



UNIVERSIDADE D
COIMBRA

Daniella Clare Smith Reis

**MINING4.0 – APLICAÇÃO A UMA
EXPLORAÇÃO DE MASSA MINERAL A CÉU
ABERTO**

**Dissertação no âmbito do Mestrado em Engenharia Geológica e de
Minas.**

**Orientada pelo Professor Doutor Fernando Pedro Ortega de
Oliveira Figueiredo e apresentada à Faculdade de Ciências e
Tecnologias da Universidade de Coimbra
Departamento de Ciências da Terra**

Outubro de 2021



UNIVERSIDADE D
COIMBRA

Daniella Clare Smith Reis

**MINING4.0 – APLICAÇÃO A UMA
EXPLORAÇÃO DE MASSA MINERAL A CÉU
ABERTO**

**Dissertação no âmbito do Mestrado em Engenharia Geológica e de
Minas.**

**Orientada pelo Professor Doutor Fernando Pedro Ortega de
Oliveira Figueiredo e apresentada à Faculdade de Ciências e
Tecnologias da Universidade de Coimbra
Departamento de Ciências da Terra**

Outubro de 2021

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Professor Doutor Fernando Pedro Ortega de Oliveira Figueiredo, um muito obrigado, pela formação, disponibilidade, incentivo e conselhos durante a realização deste estudo.

Ao Group IGE, um muito obrigado a todos os que fizeram parte do meu percurso. Em especial ao Geólogo, Pedro Neves pelo apoio, conhecimento transmitido, integração e amizade. Ao Dr. Nelson Simões, Eng.^a Sofia Lopes e Eng.^a Paula Castillo pelo apoio prestado.

À colaboração do Doutor João Duarte, um obrigado pelos conhecimentos transmitidos.

Ao Departamento de Ciências da Terra e aos seus docentes pela formação e preparação para o Futuro.

Aos meus colegas de curso e amigos que me acompanharam, apoiaram e estiveram lá nos momentos menos bons estes anos, tanto em Coimbra como no Porto. E claro, nos bons também!

Ao meu namorado, Bruno Vasconcelos, por todo o carinho, ajuda, motivação e paciência durante toda a realização deste trabalho.

Aos meu Pais e irmãos por todo o incentivo dado durante os anos de faculdade.

RESUMO

Na presente dissertação, irão ser procuradas soluções para aplicar numa pedreira a céu aberto através de tecnologias 4.0. O trabalho terá como um dos objetivos demonstrar como se pode transformar uma pedreira tecnologicamente falando. Assim de forma a demonstrar como tal pode ser feito irá ser feita uma investigação bibliográfica acompanhada da recolha de alguns dados na pedreira de Vale Longo, em Penela, local no qual será o Caso de estudo no decorrer desta dissertação.

Uma das medidas de tecnologia 4.0 aplicada, na prática, neste processo foi um levantamento topográfico através de um VANT, este é comumente conhecido pela designação de *drone*. Este faz o levantamento aerofotogramétrico, gerando assim fotografias. A partir das mesmas e com auxílio de um software, o Agisoft, foram gerados ortofotomapas e cálculo de volumes para a análise de uma pega de fogo. Através dos resultados obtidos, conseguiu-se chegar à conclusão que as utilizações destas ferramentas ajudam a controlar e otimizar o processo de desmonte. Os dados recolhidos são guardados e servem de apoio à tomada de decisões futuras e o avanço da exploração.

Posteriormente à implementação de uma tecnologia 4.0, irá ser feita uma abordagem através de pesquisa sobre equipamentos e sistemas que fazem parte das tecnologias 4.0 demonstrando-se que estas desenvolvem-se com base no *Big Data*, Internet das coisas e sistemas cibernéticos.

Será também demonstrado que apesar de serem poucas para a área específica da indústria extrativa, é possível a implementação de tecnologias capazes de captarem dados e transformá-los em sistemas de fácil acesso através de *smartphones*, tablets e computadores. Equipamentos autónomos, alternativas mais sustentáveis e tudo em tempo real. Estas tecnologias vão permitir uma subida positiva na produção, mais segurança no local de trabalho e mais sustentabilidade.

Por último serão apresentadas algumas medidas que compreensivamente devem ser aplicadas.

Palavras-chave: *Mining* 4.0; Pedreira; Otimização do processo extrativo; Tecnologia; Dados em tempo real;

ABSTRACT

In this dissertation, solutions will be searched to apply in a quarry using 4.0 technologies. The main goal of this work is to demonstrate how quarries can be transformed, technologically speaking. This work has been based on bibliographical investigation and some data from Penela, Vale Longo's quarry.

With the use of UAV (Unmanned Aerial Vehicle), as a 4.0 technology to carry out an aero photogrammetric survey. With the help of a software, named Agisoft, we will be able to create orthophotomaps and in the end obtain volume values. Through the results obtained, it was possible to reach that conclusion that when we use this tool, we can control and optimize the blasting activity. All data is saved and will support future decisions.

After some research on equipment and systems that are part of the 4.0 technologies, based and developed on Big Data, Internet of things and cyber systems, it will be given some examples, although there are few technologies that can be use in the extractive industry. It is possible to apply technologies capable of capturing data and transforming into systems that are easily transmitted by smartphones, tablets, and computers. Autonomous equipment, more sustainable alternatives, and all the information in real time. These technologies will allow a positive result in production, more safety in the workplace and more sustainability. And finally, some examples for the application of Mining 4.0 in quarries.

Keywords: Mining 4.0; Quarry; Optimization of the extractive process; Technology; Real time data.

Índice

AGRADECIMENTOS	I
RESUMO	II
ABSTRACT	III
ÍNDICE DE FIGURAS	VIII
ÍNDICE DE TABELAS	XII
1. Introdução	1
1.1 Objetivos	2
1.2 Metodologia	2
1.3 Organização da dissertação.....	3
2. Estado de Arte	5
2.1 Mining 4.0	7
2.2 Internet das coisas	8
2.3 Big Data	10
2.4 Segurança para os trabalhadores	11
2.5 Ambiente e sustentabilidade	12
2.6 Futuro da indústria extrativa- Programas de investimento para a Indústria 4.0.....	13
2.7 Contexto da indústria extrativa em Portugal	14
3. Atividades de pedreira.....	17
3.1 Considerações iniciais.....	17
3.2 Planeamento e Perfuração.....	18
3.2.1 Método de perfuração	18
3.3 Pega de Fogo.....	18
3.3.1 Taqueamento	22
3.4 Sistemas de Carga e Transporte.....	23
3.4.1 Pá frontal e pá giratória	24
3.4.2 Dumper	25
3.5 Beneficiação do material rochoso.....	26

3.5.1	Britador, moinho, telas transportadoras.....	27
3.5.2	Classificação- Crivagem e separação	29
4.	Caso de estudo - Pedreira de Vale Longo.....	31
4.1	Nota Introdutória	31
4.2	Climatologia da região.....	31
4.3	Enquadramento geográfico	34
4.4	Enquadramento geomorfológico, geológico e hidrogeológico.....	35
4.4.1	Geomorfologia.....	35
4.4.2	Geologia.....	36
4.4.3	Hidrogeologia	40
4.5	Centro de produção de Penela.....	40
4.6	Planeamento e Desmonte	42
4.6.1	Perfuração	42
4.6.2	Carregamento de explosivos.....	43
4.7	Pega de Fogo.....	43
4.8	Carga e Transporte	44
4.9	Processamento do material.....	47
4.10	Agregados Produzidos	48
4.11	Marcação CE	48
5.	Aplicações Mining 4.0 ao caso de estudo.....	49
5.1	Planificação e Perfuração	50
5.1.1	Demonstração de um exemplo de implementação do Mining 4.0.....	50
5.1.2	Outras Tecnologias 4.0	60
5.2	Sistemas Integrados para as operações de Carregamento e Transporte.....	65
5.2.1	Sistemas Integrados	65
5.2.2	Equipamentos de carregamento e transporte para a implementação de sistemas integrados 4.0	69
5.3	Beneficiação do material	72
5.4	Considerações finais - Aplicações do Mining 4.0 no caso de estudo.....	75

6. CONCLUSÕES	79
6.1 Recomendações	81
6.2 Trabalhos Futuros	81
REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS	83
WEBGRAFIA.....	88

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Evolução das diversas fases de evolução das revoluções industriais	7
Figura 2 - Gráfico com valores de produção do calcário no período entre 1999-2017 (dgeg.gov.pt, consultado setembro 2021)	14
Figura 3 - Gráfico com a variação do custo médio dos agregados no período entre 1999-2017(dgeg.gov.pt, consultado em setembro 2021)	15
Figura 4 - Localização das Pedreiras de agregados no concelho de Penela (Google Earth, 2021)	16
Figura 5 - Ciclo das operações mineiras na exploração de uma pedreira de agregados	17
Figura 6 - Parâmetros utilizados no dimensionamento de uma pega de fogo	21
Figura 7 - Exemplo de procedimentos da operação de taqueamento de blocos com recurso a explosivos (Jimeno 2003)	22
Figura 8 - Exemplo do processo de taqueamento efetuado por um martelo hidráulico	23
Figura 9 - Carregamento da Pá Frontal e Dumper (mediastorehouse.com/galleries/dumper-truck (setembro 2021)	24
Figura 10 - Exemplo de operação com Pá Giratória (Hitachi.com)(setembro 2021)	25
Figura 11 - Dumper com Sistema Trolley Power Assist (:new.abb.com)(setembro 2021)	26
Figura 12 - Circuito de britagem	27
Figura 13 - Britador de martelos (researchgate.net)(setembro 2021)	28
Figura 14 - Tela Transportadora (br.123rf.com) e tela encapsulada (assimagra.pt) (setembro 2021)	29
Figura 15 - Gráfico da temperatura média mensal da Região de Coimbra (1971-2000) (ipma.pt) (setembro 2021)	31
Figura 16 - Gráfico da precipitação média mensal (ipma.pt) (setembro 2021)	32
Figura 17 - Gráfico Radar sobre a velocidade do Vento mensal (http://www.ci.uc.pt/iguc/) (Outubro 2021)	33
Figura 18 - Valores médios da velocidade do vento vs precipitação ao longo do ano (http://www.ci.uc.pt/iguc/)(Outubro 2021)	33
Figura 19 - Mapa com os limites do concelho de Penela (websig.cm-penela.pt)(setembro 2021)	34
Figura 20 - Localização da pedreira de Vale Longo, estando assinalado a ocupação atual da pedreira e a sua zona de reserva (linha a amarelo que delimita essa área) (websig.cm-penela.pt) (setembro 2021)	35
Figura 21 - Esboço Geomorfológico do Maciço Calcário de Sicó. (Adaptado de Cunha, L. (1990))	36

Figura 22 - Cartografia geológica da região em estudo. Cunha, L. (1981). Adaptação com a implantação da área em estudo e da pedreira de Vale Longo.(EIA)	38
Figura 23 - Falha secundária do sistema da falha da Nazaré visível num dos taludes da pedreira	40
Figura 24 - Vista geral da Pedreira do Vale Longo	41
Figura 25 - Perfuradora Roc D7	42
Figura 26 - Manuseamento Explosivos.....	43
Figura 27 - Esquema de Pega de Fogo.....	44
Figura 28 - Carregamento de Dumper.....	45
Figura 29 - Fluxograma do processo de fragmentação e classificação.....	47
Figura 30 - DJI PHANTHOM 4	51
Figura 31 - Definição de voo no Dronedeploy.....	51
Figura 32 - Definição da área de voo no Dronedeploy.....	52
Figura 33 - Representação do Ortofotomapa georreferenciado. do 1º Voo realizado antes do desmonte	54
Figura 34 - Zoom Local 2 referente à Figura 33	54
Figura 35 - Zoom Local 1 referente à Figura 33	54
Figura 36 - Representação do Ortofotomapa georreferenciado, do 2º Voo, realizado depois do desmonte	55
Figura 37 - Zoom Local 2 referente à Figura 36	55
Figura 38 - Zoom Local 1 referente à Figura 36	55
Figura 39 - Modelo Digital de elevação dos 2 voos realizados	56
Figura 40 - Modelo Digital de Elevação 1º Voo.....	57
Figura 41 - Modelo Digital de Elevação 2º Voo.....	57
Figura 42 - Exemplo de Demonstração de Modelo com Curvas de Nível no ArcGis, Voo 1 .	58
Figura 43 - Exemplo de Demonstração de Modelo com Curvas de Nível no ArcGis, Voo 2 .	58
Figura 44 - Cálculo de volumes do local 1 e 2 - CloudCompare	59
Figura 45 - Laser Scanner de Percurso e Estruturas Transmitidos num tablet (geoslam.com)(setembro 2021).....	61
Figura 46 - O-Pitdev como dispositivo de introdução nos furos de uma pega de fogo e um exemplo de um esquema de pega de fogo no software, O-Pitblast (setembro 2021)	62
Figura 47 - Gráfico com parâmetros da atividade de perfuração no software Drillit (timining.com/pt-br/software/drillit/) (setembro 2021)	63
Figura 48 - Sistema de controlo do processo de perfuração, XSite Pro 3D Drilling (moba-automation.com.br)(Setembro 2021)	64
Figura 49 - Representação de um sistema remoto da Sandvik.....	65
Figura 50 - Catminestar, centro de controlo de operações (cat.com)(Setembro 2021)	66

Figura 51 - Exemplo de uma frota de dumpers no software Orchestra (timing.com).....	67
Figura 52 - Fluxograma sobre a Indústria 4.0 (Adaptado de ec.europa.eu)(Outubro 2021) ..	69
Figura 53 - Komatsu FrontRunner (in:komatsu.com)	70
Figura 54 - eDumper (in:businessinsider.com)	71
Figura 55 - Dumper Eléctrico VolvoTA15	71
Figura 56 - Imagem representativa de software ASRI (in:rocketechnology.sandvik).....	72

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Parâmetros da Pega de Fogo.....	44
Tabela 2 - Desempenho do ciclo de carga e transporte.....	46
Tabela 3 - Tabela de valores de agregado por granulometria	48
Tabela 4 - Tabela de valores de agregado por granulometria, produtos Via Húmida.....	48
Tabela 5 - Volumes teóricos e Volumes CloudCompare do desmonte	60
Tabela 6 - Softwares de perfuração e desmonte	74
Tabela 7 - Softwares de carregamento e transporte/Sistemas Integrados.....	75

Acrónimos e Siglas

ANFO - Ammonium Nitrate/ Fuel Oil

ICT - Information and Communication Technology

CPS - Cyber-physical system

PME- Pequenas e Médias Empresas

IAPMEI - Agência para a Competitividade e Inovação

CEE - Comunidade Económica Europeia

FEDER - Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional

DGEG - Direção Geral de Energia e Geologia

VANT - Veículo Aéreo Não Tripulado

SIG - Sistema de Informação Geográfica

INE- Instituto Nacional de Estatística

1. Introdução

O conceito *Mining 4.0* foi originado a partir de aplicações de tecnologias 4.0 na Indústria, mas neste caso, à Indústria Extrativa. Com os mercados a tornarem-se cada vez mais competitivos, e a existência do paradigma ligado a este tipo de indústria não é o mais adequado, é necessário então a aplicação de novos métodos e a existência de tecnologias capazes de melhorar significativamente todo o ciclo de extração.

Na presente dissertação, pretende-se realizar um conjunto de sugestões para a implementação de tecnologias baseadas, nestes pilares fundamentais, a Internet das coisas, o *Big Data* e a junção dos dois, em sistemas cibernéticos. A internet das coisas permite a ligação em rede entre dispositivos e o *Big Data*, a velocidade, a variedade e a quantidade de dados. A junção dos dois origina tecnologias capazes de fazer a conexão de um objeto físico e a transformação dos dados recolhidos num só sistema, de fácil acesso através de computadores e telemóveis, por exemplo.

A aplicação deste tipo de tecnologias na indústria extrativa ainda está no começo, principalmente em Portugal, em que poucas empresas estão a iniciar a adoção destas medidas, visto que em Portugal ainda é uma indústria muito antiquada e com a necessidade de mudanças.

Foi-me dada a oportunidade de observar de perto, através de um estágio na pedreira de Vale Longo, em Penela, todo o processo de produção, desde o processo de perfuração e desmonte até a fragmentação e classificação, com o objetivo de sugerir aplicações 4.0 para ajudar no controlo de produção da empresa e melhorar em termos de segurança dos trabalhadores. São utilizados muitos métodos sem grande evolução tecnológica o que tornou ainda mais difícil obter certos dados para realização deste trabalho e para a possibilidade de juntar e apontar resultados mais conclusivos. No entanto, apesar de ainda não existirem muitas tecnologias ligadas à indústria extrativa, é imperativo começar do zero e usar o máximo das metodologias disponibilizadas por algumas empresas com foco na automatização e otimização. Existem empresas do setor que já aplicam e que mostram que vários dados de produção aumentam e melhoram ao longo dos anos.

O processo de produção, começa com a perfuração e desmonte, sendo os resultados desta que ditam o sucesso do resto das operações. Neste trabalho vamos usar o método da Fotogrametria para analisar os resultados do método de desmonte utilizado através do levantamento aerofotogramétrico com VANT e em seguida proceder ao tratamento e análise dos dados obtidos. Ainda haverá uma seleção de outras tecnologias e comparação entre as

mesmas, que podem ser usadas para determinadas fases de produção e ainda um plano de sugestão para o caso de estudo desta dissertação.

Outras tecnologias estão a ser desenvolvidas para uma melhor facilidade de implementação, como é o exemplo das redes 5G, para aumentar a velocidade de dados e otimizar todos os sistemas de rede e quantidade de dispositivos conectados.

1.1 Objetivos

A presente tese teve como objetivo principal, o estudo e posteriormente sugestões de implementação para as atividades de uma pedreira a céu aberto, de produção de agregados. Com a adesão a esta geração tecnológica pretende-se que os resultados das empresas melhorem e que se criem métodos mais eficientes e otimizados.

- ❖ Pesquisa bibliográfica relacionada com as atividades numa pedreira a céu aberto;
- ❖ Estudar os diversos equipamentos existentes atualmente para cada fase do processo de produção, perfuração e desmonte, carregamento e transporte, fragmentação e crivagem;
- ❖ Analisar dados recolhidos e identificar oportunidades de melhoria;
- ❖ Aplicação de técnicas baseadas na Indústria 4.0 para demonstração e resultados obtidos para o controlo da fase de desmonte;
- ❖ Utilização de técnicas de fotogrametria para a construção de modelos utilizados no planeamento das atividades de pedreira;
- ❖ Investigar e seleccionar tecnologias na área do *Mining 4.0* e Indústria 4.0, possíveis de serem implementadas numa pedreira deste tipo e ainda em pedreiras com maior volume de negócio;
- ❖ Comparações entre softwares e plataformas existentes na indústria e *Mining 4.0*;
- ❖ Seleccionar as tecnologias mais adequadas para a Pedreira de Vale Longo e fornecer vantagens sobre as que ainda são praticadas.

1.2 Metodologia

As metodologias, correspondem à sequência de métodos utilizados nas diferentes etapas de realização desta dissertação.

- ❖ Pesquisa bibliográfica;

- ❖ Observação e análise no centro de produção da Pedreira de Vele Longo de cada fase de atividade da extração;
- ❖ Reconhecimento de pontos a melhorar para otimização de todo o processo de atividades;
- ❖ Utilização, processamento e tratamento de dados, com o objetivo de uma exemplificação de um método do Mining 4.0;
- ❖ Realização de uma investigação e exposição do mercado das tecnologias 4.0 e a sua compatibilidade com a indústria extrativa;
- ❖ Apresentação de medidas de implementação no caso de estudo.

1.3 Organização da dissertação

O estudo para a realização desta dissertação foi iniciado com a pesquisa sobre o tema da Indústria 4.0 em geral, seguindo-se a pesquisa sobre métodos na área da exploração a céu aberto e deste modo, realizar propostas para a melhoria da produção.

No capítulo I apresenta-se uma pequena introdução ao tema desta dissertação. Delimitam-se os objetivos a serem alcançados e de um modo geral a descrição do trabalho a ser realizado.

No capítulo II refere-se ao Estado de Arte do tema desta dissertação e a descrição e caracterização dos fundamentos principais para elaboração do tema. E ainda, o contexto do tema em Portugal.

O capítulo III consiste numa revisão bibliográfica e descrições sucintas e gerais sobre as metodologias usadas numa pedreira a céu aberto.

O capítulo IV aborda toda a caracterização do caso de estudo, a Climatologia da região, enquadramento geográfico, geomorfológico, geológico e hidrogeológico. Ainda descrição do centro de produção onde foi realizado o estágio e descrição de toda a operação a céu aberto.

No capítulo V aborda-se a utilização da aerofotogrametria como exemplo de aplicação numa tecnologia 4.0. Descrição de novas opções tecnológicas para a implementação do *Mining* 4.0. Considerações finais para o caso de estudo.

No capítulo VI consiste na apresentação das considerações finais, recomendações e sugestões para trabalhos futuros.

2. Estado de Arte

A indústria extrativa tem como principal objetivo extrair recursos geológicos para obter, com os mesmos, valor comercial. É uma antiga atividade humana que pode ter-se iniciado durante o período Paleolítico, onde, por exemplo, a hematite foi extraída para produzir pigmento vermelho. A importância do material rochoso extraído ao longo do tempo, reflete-se nas principais civilizações: a idade da pedra, cobre, bronze e ferro. Mais tarde, o carvão forneceu energia para a revolução industrial e ainda sustenta a sociedade moderna com 38% da energia mundial. As pedreiras e minas antigas usavam mão de obra humana e animal, fragmentavam rochas com ferramentas para pedra, utilização de calor, água e ferramentas de ferro. Hoje em dia, as minas e pedreiras tem máquinas movidas a diesel e eletricidade e os maciços são fragmentados com explosivos ou máquinas de corte (Corke et al., 2008).

Em Portugal, mais especificamente remonta ao período pré-romano, contudo, o seu desenvolvimento é mais significativo nos períodos que se seguem à primeira revolução industrial, depois da II guerra mundial e décadas seguintes (Matos et al., 2011).

Desde os primórdios do aparecimento do Homem sobre a terra, o Homem teve de se aproveitar dos minerais, quer como arma de defesa quer para os mais diversos fins. E a sua importância é tal, que dela resultou a divisão da História da Humanidade nas conhecidas Idades: da pedra, do cobre, do bronze, do ferro, como constituindo períodos ou etapas de civilizações (Couto, 1990).

A revolução industrial deu início a uma era que foi gradualmente tornando-se moderna. É tradicionalmente considerada um dos marcos mais importante na história da humanidade desde o período neolítico, entre 1780 e 1850, em menos de três gerações, uma revolução de longo alcance sem precedentes na história da humanidade, mudou a Inglaterra e o mundo. A revolução industrial marca o início de um processo em direção ao crescimento económico (Deane et al., 1973).

Durante a revolução industrial, as forças motrizes mais importantes para as inovações concentraram-se na exploração de novas fontes de energia e no seu consumo.

O combustível era necessário tanto para fins de aquecimento quanto para geração de energia mecânica. As inovações mais importantes da revolução industrial no Reino Unido foram baseadas em técnicas de consumo do carvão (Fremdling, 1996).

Demorou algum tempo para desenvolver as estruturas institucionais, capacidade tecnológica e introdução aos mercados para chegarmos ao que temos hoje. A primeira revolução começou na Inglaterra, onde ocorreu a substituição de métodos manuais e rudimentares por máquinas a vapor e a exploração do carvão como fonte de energia,

transformando a sociedade numa sociedade mais industrializada. A mudança do método de produção alterou a maneira como o trabalhador realizava o seu trabalho. Isto fez com que houvesse uma adaptação forçada de novas técnicas no trabalho.

Após aproximadamente 100 anos, uma corrente tecnológica (2ª Revolução Industrial) varreu as nações já mais industrializadas que expandiram e evoluíram rapidamente. Com a utilização da energia elétrica, telefone e rádio permitiram a construção de fábricas de grande escala, com modelos de produção em massa e com conexão por meio de linhas de transmissão de energia e telecomunicações (Horn et al., 2016). Na 2ª Revolução Industrial deu-se um desenvolvimento muito grande na eletricidade o que possibilitou a iluminação nas ruas

A 3ª Revolução Industrial, entre 1950 e 1970, foi marcada pela digitalização, computação e linhas de produção mais eficientes com dados processados digitalmente. Na 3ª Revolução Industrial houve um grande desenvolvimento na área da Informática e sistemas de redes (Horn et al., 2016). Esta revolução veio a alterar os modelos de produção, possibilidade de produzir mais em menos tempo, novas formas de comunicação, criação de softwares, criação de chips e desenvolvimento de robôs. No entanto, trouxe uma grande consequência, um aumento significativo das emissões de gases poluentes.

Foi na 3ª Revolução Industrial que se começou a sentir, em Portugal, realmente uma revolução na indústria, o contributo da atividade para o desenvolvimento económico e social foi notório, sendo uma importante fonte de emprego e fator de desenvolvimento local, com especial relevância nas regiões do interior (Matos et al., 2011).

A Quarta Revolução Industrial, Indústria 4.0 originou uma mudança ainda mais acentuada. Aplicações avançadas de ICT (*Information and Communications Technology*), *Big Data*, robótica industrial e sistemas de produção automatizados tornando-se CPS (sistemas Cyber-físicos), que fornecem novas plataformas e infraestruturas. O conceito de Indústria 4.0, ou Quarta Revolução Industrial é reconhecido nacional e internacionalmente e o processo de mudança está incluído nos principais documentos políticos e programas de desenvolvimento (Löow, et al., 2019). Esta revolução industrial, é a representação da realidade atual com a constante aceleração de tecnologias de comunicação, aumento da capacidade de tecnologias, inteligência artificial, robótica e nanotecnologias.

O conceito *Mining 4.0* fornece a união entre a Indústria 4.0 e a implementação deste conceito no desenvolvimento de atividades numa indústria extrativa, *smart mining* (Bartnitzki, 2017).

Na Figura 1 esta representado todas as revoluções industriais, desde a primeira com as máquinas a vapor até a quarta revolução, com o *Big Data* e a Internet das Coisas:



Figura 1 - Evolução das diversas fases de evolução das revoluções industriais

A descoberta de explosivos e o aperfeiçoamento da utilização dos mesmos teve contribuições relevantes para a sociedade e desenvolvimento da indústria extrativa. Em 1847, o italiano Ascanio Sobreno descobriu a Nitroglicerina, que permitia um poder de explosão muitas vezes maior que a pólvora que já existia. A nitroglicerina é um composto líquido que explode facilmente por aquecimento ou por simples choque mecânico.

Em 1867, Alfred Nobel, conseguiu uma forma mais segura de usar nitroglicerina com a invenção da dinamite (Vasconcelos et al., 2010) e no ano de 1950, foi descoberto o ANFO, Nitrato de Amônio e Óleo Diesel (Lynch et al., 2002). O desenvolvimento dos explosivos até à junção do Nitrato de Amônio e Óleo Diesel, permitiram que estes explosivos apresentem uma maior facilidade e em menos tempo, a explosão. São desenvolvidos para serem utilizados com mais segurança, mais facilidade de manuseamento e ainda diminuem o custo total de desmonte comparativamente com outros tipos de explosivos mais antiquados.

