

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Mestrado em Engenharia de Minas e Geo-Ambiente



**DESENVOLVIMENTO DE UM MODELO EM PYTHON
USANDO MACHINE LEARNING PARA PREVISÃO E
CONTROLO DA DILUIÇÃO MINERAL ASSOCIADA COM
DESMONTE EM MINAS A CÉU ABERTO**



Dissertação de Mestrado de

FRANCISCO FILIPE ESTEVES CHAPELEIRO MONTEIRO

Orientador

Professor Doutor Alexandre Júlio Machado Leite

Coorientador

Professor Doutor José Cardoso Guedes

Porto, Setembro de 2022

Página em branco

Dedico esta dissertação à minha família...

Página em branco

AGRADECIMENTOS

Depois destes meses de trabalho é necessário olhar para trás e pensar naqueles que me ajudaram em todo este percurso, que culminou neste relatório.

Claro que primeiramente quero agradecer à minha família. Aos meus pais, Fernando Monteiro e Cassilda Monteiro, que sempre me estimularam a tomar as minhas decisões pessoais e académicas. Um muito obrigado por toda a ajuda e apoio que me deram, tenho um enorme orgulho em ser vosso filho. Quero agradecer ao meu irmão, David Monteiro, por ser um modelo de vida para mim, tendo aprendido imenso contigo, desde que nasci até agora. Em especial, também quero deixar um agradecimento às minhas sobrinhas, Mariana Monteiro e Matilde Monteiro, pela força e alegria que me dão sempre que estou com elas.

Ao meu excelentíssimo orientador, Professor Doutor Alexandre Leite, um grande obrigado por acreditar em mim e pelo seu apoio, tanto académico como profissional.

Ao meu excelentíssimo coorientador, Professor Doutor José Guedes, deixo um agradecimento por toda a disponibilidade e apoios durante o meu percurso académico.

A toda a O-Pitblast, por me terem recebido de braços abertos, um muito obrigado. Um especial agradecimento ao Doutor Vinicius Miranda pela dedicação que demonstrou para o meu sucesso, disponibilizando-se a gastar o seu tempo para me ajudar sempre que eu enalhava durante os últimos meses.

Aos amigos que ganhei durante o meu tempo na FEUP, foram muitas noites de esforço, mas no fim podemos dizer que valeu a pena.

A todos que contribuíram de alguma forma para a realização desta dissertação. A minha eterna e sincera gratidão.

Página em branco

RESUMO

A indústria mineira tem por base o desmonte de rocha (transformação de blocos em bloco de rocha de menor dimensão) para, posteriormente, extrair o minério que se encontra na mesma. A frente de desmonte funciona como um grande bloco que deve ser repartido em blocos menores e, para tal, usam-se, por exemplo, métodos mecânicos ou utilizam explosivos para a sua extração.

A detonação provoca o movimento da rocha e este pode ser prejudicial para a delimitação precisa dentro da pilha resultante, entre os blocos com minério e os blocos de material estéril. As consequências disto podem ser a perda e diluição do minério. No entanto, a perda e diluição de minério pode ser minimizada e aumentos significativos no lucro podem ser realizados se o movimento puder ser controlado e medido com precisão.

O presente trabalho de Dissertação pretende mostrar e definir as etapas de desenvolvimento de um modelo de previsão do deslocamento associado ao desmonte, bem como permitir o cálculo e controlo dos efeitos da diluição nesse desmonte.

Este estudo toca brevemente no passado e futuro da indústria mineira, nos parâmetros de desmonte a céu aberto com explosivo, nos efeitos da diluição no desmonte de rocha mineralizada, nos produtos disponíveis no mercado e as empresas que os comercializam. Como elementos centrais da Dissertação, destacamos a construção e utilização de um modelo matemático baseado em machine learning, para o cálculo da intensidade de deslocamento que ocorre durante o desmonte e nas etapas de desenvolvimento de um modelo em Python para a previsão do deslocamento e controlo da diluição.

Palavras-chave: Diluição mineral; Deslocamento no desmonte; Teor mineral; Desmonte a céu aberto; Desmonte com explosivo

Página em branco

ABSTRACT

The mining industry is based on the blasting of rock (the transformation of blocks into smaller blocks of rock) in order to later extract the ore that is found in it. The blasting front acts as a large block that must be broken down into smaller blocks, and to do this, for example, some mechanical methods are used, or explosives are used to extract them.

Blasting causes the rock to move, and this can be detrimental to the precise delineation between the blocks with ore and waste regions within the resulting pile. The consequences of this can be loss and dilution of the ore. However, ore loss and dilution can be minimized and significant increases in profit can be reached if the movement can be controlled and accurately measured.

This Dissertation paper intends to show and define the steps in developing a model to predict the displacement associated with blasting, and to enable the calculation and control of the effects of dilution in such blasting.

This study touches briefly on the past and future of the mining industry, the parameters of open pit blasting with explosives, the effects of dilution in the blasting of mineralized rock, the products available on the market and the companies that sell them. As central elements of the Dissertation, we highlight the construction and the use of a mathematical model based on machine learning, for the calculation of the intensity of displacement that occurs during blasting, and the steps of developing a model in Python for the prediction of displacement and control of dilution.

Keywords: Mineral dilution; Blast movement; Mineral content; Open pit; Blasting

Página em branco

ÍNDICE

1.1.	Objetivos do trabalho	1
1.2.	Organização dos temas abordados no relatório.....	1
2.1.	Panorama mundial da exploração mineira	3
2.1.1.	Deloitte Mining 2022	3
2.2.	A empresa O-Pitblast.....	5
2.3.	A história da indústria mineira	6
2.3.1.	Pré-história.....	7
2.3.2.	Antiguidade	7
2.3.3.	Idade Média	7
2.3.4.	Idade Moderna.....	8
2.3.5.	Idade Contemporânea	8
3.1.	Características geométricas das bancadas associadas ao desmonte	10
3.2.	Desmonte em bancada com recurso a explosivos.....	11
3.3.	Planeamento de um diagrama de fogo.....	12
3.4.	Sistemas de iniciação da detonação	18
3.4.1.	Detonadores pirotécnicos.....	18
3.4.2.	Detonadores elétricos.....	18
3.4.3.	Detonadores não-elétricos	19
3.4.4.	Detonadores eletrónicos.....	21
3.4.5.	Booster/multiplicador.....	22
4.1.	Diluição interna e diluição externa	23
4.2.	Métodos de controlo do movimento	24
4.2.1.	Choked blast.....	24
4.2.2.	Timing to segregate the material.....	25
4.3.	Formação das barrigas	26
4.4.	Blending.....	27
5.1.	Contato inicial com possíveis clientes	30
5.2.	Pesquisa e análise de competitividade	32
5.2.1.	JKTech – JK Value Bases Ore Control (JKVBOC)	33
5.2.2.	Orica - OREPRO™3D	34
5.2.3.	DNA Blast – I-Blast Ultimate	36
5.2.4.	Augment Technologies – Ore Movement Policy (OMP)	37
5.2.5.	Blast Movement Technologies – Blast Movement Monitors (BMMs)	38
5.2.6.	Análise comparativa.....	40
5.2.7.	Análise VRIO	41

6.1.	Editor de código e linguagem de programação utilizada	43
6.1.1.	Visual Studio Code	43
6.1.2.	Python 3.0.....	44
6.2.	A importação de bibliotecas	45
6.3.	Os parâmetros de entrada.....	45
6.3.1.	Os diferentes casos testados.....	45
6.3.2.	A importação de todo os parâmetros no modelo.....	47
6.4.	A definição das funções	48
6.4.1.	Função “getTimeOutsideTriangulation”	48
6.4.2.	Função “getPointTime”	50
6.4.3.	Função “getNearestVector”	52
6.4.4.	Função “getInfluenceArea”	52
6.4.5.	Função “ZoneDistToGridPoints”	53
6.4.6.	Função “PolyArea”	54
6.4.7.	Função “getZonesSharingPoints”	54
6.5.	A análise dos parâmetros de desmonte	55
6.6.	A importação do modelo treinado e a sua escala	56
6.7.	O tratamento dos dados.....	57
6.7.1.	A construção da triangulação.....	57
6.7.2.	O cálculo dos gradientes	58
6.8.	Os parâmetros de saída	59
6.8.1.	Cálculo da área pré-desmonte	59
6.8.2.	Cálculo da área pós-desmonte	60
6.8.3.	Cálculo dos ganhos e perdas com a exclusão das barrigas	61
6.8.4.	Cálculo dos ganhos e perdas com a inclusão das barrigas.....	61
6.8.5.	Cálculo dos ganhos e perdas de cada zona importada	61
6.8.6.	Visualização dos limites das zonas pré-desmonte e pós-desmonte	62
7.1.	Resultados do modelo matemático.....	63
7.1.1.	Análise estatística	63
7.1.2.	Análise de correlação	63
7.1.3.	Resultado do modelo matemático	65
7.2.	Resultados do modelo de previsão	65
7.2.1.	Cálculo das áreas pré-desmonte	65
7.2.2.	Cálculo dos vetores de movimento.....	66
7.2.3.	Cálculo das áreas pós-desmonte.....	66
7.2.4.	Cálculo das áreas das barrigas.....	66
7.2.5.	Cálculo da massa de material de cada zona.....	67

7.2.6.	Cálculo da massa de minério de cada zona	67
7.2.7.	Cálculo do teor de cada zona	68
7.2.8.	Visualização final dos limites das zonas pré-desmonte e pós-desmonte.....	68
8.1.	Conclusões.....	71
8.2.	Desenvolvimentos/trabalhos futuros	72

Página em branco

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Localização dos clientes da empresa O-Pitblast	5
Figura 2 - Topografia de um open-pit no O-PitSurface	6
Figura 3 - Geometria típica das bancadas de desmonte (Darling, 2011).....	11
Figura 4 - Fluxograma para o dimensionamento de uma Pega de Fogo (Gomes, 2016)	13
Figura 5 - Bancada com os parâmetros de desmonte associados (adaptado de Dyno Nobel App)	14
Figura 6 - Representação dos componentes de um detonador elétrico (Leite, Sistemas de iniciação, 2018)	19
Figura 7 - Exemplo de um detonador elétrico (Leite, Sistemas de iniciação, 2018)	19
Figura 8 - Representação dos componentes de um detonador não-elétrico (Leite, Sistemas de iniciação, 2018)	20
Figura 9 - Exemplo de um detonador não-elétrico (Leite, Sistemas de iniciação, 2018)	20
Figura 10 - Representação dos componentes de um detonador eletrónico (Leite, Sistemas de iniciação, 2018)	21
Figura 11 - Exemplo de um detonador eletrónico (Leite, Sistemas de iniciação, 2018)	21
Figura 12 - Representação da montagem do detonador ao booster (Leite, Sistemas de iniciação, 2018)	22
Figura 13 - Exemplo de boosters (Leite, Sistemas de iniciação, 2018)	22
Figura 14 - Localização da existência de diluição interna e diluição externa (Leite, Controlo de diluição, 2021).....	23
Figura 15 - Representação do uso da temporização para segregação de material no O- PitSurface	25
Figura 16 - Representação do avanço do material desmontado (Leite, Controlo de diluição, 2021)	26
Figura 17 - Identificação da membrana de entrada e membrana de saída (Domingo, Leite, Miranda, & Carrasco, 2015)	27
Figura 18 - Percentagem de contatos que já usaram algum tipo de software para o controlo da diluição	31
Figura 19 - Maiores desafios encontrados nos softwares para esta finalidade no mercado...	31
Figura 20 - Ferramentas mais essenciais num software de previsão e controlo de diluição...	32
Figura 21 - Características mais valorizadas num software de previsão e controlo de diluição	32
Figura 22 - JKVBOC software.....	33
Figura 23 - Fluxograma do processo de funcionamento do OrePro3D (Orica, s.d.).....	34
Figura 24 – Localização pós-desmonte utilizando os “SmartVetors”	35
Figura 25 - Representação da presença da Orica no mundo (Orica, s.d.)	36
Figura 26 – I-Blast Ultimate software (Group, s.d.)	36
Figura 27 - Exemplo que a DNA Blast dá para o tem de processamento do software (Group, s.d.).....	37

