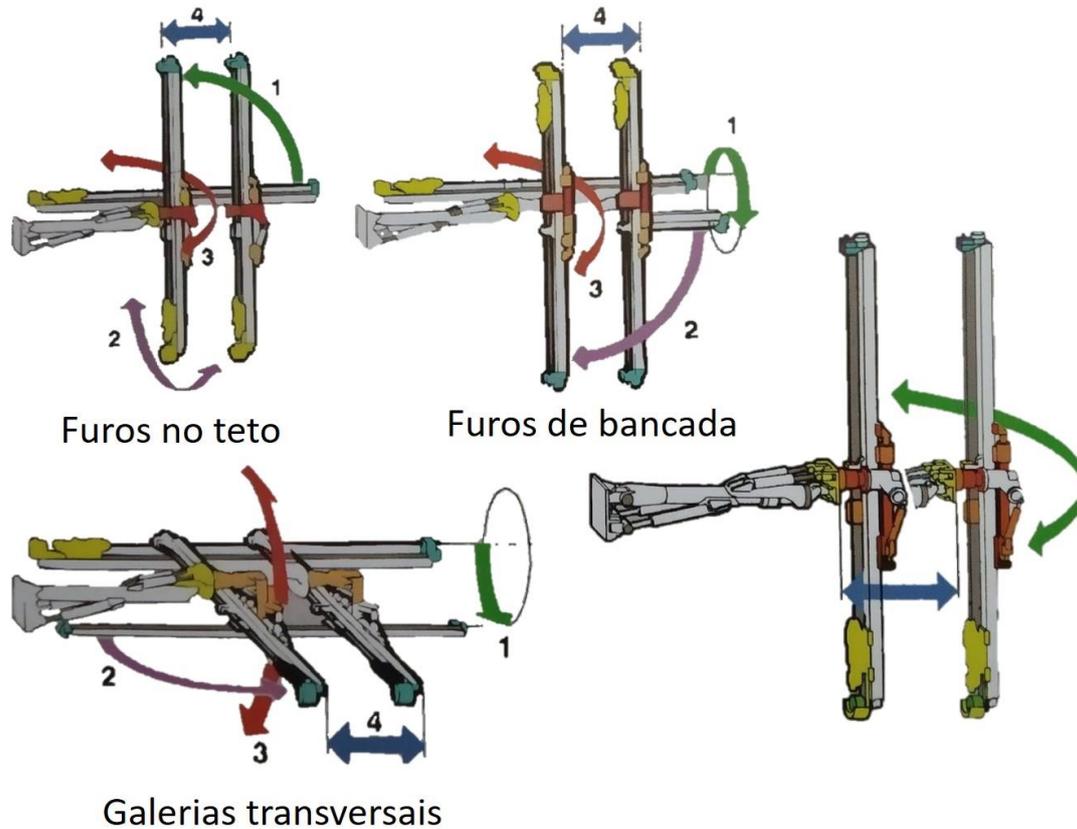


Figura 2-19 - Braços extensível com rotação em linha (Atlas Copco). Fonte: Aptado de López Jimeno et. al, 2017.

No modo de perfuração manual, os fatores mais importantes que podem levar à redução dos tempos de espera consistem em a cobertura dos braços ser suficiente para cobrir a superfície da frente e a experiência dos operadores. Os tempos de sobreposição variam de obra para obra.

A melhor forma de otimizar os tempos de perfuração é recorrendo à perfuração computadorizada. Os jumbos robotizados podem minimizar o período de espera porque têm esquema de perfuração pré-programado, o movimento dos braços e as funções de perfuração realizam-se de forma automática, e podem ser programados para obter os melhores rendimentos.

Os critérios gerais que se devem cumprir para que o processo seja o mais eficiente possível são os seguintes: o número de furos que cada braço realiza deve ser aproximadamente o mesmo, a sobreposição entre os braços deve ser superior a 30% e a ordem de execução dos furos deve ser a que, globalmente, implica menores tempos de movimentação dos braços.

O tamanho dos braços depende da cobertura necessária que o jumbo tem que satisfazer. Para o mesmo tipo de braço, dependendo da posição de estacionamento, tais características podem mudar.

Hoje em dia os jumbos têm que estar capacitados para realizar diversas tarefas, requerendo-se a execução rápida de movimentos e que sejam dotados de sistemas de paralelismo automático em todas as direções. De forma a colmatar tais necessidades foram desenvolvidos os braços universais ou “roll-over”.

A unidade rotação do braço “roll-over” está localizada no extremo frontal do braço e, por sua vez, esse braço pode mover-se verticalmente ou horizontalmente. Este tipo de braço possibilita uma cobertura ótima de todo o tipo de perfuração, o que permite ao equipamento realizar troços em curva, furos para sustimento, bancadas e interseções entre galerias, bem como a perfuração de uma pega completa de uma frente de um túnel.

O moderno do braço BUT 45 da Epiroc, tem uma cabeça de rotação dupla, que melhora os movimentos dos braços e da guia durante a perfuração da frente. A cabeça rotativa facilita também a rotação lateral dos braços, o que, associada a uma maior força de apoio permite reduzir as movimentações do jumbo, principalmente quando este está a perfurar galerias transversais e furos para a colocação de parafusos.

Um aspeto ainda mais importante é a maior rigidez dos braços, o que lhe permite ter uma dimensão maior e um posicionamento mais preciso, assim a precisão alcançada no ponto de emboquilhamento é cerca de 5 cm enquanto que nas gerações de braços anteriores era apenas de 10 cm.

Para além dos aspetos referidos até agora estes braços oferecem uma maior área de cobertura e permitem reduzir a sub-escavação e a sobre-escavação.

Graças à maior capacidade de carga, ainda pode ser montado neste tipo de braços um manipulador de barras. Alguns manipuladores de barras podem levar barras de prolongamento de 3,05 m, o que permite executar furos mais compridos para a colocação de cabos de sustimento com injeção, por exemplo. Um “carrossel” hidráulico equipado com dois sistemas de suporte pode levar até oito barras de prolongamento.

2.3.1.8 Considerações Operativas

Em seguida são descritos alguns aspetos operativos dos jumbos:

a) Cobertura

A forma geométrica e superfície da área de cobertura é específica de cada máquina. Alguns equipamentos conseguem perfurar túneis com mais de 200 m² de seção transversal, a seção

completa, caso o terreno o permita. Para a perfuração de pequenas galerias por norma não é necessário mais do que 20 m² de cobertura.

b) Automatização

A procura por uma maior qualidade das escavações subterrâneas cresce de forma continuada pelo que, no custo global da operação, tal qualidade expressa em termos de avanço das pegs e também pela sobre-escavação resultante é um dos fatores mais importantes, afetando as condições de segurança e o ambiente do local de trabalho.

A perfuração de frentes é apenas uma das muitas fases de avanço dos túneis e de explorações mineiras; contudo tem um peso muito grande sobre o resultado final e o custo do processo total de escavação.

O propósito principal da instrumentação da perfuração é melhorar a exatidão com que se realizam os processos e que as ferramentas permitam otimizar o custo de perfuração e de desmonte. A instrumentação aplicada nos equipamentos mais modernos pode classificar-se em três níveis tecnológicos distintos: indicadores de ângulo e de posição, e sistemas de informatização totais.

Os indicadores de ângulo são ferramentas de instrumentação simples que mostram o ângulo de abertura da guia quando se realizam os furos de recorte. As versões mais simples mostram a direção dos furos em relação ao eixo da máquina. As versões mais sofisticadas podem “navegar” em direção à pega sendo possível aplicar-se o verdadeiro ângulo de abertura tendo como referência o eixo principal da frente a perfurar. Outras informações que podem ser adicionadas ao sistema são a profundidade dos furos e a velocidade de perfuração, por exemplo.

Os sistemas de perfuração apoiados pela instrumentação e informática podem mostrar de forma gráfica o ângulo e a posição das guias. Quando se tem o esquema de perfuração pré-programado e a navegação em relação à linha (x,y,z) de referência do túnel ou da galeria, não é necessário marcar a pega antes de se começarem os trabalhos de perfuração. Estes sistemas também realizam registo de dados, destacando-se a localização e ângulo real dos furos, metros furados, tempo de perfuração, parâmetros de perfuração, entre outros.

Os jumbos robotizados inteiramente automáticos, realizam o seu trabalho de acordo com o esquema de perfuração pré-programado. A automação manipula todo o ciclo de perfuração, incluindo todas as funções de perfuração, condução, posicionamento dos braços e das guias de acordo com o esquema de perfuração, trocas entre furos, controlo para que os braços não colidam e pequenos ajustes que sejam necessários. O controlo dos dados permite ao operador supervisionar simultaneamente a perfuração de três braços.

Neste tipo de equipamentos o papel do operador passa por supervisionar a perfuração e fazer ajustes apenas quando é necessário.

Nos equipamentos totalmente informatizados, a localização e profundidade de cada furo, assim como a sequência de perfuração de cada braço deve ser previamente programada. Para quem projeta as pegas, esta ferramenta é um meio de otimizar a operação de perfuração, para além de ter a oportunidade de desenhar e implementar a carga de explosivo e a sequência de disparo de cada pega. Durante a operação, é gerado um esquema de perfuração real pelo que é possível detetar qualquer desvio dos furos em relação ao esquema inicial. Como é obvio, o esquema de perfuração tem que estar corretamente adaptado ao estado real da frente.

c) Posicionamento

O plano de um túnel contempla diversos aspetos, como o traçado (x,y,z), os perfis, os planos de disparo, os planos de ancoragem, a obtenção dos perfis mediante laser e a recolha de dados. Uma vez conduzido o jumbo até á frente, e estabilizado com os macacos, alinha-se uma das guias com o laser que marca o alinhamento do túnel. Para isso utilizam-se dois alvos ou colimadores situados em um dos braços.

O computador, por sua vez, lê a posição relativa da guia em relação ao jumbo, e a partir da posição do jumbo em relação ao laser efetua sobre o esquema de perfuração as alterações das coordenadas.

De forma a conseguir-se uma precisão de navegação elevada, existem dois sistemas: alinhar a guia com um raio laser ou usar uma estação total. A navegação com laser dá uma precisão dentro dos 20 cm do centralizado, caso o jumbo esteja bem calibrado e o operador alinhe a guia de forma correta com o laser.

A navegação com uma estação total permite alcançar uma precisão em torno dos 10 cm, caso o jumbo esteja bem calibrado. A navegação é feita com recurso a prismas fixos no jumbo e nos hasteais. Assim, evita-se o erro humano. A estação total é muito eficiente para trabalhos em curva e para interseção de galerias.

Os dois tipos de equipamento de navegação são muito rápidos de utilizar, demorando cerca de 10 a 15 minutos.

2.4 Acessórios

Para realizar um trabalho específico de produção, podem eleger-se diversas combinações de acessórios. Os principais fatores a considerar na seleção dos componentes são: o diâmetro e comprimento do furo, estrutura, resistência e abrasividade das rochas, tamanho e potencia da perfuradora, experiências anteriores e facilidade de fornecimento.

A coluna de perfuração é geralmente constituída pelos seguintes elementos: adaptadores de cabeça, manguitos, varas e bits (ver figura 2-20).

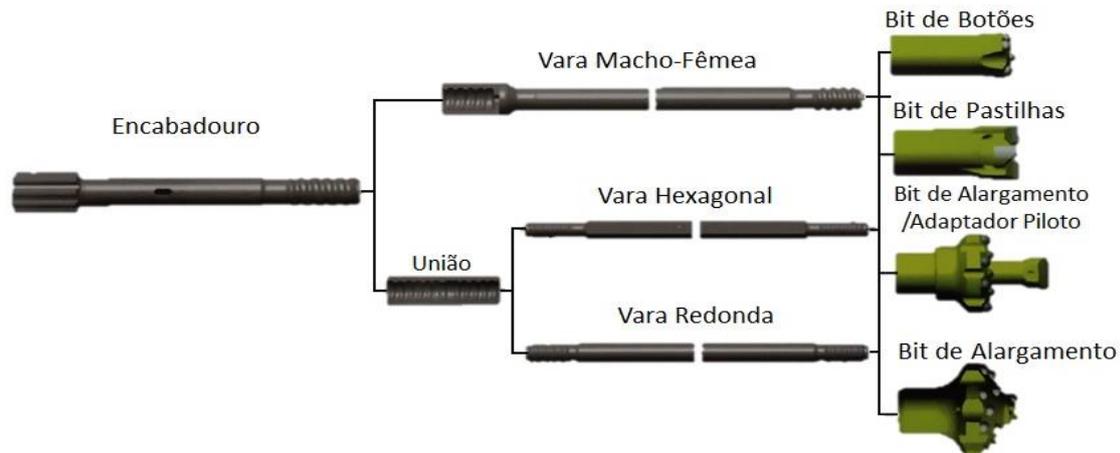


Figura 2-20 - Acessórios de perfuração. Aptado de López Jimeno et. al, 2017.

Os tipos de aço aplicados na fabricação destas ferramentas devem ser resistentes ao desgaste, à flexão, aos impactos e ao desgaste na zona das roscas e das cabeças dos cilindros.

O ideal é utilizar aços com um núcleo muito duro, com uma superfície endurecida e resistente ao desgaste. Esta estrutura na prática consegue-se de duas formas:

- Aços com alto conteúdo em carbono - Como o que é normalmente empregue nas varas integrais. A dureza desejada consegue-se através do controlo da temperatura a quando do processo de fabricação. A parte relativa à cabeça do cilindro é tratada em separado de forma a conseguir-se uma alta resistência aos impactos.
- Aços com baixo conteúdo em carbono - É usado nas varas, adaptadores, encabadouros e bits. São aços que contêm pequenas quantidades de cromo, níquel, manganês e molibdênio.

Os aços por norma são submetidos a alguns tratamentos entre os quais:

- Endurecimento superficial HF (Alta Frequência) - com este tratamento obtém-se uma alta resistência à fadiga e aplica-se nas varas, encabadouros e alguns tipos de bits.
- Carburação - Através deste tratamento os aços adquirem uma alta resistência ao desgaste e aplica-se em varas e cabeças de motores.
- Bombardeio com granalha de aço - Aumenta a resistência à fadiga dos materiais que não são submetidos aos tratamentos anteriores.
- Proteção contra a corrosão - mediante fosfatização e aplicação de uma camada fina de aço.

O metal duro dos botões e pastilhas dos bits, é fabricado a partir de tungsténio e cobalto. Este material caracteriza-se pela sua alta resistência ao desgaste e tenacidade, e podem conseguir-se diferentes combinações variando o conteúdo em cobalto, entre os 6 e os 12 % e o tamanho dos grãos de carboneto de tungsténio.

A união entre o aço e o metal duro pode-se fazer com soldadura no caso dos bits com pastilhas e por contração ou pressão no caso das bocas de botões.

2.4.1 Tipos de Roscas

As roscas têm como função unir as cabeças dos cilindros, os encabadouros, as varas e as bocas durante a perfuração. O ajuste deve ser eficiente de forma a garantir que os elementos da coluna de perfuração se mantenham bem unidos com o fim de conseguir uma transmissão direta de energia. Contudo, o aperto não deve ser excessivo pois dificulta o desacoplamento do conjunto de varas quando são retiradas do furo.

As características que determinam se as varas são ou não facilmente desacopláveis são as seguintes: o ângulo de perfil e o passo de rosca. Comparando roscas com o mesmo diâmetro, um passo maior a par de ângulo de perfil menor faz com que a rosca seja fácil de desacoplar.

Existem 4 tipos de roscas: rosca R (corda), Rosca T, Rosca C e Rosca GD ou HI. Na figura seguinte encontram-se descritos os tipos e perfis de roscas bem como um gráfico que relaciona o torque de desacoplamento com o torque de aperto.

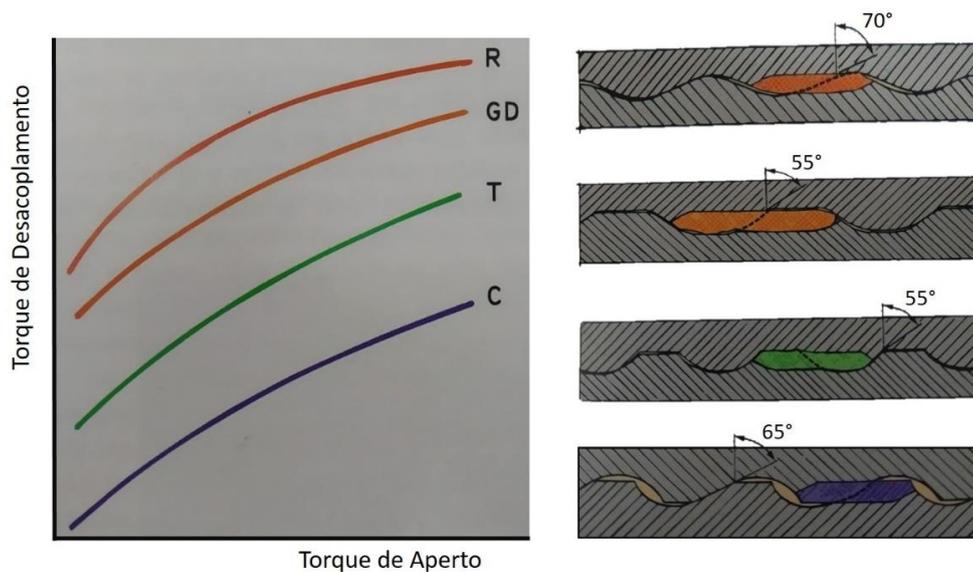


Figura 2-21 - Tipos e perfis das roscas R, T, C e GD. Aptado de López Jimeno et. al, 2017.

Quando se perfuram certo tipo de rochas brandas as roscas podem ter um comprimento duplo, desta forma quando se desgasta o primeiro tramo corta-se e continuam-se os trabalhos com o segundo.

Também existem roscas especiais, como a rosca em espiral a todo comprimento da vara, também apresentam como grande vantagem um maior aproveitamento, porque é possível cortar as zonas degradadas. Contudo tem como inconveniente de não se poder trabalhar com comprimentos padrão.

2.4.2 Encabadouros

Os adaptadores da cabeça do martelo ou espigas são aqueles elementos que se fixam às perfuradoras para transmitir a energia de impacto, a rotação às varas e o empurre. Existem 2 tipos de adaptadores: os Leiner e os estriados.

O primeiro tipo é usado com varas de 25 e 32 mm, enquanto que os adaptadores de estrias são usados com varas de diâmetro de 38, 44 e 50 mm, com martelos de rotação independente e têm entre 4 e 8 estrias. Nos equipamentos mais modernos com uma potência de impacto de, pelo menos, 18 kW os adaptadores desenham-se sem cauda (zona delgada atrás das estrias) reforçando-se assim a superfície de impacto.

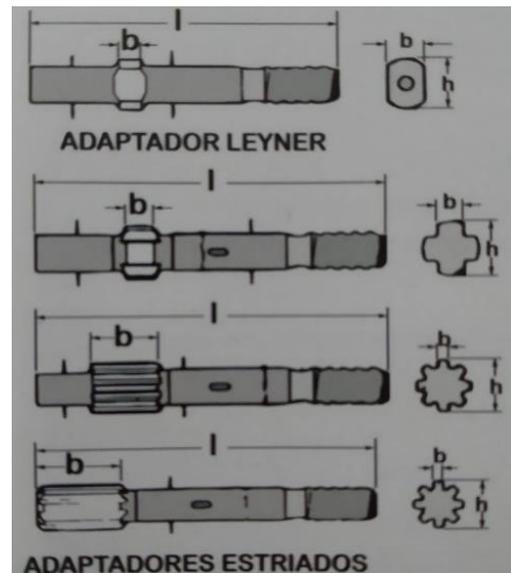


Figura 2-22 -Encabadouros. Aptado de López Jimeno et. al, 2017.

O sistema de limpeza pode ser central, no caso de os adaptadores terem uma junta ou selo interior, que é o elemento que entra em contacto com a agulha de sopro, ou lateral (figura 2-22). O fluido de limpeza entra através de um dispositivo que está ligado concentricamente ao adaptador e posteriormente passa por um orifício existente entre as estrias e a rosca.

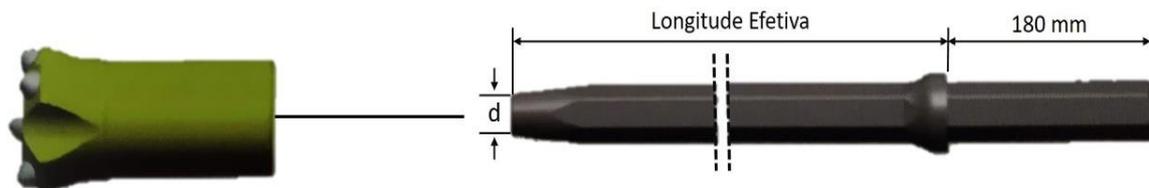


Figura 2-23 - Vara com encabadouro. Aptado de López Jimeno et. al, 2017.

Um outro tipo de desenho, consiste em varas que possuem em um dos extremos um encabadouro. Normalmente, utilizam-se em perfuradoras manuais ou com martelos mais pequenos em diâmetros de 19, 22 e 25 mm com seção transversal hexagonal.

2.4.3 Varas

As varas e os tubos são os elementos de prolongamento da coluna de perfuração.

As varas são as mais utilizadas quando a perfuração é realizada com um martelo à cabeça e podem ser de seção hexagonal ou redonda. As varas têm roscas externas do tipo macho e são acoplados por encabadouros.

As varas de extensão de seção completa hexagonal (A) ou redonda (B) (figura 2 -24), têm a mesma dimensão no centro e na zona das roscas. Nas primeiras o hexágono circunscreve o círculo que corresponde às similares de seção redonda, pelo que, são mais rígidas e também um pouco mais pesadas. Quando as condições de perfuração permitem que a vida das varas só dependa do desgaste das roscas, utilizam-se varas com rosca dupla (C). Assim quando se gasta a primeira parte da rosca, esta é cortada e pode-se continuar a perfuração com a segunda parte.

As varas de extensão ligeiras (D) têm secções transversais, normalmente hexagonais, menores que as de rosca. A designação deste tipo de varas refere-se à dimensão das roscas. Recentemente, começaram a aparecer no mercado as varas de acoplamento integrado (E), que são mais simples de manipular, não precisam de uniões, a transmissão de energia é melhor, os furos são mais retos e a operação é mais segura.

De todos os tipos de varas disponíveis para realizar perfuração em túneis e galerias os que mais se destacam são as varas de extensão ligeira (F) em que um dos extremos tem uma rosca de maior diâmetro que a seção central. A dimensão através da qual se designam refere-se ao tamanho da rosca que está situada no extremo do encabadouro.

As varas integrais roscadas (G) de seção hexagonal têm um bit com inserções em um extremo e uma rosca no extremo oposto. As varas roscadas (H) têm um encabadouro hexagonal em um lado e uma rosca no outro. Existem também varas cónicas com encabadouro (I).

Em último estão representadas as varas integrais com encabadouro que por sua vez se dividem segundo a forma do bit e forma das inserções.

Na primeira tabela que se segue são indicados os diâmetros disponíveis e os comprimentos padrão das varas mais comuns. Na segunda tabela estão discriminados os diâmetros das varas e os comprimentos máximos possíveis para furos com seções diferentes



Figura 2-24 - Tipos de varas. Aptado de López Jimeno et. al, 2017.

Tabela 2-5 - Tipos de varas e respetivos diâmetros e comprimentos. Vara com encabadouro. Fonte: López Jimeno et. al, 2017.

Tipos de vara	Diâmetros disponíveis (mm)	Comprimentos Disponíveis (mm)
Hexagonal, normal	25, 28 32, 38	3050, 3660
Redonda, normal	32, 38, 45, 51	3050, 3660, 6100
Redonda, MF	32, 38, 45, 51	3050, 3660, 6100

Tabela 2-6 - Diâmetro de varas, bits e comprimento máximos de furos recomendados Fonte: López Jimeno et. al, 2017.

Diâmetro da vara (mm) (pol.)		Diâmetro Bits (mm)	Comprimento máximo do furo recomendado (m)
25	1	38/41/45/51	6...8
28	1 1/8	38/41/45/51	8...10
32	1 1/4	48/51/57/64/76	12...15
38	1 1/2	64/70/76/89/102	15...18
45	1 3/4	76/89/102/115	18...22
51	2	89/102/115/127	25...28

2.4.4 Uniões

As uniões servem para unir as varas umas às outras de forma a conseguir-se a longitude desejada com ajuste suficiente para que os extremos estejam em contacto e que a transmissão da energia seja efetuada de forma efetiva.

Os tipos de uniões disponíveis são os seguintes: simples, com semi-ponte, com ponte, com estrias e com barbatanas de grande diâmetro.

As uniões com a parte central fechada evitam o deslizamento desse elemento sobre as varas. Podem usar-se com todas as roscas T e para unir os encabadouros às varas utilizadas na perfuração de túneis ou galerias.

As uniões com estrias utilizam-se com bits retrácteis para a realização de furos em zonas em que o risco de encravamento é elevado. As uniões com barbatanas empregam-se em furos largos de grande diâmetro e servem para centralizar e estabilizar as varas.

Na tabela seguinte são indicados os diâmetros das uniões para varas de diferentes tamanhos.

Tabela 2-7 -Diâmetros adequado das uniões para varas de diferentes tamanhos. Fonte: López Jimeno et. al, 2017.

Diâmetro Bit		Diâmetro Vara		Diâmetro União	
mm	pol.	mm	pol.	mm	pol.
41	1 5/8	25	1	36	1 7/16
45	1 3/4	28	1 1/8	40	1 5/8
51	2	32	1 1/4	44	1 3/4
57	2 1/4	32	1 1/4	44	1 3/4
64	2 1/2	38	1 1/2	55	2 5/32
70	2 3/4	38	1 1/2	55	2 5/32
76	3	45	1 3/4	63	2 31/64
89	3 1/2	51	2	72	2 7/8

2.4.5 Bits

Os bits que se empregam na precursão rotopercussiva são de dois tipos: de pastilhas ou placas e de botões (Figura 2-25).

Ambos os tipos de bits têm algumas características em comum, tais como:

- As varas serem apertadas até ao fundo da rosca do bit com o intuito de que a transmissão da energia de impacto seja transmitida diretamente à rocha;
- As bits dispõem de uma série de orifícios centrais e laterais através dos quais é injetado o fluído de limpeza dos furos e possuem ranhuras através das quais as partículas de rocha produzidas podem ascender;
- Os bits são desenhados com uma pequena conicidade, sendo a parte mais larga a que está em contacto com a rocha, com o fim de contrariar o desgaste a que estão sujeitos e evitar um ajuste excessivo às paredes do furo.