2.1 Mining 4.0

A Indústria 4.0 denota a transformação de indústrias “tradicionais” pela Internet das coisas, dados e serviços associados. O termo Indústria 4.0 foi lançado numa das maiores feiras dedicada à inovação tecnológica (Hannover Messe 2013).¹ A rede em tempo real de

¹[HTTPS://WWW.AUTOMATION.COM/EN-US/ARTICLES/2013-1/HANNOVER-MESSE-2013-CLOSING-REPORT](https://www.automation.com/en-us/articles/2013-1/hannover-messe-2013-closing-report)

produtos, processos e infraestruturas, deram início à Quarta Revolução Industrial, onde o fornecimento, a fabricação, a manutenção, são fases que estão todas conectadas (Kagerman et al., 2016).

Recentemente, uma tecnologia mais inovadora tem sido introduzida na indústria extrativa, o que pode reduzir, significativamente os custos de produção e desenvolver com sucesso projetos nas zonas de extração. Apoiado pelo crescimento económico global contínuo e pelo desenvolvimento deste setor, o mesmo está a tornar-se cada vez mais atrativo para os investidores internacionais em busca de oportunidades de investimento, com possível lucro a longo prazo (Bertayeva et al., 2019).

Mining 4.0 é o conceito dado à utilização e avanço da tecnologia em relação ao transporte e processamento de todas as atividades durante a produção. A indústria extrativa aproxima-se da Indústria 4.0, tendo minas/pedreiras totalmente automatizadas, bem como instalações de processamento do material mais sofisticadas tecnologicamente (Löow et al., 2019). A implementação do conceito, Indústria 4.0 envolve a criação de uma indústria inteligente que evoluiu desde o uso de sistemas de informação e comunicação até sistemas ciberfísicos, estes sistemas permitem a transformação de informação do meio físico para o digital (Bertayeva et al., 2019).

O termo “*Mining 4.0*” está relacionado com o objetivo de tornar uma indústria extrativa mais eficiente, sustentável, económica e também mais segura para os trabalhadores. Para isso, podemos utilizar as tecnologias existentes até hoje.

Pretende-se que as indústrias extrativas usem tecnologia mais avançada no decorrer das etapas de todo o processamento do material, isto é, com a junção de tecnologias baseadas na Internet das coisas, sistemas ciberfísicos e *Big-Data*. Várias tarefas desempenhadas por equipas de trabalhadores podem vir a ser substituídas por trabalhadores que sozinhos vão estar equipados com ferramentas digitais (Löow et al., 2019).

Para acelerar a economia e aproveitar novas oportunidades para o desenvolvimento nesta revolução industrial, os países desenvolvidos, começaram a propor várias políticas de estímulo para a evolução tecnológica (Yan et al., 2018).

2.2 Internet das coisas

O termo “Internet das Coisas” apareceu pela primeira vez em 1999, com os dispositivos eletrónicos a conectarem-se a uma rede de Internet. O avanço das redes, sem fio na Indústria, facilitou a ligação entre equipamentos fixos e móveis. Permitindo o controlo

remoto, realização de diagnósticos, solução de problemas, acesso a dados de produção de máquinas e outros relatórios em tempo real (Costner et al., 2019).

As estimativas indicam que o número atual de dispositivos conectados à Internet é de 10 mil milhões. Isso consegue ser mais do que o número de pessoas no planeta e cada um desses dispositivos produz dados. Existe por exemplo, sensores que detetam níveis de poluição, com sistemas de controlo, que vão reduzir o desperdício (Schneier, 2015).

A Internet das coisas refere-se à interconexão em rede entre máquinas e objetos, sendo que eles se integram em sistemas que ligam vários dispositivos. O *World Wide Web Consortium*, consiste numa organização internacional cujo objetivo é o desenvolvimento colaborativo de padrões da *Web*, define “coisas”, neste assunto, como abstração de uma entidade física ou virtual representada em aplicativos da Internet das coisas. Pode ser um dispositivo, um hardware ou até mesmo um local, como uma sala inteligente (Kajimoto et al., 2018).

Estes sistemas inteligentes, ambos sistemas físicos reais e os dados digitais virtuais fundem-se em sistemas físicos cibernéticos (*CPS*). Estes sistemas ciberfísicos podem ser, por exemplo, a utilização de pequenos sensores na vida de cada um de nós. Tal como, a utilização do telemóvel para ligar os eletrodomésticos à distância, as aplicações que controlam gastos de energia e obtenção de dados do estado de equipamentos que precisem ou não de manutenção. A utilização de uma *fitband*, por exemplo, que vai captar informações sobre os nossos movimentos, acordados ou quando estamos a dormir, utilizando esses dados para analisar os dados dessas atividades e os nossos hábitos para promover uma vida saudável (Schneier, 2015).

Existem vários tipos de sensores que podem fazer parte de um espaço físico cibernético e que podem ser agregados numa pedreira inteligente. Com a melhoria na computação e a comunicação entre os *CPS*, a capacidade de organização de informação obtida é ainda maior, isto é, as imagens e informações virtuais são captadas e transportadas durante o processo de produção. As máquinas e sistemas inteligentes estão em rede e reagem de acordo com estímulos internos e externos e de acordo com dados de comportamentos anteriormente captados (Bartnitzki, 2017).

Durante as operações a céu aberto, as redes telefónicas facilitam a comunicação e uma vez que as mesmas são à superfície, não existem interferências. Estes sistemas de captação de dados podem captar uma ampla quantidade de informações através de sensores de temperatura, pressões, fluxos de líquido de gás, movimento, vibração, proximidade, sistemas de campos elétricos e magnéticos, entre outras condições físicas. Isso pode incluir a deteção de tensões nos elementos de suporte do solo e movimento do solo para monitorizar

os processos de escavação e fornecer avisos antecipados de uma possível falha iminente (Costner et al.,2019).

Numa pedreira inteligente podemos pôr em prática a utilização de máquinas com sensores capazes de transmitir numa rede as informações captadas. Os sensores são as principais opções para a automação das máquinas. Têm sido usados para controlar e monitorizar aplicações em máquinas e em sistemas facilitando a capacidade de resposta em qualquer situação. Posteriormente as informações são guardadas em bases de dados em que simultaneamente, os computadores ligados à rede têm acesso.

2.3 Big Data

Uma grande quantidade de empresas estão a ser reformuladas através da existência do *Big Data*. Como por exemplo, na aquisição de bilhetes. Hoje em dia, existe a possibilidade de comprar bilhetes online, outro exemplo, é na astronomia, que utilizou *Big Data* pela primeira vez nos anos 2000, e assim, marcou o termo *Big Data*. O conceito está a evoluir para todas as áreas de atividade humana. *Big Data*, não é sobre tentar ensinar um computador para pensar como um humano. Em vez disso, consiste em aplicar matemática para uma quantidade de dados para inferir probabilidades, como por exemplo, a probabilidade de um e-mail ser spam (Mayer-Schönberger et al., 2013).

Os sistemas tradicionais de armazenamento e análise de dados ficam aquém para o desenvolvimento eficiente das atividades. O *Big Data* consiste num sistema de conjunto de arquivos, num determinado local (Suhaib, 2019). O seu desenvolvimento tecnológico desempenhou um papel fundamental no crescimento e sucesso do armazenamento dos dados digitais. Assim o *Big Data*, diminuiu as barreiras tecnológicas ao reduzir lacuna de comunicação e aumentando a disponibilidade de dados em formato digital (Gandomi et al., 2015).

Com o objetivo de explorar o potencial da tecnologia *Big Data* como parte da tecnologia 4.0 é necessário ter em atenção os obstáculos. Esses obstáculos incluem enfrentar uma grande quantidade de dados não estruturados que chegam de diferentes dispositivos, gestão de recursos e entrega dos resultados em sistemas adequados (Gokalp et al.,2016).

Esta tecnologia permite controlar a produção em tempo real, isto é, essas informações passam para sistemas ciberfísicos, ligados a uma *cloud* que vai armazenar um grande volume de dados complexos e desvinculados de fontes autónomas, como sensores por exemplo.

Usar a *cloud* significa confiar dados valiosos a um provedor de serviços distante que pode estar sujeito a quedas de energia ou outras interrupções. “Eu uso serviços em nuvem para muitas coisas, mas sempre mantenho uma cópia local de dados e *software* cientificamente importantes” (Mayer-Schönberger et al., 2013).

As características básicas do *Big Data* podem ser representadas por um modelo 3V: volume, velocidade e variedade. O primeiro, o volume, representa a grande quantidade de informações, que também vai representar um desafio para grandes empresas em termos de organização. A velocidade de entrada de grandes quantidades de dados está ligada à capacidade dos sistemas de informação e as formas de exploração do *Big Data* em tempo real. Sendo uma quantidade grande de dados a entrar também a variedade de dados é maior. Os dados podem ser divididos em texto, números, dados pessoais, entre outros (Latinović et al., 2016).

Esta nova tecnologia de informação pode trazer, melhorias do tempo necessário para realizar uma tarefa e mais fácil acesso a informações durante todo o processamento do material numa indústria extrativa. As tarefas numa instalação industrial, a serem realizadas com a ajuda do *Big Data* tornam-se mais fáceis na medida em que as informações ficam armazenadas numa *cloud* em que os principais intervenientes podem ter acesso, melhorando a organização de dados e tomadas de decisão em tempo real. Isso evita possíveis erros e previsão de ações, diminuindo o tempo de processo e mantendo os lucros positivos.

2.4 Segurança para os trabalhadores

Estatísticas de incidentes indicam que os trabalhadores na área da construção e extração incorrem sistematicamente em mais lesões fatais do que em outras indústrias. Apesar dos esforços para melhorar o desempenho da segurança, o setor da construção e exploração mineral continua a contabilizar taxas desproporcionais de acidentes responsáveis pela maioria das mortes. Assim, estratégias de intervenção inovadoras estão continuamente a ser exploradas por profissionais, com o objetivo de melhorar a segurança durante as atividades (Song et al., 2020).

A digitalização emergente na indústria extrativa oferece novas possibilidades para aumentar a produtividade e, ao mesmo tempo, pode criar locais de trabalho estimulantes e um bom ambiente de trabalho. Sensores e o uso extensivo de técnicas de imagem permitem aos trabalhadores a gestão da atividade na sala de controlo. Devemos também considerar os riscos envolventes, aumento de estresse e limites entre a vida profissional e pessoal. Se a segurança for alcançada por meio de supervisão constante, esse pode ser um preço muito

alto a pagar. Essas questões devem ser consideradas se quisermos criar locais de trabalho atraentes que possam aumentar a procura de trabalho nesta futura indústria tecnológica (Löow et al., 2019).

Com a globalização e os avanços da tecnologia tornou-se imperativo para a sobrevivência das empresas não só serem lucrativas, mas apresentarem uma boa imagem, o que tem motivado a implantação de práticas de segurança pois podem diminuir perdas humanas, com o uso de técnicas como prevenção de acidentes. Isso pode ser definido como um processo de identificação e correlação de potenciais acidentes, antes que eles resultem numa lesão que possa originar também perdas financeiras (Mendes et al., 2019).

2.5 Ambiente e sustentabilidade

A sustentabilidade faz parte do conceito 4.0. Sendo que a situação ideal de sustentabilidade ambiental seria que os recursos naturais se regenerassem e fossem utilizados sem comprometer o ciclo de produção. Durante o processo de produção, ocorre o desgaste das máquinas, necessidade de manutenções, falhas em peças. E com a tecnologia 4.0 conseguimos prever (Oláh et al., 2020).

Com a tecnologia 4.0, a previsão de falhas, o controlo em tempo real da necessidade de manutenções e de toda a atividade da máquina podem evitar o desgaste tão acentuado e a necessidade de substituição das máquinas. Se estivermos a falar de um *Dumper*, que esteja, por exemplo com alguma falha em que esteja a derramar óleo pelo caminho por onde passa, podemos com a troca de informações e dados em tempo real evitar que isso aconteça ou pelo menos solucionar logo o problema.

O objetivo é utilizar os recursos naturais de forma mais eficiente e manter o consumo dentro dos limites normais do planeta, ao mesmo tempo que vai contribuir para a redução das emissões de gases de efeito estufa e promover a economia circular, o que nem sempre é possível (Berg et al., 2021).

A opção de usar energias renováveis também é uma opção mais sustentável na indústria. Como a utilização da energia eólica ou painéis fotovoltaicos como fonte de energia e ainda novas fontes de energias para equipamentos de transporte.

2.6 Futuro da indústria extrativa- Programas de investimento para a Indústria 4.0

Cada vez mais as empresas são obrigadas a adotar estratégias e medidas para se tornarem mais competitivas, apostando em tecnologias que ajudam nos processos de produção, no tratamento do material extraído e na comunicação entre os trabalhadores.

Na Alemanha, num evento realizado em 2011, anteriormente citado, Hannover Messe, a comissão europeia criou uma plataforma que favorecia o contacto de diferentes iniciativas com o propósito de facilitar o apoio financeiro. Esta plataforma só se iniciou em 2016, com o principal objetivo de unir e partilhar tecnologias inovadoras.

O programa alemão, *Industry 4.0* e outras iniciativas internacionais, como por exemplo, *Smart Manufacturing*, EUA e *Smart Factory*, Coreia do Sul, pretendem continuamente, transformar a força de trabalho industrial e seu ambiente de trabalho. Isso terá implicações significativas na natureza do trabalho na indústria, uma vez que a Indústria 4.0 transformará o projeto, a manufatura, a operação e o serviço de produtos e sistemas de produção (Romero et al., 2016).

A Comissão Europeia tem vindo a gerar oportunidades de investimento de fundos estruturais europeus para as PME (pequenas e médias empresas). Investimento numa rede europeia *Digital Innovation Hubs*, para testarem sistemas digitais e colaborativos no suporte a integração das cadeias de valor. E ainda melhorar a legislação dos dados digitais.²

O IAPMEI, agência para a competitividade e inovação, tem como iniciativa a Indústria 4.0 e tem como objetivo gerar condições para o desenvolvimento da indústria e serviços nacionais no ramo da Economia Digital. Esta iniciativa encontra-se na fase 2, em que assenta em três eixos, generalizar, capacitar e assimilar.³

O COMPETE 2020, tem como objetivo melhorar a competitividade e a internacionalização da economia portuguesa. Este programa, COMPETE 2020 cofinanciou algumas empresas de indústria extrativa, é o exemplo da Solancis que concretizou um investimento para transformar a empresa numa indústria 4.0. Com o apoio financeiro foi possível aumentar a produção, automatização e a inovação, sendo possível alcançar objetivos mais surpreendentes e manter um lugar cativo e competitivo diante as outras

² <https://cotecportugal.pt/pt/projects/digital-innovation-hubs/>

³ <https://www.iapmei.pt/>

empresas no mercado. Este programa tem como objetivo melhorar a competitividade e a internalização da economia portuguesa.⁴

2.7 Contexto da indústria extrativa em Portugal

A indústria extrativa de produção de agregados em Portugal, gera material para outras indústrias, isto é, para a construção civil, construção de estradas, pontes e outras indústrias.

A procura dirigida a este setor depende diretamente do grau de desenvolvimento da economia, da conjuntura económica e do montante das despesas públicas, ou seja, mais do que, em qualquer outro setor de atividade, a sua evolução depende do montante e das fases de investimentos em outros setores.

Com a adesão à Comunidade Económica Europeia (CEE) em 1986, Portugal beneficiou de importantes fundos estruturais, exemplo, FEDER, para promover o desenvolvimento das suas infraestruturas, o que levou a um forte desenvolvimento do setor da construção civil e obras públicas sobretudo durante a década de 90 (Baganha et al., 2001).

Analizou-se, na figura 2, dados estatísticos da DGEG (Direção Geral de Energia e Geologia) de calcário para a construção civil, obras públicas e margem para cimento. Os valores no gráfico estão expressos em termos de toneladas e valor de produção.

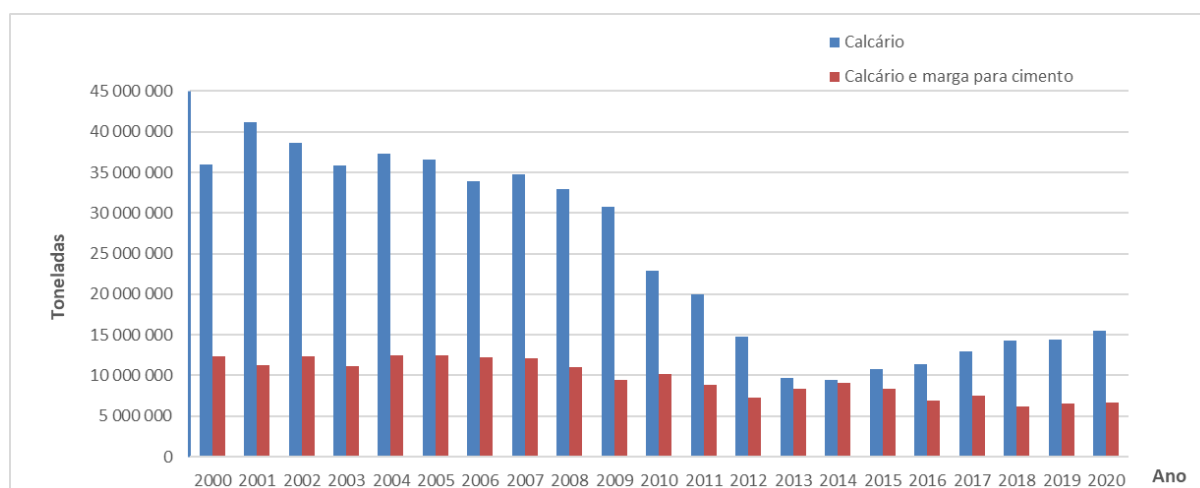


Figura 2 - Gráfico com valores de produção do calcário no período entre 1999-2017 (dgeg.gov.pt, consultado setembro 2021)

⁴ <https://www.compete2020.gov.pt/>

Os valores de produção em 2001 chegaram ao valor máximo de 42 milhões de toneladas e o valor mínimo atingido em 2014, 10 milhões de toneladas. No ano de 2008, que coincidiu com o início da crise económica em Portugal, deu início ao decréscimo de produção que continuou até o ano de 2013, em que o valor esteve em 10 milhões de toneladas. A partir desse ano e até 2020, a tendência foi manter a quantidade no calcário para cimento e aumentar para o calcário em geral.

Para proceder a esta análise, tomou-se como referência o ano de 2007, por representar a altura em que o efeito da crise financeira se fez sentir em Portugal. Para reforçar a análise destes dados, utilizou-se dados do INE (Instituto Nacional de Estatística) relativos ao número de edifícios concluídos; à produção e emprego na construção civil e obras públicas; e as vendas da indústria destinatária das substâncias em estudo. Em 2014 a economia portuguesa inverteu a tendência, observando-se o crescimento do PIB. O que se refletiu, nas vendas de cimento para a construção civil, promovidas, também, pelo aumento das exportações (Horgan, 2020).

De acordo com a Figura 3 consegue-se observar que existe uma subida acentuada em 2003 do custo médio dos agregados, pois acredita-se que houve um incentivo nesse ano devido ao Campeonato Europeu de Futebol de 2004, construção de novas estradas e outras infraestruturas, mas a tendência é manter o valor unitário de 2,5 e 3 euros na globalidade dos anos. A partir de 2016 o valor começou a subir, sem apresentar variações significativas.

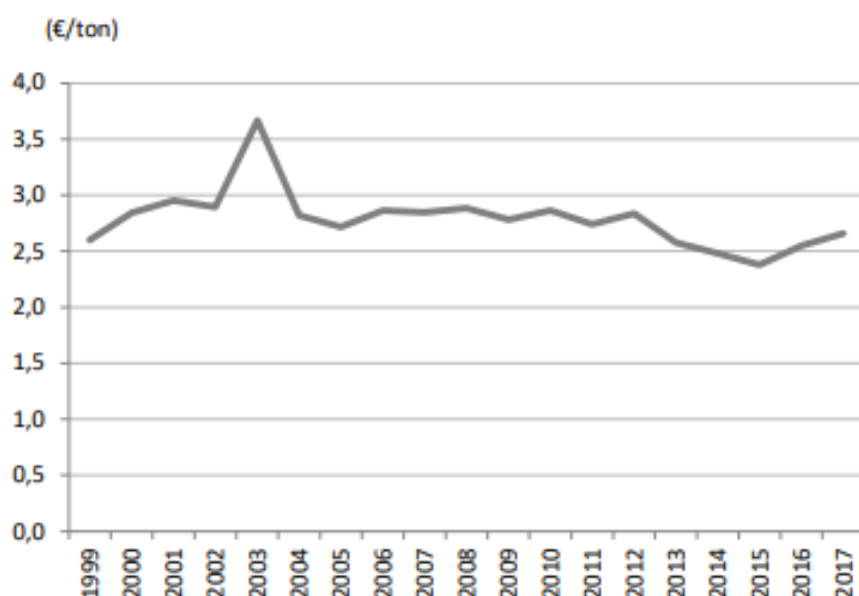


Figura 3 - Gráfico com a variação do custo médio dos agregados no período entre 1999-2017(dgeg.gov.pt, consultado em setembro 2021)

Como se pode observar na Figura 4, existem atualmente três pedreiras na região de Penela, uma em Vale Longo, o caso de estudo em questão, a pedreira Preguilha, situada na freguesia da Cumeeira e ainda na mesma freguesia uma pedreira com nome de Elimur. Podemos observar que no concelho de Penela, as únicas pedreiras estão relativamente perto, representando assim, uma zona de influência, sendo as mesmas fontes de trabalhos para algumas pessoas nesta região.



Figura 4 - Localização das Pedreiras de agregados no concelho de Penela (Google Earth, 2021)

3. Atividades de pedreira

3.1 Considerações iniciais

A lavra engloba todo o conjunto, sistematização e coordenação de operações unitárias de aproveitamento do depósito mineral ou massa mineral. O método de lavra deve definir os diversos ciclos de trabalho e a sequência da evolução da lavra para, em função do tempo, viabilizar o melhor seguimento e aproveitamento possível do recurso em causa (Curi, 2017). Estas operações consistem na fase de perfuração, carregamento, detonação, carga, transporte e por fim a britagem e classificação.

Os projetos de exploração são uma corrida contra o tempo e a duração do projeto pode variar de vários meses a vários anos. Normalmente a mobilização imediata dos equipamentos ocorre uma vez que o contrato foi adjudicado e muitas vezes existem penalidades envolvidas se o original cronograma de atividades não se mantiver até ao final do projeto (Heiniõ, 1999). Portanto, escolher o método de perfuração e desmonte adequado vai contribuir para o sucesso na realização das atividades seguintes.

A evolução e sustentabilidade operacional, financeira, de saúde e segurança e ambiental está diretamente ligada à garantia de que os recursos são utilizados de maneira ideal e produtiva. A remoção das ineficiências e a abordagem da melhoria nas operações começam com medições precisas e em tempo real com o decorrer de todo o processo.

A exploração numa indústria extrativa segue um ciclo específico, como é exemplificado na figura 5:



Figura 5 - Ciclo das operações mineiras na exploração de uma pedreira de agregados

3.2 Planeamento e Perfuração

No processo de plano de início de uma exploração, adquirir um mapa geológico é invariavelmente o primeiro passo para qualquer plano de exploração e desmonte e ainda ensaios e sondagens *in situ*, são importantes para dar início a todas as fases de exploração. O mapa e a investigação *in situ*, vão fornecer os limites da exploração e fornece os dados essenciais para a projeção de possíveis modelos de exploração (Marjoribanks, 2010). Estes dados apresentam um conjunto de características que permitirá uma previsão apoiada de detalhes do que se vai observar e realizar num plano durante todo o processo de lavra.

A correta execução da perfuração, assegura o correto posicionamento do furo segundo o plano de fogo, mantendo-se o padrão como planeado inicialmente (Koppe, 2007). É a primeira atividade para dar o início ao plano de desmonte, assume bastante importância, sendo que todas as atividades a seguir vão ser fortemente condicionadas.

3.2.1 Método de perfuração

As perfuradoras são equipamentos, geralmente sobre lagartas, para executarem um melhor movimento sobre o material, possível. O equipamento possui uma grande capacidade de movimentos para a colocação exata da posição da vara, de acordo com o objetivo do plano de perfuração (Gonçalves, 2017). No processo de perfuração, a ponta da ferramenta é cravada na rocha, sendo que gira ligeiramente, escavando o material (Watanabe, 2003).

3.3 Pega de Fogo

O desmonte é um processo de fragmentação do maciço rochoso através de explosivos. Aqui, o papel mais importante é o plano do padrão de pega de fogo e o desempenho dos explosivos de acordo com o objetivo do produto final.

Os explosivos, por sua vez, são usados para produzir um volume de gás em rápida expansão que exerce uma pressão repentina sobre o maciço, originando a quebra da rocha (Balasubramanian, 2017). A fragmentação da rocha por explosivos tem sido o motivo de preocupação de muitos trabalhos de pesquisa, por ser considerado uma das operações mais importantes numa pedreira, uma vez que afeta os custos de perfuração e a eficiência do resto das operações, como o carregamento, transporte e britagem (Faramarzi, 2013).

O desmorte do material rochoso é uma atividade complexa que exige habilidades especiais por parte da pessoa responsável pela preparação dos explosivos, mas também para os trabalhadores envolvidos nas atividades na frente de pedreira. O plano da pega de fogo varia de pedreira para pedreira, pois vai depender do material rochoso e o propósito de mineral. A realização de modelos digitais de pegas de fogo ajudam significativamente os técnicos a simular e analisar com precisão diferentes esquemas de pega e escolher o mais adequado (Okeke, 2015).

A maneira como é realizada o padrão de furação tem um papel fundamental para a realização de uma pega de fogo sem desperdícios. São planejados padrões, que consistem em linhas paralelas na frente de desmorte, sendo que o padrão mais eficaz é o padrão triangular, que fornece a distribuição ideal da energia de explosão na rocha (Altiti et al., 2021). A seleção do padrão de perfuração varia com o tipo e tamanho da broca usada, profundidade de furos, característica da rocha, quantidade e a velocidade de explosão (Balasubramanian, 2017). A pessoa encarregada para realizar o plano de desmorte determina todos os parâmetros anteriormente mencionados e ainda o diâmetro da broca a usar durante a fase de perfuração. Dependendo das especificações do trabalho, o furo terá de ter uma profundidade específica e o sondador deve medir e registrar as condições de todos os furos durante a operação. Após a execução do plano de perfuração, o furo tem de ser carregado com explosivos.