Figura 28 – Ore Movement Policy software (Technologies A. , s.d.)	37
Figura 29 - Presença da BMT no mundo (Technologies B. M., s.d.).....	38
Figura 30 - Alguns dos clientes da BMT (Technologies B. M., s.d.)	39
Figura 31 - Etapas de funcionamento do sistema da BMT (Technologies B. M., s.d.)	40
Figura 32 - Modelo de análise VRIO (Siteware, 2019).....	42
Figura 33 - VS Code com a identificação das diferentes regiões de atividade (Mustafeez, s.d.)	44
Figura 34 - Conjunto de bibliotecas importadas para o funcionamento do modelo.....	45
Figura 35 - Visualização do caso 1 no O-PitSurface.....	46
Figura 36 - Visualização do caso 2 no O-PitSurface.....	46
Figura 37 - Visualização do caso 3 no O-PitSurface.....	47
Figura 38 - Visualização do caso 4 no O-PitSurface.....	47
Figura 39 - Células de importação dos CSVs que contêm os parâmetros do desmonte	48
Figura 40 - Célula com a informação adicional	48
Figura 41 - Função "getTimeOutsideTriangulation"	49
Figura 42 - Representação da 1ª fase da função "getTimeOutsideTriangulation"	50
Figura 43 - Função "getPointTime"	51
Figura 44 - Função "getNearestVector"	52
Figura 45 - Função "getInfluenceArea"	53
Figura 46 - Função "ZoneDistToGridPoints"	54
Figura 47 - Função "PolyArea"	54
Figura 48 - Esquema de cálculo da área do polígono pelo método de "Shoelace" (Shoelace formula, 2022)	54
Figura 49 - Função "getZonesSharingPoints"	55
Figura 50 - Células referentes à importação e cálculo do deslocamento a partir da escala e do modelo treinado.....	57
Figura 51 - Representação dos furos da malha (verde) e a triangulação feita (azul)	57
Figura 52 - Célula referente à triangulação de cada conjunto de 3 furos da malha.....	58
Figura 53 – Representação dos gradientes calculados para cada ponto da grelha	58
Figura 54 - Célula referente ao cálculo dos gradientes de cada ponto da grelha.....	59
Figura 55 - Célula para obtenção do cálculo das áreas pré-desmonte de cada zona importada	60
Figura 56 - Célula para obtenção do cálculo das áreas pós-desmonte de cada zona importada	60
Figura 57 - Célula para obtenção dos ganhos e perdas de minério com exclusão das barrigas	61
Figura 58 - Célula para obtenção dos ganhos e perdas de minério com inclusão das barrigas.....	61
Figura 59 - Célula para obtenção dos ganhos e perdas de minério em percentagem	61

Figura 60 - Célula para visualização em gráfico dos limites das zonas pré-desmonte e pós-desmonte	62
Figura 61 - Análise de correlação de todos os parâmetros com o deslocamento	64
Figura 62 - Gráfico dos valores reais (azul) e dos valores previstos pelo modelo matemático (vermelho).....	65
Figura 63 - Resultados do cálculo das áreas das zonas pré-desmonte.....	66
Figura 64 - Vetores de movimento calculados para todos os pontos das zonas.....	66
Figura 65 - Resultados do cálculo das áreas das zonas pós-desmonte	66
Figura 66 - Resultados do cálculo das áreas das barrigas.....	67
Figura 67 - Resultados do cálculo da massa total de cada zona	67
Figura 68 - Resultados do cálculo da massa de minério de cada zona.....	67
Figura 69 - Resultados do cálculo dos ganhos e perdas de minério em kg e %, sem barrigas. 67	
Figura 70 - Resultados do cálculo dos ganhos e perdas de minério em kg e %, com barrigas. 68	
Figura 71 - Resultados do cálculo do teor de cada zona	68
Figura 72 - Resultados do cálculo dos ganhos e perdas de cada zona em termos de teor	68
Figura 73 - Representação da grelha de gradientes, das isolinhas de temporização e dos furos da malha.....	69
Figura 74 - Limites das zonas pré-desmonte (linha sólida) e do previsto para os limites das zonas pós-desmonte (linha pontilhada).....	69

Página em branco

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Condições dos depósitos e os métodos de desmonte à superfície (Hartman, 1987)	10
Tabela 2 - Vantagens e desvantagens dos métodos de desmonte à superfície (Hartman, 1987)	10
Tabela 3 - Vantagens e desvantagens de um furo de elevado diâmetro (Daniel, 1999).....	15
Tabela 4 - Registo dos parâmetros de blending da mina de Cobre de Las Cruces (Domingo, Leite, Miranda, & Carrasco, 2015)	28
Tabela 5 - Parâmetros de entrada em função do software de mercado	41
Tabela 6 - Funcionalidades em função do software de mercado	41
Tabela 7 - Análise estatística dos parâmetros de desmonte importados	63
Tabela 8 - Índices de correlação de cada parâmetro por ordem decrescente.....	64
Tabela 9 - Resultado do cálculo da raiz quadrado do erro médio e o nível de acuracidade da previsão.....	65

Página em branco

ÍNDICE DE FÓRMULAS

Equação 1	15
Equação 2	16
Equação 3	16
Equação 4	16
Equação 5	17
Equação 6	17
Equação 7	17
Equação 8	17
Equação 9	24
Equação 10	50

Página em branco

1. INTRODUÇÃO

A indústria mineira é crucial nos tempos que vivemos. Tudo o que nos rodeia usa diretamente ou indiretamente um conjunto diverso de minerais que precisaram de ser extraídos e processados. As empresas que exploram pedreiras e minas a céu aberto têm como objetivo a extração da rocha através do processo de desmonte em “bancada”. Ou seja, a bancada é desmontada através de operações que a transformam em blocos com dimensões sucessivamente mais reduzidas, para assim, ser possível a extração do minério presente. Estas transformações podem ser executadas, através de maquinaria especializada ou através de métodos que recorrem ao uso de explosivos. Maioritariamente no segundo caso, as empresas deparam-se com alguns problemas relativamente ao movimento do material após detonação. Um dos problemas associados ao movimento do material é a diluição mineral que se baseia na mistura de material com diferentes teores entre minério e estéril, e a influência desta mistura nas fases seguintes.

1.1. Objetivos do trabalho

O objetivo principal deste trabalho é a realização de um modelo em Python, que permitirá a importação dos parâmetros de desmonte, como por exemplo a localização dos furos, a temporização associada a cada furo, a geometria da malha utilizada, as características do explosivo, entre outros. Toda esta informação será utilizada para determinar a intensidade e direção do movimento do desmonte, para que se consiga fazer uma previsão do deslocamento do material em função dos parâmetros do desmonte. Isto irá permitir que o operador faça comparações entre diferentes planos de desmonte e tome uma decisão ponderada, com vista à minimização dos custos associados com o problema da diluição.

O modelo matemático utilizado foi escrito na linguagem Python, pelo Doutor Engenheiro Vinicius Miranda, utilizando as ferramentas do Google Colab, enquanto que o modelo de previsão e controlo da diluição foi desenvolvido na linguagem Python, pelo autor deste trabalho, utilizando ferramentas do Visual Studio Code. A direção do movimento foi obtida através das isolinhas geradas pela temporização dos furos, enquanto que a intensidade do movimento foi obtida através do modelo matemático feito com machine learning.

1.2. Organização dos temas abordados no relatório

Este documento está separado em 10 capítulos, sendo este o primeiro, com o objetivo de introduzir o tema, referir o principal objetivo deste trabalho e também indicar a organização dos temas abordados neste documento daqui para a frente.

O capítulo 2, com o título “Contextualização do trabalho”, refere de onde ocorreu a ideia para este trabalho, sendo nele também deixadas algumas notas sobre o panorama mundial da exploração mineira, mostrando e fundamentando problemas levantados no relatório “Deloitte Mining 2022”. De seguida é dada a conhecer a empresa O-Pitblast, que foi

parceira no desenvolvimento deste trabalho, e por fim uma menção sobre a história associada à indústria mineira.

O capítulo 3, intitulado como “Desmonte a céu aberto com explosivo”, aborda os diferentes tipos de desmonte a céu aberto e os critérios estudados para a escolha do próprio tipo de pega de fogo a aplicar. De seguida, são referidas as características que diferenciam os tipos de bancadas associadas com os desmontes a céu aberto com explosivos. Também neste capítulo são realçados os diferentes parâmetros a considerar num desmonte de rocha, desde os parâmetros geométricos ligados ao planeamento de um diagrama de fogo, até às características dos detonadores existentes.

No capítulo 4, com o título “Diluição mineral associada ao desmonte”, é apresentado o problema da diluição mineral, referenciando os 2 tipos de diluição que existem e os métodos de controlo do movimento causador da mesma. Para finalizar este capítulo é apresentado o conceito de blending, referindo a sua finalidade e os seus benefícios.

O capítulo 5, de nome “Estudo inicial do mercado para a prova do conceito”, refere os passos tomados no estudo de viabilidade de um futuro produto desenvolvido a partir do modelo de previsão e controlo da diluição. Aqui são mencionados os tópicos que foram abordados no estudo, separando em clientes e concorrência, entrando em maior pormenor nos resultados obtidos com essa pesquisa. Por fim é feita uma análise comparativa, em função dos parâmetros considerados e as funcionalidades, acabando com a análise VRIO - Valor, Raridade, Imitabilidade e Organização.

O capítulo 6, intitulado “Desenvolvimento do modelo de previsão”, é iniciado por uma breve explicação das ferramentas usadas, seguindo-se uma enumeração de todas as etapas seguidas para o desenvolvimento do modelo. Nele são referidas todas as características do modelo, dando exemplos do código utilizado para a construção do mesmo.

No capítulo 7, que recebeu o título “Resultados e discussão”, são apresentados todos os resultados obtidos ao longo da construção e exploração do modelo, começando-se pelos resultados obtidos no modelo matemático, em termos de análise estatística, análise de correlação e implementação do modelo matemático, passando de seguida para os resultados obtidos pelo modelo de previsão, como os cálculos das áreas, os cálculos das massas de minério, os ganhos e perdas associadas ao movimento e por fim a visualização e obtenção da previsão dos novos limites das zonas de minério.

No Capítulo 8, de nome “Conclusão e desenvolvimento futuros” são efetuadas algumas considerações finais resumindo as conclusões relevantes e são propostos alguns desenvolvimentos futuros a partir do presente trabalho.

No Capítulo 9, intitulado de “Referências bibliográficas” são apresentadas as referências bibliográficas que sustentam este documento.

Por fim, no Capítulo 10, com o título “Anexos” é possível observar o formulário utilizado para o estudo de viabilidade, para o desenvolvimento da prova de conceito.

2. CONTEXTUALIZAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho surgiu de uma oportunidade de desenvolver uma ferramenta de auxílio, para qualquer mina a céu aberto, que tenha como objetivos o aumento da rentabilidade das suas operações de desmonte com explosivo. Em concreto, há muitas questões relacionadas com a otimização do processo de desmonte, que podem ser respondidas com 3 aspetos principais em mente:

- Aplicar técnicas de desmonte inovadoras do ponto de vista técnico e económico;
- Garantir o balanço entre o nível de fragmentação e a preservação do teor do material desmontado;
- Colocar em prática modificações para otimização dos diagramas de fogo.

Qualquer um destes 3 aspetos deve ser investigado para procurar atingir a perfeição numa exploração mineral, mas devido à extrema complexidade que isso acarreta, o 3º aspeto foi aquele sobre o qual mais me debrucei durante a execução deste trabalho.

De uma maneira muito simplista este trabalho na realidade é uma apresentação de um modelo teórico-prático, que recebe informação durante a fase de planeamento das propriedades do diagrama de fogo e faz uma previsão dos resultados em função de desmontes com características semelhantes. No fim pretende-se que este modelo continue a ser desenvolvido, testado em campo e validado, para que depois possa vir a ser incorporado no O-Pitblast software, tornando-se numa mais-valia para a indústria mineira, no que diz respeito a ferramentas de desmonte com explosivo em minas a céu aberto.

2.1. Panorama mundial da exploração mineira

2.1.1. Deloitte Mining 2022

A 14ª edição anual do relatório de mineração e metais da Deloitte Global, Tracking the Trends 2022, explora as principais tendências enfrentadas pelas empresas de mineração. O relatório analisa o que o setor de mineração está a fazer corretamente e o que precisa de ser melhorado, além de oferecer exemplos de melhores práticas. Andrew Swart, líder do setor de mineração e metais globais da Deloitte relata que “Neste momento, há uma convergência de fatores que o setor de mineração precisa enfrentar se quiser construir vantagem competitiva” e “O impacto contínuo da pandemia do COVID-19 no trabalho e o impulso para digitalizar, bem como a necessidade de desenvolver e cumprir os compromissos ESG (Environmental, social and corporate governance) são desafios que o setor deve enfrentar. Mas dentro desses desafios também estão as oportunidades para redefinir a indústria” (Deloitte., 2022).

O evento COP26 (Conferência das Nações Unidas sobre as Mudanças Climáticas de 2021) realizado em Glasgow, Reino Unido, em novembro de 2021, destacou o papel integral da indústria de mineração no fornecimento de metais e materiais críticos para um futuro com

clara diminuição da produção de carbono. A maneira como as empresas de mineração se posicionam hoje em preparação para esse futuro pode aumentar ou diminuir sua vantagem competitiva na próxima década. Embora o objetivo central da indústria de mineração permaneça inalterado – fornecer metais e minerais para os setores a jusante – a transição energética apresenta uma rara oportunidade para os líderes se reorganizarem, gerarem novo valor e estabelecerem parcerias para criar um futuro mais responsável e atraente para a indústria. Para capitalizar as oportunidades e criar organizações adequadas ao século XXI, as empresas devem evoluir as suas atividades tradicionais de mineração e metais por meio de novos modelos de negócios e alocação de capital, práticas de trabalho ágeis e tecnologias orientadas por dados. A próxima década será uma das mais emocionantes e transformadoras da história da indústria de mineração. As empresas de mineração e metais bem-sucedidas serão aquelas que não apenas se adaptarem e inovarem, mas também se posicionarão para lucrar com a transição energética e deixar um impacto social positivo (Deloitte., 2022).

Para isso a Deloitte Global identificou dez tendências que podem impactar o setor nos próximos 12 a 18 meses. Cada uma dessas tendências tem um papel a desempenhar na orientação das empresas para o sucesso além da pandemia e para um futuro mais sustentável. Devido ao carácter deste trabalho ser virado para a exploração mineral e os problemas desta área industrial, o ponto de tendência nº8 do relatório da Deloitte Global, será o que se apresenta com maior relevância.

“Tendência nº8 - Liberando valor por meio de operações integradas: as empresas de mineração e metalurgia devem fazer melhor uso da transformação digital para impulsionar a tomada de decisão integrada eficaz. Isso é mais importante do que nunca, pois o atual foco elevado nas medidas ESG colocou pressão sobre as empresas para gerenciar não apenas o seu ambiente operacional, mas também certos desafios sociais e regulatórios. As percepções e a visibilidade fornecidas pela digitalização podem ajudar as empresas a capacitar os funcionários em todos os níveis para tomar decisões, além de permitir que respondam a situações ambíguas e complicadas, produzindo assim um valor significativo” (Deloitte., 2022).

O relatório levanta algumas questões, das quais se realça a questão de como é que serão as empresas de mineração e metais bem-sucedidas num futuro orientado aos seus propósitos? Não há uma resposta definitiva, mas há uma oportunidade para os líderes gerarem novos valores. A necessidade de integrar os compromissos ESG com as funções centrais de negócios abriu muitas opções para as empresas. Acompanhar as 10 tendências fornece um kit de ferramentas para ajudar as empresas de mineração a começar a pensar e avançar em direção à sua visão de sucesso futuro. Exploramos como evoluir os negócios tradicionais de mineração e metais por meio de novos modelos de negócios, alocação de capital, práticas de trabalho ágeis e tecnologias orientadas por dados (Deloitte., 2022).

As empresas de mineração e metais estão numa jornada para impulsionar a eficiência de forma geral em todas as suas organizações. A transformação digital já contribuiu para isso, fornecendo visibilidade em tempo real da mina ao mercado. Os próximos passos são usar esta informação para mudar a forma como as decisões são tomadas nos diversos níveis. As organizações de mineração estão a pedir às forças de trabalho da linha de frente que pensem no impacto das suas decisões na cadeia de valor a jusante e na viabilidade de longo prazo da empresa. O desafio está em capacitar os operadores a tomar boas decisões com base nessas situações altamente ambíguas e complicadas, algumas das quais, à primeira vista, parecem não ter nada a ver com seus alvos (Deloitte., 2022).

As empresas e os seus operadores da linha da frente precisam de mudar o seu foco, deixando de cumprir somente metas de desempenho para passarem a entregar o melhor resultado possível a qualquer custo. Uma maneira de fazer isso é através da implementação de direitos e responsabilidades mais rígidos e mais bem estruturados. A forma como as organizações de mineração e metais se relacionam com o mercado está a amadurecer. A maioria das comunicações estratégicas ocorre num nível corporativo. “Uma estratégia mais subtil e efetivamente integrada permitirá uma consideração muito mais ampla de todas as formas de maximizar a eficácia dos ativos” diz Dominic Collins, Deloitte Chile.

2.2. A empresa O-Pitblast

A O-Pitblast é uma empresa portuguesa fundada em 2016, na cidade do Porto. É reconhecida por ser especialista em soluções para um desmonte eficaz de rochas com recurso a explosivos. A empresa conta com uma equipa extremamente qualificada, composta por vários profissionais da área da Engenharia de Minas, Estatística e Matemática aplicada à indústria mineira, com uma vasta experiência no desmonte de rochas, com referências em todos os continentes, como se consegue perceber através da Figura 1.



Figura 1 - Localização dos clientes da empresa O-Pitblast

A O-Pitblast começou a tornar-se uma marca reconhecida, devido à sua inovação no desenvolvimento de software avançado para o planeamento e controlo das operações de desmonte de rocha, com recurso a explosivos. Esse software, conhecido por O-PitSurface, representado na Figura 2, permite que o engenheiro responsável pelo dimensionamento e controlo do plano de fogo, consiga elaborar, de forma otimizada, todas as etapas inseridas na operação de desmonte e que seja possível simular resultados, juntando num único programa dados de topografia, perfuração, carregamento e temporização dos furos.

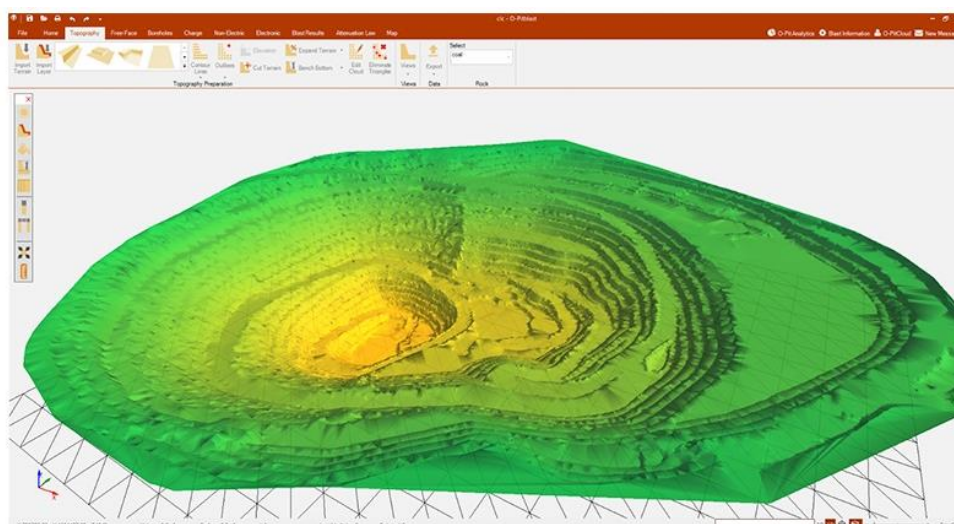


Figura 2 - Topografia de um open-pit no O-PitSurface

Com a evolução e crescimento da empresa, foram criadas novas ferramentas, que já são atualmente comercializadas, com o intuito de melhorar o processo de planeamento e controlo das operações, como a aplicação O-PitApp para Android, o site O-PitAnalytics e o O-Pitdev. Para além destes produtos a empresa também conta com o desenvolvimento de vários projetos, sendo um deles o O-PitDilution.

O O-PitDilution será um produto que funcionará em conjunto com o O-PitSurface, que terá como objetivos a previsão do deslocamento da massa mineral após detonação, que permitirá não só a estimativa de valores de diluição mineral, mas também a otimização dos parâmetros de desmonte para diminuir as perdas relacionadas com este efeito. Este modelo de previsão e controlo é assim o ponto de partida para a produção e comercialização do O-PitDilution no próximo ano.

2.3. A história da indústria mineira

A indústria mineira tem desempenhado ao longo dos tempos um papel crucial no desenvolvimento e evolução da Humanidade. Desde os primórdios que o Ser Humano está dependente dos recursos minerais presentes no seu habitat, para o fabrico de armas, utensílios, entre outros, e por isso as primeiras tribos viam-se obrigadas a migrar para locais

com solos férteis e perto de depósitos minerais, para o seu crescimento e desenvolvimento sustentável.

2.3.1. Pré-história

Do nosso conhecimento adquirido, é possível especular que os primeiros mineiros datam de pelo menos 300 000 a.C., com o foco de obterem sílex, obsidiana e cherte para a fabricação de ferramentas e armas. As suas pedreiras e cortas levaram inicialmente à criação de galerias e mais tarde de poços, até que apareceram as primeiras explorações subterrâneas durante o neolítico. Surpreendentemente, algumas destas minas subterrâneas, escavadas em giz no sul da Inglaterra e norte de França atingiam os 90 metros de profundidade. A partir daqui a humanidade passou a dirigir a sua atenção também para os minérios metálicos. Inicialmente os metais eram apenas apreciados como pedras ornamentais. Por volta de 40 000 a.C. era extraída hematite, no atual Essuatíni, para utilização em pinturas rituais.

Entre 7000 a.C. e 4000a.C. desenvolveu-se a metalurgia do cobre até à produção de ligas com características variáveis de fusão, dureza e flexibilidade. A tecnologia pirometalúrgica apareceu pela primeira vez no Médio Oriente por volta de 6000 a.C. (Mineração, 2022).