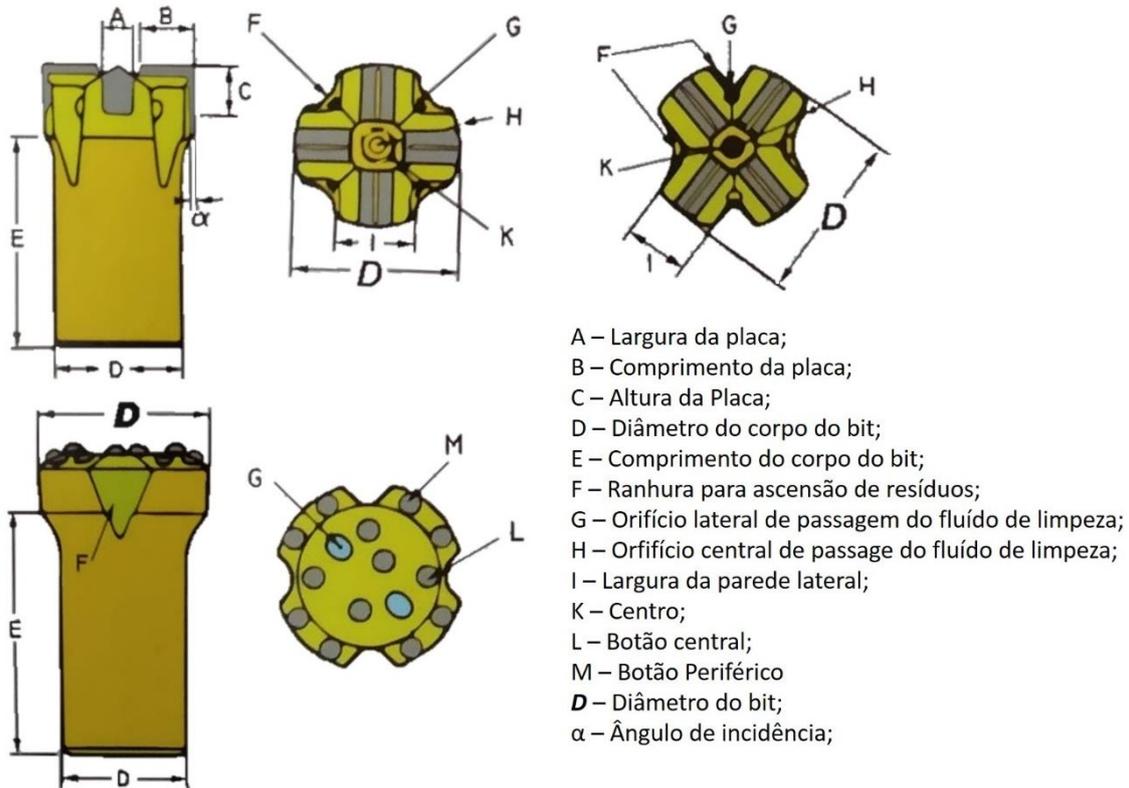


Figura 2-25 - Tipos de Bits e respetivos componentes. Apatado de López Jimeno et. al, 2017.

2.4.5.1 Bits de Botões

Estes bits dispõem de uns botões de carboneto de tungsténio distribuídos sobre a superfície do mesmo. Os diâmetros disponíveis variam entre os 50 mm e os 251 mm.

Este tipo de bit adapta-se melhor à perfuração com rotação, obtendo-se velocidades de avance superiores comparativamente aos bits de pastilhas. Também apresentam uma maior resistência ao desgaste, devido à forma dos botões e à sujeição do aço a contrações ou pressões a frio sobre o contorno dos botões.

2.4.5.2 Bits de Pastilhas

Este tipo de bits pode ser chamado de bit em cruz ou de bit em X, consoante a sua configuração de desenho. Os bits em cruz são contruídos com 4 pastilhas de carboneto de tungsténio dispostas em ângulo reto, enquanto que que em bocas em X as placas formam ângulos de 75° e 105° entre si.

O diâmetro mínimo de fabrico deste tipo de bits é 35mm, sendo habitual os diâmetros dos bits em cruz chegarem até aos 57 mm. Os bits em X usam-se, geralmente, a partir dos 64 mm até aos 127 mm, porque são mais rápidas e evita-se a abertura de furos de grande diâmetro com secções pentagonais.

2.4.5.3 Bits especiais

Existem quatro tipos de bits especiais, os bits retrácteis, os bits de alargamento, os bits com o centro afundado e os bits balísticos. Nesta seção apenas serão descritos os bits balísticos, pelo facto de serem o tipo de bits utilizados na perfuração de produção na Mina da Panasqueira.

Os bits balísticos são munidos de botões em forma de projétil que são mais largos que os modelos padrão e proporcionam maiores velocidades de penetração e uma limpeza mais eficiente. Em rochas brandas a frente do bit não está em contacto direto com a rocha devido à altura dos botões, pelo que a limpeza dos detritos é mais completa. Comparativamente aos modelos padrão de bits com botões, os bits balísticos permitem alcançar velocidades de penetração superiores na ordem dos 25 a 50%, de acordo com o tipo de rocha que se perfure.

O principal inconveniente que este tipo de bits apresenta é o risco de rotura dos botões, sobretudo quando o corpo do bit sofre desgastes mais acentuados que os botões.

Na tabela 2-9 encontram-se indicados os tipos de bits que se recomendam para perfurar dos diferentes tipos de formações rochosas.

Tabela 2-8 - Tipos de bits recomendados de acordo com o tipo de rocha. Fonte: López Jimeno et. al, 2017.

Tipo de Rocha	Bits com Inserções			Bits de Botões		
	Normal	Heavy - Duty	Retráctil	Normal	Heavy - Duty	Retráctil
Branda	R	N	N	R	N	N
Dureza média	A	R	N	R	A	N
Dura	N	A	N	A	R	N
Desgaste lateral intenso	N	R	N	N	A	N
Desgaste frontal intenso	N	A	N	A	R	N
Desgaste Frontal moderado	N	N	N	R	A	N
Fissurada	N	N	R	N	N	R
A - Adequado R - Recomendado N - Não recomendado						

2.4.6 Vida útil dos acessórios de perfuração

A vida útil das varas é influenciada principalmente pela abrasividade da rocha e pelo método de perfuração. Frequentemente, a vida destes acessórios expressa-se em “Metros-Vara”, devido ao facto de o número de metros perfurados com uma vara ser função do comprimento da mesma e da profundidade dos furos.

De um modo geral:

$$Mv = L \cdot \frac{L + Lv}{2Lv}$$

Em que:

MV = Metros-vara; L = Profundidade dos furos; Lv = Comprimento de cada vara

Na tabela seguinte encontram-se discriminados alguns valores de vida útil de acessórios utilizados para perfuração de galerias e túneis.

Tabela 2-9 - Vida útil de acessórios utilizados para perfuração de galerias e túneis. Aptado de López Jimeno et. al, 2017.

Acessório	Tipo de Rocha	
	Abrasiva	Pouco abrasiva
Varas Integrais		
Intervalo de afiação	20 - 25	150
Vida útil	200 - 300	700 - 800
Bits de Pastilhas		
Intervalo de afiação	20 - 25	150
Vida útil	250 - 300	900 - 1 200
Bits de Botões		
Vida útil	250 - 550	1 000 - 1 300
Varas extensíveis		
Vida útil		
Perfuradoras pneumáticas	1 000 - 1 500	
Perfuradoras hidráulicas	1 600 - 1 400	
Varas Integrais Roscadas		
Vida útil	600 - 800	
Uniões		
Vida útil	100 % da vida das varas	
Encabadouros		
Vida útil		
Perfuradoras pneumáticas	1 200 - 1600	
Perfuradoras hidráulicas	2 500 - 3 500	
*os valores são expressos em metros		

A vida útil das varas pode ser determinada através dos seguintes fatores: tipo e tamanho das roscas, número e comprimento das varas necessárias para realizar um furo com uma determinada profundidade, velocidade de penetração, que por sua vez depende do tipo de rocha, diâmetro de perfuração e tipo de martelo.

Quanto à vida útil das uniões considera-se que depende do tipo de rocha, diâmetro de perfuração e tipo de martelo.

2.4.7 Conservação e Manutenção dos Bits

O acondicionamento dos bits tem como objetivo obter uma velocidade ótima de penetração e aumentar a sua vida útil.

Com efeito, se as pastilhas ou os botões e o resto do corpo não têm uma forma adequada não se conseguirá alcançar a maior velocidade de penetração possível e, para além disso, vão ser gerados esforços e tensões tanto no bit como no resto dos acessórios de perfuração podendo ocorrer danos graves ou roturas.

Nos pontos seguintes indica-se como e quando se devem afiar os bits de botões, e as varas integrais

2.4.7.1 Bits de botões

Os bits de perfuração devem ser substituídos quando:

- O corpo do bit se desgasta mais que os botões, fazendo com que estes sobressaiam de forma excessiva. Assim evita-se que os botões se cravem na rocha ou que partam. Esta situação costuma ocorrer de forma frequente em terrenos brandos e abrasivos (figura 2-26 canto superior esquerdo).
- Quando os botões se desgastam mais rapidamente que o corpo, especialmente em rochas duras e abrasivas, os botões devem ser afiados com frequência (figura 2-26 canto superior direito).
- Quando se perfuram rochas pouco abrasivas e os botões são polidos mostrando sinais de fracturação com aspeto de pele de réptil, é sinal de que as fraturas superficiais não se propagam, o que poderia provocar a destruição dos botões.

A afiação dos botões tem como objetivo devolver-lhes a sua forma esférica original, mas sem reduzir demasiado a sua altura. Por norma não é necessário fazer afiações que levem à alteração do diâmetro.



Figura 2-26 - Exemplos de botões e bits desgastados. Fonte: Fonte: López Jimeno et. al, 2017.

Quando os bits estão muito desgastados, por vezes, é necessário afiar o aço em torno dos botões de forma a que estes sobressaíam o suficiente. A altura visível deve ser aproximadamente metade do diâmetro do botão (figura 2-27).

O intervalo entre afiações deve definir-se em função dos diferentes tipos de rocha e condições de perfuração. Por exemplo, se ao final de um determinado número de furos coincida aproximadamente com metade do consumo do diâmetro do botão.

A afiação dos botões realiza-se através de esmeriladoras e deve controlar-se através de moldes de medição.

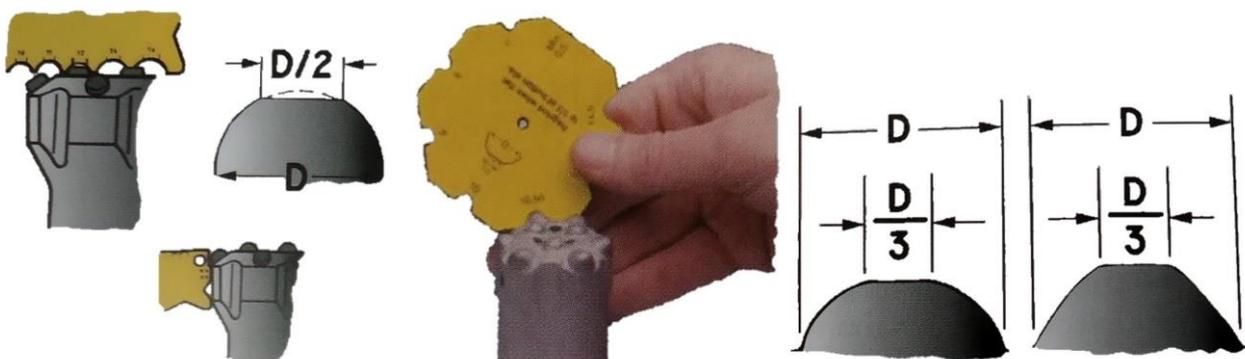


Figura 2-27 -Medição do desgaste dos botões. Fonte: López Jimeno et. al, 2017.

Na figura seguinte é possível consultar quais os tipos de mós utilizadas na afiação, adiamantadas ou tradicionais e os perfis que se conseguem em função do desgaste das mós.

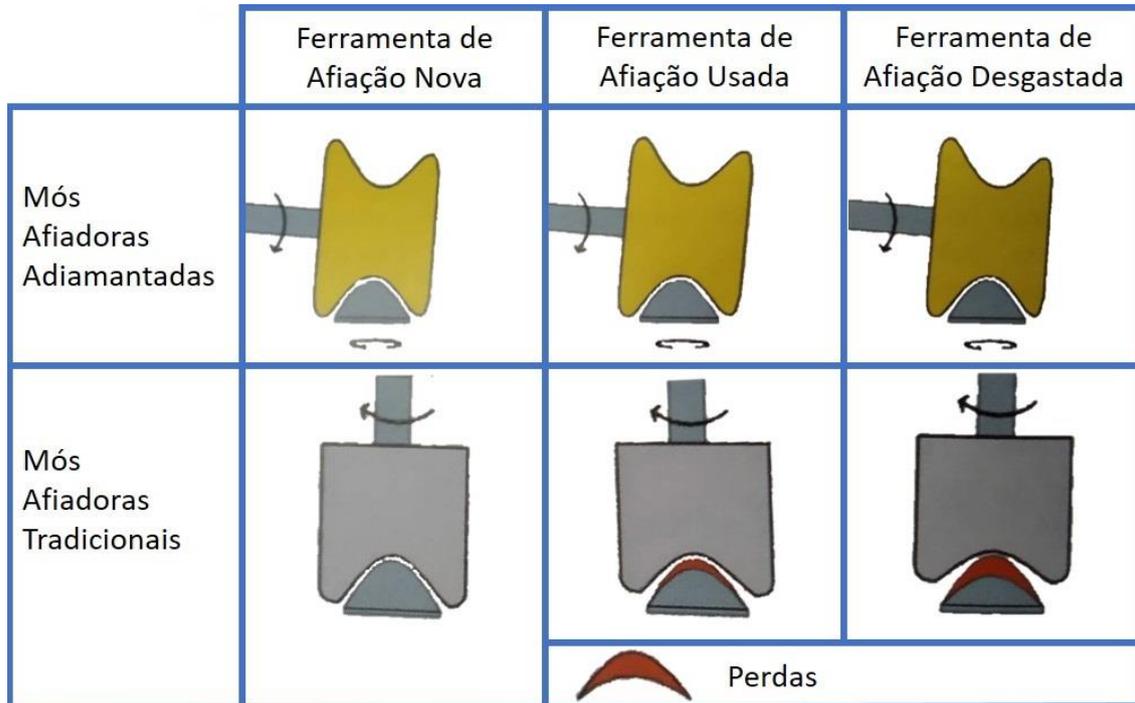


Figura 2-28 - Tipos de mós empregues na afiação dos botões. Fonte: López Jimeno et. al, 2017.

Cada vez que é necessário afiar alguns botões, os restantes também devem ser afiados mesmo que não se tenha alcançado o desgaste limite. Os bits estão em condições de furar sempre que os botões periféricos estejam bem, já que são os mais importantes para o processo. A quando do processo de afiação, deve efetuar-se também a limpeza de dos orifícios de saída do fluido de limpeza e da rosca.

Normalmente, os botões adquirem uma forma achatada devido ao contacto com os minerais abrasivos das rochas que perfuram. Este achatamento dos botões dá origem a uma maior superfície de contacto com a rocha e, conseqüentemente, a uma menor profundidade de penetração e a menos tensões induzidas e, em definitivo, a uma menor velocidade de penetração.

Na figura 2-29 pode-se observar a forma como a velocidade de penetração diminui em função do grau de desgaste dos botões, estando o desgaste expresso como uma fração do diâmetro dos botões. Os botões balísticos desgastam-se mais rapidamente que os botões esféricos, pelo que a redução da velocidade penetração é ainda mais acentuada.

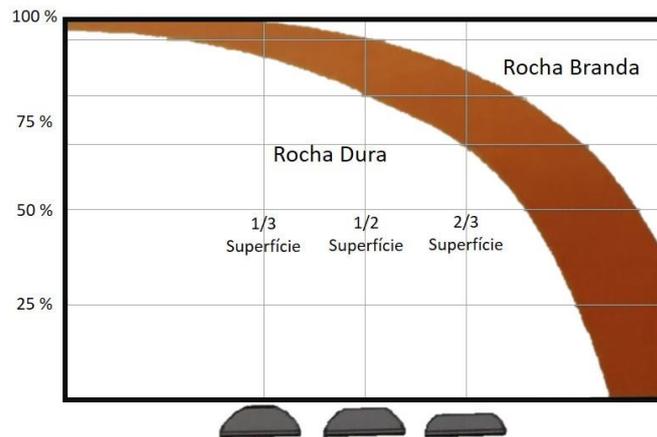


Figura 2-29 - Influência da afiação dos botões. Adaptado de: López Jimeno et. al, 2017.

O número de botões, o seu tamanho, a sua distribuição no bit e o seu perfil são características que influenciam tanto a velocidade de penetração como a vida útil.

2.4.8 Conservação e Manutenção das Varas

As recomendações que devem seguir-se para que as varas de perfuração sejam usadas de forma correta são as seguintes:

- 1 - Inverter os extremos das varas de forma a repartir o desgaste das roscas;
- 2 - Alternar a ordem as varas para que todas efetuem os mesmos metros de perfuração;
- 3 - Proteger as varas contra corrosão e o pó, armazenando-as de forma adequada e manuseando-as com cuidado;
- 4 - Lubrificar as roscas das varas e das uniões cada vez que se utilizem;
- 5 - Apertar bem os acoplamentos durante a operação de forma a que a energia seja transmitida de forma correta para que o aço não aqueça demasiado;
- 6 - Utilizar ferramentas adequadas para desapertar os acoplamentos;
- 7 - Não voltar a utilizar as varas e os manguitos que já apresentem sinais claros de desgaste nas roscas.

2.4.9 Guia para a identificação das causas de rotura dos acessórios de perfuração

Na tabela seguinte encontram-se identificados os diferentes tipos de rotura que podem ocorrer nos diversos acessórios de perfuração.

Tabela 2-10 - Guia para identificação das causas de rotura dos acessórios de perfuração. Fonte: López Jimeno et. al, 2017.

Problema	Causa
1.Vara danificada na superfície exterior. 	Má manipulação das varas (golpes e quedas) ou defeitos superficiais do aço.
2.Corrosão no orifício interno acelerado pelas condições de fátiga. 	Defeito interno do aço, p.e. uma inclusão oxidada
3.Rotura das varas na zona das roscas que entram nas uniões. 	Varas ou uniões com roscas desgastadas e movimento oscilante das varas. Deslocamento das uniões e defeitos de fabrico
4.Bloqueio dos orifícios de passagem do fluido de limpeza e encravamento das varas.	Caudal reduzido do fluido de limpeza e avances excessivos em terrenos fraturados e com presença de barro
5.Uniões com danos nos extremos das roscas. 	Varas mal acopladas. Tratamento deficiente do aço.
6.Uniões quebradas ou fraturadas.	Deslizamento entre o martelo e o centralizador, oscilação excessiva da coluna de perfuração durante a perfuração ou as roscas das varas não são as adequadas
7.Uniões com os extremos queimados ou rebitados. 	Golpeio da união com o centralizador
8.Rotura do encabadouro. 	Desgaste da bucha, avances excessivos, falta de lubrificação ou pistão roto
9.Rotura do encabadouro pelas estrias.	Desgaste da bucha, torque excessivo, falta de lubrificação ou rotura do pistão
10.Rotura do encabadouro pelas roscas.	Varas danificadas ou partidas nos extremos, uniões danificadas ou oscilação da vara durante a perfuração. Defeito de fabrico ou tratamento térmico deficiente do aço.
11.Rotura ou cisalhamento dos botões do bit.	Desgaste da bucha, torque excessivo, falta de lubrificação ou rotura do pistão
12.Perda completa dos botões.	Empurre insuficiente e falta de contacto entre o bit e a rocha
13.Desgaste excessivo dos botões.	Rotação excessiva, roca demasiado abrasiva e avances elevados

3 A Mina da Panasqueira

3.1 Enquadramento Geográfico

O couro Mineiro da Panasqueira localiza-se na zona centro de Portugal na região da Beira Baixa, no flanco sul da Serra da Estrela e a poente da designada “Cova da Beira”. Abrangendo os concelhos da Covilhã e do Fundão.

A atual concessão C-18, de 16 de dezembro de 1992, tem uma área de 19 135 983 m² que engloba várias antigas concessões (Vale da Ermida, Vale do Muro, Panasqueira, Cabeço do Pião e outras). Pertencendo em grande parte às freguesias de S. Francisco de Assis e S. Jorge da Beira (concelho da Covilhã, distrito de Castelo Branco) estendendo-se também à freguesia de Unhais-o-Velho (concelho de Pampilhosa da Serra, distrito de Coimbra) (figura 3-1).

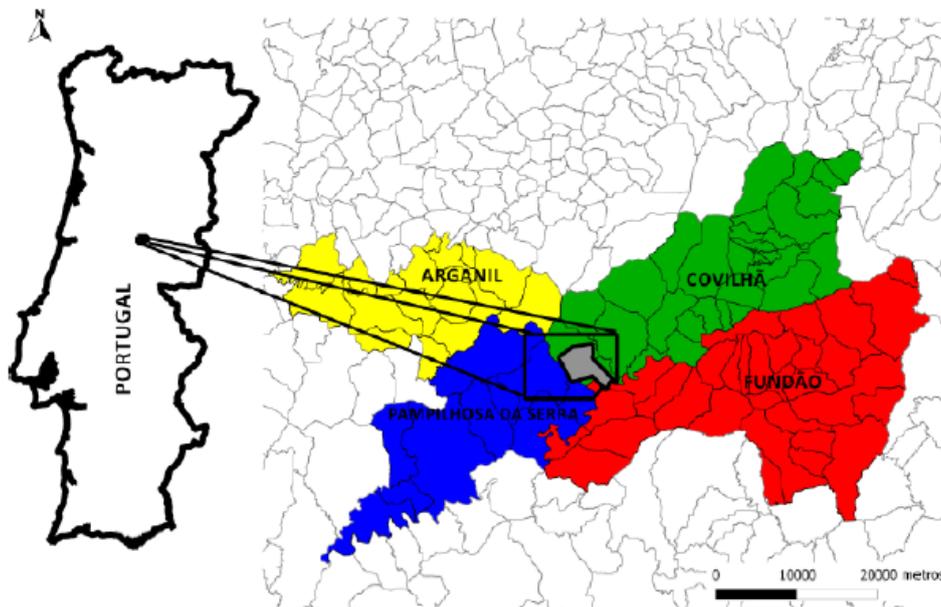


Figura 3-1 - Mapa de Portugal continental com demarcação da área de concessão
(Fonte: Pacheco, 2017)

A entrada da Mina e a sede principal da Beralt Tin & Wolfram (Portugal) S.A., situam-se na povoação da Barroca Grande que pertence à freguesia de São Francisco de Assis. Este complexo mineiro dista cerca de 30 km do Fundão, 55 km da Covilhã, 100 km de Coimbra, 250 km do Porto e 300 km de Lisboa.

As coordenadas aproximadas são: Latitude 54 000, 00 (Hayford-Gauss) ou 40°9' 16" e Longitude 33 000, 00 (Hayford-Gauss) ou 7°44'49".

3.2 Enquadramento Geológico

O Couto Mineiro da Panasqueira enquadra-se geologicamente na grande mancha do Complexo Xisto - Grauváquico do “Grupo das Beiras”, na Zona Centro Ibérica (ZCI), próximo do limite sul do Complexo Granítico Hercínico do maciço da Serra da Estrela. Nesta região predominam as formações sedimentares fortemente metamorfizadas, mas onde se verifica a ocorrência de um grande número de manifestações eruptivas ácidas e básicas (Reis, 1971) (figura 3-2).

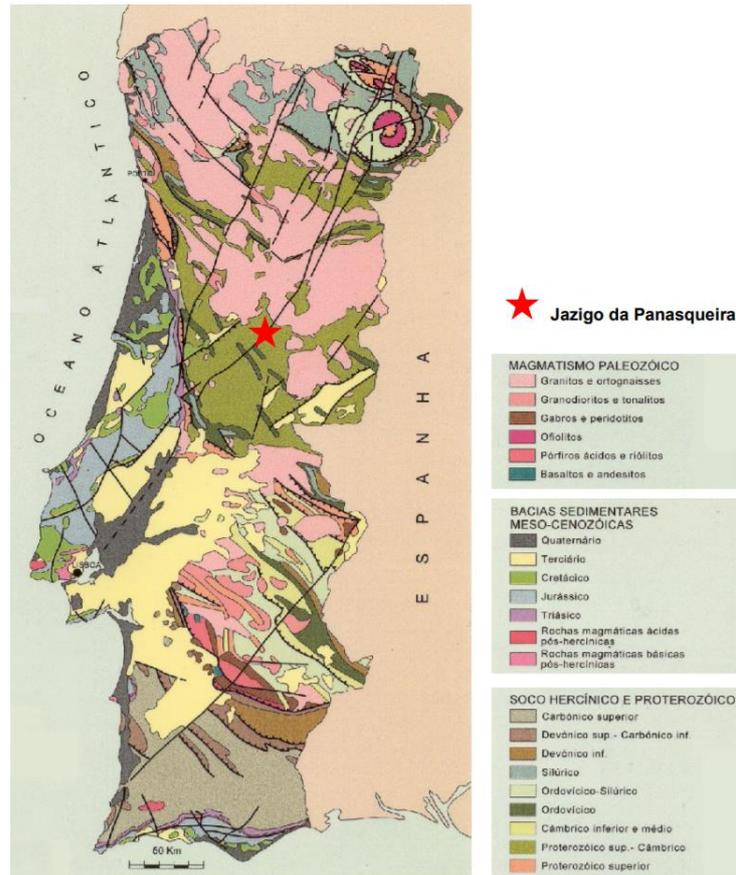


Figura 3-2 - Mapa geológico simplificado de Portugal Continental. Fonte: <http://www.cienciaviva.pt>

Segundo Reis, 1971, a rocha mais abundante na região da Mina e respetiva envolvente é o xisto argilo-gregoso de cor cinzenta, podendo encontrar-se quartzitos xistóides também de cor cinzenta. O pendor e direção geral das camadas xistentas é marcado pelo “xisto listrado”. A xistosidade destas rochas é geralmente vertical e orientada segundo direções mais ou menos definidas. Este facto deve-se ao processo de metamorfismo de contacto e que permite a divisão da região em duas zonas distintas: a zona dos xistos-argilosos mosqueados e a zona dos xistos argilosos (figura 3-3).