Os explosivos são concentrações de fontes de energia química que podem ser utilizados para uma série de aplicações. Diferentes explosivos requerem diferentes quantidades de energia para detonar. Normalmente, quatro tipos de explosivos são usados em operações de desmorte a céu aberto. São usadas, misturas, secas, emulsões e ANFO (nitrato de amónio/óleo) A seleção de explosivos depende de muitos fatores. Os principais incluem o diâmetro, pressão hidrostática, temperatura, sensibilidade, resistência a água, procedimentos no carregamento e vida útil (Balasubramanian, 2017).

Os explosivos são encomendados por empresas, em Portugal, como:

- MaxamPor (Emulsão encartuchada, ANFO, detonadores);
- SPEL (Gelatina, Amonóleo, Gelamonite);
- SEC/Orica (Gelatina, Emulex).

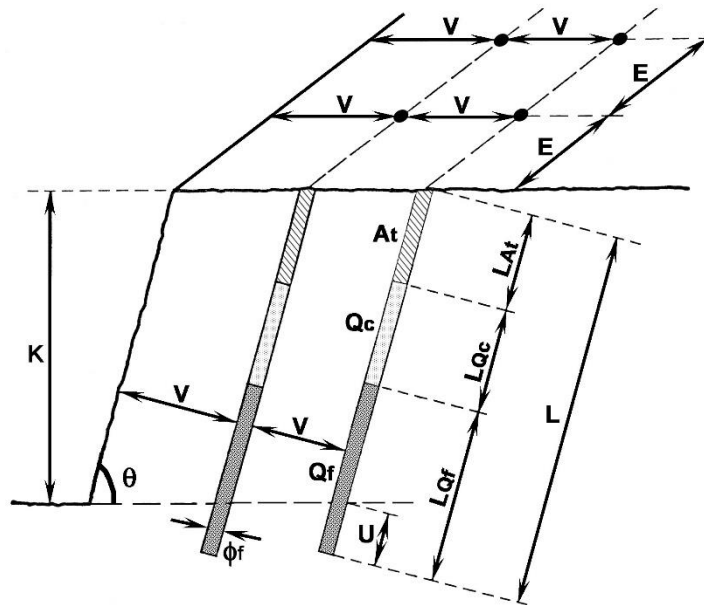
Para além do tipo de explosivo, o detonador é um dispositivo usado para ativar o explosivo. Os detonadores podem ser iniciados por meios químicos, mecânicos ou elétricos (Balasubramanian, 2017). Estes podem ser pirotécnicos (não elétricos), elétricos

(instantâneos e com retardo), Nonel (instantâneos e com retardo) e eletrônicos (com programação do tempo de retardo).

Nos explosivos existem os de ANFO, Hidrogéis e Emulsões para pedreiras a céu aberto. O explosivo ANFO é uma substância inorgânica de cor branca em que a temperatura de fusão é de 160,6°C. Isoladamente, o ANFO não é explosivo, mas juntamente com combustível adquire essa propriedade (Jimeno et al.,2003).

Existe ainda, uma variedade de produtos emulsificados e géis, que são especificamente projetados para furos de explosão, em meios húmidos. Estas variedades de produtos foram desenvolvidas para melhorar a densidade, sensibilidade e resistência à água (Okeke, 2015).

A Figura 6 representa uma pega de fogo e os seus parâmetros:



Legenda:

\emptyset - Diâmetro do furo, ou milímetros;

V- Afastamento, distância entre o furo e a frente, em metros;

E- Espaçamento entre os furos numa fila, em metros;

K- Altura da bancada em metros;

L- Profundidade do furo em metros;

At- Atacamento, comprimento em metros na parte superior, preenchido com material inerte;

U- Subfuração, comprimento no furo abaixo do piso da bancada, em metros;

α - Ângulo correspondente à inclinação do furo, em graus;

QF- Comprimento da carga de fundo em metros;

QC- Comprimento da carga de coluna representa o resto de explosivo que é aplicado em cima da QC, em metros.

Figura 6 - Parâmetros utilizados no dimensionamento de uma pega de fogo

Durante a explosão, é necessário que haja um controlo das vibrações provocadas pelo disparo, geralmente, coloca-se um ou mais equipamentos para a medição das vibrações. Como por exemplo, os sismógrafos, geralmente próximos de edificações mais próximas ao local de explosão, nomeadamente junto aos escritórios, estaleiros, instalações sociais, oficinas ou mesmo em povoações que se localizem nas proximidades da pedreira (Póvoa, 2013).

Segundo Póvoa (2013), após a detonação e verificação de conformidade de segurança, o sinal sonoro é outra vez, ativado e desta maneira, informa a conclusão da operação de desmonte, autorizando a retoma de circulação pedonal e rodoviária dentro da zona intervencionada e por fim, a retoma dos trabalhos.

3.3.1 Taqueamento

Esta operação tem como objetivo fragmentar blocos de rocha que após o desmonte, com dimensões superiores à capacidade de carga da máquina transportadora e da boca do britador da estação de britagem. Tanto se pode recorrer à utilização de um martelo manual, com a colocação de um explosivo por cima do bloco como fazer um furo na rocha e introduzir o suficiente explosivo no furo para obter a fragmentação da mesma.

Os métodos que atualmente se utiliza após desmonte, para diminuição de blocos, classificam-se em dois grupos. O primeiro, onde se faz um furo no bloco e introduz-se um explosivo ou por meios mecânicos especiais (Jimeno et al., 2003).

Perfura-se o bloco com um martelo manual, abrindo um furo de pequena dimensão no centro do bloco. Também existe a opção de fragmentar colocando o explosivo na superfície por baixo do bloco. A principal vantagem é que evita grandes projeções de material e é de execução rápida.

Na figura 7, está representado o processo de taqueamento através da introdução de um explosivo:

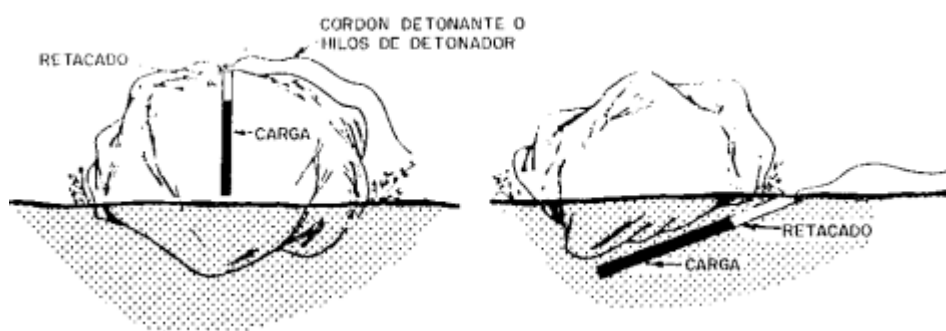


Figura 7 - Exemplo de procedimentos da operação de taqueamento de blocos com recurso a explosivos (Jimeno 2003)

Pode-se recorrer à utilização de martelos hidráulicos, onde o martelo através do impacto vai criando fissuras na rocha, até que ocorre a fragmentação (Jimeno et al., 2003). Como representado na figura 8.



Figura 8 - Exemplo do processo de taqueamento efetuado por um martelo hidráulico

Estes processos são por sua vez, dispendiosos porque requerem gastos de combustível e de explosivo extra. Seria um processo a evitar, caso a pega de fogo tivesse sido devidamente programada.

3.4 Sistemas de Carga e Transporte

A importância dos camiões de transporte na história da exploração a céu aberto foi sempre crescente. Trabalho manual, carrinhos de mão, veículos puxados por cavalos e carros de minério eram os principais meios de equipamentos de terraplanagem até o século XX. O desenvolvimento do motor de combustão interno levou ao desenvolvimento mais tarde, do *dumper* de transporte nesta indústria. Hoje em dia, a eficiência e a maior capacidade de carga dos camiões de transporte elétrico e movidos a diesel, tornaram-se o método preferido para o transporte na extração a céu aberto, substituindo gradualmente o ferroviário (Altit et al., 2021).

É possível verificar que a operação de carga e transporte é bastante representativa economicamente de acordo com o excessivo gasto de combustível. Contudo é a penúltima do processo de extração e transformação, significando que a sua rentabilidade depende da qualidade das operações anteriores (Monteiro, 2014).

Inicialmente, após o desmonte, os fragmentos de rocha encontram-se em pilhas com distribuição granulométrica aleatória na frente da bancada, para depois serem movimentados pelos equipamentos, tais como, pás frontais ou pás giratórias. As mesmas, possibilitam a separação granulométrica e carga do material. Atualmente, as atividades de pedreira a céu aberto são realizadas com pás carregadoras giratórias sobre lagartas ou pás carregadoras

frontais pneumáticas. No seguimento desta tese, vou referir como pá giratória e pá frontal respetivamente.

Em pedreiras, as pás giratórias e pás frontais são mais comumente usadas. A seleção da máquina certa para o trabalho depende do material de alimentação, dos objetivos da produção, das condições operacionais e das operações seguintes. As vantagens da pá frontal é a sua mobilidade, versatilidade e grande capacidade do balde, o que facilita o carregamento, transporte a curta distância e preparação de pilha (Heiniõ, 1999).

O equipamento de carregamento é combinado com *dumpers* de transporte que podem ser carregados em 3-5 ciclos da pá giratória. As pás giratórias e frontais são frequentemente usadas para carregar, transportar e despejar material em britadores ou carregar a partir de pilhas de stock perto dos britadores, caso seja necessário (Altiti et al., 2021). Quando a rocha já esta fragmentada, após a pega de fogo, é necessário ser carregada para os *dumpers* que depois passam à fase seguinte, a fase de tratamento e valorização.

3.4.1 Pá frontal e pá giratória

As pás frontais são frequentemente usadas como equipamento de carregamento de suporte, por causa da sua facilidade em realizar movimentos, estas podem ser movimentadas mais prontamente para cobrir o tempo de inatividade não planeado de uma giratória ou para limpeza de pequenas quantidades de restos de rocha. Para limpeza final e para preparar solo para detonação (Hardy, 2007). Na figura 9, consegue-se observar uma pá frontal a depositar material num *dumper*.



Figura 9 - Carregamento da Pá Frontal e Dumper (mediastorehouse.com/galleries/dumper-truck (setembro 2021))

Os operadores de pás giratórias preparam o pavimento onde vão circular e a partir daí começam a seleção do material para o carregamento. São máquinas robustas e versáteis que

foram construídas para terem um tempo de vida útil duradouro. A quantidade a recolher vai depender da capacidade do balde e é importante que a máquina mantenha a mesma trajetória para que as manobras sejam mais fáceis, constantes e eficazes. Segundo Heiniõ (1999), as pás giratórias operam em superfícies irregulares, movem-se tão rápidas quanto as pás frontais, não tem tanta capacidade para recolha de material, sendo que precisam uma máquina de recolha para depositar material. Quando a pá da giratória se encontra cheia, o material é logo a seguir depositado no *dumper*. Na figura 10, consegue-se observar uma pá giratória sobre material, a proceder à recolha do material.



Figura 10 - Exemplo de operação com Pá Giratória (Hitachi.com)(setembro 2021)

Se a fragmentação pós-desmonte é grosseira, será reduzido o coeficiente de enchimento do balde, diminuindo então a quantidade de material que a máquina poderá movimentar no mesmo ciclo. Este facto terá implicações na produtividade dos equipamentos de transporte uma vez que é necessário maior número de ciclos para se atingir então a capacidade total deste equipamento, aumentando os seus tempos de espera na operação de carga (Oliveira, 2020).

3.4.2 Dumper

O *dumper* é o meio de transporte de material mais frequente numa pedreira a céu aberto, sendo um veículo com grandes capacidades de transporte de material, possibilita rapidez e vence mais facilmente inclinações. É mais utilizado para pequenas e médias distâncias e foram construídos para conseguirem lidar com materiais de diversas densidades e dimensões.

Estas máquinas são dimensionadas para trabalhos pesados, de grande capacidade. Apresentam também certas características mecânicas que os tornam mais resistentes e

robustos. A capacidade das caixas pode variar desde 20 até 150 toneladas, ou mesmo mais de 300 toneladas, podendo atingir velocidades da ordem dos 60km/h. São equipamentos de custo elevado e só é justificado se o volume de rochas a movimentar, seja também elevado (Couto, 1990). Os *dumpers* na sua maioria são a diesel, no entanto, existem *dumpers* com tecnologias mais sustentáveis, com a utilização de energia elétrica por cabos (Kennedy, 1990). Como é o exemplo de *dumpers* com sistemas de cabos elétricos, *trolley power assist*, estes são meios de sistemas autónomos. Podem percorrer distâncias de transporte mais longas e declives mais acentuados (Kennedy, 1990). O *trolley power assist* consiste numa linha elétrica com corrente ligada ao *dumper*. A energia elétrica, da linha de alta tensão, é direcionada para as rodas motrizes por meio de um equipamento de controlo. O motor a diesel é usado para impulsionar o *dumper* para uma zona plana na estrada para depois possibilitar o contato do mesmo com a corrente elétrica (Radlowski, 1988).

Na figura 11 está representado um exemplo de um *dumper* com sistema de *trolley power assist*.



Figura 11 - Dumper com Sistema Trolley Power Assist (:new.abb.com)(setembro 2021)

3.5 Beneficiação do material rochoso

A fragmentação é o primeiro processo mecânico após o desmonte de rocha. Envolve a redução dos fragmentos de rocha para tamanhos menores. A produção dos tamanhos economicamente desejáveis é o principal objetivo na indústria de produção de agregados e por sua vez, o tipo de britador a ser usado para um determinado trabalho depende da natureza do material a ser fragmentado, área de aplicação do material, custos de manutenção, consumo de energia, vibração, ruído e questões ambientais (Okechukwu et al., 2017). Para a realização desta fase, utilizam-se britadores, moinhos fragmentadores e telas de transporte para transporte do material dentro do circuito.

3.5.1 Britador, moinho, telas transportadoras

O projeto da planta de britagem requer informações exatas sobre a matéria-prima (dimensão dos blocos a fragmentar, abrasividade da rocha e dimensão dos produtos finais), além de qualquer outro requerimento feito pelo cliente. Isto permite criar uma planta geral para todo o processo, contudo os produtos podem variar de acordo com o pedido de cada cliente (Vergne, 2000).

Um circuito de britagem otimizado pode de fato, reduzir os gastos de energia no processo de redução do tamanho da rocha. Algumas etapas de britagem são necessárias na maioria do processamento de material rochoso, plantas de britagem, etapas, primária, secundária e terciária. Redução de tamanho com partículas grosseiras requer, comparativamente, menos energia do que com partículas mais finas (Dey, 2013). Nesta fase, o britador vai provocar fraturas na rocha até que a mesma se desintegra.

Segundo Dey (2013), por outro lado, existe também o processo de moagem do material, onde é utilizado em partículas com calibres menores e quando não existe mais a possibilidade de usar britador. Um exemplo mais utilizado, é o moinho de martelo que é geralmente considerado como um britador secundário. No entanto, para a produção de agregados utiliza-se os moinhos de fragmentação. Na figura 12, pode-se observar um circuito de britagem:

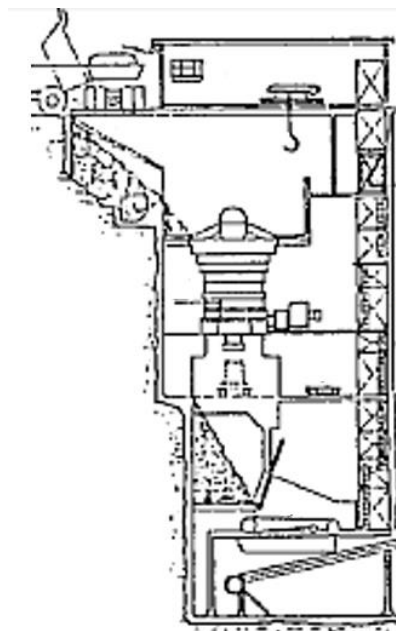


Figura 12 - Circuito de britagem

a) Moinhos de fragmentação

Como moinho de fragmentação para produção de agregados, usa-se um moinho de martelos ou fragmentador cônico. A concepção do fragmentador de cone derivou da necessidade de aumentar o volume da câmara de fragmentação do de maxilas, mantendo a mesma configuração geométrica absoluta. Dito de outro modo, promover um aumento de capacidade mantendo a mesma gama granulométrica de trabalho. O modo como se processa a fragmentação neste tipo de fragmentadores é inteiramente semelhante ao dos de maxilas, sendo para eles válida toda a análise efetuada em termos de esforços na câmara de trituração e de ângulo mordente (Leite, 1986).

Num moinho de martelos, a alimentação é introduzida dentro da câmara do britador, o material rochoso é despedaçado pelo impacto, com os martelos rotativos primeiro, e, em seguida, vai contra a superfície interna. A quebra do material é o principal método de fratura nos moinhos de martelo (Dey, 2013).

Segundo Dey (2013), as fraturas no material rochoso vai originar produção de vários tamanhos de partículas, sendo que isso vai ajudar a uma melhor distribuição de calibres e sempre mais finos que o calibre inicial. Isso é o que realmente ajuda a alcançar uma taxa de redução muito alta no moinho.

Na figura 13, esta representada o britador de martelos:

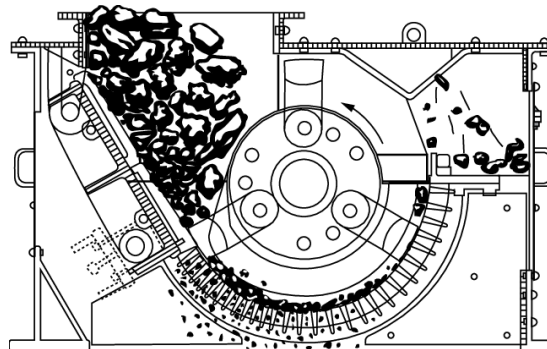


Figura 13 - Britador de martelos (researchgate.net)(setembro 2021)

b) Telas transportadoras

Durante a fase de concepção do projeto para o transporte de matérias-primas ou produtos acabados, a escolha do método deve ser a solução mais económica para o volume de material movimentado, com a inserção num projeto de pedreira. Tem uma grande flexibilidade de adaptação e de transporte de uma grande variedade de cargas (Ananth, et al., 2013).

A tela transportadora é usada como transporte contínuo na produção. Tem uma grande capacidade de material, longa distância de percurso, alta eficiência sendo assim uma operação suave no carregamento e descarregamento. Tornou-se um dos principais modos de transporte industrial juntamente com caminhões e linhas ferroviárias, tem sido muito utilizadas na indústria do carvão, portos, metalurgia e indústrias extrativas (Ji et al., 2020).

Este modo de transporte permite a redução da frota de *dumpers*, menos pessoal para manutenções e conseqüentemente não é necessário armazenamento de combustível pois o consumo de combustível é menor e diminui o consumo de pneus também (Radlowski, 1988). Inclusive, existe telas transportadoras que são encapsuladas, que permitem que o excesso de poeira no local, como se consegue observar nas figuras seguintes, não interfira com a produção nem com o bem-estar dos trabalhadores. As telas transportadoras, como representadas na figura 14, utilizam a energia elétrica e o custo da mesma, por sua vez é mais estável do que o custo do diesel.

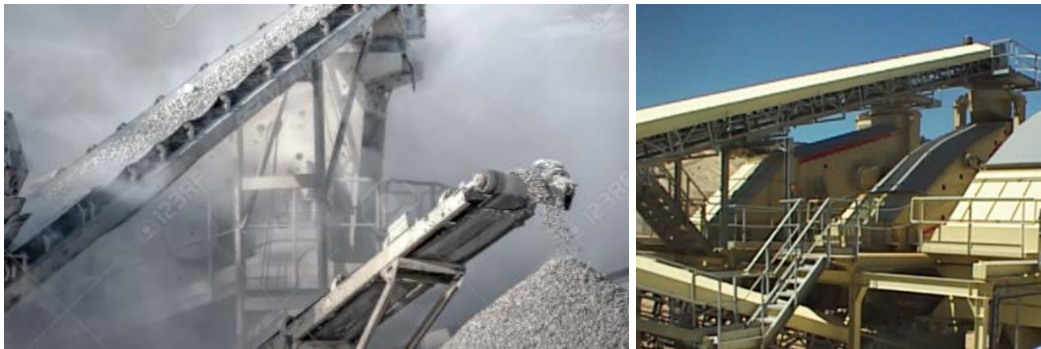


Figura 14 - Tela Transportadora (br.123rf.com) e tela encapsulada (assimagra.pt) (setembro 2021)

3.5.2 Classificação- Crivagem e separação

No processo de crivagem, numa indústria extrativa, é comum a utilização de estruturas metálicas de malha quadrada. Geralmente usa-se chapas metálicas perfuradas e grades de barras, paralelas entre si (Leite, 1986). As partículas passam pelas aberturas das grades e assim permite que haja separação de calibres. Utiliza-se telas de crivagem estáticas e vibratórias sendo que assim, telas com vibração permitem melhores resultados e, portanto, são as mais comumente utilizadas.

A tela é uma superfície com muitas aberturas com dimensões uniformes. As partículas quando chegam à superfície da tela, passam ou vão ser retidas, de acordo com o tamanho delas e como reagem à abertura das telas de crivagem. A sua eficiência passa pela separação adequada do material em tamanhos diferentes e pretendidos. Telas de vibração tem um

sistema de vibração que permite que as partículas saltem e voltem a entrar em contacto com a tela para terem a oportunidade de passar entre as aberturas ou não (Wills et al., 2006).

Dentro dos processos de crivagem, também existe a crivagem do material rochoso por via húmida que inclui a lavagem, com água, para remover as partículas finas dos agregados e para segregar as partículas de acordo com o tamanho. O material é armazenado de acordo com o tamanho e preparado para posterior uso de acordo com as suas especificações (Langer, 1993).

A seguir dá-se o processo de crivagem, o produto é separado para que depois seja vendido e é o que vai ditar as especificações do agregado e o futuro dele, esta é necessária para que exista uma série de produtos dentro de intervalos e tamanho especificados.

4. Caso de estudo - Pedreira de Vale Longo

4.1 Nota Introdutória

O presente trabalho teve como objetivo a análise das diferentes tecnologias e etapas de trabalho numa exploração a céu aberto. Desde o desmonte de rocha, carregamento e transporte até o posterior tratamento do material. Inicialmente, foi feita observação das atividades, depois foi feita uma análise mais profunda dos dados de produção, na área do ambiente e segurança também foram feitas algumas observações. Irá ser realizada uma descrição das atividades na empresa no que diz respeito à área da pedreira e respetivo enquadramento geológico que vai imperativamente condicionar todo o processo extrativo e ditar o seu futuro. Contudo, o seu futuro pode ser planeado de uma maneira mais eficiente, através de tecnologias com a função de promover um melhor aproveitamento do material, melhorar a segurança e não menos importante, preservar ou aumentar a longo prazo, os lucros.

4.2 Climatologia da região

Na Região de Coimbra o clima é geralmente caracterizado por ser quente e temperado. No gráfico da figura 15, durante o período de 1971-2000, o valor médio de temperatura foi no mês de julho, com 23°C e o menor valor médio, 9 °C, em janeiro. Registou-se uma temperatura média anual de 14 °C.

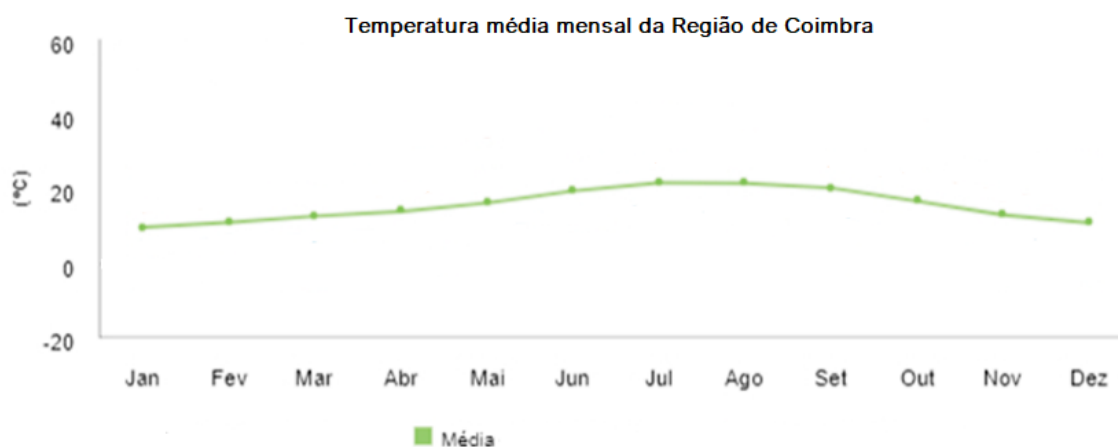


Figura 15 - Gráfico da temperatura média mensal da Região de Coimbra (1971-2000) (ipma.pt) (setembro 2021)

O valor anual da precipitação de acordo com o gráfico da figura 16, foi de 120mm, com o mês de dezembro e janeiro com 110mm, de precipitação média total. Os meses mais secos correspondem, aos meses de julho e agosto, com 10 e 11 mm de precipitação média.

O valor máximo de precipitação média diária foi de 75mm em setembro. Os três meses a seguir, outubro, novembro, dezembro apresentam precipitações diárias de 60mm a 64mm.

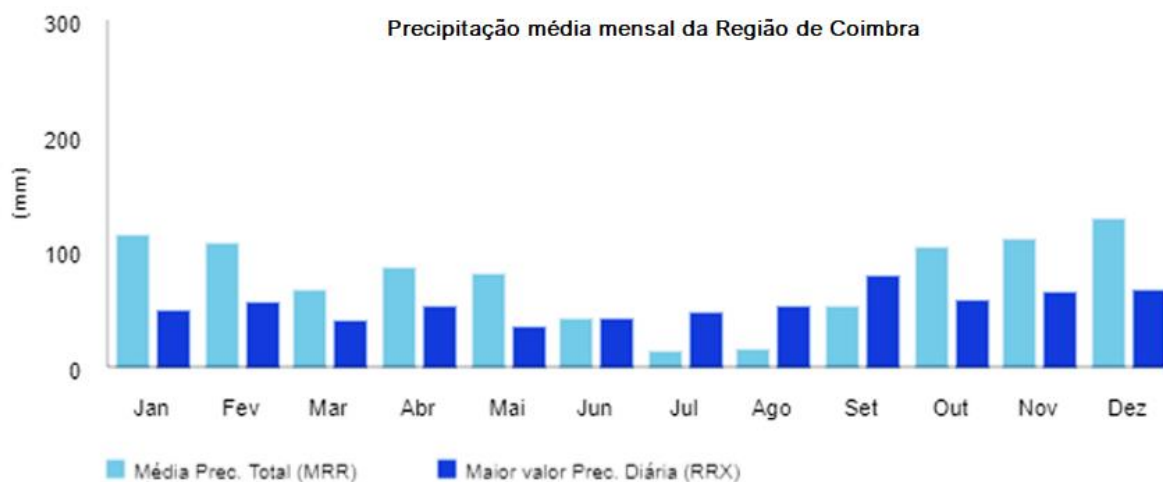


Figura 16 - Gráfico da precipitação média mensal (ipma.pt) (setembro 2021)

A caracterização do regime de ventos, teve como base as informações do Observatório Geofísico e Astronómico da Universidade de Coimbra. O período de dados obtidos corresponde desde 1971 a 2000. Na figura 17, os meses com ventos mais fortes correspondem a dezembro, janeiro e fevereiro em que os ventos sopraram fortes no quadrante SE, com a média de 10km/h. Os restantes meses apresentaram ventos na direção NW e relativamente mais fracos. A direção e intensidade dos ventos são importantes devido ao levantamento de poeiras. Com o fato, que os ventos são mais fortes no inverno, haveria possivelmente mais problemas com o levantamento de poeiras.