2.3.2. Antiguidade

O bronze seria produzido a partir de 2600 a.C., no entanto, aproximadamente 2000 a.C. os povos do mediterrâneo oriental eram já capazes da produção em massa de cobre, chumbo e prata a partir de minérios de óxidos e sulfuretos de metais, bem como de várias ligas metálicas. Por esta mesma altura, os povos pré-Hititas já utilizavam o ferro e os chineses iniciavam a extração de carvão para utilização como combustível. As minas de prata e chumbo de Laurium, próximo de Atenas, Grécia foram inicialmente exploradas e posteriormente abandonadas pelos Micénios, no 2º milénio a.C.. Eram explorações a céu aberto com pequenas galerias. Os atenienses retomariam a sua exploração cerca de 600 a.C., construindo numerosos poços de acesso e ventilação e utilizando o método de câmaras e pilares. O progresso da escavação era lento, estimando-se que um mineiro conseguisse um avanço de 1.5 m/mês na escavação de poços. Cerca de 950 a.C. os Fenícios iniciam a exploração da mina de Rio Tinto, Espanha, para obtenção de prata. Por volta de 700 a.C. são utilizadas as primeiras ferramentas de ferro na extração de sal-gema na Áustria e em 600 a.C. os chineses descobrem o petróleo e o gás natural em explorações de sal. As primeiras armas de aço aparecem na China em 600 a.C. (Mineração, 2022).

2.3.3. Idade Média

Em 265 a.C. iniciam-se as Guerras Púnicas pelo controle dos depósitos argentíferos da Península Ibérica e pela mesma altura Teofrasto escreve a sua obra Sobre as pedras. Cerca do ano 900, os chineses inventam a porcelana. A maior contribuição romana para a

mineração foram os dispositivos de remoção de água das minas, destacando-se a nora e o parafuso de Arquimedes (Mineração, 2022).

2.3.4. Idade Moderna

Em 1553 são utilizados pela primeira vez carris para movimentação de minérios, na República Checa e em 1556 é publicada a primeira edição de *De Re Metallica* de Agrícola, o primeiro registo abrangente sobre métodos mineiros e metalúrgicos. Em 1627 faz-se a primeira utilização de explosivos em mina na Hungria e em 1768 inicia-se a utilização bombas movidas a vapor para retirar água das minas de estanho da Cornualha (Mineração, 2022).

2.3.5. Idade Contemporânea

Em 1815 é fabricada a primeira lanterna de segurança para uso em minas de carvão, em 1825 é legalizado o primeiro sindicato mineiro em Inglaterra e em 1829 aparecem as primeiras jigas. 1848 é o ano do início da corrida ao ouro na Califórnia, em 1850 aparece em França, a primeira máquina de perfuração de rocha, em 1864 surge a primeira broca de diamante e em 1865 Alfred Nobel inventa a dinamite. Em 1876 são utilizados pela primeira vez martelos pneumáticos, na Alemanha. Os britadores de maxilas e os moinhos de bolas são aplicados pela primeira vez na Cornualha em 1880 e a primeira máquina de extração a eletricidade começa a funcionar em 1888, em Aspen, Colorado. Em 1897 é inventada a mesa de Wilfley e em 1900 a lâmpada de acetileno. Em 1950 inicia-se o uso do ANFO na indústria mineira (Mineração, 2022).

3. DESMONTE A CÉU ABERTO COM EXPLOSIVO

O desmonte de rocha a céu aberto, também conhecido como desmonte à superfície, com recurso a explosivos pode ser descrito pelas empresas de mineração, como a escolha globalmente predominante. Por exemplo, nos Estados Unidos 85% das explorações são a céu aberto, excluindo a indústria petrolífera e o gás natural. Nesse país 96% das explorações de minerais não metálicos são a céu aberto, em minerais metálicos tem uma representação de 87%, e as explorações à superfície para extrair carvão representam 60% da totalidade (Hartman, 1987).

Em todas as operações de desmonte à superfície, existe uma necessidade de escolher um método de mineração específico preferencial, com base num elevado número de fatores que influenciam essa decisão. Na maioria dos casos a escolha do método e o tipo de equipamentos a utilizar acaba por tentar levar em consideração 5 critérios importantes (Darling, 2011), que são:

- O tipo de depósito a explorar;
- A geometria do depósito e do terreno;
- A razão entre a quantidade de material a desmontar e o tempo disposto;
- O tempo de vida do projeto;
- A localização geográfica.

Se possível a estes 5 critérios ainda se tenta agregar alguns de menor relevância, mas que ainda podem alterar a escolha (Darling, 2011), como:

- As condições climáticas;
- A altitude do local;
- A disponibilidade e o custo de mão-de-obra especializada;
- As restrições ambientais e legais;
- A estabilidade da rocha a ser desmontada;
- O capital disponível e os riscos do investimento;
- O método de eliminação do material sem valor comercial;
- A disponibilidade dos serviços e instalações de suporte;
- A disponibilidade de energia elétrica e o custo do combustível.

A Tabela 1, mostra a comparação dos diferentes métodos de desmonte à superfície em função das condições mais usuais dos depósitos minerais.

Tabela 1 - Condições dos depósitos e os métodos de desmonte à superfície (Hartman, 1987)

Open Pit	Characteristic	Mechanical Extraction				Aqueous Extraction		
		Quarrying	Strip Mining	Augering	Hydraulic Mining	Dredging	In-situ Mining	Surface Leaching
Ore strength	Any	Any (sound structure)	Any	Any	Unconsolidated, few boulders	Unconsolidated, some boulders	Consolidated	Rubblized or cavable, permeable
Rock strength	Any	Any	Any	Any	Unconsolidated	Unconsolidated	Competent, impervious	Competent, impervious
Deposit shape	Any (preferably tabular)	Thick-bedded or massive	Tabular, bedded	Tabular, bedded	Tabular	Tabular	Any	Massive or thick tabular
Deposit dip	Any (preferably low dip)	Any, if thick	Any (preferably low dip)	Low dip	Low dip	Low dip	Any (preferably low dip)	Steep
Deposit size	Large, thick	Large, thick	Large, moderate thickness	Limited extent, thin	Limited extent, thin	Moderate extent and thickness	Moderate to large	Any (preferably large)
Ore grade	Low	High (assay not critical)	Low	Low	Very low	Very low	Intermediate	Very low
Ore uniformity	Uniform (or sort or blend)	Uniform	Fairly uniform	Uniform	Fairly uniform	Fairly uniform	Variable	Variable
Depth	Shallow to moderate	Shallow to moderate	Shallow	Shallow	Very shallow	Very shallow	Moderate to deep	Shallow to moderate

A Tabela 2, compara e compila as vantagens e desvantagens dos diferentes métodos de desmonte a céu aberto.

Tabela 2 - Vantagens e desvantagens dos métodos de desmonte à superfície (Hartman, 1987)

Characteristic	Open Pit	Mechanical Extraction				Aqueous Extraction		
		Quarrying	Strip Mining	Augering	Hydraulic Mining	Dredging	In-situ Mining	Surface Leaching/ Hydraulic Mining
Mining cost (relative)	10%	100% (highest)	10%	5%	5%	<5%	5%	5%
Production rate	Large-scale	Small-scale	Large-scale	Moderate	Moderate	Large-scale	Moderate	Moderate
Productivity	High	Very low	High	Very high	High	Highest	Very high	Very high
Capital investment	Large	Small	Large	Small	Small	Large	Large	Moderate
Development rate	Rapid	Moderate	Rapid	Rapid	Rapid	Moderate	Moderate	Moderate
Depth capacity	Limited	Limited	Limited	Limited	Limited	Limited	Unlimited	Unlimited
Selectivity	Low	High	Low	Low	Moderate	Low	Low	Low
Recovery	High	High	High	Moderate	Moderate	High	Low	Very low
Dilution	Moderate	Low	Low	Low	High	High	High	Very high
Flexibility	Moderate	Low	Moderate	Very low	Moderate	Low	Low	Low
Stability of openings	High	Highest	High	High	Moderate	Moderate	High	Moderate
Environmental risk	High	Moderate	Very high	Low	Severe	Severe	Moderate	Moderate
Waste disposal	Extensive	Moderate	Minor	None	Moderate	Extensive	Minor	Minor
Health and safety	Good	Good	Good	Good	Fair	Good	Good	Good
Other	Low breakage cost; rainfall and weather problems; large-scale best	Waste-intensive; labor-intensive; high breakage cost	No waste haulage; low breakage cost; large-scale best	Restrictive; used for remnant coal	Unconsolidated deposit; water required; no breakage cost; beneficiaries	Unconsolidated deposit; water required; no breakage cost	Unconsolidated deposit; water required; no breakage cost; beneficiaries	Unconsolidated deposit; water required; no breakage cost

Em conclusão, muitos fatores têm de ser considerados na seleção do melhor método de exploração mineira aliado à escolha economicamente correta da frota de equipamento. Quando existe mais do que uma opção, é melhor selecionar a alternativa que possibilitará à exploração mineira o maior grau de flexibilidade. Isso fará com que a exploração mineira seja dinâmica, e na maioria dos casos a operação que melhor se ajusta às condições e que mais facilmente se adapta a mudanças é a operação que mais chance terá de sobreviver a futuras crises.

3.1. Características geométricas das bancadas associadas ao desmonte

As bancadas são possivelmente a característica mais distintiva de um desmonte a céu aberto. Estas bancadas podem ser classificadas como:

- bancadas ativas – que ainda se encontram em fase de exploração, normalmente cumprindo apenas as restrições necessárias de segurança devido ao baixo período de tempo entre desmontes;
- bancadas inativas – que já atingiram os limites da exploração, cessando a sua atividade de desmonte, normalmente seguem restrições de segurança mais rígidas pois devem ficar estáveis até ao fim de vida da exploração;
- bancadas de captura – bancadas de menor dimensão que podem ser temporárias ou finais que têm como objetivo parar a queda de rochas que se soltam.

As alturas dos degraus normalmente têm em torno dos 15 m. A largura do degrau varia de acordo com o tamanho do equipamento e o tipo de bancada. É aconselhável que as bancadas de trabalho devem ter pelo menos largura suficiente para acomodar o raio de viragem do maior camião de transporte mais a largura da berma de segurança. Dependendo da geometria e tamanho do equipamento escolhido, a largura de uma bancada de trabalho pode ser de 30 m a 100+ metros. A largura das bancadas de captura é tipicamente entre 3 e 5 m, mas pode variar com a altura total da bancada. Uma pequena berma de captura (1 a 1,5 m) é normalmente incluída na borda da bancada de captura para melhorar a sua eficácia na contenção de quedas de rochas (Caterpillar, 2006).

A Figura 3, mostra a geometria típica das bancadas de uma exploração a céu aberto (Darling, 2011).