CARTA GEOLÓGICA SIMPLIFICADA

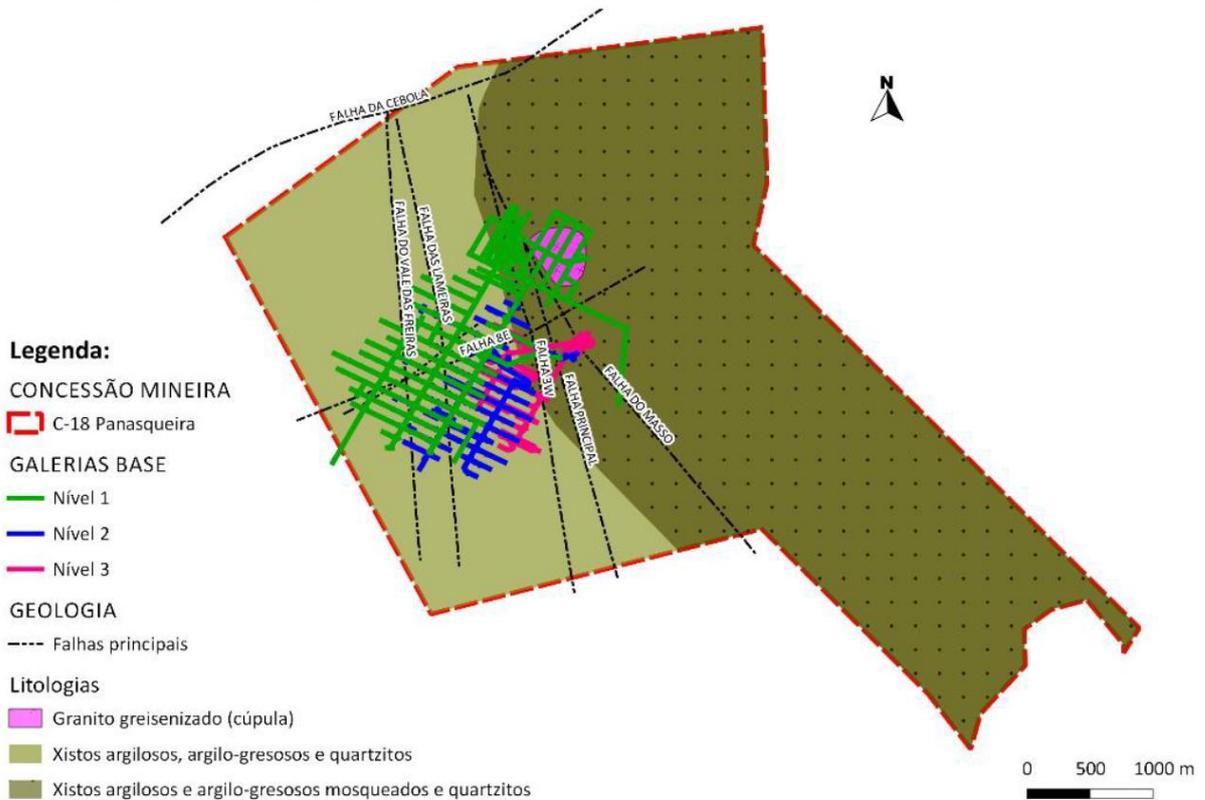


Figura 3-3 - Carta geológica simplificada da área da concessão. (Fonte: Pacheco, 2017)

Tal diferenciação resultou de um fenómeno de metamorfismo de contacto devido à proximidade de cúpulas graníticas subjacentes que, segundo as teorias metalogénicas admitidas, constituem os centros emanantes das soluções mineralizantes.

De uma maneira prática e simplificada pode-se dizer que a exploração da Mina da Panasqueira está concentrada num amplo campo filoniano constituído por uma série de filões de quartzo mineralizados. A maioria dos filões mineralizados são sub-horizontais, verificando-se por vezes a existência de filões sub-verticias também eles mineralizados. Sendo, estes últimos denominados na gíria mineira por filões de galo.

A formação das fraturas sub-horizontais onde se instalaram os filões de quartzo está associada a uma intrusão granítica, que após a sua instalação, criou aberturas verticais no conjunto de diáclases pré-existentes, devido aos processos de arrefecimento e contração (Ribeiro, A. & Pereira, E., 1982).

Segundo Pacheco (2017), a possança (menor distância entre pontos dos encostos do filão) média dos filões é de 15 cm, sendo possível encontrar filões de possança igual a alguns centímetros e outros com possança superior a um metro. Atualmente a possança média dos filões em

exploração é de 25 cm. Horizontalmente os filões podem estender-se por mais de 100 metros. Na figura seguinte é possível observar distintas configurações dos filões.



Figura 3-4 - a) Fotografia de filões pouco possantes b) Fotografia de filão possante. (Fonte: Pacheco, 2017)

Os filões de quartzo mineralizados da Mina da Panasqueira apresentam uma grande variedade de texturas. Contudo, verifica-se uma tendência geral para a deposição da mineralização, desde a periferia até ao centro da estrutura filoniana.

No contato entre os filões e a rocha xistenta encaixante é frequente a existência de uma “salbanda micácea”, constituída por moscovite, turmalina, topázio e cassiterite. Seguindo-se a formação dos cristais de volframite, dispostos perpendicularmente aos contactos do filão. Nas zonas mais centrais dos filões encontram - se os sulfuretos (arsenopirite, calcopirite, pirite, blenda). Os espaços vazios são preenchidos por carbonatos que cristalizam posteriormente.

Uma outra estrutura filoniana possível de encontrar na Mina da Panasqueira, corresponde a filões de quartzo leitoso subverticais, subconcordantes com a xitosidade e com forma lenticular. Estes filões são designados localmente por “seixo bravo”, devido ao facto de não apresentarem qualquer tipo de mineralização. Estas estruturas são muitas vezes intersectadas pelas estruturas filonianas sub-horizontais, o que indica de forma clara a formação posterior dos filões sub-horizontais relativamente aos filões de “seixo bravo” (figura 3-5).

Uma das morfologias típicas destes filões é o “rabo de enguia”. Os “rabos de enguia” formam-se devido a variações da pressão, da qual resulta a precipitação de volframite e cassiterite.



Figura 3-5 - Filões sub-horizontais em “rabo de enguia” (Foto do Autor).



Figura 3-6 - Filão de “seixo bravo” intersectado por um filão horizontal mineralizado (Foto do autor)

A nível estrutural, o Couto Mineiro é caracterizado pela ocorrência de diversas falhas geológicas principais, aflorantes e de escala regional. A caraterização da sua orientação e preenchimento é fundamental, pois as falhas têm impacto nos trabalhos da mina.

Existem dois grandes sistemas principais de falhas (figura 3-7)

- Sistema Norte - Sul;
- Sistema Nascente - Poente;

Ao sistema N - S associa-se, normalmente, um preenchimento argiloso e com maior presença de água em relação ao sistema Nascente - Poente cujo preenchimento é caraterizado por material carbonatado (brechas) (Pinto, 2014).

Estes sistemas têm impacto direto nos trabalhos da mina, visto que, estes têm que ser adaptados de forma eficaz às caraterísticas de cada sistema. No que diz respeito à segurança o sistema Norte - Sul requer uma maior atenção em relação ao sistema Nascente - Poente devido ao seu tipo preenchimento (Pacheco, 2017).

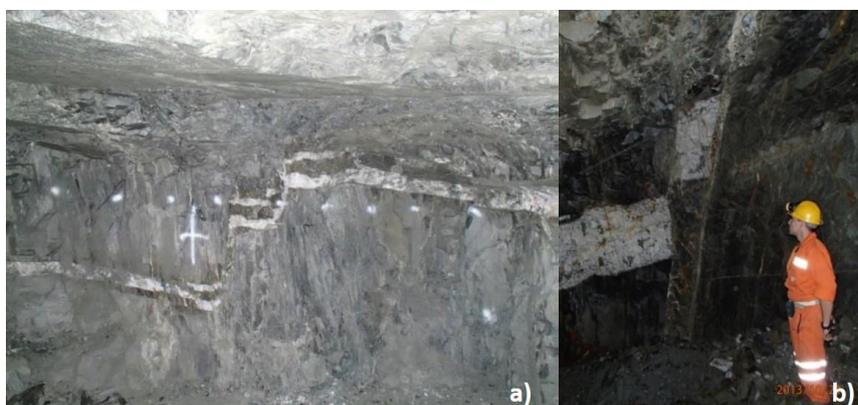


Figura 3-7 - Falhas: **a)** com preenchimento argiloso (Falha das Lameiras, Nivel 1); **b)** com preenchimento carbonatado e brechóide (Falha 8E, Nivel 3), pertencentes ao sistema N-S e NE-SW respetivamente (Fonte: Pinto, 2014).

3.3 Mineralogia

A paragénese mineral deste jazigo é constituída por diversas espécies minerais. Segundo Thadeu (1951), os minerais existentes nos filões da Mina da Panasqueira podem ser classificados da seguinte forma:

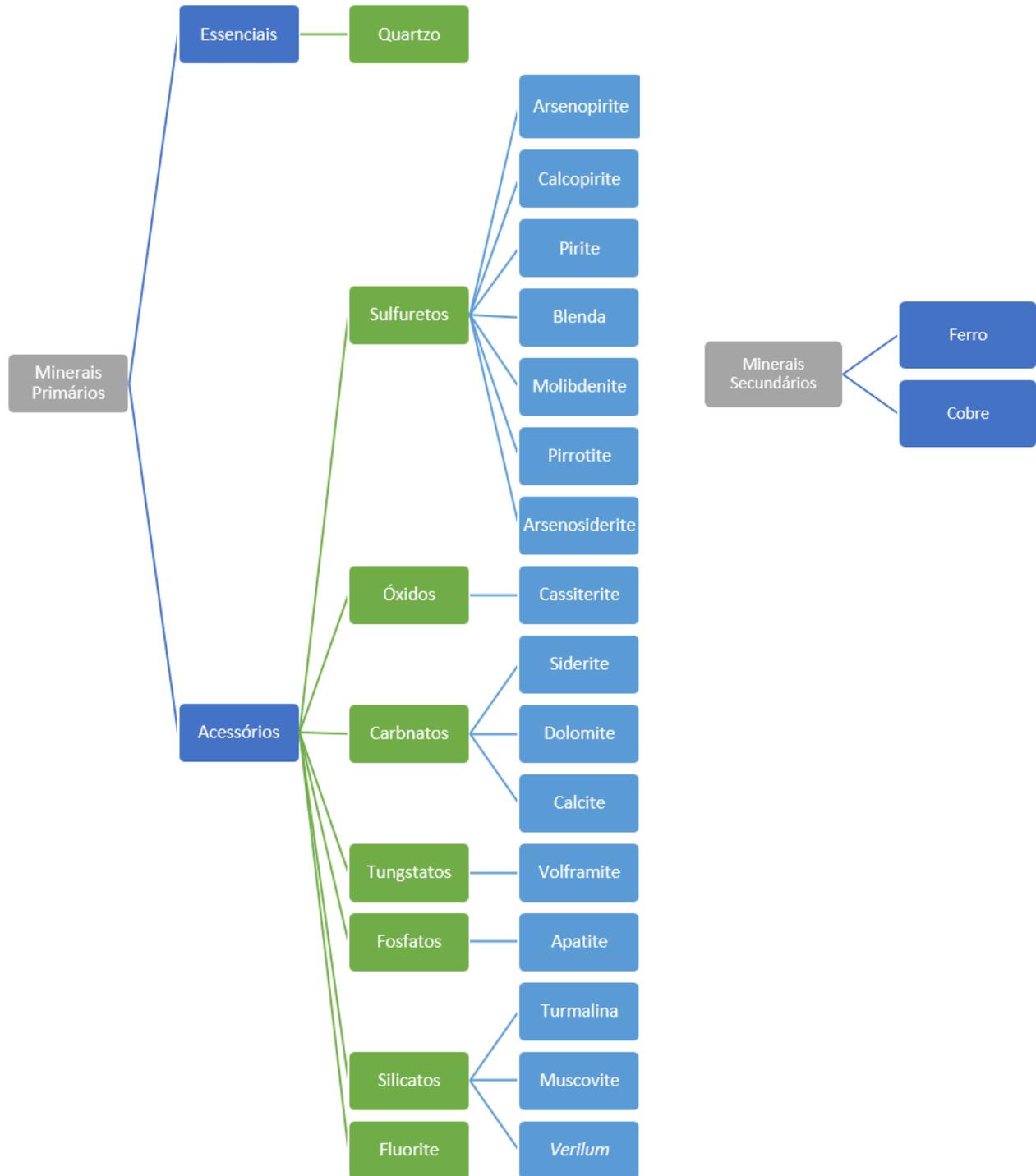


Figura 3-8 - Classificação dos Minerais existentes na Mina da Panasqueira

(Fonte: Thadeu, 1951)

De todos os minerais de volfrâmio conhecidos, apenas a scheelite (CaWO_4) e a volframite ($(\text{Mg,Fe})\text{WO}_4$) têm valor económico. Na Mina da Panasqueira a volframite ocorre sob a forma férrica, denominada por ferberite.

No interior da massa filoniana é frequente o aparecimento de cavidades que frequentemente apresentam cristais de quartzo, cassiterite, volframite, arsenopirite, apatite, siderite e fluorite. Estas cavidades são apelidadas na gíria mineira por “Rotos” (figura 3-9) (Pinto, 2014).



Figura 3-9 - Cavidades nos filões sub-horizontais - “Rotos” (Fonte: Pinto, 2014).

Muitas amostras de associações destes minerais, maioritariamente retiradas de “Rotos”, dada a sua raridade e peculiar beleza, encontram-se incluídas em coleções de museus por todo o Mundo e também fazendo parte de muitas coleções particulares.

3.3.1 Associações Minerais

O estabelecimento de uma sequência de deposição para os minerais dos filões da Mina da Panasqueira não é uma tarefa simples. Contudo, Kelly & Rye (1979) definiram para a mineralogia dos filões da Panasqueira, quatro etapas de deposição:

- 1 - Etapa de formação de óxidos e silicatos (OSS);
- 2 - Etapa de formação dos principais sulfuretos (MSS);
- 3 - Etapa da alteração da pirrotite (PAS);
- 4 - Etapa de formação de carbonatos tardios (LCS);

Na figura 3-10 encontram-se esquematizados as quatro etapas de mineralização principais.

A primeira etapa (OSS) pode ser considerada a mais importante do ponto de vista económico, pois é nesta que se formam a volframite e a cassiterite. Na segunda etapa (MSS) tem lugar a génese dos sulfuretos, principalmente, a calcopirite, a pirite, a esfalerite, estanite e pirrotite.

A terceira etapa (PAS) caracteriza-se principalmente pela alteração da pirrotite, da qual resulta a marcassite e, especialmente, a siderite devido ao ferro libertado ao longo do processo de alteração. Na quarta etapa ocorre a formação dos carbonatos, principalmente calcite e dolomite.

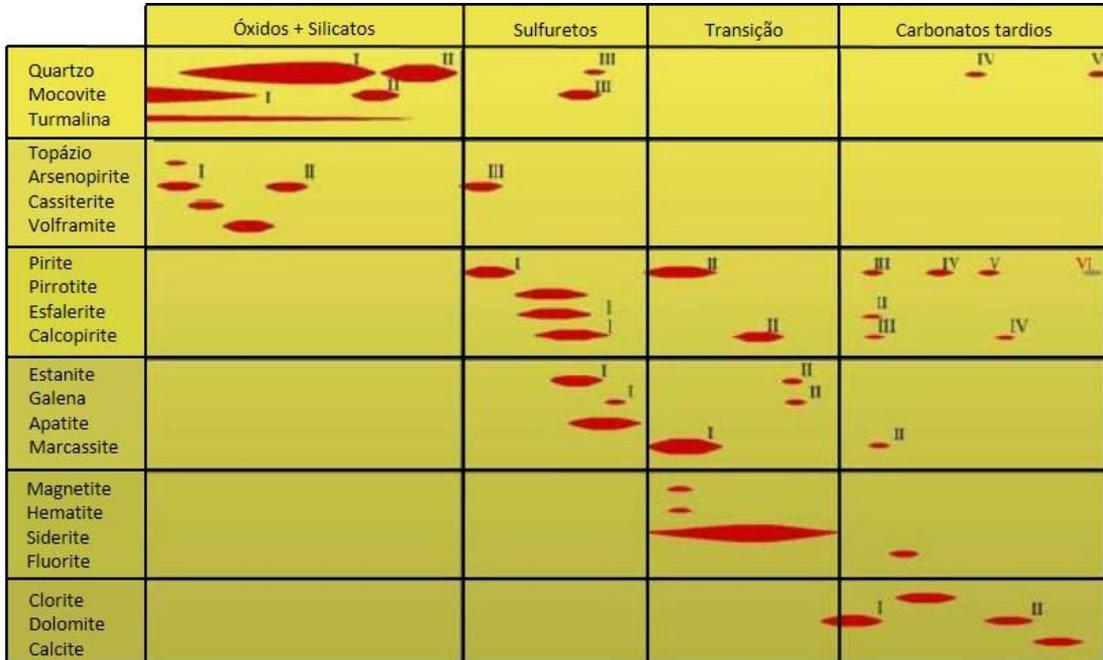


Figura 3-10 - Paragéneses minerais e sequência de deposição (Alterado de Kelly & Rye, 1979).

3.3.2 Minérios produzidos

O produto principal produzido na Mina da Panasqueira é o concentrado de volfrâmio, mas também se obtém como subprodutos concentrados de mineral de cobre e de estanho (cassiterite), em quantidades bastantes inferiores relativamente ao volfrâmio.

Os rejeitados grosseiros provenientes do ciclone do meio denso da secção de desengrosso da instalação de preparação de minérios local, são inertes, de granulometria extensa, não calibrados e constituídos por xisto e quartzo. Uma pequena porção é vendida a empresas de construção ou cedida gratuitamente a entidades autárquicas, para ser aplicado na construção civil e no arranjo de caminhos rurais (Pacheco, 2017).

3.4 Enquadramento Histórico

O início da exploração das Minas da Panasqueira ocorre no final do século XIX coincidindo com a primeira aplicação industrial de volfrâmio.

A portaria de Direitos de Descoberta foi emitida em 1887 para a zona do Cabeço do Pião e em 1888 para a Zona da Panasqueira. O primeiro registo da empresa mineira ocorre em 1896 e em 1898 é atribuída à Sociedade de Minas de Volfram em Portugal - Lisboa a primeira concessão

mineira. Os locais de exploração situavam-se na Panasqueira e Cabeço do Pião e a concessão estendia-se pelo concelho do Fundão e Covilhã.

Posteriormente as operações de exploração expandiram-se para Vale das Freiras, Vale da Ermida e Barroca Grande, posteriormente todas as estas concessões individuais foram agrupadas numa só área mineira, denominada por Couto Mineiro da Panasqueira, com um total de 21 Km².

A história da mina da Panasqueira prolonga-se há mais de 130 anos, pelo que, se apresenta em seguida um resumo dos acontecimentos mais marcantes da história da Mina da Panasqueira (Corrêa de Sá et. al, 1999):

- 1886 Início trabalhos de prospeção;
- 1887 Portaria Direitos de Descoberta zona Cabeço do Pião;
- 1888 Portaria Direitos de Descoberta zona da Panasqueira;
- 1893 Primeiro registo;
- 1896 Primeira concessão, Sociedade de Minas de Volfram Portugal - Lisboa;
- 1904 Construção da Lavaria Mecanizada Cabeço do Pião;
- 1911 Constituição da empresa Wolfram Mining and Smelting Company;
- 1912 Instalação do cabo aéreo até à lavaria do rio com uma extensão de 5100 m;
- 1914 Início da Primeira Guerra Mundial (grande desenvolvimento das operações mineiras);
- 1918 a 1928 A atividade mineira aumentava ou diminuía consoante a o preço do volfrâmio;
- 1927 Reconstrução financeira, formando-se a BTWL;
- 1934 Até ao final da Segunda Guerra Mundial existiu muita procura desta substância mineral, tendo-se alcançado metas máximas de produção e o número de trabalhadores ultrapassou os 10 000 (5790 trabalhadores e 4 780 contratados ao “quilo”);
- 1944 Decreto - Lei do Governo Português obrigou todas as minas de Volfrâmio do país a fecharem;
- 1962 Início da produção de concentrados de cobre;
- 1970 Construção da Lavaria da Barroca Grande;
- 1973 Formação da empresa Beralt Tin & Wolfram (Portugal) S.A. (BTWP);
- 1980 a 1984 Mecanização das operações mineiras e alteração do método de desmonte para câmaras e Pilares;
- 1984 Início dos trabalhos no Nível 2 (L2);

- 1990 Aquisição de 80 % da BTWP por parte da MINORCO;
- 1994 Encerramento da Mina por parte da MINORCO;
- 1994/1995 Aquisição da BTWP por parte da AVOCET;
- 1995 Reabertura da Mina;
- 1996 Início da exploração do Nível 3 (L3);
- 1996/1997 Transferência total da Lavaria do Rio para a Barroca Grande;
- 1998 Entrada em funcionamento do Poço Cláudio dos Reis entre o L2 e L3;
- 2007 Aquisição da totalidade das ações da canadiana Primary Metals Inc. por parte da Japonesa Sojitz Corporation, formamdo a Sojitz Tin & Wolfram (Portugal) S.A.;
- 2016 Aquisição a 100 % dos direitos de exploração por parte do Grupo Almonty Industries Inc.

Após um período menos positivo ao longo do ano de 2015, em que foi preparado o encerramento da mina devido à descida das cotações do minério de volfrâmio, o grupo Almonty adquiriu os direitos de exploração da Mina da Panasqueira. Atualmente, devido à visão e posicionamento estratégico do grupo Almonty no mercado global, os níveis de produção foram recuperados e a lavra mineira mantém-se ativa de forma ininterrupta.

3.5 Estrutura atual da mina

A mina da panasqueira é uma mina em flanco de encosta e o escoamento do minério é em *descendum*, caraterísticas que desde cedo condicionaram o desenvolvimento da estrutura da mina e que facilitam a resolução de problemas de ventilação, circulação de pessoal e escoamento de águas.

Os primeiros trabalhos, como referido anteriormente, eram realizados com o intuito de “seguir” o filão, por esta razão, os pisos principais de trabalho não foram projetados em níveis regulares. As galerias base de acesso à zona central do jazigo eram iniciadas à superfície a partir da cota que permitisse alcançar o jazigo com mínimo de desenvolvimento. Pelo que, as bocas das galerias principais dos diferentes pisos estão localizadas nos vales encaixados da região (Pacheco, 2017).

O Nível 0 situa-se à cota 680 metros, com entrada na Barroca Grande. A entrada do Nível 1 localiza-se na Fonte do Masso e está à cota 620 metros e o Nível L530 (antigo nível 2) tem entrada na zona da Salgueira à cota 530 metros. O Nível 2 e Nível 3 não têm ligação ou entrada ao mesmo nível da superfície e encontram-se à cota 560 metros e 470 metros respetivamente.

A estrutura atual da mina assenta em uma malha ortogonal de galerias, as galerias orientadas Norte - Sul denominam-se por Painéis e distam entre si 50 metros (80 metros no Nível 3), e as

galerias orientadas Poente - Nascente denominam-se por *Drives* e distam entre si 100 metros. A orientação atual da estrutura geral de base é de 30° em relação ao Norte geográfico.

O número de Painéis a que correspondem a galerias abertas é muito reduzido, a maioria dos Painéis são teóricos ou imaginários e a sua enumeração aumenta de Este para Oeste. As *Drives* são abertas a partir da galeria de um Painel e sua numeração aumenta de Norte para Sul em números ímpares (D1, D3 . . . Dn), sobrepondo-se entre os vários níveis. A única *Drive* par aberta é a D2, do nível 1.

A localização das chaminés ou torvas é definida na interseção entre os Painéis e as *Drives* e têm como função principal o escoamento de minério para o nível inferior, mas também promovem a ventilação e a drenagem de águas.

Para que o processo produtivo decorra de forma eficiente e em segurança, são necessárias as denominadas operações auxiliares mineiras, nomeadamente, o fornecimento de energia elétrica, água, ar comprimido e instalação de meios de comunicação. Assim sendo, ao longo de toda a infraestrutura geral de base e nas áreas de produção é necessário criar condições para a instalação das diversas redes essenciais ao funcionamento da mina.

- Rede elétrica: abastecimento geral da mina e dos jumbos de perfuração;
- Rede de água: abastecimento dos jumbos de perfuração e rega das frentes;
- Rede de ar comprimido: carregamento do explosivo;
- Rede de telecomunicações: comunicações via rádio e telefones fixos;

Naturalmente, não fica esquecida a atividade auxiliar de manutenção dos processos de esgoto de água que aflui em permanência ao interior da mina.

Na figura 3-11 pode-se observar a infraestrutura geral de base da mina, com os vários níveis sobrepostos em Planta e na figura 3-12 encontra-se esquematizada toda a operação subterrânea da mina.