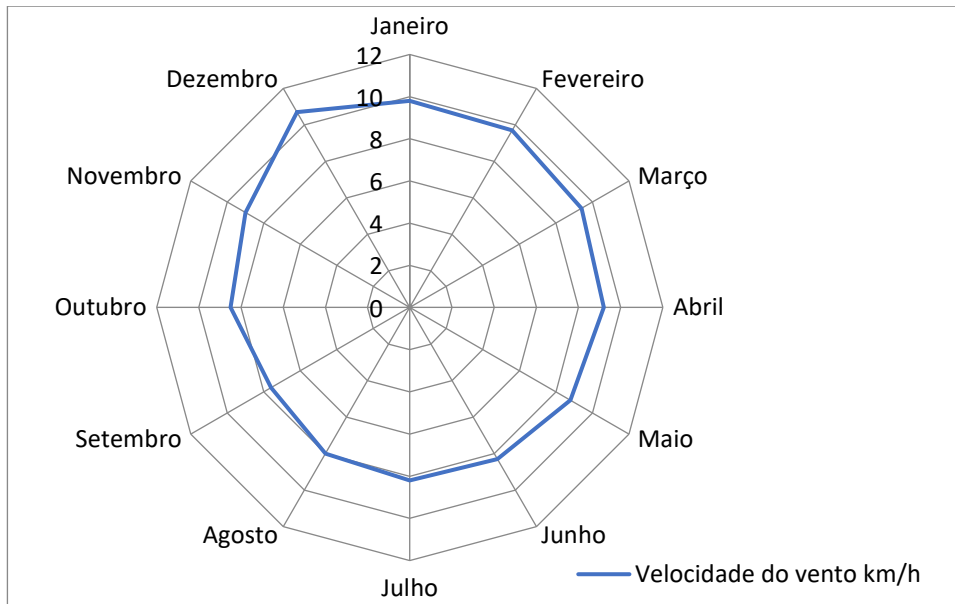


Figura 17 - Gráfico Radar sobre a velocidade do Vento mensal (<http://www.ci.uc.pt/iguc/>)(Outubro 2021)

Como podemos observar na figura 18, nos meses em que a velocidade do vento é maior, coincide com os meses mais chuvosos, o que, por sua vez diminui a propagação das poeiras na pedreira e ainda evita que estruturas locais sejam afetadas por este problema. Para além, das estruturas no local da pedreira temos também a possibilidade de aumento de poeiras e transporte através do vento, que possam afetar estruturas o estabelecimento ou casa mais perto, o que não é o caso.

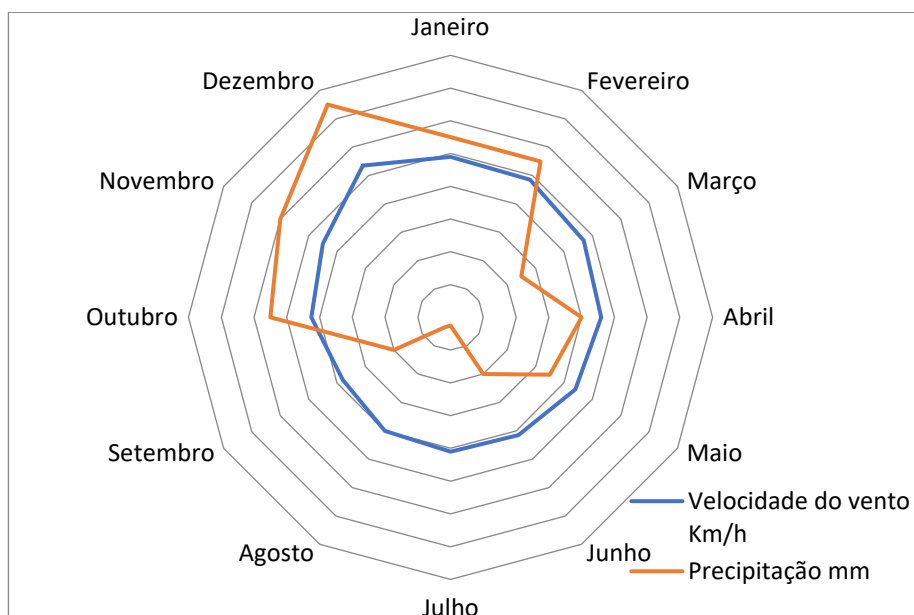


Figura 18 - Valores médios da velocidade do vento vs precipitação ao longo do ano (<http://www.ci.uc.pt/iguc/>)(Outubro 2021)

4.3 Enquadramento geográfico

A pedreira de Vale Longo, situa-se em Vale Longo, na freguesia de São Miguel, pertence ao concelho de Penela, distrito de Coimbra. A área total da pedreira é de 40,35 ha e situa-se num local distante de qualquer habitação, em que a habitação mais próxima esta a pouco mais de 1km. Existe uma parte da pedreira que excede a freguesia de São Miguel, pertencendo a Alvorge, concelho de Ansião, distrito de Leiria. A pedreira Vale Longo, segundo o plano diretor municipal localiza-se numa zona de recursos geológicos. Na figura 19, esta representado num círculo a vermelho, a localização da pedreira de Vale Longo.

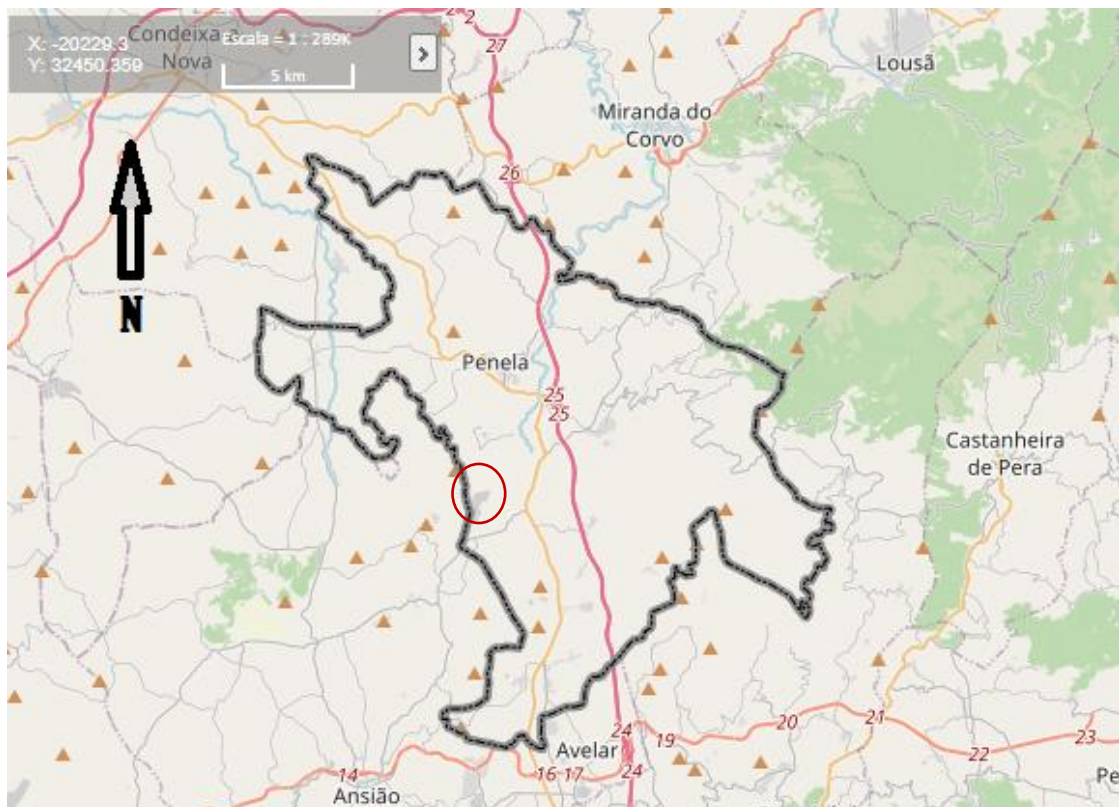
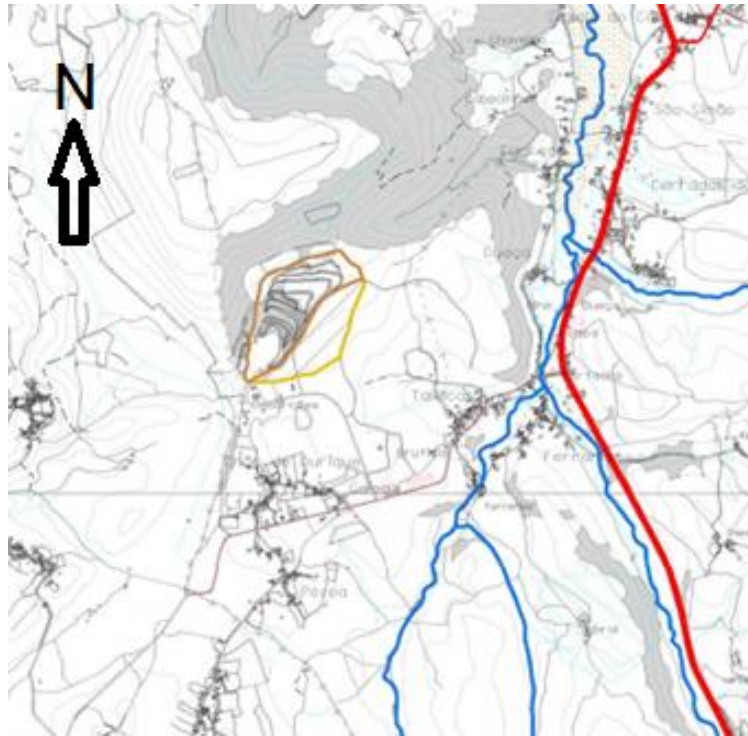


Figura 19 - Mapa com os limites do concelho de Penela (websig.cm-penela.pt)(setembro 2021)



SERVIDÕES E RESTRIÇÕES DE UTILIDADE PÚBLICA

Domínio Hídrico

 Leitões e margens dos cursos de água

Espaço afecto à Exploração de Recursos Geológicos

 Área de de Exploração Consolidada (recursos geológicos)

 Área de Exploração Complementar (recursos geológicos)

Recursos Ecológicos

 Leitões dos Cursos de Água

Rede Rodoviária Nacional e Regional

 Autoestrada (A)

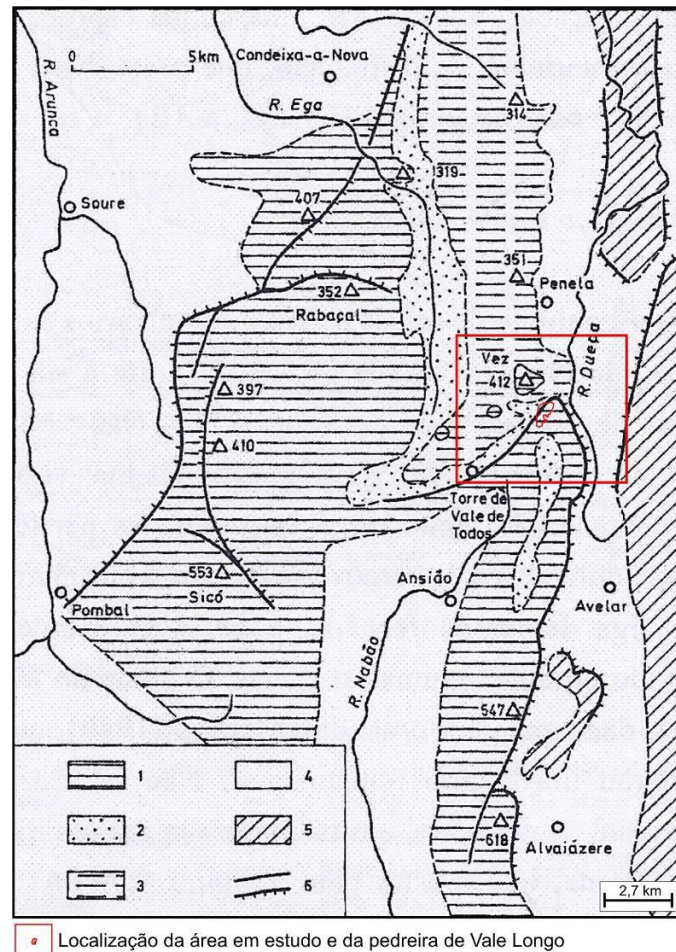
Figura 20 - Localização da pedreira de Vale Longo, estando assinalado a ocupação atual da pedreira e a sua zona de reserva (linha a amarelo que delimita essa área) (websig.cm-penela.pt) (setembro 2021)

4.4 Enquadramento geomorfológico, geológico e hidrogeológico

4.4.1 Geomorfologia

A área da pedreira localiza-se no Maciço Calcário de Sicó, sendo o mesmo caracterizado por serras e depressões calcárias, que se iniciam de Condeixa e vão até Alvaiázere, respetivamente a sul de Coimbra. Localizada a SE do Monte de Vez, numa zona com inclinação para SSW. A pedreira divide-se com calcários de Dogger pertencente às

serras calcárias e uma pequena parte, as depressões calco-margosas do Liásico (Cunha, 1981). As zonas de maior relevo correspondem aos calcários de Dogger (Serras Calcárias) e as zonas mais deprimidas aos calcários Liásicos e depressões calco-margosas.



Legenda: 1 – Serras e planaltos em calcário do Dogger (Serras Calcárias); 2 – Depressões em calcário margoso (Depressões Calco-Margosas); 3 – Colinas em calcário dolomítico (Colinas Dolomíticas); 4 – Áreas deprimidas periféricas; 5 – Maciço Antigo; 6 – Falhas e escarpas de falha principais.

Figura 21 - Esboço Geomorfológico do Maciço Calcário de Sicó. (Adaptado de Cunha, L. (1990))

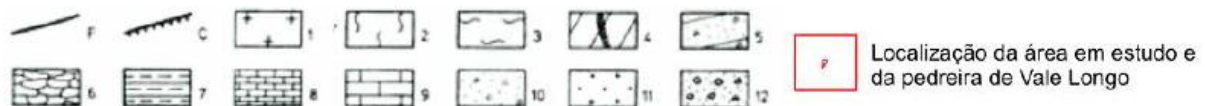
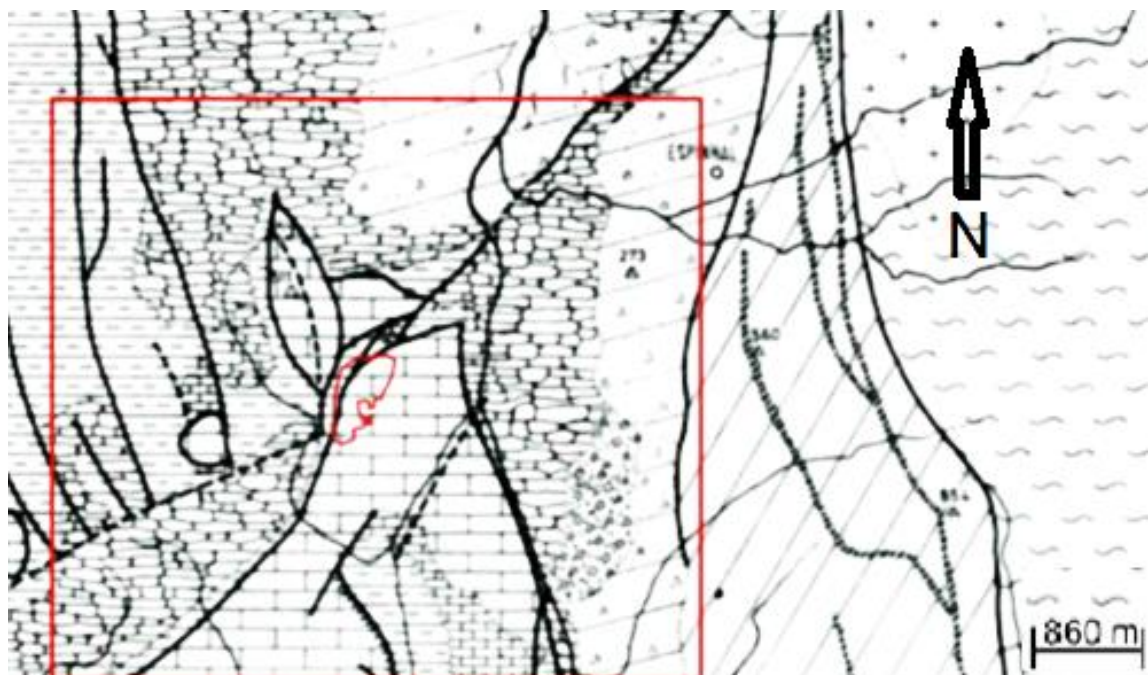
4.4.2 Geologia

O maciço rochoso onde está implantada a pedreira Vale Longo insere-se na Bacia Lusitaniana, Orla Meso-Cenozóica Ocidental. Situa-se no Jurássico Inferior (ou liásico) e de

Dogger (Jurássico Médio). Sendo uma transição notória de calcários, a predominância é do calcário Dogger.

A Bacia Lusitaniana é uma bacia sedimentar que se originou na Margem Ocidental Ibérica, durante parte do Mesozóico. Caracteriza-se por ser uma bacia distensiva, não vulcânica e pertencente a uma margem continental do tipo atlântico de rift (Kullberg et al., 2013).

No concelho de Penela, uma sucessão estudada por Dimuccio (2016), com pendor generalizado para W a NW, localmente dá origem a um relevo em costeira, com reverso para ocidente e com altitudes a rondar 300m de altitude. De um modo geral, de um corpo de relevos representam as chamadas “ Colinas dolomíticas carsificadas “ a sul de Coimbra, e que, na morfologia, se salientam em função do comportamento diferencial das formações geológicas que os estruturam (calco-dolomíticas), relativamente aos materiais menos resistentes que os delimitam (rochas essencialmente pelito-dolomíticas e areno-conglomeráticas do Triásico-Hetágiano, a oriente e rochas margo-calcárias do Pliensbaquiano e Toarciano, a ocidente)(Dimuccio, 2016).



Legenda

F- Falhas; C- Cavalgamentos;

Maciço Antigo: 1- Granito da Vila Nova; 2- Complexo Cristalofílitico (Pré-Câmbrico); 3- Complexo Xisto-Grauváquico (Pré-Câmbrico-Câmbrico); 4- Xistos e Filões quartzíticos (Ordovícico);

Orla Ocidental: 5- Complexo detritico da base do Mesozóico (Triásico); 6- Calcários dolomíticos (Liásico inferior); 7- Calcários margosos (Liásico médio e superior); 8- Calcários margosos compactos (Aaleniano- Liásico superior); 9- Calcários puros compactos (Dogger); 10- Depósito silicioso- "Arenitos de Torres Vedras" (Cretácico inferior); 11- Arcoses de Miranda (Senoniano-Cretácico superior e Eocénico); 12- Complexo fanglomerático (Vila-franquiano-Plio-pleistocénico)

Figura 22 - Cartografia geológica da região em estudo. Cunha, L. (1981). Adaptação com a implantação da área em estudo e da pedreira de Vale Longo. (EIA)

A formação de Póvoa Lomba começa por ter na fase superior unidades calcárias e na fase inferior a alternâncias margo-calcárias. Sendo que constitui na generalidade um material rochoso bastante frágil (Azerêdo et al., 2003).

As unidades calcárias do jurássico Médio que constituem os maciços de Condeixa-Sicó-Alvaiázere encontram-se nas regiões que citaram como Norte e Central da Bacia Lusitaniana (Martins, 2008).

Segundo Martins, a formação de Degracias que se observa a maior extensão nos sectores Norte e Centro. Corresponde fundamentalmente à ocorrência de calcários compactos com nódulos de sílex e filamentos. Consiste em pelintramicrites e pelmicrites. Para o topo das unidades, observam-se nódulos botrioidais siliciosos. A espessura da formação é da ordem de 100 a 150 metros (Manuppella et al., 1998).

A formação de Sra. da Estrela, trata-se de uma formação de natureza calciclástica. Para o topo, esta formação adquire um caráter cada vez mais grosseiro. Nas regiões a sul, nomeadamente nos perfis de vértice de Sicó, dominam intra-oosparitos e biosparitos. Esta formação traduz uma deposição em barreira oolítica/bancos oolíticos, fortemente influenciada por correntes, ondulação e tempestades. A espessura aproximada desta formação é superior a 80 metros (Martins, 2008).

A formação de Sicó é representada por ser uma formação predominantemente caracterizada por calcários micríticos e pelmicríticos e por calcários oncolíticos. Na base da formação, os calcários micríticos laminados dominam, nos quais se intercalam sem continuidade lateral. Foi ainda feita uma estimativa de 120 metros de espessura (Martins, 2008).

A rocha que se observa na área da pedreira é o calcário, que pertence ao jurássico médio. A mesma tem origem sedimentar, possui tons amarelados, bege e alaranjados, com óxidos de ferro e possui muito material argiloso. Sendo que também existe uma cor mais acinzentada que representa as margas calcárias. O material apresenta textura agranular em que não se distingue nenhum mineral, estrutura compacta e de dureza média.

Na Figura 23, está apresentada o que se acredita ser uma falha secundária do sistema da falha de Nazaré. Tem orientação Nordeste-Sudoeste e possui um preenchimento da chamada terra rossa, argila residual. Possui também material muito fraturado ao seu redor. Tem uma largura aproximadamente de 2 a 3 metros e é visualmente perceptível na altura total da bancada de 10 metros.



Figura 23 - Falha secundária do sistema da falha da Nazaré visível num dos taludes da pedreira

4.4.3 Hidrogeologia

O rio Dueça, afluente do Ceira, possui em toda a sua expansão cerca de 40 km, sendo que mantém contato entre duas unidades morfo-estruturais. É constituído por inúmeras elevações topográficas com o destaque do Monte de Vez com 412m. Para Este do vale do rio Dueça encontra-se a um relevo aplanado, sendo que no setor Norte encontra-se as altitudes mais baixas (Cordeiro, 2006). As linhas de drenagem de água são mais notórias no Inverno. Devido à carsificação, a água circula no maciço carbonatado através de fissuras, algares e grutas.

4.5 Centro de produção de Penela

O presente trabalho foi realizado no Centro de Produção de Penela, pertence ao grupo IGE e a pedreira denomina-se por Pedreira de Vale Longo, tem o número de cadastro 5347, é uma pedreira de classe 1 com 40, 5 ha.

O Group IGE, opera na área da engenharia e construção civil, energias renováveis, comercialização e distribuição de materiais de construção. Fornecem materiais de construção com marcação CE, tais como agregados de origem calcária, betão pronto, misturas e emulsões betuminosas. Faz parte deste grupo económico, a Windpark, Lda que opera na área da energia eólica, Betumes Vale Longo, Lda com a atividade de comercialização de betumes e fuel e ainda a Isidoro Grupo Empresarial, SL, empresa focada na construção de parques eólicos.

A exploração de Vale Longo veio a colmatar as necessidades regionais de matérias-primas (agregados), para a execução das obras de construção rodoviária, deixando assim de depender de terceiros.

De acordo com o Plano Diretor Municipal (PDM), a pedreira encontra-se inserida no espaço de Exploração de Recursos Geológicos. Sendo que ainda se encontra longe de qualquer zona habitacional.

A pedreira Vale Longo, utiliza explosivos como método de desmonte e a exploração é caracterizada por ser a direito e em flanco de encosta.

Este centro de produção fornece material para diversas obras de pavimentação, a salientar a obra do metro do Mondego, locais de construção de zonas industriais e parques eólicos. Na figura 24, esta apresentada a vista geral da pedreira de Vale Longo.



Figura 24 - Vista geral da Pedreira do Vale Longo

4.6 Planeamento e Desmonte

4.6.1 Perfuração

Nesta primeira fase, na Pedreira de Vale Longo, dá-se início ao processo com o plano de pega de fogo programado após análise do maciço e da quantidade de rocha a ser fragmentada. Escolhe-se o sítio para a marcação dos furos e com o devido espaçamento entre eles, logo a seguir, será calculado a quantidade necessária de explosivos para cada furo, sem desperdício e sem comprometer as atividades seguintes.

Os furos são executados com a perfuradora da Atlas Copco, ROC D7, com sistema de martelo hidráulico, juntamente estão varas terminadas com um “bit” que, por sua vez, fazem movimento de rotação e percussão para furação. O “bit” provoca abrasão à rocha e assim, ao ejetar o pó de pedra, conclui o furo. O martelo possui uma pressão de 12kg/ cm² com a velocidade para perfuração de 60m/h e com um comprimento de varas até 3,6 metros. Funciona a gasóleo, só é necessário um operador, é de custo reduzido e de simples manuseio. Como representado na figura 25:

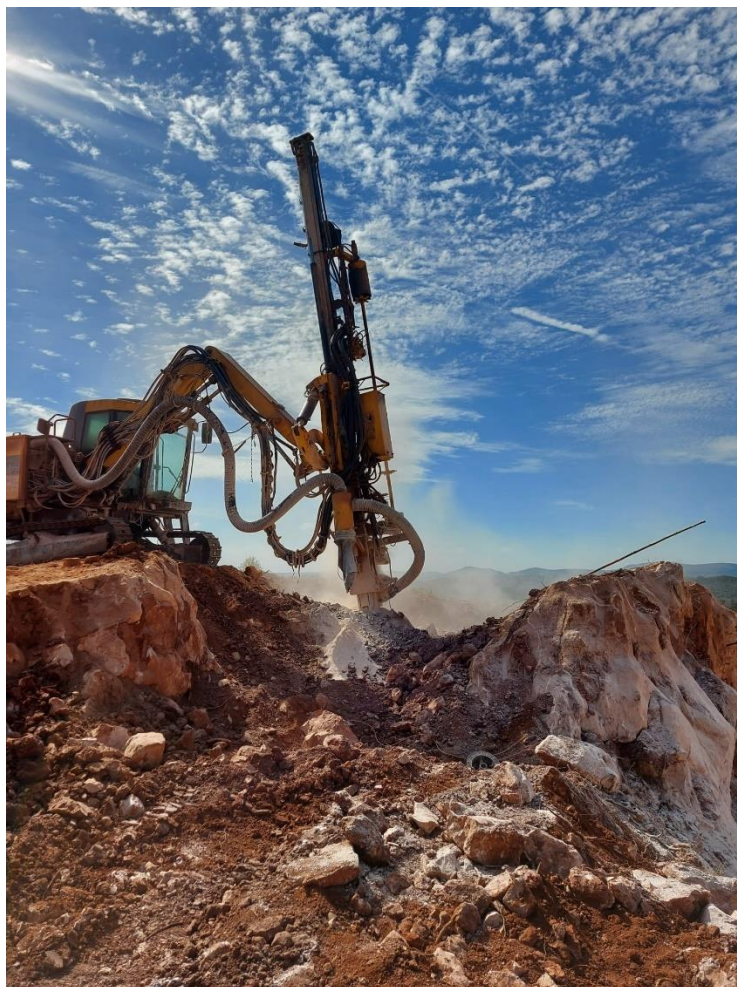


Figura 25 - Perfuradora Roc D7

4.6.2 Carregamento de explosivos

Os explosivos utilizados na pedreira são do fabricante Orica. Para a carga de fundo utilizam a marca Orica Senatel Pulsar e para carga de coluna, Senatel Powerfrag, ambos com agentes explosivos de ANFO (Ammonium Nitrate/Fuel Oil). Utilizam o detonador Nonel de tubo de choque projetado para iniciar explosões e é num sistema de iniciação Nonel, que numa extremidade tem um detonador de alta potência e a outra a terminar um detonador de superfície de baixa potência, para iniciar tubos de choque.