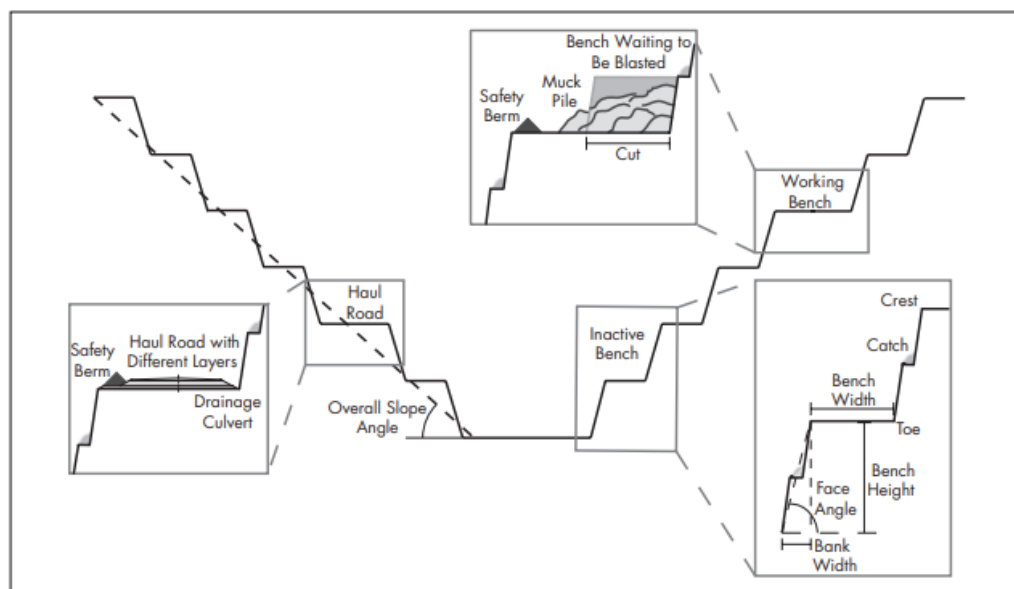


Figura 3 - Geometria típica das bancadas de desmonte (Darling, 2011)

3.2. **Desmonte em bancada com recurso a explosivos**

Explorando o conceito de desmonte dentro da área de Engenharia de Minas, podemos referir que mesmo se baseia num conjunto de processos utilizados para proceder à

extração do minério do maciço. O desmonte de rocha efetua-se na frente de trabalho e engloba todas as operações necessárias à extração da substância mineral (Mineiro, 1999).

As operações que se realizam no período de desmonte correspondem a fragmentações e desagregações do maciço. Este processo ocorre porque o maciço rochoso possui uma tensão natural que, ao ser interferida por tensões superiores, tende a ceder levando à fracturação do mesmo (Gomes, 2016).

Este tipo de desmonte pode ser explicado de uma maneira simplificada. Inicialmente o explosivo, devido à elevada pressão provocada pela detonação, tritura a rocha que se encontra na proximidade. De seguida, as ondas sísmicas de compressão que foram geradas pela detonação propagam-se em todos os sentidos com uma velocidade constante. Finalmente, o gás da detonação penetra as fraturas que foram geradas no segundo estágio e expande forçando o alargamento dessas fraturas. A pressão gerada pelo gás faz com que a massa entre o furo e a face livre ceda e seja empurrada para a frente (Gouvêa, 2011).

Os três principais fatores que afetam os resultados da detonação dependem da configuração da carga explosiva, da conceção da detonação e dos procedimentos implementados para replicar essa conceção. É importante compreender as características, estruturas e comportamento das rochas quando submetidas a um certo tipo de stress gerado por explosivos (Bhandari, 1997).

3.3. *Planeamento de um diagrama de fogo*

Qualquer engenheiro de minas responsável pelo planeamento de um desmonte entende a complexidade do mesmo, oriunda da quantidade de variáveis nele presente. Desde cumprir as exigências do processo de tratamento, passando pela produção de uma determinada gama de tamanho de fragmentos, evitando situações que podem colocar em risco equipamentos e vidas humanas (Gouveia, Leite, Brito, & Sobral, 2020).

Assim um dos aspetos com maior importância nos desmontes a céu aberto é o dimensionamento do diagrama de fogo, visto que é esta operação que permite controlar e otimizar a qualidade do desmonte (Gomes, 2016). A Figura 4, descreve o fluxograma para o dimensionamento de uma pega de fogo em geral.

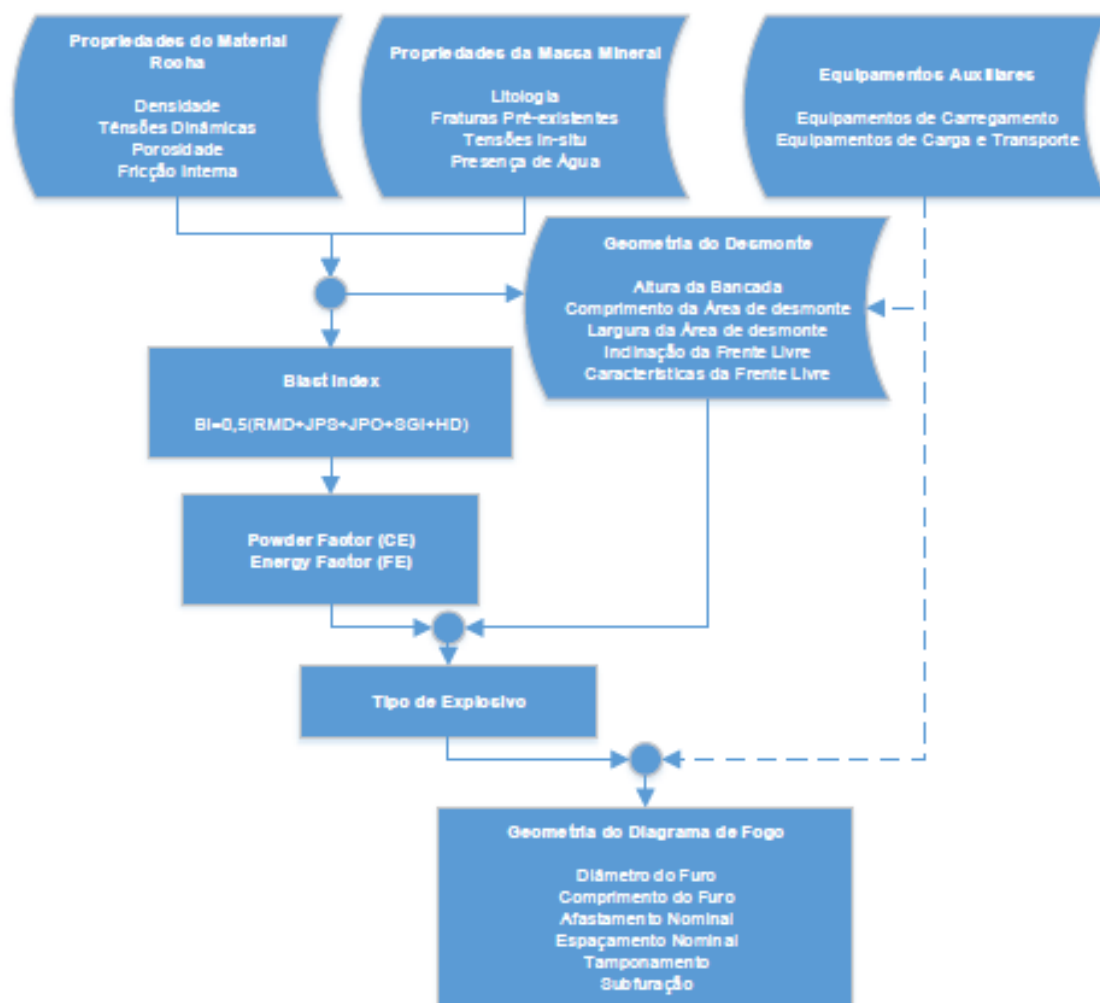


Figura 4 - Fluxograma para o dimensionamento de uma Pega de Fogo (Gomes, 2016)

A investigação empírica e a informação recolhida sobre as operações de desmonte ajudaram a desenvolver uma série de fórmulas a fim de propor orientações para o processo de conceção. Acredita-se que estas importantes "regras" se destinam a ser aplicadas com o objetivo de alcançar os resultados de detonação desejados numa fase inicial de qualquer operação (Jimeno, Jimeno, & Carcedo, 1995). Aqui os resultados, as condições do solo, os detalhes da operação e a geologia serão os verdadeiros indicador-chave do desempenho do diagrama de fogo.

Como mencionado por Jimeno, Jimeno & Carcedo (1995), existe uma série de autores, engenheiros de minas e investigadores, que desenvolveram fórmulas empíricas, para o planeamento de um diagrama de fogo, manipulando relações entre os seguintes parâmetros associados com o desmonte, como:

- Diâmetro do furo (D);
- Altura da bancada (H);
- Tamanho do furo (L);

- Tampão (T);
- Altura da coluna de carga (C);
- Densidade da rocha;
- Resistência da rocha;
- Densidade do explosivo;
- Pressão de detonação;
- Rácio afastamento (B)/espaçamento (S);
- Energia do explosivo.

A Figura 5, mostra alguns dos parâmetros que foram listados anteriormente, associados a um desmonte em bancada.

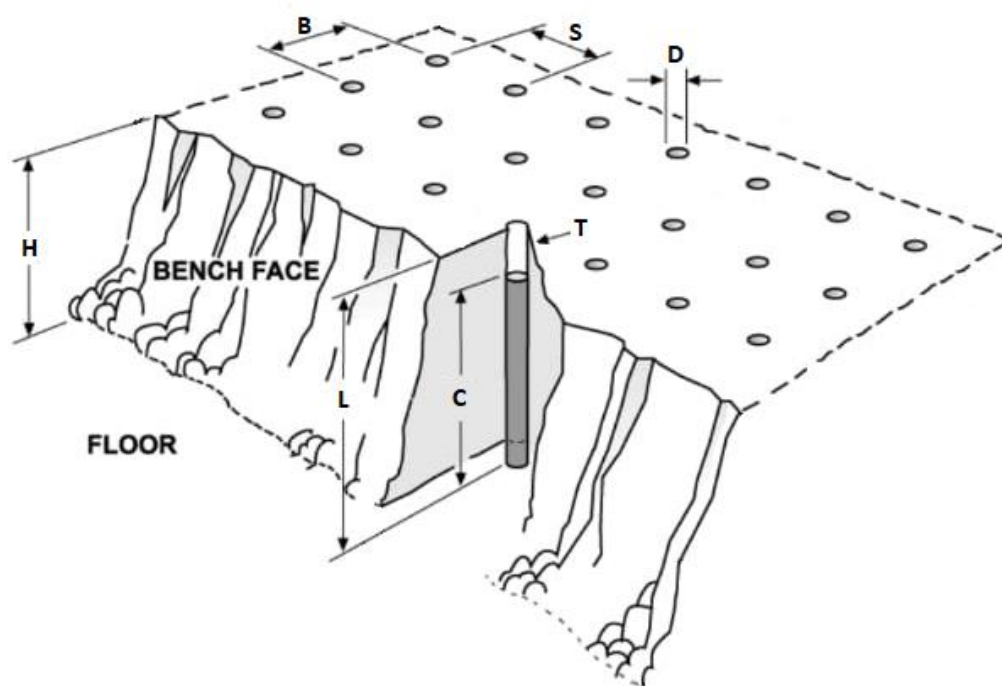


Figura 5 - Bancada com os parâmetros de desmonte associados (adaptado de Dyno Nobel App)

Aprofundando um pouco mais esta questão do planeamento do diagrama de fogo é aconselhável que se ofereça uma explicação dos parâmetros controláveis listados acima, que apresentam maior relevância para o seguimento do tema de trabalho.

3.3.1. Diâmetro do furo (D)

O diâmetro do furo é uma unidade de medida, usualmente apresentado em milímetros, que está ligado a vários fatores que serão mencionados de seguida, e na indústria mineira, normalmente apresenta valores entre os 14 mm e os 300 mm, apesar dos valores mais

usuais, em pegadas de fogo com mais de que um furo, serem entre os 38 mm e os 200 mm (Daniel, 1999).