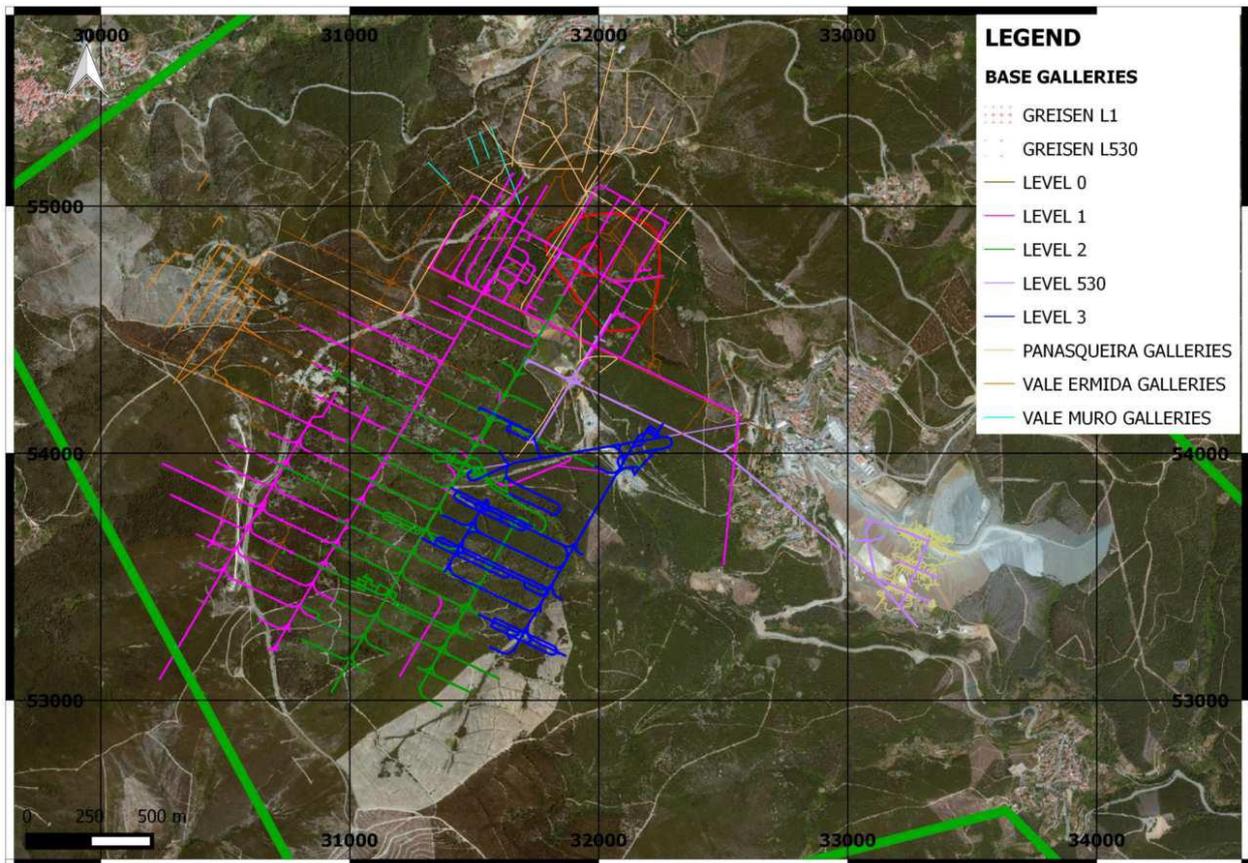


Figura 3-11 - Planta de desenvolvimento da Mina. Fonte: Almonty, 2016.

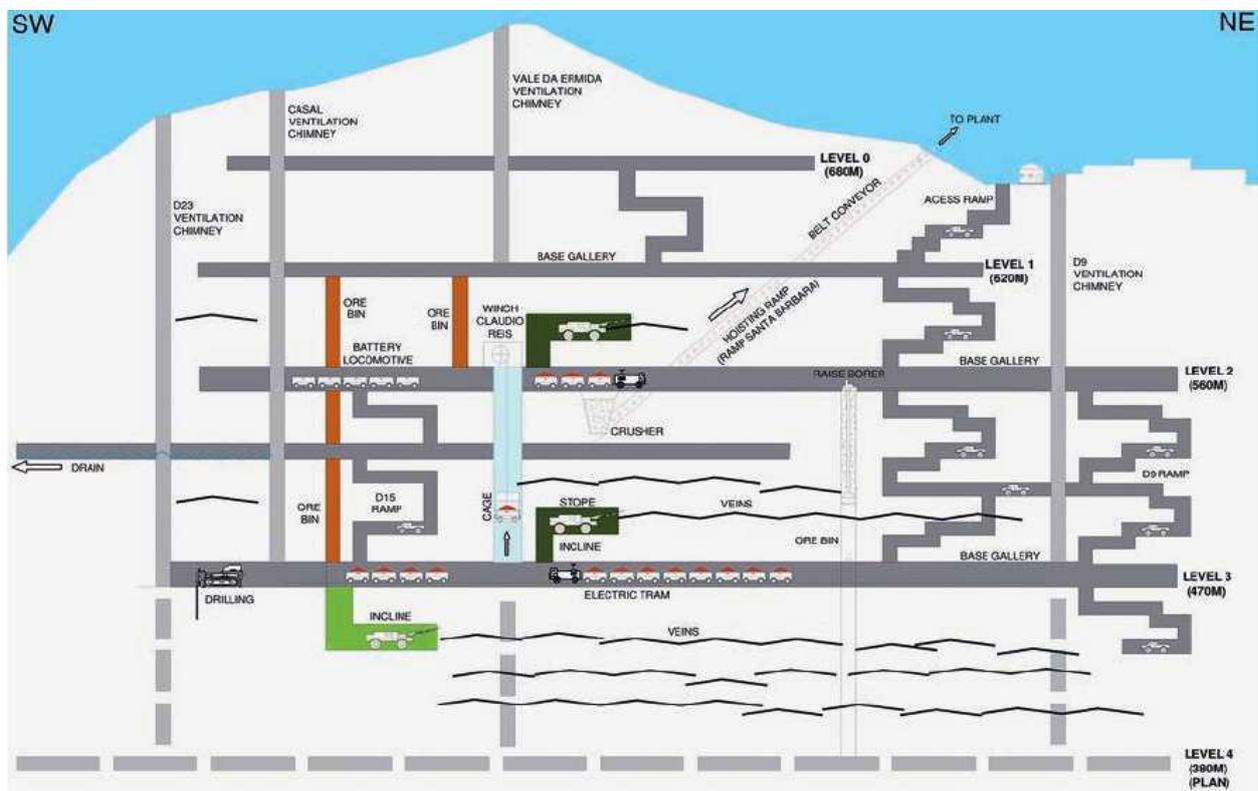


Figura 3-12 - Esquema geral de operações subterrâneas. Fonte: Almonty, 2016.

3.5.1 Áreas de Produção

As áreas de produção são apelidadas na gíria da mina por desmontes.

A primeira fase do processo produtivo é a abertura dos inclinados. A abertura destas galerias tem como objetivo expor o filão ao longo de uma distância considerável, normalmente superior a 100 metros, e sempre que possível definir grandes blocos de 50 x 100 metros ou 80 x 100 metros de forma a coincidirem com Painéis e *Drives*.

Para além da exposição do filão os inclinados também são usados para o desenvolvimento das várias redes essenciais à exploração dos desmontes.

A nomenclatura dos desmontes é feita com base na malha da infraestrutura de base criada e na divisão em seções de 10 metros entre níveis. Assim sendo, cada desmorte é apelidado em função:

- Do Nível (N);
- Da Drive (D);
- Do Pannel ou Torva (R);
- Da posição entre níveis;

A designação da posição entre níveis é efetuada da parte superior para a parte inferior, ou seja, quanto mais perto se localizar o desmorte do nível onde está a ser explorado maior será a sua designação.

Em seguida encontra-se um exemplo de como se deve interpretar a nomenclatura utilizada.

Exemplo - L1-D5-R7-AW15

L1 - significa que o desmorte se localiza entre o Nível 1 e o Nível 0;

D5 - localiza-se na Drive D5;

R7 - indica que foi iniciado com a chaminé do Pannel 7;

AW 15 - A designação AW é aplicada desde o início da lavra a Poente da Falha Principal. O número 1 indica o Nível e o número 5 a seção de 10 metros, neste caso, abaixo do Nível zero. Sendo possível calcular a partir deste dado a cota aproximada do desmorte (Cota Nível 0 - 680 metros; Cota do Desmorte = $680 - 5 \cdot 10 = 630$ metros).

3.5.2 Método de Desmorte

Ao longo dos mais de 130 anos de história foram vários os métodos de exploração aplicados na mina da Panasqueira. Os primeiros trabalhos mineiros eram realizados com base na força humana e o planeamento era praticamente inexistente, pois, os trabalhadores limitavam-se a “seguir” o filão.

Atualmente os desmontes são explorados através do método de Câmaras e Pilares (*Room and pillar*).

Para uma aplicação eficiente e segura deste método é necessário um controlo rigoroso da altura e largura das galerias, de forma a diminuir a diluição e garantir a estabilidade de toda a infraestrutura da mina. Assim a altura das galerias deve ser mínima, mas suficiente para que os equipamentos possam operar em segurança. Segundo o Departamento de Topografia da BTW as galerias têm uma altura média de 2,20 m e uma largura de aproximadamente 4,5 metros, em média cada frente tem uma área aproximada de 9,9 m².

Segundo Pacheco (2017), a diminuição da altura de corte diminui a diluição, facto que leva a um aumento do teor independentemente do valor do teor medido ou estimado do recurso a ser explorado. Os custos de produção da mina e da lavaria também diminuem, porque os custos unitários por kg de concentrado também diminuem.

Após os trabalhos de sondagem e identificação dos filões, são abertas as galerias de prospeção, apelidadas por “inclinados” na gíria mineira. Estas galerias são abertas sobre o filão com o intuito de avaliar e estimar o teor existente. Se o valor do teor for superior ao do teor de corte é tomada a decisão de se avançar para a fase de desmonte.

No caso da Mina da Panasqueira a aplicação do método de câmaras e pilares desenvolve-se ao longo das seguintes fases (figura 3-13):

1ª Fase -Conceção dos Pilares 11 x 11 metros

Ao longo do inclinado e de acordo com a malha da mina são marcadas pela equipa de topógrafos da mina os pontos onde serão abertas as novas galerias, aproximadamente com 5 metros de largura cada e distanciadas entre si 11 metros. Com o desenvolver da lavra são definidos os pilares 11 X 11 metros.

2ª Fase - Conceção dos Pilares 11 x 3 metros

Esta fase consiste na divisão ao meio dos pilares 11 x 11 metros, o que resulta em dois pilares 11 x 3 metros. De forma a garantir a estabilidade geotécnica do desmonte a divisão dos pilares é efetuada desde a bordadura do desmonte até à entrada.

3ª Fase - Conceção dos Pilares 3 x 3 metros

Após a abertura de todos os pilares 11 x 3 metros procede-se à sua divisão, da qual resultam os pilares finais 3 x 3 metros. Esta divisão também é efetuada desde a bordadura do desmonte até à entrada.

4ª Fase - Limpeza finos Ao longo dos trabalhos de exploração há uma percentagem de volframite que se acumula nos pisos das galerias, pelo que, é realizada uma recuperação desses finos com mini - giratórias com controlo remoto, ver figura 3-14.

Em algumas áreas da mina porque questões de segurança é necessário deixar os pilares 11 x 11 metros intactos de forma a proteger as infraestruturas base da mina, como painéis, drives, torvas, chaminés e rampas de acesso.

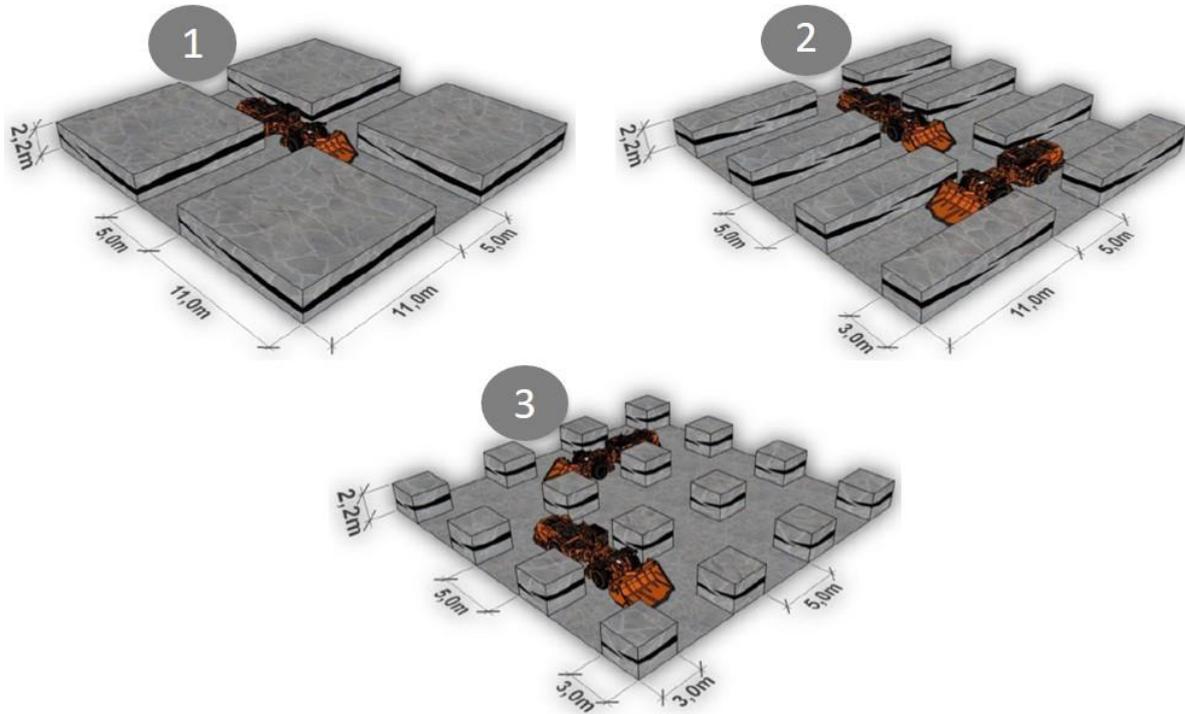


Figura 3-13 - Fases do Método de exploração de Câmaras e Pilares. Adaptado de Almonty, 2016.



Figura 3-14 - Mini - giratória para recuperação de finos. Fonte: Almonty, 2016.

3.6 Produção

A mina produz diariamente cerca de 3 000 toneladas de ROM (*run-of.-mine* ou minério tal-qual) com um teor médio de 1,35 kg de concentrado de WO₃ por tonelada de ROM. A produção diária de concentrado é de cerca de 4 toneladas, ou seja, para um mês de 21 dias de trabalho a produção mensal é de aproximadamente 84 toneladas, o que perfaz uma produção anual de concentrados entre as 900 e as 1 000 toneladas.

As toneladas de ROM são medidas e reportadas pela lavaria, na parte jusante do processo produtivo. Apesar de existir alguma folga ou volante de material dentro da mina ou nas principais torvas de alimentação da lavaria, o ROM está relacionado de forma direta com o número de pegas de fogo para desmorte realizadas em frentes com filão. O cálculo de alguns indicadores de gestão da mina, tais como, toneladas por homem por turno, custos parciais por tonelada, tonelada por pega de fogo, tonelada por homem por mês, custo total por tonelada, têm por base as toneladas de ROM (Pacheco, 2017).

No gráfico da imagem 3-15 é possível observar a produção anual de concentrados entre o ano de 1948 e 2016.

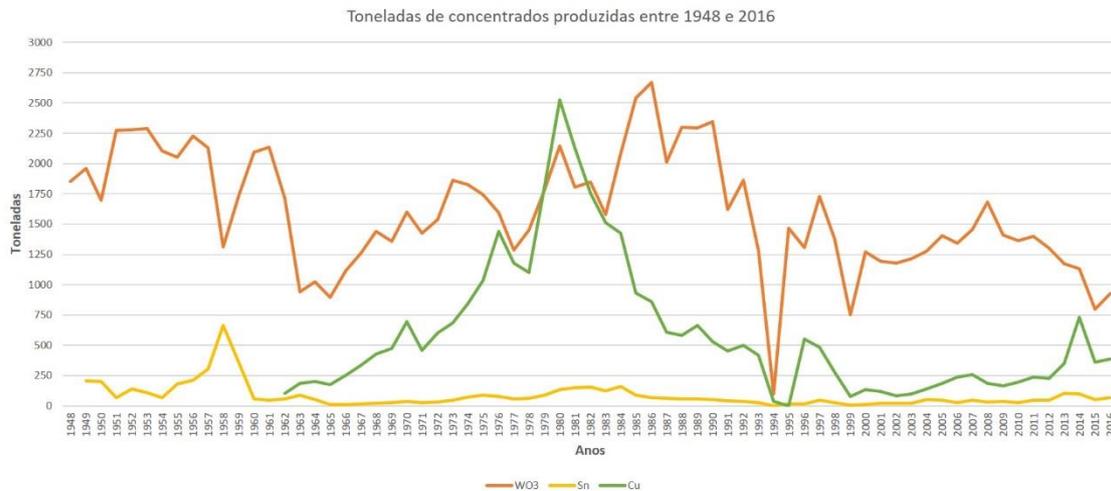


Figura 3-15 - Produções anuais de concentrados, de 1947 a 2016. Fonte: Almonty, 2016

Como é possível observar no gráfico anterior o concentrado de volfrâmio sempre foi o produto principal. A produção de concentrados de cassiterite sofreu um ligeiro aumento entre 1955 e 1960, período que coincidiu com o final da guerra das coreias e durante o qual a cotação do volfrâmio baixou significativamente. A produção de concentrados do mineral de cobre teve início no princípio da década de 60, registando-se o maior pico de produção deste concentrado no início da década de 80, tendo mesmo ultrapassado a produção de concentrados de volfrâmio.

Segundo a DGE, a Panasqueira é a única mina em Portugal que produz concentrados de volfrâmio desde 1986.

No ranking mundial de países produtores de volfrâmio, Portugal ocupa, segundo, o relatório *World Mining Data* (Reichl *et al*, 2017) para o ano de 2016 a 9ª posição.

3.7 Reservas

A BTW realiza trabalhos de sondagem e reconhecimento de forma contínua. Os Recursos Inferidos e Indicados são definidos através da interseção dos filões pelos furos de sondagens, e com recurso à fórmula da D9 é feita uma estimativa dos teores. Os recursos Medidos são definidos com base na denominada fórmula das Pintas. Esta fórmula tem por base medições diárias das áreas dos cristais de volframite nos filões expostos, e é aplicada em todas as áreas desmontadas sendo possível obter os teores em Kg/m² e em %WO₃ de cada frente desmontada e dos inclinados em desenvolvimento.

A aplicação da fórmula das Pintas, da fórmula da D9 e os métodos aplicados para estimar os recursos e reservas da Mina da Panasqueira são explanados de forma exaustiva por Filipe Pinto no artigo intitulado “*Mineral Resource and Reserve Evaluation in Panasqueira Mine, Portugal*” publicado na *Coring Magazine* a 22 de maio de 2017.

A reconciliação de recursos é realizada pelo Departamento de Geologia da BTW semestralmente e os resultados são reportados anualmente à DGEG tendo como referência a reconciliação de janeiro de cada ano, para teores de corte superiores a 10 Kg/m² = 0,12 WO₃.

No *Technical Report* publicado pela Almonty a 31 de dezembro de 2016 encontram-se discriminadas as Reservas Provadas e Prováveis da Mina da Panasqueira a 30 de setembro de 2016. O resumo destas reservas é apresentado na tabela seguinte.

Tabela 3-1 Tabela Resumo das Reservas Provadas e Prováveis da Mina da Panasqueira a 30 de setembro de 2016

Fonte: Almonty, 2016.

Nível	Reservas Provadas		Reservas Prováveis		Reservas Totais	
	Toneladas (Kt)	%WO ₃	Toneladas (Kt)	%WO ₃	Toneladas (Kt)	%WO ₃
0	25	0,19	26	0,17	51	0,18
1	238	0,22	468	0,18	706	0,20
2	216	0,21	251	0,19	468	0,20
3	297	0,24	431	0,19	727	0,21
Total	775	0,22	1176	0,19	1951	0,20

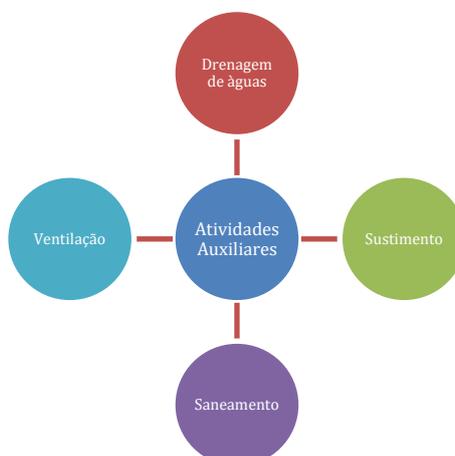
A diluição na tonelagem de ROM e a recuperação de 84% associada ao método de desmonte da mina já são tidos em conta em todos os valores de recursos e reservas estimados e declarados.

4 Ciclo de Atividades da Mina da Panasqueira

Os ciclos de atividades de lavra de minas subterrâneas compreendem várias atividades elementares. Ao longo dos mais de dois meses de observação da atividade de perfuração, foi também possível acompanhar, ainda de que forma menos exaustiva, as restantes atividades essenciais à lavra da mina. O seguinte diagrama pretende exemplificar o ciclo de atividades de desmante que encontramos na Mina da Panasqueira.



As atividades elementares de produção são suportadas por diversas atividades auxiliares. Pelo que, ao longo deste capítulo, para além de uma caraterização das atividades elementares do ciclo de produção é realizada uma breve descrição das atividades auxiliares ao ciclo de produção da Mina da Panasqueira. Tais atividades encontram-se identificadas no esquema seguinte.



4.1 Marcação do diagrama de fogo

O ciclo de atividades produtivas de desmonte inicia-se com a marcação do diagrama de fogo. Esta atividade pode ser dividida em duas atividades complementares:

- Marcação do eixo da frente
- Marcação do diagrama de fogo.

A marcação do diagrama de fogo só é realizada de forma eficiente caso o eixo da frente esteja corretamente assinalado. Ambas as atividades são realizadas pelos encarregados de desmonte e de forma consecutiva.

4.1.1 Marcação do eixo da frente

A marcação do eixo da frente é realizada com recurso a uma técnica empírica e bastante expedita, sendo a sua validade comprovada pelos vários anos de aplicação e demonstrando-se eficiente na interseção das galerias.

Esta técnica tem como base o uso dos pontos marcados no teto das galerias, pela equipa de topografia da mina, e que indicam o seu eixo. Os pontos são assinalados com *spray* e por um arame de comprimento variado (ver figura 4-1).



Figura 4-1 - Pontos de identificação do eixo de uma galeria. Fonte: O autor.

Num primeiro momento são esticados os arames de dois pontos que se encontrem no mesmo seguimento e que estejam alinhados perpendicularmente à frente a marcar. De forma a estabilizar os arames são atadas, na sua extremidade livre, pedras ou o martelo do encarregado (ver figura 4-2). Em seguida o encarregado alinha-se com os dois arames, voltado para a frente, e com recurso à lanterna do capacete identifica o local aproximado para marcação do eixo.



Figura 4-2 - Estabilização do arame com recurso a um martelo. Fonte: o Autor

4.1.2 Marcação do Diagrama de Fogo

Após a marcação do eixo da frente, procede-se à marcação do diagrama. O diagrama empregue nas frentes de produção é o chamado *fan-cut* ou pega em leque.

Como referido anteriormente, as frentes são verticais, pelo que não existe uma zona livre para o arranque da rocha. Assim, o diagrama tem que ser dimensionado de forma a que seja possível criar a zona de caldeira.

A caldeira é o espaço criado pelo arranque do primeiro bloco de material e a partir do qual se desenvolve toda a pega, criando-se assim uma frente livre. É necessário, um dimensionamento correto da pega e utilizar um consumo específico de explosivo em maior concentração.

A marcação dos diagramas tem como ponto de referência a interseção, com a frente de desmonte, do eixo anteriormente marcado. Os encarregados recorrerem a uma fita métrica e lata de spray para procederem à marcação desse ponto.

4.1.2.1 Diagrama de Fogo

Nos diversos diagramas de fogo aplicados nas áreas de produção da Mina a localização da zona da caldeira pode ser localizada num dos lados da frente, sendo o resto da perfuração realizada consoante a localização da caldeira definida.

O diagrama é constituído em norma por 3 fiadas de furos, duas fiadas centrais com 10 furos cada, separadas entre si 60 centímetros e uma para abertura de seção suficiente para movimentação de equipamentos. Esta fiada é constituída por 6 furos e pode-se localizar por cima (“Coronas”) ou por baixo (“soleiras”) das outras duas fiadas (figura 4-3).

O diâmetro dos furos é de 43 mm.

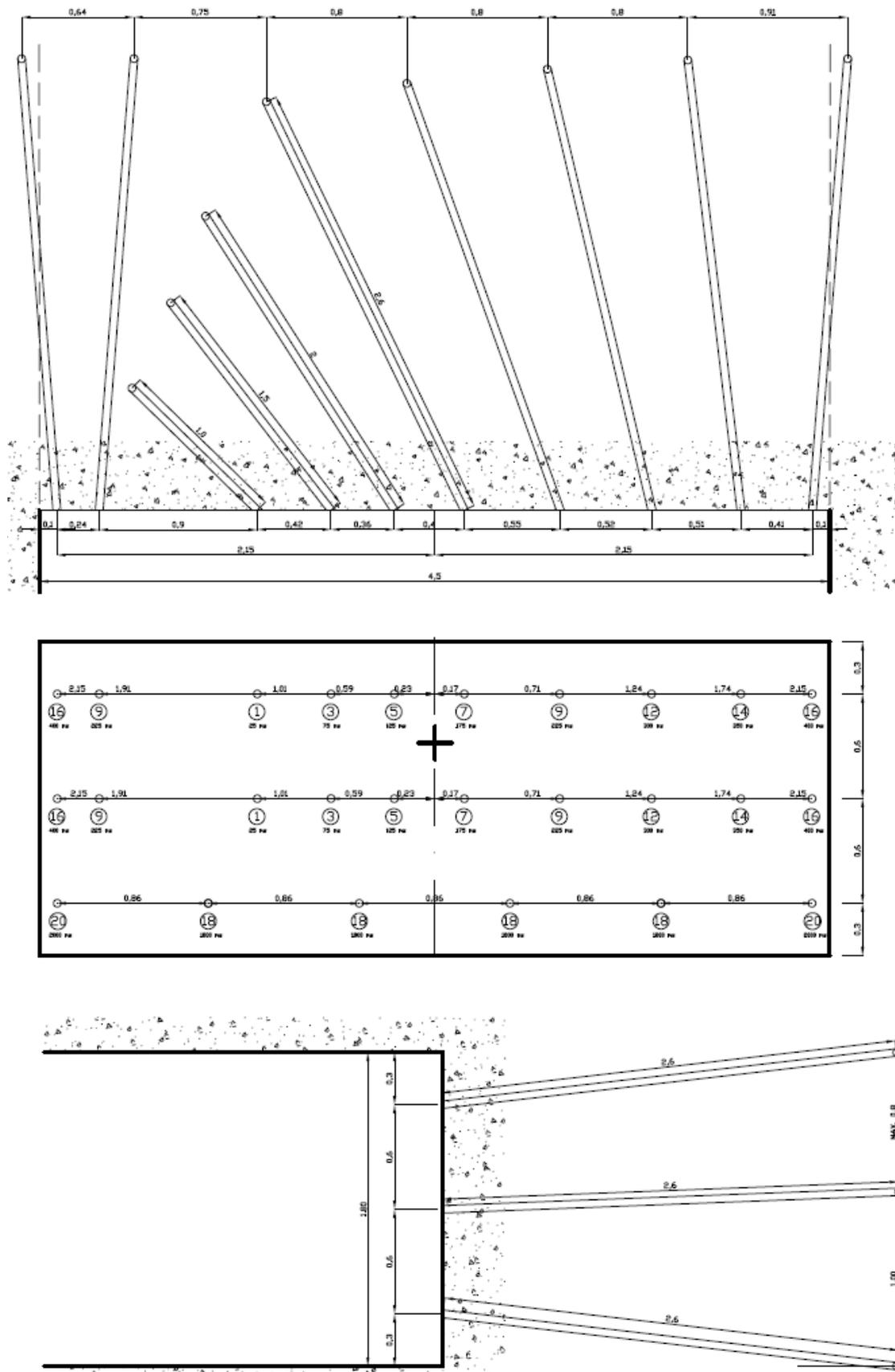


Figura 4-3 - Diagrama de fogo (fan-cut). Fonte: BTW.