O furo, na sua totalidade é carregado com 42,8kg de explosivo, sendo 17,8 kg para a carga de fundo e 25 kg para a carga de coluna. Considerando o consumo total de explosivo e o volume de rocha desmontado, obtemos a carga específica de 282 g/m³. Na figura 26, esta representada a atividade de carregamento de explosivos:



Figura 26 - Manuseamento Explosivos

4.7 Pega de Fogo

Na pedreira de Vale Longo, o diagrama de fogo é composto por uma fiada de 5 a 10 furos ou 2 fiadas de 5 a 7 furos, mas isto vai sempre depender da quantidade de material que querem obter. O afastamento é de geralmente, 4 m com espaçamento de 4 m entre os furos. Na figura 27 esta representado um esquema de um furo para uma pega de fogo:

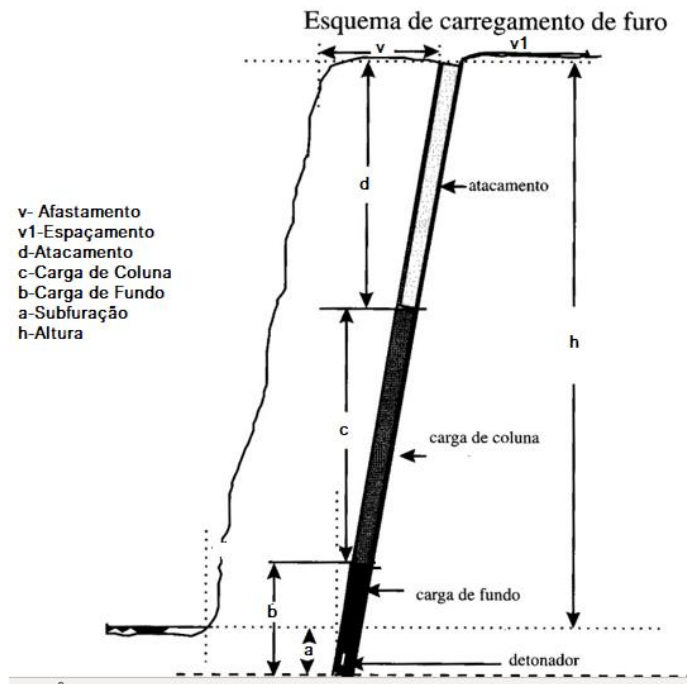


Figura 27 - Esquema de Pega de Fogo

Parâmetros da pega de fogo mais utilizada na pedreira:

Tabela 1 - Parâmetros da Pega de Fogo

v (m)	v1 (m)	h (m)	d (m)	a (m)	b (Kg)	c (Kg)
4	3,8	11,6	2	2	17,8	25

No final da atividade de desmonte, pode existir algum material com calibres maiores e que não podem ser transportados diretamente para o britador primário, por isso, é necessário proceder a utilização de um martelo para fragmentar para dar início ao processo de taqueio. O martelo que utilizam é a escavadora Caterpillar 330, com 159 Kw de potência de motor. O mesmo possibilita fragmentar a rocha até se obter o tamanho de calibre necessário para as operações seguintes.

4.8 Carga e Transporte

Após a operação de desmonte o material amontoado, vai ser carregado por uma pá giratória ou pá frontal para ser transportado. Neste caso, a giratória é a mais utilizada, tendo uma boa mobilidade nestes terrenos mais argilosos, possibilidade de haver melhor seleção

de material, uma maior facilidade a trabalhar em pilhas de material e a vencer inclinações de terreno. O operador em causa é experiente e consegue manter o número de carregamentos constante. Inicialmente, a giratória faz uma cama para poder realizar as movimentações, seleciona o material e enche o balde, recuando logo a seguir para carregar o *dumper*. Movimenta-se de modo a se situar mais perto do *dumper* e ser possível a sua descarga em segurança. A máquina realiza o trabalho com material rochoso de diversos tamanhos que, mal feito pode danificar muito mais rápido as partes com desgaste mais acentuado, a parte hidráulica, a corrente da lagarta e até mesmo os dentes do balde. A giratória utilizada na frente de pedreira é a Hitachi 490 a mesma é movida por um motor diesel com potência de 270 Kw, sobre as suas lagartas, com sistema hidráulico e capacidade de balde de 2,1 m³. Na figura 28 esta representada o carregamento do *dumper*:



Figura 28 - Carregamento de Dumper

O material é descarregado para um *dumper* da Caterpillar, modelo CAT771D com a capacidade de 27,5 m³ e velocidade máxima de 56,3 km/h. Esta máquina tem uma grande capacidade, grande resistência, vence inclinações, contudo, a via tem de estar em bom estado para que o operador possa usar a maior velocidade possível.

O *dumper* possui um controlador de chassi de transmissão que usa transferência eletrónica de rotações por minuto do motor, para executar mudanças em pontos predefinidos para desempenho ideal e mais eficiência. Permite controlar o limite de marcha superior programável, controlo de mudança do acelerador, gestão de mudança direcional, inibidor de costa neutro e modo de mudança económica. Esta máquina de transporte funciona a gasóleo.

Esta fase do processo pode influenciar diretamente a fase seguinte, pois se o material não tiver sido corretamente selecionado, carregado, não tenha sido um transporte fácil e rápido pode causar constrangimentos. O *dumper* pode transportar o material diretamente para a primeira estação de britagem e fazer com que o material bloqueie o processo. Isso causa intervalos em que a produção fica suspensa.

Tabela 2 - Desempenho do ciclo de carga e transporte

Dias	Carregamento do <i>dumper</i> com pá carregadora	Tempo de carregamento	Tempo total de viagens do <i>dumper</i> , da frente até o britador (800m)	Tempo de descarga
1 ^o	9 ciclos	2' 52"	5' 55"	3' 00"
2 ^o	9 ciclos	3' 00"	5' 57"	2' 45"
3 ^o	9 ciclos	2' 52"	5' 51"	4' 00"
4 ^o	9 ciclos	2' 55"	6' 00"	3' 57"
5 ^o	9 ciclos	2' 56"	6' 02"	3' 50"
6 ^o	9 ciclos	3' 03"	5' 55"	3' 07"
7 ^o	9 ciclos	2' 59"	5' 52"	3' 30"
Média	9 ciclos	2' 57"	5' 56"	3' 27"

A quantidade de ciclos manteve-se constante e o tempo variou ligeiramente, sendo que a média de tempo para o carregamento do *dumper* foi de 2 minutos e 57 segundos.

Produção Diária: Média de 5 ciclos por hora; Média de 43 ciclos por dia e (8 h de trabalho).

Capacidade do *dumper*: 27,5 m³ de capacidade; **Resultado:** 137 m³/ h;

Produção Diária: 1182,5 m³ = 656,8 toneladas por dia.

Gastos de gásóleo *dumper*: 530 L/dia.

Gastos de pá giratória (estimado): 140L/dia

Gasóleo por cada m³: 0,61 L/m³

4.9 Processamento do material

Processamento do material - Fragmentação e classificação

O material passa por diferentes estações de fragmentação e classificação, produzindo materiais com granulometria diferente. É necessário que haja um controlo rigoroso na fragmentação e classificação, para que não venha a ocorrer desperdícios na produção.

O material neste caso de estudo, pode ser classificado por via seca ou por via húmida a diferença esta na utilização de água ou não. Sendo que por via seca foi o processo mais utilizado, o material rochoso começa por ser fragmentado e depois passa para uma classificação até se obter o resultado pretendido. Por via húmida temos a utilização de água na classificação, retirada de lamas, hidroclassificação, escurredores de material, decantação e filtragem para separar o material.

Fragmentação- Britagem

Nesta fase, o objetivo é diminuir a granulometria da rocha até chegar aos valores pretendidos. O material entra com o máximo 0,8 m na boca do britador primário. Como se pode observar no esquema a seguir:

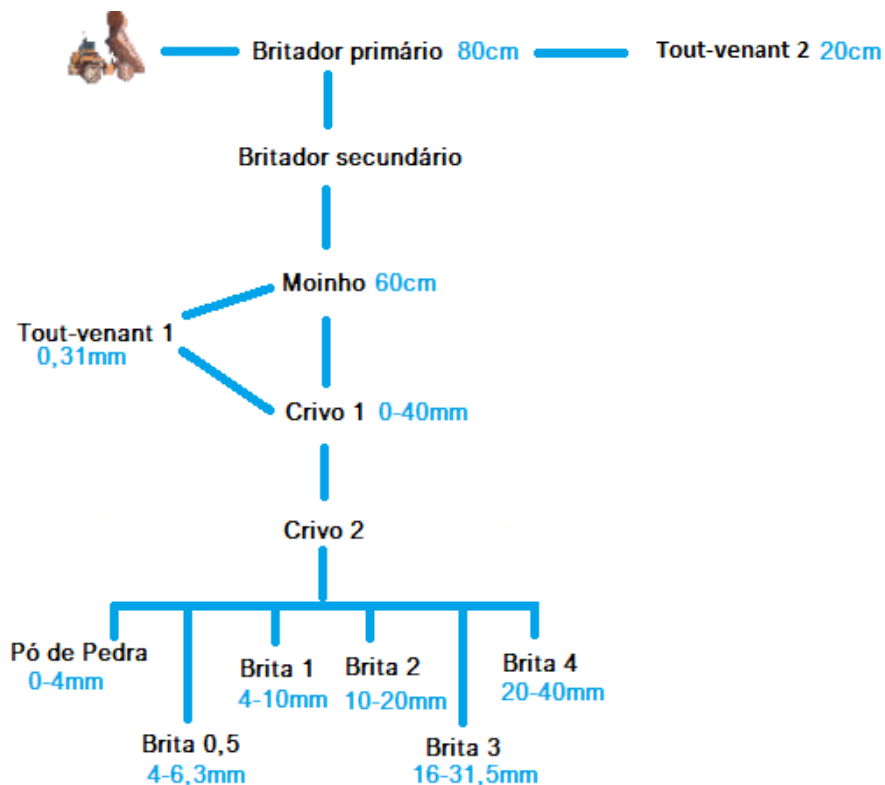


Figura 29 - Fluxograma do processo de fragmentação e classificação

4.10 Agregados Produzidos

Tabela 3 - Tabela de valores de agregado por granulometria

Material	Granulometria	Preço/m ³
Pó de calcário	0-4 mm	6,69 €
Brita 0,5	4-6,3 mm	6,04 €
Brita 1	4-10 mm	6,04 €
Brita 2	10-20 mm	6,04 €
Brita 3	16-31,5 mm	6,04 €
Brita 4	20-40 mm	6,04 €
Tout-venant 1	0,31mm	4,94 €
Tout-venant 2	20 cm	3,88 €

Nota: As classes granulométricas estão sobrepostas devido às necessidades dependerem da procura do mercado.

Via húmida

Tabela 4 - Tabela de valores de agregado por granulometria, produtos Via Húmida

Material	Granulometria	Preço/m ³
Brita 0,5 Lavada	2-6,3 mm	6,66 €
Brita 1 Lavada	6,3-12,5 mm	6,66 €
Brita 2 Lavada	10-20 mm	6,66 €

4.11 Marcação CE

Os produtos seguem um controlo de acordo com normas e especificações técnicas da marcação CE. Esta marcação permite estabelecer que o produto está em concordância com a legislação da UE, sendo assim, esta marcação serve de certificado de qualidade e pronto a ser comercializado.

Normas usadas no produto para certificação CE:

- NP EN 12620: 2002 + A1: 2008- Agregados para betão.
- NP EN 13043: 2002 + EN 13043: 2002/ AC: 2004- Agregados para misturas betuminosas e tratamentos superficiais para estradas, aeroportos e outras áreas de circulação.
- NP EN 13242- Agregados para betão, para misturas betuminosas.

5. Aplicações Mining 4.0 ao caso de estudo

A indústria extrativa é uma área extremamente importante para o desenvolvimento industrial e económico da sociedade, pois, utilizamos recursos geológicos no decorrer das nossas atividades do dia a dia e desde os primórdios da nossa existência, para a caça, por exemplo. Por se tratar de um ambiente de produção de alta escala, apresenta um alto risco associado às operações na pedreira, entre eles a interação entre equipamentos de grande porte (pás carregadoras, escavadoras, camiões, entre outros) com a circulação de trabalhadores no perímetro da pedreira.

A escala que algumas explorações têm, vão interagir negativamente com as populações situadas nas imediações das explorações, gerando uma onda negativa contra as explorações mineiras. Essa situação tem repercussões nos meios de comunicação sociais e redes sociais, gerando movimentos de solidariedade regionais, nacionais e transfronteiriços contra a exploração de recursos minerais, sendo esta uma das razões para a necessidade de mudança.

Tendo em vista os diversos desafios do setor e por se tratar de equipamentos com altos custos de investimento e de operação, muitas empresas têm tentado aplicar intensivamente programas de melhoria contínua, de modo a alcançar a segurança adequada, aumento de produção, redução de custos e redução no impacto ambiental (Coutinho, 2017).

Esses programas concentram-se num conjunto de objetivos por trabalhar para que esta indústria seja cada vez mais sustentável e que venha alcançar cada vez mais melhorias. Possivelmente a maior resistência ao desenvolvimento tecnológico baseia-se no fato de que as necessidades associadas ao capital humano, para saber manusear este tipo de tecnologia, que é diferente do tipo de exploração tradicional. Este novo paradigma exige a formação de trabalhadores aptos a trabalhar com a automação e o digital (Rascón, 2021).

Rascón (2021), afirmou que a maioria dos processos serão automatizados ou remotos, com um consumo mais reduzido de energia e água, um impacto ambiental cada vez menor e o uso progressivo de menos energia, com o uso de equipamentos elétricos de baterias, com sistemas de processos mais otimizados ou analisando dados obtidos e transmitidos em tempo real.

Para alcançar o verdadeiro desenvolvimento tecnológico no setor e impulsionar o *Mining 4.0*, é necessário que haja uma coordenação entre as empresas, universidades, centros tecnológicos e profissionais na área da Geologia (Rascón, 2021)

5.1 Planificação e Perfuração

A partir de modelos digitais de terreno com elevada resolução pode-se estabelecer rotas para a deslocação de perfuradoras para as localizações onde se pretendem efetuar as furações, sendo possível efetuar cálculos de diferenças de volumes passíveis de posterior interpretação. Desta forma, é necessário que os modelos cumpram à *priori* certos requisitos de precisão posicional (Ribeiro et al., 2016).

5.1.1 Demonstração de um exemplo de implementação do Mining 4.0

Uma das técnicas para obter modelos digitais de terreno com elevada resolução, é a utilização de VANT (Veículo Aéreo Não Tripulado) equipados com câmaras fotográficas, capazes de captar fotografias para serem usadas pelo SIG (sistemas de informação geográfica) para mapear, visualizar e analisar locais. Estes dados vão ser captados e posteriormente tratados e organizados para criar mapas 3D, para análise das características do terreno e estabelecer trocas de informações entre os trabalhadores na pedreira, bem como os que podem estar num local, onde é feito o processamento de dados. A utilização de VANT pode resultar na diminuição de custos em veículos, sensores e ainda proporcionar avanços significativos em software de processamento de dados e criação de mapas (Park et al., 2020).

VANT

As câmaras dos VANTS obtêm alta resolução de imagens para reconstruir a geometria da pedreira a céu aberto. As imagens aéreas podem ser capturadas com alta resolução espacial e processamento muito mais rápido em comparação com imagens de satélite (Yu et al., 2018). Tanto consegue-se obter imagens para o plano de pedreira, como para a pega de fogo é ainda possível a utilização este veículo para o controlo das atividades na pedreira.

Neste trabalho, procedeu-se à utilização deste meio para fim de realizar dois levantamentos aerofotogramétricos, como exemplos desta tecnologia. Com um VANT para captar dados antes da pega de fogo e depois para criar modelos e calcular volume do desmonte.

Para fazer o levantamento aerofotogramétrico foi usado o VANT (veículo aéreo não tripulado) *Dji Phantom 4* (figura 30). Inicialmente, define-se a área de levantamento, estabelecendo os limites da rota que o VANT vai realizar. É necessário estabelecer pontos de

controlo, área onde o VANT vai descolar e aterrar e ainda outras características que vão caracterizar o voo para o objetivo pretendido.

Utilizou-se a aplicação para telemóvel, *DroneDeploy* (figura 31 e 32), que permite que o utilizador faça um planeamento de voo de acordo com o objetivo do trabalho, por meio de processamentos de imagens, armazenamento de dados e possíveis mapas obtidos através de imagens dos VANTS.

As linhas de voo são projetadas no melhor mapa disponível da área a ser fotografada. Para este plano de mapa de voo deve-se ter em conta a finalidade da fotografia, a escala, as variações da escala, deslocamento do relevo, inclinação fotográfica, altura do voo e direção da fotografia. (Gonçalves, 2006)

A altitude foi estabelecida para 90m para uma resolução de 3.8cm/píxel com câmara posicionada a 75 ° totalmente automatizada para sobrevoar uma área de 12 hectares a 10 m/s. É necessário definir sobreposições longitudinais (aprox.75%) e sobreposições transversais (aprox.70%) e o modelo de voo que se pretende.



Figura 30 - DJI PHANTHOM 4

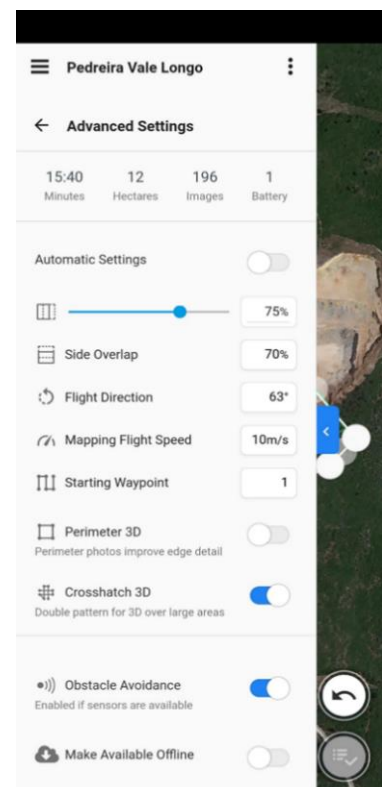


Figura 31 - Definição de voo no Dronedeploy

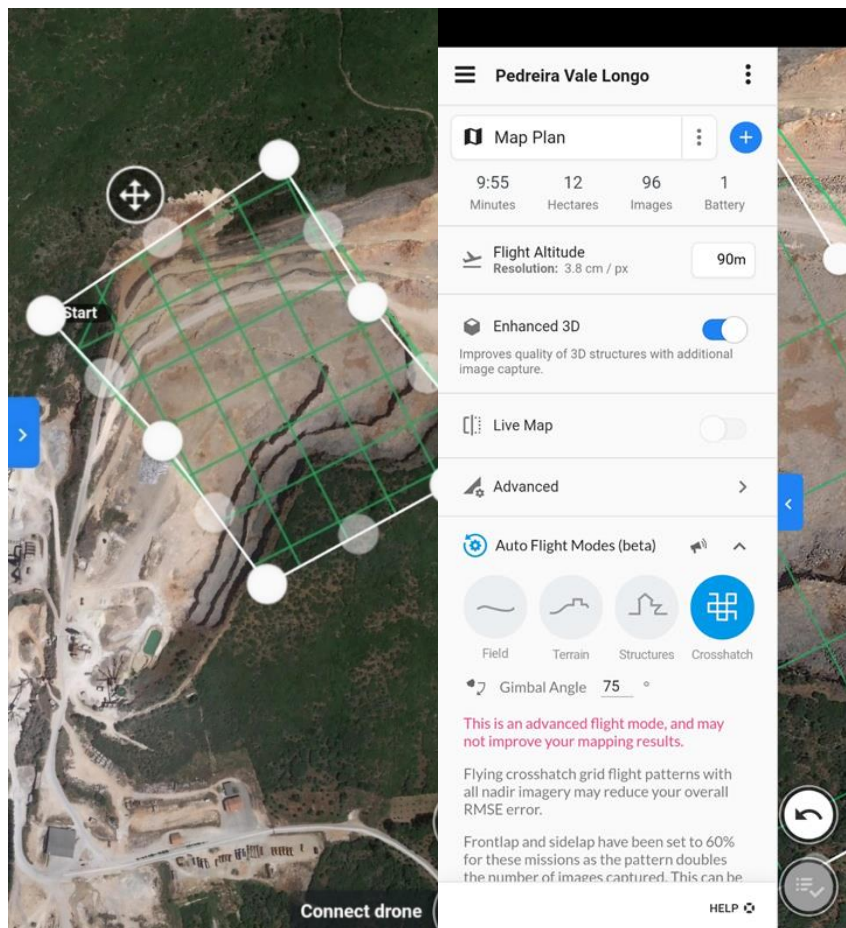


Figura 32 - Definição da área de voo no Dronedeploy

Fotogrametria

A fotogrametria, é a arte, ciência e tecnologia de obter informações sobre o meio ambiente, com o uso de processos de registo, medições e interpretações das imagens fotográficas. Utiliza métodos matemáticos para solucionar a informação numérica a partir das imagens.

Com a fotogrametria é possível criar ortofotomapas, mosaicos de fotografias, bases de dados geográficos, mapas topográficos e modelos digitais de terreno. (Gonçalves, 2006)

Os modelos do levantamento aerofotogramétrico foram realizados no software *Agisoft Photoscan*⁵ (Agisoft, 2018), baseado na técnica *Structure from Motion* (SFM). (Westoby et al., 2012)

É um software versátil, com experiência no tratamento e processamento de imagens, como a fotogrametria. O presente programa possibilita o processamento de imagens obtidas por camaras fotográficas multiespectrais, incluindo um sistema de várias camaras. Após a obtenção dos dados das fotografias é possível criar densas nuvens de pontos, modelos poligonais texturizados, ortofotomapas georreferenciados, com modelos digitais de elevação/terreno (DEM/DTM).

Metodologia:

- O início do processamento começa com a seleção de fotografias para o programa e inicia-se o processo de alinhamento das fotografias; O alinhamento corresponde a orientação relativa dos pares em centenas ou milhares de fotografias, com utilização de pontos em comum (Gonçalves et al., 2015).
- Insere-se as devidas coordenadas com a georreferenciação de pontos em comum. Utilizando o *Google Earth Pro* e obtendo as coordenadas, com recurso a identificação de estruturas em comum nas fotografias. Utilizou-se *World Geodetic System (WGS) 84/ Universal Transversa Mercator (UTM) zone 29N*.
- Procede-se a definição de pontos no modelo. Esses pontos estão localizados nas imagens, aproximadamente. Este, por sua vez, corresponde a um processo manual, mas com a prévia localização dos pontos de acordo com o software. As imagens são outra vez, alinhadas para que seja feito os ajustes de coordenadas (Gonçalves et al., 2015).
- Dá-se início à construção da nuvem de pontos. Esta etapa vai aproximar o modelo ao modelo final pretendido.

⁵ <https://www.agisoft.com/>

- É criada uma malha juntamente com a nuvem de pontos para podermos manipular com o programa *CloudCompare*.
- Nesta etapa, dá-se a construção definitiva do modelo, podemos assim, obter o ortofotomapa; como demonstrado nas figuras 33 e 36.