O diâmetro do furo está profusamente ligado ao tamanho do bit utilizado pelo operador, que deve ser escolhido tendo em mente que o tamanho deste acarreta vantagens e desvantagens. Para facilitar a interpretação da influência da escolha do bit, Fernando Daniel (1999), dá o exemplo da Tabela 3, onde lista algumas vantagens e desvantagens da escolha de um diâmetro do furo elevado.

Tabela 3 - Vantagens e desvantagens de um furo de elevado diâmetro (Daniel, 1999)

Vantagens	Desvantagens
Maior economia Melhor adaptação a bancadas de altura média ou alta	Maior granulometria média do material obtido Maior risco de blocos grandes Maior risco de projeções Maior facilidade de ocorrências de fraturas indesejadas

3.3.2. Altura da bancada (H)

A altura da bancada é uma unidade de medida, normalmente apresentada em metros, que de acordo com Llera, Jimeno, Urbina & Jimeno, a altura da bancada está relacionada com o diâmetro do furo. Algumas razões entre a altura da bancada e o diâmetro do furo podem ser classificadas como:

- $\frac{H}{D} \cong 1$ - Irá resultar numa fragmentação grosseira e sobrecavação;
- $\frac{H}{D} \cong 2$ - Irá resultar numa fragmentação menos grosseira e quase sem sobrecavação;
- $\frac{H}{D} \cong 3$ - Irá resultar numa fragmentação mais ideal e sem sobrecavação;

Apesar do valor ideal para o rácio (H/B) ser 3 muitas vezes torna-se impossível de o alcançar, pois a altura da bancada encontra-se dependente da maquinaria e da diluição do mineral (Llera, Jimeno, Jimeno, & Urbina, (s.d.))

De acordo com o Red Pocket Book, o cálculo da altura da bancada mínima e da altura da bancada máxima é expresso da seguinte forma:

$$H_{min} = 0,06 \times D \quad (1)$$

Onde:

-
- $H_{\min}$ - Altura mínima da bancada;
 - D - Diâmetro do furo.

E,

$$H_{\max} = 0,12 \times D \quad (2)$$

Onde:

- $H_{\max}$ - Altura máxima da bancada;
- D - Diâmetro do furo.

3.3.3. Tampão (T)

O tampão, ou tamponamento, serve para evitar que os gases produzidos pela detonação do explosivo escapem para a boca do furo., forçando a que a energia da detonação se propague pelas paredes do furo, entrando nas fraturas da rocha, para que a expansão do gás leve à rotura e fragmentação da rocha, numa área em seu redor. Na maioria dos casos o tamponamento é feito com material retirado durante a execução desse furo, no entanto é recomendado que a granulometria deste material seja grande o suficiente para oferecer fricção, entre o tampão e a parede do furo, causando assim uma resistência à força do explosivo.

De acordo com vários autores como Bhandari (1997), Jimeno (2003) e Red Pocket Book da O-Pitblast, o cálculo do tamanho mínimo do tampão e do tamanho máximo do tampão é expresso da seguinte forma:

$$T_{\min} = 0,7 \times B \quad (3)$$

Onde:

- $T_{\min}$ - Tamanho mínimo do tampão;
- B - Afastamento.

E,

$$T_{\max} = 1 \times B \quad (4)$$

Onde:

- $T_{\max}$ - Tamanho máximo do tampão;
- B - Afastamento.

3.3.4. Afastamento (B)

O afastamento é uma unidade de medida, normalmente apresentada em metros, que representa a menor distância entre 2 furos de diferentes linhas paralelas à frente livre. No

entanto, quando se apresenta a distância mínima entre 1 furo da primeira linha e a frente livre, então estamos perante o afastamento crítico.

De acordo com a literatura o afastamento pode ser calculado de diversas formas, mas na maioria dos estudos de carácter empírico, existe uma relação direta com o diâmetro do furo (mm). De acordo com o Red Pocket Book, editado e partilhado pela empresa O-Pitblast, o cálculo do afastamento mínimo e do afastamento máximo é expresso da seguinte forma:

$$B_{min} = 25 \times \frac{D}{1000} \quad (5)$$

Onde:

- B_{min} - Afastamento mínimo;
- D - Diâmetro do furo.

E,

$$B_{max} = 40 \times \frac{D}{1000} \quad (6)$$

Onde:

- B_{max} - Afastamento máximo;
- D - Diâmetro do furo.

3.3.5. Espaçamento (S)

O espaçamento é a unidade de medida, que diz respeito à distância mínima entre 2 furos da mesma linha, perpendiculares à frente livre, normalmente apresentada em metros. A literatura aponta que este parâmetro deve seguir uma razão de proporcionalidade em relação ao afastamento. Quase todas as fontes apontam para formas de cálculo muito similares e de acordo com o Red Pocket Book, o cálculo do espaçamento mínimo e do espaçamento máximo deve ser expresso da seguinte forma:

$$S_{min} = 1 \times B \quad (7)$$

Onde:

- S_{min} - Espaçamento mínimo;
- B - Afastamento.

E,

$$S_{max} = 1,5 \times B \quad (8)$$

Onde:

-
- $S_{m\acute{a}x}$ - Espaçamento máximo;
 - B - Afastamento.

3.4. Sistemas de iniciação da detonação

Os diagramas de fogo, também designados por pegas de fogo compreendem o conjunto de furos carregados com explosivo com uma determinada sequência de disparo. Isso faz-se com a utilização de detonadores que servem para regular os atrasos necessários entre detonações das cargas (Bernardo, 2014).

Os detonadores estão divididos como detonadores pirotécnicos, elétricos, não-elétricos e eletrônicos.

3.4.1. Detonadores pirotécnicos

Um detonador pirotécnico é classificado como um detonador térmico. Funciona através de rastilho, cortado e apenso à cápsula. O uso deste tipo de detonador teve um grande decréscimo, devido a estes serem muito pouco fiáveis, pouco seguros em termos de manuseamento e tecnicamente indesejáveis a nível de retardos (Bernardo, 2014).

O nível de segurança associado a este detonador é muito baixo, devido ao atraso do rastilho que tem de ser iniciado presencialmente e nem sempre apresenta a mesma velocidade de combustão. Para além de não ser possível a verificação dos atrasos entre furos, de forma previsível (Bernardo, 2014).

3.4.2. Detonadores elétricos

Um detonador elétrico é classificado como um detonador térmico. Funciona com via de inflamação de um filamento percorrido por correntes elétricas de baixa, de média ou de alta intensidade. Os de corrente elétrica de baixa intensidade estão atualmente banidos, os de média intensidade são os mais usados e os de alta intensidade são apenas usados em trabalhos subterrâneos (Bernardo, 2014).

Na Figura 6 é possível ver todos os componentes que constituem um detonador elétrico.

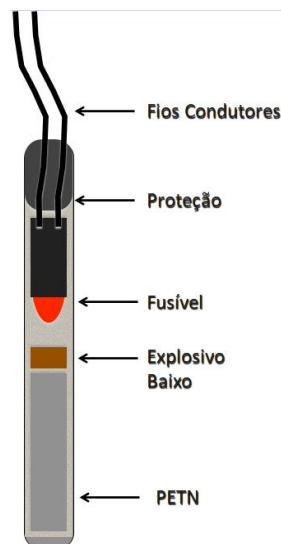


Figura 6 - Representação dos componentes de um detonador elétrico (Leite, Sistemas de iniciação, 2018)

Melhores apenas quando comparados com os pirotécnicos, pois são muito sensíveis a correntes erráticas que a qualquer momento podem iniciar o desmonte provocando acidentes (Bernardo, 2014).



Figura 7 - Exemplo de um detonador elétrico (Leite, Sistemas de iniciação, 2018)

Este detonador já mostrou um pequeno avanço em termos de controlo da temporização, por permitiu trabalhar com atrasos a nível de milissegundos, embora com alguns erros associados ao elemento retardador e à limitação do número de atrasos por desmonte ser 20 (Bernardo, 2014).

3.4.3. Detonadores não-elétricos

Um detonador não-elétrico é classificado como um detonador mecânico. Este funciona por intermédio de um impacto, provocado pela propagação de uma onda de choque, que é conduzida num tubo impregnado de uma pequena quantidade de explosivo e de sensibilizante (Bernardo, 2014).

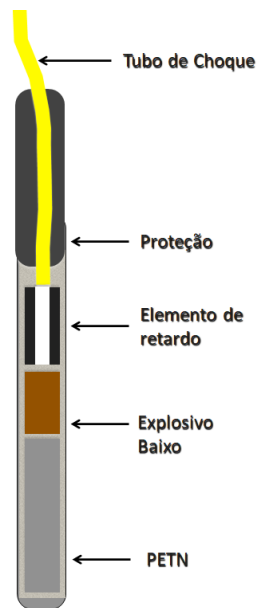


Figura 8 - Representação dos componentes de um detonador não-elétrico (Leite, Sistemas de iniciação, 2018)

Na Figura 8 consegue visualizar-se os componentes que constituem um detonador não-elétrico.

Os detonadores não-elétricos melhoram muito em relação aos dois anteriores, visto ser mais robusto e seguro. O maior defeito deste detonador é não permitir a verificação prévia e inequívoca do estado de funcionamento das ligações e detonadores (Bernardo, 2014).



Figura 9 - Exemplo de um detonador não-elétrico (Leite, Sistemas de iniciação, 2018)

Este também permite trabalhar com atrasos a nível dos milissegundos, mas com erros associados ao elemento retardador, assim como os detonadores elétricos, no entanto este não está limitado do número de atrasos por desmonte (Bernardo, 2014).

3.4.4. Detonadores eletrônicos

Um detonador eletrônico é classificado como um detonador térmico. Este encontra-se protegido por um sistema eletrônico, pois a inflamação do filamento percorrido por uma corrente elétrica, apenas acontece quando o chip contido no detonador dá informação que aquela peça, de código individual, pode disparar (Bernardo, 2014).

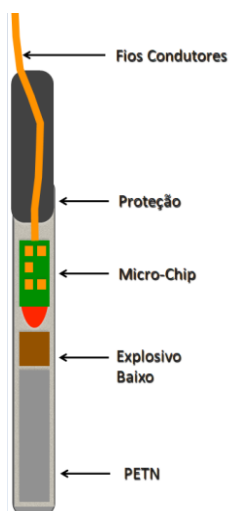


Figura 10 - Representação dos componentes de um detonador eletrônico (Leite, Sistemas de iniciação, 2018)

Estes são os melhores detonadores do mercado, sendo os mais seguros, não sofrendo nenhuma consequência na presença de correntes de distúrbio. O sistema é protegido com um chip que apenas pode ser acionado por uma determinada “Blast Box”, que tenha recebido informação de um “Logger” específico. Para além disso tem a capacidade de permitir desmontes até uma distância de 2 km, permitindo sempre uma distância de segurança para o operador responsável (Bernardo, 2014).



Figura 11 - Exemplo de um detonador eletrônico (Leite, Sistemas de iniciação, 2018)

O detonador eletrônico veio resolver o problema dos erros associados ao elemento retardador, porque o atraso passa a ser controlado por chip. Também não apresenta

limitações do número de atrasos por desmonte e permitiu que o utilizador não estivesse preso aos atrasos standard de 17ms, 25ms, 42ms ou 67ms. O utilizador assim consegue escolher qualquer atraso, até intervalos de 1ms para evitar quaisquer problemas com a frequência e amplitude das vibrações (Bernardo, 2014).