4.2 Perfuração

A atividade de perfuração é realizada por jumbos de *low-profile*, em frentes verticais.

Na mina existem atualmente oito jumbos dedicados à produção, cinco da marca Atlas Copco, um da marca Sandvik e dois da marca Mine Master O número de jumbos a operar em cada turno varia consoante a produção necessária para satisfazer as solicitações da instalação de preparação de minérios. Trabalhando em média 5 a 7 jumbos por turno.

Tendo sido a perfuração a atividade estudada e acompanhada ao longo da realização desta dissertação, no Capítulo 5 será realizada uma descrição mais aprofundada da mesma, dos equipamentos usados e a divisão da mesma em atividades elementares.

4.3 Carregamento e Detonação

Efetuada a atividade perfuração inicia-se a atividade de carregamento e detonação. O turno das equipas de carregadores de fogo inicia-se às 17 horas. As primeiras frentes a serem carregadas são as perfuradas pelo turno primeiro turno (7:00h - 15:00h) e por fim as frentes perfuradas pelo segundo turno (15:00 h - 23:00H). De forma a otimizar o carregamento das frentes, os detonadores necessários para as várias frentes são agrupados, previamente, pelos respetivos tempos de retardo e em molhos por pegas.

A detonação das pegas de fogo ou conjunto de pegas de fogo inicia-se a partir das 23:00h, momento em que só estão no interior da mina as equipas de carregadores.

Na figura 4-4 é possível observar, no diagrama de fogo, a distribuição dos tempos de retardo dos detonadores.

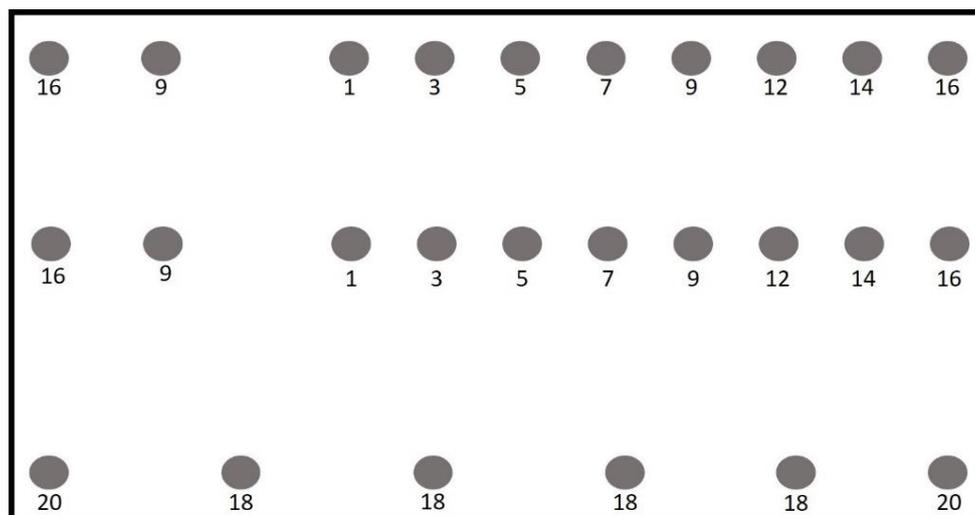


Figura 4-4 - Distribuição no diagrama de fogo dos tempos dos detonadores.

4.3.1 Detonadores e Explosivos empregues

Os detonadores empregues são do tipo não elétrico, diferenciando-se entre si pelos tipos de tempo de retardo que comportam. Os tempos de retardo são da ordem dos milissegundos (do 1 ao 16) ou do tipo retardo longo (18 e 20), ver figura 4-5.

Nos furos extras são empregues detonadores não elétricos do tipo de retardo longo com o tempo de retardo de 3000 milissegundos (Pacheco, 2017). Os tipos de detonadores usados, o tempo de retardo e respetivas quantidades podem ser consultados na tabela 4-1.



Figura 4-5 - Detonadores não-elétricos. Do lado esquerdo detonador com Retardo Millissegundo e do lado direito Retardo Longo. Fonte: Catálogos Maxam.

Tabela 4-1 - Tempo de retardo de detonadores não elétricos (Fonte: Catálogos Maxam).

Tempo retardo (valores nominais)		
Retardo	Tempo (ms)	Quantidades
1	25	2
3	75	2
5	125	2
7	175	2
9	225	4
12	300	2
14	350	2
16	400	4
18	1800	4
20	2000	2
30	3000	

Relativamente aos explosivos utilizados, para a carga de fundo, na mina da Panasqueira recorre-se à dinamite gelatinosa, sendo a carga de coluna constituída por ANFO ou Hidrogel, consoante a quantidade de água presente nos furos (figura 4-6).



Figura 4-6 - Explosivos aplicados nas pegas de fogo. Fonte: Catálogos Maxam.

O carregamento do ANFO é realizado com recurso a um equipamento, designado por Portanol, que funciona com ar comprimido. É um equipamento portátil e de simples utilização. É constituído por um balde 50 litros que tem uma capacidade aproximada de 40 kg de ANFO.

Para proceder à iniciação da pega de fogo, os detonadores não elétricos são agrupados e ligados a um cordão detonante que tem como iniciador um detonador elétrico.

As equipas de carregadores apenas saem da mina após todos a detonação de todas as pegas (1:00 h), estando reservado um período de 6 horas (entre a 1:00h e as 7:00h) para ventilação e dissipação dos gases nocivos provenientes das detonações das pegas de fogo.

4.4 Saneamento, Limpeza, Remoção e Transporte de material das frentes

Após a detonação das frentes e correta ventilação da mina, procede-se ao saneamento de blocos instáveis, remoção e transporte do material que resultou dos rebentamentos realizados. Esta atividade é realizada em dois turnos de oito horas, o primeiro turno das 7 horas às 15 horas e o segundo turno das 15 horas às 23 horas.

Esta atividade pode ser decomposta nas seguintes atividades:

Saneamento e limpeza;

Remoção e Transporte do material;

A primeira atividade a ser executada é a de saneamento do teto, frentes e hasteais, fazendo cair blocos que se encontram em posição de instabilidade clara, seguida da denominada limpeza que consiste na rega do material desmontado, tetos e hasteais.

Após a limpeza da frente é executada a atividade de remoção e transporte do material. Para tal, recorre-se a pás carregadoras (ver figura 4-7), também denominadas por *LHD's* (*Load Haul and Dump*) de *low profile*. Estas removem o material das frentes e transportam o mesmo até às torvas (chaminés) de escoamento do minério. A empresa tem uma frota de 10 *LHD's* afetas à produção. Em norma, por turno, são usados 8 destes equipamentos.



Figura 4-7 - Pá carregadora (LHD) Wagner ST7 LP. Fonte: Pacheco, 2017.

4.5 Extração

Como referido no subcapítulo anterior, o material é transportado e descarregado pelas *LHD's* nas torvas ou chaminés. Material esse que é recolhido em um dos 2 níveis de extração da mina, ou seja, no Nível 2 ou no Nível 3.

A recolha é feita por composições de comboios de vagões tracionados por locomotivas (figura 4-8) que circulam ao longo das galerias dos níveis de extração. O virador¹, que alimenta a torva principal de minério, que por sua vez alimenta o britador primário, localiza-se no Nível 2 (figura 4-8). Paralela à torva principal de minério existe uma torva para o material estéril.

O material recolhido nas trovas do Nível 3 é transportado até ao poço vertical de extração de dupla simples, que eleva o material até ao Nível 2. Por ciclo é elevado um vagão cheio e descido um vazio. No nível 2, os vagões são transportados por locomotivas até ao virador anteriormente referido, para o material ser descarregado. Os vagões vazios regressam novamente ao poço para serem transportados para o Nível 3.

¹ Sistema mecânico que faz com que os vagões carregados despejem o material para as trovas.

Após ser britado, o material é transportado até à superfície por uma tela transportadora instalada na rampa de Santa Bárbara e pré - armazenado nas 4 torvas de alimentação da lavaria.



Figura 4-8 - Composição de vagões e respetiva locomotiva (à esquerda) e vagões a descarregarem material para a torva principal de minério (à direita). Foto: Tiago Ferreira.

4.6 Atividades Auxiliares

4.6.1 Sustimento

Em norma o sustimento é uma das atividades auxiliares de maior relevância e importância ao longo de qualquer ciclo de produção. A execução desta atividade garante a segurança dos trabalhadores e a estabilidade das infraestruturas da mina.

No caso da Mina da Panasqueira devido à boa competência da rocha encaixante do jazigo e ao método de exploração adotado, são raras as situações em que é necessário aplicar qualquer tipo de sustimento. As zonas mais críticas, em que por vezes é necessário aplicar sustimento, são as zonas de falha, particularmente na família de falhas de direção Norte-Sul, e certas zonas em que o maciço apresenta instabilidade (Pacheco, 2017).

O tipo de sustimento aplicado consiste no emprego de quadros de vigas metálicas soldadas com preenchimento de betão.

4.6.2 Saneamento

Como referido anteriormente, as zonas em que é aplicado qualquer tipo de sustimento são muito reduzidas, contudo devido aos planos de xistosidade da rocha encaixante, é frequente alguns blocos de pequena dimensão apresentarem sinais de instabilidade. Após a identificação dos blocos instáveis é necessário proceder à sua remoção.

Devido à extensão da mina e à frequência com que este tipo de blocos é identificado, todos os trabalhadores da mina recebem formação para procederem ao saneamento dos tetos e hasteais de forma correta. Quando um trabalhador identifica um ou vários blocos instáveis é sua obrigação proceder à remoção do mesmo, com recurso a uma “ponteirola” (figura 4-9).



Figura 4-9 - Atividade de Saneamento. Fonte: O Autor

As “ponteirolas” são ferramentas móveis de comprimento variável, equipadas em uma das extremidades com um ponteiro e na outra com uma peça metálica em forma de pé-de-cabra. Quanto maior for a altura da galeria maior deve ser o comprimento da “ponteirola” a utilizar de forma a que o trabalhador não se encontre na trajetória de queda do bloco.

De forma a garantir um acesso fácil e rápido às “ponteirolas”, as mesmas estão distribuídas por todos os equipamentos e pelos locais de refeições existentes na mina.

4.6.3 Ventilação

O processo de ventilação da Mina da Panasqueira reveste-se de especial complexidade e dificuldade, devido aos milhares de metros de galerias abertas ao longo dos mais de 100 anos de história de exploração da mina. Para além desta questão, ainda é necessário ter em consideração os trabalhos antigos realizados à superfície e que por sua vez têm conexão com trabalhos subterrâneos mais antigos.

Segundo Pacheco (2017), em 2011 foi efetuada uma revisão a todo o circuito primário de ventilação tendo sido instalados dois ventiladores para extração de 200 kW cada. A instalação foi efetuada em duas galerias recuperadas na zona Norte-Poente da mina de cota mais elevada, conhecida como Vale da Ermida, facto que auxilia o efeito de chaminé. A este feito associa-se a subpressão criada que força a entrada de ar fresco pelas restantes chaminés com conexão à superfície na zona sul da mina e pela galeria de drenagem (L530).

Nas áreas de produção (desmontes) e inclinados onde existam galerias de fundo de saco, a ventilação é realizado com recurso a ventiladores auxiliares secundários de menor dimensão.

4.6.4 Drenagem de águas

O sistema de drenagem de águas da mina assenta num pequeno conjunto de galerias à cota de 530 metros, sendo que toda a água é concentrada na galeria do Nível de 530. A água abaixo da cota 530 é recolhida pela estação de bombagem existente no Nível 3 e que encaminha água para a galeria do Nível 530.

Toda a água é assim drenada, por gravidade, pela galeria do Nível 530 até à estação de Tratamento de Águas (ETAM) com capacidade de 500 m³/h. Após os processos de tratamento a água volta a ser bombeada para os tanques de alimentação da mina e da lavaria (Pacheco, 2017).

5 Perfuração de Produção - Mina da Panasqueira

Neste capítulo é realizada uma caracterização detalhada da atividade de perfuração para produção da Mina da Panasqueira, bem como da metodologia aplicada para a recolha dos dados e para a divisão em atividades elementares do ciclo de perfuração. Os primeiros subcapítulos, onde é feita a caracterização da atividade perfuração, têm como objetivo familiarizar o leitor com as práticas levadas a cabo de forma a facilitar a interpretação da metodologia aplicada e os resultados obtidos. Além disso, são apresentados os resultados obtidos no decorrer da realização desta dissertação.

Durante os mais de 130 anos de história da Mina da Panasqueira, foram vários os métodos e equipamentos empregues nos trabalhos de perfuração, pelo que a seleção dos equipamentos que hoje em dia realizam estes trabalhos assenta nos vários anos de experiência da equipa técnica, testes e processos de otimização realizados até à data.

A atividade de perfuração para produção na Mina da Panasqueira é desempenhada por oito jumbos de baixo perfil (*low profile*) e decorre ao longo de dois turnos de oito horas (7h - 15h e 15h - 23h). Como referido no capítulo anterior, o número de jumbos a operar por turno varia consoante as necessidades impostas pela instalação de preparação de minérios. Operando em média por turno 5 a 6 jumbos.

A distribuição dos jumbos pela mina varia consoante as áreas de produção ativas. Durante o tempo em que foram acompanhados os trabalhos, o número de jumbos por área de produção variou entre um e dois. Estes equipamentos também são utilizados para a abertura de inclinados.

5.1 Equipamentos de perfuração (jumbos)

Para a realização dos trabalhos de perfuração de produção a empresa tem à sua disposição oito jumbos de *low profile* equipados com um braço de perfuração. Sendo cinco da marca Atlas Copco, atual Epiroc, um da marca Sandvik e dois da marca Mine Master. De forma a agilizar a identificação dos equipamentos e o tratamento dos dados de cada equipamento, a empresa numera cada um de forma crescente de acordo com a data de aquisição.

De forma a agilizar a recolha, a organização dos dados e a escrita desta dissertação, decidiu-se adotar a nomenclatura numérica aplicada pela empresa. Assim, quando por exemplo, for referido o Jumbo N°5, deverá entender-se que o Jumbo em questão é o Atlas Copco Boomer S1L, neste caso o mais recente de todos os jumbos Atlas.

A marca, o modelo, a data de aquisição e respetivo número de identificação podem ser consultados na tabela 5-1.

Tabela 5-1 - Marcas, e modelos dos jumbos existentes na Mina da Panasqueira.

Marca	Modelo	Data de aquisição	Nº Identificação
Epiroc	Boomer S1 L	2004	1
Epiroc	Boomer S1 L	2004	2
Epiroc	Boomer S1 L	2005	3
Epiroc	Boomer S1 L	2006	4
Epiroc	Boomer S1 L	2008	5
Sandvik	Dd210l	2009	6
Mine Master	Face Master 1.4	2010	7
Mine Master	Face Master 1.4	2011	8

5.1.1 Especificações técnicas dos jumbos

5.1.1.1 Meio de locomoção

Ao longo da história da Mina da Panasqueira já foram abertos mais de 3 000 km de galerias. Com a evolução e crescimento da infraestrutura base da mina, motivada pelo avanço dos trabalhos em profundidade e em planta, são cada vez maiores as distâncias que os equipamentos necessitam de percorrer. Estas vão desde as frentes de trabalho até às oficinas existentes no interior ou no exterior da mina e, por vezes, entre as frentes de trabalho. Tendo em conta este fator e os meios de locomoção referidos no Capítulo 2, o meio de locomoção que mais se adequa à estrutura da mina e à forma como os trabalhos estão organizados é a locomoção sobre pneus. Todos os jumbos são autopropulsados.

Quanto às velocidades de deslocamento estas variam de marca para marca, na tabela seguinte é possível consultar as velocidades de deslocamento de cada uma delas.

Tabela 5-2 - Velocidades de deslocamento dos jumbos Fonte: Catálogos das marcas

Marca	Vel. em terreno plano	Vel. em terreno inclinado
Epiroc	>15 Km/h	>5,5 km/h (Inc. 12,5 %)
Sandvik	12 km/h	5 km/h (Inc. 13%)
Mine Master	10 km/h	-

Todos os equipamentos têm tração às 4 rodas, contudo o sistema de tração dos jumbos Epiroc é alimentado por um motor enquanto que os sistemas de tração do jumbo da Sandvik e da Mine Master são alimentados por 4 motores, um para cada roda.

5.1.1.2 Chassis

Todos os jumbos são articulados, o que aliado ao tipo de braço que estes equipamentos têm instalados, permite-lhes realizar atividades de perfuração transversais à galeria onde se encontram. A possibilidade de se poderem fazer estes trabalhos com os jumbos é um fator de peso na hora de se proceder à seleção deste tipo de equipamentos. Tal facto verifica-se, uma vez que tendo conta a malha ortogonal criada pelo método de desmorte aplicado na mina, cada vez que se inicia ou corta um pilar a perfuração a realizar é transversal em relação à galeria onde o jumbo se posiciona.

Nas figuras seguintes encontram-se discriminadas as medias de cada um dos jumbos.

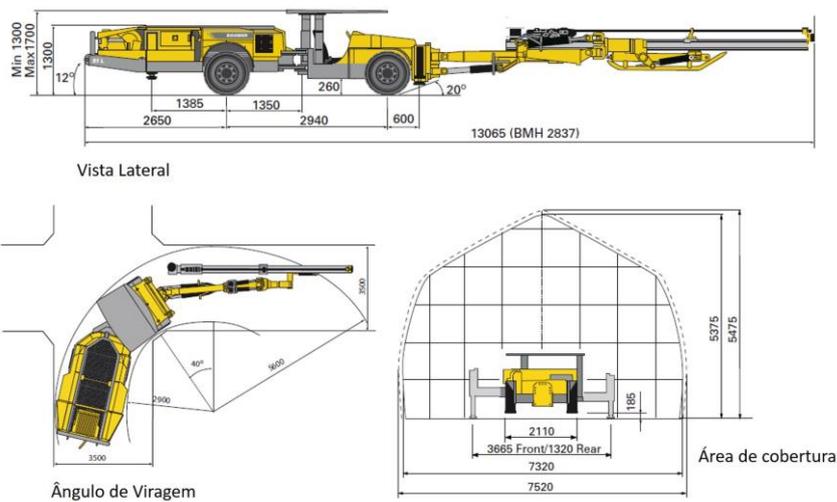


Figura 5-2 - Dimensões dos jumbos da marca Epiroc. Fonte: Catálogo Epiroc.

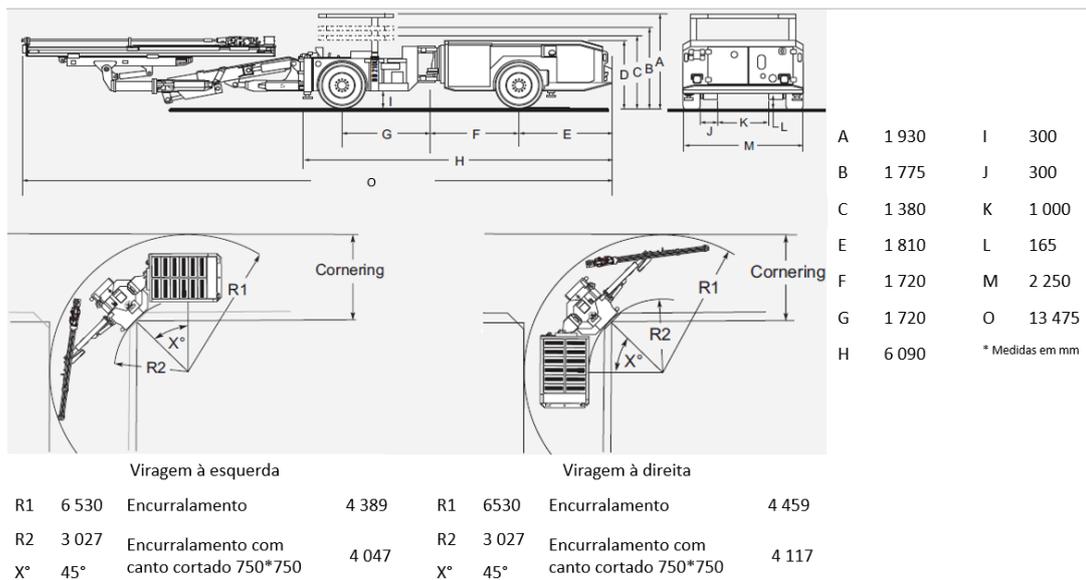


Figura 5-1 - Dimensões do jumbo da marca Sandvik. Fonte: Catálogo Sandvik.

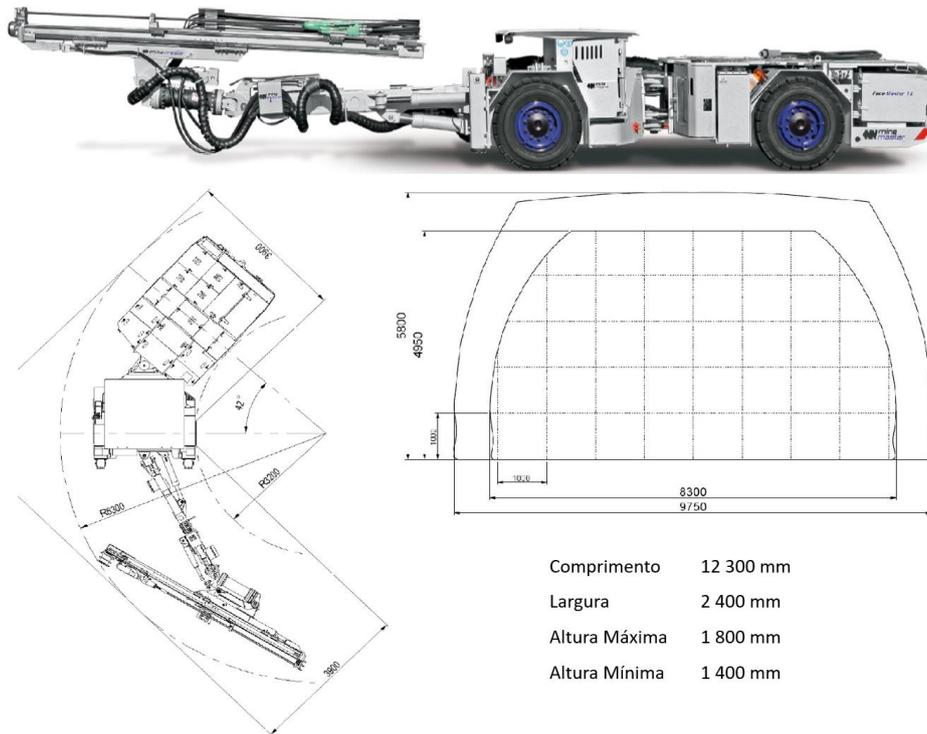


Figura 5-3 - Dimensões do jumbo da marca Mine Master. Fonte: Catálogo Mine Master.

5.1.1.3 Acionamento e componentes auxiliares

As fontes de energia destes jumbos são um motor a diesel e um motor elétrico. O motor a diesel aciona o sistema de locomoção e o motor elétrico o sistema de perfuração.

Relativamente aos componentes auxiliares importa referir que todos os jumbos possuem um enrolador para a mangueira da água e outro para o cabo elétrico. O enrolador do cabo elétrico por norma tem um sistema automático de enrolamento.

Todos os jumbos estão equipados com um sistema automático que retira a vara e o bit do furo quando o martelo chega ao final do seu percurso. Na figura 5-4 é possível observar com detalhe o sistema em questão.



O botão (1) quando pressionado pela peça (2) aciona o sistema automático de retirada da vara e do bit.

Figura 5-4 - Sistema de retirada da coluna de perfuração. Fonte: O Autor.

5.1.1.4 Cabine do operador

As cabines dos operadores são abertas e possuem os sistemas de segurança FOPS e ROPS. Na cabine encontram-se todos os comandos necessários para proceder aos trabalhos de perfuração e à deslocação do jumbo, bem como os amostradores das pressões hidráulicas (rotação e impacto), da pressão da água, da pressão do martelo.

Na figura seguinte é possível ver a zona de comandos situada dentro da cabine do operador de um jumbo da Epiroc.



Figura 5-5 - Cabine de um jumbo da Epiroc. Fonte: O Autor

O modo de funcionamento dos comandos para a movimentação do braço dos jumbos da Epiroc e da Mine Master é muito semelhante, sendo possível realizar 8 movimentos distintos com cada *joystick*. Os comandos do jumbo da Sandvik não são *joysticks*, mas sim alavancas como as que se podem observar na figura 5-6. Cada avalanche permite fazer até 4 movimentos distintos.



Figura 5-6 - Comandos para controlo do braço de perfuração do jumbo da Sandvik. Fonte: O Autor

5.1.1.5 Braços de perfuração

Os jumbos da Epiroc estão equipados com um braço ótico que roda 360° o que lhe permite cobrir toda a frente. Têm suspensão dupla de tripé o que permite a realização de furos paralelos de forma precisa em todas as direções (figura 5-7).



Figura 5-7 - Braço de um dos jumbos da Epiroc. Fonte: O Autor.

Os braços dos jumbos da Sandvik e da Mine Master têm um design distinto dos braços dos jumbos da Epiroc. Ambos os braços são óticos e conseguem rodar 360° o que lhes permite cobrir toda a frente. A grande diferença comparativamente aos braços dos jumbos da Epiroc é o *layout* em forma de V, tal como demonstrado nas figuras 5-8 e 5-9.



Figura 5-8 - Braço do jumbo da Sandvik. Fonte: Catálogo Sandvik.



Figura 5-9 - Braço do jumbo da Mine Master. Fonte: Catálogo Mine Master.