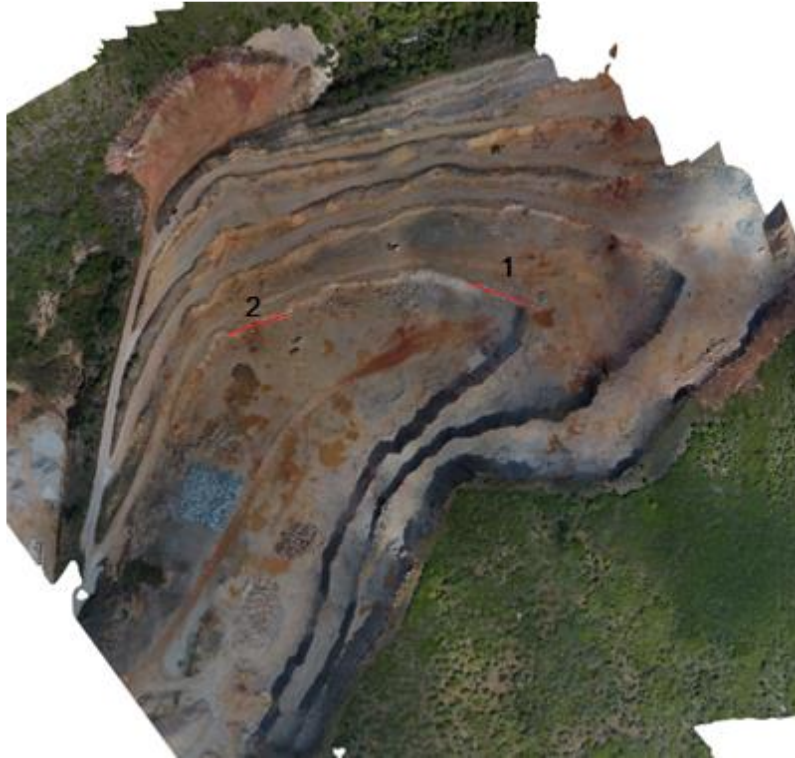


Figura 33 - Representação do Ortofotomapa georreferenciado. do 1º Voo realizado antes do desmonte



Figura 34 - Zoom Local 2 referente à Figura 33



Figura 35 - Zoom Local 1 referente à Figura 33

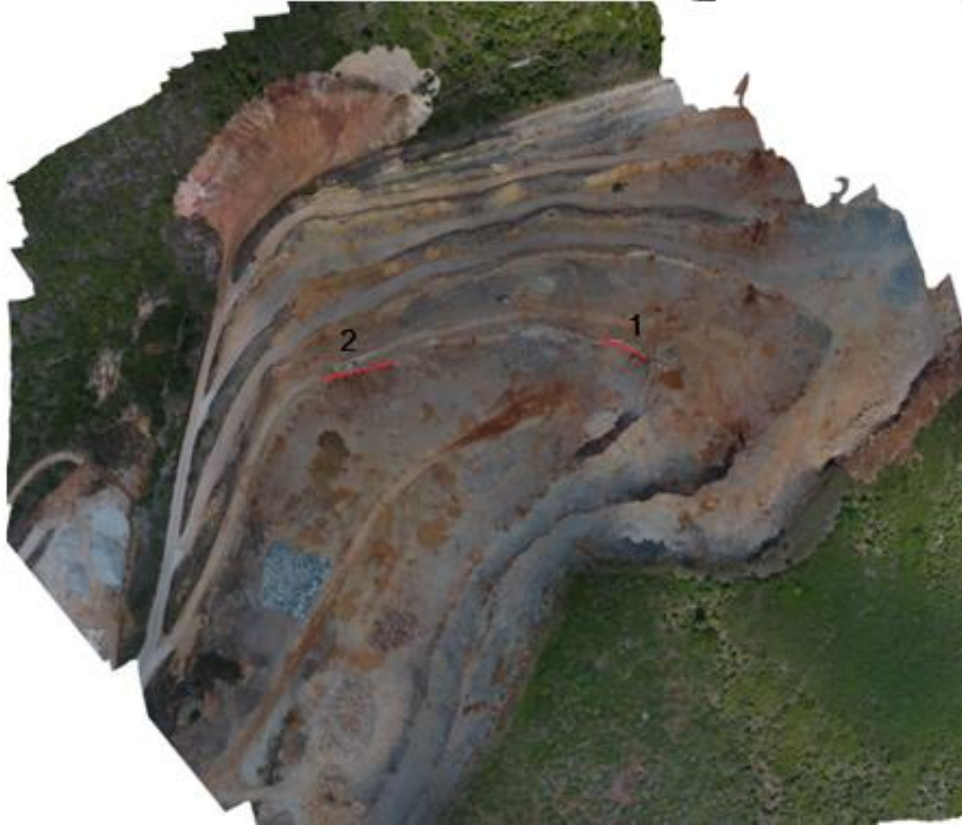


Figura 36 - Representação do Ortofotomapa georreferenciado, do 2º Voo, realizado depois do desmonte



Figura 37 - Zoom Local 2 referente à Figura 36



Figura 38 - Zoom Local 1 referente à Figura 36

O programa *Agisoft* em seguida permite construir um modelo digital de elevação construído a partir do modelo digital de superfície, essencial para o cálculo de volumes, que vai ser apresentado mais à frente neste documento. O modelo digital de elevação permite a visualização mais simplificada dos dados de altimetria do modelo. Representado na figura 39:

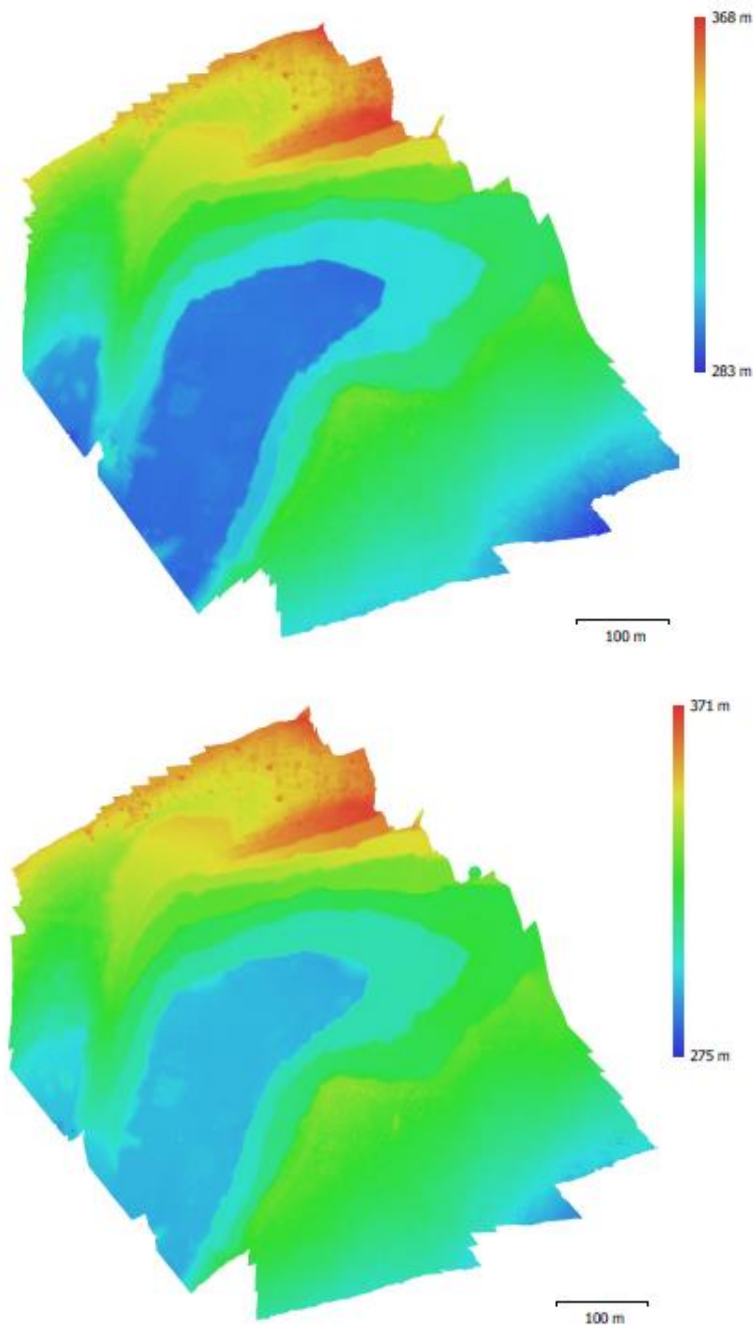


Figura 39 - Modelo Digital de elevação dos 2 voos realizados

Os dois modelos apresentam uma gama de cores semelhante, apesar de ser notório a variação dos azuis. O azul mais escuro, representado na primeira imagem, no 1º voo, antes do desmonte, tem o valor de profundidade mais próximo dos 283m. Na segunda imagem, 2º

voo, depois do desmorte, o azul está mais claro, isto é, devido ao material desmontado que permaneceu na superfície e por isso altera os valores de elevação no terreno. Nas figuras seguintes, figura 40 e 41, também esta representado os dois modelos digitais de elevação, mas com mais pormenor e ainda como exemplo, modelos de curvas de nível, nas figuras, 42 e 43.

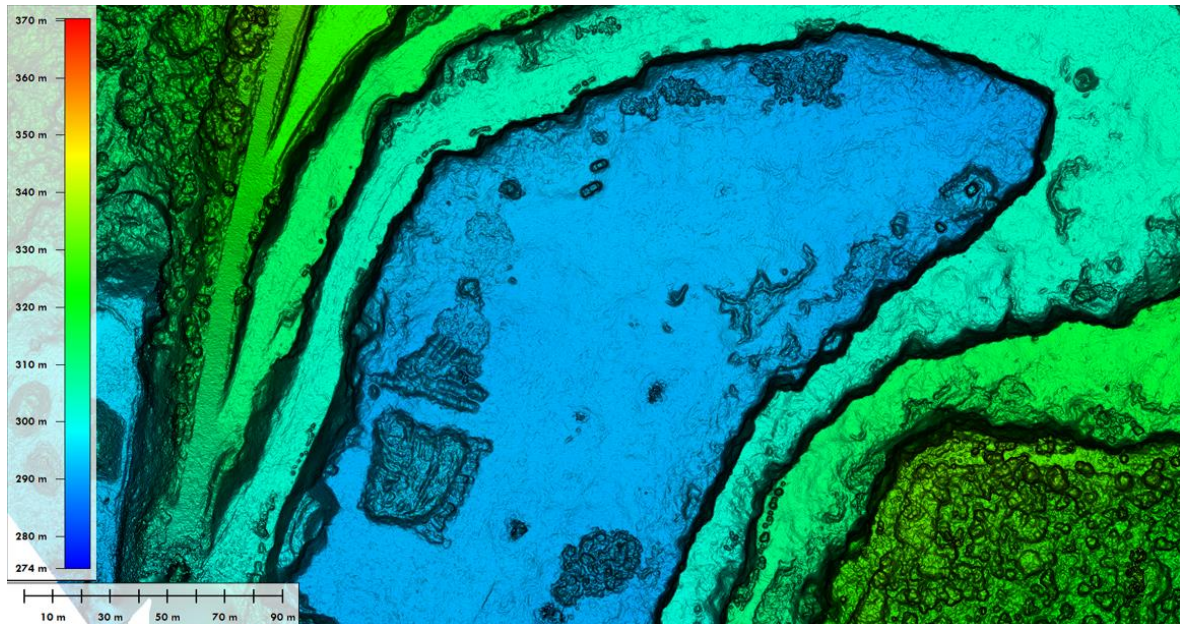


Figura 40 - Modelo Digital de Elevação 1º Voo

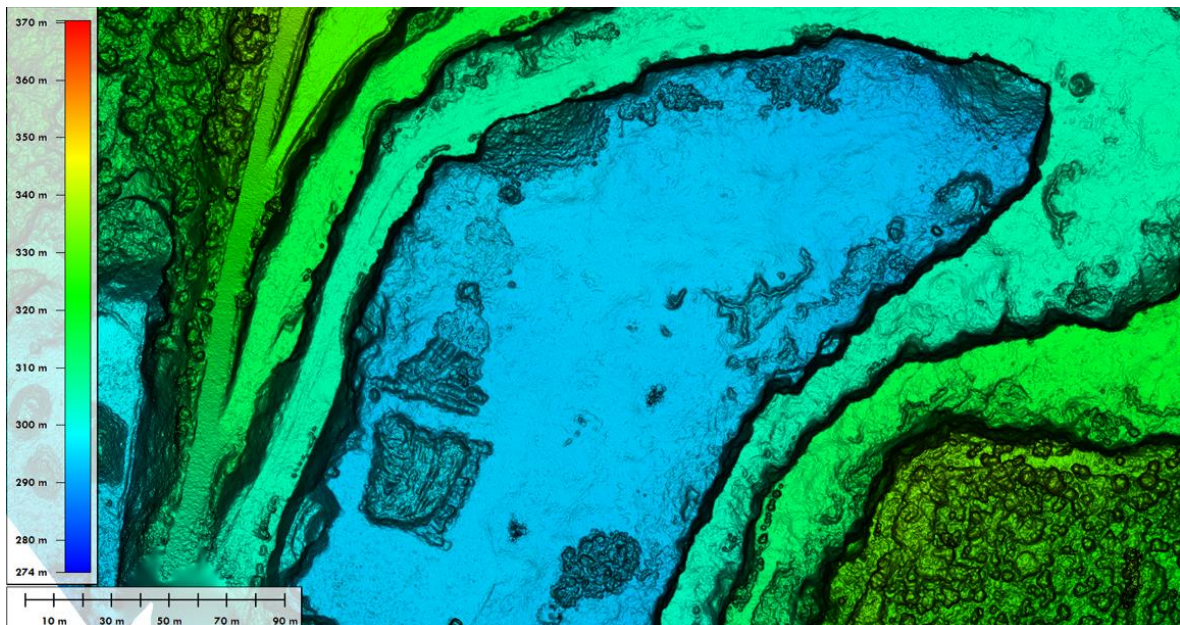


Figura 41 - Modelo Digital de Elevação 2º Voo

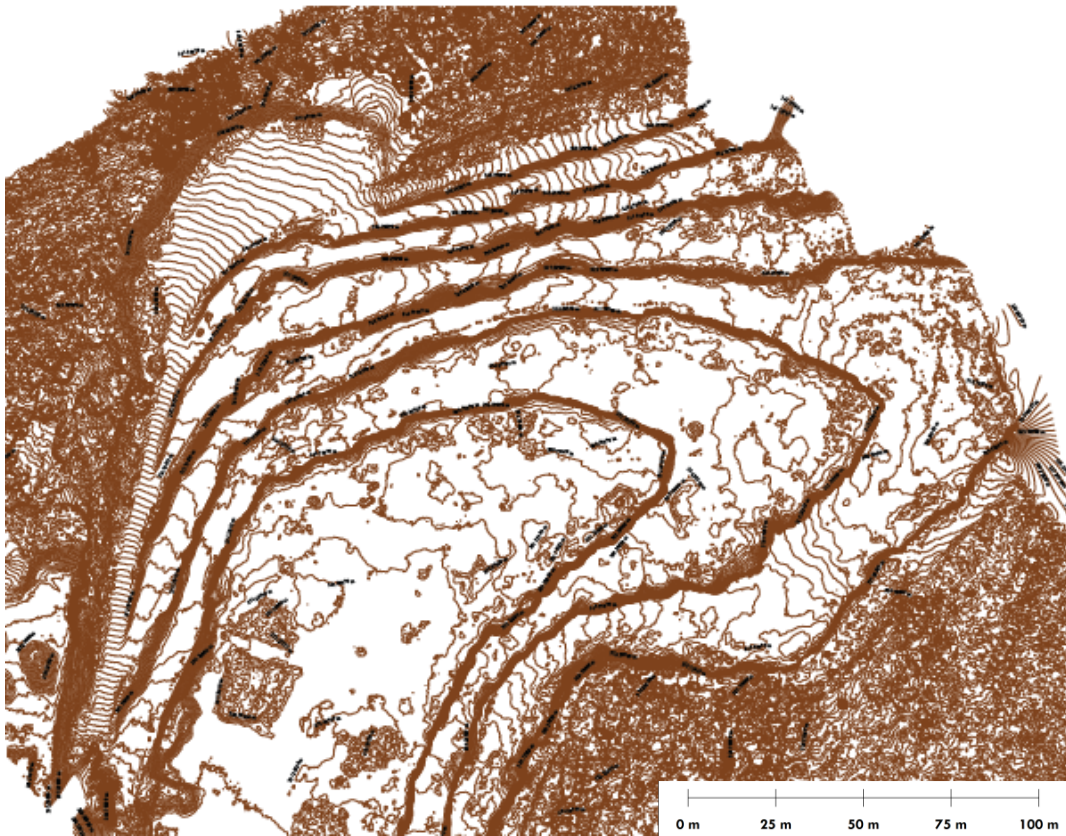


Figura 42 - Exemplo de Demonstração de Modelo com Curvas de Nível no ArcGis, Voo 1

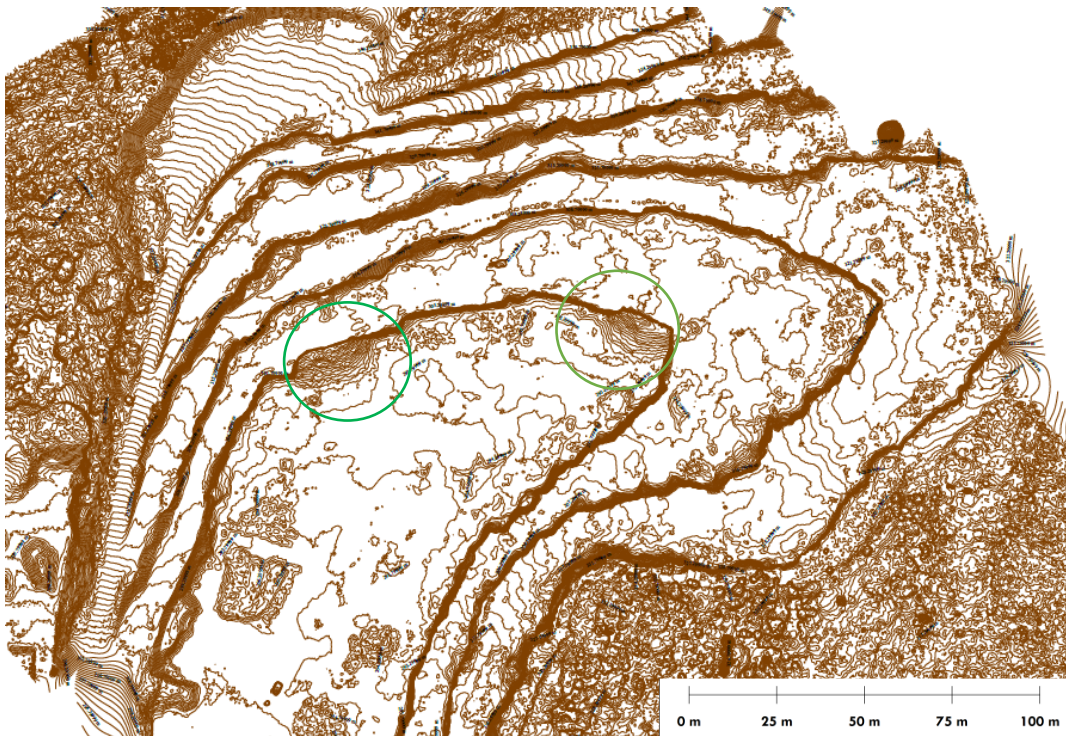


Figura 43 - Exemplo de Demonstração de Modelo com Curvas de Nível no ArcGis, Voo 2

A seguir foi utilizado o *CloudCompare* de Telecom Parisistech/ EDF, um programa *open source*. (Duarte, 2018). Permitiu introduzir primeiro, os dados que tem origem na nuvem de pontos anteriormente processados no *Agisoft*. No *CloudCompare*, procede-se à marcação manual de dois a três pontos representativos e que façam parte de uma zona de especial interesse, em que o programa forma uma área com a conexão desses pontos. Neste caso a zona de interesse foi a zona da pega de fogo. Sendo que através do programa calculamos os volumes desmontados, como representado na figura 44.

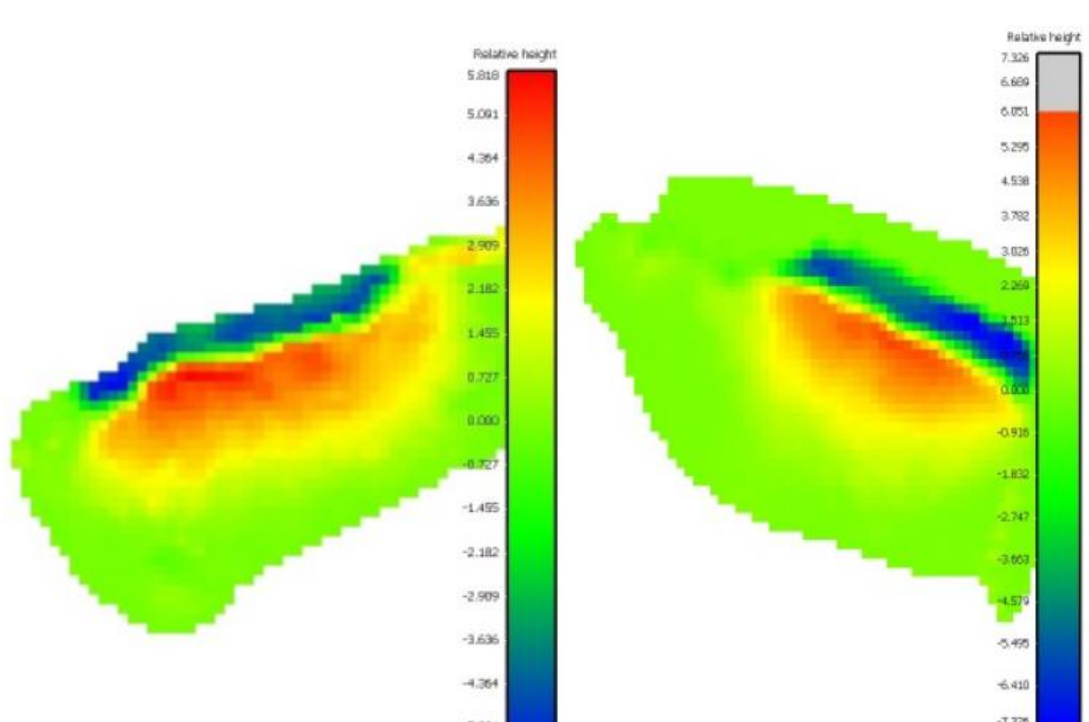


Figura 44 - Cálculo de volumes do local 1 e 2 - *CloudCompare*

Na Figura 44 estão representados dois modelos no *CloudCompare*, o primeiro do local 1 e o segundo do local 2. A cor azul representa o sítio do local onde foi realizada a pega de fogo e a parte avermelhada e alaranjada ao material desmontado projetado, que ficou amontoado à frente da frente de desmonte. O programa, a partir dos modelos realizados no *Agisoft*, realiza cálculos da pilha do volume desmontado, com a diferença do modelo do voo 1 e o modelo do voo 2.

Tabela 5 - Volumes teóricos e Volumes CloudCompare do desmonte

Nº de locais	Valores teóricos	Valores CloudCompare
Local 1	1559,52 m ³	1029,20 m ³
Local 2	1364,58 m ³	709,60 m ³

Tanto no local 1 como no local 2, os valores reais apresentam uma grande diferença para os valores teóricos, sendo que os valores reais foram valores mais pequenos. Na realidade existiram 3 furos que não detonaram. Foram furos em que, provavelmente, não foram devidamente carregados com as quantidades certas de explosivos e também ao serem carregados, os furos tinham desvios ou cavidades que permitiam que os explosivos não ficassem seguidos e em contato na vertical. Estes resultados vão permitir que haja uma alteração no plano de pega de fogo para que tenha o resultado pretendido e mais otimizado. Ou seja, mais controlo de gastos de gasóleo e de explosivos (redução do recurso do processo de taqueamento) pós desmonte, mais controlo na estabilização do terreno, avanço na exploração e eficiência e aumento de produção.

5.1.2 Outras Tecnologias 4.0

Zeb-Revo RT geoslam⁶

É um sistema laser scanner portátil, com sistema de GPS, mede milhares de pontos com precisão de 1 a 3 cm, por segundo, enquanto o operador se desloca pelo local. Com este equipamento, é possível construir modelos 3D com alta precisão. E assim, ajudar na planificação correta do desmonte e avanço das frentes de exploração.

O técnico desloca-se pelo local com o laser scanner e à medida que vai recolhendo dados, os dados são ao mesmo tempo transmitidos num computador ou *smatphone* e começam a construir modelos, em que assim será possível identificar as estruturas. Na figura a seguir esta representado o laser scanner e um exemplo de modelo num tablet.

⁶ <https://geoslam.com/solutions/remote-access/>

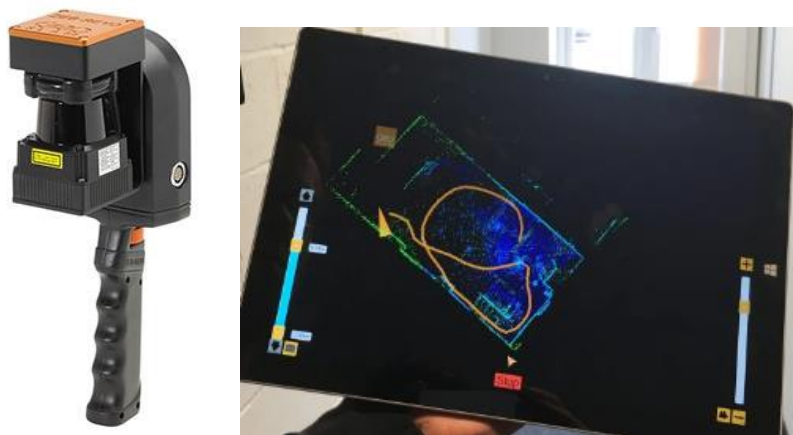


Figura 45 - Laser Scanner de Percurso e Estruturas Transmitidos num tablet (geoslam.com)(setembro 2021)

O-Pitblast

O *O-Pitblast* é um software que permite aos técnicos e especialistas, inserirem parâmetros das pegas de fogo ou com captação de dados por dispositivos de medição no local (*O-Pitdev*) e assim, planear todas as fases das operações de detonação. Como parte integrante do *O-Pitblast*, existe o *O-Pitdev* (diagnóstico dos furos) que permite que o operador insira um dispositivo preso por uma corda com transmissão por Bluetooth 4.2 e wireless, resistente à água, ao choque e a temperaturas entre -25°C até 70°C . Este dispositivo liga diretamente à aplicação *O-PitApp* (permite obter informações em tempo real no próprio smartphone). Esta aplicação armazena os dados numa nuvem (*O-Pitcloud*) que pode ser acedida pelo técnico e poderá abrir os dados no *O-Pitblast*.

O programa tem a capacidade de:

- Importar informações do terreno;
- Identificar desvios nos furos;
- Capacidade de criar, editar e gerir informações sobre os furos e configurar novas soluções de padrão de furos;
- Utilizar e programar ferramentas disponíveis para cada tipo de detonador;
- Digitalizar dados sobre vibrações;
- Fazer modelos de previsão e calibre da rocha desmontada;

A operação de perfuração e desmonte vai ser mais eficaz com a ajuda do conjunto, *O-Pitdev* para dados específicos da perfuração e o software *O-Pitblast* para a programação total da pega de fogo e desmonte, como representado na figura seguinte:

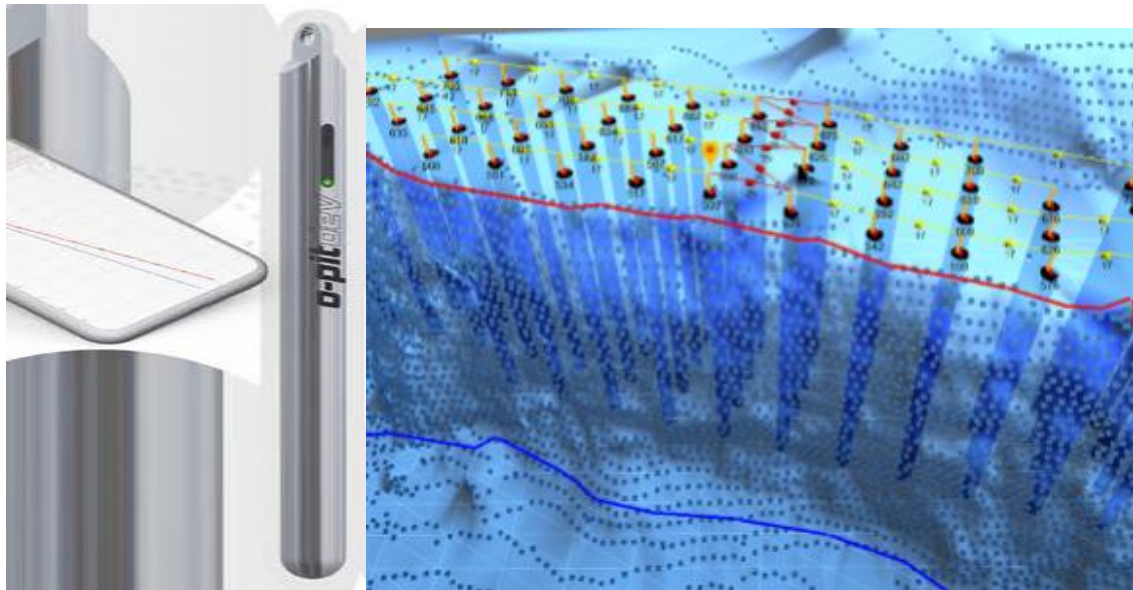


Figura 46 - O-Pitdev como dispositivo de introdução nos furos de uma pega de fogo e um exemplo de um esquema de pega de fogo no software, O-Pitblast (setembro 2021)⁷

Drillit

O *Drillit* é um software de controlo do processo de perfuração e desmonte em tempo real.