3.4.5. *Booster/multiplicador*

O primário ou booster é um explosivo de alta potência, feito de uma carga de pentolite (uma mistura de TNT e PETN) para a iniciação de agentes explosivos. O seu principal objetivo é fornecer um impulso energético suficientemente alto para atingir rapidamente uma velocidade ótima de detonação da coluna explosiva (ENAEX, Detonation Booster for Explosives, s.d.).

Na Figura 12 é possível ver como se faz a ligação entre o detonador e o booster.

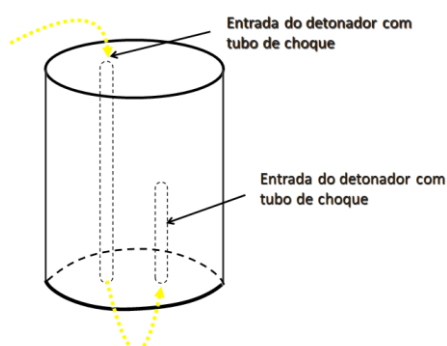


Figura 12 - Representação da montagem do detonador ao booster (Leite, Sistemas de iniciação, 2018)

O cartucho especial de plástico protege a mistura explosiva, para ganhar insensibilidade ao impacto e fricção, bem como uma maior resistência à ação da água presente nos furos. Os boosters fundidos são utilizados para iniciar explosões de rocha em minas a céu aberto e subterrâneas, pedreiras e obras civis (ENAEX, Detonation Booster for Explosives, s.d.).



Figura 13 - Exemplo de boosters (Leite, Sistemas de iniciação, 2018)

São explosivos seguros, fiáveis e funcionais, com um recipiente de plástico que proporciona melhores propriedades de resistência à água, ideais para as condições de campo mais severas, e uma excelente duração de vida em stock quando devidamente armazenados (ENAEX, Detonation Booster for Explosives, s.d.).

4. DILUIÇÃO MINERAL ASSOCIADA AO DESMONTE

Qualquer empresa produtora tem como principal objetivo o aumento da sua produção em paralelo com a minimização dos custos e as empresas de mineração não são exceção. Para isso é necessário que existam sistemas de otimização que facilitem a chegada a esse objetivo.

Como já referido anteriormente, o método de desmonte em bancada é utilizado na maioria das minas a céu aberto para permitir a remoção de um volume de massa rochosa pré-determinado. Estes depósitos mineiros são altamente heterogêneos com o minério disseminado em bolsas de grau variável com um teor de corte económico determinado para a operação da mina e, como tal, qualquer material com menor teor em mineralização é designado como estéril ou resíduo (Domingo, Leite, Miranda, & Carrasco, 2015).

O minério é escavado e transportado para a instalação de processamento mineral enquanto os resíduos são transportados para um local de descarga adequado. O desmonte destas rochas envolve a perfuração de uma série de furos de determinado comprimento e diâmetro, bem como uma relação espaçamento-afastamento entre eles necessária para fragmentar e soltar a massa rochosa. No entanto, o movimento da rocha causado pelo desmonte tem um efeito desfavorável na separação do minério e dos resíduos na pilha, causando a perda de minério, no caso do minério ser erradamente classificado como resíduo e enviado para o local de descarga; e/ou diluição do minério, no caso do resíduo ser erradamente classificado como minério e enviado para a instalação de processamento (Domingo, Leite, Miranda, & Carrasco, 2015).

4.1. *Diluição interna e diluição externa*

Os 2 tipos de diluição que podem ocorrer são a diluição interna e a diluição externa. A diluição interna ocorre quando existe um corpo de rocha não mineralizada dentro do corpo mineralizado, que é incluído na pilha de material mineralizado desmontado. Já a diluição externa ocorre nos contatos externos entre o corpo mineralizado e o corpo não mineralizado, que se misturam devido ao movimento não favorável, dos 2 corpos de material, durante a fase de desmonte (Domingo, Leite, Miranda, & Carrasco, 2015). A Figura 14 mostra uma representação visual da diferença entre os 2 tipos de diluição.

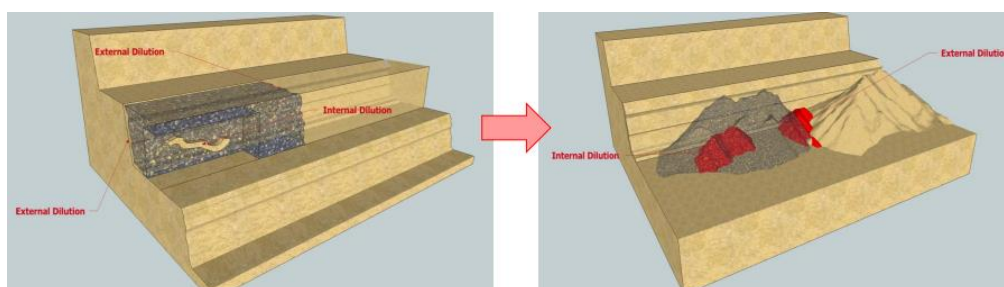


Figura 14 - Localização da existência de diluição interna e diluição externa (Leite, Controlo de diluição, 2021)

A diluição interna é estudada e controlada em função da eficiência e detalhe do estudo geológico do corpo a desmontar. Se o corpo não mineralizado for detectado previamente ao desmonte, pode ser feita uma carga seletiva para que o corpo não seja fragmentado, impedindo que a mistura com o material mineralizado não ocorra, facilitando a sua retirada da pilha.

A diluição externa é estudada e controlada em função da monitorização dos parâmetros de desmonte associados. A diluição num desmonte pode ser calculada através da razão entre o volume de material abaixo do teor de corte e o volume total do desmonte (Ebrahimi, 2013). Este cálculo da diluição está representado na Equação 9.

$$\%_D = \frac{V_R}{V_T} \times 100 \quad (9)$$

Onde:

- $\%_D$ – Percentagem de diluição;
- V_R – Volume de material abaixo do teor de corte;
- V_T – Volume total de material desmontado.

Sabendo isto, o objetivo com a construção deste modelo de previsão e controlo da diluição, passou a ser o controlo associado com a diluição externa.

4.2. Métodos de controlo do movimento

Os dois principais resultados da explosão de rochas são a fragmentação e o movimento dos geomateriais. A modelação do movimento em escala real é agora possível com modelos de elementos distintos em 3D e processamento paralelo. Os corpos de minério são mapeados na mineração à superfície através de ensaios dos cortes de perfuração de cada furo. Estes dados são assimilados em polígonos de superfície que definem o minério e os resíduos. O controlo do movimento e ter noção da localização destes polígonos após o desmonte é importante para maximizar a recuperação do minério (Preece & Silling, 2016).

4.2.1. Choked blast

Choked blast, que se traduz em desmonte “abafado”, é um termo usado em mineração para descrever um desmonte sem frente livre, onde o objetivo é atingir a fragmentação da rocha, negando o movimento do material em qualquer direção. Este método apesar de eficaz, tem algumas desvantagens, sendo uma delas a necessidade de ajuste ao diagrama de fogo. Num desmonte em bancada o objetivo é desmontar a rocha, desde a frente livre, com cada detonação, a fragmentar e a empurrar o material desmontado para a frente, criando assim uma nova frente livre para a próxima detonação, até atingir a traseira da bancada. No entanto, no desmonte abafado isso não acontece, aqui o objetivo é não permitir que o material se mexa, logo a falta de frente livre aumenta a resistência que o material tem em relação à energia que o explosivo liberta. Assim é necessário mudar alguns parâmetros que se traduzam num aumento da energia. Uma possibilidade seria a

diminuição do afastamento e espaçamento da malha; outra possibilidade seria o aumento do diâmetro dos furos para permitir uma maior quantidade de carga explosiva. Independentemente da opção escolhida é necessário que se tomem precauções em relação à segurança do desmonte, como por exemplo o aumento do tampão para combater o aumento da quantidade de explosivo no furo.

4.2.2. *Timing to segregate the material*

Foram desenvolvidos e aplicados tempos de retardamento na temporização dos furos para a segregação de minério e resíduos durante o desmonte. O princípio geral é que, uma vez que as rochas se movem em sentido contrário ao do crescimento da temporização, o minério e os resíduos podem ser segregados ao controlar os tempos de atraso da detonação que se propagam em direção ao limite minério/resíduos (Preece & Silling, 2016).

É bem entendido que a mineração ocorre num meio geológico e que os corpos de minério são tudo menos regulares ou retos. Normalmente, os ensaios são feitos em cortes de perfuração e utilizados para definir os blocos de minério e de resíduos. Por vezes, isto é conseguido utilizando a carga e o espaçamento da malha e também pode ser levantado e estacado como uma forma livre na superfície do solo, antes e após desmonte. As opções modernas de temporização eletrónica de retardamento permitem uma temporização complexa de detonação da explosão e separar em pilhas de minério e de resíduos (Preece & Silling, 2016).

Controlar e dirigir o movimento de rochas através de retardos na temporização, também pode melhorar muito a recuperação de minério, ao segregar minério e resíduos. Quando existe uma descontinuidade clara entre 2 teores em zonas diferentes é aconselhável que seja feita uma temporização, que force a criação de 2 pilhas separadas pela mesma descontinuidade. Na Figura 15 é possível verificar um exemplo do método a ser utilizado para separar uma bancada que apresentava uma diferença significativa de 2 teores.

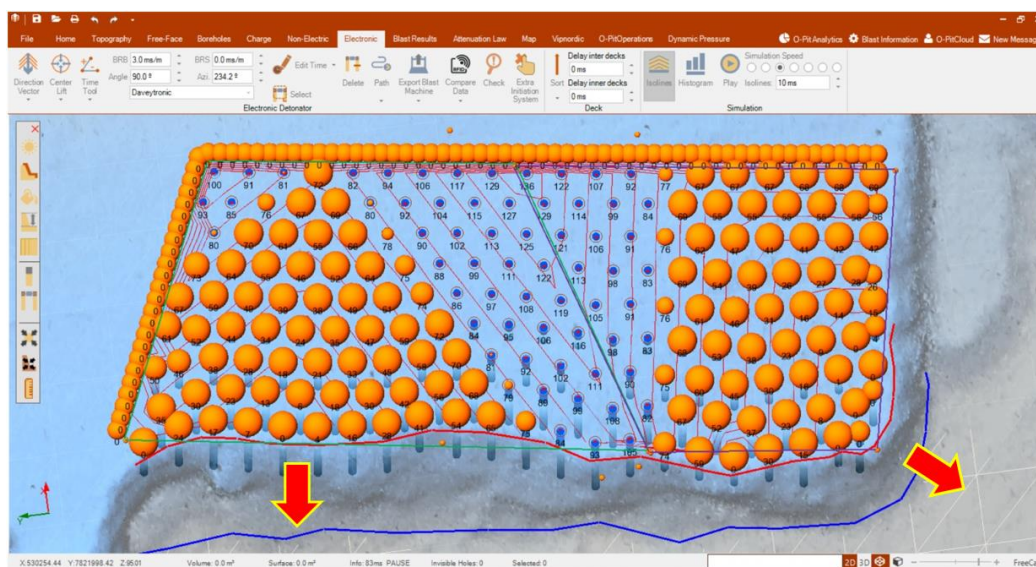


Figura 15 - Representação do uso da temporização para segregação de material no O-PitSurface

O O-PitSurface é uma boa ferramenta para este efeito pois apresenta uma ferramenta de simulação que foi usada para ajustar a temporização dos detonadores eletrónicos que permitiu que o ângulo de mudança das isolinhas fosse colocado sobre a descontinuidade de teores.