5.1.1.6 Martelos

Os jumbos da marca Epiroc estão equipados com martelos hidráulicos, cujo modelo é o COP 1838. Na tabela seguinte é possível consultar as principais especificações dos martelos com que estes jumbos estão equipados (figura 5-10)

Tabela 5-3 - Especificações técnicas dos martelos dos jumbos da Epiroc. Fonte: Catálogo da Epiroc.

Modelo	COP 1838	Sistema de rotação	Independente
Alimentação	Motor elétrico	Velocidade de rotação	0 - 340 rpm
Poder de impacto	18 kW	Torque máximo de rotação	640 - 1 000 Nm
Frequência de impacto	60 Hz	Consumo de água	40 - 120 l/m
Diâmetro furo	38 - 89 mm	Peso	170 kg
Pressão hidráulica	230 bar	Ruído	< 160dB(A)



Figura 5-10 - Martelo Hidráulico Epiroc Modelo COP 1838. Fonte: Epiroc

O jumbo da marca Mine Master está equipado com um martelo hidráulico da marca Montabert. As especificações técnicas destes martelos podem ser consultadas na tabela seguinte.

Tabela 5-4 - Especificações técnicas do martelo do jumbo da Mine Master. Fonte: Montabert

Modelo	HC95 LM	Sistema de rotação	Independente
Alimentação	Motor elétrico	Velocidade de rotação	296 rpm
Poder de impacto	21 kW	Torque máximo de rotação	750 Nm
Frequência de impacto	62 Hz	Consumo de água	60 - 120 l/m
Diâmetro furo	45 - 89 mm	Peso	185 kg
Pressão hidráulica	170 - 200 bar	Ruído	-



Figura 5-11 - Martelo Hidráulico Montabert Modelo HC95 LM. Fonte: Montabert

As especificações técnicas do martelo com que está equipado o jumbo da Sandvik podem ser consultadas na tabela seguinte.

Tabela 5-5 - Especificações técnicas do martelo do jumbo da Sandvik. Fonte: Sandvik.

Modelo	HLX5	Sistema de rotação	Independente
Alimentação	Motor elétrico	Velocidade de rotação	250 rpm
Poder de impacto	20 kW	Torque máximo de rotação	400 Nm
Frequência de impacto	67 Hz	Consumo de água	60 - 120 l/m
Diâmetro furo	43 - 64 mm	Peso	210 kg
Pressão hidráulica	220 bar	Ruído	-

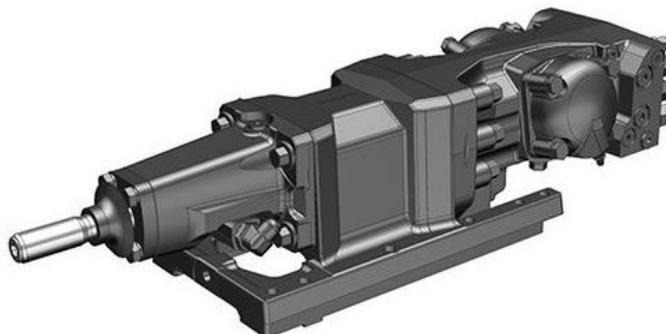


Figura 5-12 - Martelo Hidráulico Sandvik Modelo HLX5. Fonte: Sandvik.

5.1.1.7 Considerações operativas

a) Cobertura

As áreas de cobertura de cada um dos jumbos encontram-se discriminadas na tabela seguinte.

Tabela 5-6 - Áreas de cobertura. Fonte: Catálogos das Marcas

Marca	Área de cobertura (m ²)
Epiroc	29
Sandvik	35
Mine Master	50

a) Automatização

No capítulo 2 é referido que a instrumentação aplicada nos equipamentos mais modernos pode classificar-se em três níveis tecnológicos distintos: indicadores de ângulo, indicadores de posição e sistemas de informatização totais.

Os jumbos existentes na mina da Panasqueira não possuem nenhum destes três níveis tecnológicos, sendo o operador responsável por todas as ações necessárias para se realizar a perfuração, bem como pelo posicionamento do jumbo junto das frentes de trabalho.

b) Posicionamento

O posicionamento dos jumbos junto das frentes de trabalho é feita pelo operador. O jumbo deve ficar sempre posicionado de forma a que não seja necessário ser movimentado enquanto a perfuração da frente não esteja terminada. Sempre que possível deve estar alinhado com o eixo da galeria e uma distância tal da frente que permita ao operador poder operar o braço sem qualquer tipo de restrição. Contudo, para perfurar frentes transversais os braços dos jumbos não tem alcance suficiente para cobrir toda a área da frente, sendo necessário movimentar o mesmo para completar o trabalho. O número de vezes que é necessário movimentar o jumbo depende da experiência do operador. Por norma, é feita perfuração transversal nas duas primeiras pegadas de recorte dos pilares.

Após o posicionamento do jumbo no local devido, o operador desliga o motor a diesel, liga o elétrico e baixa os macacos para estabilizar o equipamento, encontrando-se, assim, preparado para proceder à perfuração.

5.2 Acessórios de Perfuração

Os acessórios de perfuração que constituem a coluna de perfuração são todos da marca Epiroc.

A coluna de perfuração é constituída por um encabadouro, uma união, uma vara e um bit. Na figura seguinte encontra-se representado um esquema da coluna de perfuração utilizada.

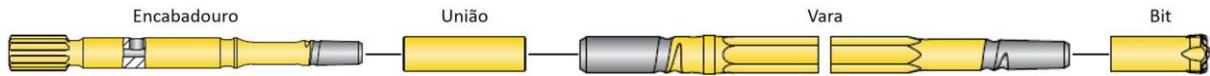


Figura 5-13 - Coluna de perfuração utilizada na Mina da Panasqueira. Adaptado de Catálogo Atlas Copco

5.2.1 Encabadouros

Os encabadouros utilizados são do tipo 1838 R38, onde o R nos fornece informação sobre o tipo de rosca dos mesmos, rocas do tipo R em corda com 38 mm de diâmetro.

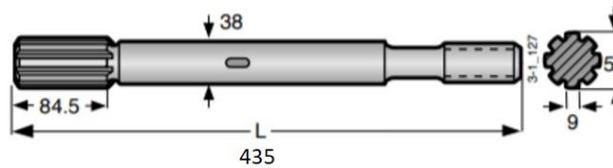


Figura 5-14 - Encabadouro. Fonte: Catálogo Atlas Copco

5.2.2 Varas

O modelo do tipo de varas utilizadas é o SR35 HEX35 R38. As principais características das varas utilizadas na mina da Panasqueira encontram-se discriminadas na tabela seguinte.

Tabela 5-7 - Características técnicas das varas. Fonte: Catálogo Atlas Copco

Comprimento (L)	3090 mm
Formato secção	Hexagonal
Diâmetro do furo para o fluído de limpeza	9,5 mm
Diâmetro da rosca traseira	38 mm
Formato da rosca dianteira	Cónico
Diâmetro da rosca dianteira	35 - 32 mm

Na figura seguinte é possível observar alguns detalhes mais técnicos do desenho deste tipo de varas

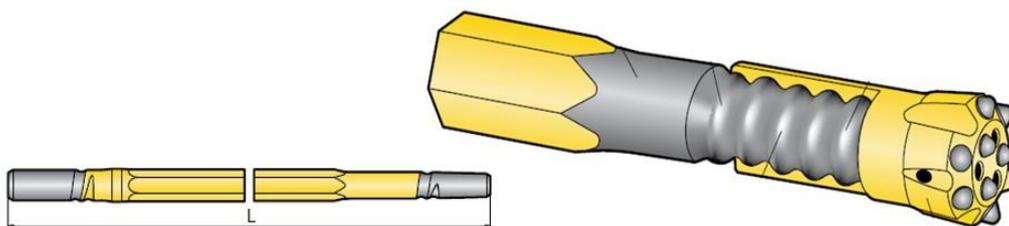


Figura 5-15 - Vara. Fonte: Catálogo Atlas Copco

O formato cônico da rosca dianteira facilita os processos de desacoplamento e de acoplamento. Para além da vara que se encontra instalada na coluna de furação, cada jumbo possui uma vara de reserva na zona superior do chassi traseiro, para que, caso seja necessário substituir a vara os tempos de paragem dos trabalhos não sejam muito longos.

A troca de varas ocorre quando se verifica a rotura de umas das roscas ou um empenamento da mesma. Em caso de empenamento, sempre que possível, procede-se à reparação da mesma, devendo referir-se que o processo de reparação enfraquece o aço, diminuindo a resistência da vara. Contudo, tal operação permite aumentar a vida útil da vara.

5.2.3 Uniões

As uniões utilizadas e que tem como função unir o encabadouro à vara são do modelo R38 x R38, ou seja, ambas as roscas são do tipo R (corda) e têm 38 mm de diâmetro em cada extremo (figura 5-16).



Figura 5-16 - União. Fonte: Catálogo Atlas Copco

5.2.4 Bits

Os bits utilizados na mina da Panasqueira podem ser aplicados em rochas macias, médias ou duras. Estes têm como principal característica apresentarem quatro furos para passagem do fluido de limpeza, três na cabeça e um na lateral. Esta característica permite um alto desempenho, principalmente nas zonas da mina em que as falhas têm um preenchimento argiloso ou o xisto não é tão competente, evitando que os mesmos ou as varas encravem com frequência (figura 5-17).



Figura 5-17 - Bits. Fonte: O Autor

As principais características dos bits utilizados encontram-se discriminadas na tabela seguinte.

Tabela 5-8 -Características dos bits. Fonte: Catálogo Atlas Copco

Designação	HDSR35”B”
Modelo de desenho	37
Diâmetro da cabeça	43 mm
Comprimento	71 mm
Número de botões	9
Forma dos botões	Balístico
Furos para limpeza	4

De forma a prolongar a vida útil dos bits, a equipa técnica da mina definiu que os bits novos devem realizar no máximo 2 frentes seguidas e serem afiados. Uma vez afiados, o intervalo entre afiações deve ser de apenas uma frente. Para proceder à afiação dos bits existe nas instalações da mina uma máquina própria para o efeito.

Os bits deixam de ser utilizados e chegam ao fim da sua vida útil quando:

- Já não é possível afiar mais os botões;
- Perdeu dois botões exteriores seguidos (figura 5-18);
- Perdeu três botões exteriores não consecutivos;
- Ocorre rutura da sua estrutura (figura 5-18);



Figura 5-18 - Bits em fim de vida. Fonte: O Autor.

5.3 Equipas de trabalho

Cada equipa de perfuração é constituída, obrigatoriamente, por dois trabalhadores, o operador do jumbo e o ajudante. O operador do jumbo é o responsável de equipa e responde diretamente ao encarregado do desmonte em que se encontra a perfurar. Este tem como principais funções operar e movimentar o jumbo.

O ajudante do jumbo apesar de não operar o equipamento, salvo raras exceções, desempenha pequenas atividades que são fundamentais na atividade de perfuração. Entre essas atividades destacam-se a limpeza dos furos realizados, a movimentação dos cabos elétrico e de água que abastecem o jumbo. Esta última permite agilizar a movimentação do jumbo entre frentes e, quando o alcance visual do operador é reduzido, auxilia-o de forma a que o emboquilhamento dos furos seja realizado nos locais corretos.

A cada jumbo estão associadas duas equipas de trabalho permanentes, uma para o primeiro turno e outra para o segundo.

5.4 Variações do Diagrama de Fogo

No capítulo 4 desta dissertação encontra-se a descrição teórica do diagrama, sendo apresentado um modelo padrão do mesmo. Contudo, a posição da caldeira na frente a desmontar pode variar, levando a alterações na posição dos restantes furos. Contudo, a geometria dos furos, o número de furos e as distâncias entre os mesmos, entre as fiadas, entre os furos de contorno, o teto e os hasteais das galerias não variam. No Anexo I é possível consultar as diferentes posições que a caldeira pode adquirir no diagrama de fogo aplicado na Mina da Panasqueira

Apesar da geometria dos furos não ser alterada estas variações têm influência na sequência com que os furos devem e são realizados.

Para além da variação da posição da caldeira, é necessário ter em consideração que o ângulo de perfuração e a inclinação dos furos dificilmente é constante. Estes podem variar de furo para furo, uma vez que os jumbos não estão equipados com qualquer tipo de medidores e indicadores, estando este fator muito dependente da experiência do operador. A inclinação com que os furos são executados é definida, na maioria das vezes, em função da inclinação do filão existente na frente, sendo esta informação transmitida pelos encarregados de desmonte aos operadores junto das frentes de trabalho.

Para além destes fatores, é necessário ter em conta que se deve evitar intersectar qualquer tipo de estrutura filoniana, porque para além do desgaste acentuado dos bits e do risco elevado de encravamento, se maior parte do furo estiver alojado dentro de uma estrutura filoniana, a detonação do furo em causa pode estar comprometida. Quando esta situação ocorre, por vezes, a geometria da galeria é afetada e é necessário realizar furos extras para que esta adquira as

dimensões adequadas. Contudo, em certas situações torna-se difícil evitar as estruturas filonianas, acabando por a interseção ser inevitável (figura 5-19).



Figura 5-19 - Interseção de estruturas filonianas. Fonte: O Autor.

No diagrama padrão, apresentado anteriormente, é possível verificar que o comprimento dos furos, com exceção dos da caldeira, é de 2,6 m. O comprimento das varas é de 3,09 m. Contudo, devido a limitações mecânicas, o comprimento máximo que cada jumbo pode furar é de 2,50 m. Esta profundidade é controlada pelo sistema de recolha automática da coluna de perfuração. Contudo, devido às irregularidades das frentes e à borracha de proteção da lança, o encosto da lança na frente nem sempre é feito de forma a que se consiga alcançar os 2,50 m de profundidade na perfuração. O método aplicado que permite aos operadores saber quando é que foi alcançada a profundidade dos furos da caldeira consiste em 3 marcas no braço do jumbo. Quando a parte dianteira do martelo alcança essas marcas o operador deve retirar a coluna de perfuração. A garantia de que a profundidade ideal dos furos da caldeira é alcançada depende exclusivamente da atenção com que o operador executa esta operação.

Também se podem verificar alterações ao diagrama implementado quando é realizada a última pega para que uma galeria intersecte outra. Nesta situação, por norma, o comprimento dos furos é reduzido para evitar que estes varem para a outra galeria. Este procedimento tem como principal objetivo evitar que ocorra o encravamento das varas e que o carregamento com explosivos possa ser executado com sucesso.

Na fase final de corte dos pilares em 3 x 3 é pratica comum ser retirada uma fiada de furos à pega, por norma a fiada da qual se abdica é a de 6 furos.

5.5 Procedimentos de Segurança

A execução de trabalhos em ambientes subterrâneos é uma atividade revestida de uma certa perigosidade, pelo que há certos procedimentos de segurança que quem trabalha neste tipo de ambientes deve cumprir.

Durante a atividade de perfuração os principais procedimentos de segurança que os trabalhadores devem cumprir são os seguintes:

- Utilização dos EPI's obrigatórios (Capacete, fato de macaco refletor, protetores auriculares, galochas de biqueira de aço, luvas e máscara);
- Inspeccionar o local de trabalho e caso seja necessário proceder ao saneamento da frente;
- Inspeccionar os furos “velhos”, de forma a garantir que não tem cargas explosivas alojadas no seu interior. Caso esta situação se verifique os jumbos estão equipados com uma mangueira de água para lavar os furos;
- Quando é necessário movimentar o jumbo o cabo elétrico não pode estar conectado à fonte de energia. Caso a deslocação seja longa, o mesmo tem que ser devidamente acondicionado no respetivo enrolador, para que não se danifique.
- Quando o jumbo se encontra a perfurar o cabo tem que estar todo desenrolado de forma a evitar sobreaquecimento e possíveis incêndios;
- Inspeccionar o equipamento, verificando estado das mangueiras, dos cabos, os níveis do óleo e do combustível, testar os travões e as luzes, verificar o estado dos pneus e do extintor, entre outros. Após inspeccionar o equipamento deve preencher a folha de verificações.
- Estabilizar o equipamento com os 4 macacos hidráulicos, antes de iniciar os trabalhos de perfuração;
- Não estar próximo do braço do jumbo enquanto este se encontra a furar.

5.6 Metodologia de Aquisição e Tratamento de Dados

A recolha de dados para a realização desta dissertação foi levada a cabo na Mina da Panasqueira, durante oito semanas ao abrigo de um contrato de realização de dissertação em ambiente empresarial estabelecido entre a FEUP e BTW. Esta recolha não foi elaborada de forma contínua, tendo sido sujeita a semanas de interrupção de modo a proceder à análise dos dados e discussão dos mesmos com o orientador desta dissertação. Estas interrupções na recolha de dados são, por vezes, de extrema importância pois permite a quem está a efetuar a

recolha poder abstrair-se um pouco do processo e questionar os métodos aplicados e os valores dos dados que são recolhidos. Sendo, por vezes, uma oportunidade para reajustar o método de recolha dos dados ou para identificar quais as variáveis que requerem mais atenção e que mais influenciam o processo em estudo.

Segundo Silva e Menezes (2005), o tipo de pesquisa efetuada, do ponto de vista da sua natureza, pode classificar-se como aplicada, pois tem como objetivo gerar conhecimentos que possam ser aplicados na prática e que são orientados para a resolução de problemas específicos. Do ponto de vista de abordagem do problema pode classificar-se como quantitativa e qualitativa, porque para além das medições realizadas, também foram recolhidas informações que permitem efetuar a caracterização de toda a atividade de perfuração. Quanto aos seus objetivos pode ser classificada como uma pesquisa descritiva e explicativa, uma vez que é feita uma descrição das características dos fenómenos associados ao processo de perfuração, são estabelecidas relações entre as variáveis e identificados os fatores que determinam ou contribuem para a ocorrência dos fenómenos.

Os primeiros passos dados para a definição da metodologia a aplicar na recolha de dados resultaram de várias discussões entre o orientador, coorientador e autor, de forma a definir os objetivos gerais da dissertação, a decomposição da atividade de perfuração em atividades elementares, quais os aparelhos de medição necessários e o primeiro modelo da folha de aquisição de dados.

5.6.1 Atividades Elementares que compõem a Atividade de Perfuração de Produção

A atividade de perfuração foi subdividida nas seguintes atividades elementares:

- **Posicionamento e Estabilização**

Início - Estacionamento do jumbo junto da frente de trabalho;

Fim - Início do emboquilhamento do primeiro furo;

- **Perfuração**

Início - Emboquilhamento do furo;

Fim - Saída do bit;

- **Movimentação do braço**

Início - Saída do bit;

Fim - Emboquilhamento do furo;

A atividade elementar de posicionamento e estabilização engloba os testes que o operador realiza com o braço do jumbo, de forma a certificar-se que a partir do local onde o jumbo se encontra estacionado consegue proceder à perfuração da pega na sua totalidade sem necessitar de voltar a movimentar o equipamento. Esta engloba também a estabilização do jumbo com

recurso aos macacos hidráulicos e o primeiro movimento da lança até ao local onde iniciará o primeiro furo. A variável que mais influencia esta atividade é a experiência do operador.

A atividade elementar de perfuração, como referido, inicia-se quando o bit entra em contacto com a rocha (emboquilhamento) e só termina quando o bit é retirado na sua totalidade. A operação é repetida 26 vezes até que a perfuração da frente esteja concluída. Esta atividade engloba assim o emboquilhamento, a perfuração do furo e a chegada atrás da coluna de perfuração. As variáveis que influenciam esta operação são as características geológicas da frente, o estado do bit, a pressão de empurre, as características do martelo e a pressão da água de limpeza.

A atividade elementar de movimentação, do braço é repetida 25 vezes até que a perfuração da frente esteja concluída. A par da atividade de posicionamento e estabilização, também a experiência do operador é uma das variáveis que mais influência esta atividade.

Assim, o tempo global de perfuração de uma pega está compreendido entre o início da atividade de posicionamento do jumbo e a retirada do bit do último furo a ser perfurado.

Foram recolhidos tempos de cada uma das atividades acima referidas e foram efetuadas medições dos comprimentos dos furos.

5.6.2 Aquisição de dados

Como referido anteriormente, a recolha de dados foi realizada ao longo de oito semanas, tendo sido acompanhados os 2 turnos em que decorrem os trabalhos de perfuração ao longo dos 40 dias de trabalho de campo. Destes, 35 foram dedicados única e exclusivamente à aquisição de dados. Os restantes dias foram dedicados a uma palestra de segurança e ao acompanhamento dos trabalhos dos encarregados e das equipas de carregamento de explosivos. O acompanhamento destes trabalhos foi realizado com o intuito de compreender de que forma é que atividade de perfuração condiciona as outras atividades do ciclo de produção da Mina da Panasqueira.

5.6.2.1 Aparelhos de medição

Os tempos foram contabilizados com recurso ao cronómetro de um telemóvel. A opção de se utilizar esta aplicação, disponível em todos os telemóveis modernos, tem como base a possibilidade de a mesma ter a opção de se poderem contar voltas. Cada vez que se iniciava um furo, por exemplo, era contabilizada uma volta, quando o bit era retirado do furo iniciava-se a contagem de uma nova volta e quando se iniciava o furo seguinte iniciava-se novamente a contagem de uma volta. Cada vez que se inicia uma volta, a aplicação cria uma lista de forma automática com todas as voltas contabilizadas.

De seguida a lista era copiada e colada na aplicação Google Keep. Esta aplicação pode ser utilizada como bloco de notas. A principal vantagem de colocar os dados nesta aplicação é que cada vez que o telemóvel é conectado a uma rede Wi-fi ou aos dados móveis, é criada de forma automática uma cópia de segurança dos ficheiros existentes na aplicação. Assim, em caso de perda ou danificação do telemóvel o acesso aos dados recolhidos está sempre assegurado. Na figura 5-19 é possível observar o *layout* de ambas as aplicações e a forma como os dados são dispostos em ambas. Os valores que aparecem na imagem são meramente ilustrativos e não correspondem a valores reais medidos.

Para a medição do comprimento dos furos foi utilizada uma fita métrica convencional.

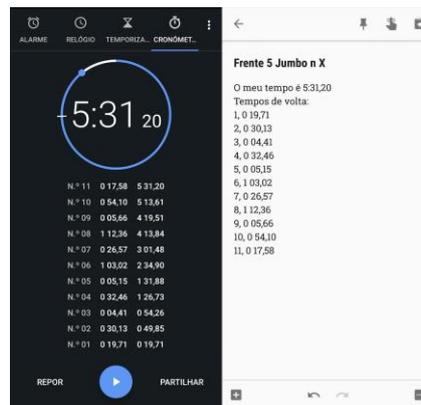


Figura 5-20 - Layout Cronómetro (à esquerda); Layout Google Keep (à direita);

A primeira atividade elementar a ser medida é a de posicionamento e estabilização, logo o primeiro tempo que aparece na lista gerada pelo cronómetro corresponde ao tempo que levou a ser executada essa atividade. O segundo tempo será o do primeiro furo a ser executado e o terceiro tempo corresponde ao primeiro movimento do braço até ao local do segundo furo. Esta sequência de acontecimentos cria um padrão automático de numeração das atividades. Os números ímpares, exceto o número 1, correspondem aos tempos medidos para atividade de movimentação do braço. Os números pares correspondem aos tempos medidos para atividade de perfuração. Tendo em conta que o diagrama de fogo é composto por 26 furos, por cada frente são recolhidos 52 tempos e 26 medições de comprimentos de furos, contabilizando um total de 78 dados por frente.

5.6.2.2 Folha de Aquisição de Dados

Para a aquisição de dados foi criada uma folha de registo cuja estrutura pode ser consultada no Anexo II. A folha criada divide-se em três partes fundamentais que são o cabeçalho, o campo de observações e o campo para desenho do diagrama executado.

No cabeçalho são apontados os dados que permitem a identificação da frente, qual o jumbo, o operador, o local (desmonte), o dia e a hora em que foi executada, os equipamentos de medição utilizados e os limites de análise do tempo da atividade.

No campo das observações são apontadas algumas características geológicas da frente, tais como a existência de falhas, a menor ou maior fracturação do maciço, a quantidade de estruturas filonianas, entre outras. Neste campo também é elaborado um pequeno esquema do posicionamento do jumbo em relação à frente a perfurar e são apontadas outras informações que possam vir a ser relevantes para a análise dos dados.

Na área de desenho é feito um rascunho do diagrama executado, são apontados os comprimentos dos furos e é feita numeração dos furos de acordo com a sua ordem de execução. Esta numeração é fundamental para que durante a análise dos resultados seja possível correlacionar os tempos recolhidos com os respetivos furos e movimentos executados.

5.6.3 Tratamento de Dados

O tratamento dos dados foi efetuado com recurso ao Excel, tendo sido utilizadas algumas ferramentas de construção de gráficos, análise estatística descritiva e de organização de dados.

Após a recolha, os dados foram organizados de acordo com os equipamentos observados. No Anexo 3 é possível consultar a tabela criada para a primeira organização dos dados, tendo sido gerada uma tabela igual para cada frente que foi acompanhada. Após a introdução de todos os dados nas respetivas tabelas, foi gerada uma primeira tabela de resumo dos dados recolhidos (Anexo 3). Dos oito jumbos de perfuração de produção, foi possível acompanhar cinco. Por motivos principalmente mecânicos não foi possível acompanhar os restantes.

Os valores totais dos dados recolhidos encontram-se discriminados na tabela seguinte.

Tabela 5-9 - Valores Totais dos dados recolhidos

Jumbo	Operador	Dados recolhidos por frente	Nº frentes	Dados Recolhidos
Nº 3	A	52 tempos + 26 comprimentos = 78	7	546
	B	78	6	468
	C	78	4	312
Nº 4	D	78	10	780
	E	78	10	780
Nº 5	F	78	12	936
	G	78	9	702
Nº 6	H	78	6	468
	I	78	11	858
Nº 8	J	78	11	858
	K	78	10	780
TOTAL =			96	7488

Por motivos de confidencialidade o nome dos operadores não será divulgado, tendo sido atribuída uma letra a cada um.

5.6.4 Resultados

Num primeiro momento são apresentados alguns resultados gerais do ciclo de perfuração (Tabela 5-10). A apresentação destes resultados tem como objetivo proporcionar ao leitor uma dimensão em termos numéricos do ciclo de perfuração da Mina da Panasqueira e servirão de base para um melhor entendimento dos resultados que serão apresentados em seguida.

Num segundo momento serão apresentados resultados mais específicos que caracterizam alguns momentos do ciclo de perfuração, em relação aos quais a empresa revelou ser do seu interesse a respetiva análise.