Utiliza o GPS que tem de estar instalado em todas as perfuradoras e ainda requiere a prévia disponibilização da topografia atualizada da pedreira, modelos e informações sobre os blocos de rocha e a planos de perfuração. Pode ser um software que integre sistemas integrados de várias operações de pedreira (ex: Fleet Terrain Caterpillar, com a explicação mais à frente nesta dissertação).

Melhora os resultados do processo de perfuração e desmonte através da análise online do avanço da perfuração em tempo real.⁸

Vantagens da utilização:

- Mede a profundidade dos furos e velocidade de perfuração;
- Analisa a qualidade da perfuração detetando possíveis desvios em relação ao plano de perfuração e emite alertas;
- Define o padrão da pega de fogo e a quantidade de carga de explosivos de acordo com os parâmetros

⁷ <https://www.o-pitblast.com/pt-pt/about/>

⁸ <https://www.timing.com/pt-br/software/drillit/>

- Durante a perfuração exibe num dispositivo o rendimento da máquina perfuradora e ainda a presença de deformações ou água;⁹

Na Figura 47, consegue-se observar um exemplo de um gráfico que o operador pode ter acesso através deste software, com dados sobre a velocidade de perfuração, desempenho da máquina e outros parâmetros:



Figura 47 - Gráfico com parâmetros da atividade de perfuração no software Drillit (timing.com/pt-br/software/drillit/) (setembro 2021)

MOBA (Mobile Automation) XSite Pro 3D Drilling¹⁰

O MOBA XSite Pro 3D Drilling é um sistema de controlo total da operação de perfuração, consiste num sistema que une Hardware e Software. Neste caso, na parte de Hardware é necessário ter: O display, recetor compatível com rede de Internet, sensores de inclinação e uma antena. O sistema capta informações da perfuradora e ao mesmo tempo que o operador da máquina tem acesso as informações, as informações também podem ser transmitidas para computadores que estejam noutra localização. A marca ainda dispõe de softwares para a criação de modelos de superfície 3D.

⁹ <https://www.youtube.com/watch?v=5x4lbBAXB70&t=64s>

¹⁰ <https://moba-automation.com.br/tecnologias/perfuracao>

As principais características deste sistema são:

- O Operador da máquina perfuradora, tenha acesso em tempo real aos parâmetros da perfuração e a possibilidade de armazenamento de dados em nuvem;
- Controla a inclinação e desvios dos furos fazendo uma correção de posicionamento através da georreferenciação;
- Permite que operador da máquina perfuradora tenha acesso aos dados sobre a profundidade e a presença da água;
- Realização de modelos 3D.

Este sistema é compatível com vários fabricantes. E da mesma empresa tem disponíveis outros acessórios que ajudam no processo de perfuração é o exemplo do *MDS-1000*. Realiza medições da profundidade em tempo real e apoia o técnico durante a operação de perfuração. Tornando a mesma igualmente rentável, menos tempo despendido, aumento da segurança.



Figura 48 - Sistema de controlo do processo de perfuração, XSite Pro 3D Drilling (moba-automation.com.br)(Setembro 2021)

Estes sistemas em que unimos o hardware ao software tornam as operações muito mais eficientes. A utilização de sensores inteligentes, permitem que os dados obtidos sejam o mais próximo da realidade possível. Depois podem ser ainda ser armazenados dentro de uma nuvem de uma empresa e consultado pelos técnicos.

Estes sistemas em que unimos o hardware ao software tornam as operações muito mais eficientes. Transformam a realidade em valores digitais e permitem um controlo sobre toda a operação de uma maneira muito mais facilitada.

AUTOMINE Surface Drilling- Sandvik¹¹

É um sistema de automação que permite o controlo remoto da máquina e até mesmo para um trabalhador com mobilidade reduzida, o mesmo consegue trabalhar com esta tecnologia. O operador visualiza os dados em tempo real e de acordo com o esquema de perfuração, vai analisar o comportamento da máquina e toda a ação de perfuração. A máquina deteta obstáculos e usa o sistema de GPS para se movimentar.¹² Na figura 49, ilustra todo o modelo tecnológico:



Figura 49 - Representação de um sistema remoto da Sandvik

5.2 Sistemas Integrados para as operações de Carregamento e Transporte

5.2.1 Sistemas Integrados

Cat Minestar¹³

Cat Minestar Fleet corresponde a sistemas integrados num programa que junta as operações a céu aberto, faz a gestão de toda frota permitindo que o operador da máquina e um especialista fora da área de exploração tenham o mesmo acesso a todos os dados necessários para melhorar a produção e segurança.

- Coleta dados de todas as máquinas, tais como, *dumpers*, perfuradoras, pás carregadoras e ainda equipamentos de transporte extra;

¹¹ <https://www.rocktechnology.sandvik/pt-br/produtos/automacao/sistemas-de-teleopera%C3%A7%C3%A3o-e-automa%C3%A7%C3%A3o-de-equipamento-do-automine/automine-surface-drilling/>

¹² <https://www.youtube.com/watch?v=5lgr8PkOjVc>

¹³ https://www.cat.com/en_US/by-industry/mining/surface-mining/surface-technology.html

- Coleta os dados e analisa, sendo geralmente num escritório central;
- Minimiza os tempos de paragem das máquinas, com o controlo das necessidades de manutenção e alternativas a prováveis necessidades de mudança de rotas;
- No caso de pedreiras com uma grande frota, o software ao localizar os *dumpers* e no caso de existir um *dumper* que por algum motivo esteja parado, automaticamente o sistema seleciona outro *dumper* para ir no seu lugar. Para evitar paragens na produção;
- Faz a programação de combustível e as mudanças de turnos para evitar paragens na produção;
- Prevê possíveis acidentes e alerta o operador para uma solução. ¹⁴



Figura 50 - Catminestar, centro de controlo de operações (cat.com)(Setembro 2021)

Orchestra¹⁵

Este software analisa todos os dados de desempenho dos equipamentos de carregamento e transporte, emitindo relatórios que permitem observar todos os parâmetros que podem estar a influenciar a operação. Uma das funções do programa é identificar a operação que está a causar constrangimentos, usando dados reais e com esses dados, criar modelos e resultados, assim, podemos avaliar se o modelo em concreto está a ser lucrativo ou não e detetar oportunidades de melhoria.

¹⁴ <https://www.youtube.com/watch?v=VZQyQKFibeo&t=1s>

¹⁵ <https://www.youtube.com/watch?v=6ERTITVx8gg&t=1s>

O software *Orchestra*, emite relatórios e gráficos de velocidade, tempos de cargas, descargas e deslocação, localização exata devido à utilização do sistema de GPS e ainda performance de máquina.

- Cria mapas topográficos;
- Acesso ao trajeto em tempo real;
- Faz comparações entre dados de trajetórias de dias diferentes e seu desempenho;
- Analisa os tempos de paragem;
- Simulação diária de planos de toda a atividade de carregamento e transporte;
- Cálculo de ciclos;
- Cada equipamento de transporte tem a sua própria identificação e ficha de dados.¹⁶

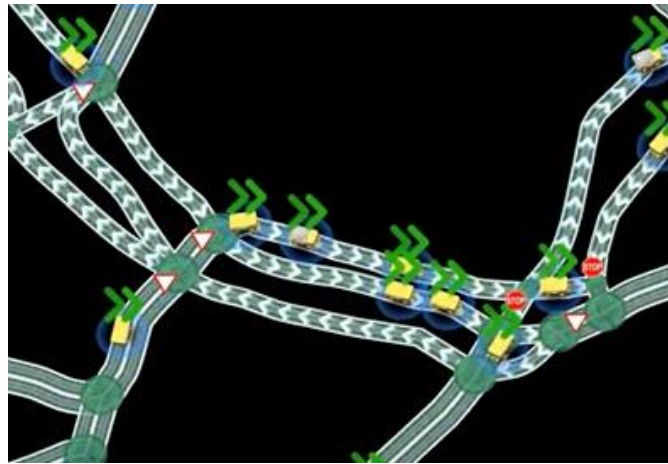


Figura 51 - Exemplo de uma frota de dumpers no software *Orchestra* (*timing.com*)

Os sistemas integrados reduzem custos de produção nas minas e pedreiras a 20%, aumentando a produtividade a 30% e diminuindo os incidentes em 50%. Com as operações ligadas num sistema, o ciclo pode ser contínuo e sem paragens ou pelo menos diminuir o tempo das mesmas.¹⁷

ABB- Asea Brown Boveri, Centros de Operações Remotas e Integradas (IROC)¹⁸

A *ABB* identificou potenciais níveis de automação para atividades existentes e ainda programas para o futuro, oferecendo um conjunto de soluções para cada tipo de fase de

¹⁶ <https://www.timing.com/software/orchestra/>

¹⁷ <https://www.mining-technology.com/mining-safety/autonomous-haulage-systems/>

¹⁸ <https://www.youtube.com/watch?v=dPwV6hP8p2w>

produção. Sistema que integra o conjunto de operações de pedreiras e minas com a programação de circuitos, todos na mesma plataforma.

Criaram sistemas como, centros tecnológicos e salas de controlo que monitorizam os equipamentos e máquinas afetas à exploração mineral. Controlam e processam através de distintas variáveis.

- Planificação e design de toda a cadeia de exploração para melhor aproveitamento de recursos. A *ABB* foca no melhor caminho a seguir para chegar ao objetivo final;
- Soluções disponíveis numa biblioteca digital para cada atividade em que todos os técnicos e operadores tem acesso;
- Otimização de cada fase de todo o processo produtivo através de análise de dados;
- Todas operações estão a ser transmitidas em ecrãs em tempo real, permitindo a tomada de decisões necessárias para que não haja possíveis perturbações e necessidade de manutenções;
- Os operadores podem comunicar e trabalhar remotamente ou na mesma sala;
- Fornecem alertas através de uma nuvem;¹⁹

Rami 4.0 (Reference Architectural Model for Industry 4.0)

Na sua criação este software foi pensado para otimizar a Indústria 4.0, contudo existem elementos deste que podem ser adaptados ao *Mining 4.0*, e daí vem a sua inclusão neste capítulo.

O *Rami 4.0* é um modelo que permite estabelecer ligações cibernéticas entre toda a cadeia de produção. Este modelo vai resultar na ligação entre dispositivos inteligentes (*Smart factory*) e uma *cloud* onde os dados vão estar disponíveis e armazenados. Inicialmente, desenha-se a linha de automação e dispositivos, depois cria-se componentes de informações necessárias (Controlo de manutenções, arquivo de dados da qualidade do material rochoso, por exemplo, entre outros componentes à escolha), configurar o sistema com o objetivo de ser constantemente personalizado, alterado e totalmente adaptado ao *Mining 4.0*.

- Orienta o fluxo de produção e operações;
- Preserva a segurança.

Na imagem a seguir esta representado o fluxograma do objetivo destes sistemas integrados para a implementação da Indústria 4.0:

¹⁹ <https://www.youtube.com/watch?v=byql25newio&t=108s>

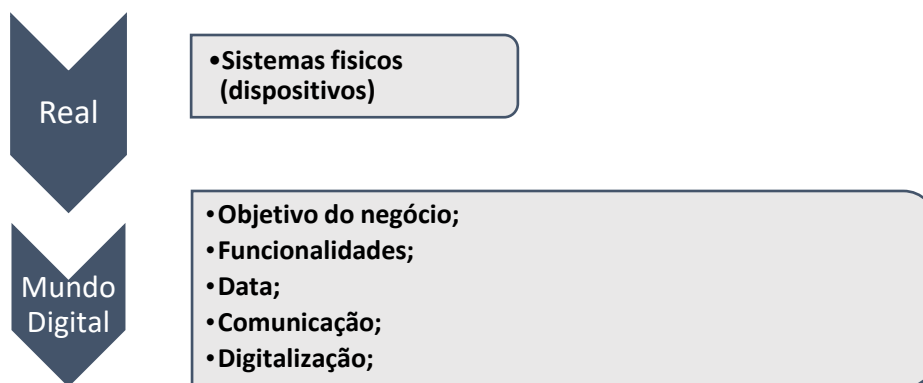


Figura 52 - Fluxograma sobre a Indústria 4.0 (Adaptado de ec.europa.eu)²⁰(Outubro 2021)

Industrial Internet Reference Architecture (IIRA) e OneM2M²¹

Estes dois sistemas industriais são também sistemas de produção, são também alternativas criadas para a Indústria 4.0, mas que podem ser adaptados para o *Mining 4.0*. Mas por fases, ou apenas no processo de carregamento e transporte ou na Fragmentação e Crivagem. Fornece o relatório técnico da arquitetura do processo de ligação das operações. Sendo que de acordo com o objetivo da empresa e dados fornecidos, o mesmo vai emitir orientações para construir o melhor sistema de uma ponta à outra. Consegue organizar o melhor sistema para armazenar dados de sensores e sistemas inteligentes.

A principal funcionalidade da plataforma *OneM2M* é proporcionar que qualquer aplicação/software IoT interaja com qualquer dispositivo inteligente. A arquitetura destes sistemas permite evitar barreiras entre sensores e aparelhos IoT com outros, sendo caracterizado por serem os mais simples na implementação.

5.2.2 Equipamentos de carregamento e transporte para a implementação de sistemas integrados 4.0

Os sistemas integrados só funcionam se tiverem máquinas que possibilitem a integração deste tipo de sistemas, máquinas que tenham a capacidade de fazer a ligação por rede a um sistema com armazenamento em nuvem.

²⁰ https://ec.europa.eu/futurium/en/system/files/ged/a2-schweichhart-reference_architectural_model_industrie_4.0_rami_4.0.pdf

²¹ <https://www.onem2m.org/using-onem2m/what-is-onem2m>

- **Pás Carregadoras**

Os fabricantes de pás carregadoras tem desenvolvido opções de pás carregadoras com sistemas integrados de controlo de carga: A Caterpillar disponibiliza uma pá frontal com balança integrada, como a CAT 962L AH e a CAT 972L AH, “*caterpillar production measurement*” que permite controlar da carga que esta a ser transportada em tempo real. Isto permite que os operadores ao atingirem a carga necessária, evitam situações de sobrecarga, que resultem na perda de produtividade e aumento do consumo de combustível.²²

- **Dumpers**

Dumpers autónomos, com rotas já pré-definidas e com dados de viagens à disposição do condutor e restantes técnicos, em tempo real, transmitidas numa sala de controlo. Permite a utilização do sistema GPS para a localização exata, calcular horas de trabalho, velocidade, possíveis falhas durante o percurso, agendamento de manutenções. Estas características vão permitir que forçosamente estas máquinas sofram menos desgaste, sendo que vai ser permitido a análise de toda a atividade da máquina, mais controlo de gastos de combustível, melhor planeamento da frota de *dumpers* e ainda, possuem sistemas de deteção de outras máquinas que mantém “comunicação” entre elas, evitando choques. A maior vantagem, é na segurança do trabalhador e a produção contínua, sendo que não necessita de nenhum condutor e também não necessita de paragens desnecessárias.

- Komatsu FrontRunner autonomous system: *dumper* autónomo que consegue economizar 15% do combustível, a operação consiste no envio constante de dados em tempo real, aumentando a segurança e a produção, sem desnecessárias paragens.²³ (Figura 53)



Figura 53 - Komatsu FrontRunner (in:komatsu.com)

²² https://www.cat.com/en_US/by-industry/mining/minestar-solutions/automation.html

²³ <https://www.komatsu.com/en/site-optimization/smart-mining/loading-and-haulage/autonomous-haulage-system/>

- O eDumper é uma solução mais sustentável, é um *dumper* elétrico com carga de 65 toneladas e com capacidade de vencer uma inclinação de 13%. Usa um sistema de travagem para regeneração de energia. Este *dumper* elétrico é o maior veículo elétrico do mundo, com capacidade de 65 toneladas, possui baterias que recarregam ao travar durante as descidas do terreno. Foi criado com a união da Kuhn Schweiz AG, Universidade de Berna (Suíça) e a Universidade de Buchs (Suíça). O *dumper* transportará 300.000 toneladas de rocha nos próximos 10 anos, economiza 500.000 litros de diesel, evitando 1.300 toneladas de CO² na atmosfera.²⁴ (Figura 54)



Figura 54 - eDumper (in:businessinsider.com)

- *Dumper* elétrico e autónomo Volvo TA15, com sistema de GPS, Lidar, Radar e múltiplos sensores. Funciona a bateria, tem capacidade para transportar 15 toneladas e evita 98% menos emissões de CO².²⁵ (Figura 55)



Figura 55 - *Dumper* Eléctrico VolvoTA15

²⁴ <https://www.lwtsistemas.com.br/2018/05/15/conheca-o-maior-caminhao-eletrico/>
<https://www.businessinsider.com/edumper-121-ton-electric-dump-truck-2019-8#the-edumper-began-life-as-a-traditional-gas-guzzling-dump-truck-and-the-transformation-was-no-small-feat-heres-a-human-for-size-comparison-2>

²⁵ <https://www.volvoautonomoussolutions.com/en/our-solutions/our-pilots/tara>

5.3 Beneficiação do material

O **ASRI (Automatic Setting Regulation)** controla automaticamente o britador, com a junção de dados sobre a alimentação a sua flutuação e dureza do material a ser fragmentado. Este sistema vai oferecer à empresa uma maior produtividade, menos tempo de paragens, mais controlo do processo de fragmentado e ainda, representação na figura 56:

- Evita sobrecarga;
- Visibilidade da operação em tempo real;
- Diminui o desgaste do britador;
- Permite perceber erros caso estejam a ocorrer.

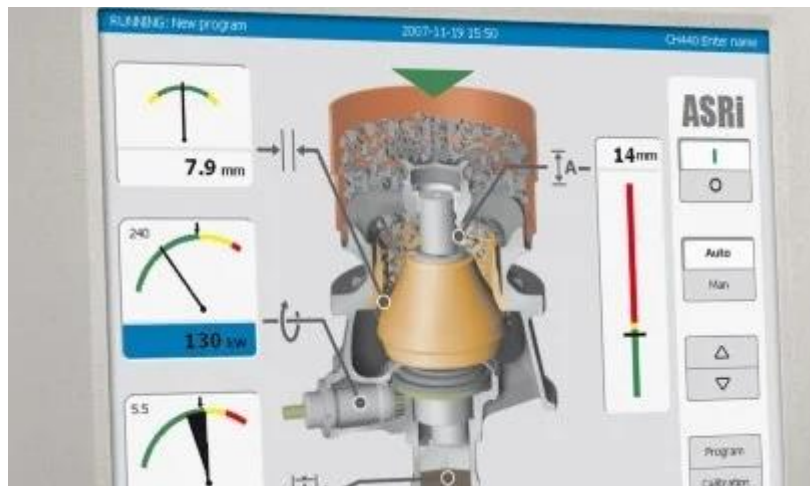


Figura 56 - Imagem representativa de software ASRI (in:rocktechnology.sandvik)²⁶

Metso Outotec Metrics

É uma plataforma que permite o acesso remoto as informações do equipamento, estas informações são armazenadas numa *cloud*. Os trabalhadores não necessitam estar no local, evitando riscos desnecessários e o processo de entrada e saída de material rochoso é devidamente controlado.

Existem dois níveis de visibilidade, a visibilidade só por parte da empresa/cliente ou existe a possibilidade de recorrer a especialistas da *Metso Performance Centers*. O objetivo

²⁶ <https://www.rocktechnology.sandvik/pt-br/produtos/britadores-e-peneiras-estacion%C3%A1rios/automa%C3%A7%C3%A3o-do-britador/automa%C3%A7%C3%A3o-do-britador/>

é otimizar as operações de fragmentação e crivagem. Este sistema está disponível para britadores de cone, moinhos e primários.

Existem na atualidade poucos *softwares* de controlo de equipamentos de fragmentação e crivagem, no entanto, uma das formas para ter acesso a tempo real do ciclo produtivo é a utilização de uma câmara à prova de vibrações e poeiras que transmita imagens de toda a atividade.²⁷

Segurança- Wearables

A integração de sensores (*wearables*) nos trabalhadores corresponde a uma das tecnologias 4.0, possibilita obter dados sobre a segurança dos mesmos e problemas em equipamentos que possam se tornar um perigo. Os sensores promovem o mapeamento geográfico das localizações dos trabalhadores e suas trajetórias para quantificar o tempo gasto em áreas de trabalho específicas. Existem sensores em roupas ou acessórios que os trabalhadores podem usar e que vai permitir conseguir dados fisiológicos sobre os mesmos. Os dados vão ser obtidos e armazenados numa *cloud*, melhorando a agilidade entre sensores e outros dispositivos (Calvetti et al., 2020).

- Sensores fisiológicos (eletrocardiograma, batimento cardíaco, oxímetro);
- Smartwatches e pulseiras (acelerómetros);
- Óculos de visão mista (Microsoft HoloLens, Google Glass);
- Coletes desportivos (Athos sportsware), controlo esforço muscular;
- Anel para controlo de atividades corporais (Motiv ring).

De forma a tirar as melhores conclusões irá ser feita uma comparação entre softwares para poder concretamente verificar as valências de cada um deles e qual poderá melhor adaptar-se ao que se pretende.

²⁷ <https://www.mogroup.com/portfolio/metso-metrics/>

Tabela 6 - Softwares de perfuração e desmonte

	O-Pitblast	Drillit	MOBA Xsite Pro3D
Aumento da Produção	✓	✓	✓
Levantamento Topográfico	✓	✓	-
Segurança (diminuição de riscos no local)	✓	✓	✓
Proteção do Ambiente/Sustentabilidade	-	-	-
Controlo redução de consumos	✓	✓	✓
Plano de desmonte	✓	✓	✓
Gestão das atividades (controlo das máquinas)	✗	✓	✓
Eficiência do operador	✓	✓	✓
Deteção de desvios dos furos	✓	✓	✓
Planificação do padrão da perfuração	✓	✓	✓
Recomendações já programadas	✓	✓	✓
Recomendações e apoio de especialistas	✓	-	-
Planos de manutenção da máquina perfuradora	✓	✓	✓
Controlo de Vibrações	✓	✗	✗
Previsão de Calibre da rocha fragmentada	✓	✓	✗
Informações em tempo real	✓	✓	✓

Tabela 7 - Softwares de carregamento e transporte/Sistemas Integrados

	Orchestra	CatmineStar	ABB – Operações Integradas
Planos de Manutenção	✓	✓	✓
Melhor desempenho da frota	✓	✓	✓
Eficiência do operador	✓	✓	✓
Segurança	✓	✓	✓
Menor tempo de Paragem	✓	✓	✓
Compatibilidade com diversas máquinas	-	✓	✓
Centro de operações	✓	✓	✓
Controlo de velocidades de consumos	✓	✓	✓
Tempo real	✓	✓	✓
Soluções integradas, com outras atividades	✗	✓	✓

5.4 Considerações finais - Aplicações do Mining 4.0 no caso de estudo

No presente caso de estudo, inicialmente, tendo em conta as suas valências o software a ser aplicado seria *O-Pitblast* para a implementação de um padrão de pega de fogo, emissão de relatórios para controlo de toda a operação de perfuração e desmonte.

Esta aplicação permitiria evitar desvios dos furos e seria possível recolher dados relacionados com deformações, possíveis cavidades, que pudessem alterar a composição da coluna de carregamento dos explosivos. No caso de estudo, o tipo de rocha no local é o

calcário, em consequentemente um dos maiores impedimentos para o sucesso de alguns planos de pegadas de fogo, são, a falta de conhecimento de cavidades no maciço.

Uma vez que o *O-Pitblast* apresenta dados sobre o calibre da fragmentação e dados sobre as vibrações geradas pelo desmonte este torna-se a melhor opção entre os demais. Deve-se referir que a previsão do calibre de fragmentação e concretização da mesma, origina blocos com tamanhos mais homogêneos, evitando o processo de taqueio, que resulta em mais gastos na produção. E apesar da Pedreira Vale Longo estar longe de habitações é importante obter dados e controlar as vibrações durante o desmonte para que não haja acidentes nem abalos de estruturas locais e geológicas, e daí a escolha por este software.

CatMinestar Fleet seria o software a implementar na fase de carga e transporte do material rochoso. A implementação deste teria como objetivo o controlo geral de toda a operação, uma vez que apenas existe um *dumper* afeto à frente de pedreira e uma pá giratória, só existiria a necessidade de controlar e analisar uma rota e as características da operação de carregamento. No entanto, para que toda a operação fosse melhorada, a aquisição de outro *dumper*, seria uma necessidade. O investimento passaria por um *dumper* autónomo com as mesmas capacidades de carregamento para que não houvesse tempos desnecessários de paragens, uma contínua produção e ainda diminuição de riscos ao ter a opção de ter um operador a controlar o veículo numa sala de controlo, que também criava para facilitar a receção de dados em tempo real, assim qualquer dado poderia ser discutido entre os operadores e especialistas para tomarem a melhor decisão.

Ao adquirir outro *dumper*, enquanto um estaria a carregar, o outro estaria a descarregar e com a utilização do software da Caterpillar, seria possível o controlo da operação total. Obtendo informações sobre manutenções, ciclo de transporte, tempo de trabalho da máquina e controlo do material transportado, tirando assim melhor aproveitamento de ambas as máquinas.

Nas operações de fragmentação e classificação, seria necessário alterar os equipamentos que estão a ser utilizados neste momento, por equipamentos mais recentes e incorporando um sistema de controlo mais rigoroso. Como por exemplo o apresentado pela *Metso Outotec Metrics*, este controla todo o processo, sem a necessidade de um trabalhador estar no local exposto a um elevado número de poeiras e ruído. Com este sistema, haveria um controlo maior dos calibres de entrada, saída e ainda a quantidade de material britado. O desgaste do equipamento seria menor, pois esta plataforma permite recolher dados da rocha e optar pelas melhores capacidades mecânicas do britador, preservando a vida útil desta máquina. Como redução de custos, ainda diminui a eletricidade necessária para esta

atividade, sendo que a programação vai ser a adequada e o material não vai estar em ciclos fechados de fragmentação completamente desnecessários.

Relativamente à utilização da Aerofotogrametria, a proposta passaria pela utilização bi-diária (abertura e fecho de produção) de forma a medir a volumetria das pilhas na frente de pedreira e assim consequentemente conseguir calcular a quantidade de produção diária.

As implementações faladas são básicas e trariam o Caso de Estudo um pouco do que é o *Mining 4.0*, mas sem chegar a este, uma coisa seria certa, os custos iriam diminuir e a produtividade iria aumentar com estas pequenas aplicações.

6. CONCLUSÕES

Este trabalho teve como foco principal a investigação de tecnologias 4.0 transversais a diferentes tipos de exploração mineral a céu aberto e exemplo de aplicação na Pedreira Vale Longo em Penela.

No presente trabalho foi possível analisar métodos e tecnologias para a implementação do *Mining 4.0*, com a aplicação da Internet das coisas (sistemas de redes e fácil ligação à internet), *Big Data* (Armazenamento rápido numa *cloud* de um grande volume e variedade de dados) e sistemas cibernéticos que estabelecem estas ligações, entre um hardware, software e o ser humano. Os principais objetivos destas ligações são o aumento de produção, melhoria na segurança e sustentabilidade ambiental.

A investigação centrou-se na análise inicialmente, geral de todas as atividades de pedreiras a céu aberto. Denotou-se que duas fases de todo o processo produtivo merecem uma atenção especial, a operação de desmonte e carregamento e transporte, sendo a adequada escolha de equipamentos, fundamental para todo o sucesso do ciclo.

Assim o processo de desmonte e o de carregamento e transporte do material rochoso são os que mais se destacaram e vão alterar todo o processo a seguir.

O processo começa com a planificação adequada da pega de fogo, caso a projeção não seja adequada para certo maciço ou haja algum tipo de defeito do furo, a introdução de explosivos e todas as atividades seguintes, serão condicionadas. Ao originar mais gastos e aumentando do custo de produção, o ciclo vai representar baixa eficiência, mais desgaste das máquinas, desgaste físico dos operadores e menor produtividade (menor lucro).

No caso de estudo da Pedreira de Vale Longo, procedeu-se à análise do ciclo de produção total, desde a frente de desmonte até o processo de beneficiação da rocha. Constatou-se alguns detalhes, como, pegas de fogo com pouco rigor, baseadas em função da observação do terreno e experiência na área e ainda terrenos muito irregulares e falta de estudos topográficos à medida que se avança no terreno. Isto, originou desmontes em que alguns furos não foram detonados, calibres superiores a um metro e alguma projeção. Observou-se também a recorrente utilização do processo de taqueio.

Durante a fase de carregamento e transporte, foram analisados ciclos em diferentes dias e os resultados foram semelhantes, com tempos muito constantes. Contudo existe a possibilidade da otimização do processo. Investir noutro equipamento de transporte semelhante, mas autónomo em que seja possível a constante produção sem tempos de

inatividade, gastos mais regulares e obtenção de dados do equipamento para o agendamento das manutenções, sem a necessidade do desgaste exaustivo do equipamento.

No local de Britagem e Classificação do material, os equipamentos são um pouco antiquados e durante todo o processo de produção, verificaram-se muitas paragens, sendo que muitas vezes as mesmas eram devidas ao calibre e ao formato do material que entra na alimentação por conta de algumas falhas no plano de desmonte. Estas falhas originam uma maior utilização de eletricidade devido as partículas que demoram a ser fragmentadas. Este local é ainda o local onde existe uma grande quantidade de poeiras e ruído, o que causa fadiga e decréscimo de produtividade por parte dos operadores.

Todos os dados das atividades são guardados em folhas de *excel*, num servidor da empresa e nem sempre são consultados regularmente. Nem todos os dados foram fornecidos e o tratamento deles não foram o suficiente para se ter uma concreta solução, mas baseado na pesquisa executada conclui-se que algumas tecnologias são possíveis de serem implementadas.

Neste trabalho houve a possibilidade de proceder à demonstração de uma tecnologia 4.0 para fazer dois levantamentos topográficos, com a utilização de um VANT. Um equipamento que demora pouco tempo a fazer o levantamento, apesar de variar consoante o tipo de resolução das imagens, permite obter imagens bastante precisas e com a localização certa.

Após a utilização desta ferramenta, posteriormente procedeu-se à realização de métodos fotogramétricos e possibilitou a criação de modelos, cálculo de volumes, análise de processo do avanço da frente de desmonte e estabilidade de taludes. Ao realizar este tipo de estudo pode-se avaliar os erros cometidos na planificação do desmonte e otimizar esta operação. Existe outra vantagem para a utilização desta ferramenta, como a segurança dos operadores e operador do VANT, o mesmo consegue sobrevoar áreas de difícil acesso.

Existem várias tecnologias para a indústria 4.0, mas especificamente para a área aplicada à exploração mineral, existem poucas. Os diferentes softwares e equipamentos inteligentes ligados através de redes capazes de sustentar grandes volumes de dados, podem ser uma mais-valia para a evolução positiva dos lucros da empresa, preservação do bem-estar dos trabalhadores e ainda poupança de energia com o regular fornecimento e análise de dados de cada equipamento. A possibilidade de obter relatórios, gráficos, esquemas e todo o tipo de informações em tempo real, facilita o trabalho dos operadores e possibilita resolução e previsão de problemas.

A tecnologia está em constante evolução, por isso mais revoluções tecnológicas virão. O mundo da tecnologia está sempre em mudança e por isso o termo *Mining 4.0* tem de ser

mais abordado, apesar de haver vários sistemas integrados na indústria 4.0, torna-se difícil a aplicação desses modelos numa exploração a céu aberto. Especificamente no caso de Portugal, existem algumas empresas grandes a começar a implementar mais tecnologias 4.0, mas é apenas um começo. Para além dos sistemas integrados já existentes, são necessárias mais opções no mercado, mais investimento em programas para implementação destes sistemas, mais investimento na formação de profissionais capazes de trabalhar com estas tecnologias e mais alternativas sustentáveis.

6.1 Recomendações

De maneira a concretizar a implementação do *Mining 4.0* numa empresa de exploração mineral, para além da utilização das tecnologias apresentadas nesta dissertação, existem algumas medidas extra que podem facilitar o processo:

- Fornecer formações para os operadores no local de trabalho sobre as tecnologias 4.0;
- Implementação de dispositivos (chipe eletrónico) à entrada da pedreira para controlo da localização de cada operador, como medida de segurança;
- Como medida sustentável, criação de parque eólico ou fotovoltaico para o fornecimento de energia elétrica às instalações, permitindo uma menor dependência de fontes de energia de combustíveis fósseis, reduzindo as emissões de CO².

6.2 Trabalhos Futuros

A investigação por alternativas no *Mining 4.0* precisa de continuar a ser feita, ainda existe poucas opções.

Propostas para futuros trabalhos:

- Investigação para a implementação de tecnologias *Mining 4.0* para Minas ou pedreiras de rocha ornamental;
- Adaptação prática de sistemas de Indústria 4.0 ao *Mining 4.0*;
- Utilização da tecnologia de realidade aumentada como tecnologia 4.0 para observação de atividades na pedreira, em que o acesso é mais inseguro para a presença de trabalhadores;
- Na parte dedicada a fotogrametria, o objetivo a seguir seria usar programas capazes de identificar as formas das rochas e tamanhos através de filtros e ferramentas aplicadas às imagens captadas, por exemplo através de www.gimp.org, e com esses

dados fazer curvas granulométricas. Permite a análise do material que é desmontado, quanto aos calibres e assim a modificação do plano de pega de fogo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aliti, A., O. Alrawashdeh, R., & M. Alnawafleh, H. (2021). Open Pit Mining. *Mining Techniques - Past, Present And Future*. doi:10.5772/intechopen.92208
- Ananth, K., Rakesh, V., & Visweswarao, P. (2013). Design and selecting the proper conveyor-belt. *International Journal Of Advanced Engineering Technology*, IV(April - June), 43-49.
- Azerêdo, A., Duarte, L., & Henriques, M. (2003). Da dinâmica continental no Triásico aos mares do Jurássico Inferior e Médio. Lisboa: Instituto Geológico e Mineiro.
- Aziz, A., Schelén, O., & Bodin, U. (2020). A Study on Industrial IoT for the Mining Industry: Synthesized Architecture and Open Research Directions. *lot*, 1(2), 529-550. doi: 10.3390/iot1020029
- Baganha, M., Marques, J., & Góis, P. O Sector da Construção Civil e Obras Públicas em Portugal: 1990-2001 [Ebook]. Consultado em <https://www.ces.uc.pt/publicacoes/oficina/173/173.pdf>
- Balasubramanian, A. (2017). Rock Blasting For Mining [Ebook]. Mysore: University of Mysore. Consultado em https://www.researchgate.net/publication/316158230_ROCK_BLASTING_FOR_MINING
- Bartnitzki, T. (2017). Mining 4.0 – Importance of Industry 4.0 for the Raw Materials Sector [Ebook] pp. 25 – 31. Consultado em https://mining-report.de/wp-content/uploads/2017/02/MRG_1701_RWTH_Bartnitzki_170105.pdf
- Berg, H., Jansen, M., Blévenec, K., Bottermann, P., Magnus-Melgar, M., Pohjaleinen, E., & Wahlstrom, M. (2021). Unlocking the potential of Industry 4.0 to reduce the environmental impact of production [Ebook]. Eionet Report.
- Bertayeva, K., Panaedova, G., Natocheeva, N., Kulagovskaya, T., & Belyanchikova, T. (2019). Industry 4.0 in the Mining Industry: Global Trends and Innovative Development. In *E3S Web of Conferences* 135, EDP Sciences. doi.org/10.1051/e3sconf/201913504026
- Calvetti, D., Mêda, P., Chichorro Gonçalves, M., & Sousa, H. (2020). Worker 4.0: The Future of Sensored Construction Sites. *Buildings*, 10(10), 169. doi: 10.3390/buildings10100169
- Cordeiro, A., (2006). Penela - Carta Educativa. Coimbra: Secção de Textos da FLUC.
- Collan., & Harrison. (2020). Technical, Economic and Societal Effects of Manufacturing 4.0. Lappeenranta: Springer International Publishing.
- Corke, P., Roberts, J., Cunningham, J., & Hainsworth, D. (2008). Mining Robotics. *Springer Handbook Of Robotics*, 1127-1150. doi: 10.1007/978-3-540-30301-5_50
- Costner, K., Günther, F., Brune, J., & Mischo, H. (2019). State of the Art of the Industrial Internet of Things and Underground Autonomous Robots In the United States [Ebook]. Denver: SME. Consultado em https://www.researchgate.net/publication/331530214_State_of_the_Art_of_the_Industrial_Internet_of_Things_and_Underground_Autonomous_Robots_in_the_United_States
- Coutinho, H. (2017). *Melhoria contínua aplicada para carregamento e transporte na operação de mina a céu aberto* (Master). Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto.
- Couto, R. (1990). *Lavras a Céu Aberto e Equipamentos Principais* (Ph.D). Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

- Cunha, L. (1981). O Duença a montante de Miranda do Corvo. *Revista Da Universidade De Coimbra*, 24, 451-520.
- Cunha, L. (1990). *As Serras Calcárias de Condeixa-Sicó-Alvaiázere*. Coimbra: Instituto Nacional de Investigação Científica.
- Curi, A. (2017). *Lavra de Minas*. São Paulo: Oficina de Textos.
- Deane, P., & Kuznets, S. (1967). Modern Economic Growth. Rate, Structure, and Spread. *The Economic Journal*, 77(308), 882. doi: 10.2307/2229582
- Dey, S., Dey, S., & Das, A. (2013). Comminution features in an impact hammer mill. *Powder Technology*, 235, 914-920. doi: 10.1016/j.powtec.2012.12.003
- Dimuccio, L., Duarte, L., & Cunha, L. (2016). Definição litostratigráfica da sucessão calco-dolomítica do Jurássico Inferior da região de Coimbra-Penela (Bacia Lusitânica, Portugal). *Comunicações Geológicas*, 103(1), 77-96.
- Duarte, J. (2018). *Contributos para a Caracterização de Áreas com Potencial para a Extração de Rochas Ornamentais Carbonatadas - Análise Integrada de Dados Fotogramétricos, Geológicos e Geofísicos para Caracterização de Maciços* (Phd). Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.
- Faramarzi, F., Mansouri, H., & Ebrahimi Farsangi, M. (2013). A rock engineering systems based model to predict rock fragmentation by blasting. *International Journal Of Rock Mechanics And Mining Sciences*, 60, 82-94. doi: 10.1016/j.ijrmms.2012.12.045
- Fremdling, R. (1996). *Industrial Revolution and Scientific and Technological Progress* [Ebook] (1ª ed.). Groningen. Consultado em https://www.researchgate.net/publication/5064586_Industrial_Revolution_and_Scientific_and_Technological_Progress
- Gandomi, A., & Haider, M. (2015). Beyond the hype: Big data concepts, methods, and analytics. *International Journal of Information Management*, 35(2), 137-144. doi:10.1016/j.ijinfomgt.2014.10.007
- Gillette, H. (2012). *Handbook of rock excavation, methods and cost*. Hardpress Publishing.
- Gokalp, M., Kayabay, K., Akyol, M., Eren, P., & Kocyigit, A. (2016). Big Data for Industry 4.0: A Conceptual Framework. 2016 International Conference On Computational Science And Computational Intelligence (CSCI). doi: 10.1109/csci.2016.0088
- Gonçalves, J., Manta, V., & Carvalho, M. Geração automática de orto-mosaicos de fotos aéreas de arquivo do Concelho de Coimbra. *Atas Das I Jornadas Lusófonas De Ciências E Tecnologias De Informação Geográfica*, 748-766. doi: 10.14195/978-989-26-0983-6_44
- Gonçalves, T. (2017). *análise de Curvas Granulométricas de material desmontado na deteção indireta de anomalias de operações de perfuração* (Master). Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Hardy, R. (2007). *Selection Criteria For Loading and Hauling Equipment - Open Pit Mining Applications* (PhD). Western Australian School of Mines.
- Heiniö, M. (1999). *Rock excavation handbook*. Sandvik Tamrock.
- Horgan, S. (2020). *A evolução da crise económica em Portugal e a evolução da construção civil Análise baseada no comportamento de alguns recursos geológicos utilizados na construção civil* [Ebook]. Consultado em <https://www.dgeg.gov.pt/media/ztja3b3m/a-evolu%C3%A7%C3%A3o-da-crise-econ%C3%B3mica-em-portugal-versus-evolu%C3%A7%C3%A3o-da-constru%C3%A7%C3%A3o-civil.pdf>

- Horn, J. (2016). *The industrial revolution* (1ª ed.). Westport, Connecticut: Greenwood Press.
- Ji, J., Miao, C., & Li, X. (2020). Research on the energy-saving control strategy of a belt conveyor with variable belt speed based on the material flow rate. *PLOS ONE*, 15(1),. doi: 10.1371/journal.pone.0227992
- Jimeno, C., & Jimeno, E. (2003). *Manual de perforación y voladura de Rocas*. (2ª ed.) Murcia: Instituto Geológico Y Minero de Espanha
- Kagermann, H., Anderl, R., Gausemeier, J., Schuh, G., & Wahlster, W. (2016). *Industrie 4.0 in a Global Context*. München: Herbert Utz Verlag.
- Kajimoto, K., Matthias Kovatsch, and Uday Davuluru. 2018. *Web of Things (WoT) Architecture*, W3C First Public Working Draft 14 Setembro 2017. W3C Recommendation. World Wide Web Consortium (W3C). <https://www.w3.org/TR/2017/WD-wot-architecture-20170914/>
- Kennedy, A. (1990). *Surface Mining* (2ª ed.). Littleton, Colorado: Society for Mining, Metallurgy and Exploration Incorporated.
- Koellner, W., Brown, G., Rodriguez, J., Pontt, J., Cortes, P., & Miranda, H. (2004). Recent Advances in Mining Haul Trucks. *IEEE Transactions On Industrial Electronics*, 51(2), 321-329. doi: 10.1109/tie.2004.825263
- Koppe, J., & Costa, J. (2012). Operações de Lavra em Pedreiras. In *Manual de Agregados para Construção Civil* (2ª ed., pp. 127-145). CETEM.
- Kullberg, J., Dias, R., Araújo, A. & Terrinha, P., (2013). A Bacia Lusitaniana: Estratigrafia, Paleogeografia e Tectónica. In *Geologia de Portugal* (2ª ed., pp. 195-347). Escolar Editora.
- Langer, W. (1993). *Natural Aggregates of the Conterminous United States*. Denver: United States Government Printing Office.
- Latinović, T., Preradović, D., Barz, C., Latinović, M., Petrica, P., & Pop-Vadean, A. (2016). Big Data in industry. *IOP Conference Series: Materials Science And Engineering*, 144, 012006. doi: 10.1088/1757-899x/144/1/012006
- Leite, M. (1986). *Fragmentação e Classificação de Rochas e Minérios*. Aula, Universidade do Porto.
- Leka, S., & Jain, A. (2010). *Health Impact of Psychosocial Hazards at Work: An Overview* (1ª ed.). Nottingham: WHO Press.
- Lööw, J., Abrahamsson, L. & Johansson, J. Mining 4.0—the Impact of New Technology from a WorkPlace Perspective. *Mining, Metallurgy & Exploration* 36, 701–707 (2019). doi.org/10.1007/s42461-019-00104-9
- Lynch, M. (2012). *Mining in World History* (1ª ed.). London: Reaktion Books.
- Machado, S., & Manuppella, G. Contribuição para o conhecimento da Geologia da região Ansião-Sico-Pombal [Ebook]. Consultado em https://repositorio.Ineg.pt/bitstream/10400.9/2149/1/Com84_V1_pA67.pdf
- Marjoribanks, R. (2010). Geological Mapping in Exploration. *Geological Methods In Mineral Exploration And Mining*, 13-49. doi: 10.1007/978-3-540-74375-0_2
- Martins, J. (2008). Litostratigrafia das séries de meio marinho interno do Jurássico Médio da região de Condeixa-Sicó-Alvaiázere (Portugal). *Comunicações Geológicas*, 98, 27-49.

- Matos, M., Baptista, J., Diogo, M., & Magalhães, B. (2011). A Evolução da Indústria Extrativa Portuguesa - Perspetivas de Segurança, Saúde e Sustentabilidade. In Colóquio Internacional de Segurança e Higiene Ocupacionais.
- Mayer-Schönberger, V., & Cukier, K. (2013). *Big Data - A Revolution That Will Transform How we Live, Work and Think* (1ª ed.). Londres: John Murray.
- Mendes, J., & Chaves, C. (2019). Industry 4.0: Is there any impact on worker's health and safety? – A literature review. In XXXIX Encontro Nacional de Engenharia de Produção (ENEGEP). São Paulo. Consultado em: <https://www.researchgate.net/publication/352395059>
- Monteiro, D. (2014). Alternativas ao sistema de transporte tradicional em explorações a céu aberto. Caso de estudo: Pedreira de Fornelo (Master). Instituto Superior de Engenharia do Porto.
- National Academy of Science and Engineering. (2013). Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0. Frankfurt: ACATECH.
- Okechukwu, C., Dahunsi, O., Oke, P., Oladele, I., Dauda, M., & Olaleye, B. (2017). Design and Operations Challenges of a Single Toggle Jaw Crusher: A Review. *Nigerian Journal Of Technology*, 36(3), 814-821. doi: 10.4314/njt.v36i3.22
- Okeke, R. (2015). Blasting and Mining. *Explosives Engineering*, 8-13. Consultado em https://www.researchgate.net/publication/321912428_Blasting_and_Mining
- Oláh, J., Aburumman, N., Popp, J., Khan, M., Haddad, H., & Kitukutha, N. (2020). Impact of Industry 4.0 on Environmental Sustainability. *Sustainability*, 12(11). doi: 10.3390/su12114674
- Oliveira, A. (2020). Modelação Integrada e Simulação de Operações de Desmonte e Processamento de Recursos Minerais (Master). Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Oliveira, R. (2012). Uma Revisão dos Princípios de Funcionamento e Métodos de Dimensionamento de Moinhos de Bolas (Master). Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais.
- Park, S., & Choi, Y. (2020). Applications of Unmanned Aerial Vehicles in Mining from Exploration to Reclamation: A Review. *Minerals*, 10(8), 663. doi: 10.3390/min10080663
- Póvoa, A. (2013). *Avaliação de riscos associada ao ciclo de trabalhos mineiros em pedreira de agregados* (Master). Universidade de Évora.
- Racia, I., & Peroni, R. (2017). Desenvolvimento de um modelo de dimensionamento de equipamentos de escavação e de transporte em mineração. In 8º Congresso Luso-Moçambicano de Engenharia / V Congresso de Engenharia de Moçambique. Maputo: INEGI/FEUP. Consultado em <https://paginas.fe.up.pt/clme/2017/Proceedings/data/papers/6467.pdf>
- Radlowski, J. (1988). *In-pit crushing and conveying as an alternative to an all truck system in open mines* (Master). The University of Mining nad Metallurgy.
- Rascón, Á., Jimeno, C., & Ruano, F. (2021). Mining 4.0, an evolving industry [Ebook]. Mapfreglobalrisks. Consultado em <https://www.mapfreglobalrisks.com/gerencia-riesgos-seguros/article/mining-4-0-an-evolving-industry/?lang=en>
- Ribeiro, M., Estanqueiro, R., Silva, C., & Tenedório, J. (2016). Variação da sobreposição longitudinal e lateral entre imagens obtidas por UAV e utilização de GCP na melhoria da qualidade dos dados. In SEMINÁRIO INTERNACIONAL UAV. Lisboa.
- Romero, D., Stahre, J., Wuest, T., Noran, O., Bernus, P., Fast-Berglund, Å., & Gorecky, D. (2016). Towards an operator 4.0 typology: A Human-Centric Perspective on the Fourth Industrial Revolution Technologies. In CIE46. Tianjin: CIE46. Retrieved from <https://www.researchgate.net/publication/309609488>

- Samad, T., & Annaswamy, A. (2021). *The Impact of Control Technology*, [Ebook] (2^a ed.). IEEE Control Systems Society.
- Schneier, B. (2015). *Data and Goliath* (1^a ed.). London & New York: WW NORTON & CO.
- Song, S., & Awolusi, I. (2020). Industrial Safety Management Using Innovative and Proactive Strategies. In *Industrial Engineering* (pp. 1-13).
- Suhaib, M. (2019). Analysis of Big Data: Challenges and Fundamentals in the Computing System. *International Journal Of Emerging Technology And Innovative Engineering*, 5(6), 466-468.
- The Big Challenges of Big Data (2013). *NATURE*, (498), 255-260.
- Vasconcelos, F., Silva, L., & Almeida, M. (2010). Um pouco da história dos explosivos: da pólvora ao Prêmio Nobel [Ebook]. Pernambuco. Consultado em https://www.researchgate.net/publication/318471710_Um_pouco_da_historia_dos_explosivos_da_polvora_ao_Premio_Nobel
- Vergne, J. (2000). *Hard rock miner's handbook* (1^a ed.). Edmonton: Stantec Consulting.
- Watanabe, H. *Drilling Machines* [Ebook]. Consultado em <https://www.eolss.net/sample-chapters/C05/E6-37-06-03.pdf>
- Westoby, M., Brasington, J., Glasser, N., Hambrey, M., & Reynolds, J. (2012). 'Structure-from-Motion' photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. *Geomorphology*, 179, 300-314. doi: 10.1016/j.geomorph.2012.08.021
- Wills, B., & Napier-Munn, T. (2006). *Wills' mineral processing technology* (4th ed.). London: Butterworth-Heinemann.
- Yan J., Y. Meng, L. Lu and L. Li, "Industrial Big Data in an Industry 4.0 Environment: Challenges, Schemes, and Applications for Predictive Maintenance," in *IEEE Access*, vol. 5, pp. 23484-23491, 2017, doi: 10.1109/ACCESS.2017.2765544.
- Yu, M., Yang, C., & Li, Y. (2018). Big Data in Natural Disaster Management: A Review. *Geosciences*, 8(5), 165. doi: 10.3390/geosciences8050165

WEBGRAFIA

- 771D Quarry Truck (2021). Consultado em 8 Outubro 2021, de https://www.kellytractor.com/eng/images/pdf/earthmoving/offhighway_trucks/771d.pdf
- Atlas Copco Surface drill rigs ROC® D5, D7, D9 and D7LF Technical specification. (2021). Consultado em 24 Outubro 2021, de https://ee-industry-equipment.com/deposit/3344_f2440.pdf
- Caterpillar. (2016). Caterpillar Performance Handbook [Ebook]. Consultado a 5 de Setembro de 2021 em <https://www.warrencat.com/performance-handbook/>
- Escavadoras Hitachi. (2021). Consultado a 10 de Setembro 2021, em <https://moviter.pt/wp-content/uploads/download-manager-files/Apresentaco%20-%20Escavadoras%20Hitachi.pdf>
- EUROCID (2021). Consultado em 5 de Outubro 2021, em <https://eurocid.mne.gov.pt/apoios-financeiros/perguntas-frequentes/compete-2020>
- Ferreira, R. (2018). Britador de martelos. Consultado a 16 Outubro 2021, em https://www.researchgate.net/figure/Figura-31-Britador-de-martelos_fig2_324653886
- Cement production factory on mining quarry. Conveyor belt of heavy machinery loads stones and gravel. (2021). Retrieved 1 September 2021, from https://br.123rf.com/photo_47112764_f%C3%A1brica-de-produ%C3%A7%C3%A3o-de-cimento-na-pedreira-da-minera%C3%A7%C3%A3o.-correia-transportadora-de-cargas-pesad.html
- Hitachi Construction Machinery. (2021). Hitachi ZAXIS 490/530 [Ebook]. Consultado a 6 de Setembro 2021 em <http://www.hitachicm.eu>
- IAPMEI (2021). Consultado a 9 de Setembro 2021, em <https://www.iapmei.pt/Paginas/Industria-4-0.aspx>
- Instituto Português do Mar e da Atmosfera. (2021). Consultado a 17 de Setembro 2021, em <https://www.ipma.pt/pt/index.html/>
- Mapa Penela. (2021). Consultado a 1 de Outubro 2021, em <https://websig.cm-penela.pt/mapa>
- LARGE WHEEL LOADERS. (2021). Consultado a 4 Agosto 2021, em https://www.cat.com/en_US/products/new/equipment/wheel-loaders/large-wheel-loaders.html?page=2
- NONEL® EZ DET® Sistema de iniciación no eléctrico. (2021). Consultado a 24 de Outubro 2021, em https://www.dynonobel.com/southamerica/~/_media/Files/Dyno/ResourceHub/Technical%20Information/Latin%20America%20Spanish/NONEL/NONEL_EZDet_Spanish.pdf
- ORICA (2021). Senatel™ Powerfrag. Consultado a 24 de Outubro 2021, em <https://www.orica.com/products-services/package-explosives/senatel-powerfrag#.YXXy657MLIV>
- Produção Anual. (2021). Consultado em 1 Outubro 2021, em <https://www.dgeg.gov.pt/pt/estatistica/geologia/pedreiras/producao-anual/>
- What is Industrie 4.0?. (2021) Consultado a 28 de Setembro 2021, em <https://www.plattform-i40.de/IP/Navigation/EN/Industrie40/WhatIsIndustrie40/what-is-industrie40.html>