5.6.4.1 Gerais

De uma primeira análise obtiveram-se os resultados do tempo médio total do ciclo de perfuração, o tempo médio de cada atividade elementar que compõem o ciclo e o valor médio de metros perfurados por frente. Resultados esses que podem ser observados na tabela seguinte.

Tabela 5-10 - Resultados gerais do ciclo de perfuração para produção.

Valor médio de metros perfurados por frente	56,12 (metros)		
Tempo médio ciclo de perfuração	2 407,04 (segundos)	Movimentação e Estabilização	40,52
		Movimentos do braço	310,96
		Perfuração	2 124,95
	40,12 (minutos)	Movimentação e Estabilização	0,68
		Movimentos do braço	5,18
		Perfuração	35,42

Quanto ao posicionamento do jumbo em relação à frente a perfurar, os primeiros resultados que se demonstraram relevantes podem ser consultados na tabela seguinte.

Tabela 5-11 - Posicionamento do jumbo em relação à frente perfurar

Número de Frentes		
Total	Posicionamento frontal	Posicionamento Transversal
96	67	29
100 %	70 %	30 %

Os valores apresentados vão ao encontro do exposto no subcapítulo 5.1.1.7 acerca do posicionamento dos jumbos. Estes resultados indicam que durante todo o processo de desmonte de uma determinada área de produção, a perfuração da maioria das frentes é executada com o jumbo posicionado de frente para as mesmas. A geometria das galerias, principalmente a altura, tem influência direta na diluição, parâmetro que deve ser constantemente controlado. Com base nestes dois fatores, decidiu-se proceder a uma análise mais detalhada do ciclo de

perfuração, associado à perfuração de frentes executadas com o jumbo posicionado frontalmente.

5.6.4.2 Movimentações do Braço dos Jumbos

Para cada uma das frentes acompanhadas e em que o posicionamento do jumbo é frontal criou-se um esquema representativo da sequência de execução dos furos. Como foi dito anteriormente, a experiência do operador é o fator mais determinante para uma execução bem sucedida desta atividade. A figura exemplifica um dos esquemas criados para as 67 frentes analisadas.

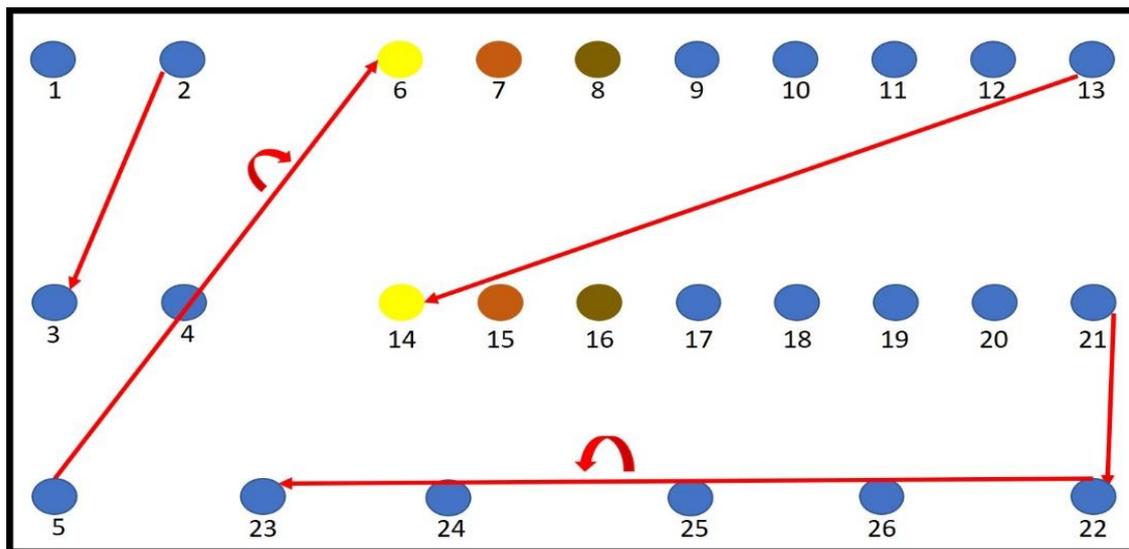


Figura 5-21 - Esquema da sequência de perfuração de uma frente (não está à escala). Fonte: O Autor.

Da análise dos 67 esquemas, o aspeto que mais se destacou foi o facto de que nenhuma das sequências é igual entre si. O mesmo operador, no mesmo turno, com diagramas de perfuração iguais não executa a mesma sequência de perfuração. A esse aspeto associa-se a dificuldade que os operadores têm em manter sempre o mesmo ângulo de perfuração para os furos que compõem a mesma fiada.

Para além destes aspetos ainda foi possível identificar as seguintes ações que são executadas de igual forma por todos os operadores:

- Os furos das fiadas onde se localizam os furos de caldeira são executados em sequência;
- A ordem de execução dos quatro furos laterais revela alguma aleatoriedade;
- As fiadas onde se verifica uma maior aleatoriedade na ordem de execução dos furos é nas fiadas das “soleiras” ou “coronas”.

Tendo como base os resultados apresentados e as observações acima descritas, no capítulo que se segue será apresentada uma proposta de otimização de forma a diminuir a aleatoriedade da

Tabela 5-12 - Tabela resumo dos resultados dos comprimentos das caldeiras.

Jumbo		Nº 3			Nº 4		Nº 5		Nº 6		Nº 8	
Operador		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
Nº de dados		14	12	8	20	20	24	18	12	22	22	20
Média	VR1	1,06	1,1	1,06	1,25	1,11	1,27	1,1	0,98	1,09	1	1,17
	VR2	1,57	1,58	1,64	1,75	1,53	1,58	1,61	1,63	1,62	1,49	1,66
	VR3	2,13	2,23	2,16	2,23	2,08	2,3	2,26	2,2	2,19	2,3	2,3
Desvio Padrão	VR1	0,11	0,13	0,12	0,34	0,19	0,33	0,18	0,13	0,13	0,17	0,22
	VR2	0,14	0,12	0,13	0,31	0,19	0,18	0,22	0,21	0,21	0,3	0,21
	VR3	0,15	0,25	0,14	0,28	0,16	0,31	0,29	0,23	0,24	0,32	0,34
Moda	VR1	1,1	1,1	1	1,1	1,1	1,3	1	0,9	1,1	1,1	1,2
	VR2	1,6	1,5	1,5	1,7	1,5	1,5	1,8	1,6	1,7	1,5	1,8
	VR3	2,1	2,3	2	2,2	2,1	2,3	2,3	2,1	2,3	2,3	2,4
Máximo	VR1	1,3	1,2	1,3	1,8	1,7	1,7	1,4	1,2	1,2	1,4	1,5
	VR2	1,7	1,7	1,8	2,1	2,1	1,9	1,8	2	1,8	1,9	2
	VR3	2,2	2,3	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,3	2,4	2,4
Mínimo	VR1	0,9	0,9	1	0,9	1	0,9	0,9	0,8	0,9	0,7	0,8
	VR2	1,3	1,4	1,5	1,4	1,2	1,1	1,2	1,4	1,1	1,1	1,2
	VR3	2	2,1	2	1,8	1,8	2	1,9	2,1	1,8	2	1,8
Amplitude	VR1	0,4	0,3	0,3	0,9	0,7	0,8	0,5	0,4	0,3	0,7	0,7
	VR2	0,4	0,3	0,3	0,7	0,9	0,8	0,6	0,6	0,7	0,8	0,8
	VR3	0,2	0,2	0,4	0,6	0,6	0,4	0,5	0,3	0,5	0,4	0,6
*Unidades - Metros												

Outra questão que também é abordada no subcapítulo 5.4 é o comprimento dos restantes furos que se encontra condicionada pelos fatores já referidos. Desta forma procedeu-se ao cálculo da média do comprimento dos restantes furos, que é de 2,30 metros.

6 Discussão e Conclusões

Tendo por base a caraterização, as observações e os resultados apresentados no capítulo anterior serão apresentadas, numa primeira fase, algumas propostas de otimização e respetiva discussão. Em seguida, encontram-se as conclusões desta dissertação e, por fim, são propostos alguns trabalhos futuros.

6.1 Propostas de otimização

Assente na descrição detalhada do ciclo de perfuração e nos resultados apresentados ao longo do Capítulo 5, são apresentadas algumas propostas de otimização do ciclo de perfuração de produção. Estas propostas caraterizam-se por serem simples, fáceis de implementar e por afetarem de forma positiva não só o ciclo de perfuração de produção, mas todo o ciclo de produção da mina.

6.1.1 Sequência de perfuração e inclinação dos furos

A falta de uniformização da sequência com que se realizam os furos de uma pega e o facto de os jumbos não estarem equipados com um sistema de controlo da inclinação dos furos foram algumas das questões abordadas no capítulo anterior.

Estas questões têm como principal consequência a alteração da geometria das galerias. Se o tamanho da galeria aumentar, a diluição aumenta e, conseqüentemente, o teor de minério diminui. Caso o tamanho da galeria seja reduzido, os equipamentos de carga e transporte podem ter dificuldades em efetuar a limpeza da frente, o que, por vezes, obriga a que sejam realizados furos extras de forma a dar à galeria as medidas mínimas respetivas. Qualquer uma das situações leva a que os custos de produção aumentem.

De forma a colmatar a falta de uniformização da sequência de perfuração, são em seguida apresentadas duas propostas de otimização.

A primeira proposta tem como principal objetivo diminuir a diferença de inclinações entre furos. Para tal, sugere-se que o encarregado de desmonte aquando da marcação da frente, trace três linhas em cada um dos hasteais. Estas linhas devem ter a mesma inclinação que os furos a executar e estarem marcadas no mesmo alinhamento que as fiadas. Assim, sempre que necessário o operador pode alinhar o braço em função das linhas traçadas nos hasteais.

A segunda proposta consiste na apresentação de duas possíveis sequências de perfuração. Uma para o caso em que é feita a fiada de furos da “soleira” e a outra para o caso em que é feita a fiada de furos das “coronas”. Para ambos os casos a caldeira situar-se no lado esquerdo ou

direito da frente é indiferente. As seqüências propostas encontram-se representadas nas duas figuras seguintes.

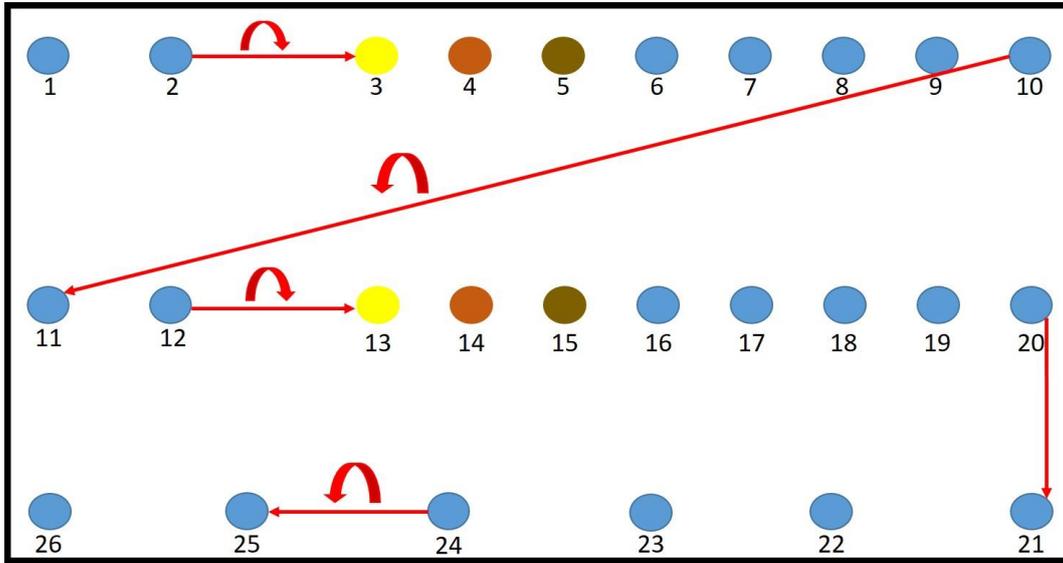


Figura 6-1 - Proposta de seqüência de movimentação do braço do jumbo entre furos

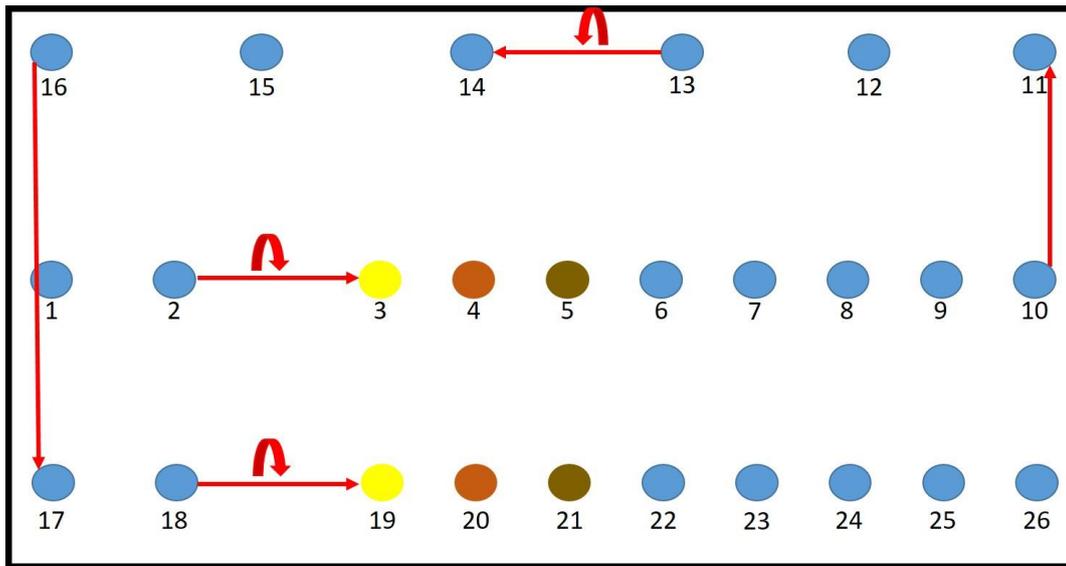


Figura 6-2 - Proposta de seqüência de movimentação do braço do jumbo entre furos

Na figura 6-1 em que é feita a fiada da “soleira”, a primeira fiada a realizar é a superior, em seguida a fiada do meio e, por fim, a fiada da “soleira”. Desta forma, caso a água de limpeza dos furos elimine as marcações dos furos da fiada do meio, o operador pode sempre alinhar a lança com os furos superiores antes de executar os furos da fiada do meio. Para a execução dos furos das “soleiras” na localização correta sugere-se que a marcação da localização seja feita no teto da galeria junto à frente a perfurar. Assim, com a linha marcada no hasteal com a indicação da altura e inclinação com que se devem realizar os furos mais a marcação no teto da localização do furo, o operador tem todas as indicações necessárias para efetuar uma perfuração mais eficiente.

Na figura 6-2 em que é feita a fiada da “corona”, a primeira fiada a realizar é a do meio, seguindo-se a fiada da “corona” e, por fim, a fiada inferior. Inicia-se a perfuração na fiada do meio pelo mesmo motivo mencionado anteriormente, pelo facto de a água de limpeza poder eliminar as marcações da fiada inferior e esta servir de orientação para a realização da fiada inferior.

Em ambos os esquemas, a fiada inferior é sempre a última a ser executada, porque caso seja a primeira ou a segunda a ser perfurada corre-se o risco de os furos encravarem devido à queda de material aquando da execução dos furos das fiadas superiores.

Um dado importante a realçar é que as sequências propostas não são ótimas do ponto de vista temporal, ou seja, realizando os movimentos sugeridos em ambas, o tempo total de perfuração de cada frente aumenta, principalmente devido à necessidade de se efetuarem várias rotações do braço. O acréscimo temporal em relação às frentes observadas varia entre os 42 segundos e os 63 segundos, caso a frente a perfurar tenha fiada de “soleira”, e entre 21 a 42 segundos caso a frente tenha fiada de “corona”. Contudo, tendo em conta os custos que uma má sequenciação pode acarretar, o aumento no máximo de aproximadamente um minuto por frente pode representar uma diminuição desses custos, justificando, assim, a implementação de ambos os diagramas.

6.1.2 Controlo do Comprimento dos Furos das Caldeiras

A caldeira tem como função criar o espaço livre necessário para que o rebentamento dos restantes furos da pega possa ocorrer de acordo com o planeado. Assim sendo, a perfuração dos furos da caldeira deve ser feita com a maior exatidão possível, pois uma má execução da mesma pode comprometer o rebentamento da pega.

Como se pode constatar após uma análise atenta dos gráficos de dispersão do Anexo 4 e os resultados apresentados da tabela 5-13, o comprimento dos furos da caldeira de todas as frentes observadas varia de operador para operador.

Esta operação está muito dependente do desempenho de cada operador e pode-se concluir, pelos resultados obtidos, que a técnica implementada de marcar no braço do jumbo o sítio a partir do qual se deve recolher a coluna de perfuração, se torna um tanto ineficaz, principalmente se o operador não estiver com a atenção devida.

De forma a aumentar o rigor com que os furos da caldeira são executados propõe-se a implementação de um sistema simples de alarme sonoro ou luminoso acionado por movimento. Este sistema tem como objetivo alertar o operador para proceder à retirada do braço no momento correto.

A implementação de tal sistema carece de um estudo mais aprofundado com especialistas do ramo da eletrotécnica e das firmas que fabricam os jumbos de perfuração utilizados.

6.1.3 Controlo do Posicionamento do Jumbos

Os jumbos existentes na mina da Panasqueira não possuem qualquer tipo de sistema de posicionamento, estando o mesmo dependente do desempenho do operador. De forma a aumentar a eficiência desta operação propõem-se a instalação de um *laser* no centro da parte superior da cabine do operador (figura 6-3). Assim que o operador se aproxime da frente a furar, liga o laser e inicia as manobras de posicionamento de forma a que o feixe emitido pelo laser coincida com o eixo da galeria anteriormente marcado pelo encarregado de desmonte.



Figura 6-3 - Local para colocação do laser. Fonte: O Autor.

6.2 Conclusões

Após todo o trabalho desenvolvido é possível chegar às seguintes conclusões:

- Os objetivos propostos inicialmente foram cumpridos, uma vez que foi feita uma caracterização detalhada do ciclo de perfuração de produção da Mina da Panasqueira e foram apresentadas propostas de otimização.
- A atividade de perfuração influencia de forma direta as atividades que se lhe seguem no ciclo de operações.
- A metodologia aplicada na recolha de dados revelou-se eficiente tendo em conta os objetivos desta dissertação.
- Através do trabalho de campo e da elaboração desta dissertação foi possível criar uma base de dados atual e bastante representativa do ciclo de perfuração de produção da Mina da Panasqueira.

- O desempenho dos operadores tem uma grande influência sobre o todo o ciclo de perfuração de produção. A realização eficiente de quase todas as atividades que compõem o ciclo tem por base a experiência dos operadores e a atenção com que estes as desempenham.

6.3 Trabalhos Futuros

- Estudo da influência das características geológicas do terreno no processo de perfuração da Mina da Panasqueira, aconselhando-se para a realização deste trabalho a seleção de 2 jumbos e aços de perfuração com características semelhantes e que os ensaios sejam realizados em zonas com caraterísticas geológicas distintas umas das outras.
- Estudo do desempenho de bits ao longo da sua vida útil, e da influência da afiação dos mesmos nesse desempenho. Para este trabalho aconselha-se que o equipamento de perfuração seja sempre o mesmo, bem como operador e que as caraterísticas geológicas dos locais dos ensaios sejam o mais homogêneas possível.
- Estudo experimental de eliminação de mais um furo no diagrama de fogo das frentes de desmonte e seus efeitos no arranque da rocha e na granulometria do material desmontado.
- Caracterização das avarias mecânicas dos equipamentos de perfuração e de carga e transporte (LHD's). Análise e proposta de uma metodologia de manutenção preventiva a ser implementada bem como a contabilização dos tempos mortos causados pelas mesmas e de que forma afetam o ciclo de produção.
- Estudo da eficiência dos processos conjuntos de perfuração e carregamento com explosivos em função dos metros de avanço por pega e da análise granulométrica do material desmontado.
- Caraterização e propostas de otimização global do planeamento de trabalhos em fundo de Mina.
- Aplicação e avaliação dos resultados das propostas de otimização apresentadas nesta dissertação

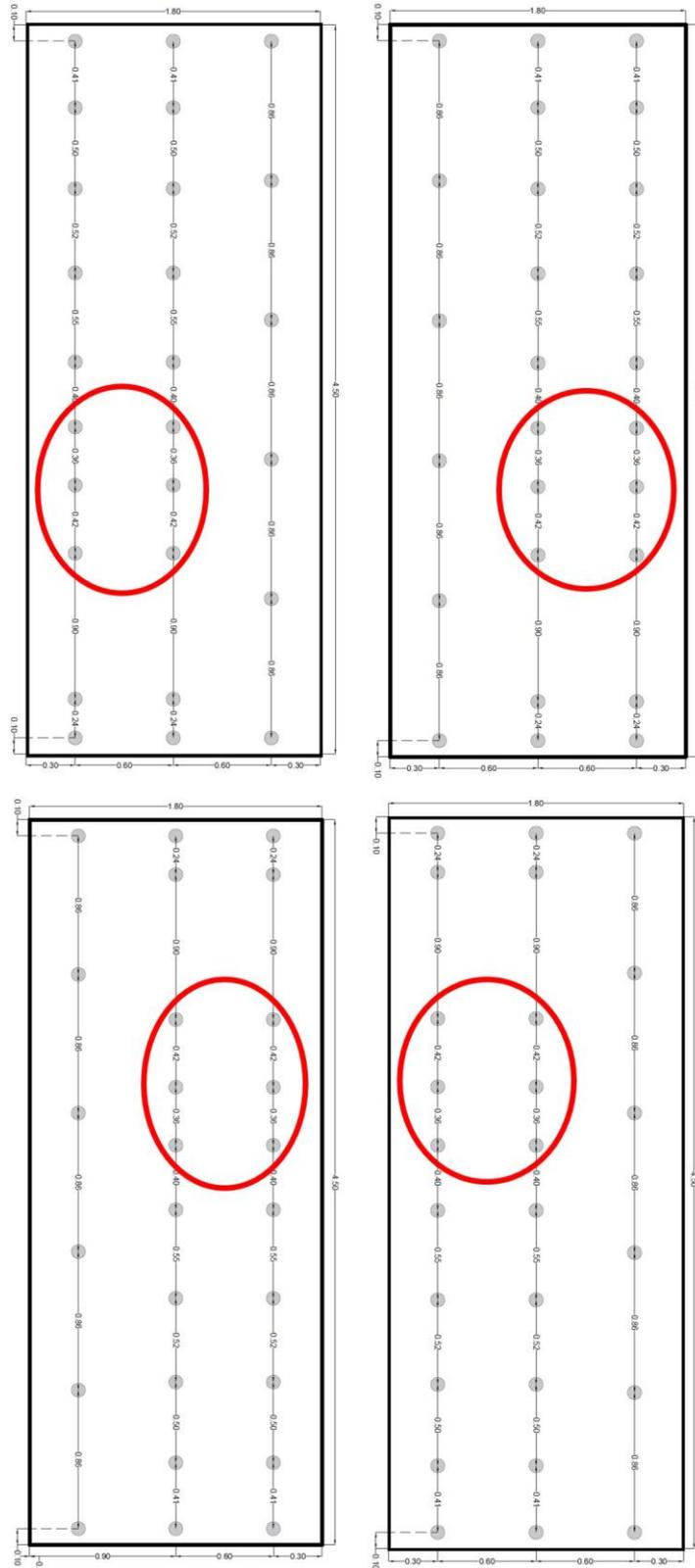
Referências

- Almonty Industries. Report Ni 43-101, *Technical Report On The Mineral Resources and Reserves Of The Panasqueira Mine, Portugal*. 2016.
- Almonty Industries. *Annual Information Form*. Toronto, Canada, 2017.
- C. Reichl, M. Schatz, G. Zsak; World Mining Data - Minerals Production. Volume 32, Vienna, Áustria, 2017.
- Galiza, A.C., Teixeira, J., Chaminé, H.I., Ramos, L., Fonseca, L. *O Papel da Geotecnia Mineira na Otimização do Desmonte de Maciços Rochosos Fraturados*, (pág. 103-120). Boletim de Minas, nº 46(2), 2011.
- Jimeno, C.L., Jimeno, E.L., Bermúdez, P.G. *Manual de Perforación, Explosivos y Voladuras Minería y Obras Públicas* (Pág. 17-217). Madrid, Espanha, 2017.
- Kelly, W. C., Rye, R. O. *Geologic, fluid inclusion, and stable isotope studies of the tungsten deposits of Panasqueira, Portugal*. Economic Geology, 74/8,1979.
- Pacheco, Manuel Sousa. *Panasqueira Projeto Mineiro Atípico Contributo técnico-económico da alteração do Diagrama de Fogo*. Tese de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2017.
- Pinto, Filipe M.V. *Estudo da distribuição do Estanho na Mina da Panasqueira*. Tese de Mestrado, Faculdade de Ciências da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2014.
- Pinto, Filipe M.V. *Mineral Resource and Reserve Evaluation in Panasqueira Mine, Portugal*. Coring Magazine, 2017.
- Reis, António Cláudio (1971). *As Minas da Panasqueira*, (pp 3-44). Lisboa, Boletim de Minas, Vol. 8. Nº 1, Jan/Mar.
- Ribeiro, A. & Pereira, E. (1982). Controles paleogeográficos, petrológicos e estruturais na génese dos jazigos portugueses de estanho e volfrâmio. *Geonovas*, 1/3: 23-31.
- Sá, A. Correa De, Naique, R. A., Nobre, Edmundo. *Mina da Panasqueira - 100 anos de história mineira*, (pág. 3-22).Lisboa, Boletim de Minas nº 36 (1) Jan/Mar, 1999.
- Silva, Edna L. Da, Menezes, E.M., Metodologia da Pesquisa e Elaboração da Dissertação. 4º Ed. Ver. Atual., Florianópolis: UFSC, 2005.
- Thadeu, D. (1951). Geologia do Couto Mineiro da Panasqueira. *Comunicações dos Serviços Geológicos de Portugal*, 32, 5-64.
- <https://www.rocktechnology.sandvik/> (Consultado a 17/09/2018).

- <https://www.epiroc.com> (Consultado a 17/09/2018).
- <http://www.minemaster.eu> (Consultado a 17/09/2018).
- <http://www.montabert.com> (Consultado a 19/09/2018).
- <http://www.maxam.net/pt> (Consultado a 23/06/2018).

Anexo 1 Variações do Diagrama de Fogo

Os furos que constituem a caldeira encontram-se assinalados pelo círculo vermelho.



Anexo 2 Folha de Aquisição de Dados



Folha de Aquisição de Dados

Atividade:			
Dia:	Hora:	Turno:	Operador:
Equipamento de perfuração:			
Desmonte:			
Equipamento de Medição:		Unidades:	
Limites de análise do tempo da Atividade:			
Início _____			
Fim _____			

Observações:

--

Anexo 3 Tabelas de Organização de Dados

Dia:	23mar	Observações:
Turno:	Manhã	Zona de falha
Localização:	L1-D5-R7-AW15	
Operador:		
Hora:	08:50	

Nº da frente : 1			
Atividade	Cód.	Medição (s)	Comp. Furo (m)
Est.		25,22	
1	2,4-1	116,23	2,4
M1	-0	7,50	
2	2,3-1	90,10	2,3
M2	-0	12,18	
3	2,3-2	98,34	2,3
M3	-0	22,84	
4	2,4-2	104,81	2,4
M4	-0	19,54	
5	2,3-3	90,32	2,3
M5	-0	10,77	
6	2,3-4	95,84	2,3
M6	-0	15,68	
7	2,3-5	93,38	2,3
M7	-0	7,71	
8	2,3-6	90,47	2,3
M8	-0	8,90	
9	2,4-3	74,68	2,4
M9	-0	13,51	
10	2,4-4	101,77	2,4
M10	-0	30,34	
11	1,2-1	37,53	1,2
M11	-0	8,42	
12	1,5-1	55,18	1,5
M12	-0	12,39	
13	2,2-1	83,00	2,2
M13	-0	7,54	
14	2,3-7	86,49	2,3
M14	-0	7,89	
15	2,3-8	72,30	2,3
M15	-0	6,49	
16	2,3-9	93,55	2,3
M16	-0	7,67	
17	2,3-10	90,30	2,3
M17	-0	7,60	
18	2,3-11	78,31	2,3
M18	-0	12,57	
19	1,2-2	38,39	1,2
M19	-0	12,59	
20	1,5-2	102,53	1,5
M20	-0	9,79	
21	2,1-1	79,14	2,1
M21	-0	8,21	
22	2,4-5	108,76	2,4
M22	-0	6,66	
23	2,4-6	123,68	2,4
M23	-0	13,63	
24	2,3-12	82,15	2,3
M24	-0	8,21	
25	2,4-7	130,84	2,4
M25	-0	7,32	
26	2,4-8	104,79	2,4
TOTAL		2 634,05	56,5

Soma M's =	285,95	Segundos
	4,77	Minutos
%	10,86%	
Soma Furos =	2 322,88	Segundos
	38,71	Minutos
%	88,19%	

Legenda:

Est. – Posicionamento e Estabilização;

Cód. – Comando do Excel para organização de dados;

1, 2, 3 ... – Furo 1, Furo2, Furo3 ... ;

M1, M2, M3 ... – Movimentos do Braço;

Caracterização e Propostas de Otimização do Ciclo de Perfuração da Mina da Panasqueira

Total Frentes =		21		Total de metros =		1187,80 metros									
Total Furos =		546		Total de tempos furos =		45 081,260 segundos									
Tempos								Médias							
Frete	Estabilização	Total M's	Total furos	Total		Nº de furos	Total m furados	Localização	Dia	Operador	Estabilização	M's	Furos	Tempo Total	
1	70,10	484,08	1 947,51	2 501,69 segundos		26	55,50	AW15	22/fev		45,863	438,400	1 848,247	2 332,510	segundos
	1,17	8,07	32,46	41,69 minutos											
2	36,89	469,32	1 862,16	2 368,37 segundos		26	56,60								
	0,61	7,82	31,04	39,47 minutos											
3	30,60	361,80	1 735,07	2 127,47 segundos		26	54,90								
	0,51	6,03	28,92	35,46 minutos											
4	77,11	319,00	2 440,52	2 836,63 segundos		26	57,70								
	1,29	5,32	40,68	47,28 minutos											
5	40,27	333,50	1 955,31	2 329,08 segundos		26	57,40								
	0,67	5,56	32,59	38,82 minutos											
6	24,10	380,74	2 268,19	2 673,03 segundos		26	57,90								
	0,40	6,35	37,80	44,55 minutos											
7	47,90	373,05	2 076,09	2 497,04 segundos		26	57,30								
	0,80	6,22	34,60	41,62 minutos											
8	30,61	316,27	2 121,21	2 468,09 segundos		26	58,80								
	0,51	5,27	35,35	41,13 minutos											
9	51,56	550,46	1 967,55	2 569,57 segundos		26	56,70								
	0,86	9,17	32,79	42,83 minutos											
10	52,26	485,35	2 029,45	2 567,06 segundos		26	56,00								
	0,87	8,09	33,82	42,78 minutos											
11	33,09	431,00	2 205,29	2 669,38 segundos		26	56,00								
	0,55	7,18	36,75	44,49 minutos											
12	51,26	505,27	2 263,38	2 819,91 segundos		26	56,50								
	0,85	8,42	37,72	47,00 minutos											
13	30,68	313,32	1 972,54	2 316,54 segundos		26	54,30								
	0,51	5,22	32,88	38,61 minutos											
14	37,52	638,62	2 242,33	2 918,47 segundos		26	54,70								
	0,63	10,64	37,37	48,64 minutos											
15	30,36	512,63	2 272,93	2 815,92 segundos		26	55,00								
	0,51	8,54	37,88	46,93 minutos											
16	46,78	274,38	1 922,80	2 243,96 segundos		26	56,70								
	0,78	4,57	32,05	37,40 minutos											
17	47,38	397,47	2 212,06	2 656,91 segundos		26	58,00								
	0,79	6,62	36,87	44,28 minutos											
18	25,22	285,95	2 322,88	2 634,05 segundos		26	56,50								
	0,42	4,77	38,71	43,90 minutos											
19	42,29	287,50	2 436,82	2 766,61 segundos		26	57,60								
	0,70	4,79	40,61	46,11 minutos											
20	40,51	353,71	2 345,07	2 739,29 minutos		26	56,50								
	0,68	5,90	39,08	45,65 segundos											
21	54,08	407,92	2 482,10	2 944,10 minutos		26	57,20								
	0,90	6,80	41,37	49,07 segundos											

Anexo 4 Dados e Resultados do Estudo do Comprimento dos Furos de Caldeira

Tabela de dados com os comprimentos dos furos de caldeira realizados pelos operadores do Jumbo N^o3.

Operador A					
VT1	VR1	VT2	VR2	VT3	VR3
1	1,1	1,5	1,5	2	2,2
1	1	1,5	1,6	2	2,1
1	1,1	1,5	1,6	2	2,1
1	1,1	1,5	1,6	2	2,2
1	1	1,5	1,6	2	2,1
1	1	1,5	1,6	2	2,1
1	0,9	1,5	1,7	2	2,1
1	1,3	1,5	1,5	2	2,1
1	1,1	1,5	1,3	2	2,1
1	1,1	1,5	1,7	2	2
1	1,1	1,5	1,4	2	2,1
1	1,1	1,5	1,6	2	2,2
1	1	1,5	1,6	2	2,2
1	1	1,5	1,7	2	2,2

Operador B					
VT1	VR1	VT2	VR2	VT3	VR3
1	0,9	1,5	1,7	2	2,3
1	1,1	1,5	1,5	2	2,2
1	1,1	1,5	1,6	2	2,3
1	1	1,5	1,6	2	2,3
1	1,1	1,5	1,7	2	2,3
1	1,2	1,5	1,7	2	2,3
1	1,2	1,5	1,6	2	2,1
1	1,1	1,5	1,5	2	2,1
1	1,1	1,5	1,5	2	2,1
1	1,1	1,5	1,4	2	2,1
1	1,2	1,5	1,6	2	2,3
1	1,1	1,5	1,5	2	2,3

Operador C					
VT1	VR1	VT2	VR2	VT3	VR3
1	1	1,5	1,6	2	2,4
1	1	1,5	1,5	2	2,3
1	1	1,5	1,5	2	2
1	1	1,5	1,5	2	2,1
1	1	1,5	1,8	2	2,1
1	1	1,5	1,7	2	2
1	1,2	1,5	1,7	2	2,2
1	1,3	1,5	1,8	2	2,2

Tabela de dados com os comprimentos dos furos de caldeira realizados pelos operadores do Jumbo N^o4.

Operador D					
VT1	VR1	VT2	VR2	VT3	VR3
1	1,1	1,5	1,6	2	2,3
1	1,4	1,5	1,7	2	2,3
1	1,2	1,5	2	2	2,2
1	1,8	1,5	1,7	2	2,2
1	1,1	1,5	1,4	2	2,2
1	1,2	1,5	1,7	2	2,2
1	1,6	1,5	1,9	2	2,1
1	1,3	1,5	1,5	2	1,8
1	0,9	1,5	1,9	2	2,4
1	1,1	1,5	1,9	2	2,2
1	1,4	1,5	1,8	2	2,3
1	1,3	1,5	1,8	2	2,3
1	1,2	1,5	1,7	2	2,2
1	1,2	1,5	1,8	2	2,2
1	1,3	1,5	1,9	2	2,4
1	0,9	1,5	1,7	2	2,4
1	1	1,5	1,5	2	2,1
1	1,1	1,5	1,6	2	2,3
1	1,5	1,5	1,8	2	2,4
1	1,3	1,5	2,1	2	2,1

Operador E					
VT1	VR1	VT2	VR2	VT3	VR3
1	1	1,5	1,3	2	2,2
1	1,1	1,5	1,2	2	2,3
1	1	1,5	1,5	2	1,8
1	1	1,5	1,5	2	1,9
1	1,1	1,5	1,4	2	2,1
1	1,1	1,5	1,5	2	2,1
1	1,1	1,5	1,5	2	2,1
1	1	1,5	1,5	2	2,1
1	1,3	1,5	1,7	2	2,1
1	1,2	1,5	1,7	2	2,1
1	1,7	1,5	2,1	2	2,1
1	1	1,5	1,7	2	1,9
1	1,1	1,5	1,5	2	2,1
1	1,1	1,5	1,5	2	2,1
1	1,1	1,5	1,5	2	2,4
1	1,1	1,5	1,6	2	2
1	1,1	1,5	1,3	2	2,1
1	1	1,5	1,5	2	2
1	1,1	1,5	1,5	2	2,1
1	1	1,5	1,5	2	2

Tabela de dados com os comprimentos dos furos de caldeira realizados pelos operadores do Jumbo N°5.

José Ramos					
VT1	VR1	VT2	VR2	VT3	VR3
1	1,3	1,5	1,8	2	2,3
1	1,1	1,5	1,5	2	2,3
1	1,7	1,5	1,6	2	2,3
1	1,5	1,5	1,1	2	2,3
1	1,3	1,5	1,6	2	2,3
1	1,2	1,5	1,5	2	2,3
1	1,4	1,5	1,6	2	2,3
1	1,4	1,5	1,7	2	2,3
1	1,3	1,5	1,5	2	2,4
1	1,1	1,5	1,6	2	2,3
1	1	1,5	1,5	2	2,3
1	1,1	1,5	1,4	2	2,4
1	1,3	1,5	1,9	2	2,3
1	1,5	1,5	1,7	2	2,3
1	1,3	1,5	1,7	2	2,3
1	1,2	1,5	1,5	2	2,1
1	1,3	1,5	1,6	2	2,3
1	1,5	1,5	1,6	2	2,4
1	1,3	1,5	1,6	2	2,4
1	1,4	1,5	1,8	2	2,3
1	1,1	1,5	1,5	2	2,3
1	1	1,5	1,4	2	2
1	0,9	1,5	1,5	2	2,3

David Moiteiro					
VT1	VR1	VT2	VR2	VT3	VR3
1	1,3	1,5	1,8	2	2,4
1	1,3	1,5	1,8	2	2,4
1	1	1,5	1,4	2	2,3
1	1	1,5	1,2	2	2,2
1	1	1,5	1,7	2	2,3
1	1	1,5	1,3	2	1,9
1	1,3	1,5	1,4	2	2,4
1	1,1	1,5	1,8	2	2,2
1	1,1	1,5	1,7	2	2,3
1	0,9	1,5	1,6	2	2,1
1	1,1	1,5	1,5	2	2,2
1	1	1,5	1,8	2	2,2
1	1,1	1,5	1,6	2	2,3
1	0,9	1,5	1,6	2	2,3
1	1,2	1,5	1,8	2	2,3
1	1,4	1,5	1,7	2	2,3
1	1	1,5	1,6	2	2,2
1	1,1	1,5	1,7	2	2,3

Tabela de dados com os comprimentos dos furos de caldeira realizados pelos operadores do Jumbo N°6.

Operador H					
VT1	VR1	VT2	VR2	VT3	VR3
1	0,9	1,5	1,7	2	2,2
1	1,1	1,5	2	2	2,2
1	1	1,5	1,6	2	2,1
1	0,9	1,5	1,5	2	2,1
1	1,1	1,5	1,5	2	2,4
1	1,2	1,5	1,6	2	2,1
1	0,9	1,5	1,6	2	2,1
1	1,1	1,5	1,6	2	2,2
1	0,8	1,5	1,4	2	2,1
1	1	1,5	1,7	2	2,1
1	1	1,5	1,8	2	2,3
1	0,8	1,5	1,6	2	2,4

Operador I					
VT1	VR1	VT2	VR2	VT3	VR3
1	1,1	1,5	1,7	2	2,3
1	1,2	1,5	1,8	2	2,3
1	1,2	1,5	1,7	2	2,3
1	1,1	1,5	1,6	2	2,1
1	1,2	1,5	1,7	2	2,3
1	1,1	1,5	1,7	2	2,3
1	1,1	1,5	1,7	2	2,3
1	1,2	1,5	1,8	2	2,3
1	1,2	1,5	1,8	2	2,3
1	1,2	1,5	1,7	2	2,3
1	1,1	1,5	1,6	2	2,1
1	1,2	1,5	1,7	2	2,3
1	1,1	1,5	1,7	2	2,3
1	1,1	1,5	1,7	2	2,2
1	0,9	1,5	1,4	2	2,1
1	1	1,5	1,7	2	2,3
1	1,1	1,5	1,6	2	2,1
1	1	1,5	1,8	2	2,1
1	0,9	1,5	1,6	2	2,2
1	1	1,5	1,1	2	1,8
1	1,1	1,5	1,5	2	2,3
1	1	1,5	1,4	2	2
1	1	1,5	1,5	2	1,9

Tabela de dados com os comprimentos dos furos de caldeira realizados pelos operadores do Jumbo N°8.

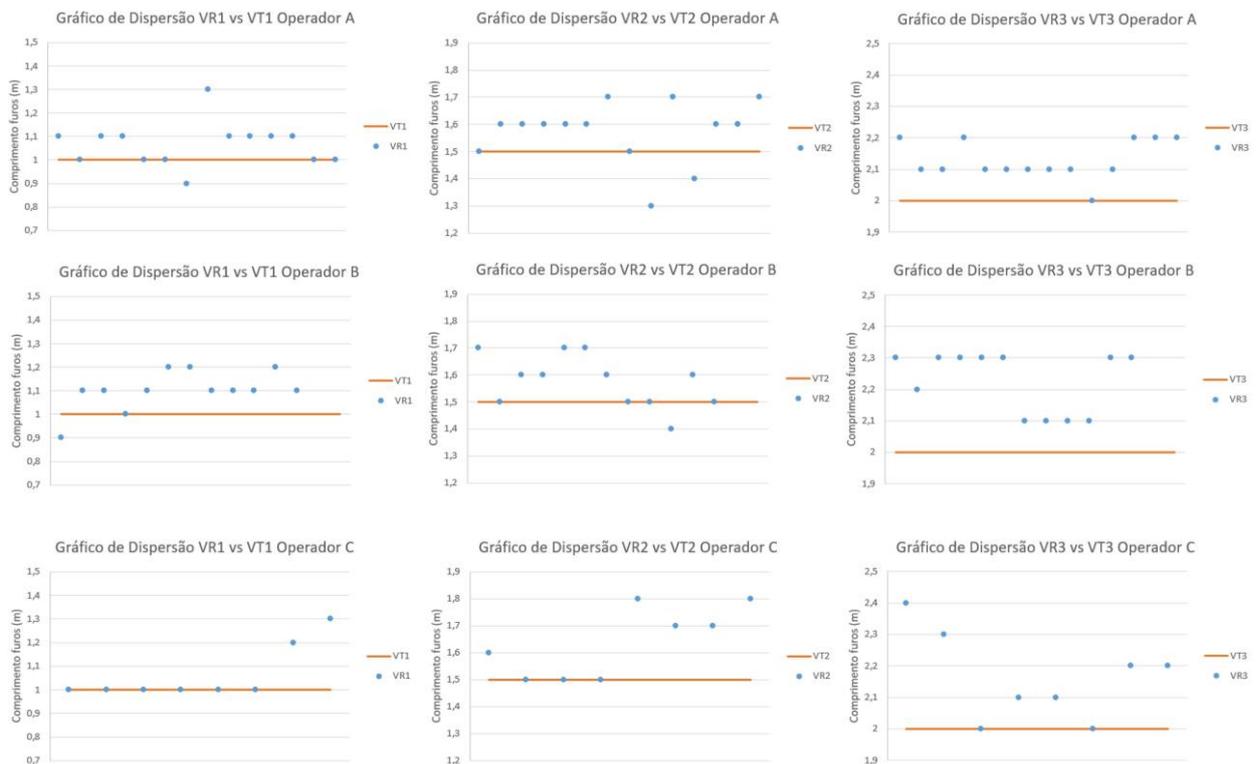
Operador J					
VT1	VR1	VT2	VR2	VT3	VR3
1	1,2	1,5	1,5	2	2,3
1	1,2	1,5	2,5	2	2,3
1	1,1	1,5	1,6	2	2,4
1	1,1	1,5	1,7	2	2,3
1	1,1	1,5	1,4	2	2,1
1	0,8	1,5	1,5	2	2
1	1	1,5	1,4	2	2,4
1	1	1,5	1,4	2	2,3
1	1	1,5	1,8	2	2,4
1	0,9	1,5	1,6	2	2,3
1	0,9	1,5	1,3	2	2,4
1	1	1,5	1,1	2	2,4
1	0,7	1,5	1,4	2	2,3
1	0,7	1,5	1,5	2	2,3
1	1	1,5	1,3	2	2,3
1	0,9	1,5	1,3	2	2,3
1	0,9	1,5	1,2	2	2,3
1	1,1	1,5	1,6	2	2,4
1	1,1	1,5	1,7	2	2,3
1	1,2	1,5	1,8	2	2,3
1	1,4	1,5	1,9	2	2,4

Operador K					
VT1	VR1	VT2	VR2	VT3	VR3
1	1,2	1,5	1,7	2	2,3
1	1,1	1,5	1,7	2	2,3
1	1,1	1,5	1,7	2	2,4
1	1,1	1,5	1,8	2	2,3
1	1,2	1,5	2	2	2,4
1	1,5	1,5	1,9	2	2,3
1	1	1,5	1,8	2	2,3
1	1,2	1,5	1,8	2	2,4
1	1,4	1,5	1,9	2	2,4
1	1,3	1,5	1,9	2	2,3
1	1,2	1,5	1,4	2	2,2
1	1,2	1,5	1,4	2	2,3
1	1,2	1,5	1,5	2	2,2
1	1,2	1,5	1,5	2	2,1
1	1,1	1,5	1,8	2	2,4
1	1,2	1,5	1,2	2	1,8
1	0,8	1,5	1,4	2	2,4
1	1,1	1,5	1,6	2	2,4
1	1	1,5	1,6	2	2,4
1	1,2	1,5	1,6	2	2,4

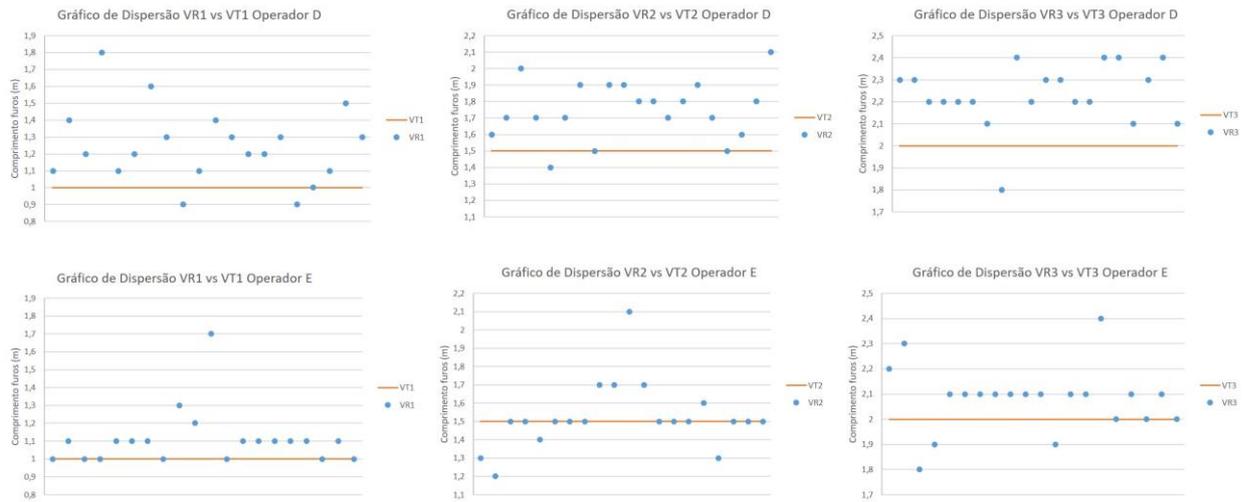
Legenda das tabelas e dos gráficos que se seguem:

- VT1, VT2, VT3 - Valores teóricos dos comprimentos dos furos por ordem crescente;
- VR1, VR2, VR3 - Valores reais dos comprimentos medidos no campo;
- * A unidade de medida dos valores dos comprimentos dos furos é o metro.

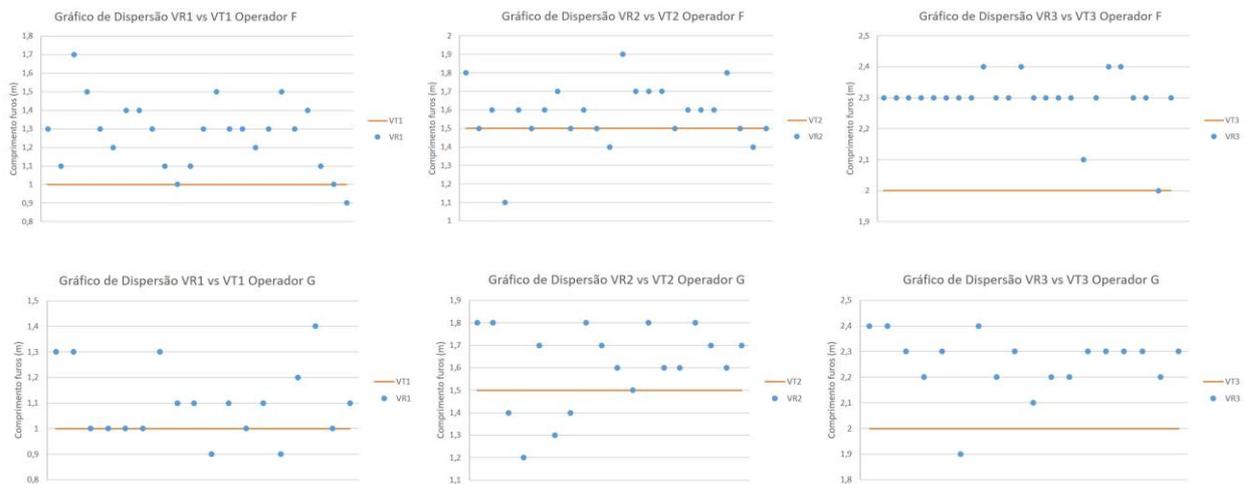
Gráficos de Dispersão dos Operadores do Jumbo N°3 (A, B e C)



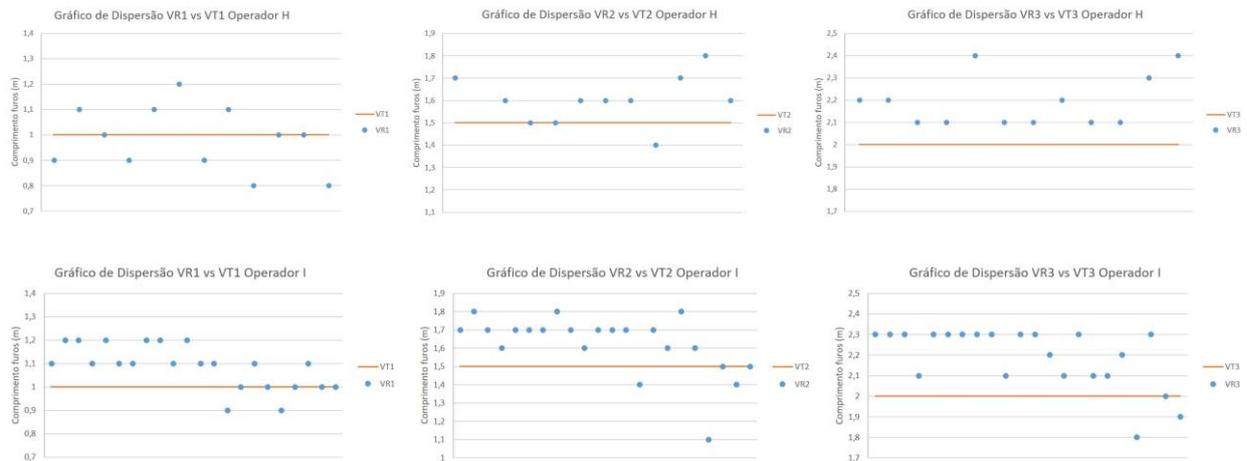
Gráficos de Dispersão dos Operadores do Jumbo N°4 (D e E)



Gráficos de Dispersão dos Operadores do Jumbo N°5 (F e G)



Gráficos de Dispersão dos Operadores do Jumbo N°6 (H e I)



Gráficos de Dispersão dos Operadores do Jumbo N°8 (J e K)