4.3. Formação das barrigas

O movimento assistido pela detonação não é uniforme em toda a extensão do furo. Como se pode verificar pela Figura 16, quando o explosivo detona, o material é empurrado de uma maneira que se assemelha a uma “barriga”. Isto deve-se ao facto de que a energia libertada pelo explosivo tem maior influência na zona central. Na parte debaixo do furo, uma parte da energia do explosivo é contrariada pela força de atrito que o chão da bancada exerce. Na parte de cima a quantidade de explosivo não só é menor devido ao volume ocupado pelo atacamento, mas também o material assim que fragmentado é puxado pela gravidade para a zona central.

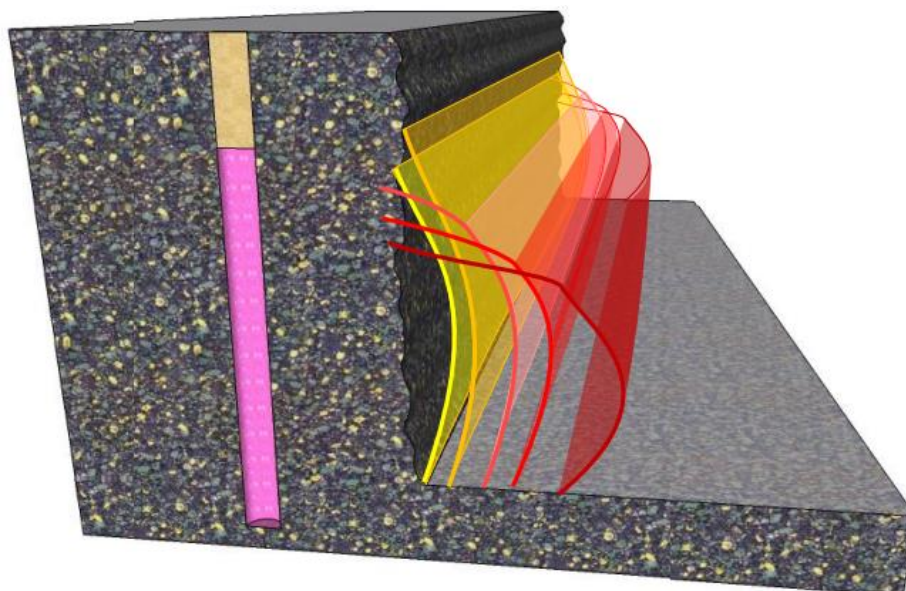


Figura 16 - Representação do avanço do material desmontado (Leite, Controlo de diluição, 2021)

Com o efeito da criação de barrigas em mente para a frente livre do desmonte em bancada é possível estabelecer que o mesmo princípio pode ser aplicado para todo o desmonte. Basicamente esta formação de barriga é replicada até à traseira do desmonte.

Este efeito vai então criar barrigas que em termos mais técnicos podem ser chamadas de membranas de entrada e membranas de saída. Para o controlo do problema da diluição, estas membranas limitam as zonas de diferentes teores. Na Figura 17 é possível ver uma representação da mudança de forma que o volume de material a desmontar sofre, quando é deslocado.

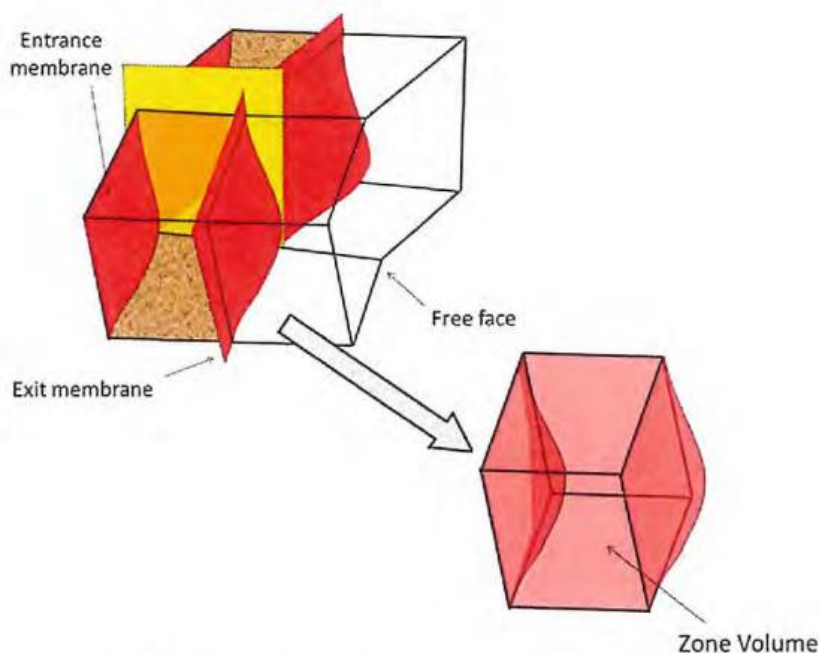


Figura 17 - Identificação da membrana de entrada e membrana de saída (Domingo, Leite, Miranda, & Carrasco, 2015)

4.4. Blending

A importância do controlo da diluição, principalmente na mineração de metais, está associada à construção de misturas para normalizar o grau de entrada de minerais na estação de tratamento. Em alguns casos, o teor disponível após desmonte é variado, logo a sua entrada na fase de processamento pode ser prejudicial à otimização da produção (Domingo, Leite, Miranda, & Carrasco, 2015). Como não é viável a regulação dos parâmetros de regulação da operação de processamento, sempre que o material de entrada muda de teor, é necessário que exista uma fase de mistura técnica para a estabilização do teor do material que entra na instalação de processamento.

Esse processo de mistura controlada de material de diferente teor para a regulação da entrada na fase de processamento, tem o nome de blending. A teoria por detrás do blending é que o material desmontado, deve ser classificado em função do seu teor, densidade, volume e massa, como se pode visualizar na Tabela 4, permitindo que o responsável pela alimentação da instalação de processamento consiga fazer misturas favoráveis tendo em vista atingir o teor ótimo de alimentação.

Tabela 4 - Registo dos parâmetros de blending da mina de Cobre de Las Cruces (Domingo, Leite, Miranda, & Carrasco, 2015)

Blending	Blast number	Theoretical			Real			Cu ton Difference (*)	% Cu control			
		Density	Volume	Ton	Density	Volume	Ton		% Cu theoretical	% Cu real	Difference	Error
A	4	3.84	5984.15	23254.19	3.83	5131.56	20079.52	-213.43	3.5%	3.03%	0.50%	-14%
C	1	3.85	3611.77	13908.77	3.87	3779.51	14642.97	24.45	2.7%	2.73%	0.03%	1%
D	4	3.61	5314.04	19312.50	3.61	4982.95	18071.40	-134.37	4.2%	3.79%	0.45%	-11%
E	5	3.94	4416.62	23709.02	3.90	4825.21	25067.90	8.26	5.9%	5.66%	0.29%	-5%
F	4	3.73	4786.09	18283.96	3.73	5321.06	20245.69	44.57	3.9%	3.73%	0.16%	-4%
G	4	3.88	7252.99	27903.49	3.85	8249.28	31631.08	145.35	6.6%	6.32%	0.32%	-5%
H	2	3.70	1567.75	5837.34	3.67	1562.03	5593.65	-11.23	2.9%	2.78%	0.08%	-3%
IEM	3	3.29	5969.16	5837.34	3.28	5048.46	17438.99	57.08	0.8%	0.58%	0.17%	-23%
SBL	4	3.45	7714.20	5837.34	3.45	6990.40	24313.37	261.77	1.6%	1.46%	0.14%	-9%
SM	2	3.70	2886.77	5837.34	3.71	3444.94	12929.15	125.49	2.0%	1.87%	0.12%	-6%
GA	2	2.82	1471.61	5837.34	2.82	1165.03	3383.18	-14.34	0.3%	0.12%	0.19%	-61%
SGE	1	2.98	474.57	5837.34	2.98	410.46	1221.72	-1.17	0.02%	0.00%	0.02%	-100%

5. ESTUDO INICIAL DO MERCADO PARA A PROVA DO CONCEITO

Prova de conceito é a tradução literal do conceito “proof of concept”, que representa um exercício que se concentra em determinar se uma ideia pode ser convertida numa realidade. Uma prova de conceito é destinada a determinar a viabilidade da ideia ou a verificar se a ideia funcionará como previsto. É por vezes também conhecida como prova de princípio.

Uma prova de conceito não se destina a explorar a procura do mercado para a ideia, nem se destina a determinar o melhor processo de produção. Pelo contrário, o seu objetivo é testar se a ideia é viável, dando aos envolvidos no exercício da prova de conceito a oportunidade de explorar o potencial da ideia para ser desenvolvida ou construída (Pratt, s.d.).

Na criação de software, por exemplo, uma prova de conceito mostraria se uma ideia é viável do ponto de vista tecnológico. Para as empresas em fase de arranque, uma prova de conceito focar-se-ia na demonstração da viabilidade financeira (Pratt, s.d.).

Desenvolver uma prova de conceito geralmente requer algum investimento de tempo ou de outros recursos, tais como tecnologias de apoio ou componentes físicos necessários a completar. Contudo, a passagem por este processo, permite às empresas determinar a viabilidade de uma ideia antes de atribuir recursos ao nível da produção por detrás de uma ideia sem necessidade comercial (Pratt, s.d.).

Como o objetivo deste trabalho era a produção de um modelo de previsão que será integrado na plataforma O-PitSurface, a O-Pitblast enunciou, logo desde início, o seu interesse em que fosse feita uma prova de conceito da viabilidade de um produto deste género na indústria mineira. A constituição deste estudo depende da informação que se considera como relevante para a viabilidade do produto no mercado. Os componentes do estudo foram deixados ao critério da equipa de projetos da empresa, que identificou como tópicos principais:

- Estudo focado aos clientes:
 - Fazer uma sondagem de possíveis clientes - para entender a necessidade de um produto como este no mercado e prever um possível rácio de rendimento face ao investimento;
 - Fazer uma análise da densidade de clientes por país - isto ajudaria a entender quais os idiomas mais prioritários para o lançamento da integração;
 - Fazer uma recolha da experiência dos clientes na área da diluição - para entender como é que os clientes se adaptavam a este problema ao longo do tempo e a sua familiaridade com outros produtos no mercado;

-
- Diferenciar entre ferramentas essenciais e ferramentas opcionais para os clientes - isto ajudaria a manter o foco na necessidade dos clientes, permitindo o uso otimizado do investimento no desenvolvimento deste produto;
 - Se já teriam usado algum software para a mesma finalidade - tentar entender qual seria o principal competidor e os problemas mais usuais para este tipo de produto;
 - Tentar obter uma estimativa do valor de investimento que os clientes têm disponível para alocar num produto como este - para obter uma estimativa justa de um valor comercial do produto de maneira a agradar ao cliente e perceber a capacidade de ajustar o valor de investimento face a esta informação.
 - Criar e registar numa base de dados a informação adquirida - para melhor visualizar toda a informação recolhida e para facilitar a comunicação futura entre a equipa de sales com o cliente.
- Estudo focado à concorrência:
 - Fazer uma sondagem de possíveis competidores - para entender o nível de resistência de entrada neste mercado que irá aparecer;
 - Fazer uma pesquisa mais aprofundada de cada competidor – Tentar cobrir o valor do produto de cada empresa e as funcionalidades existentes nesse produto;
 - Criar e registar numa base de dados a informação adquirida - para melhor visualizar toda a informação recolhida.

5.1. Contato inicial com possíveis clientes

Inicialmente foi feita uma seleção dos clientes da O-Pitblast com conta ativa, que trabalhassem em minas com necessidade de controlo da diluição. Com essa recolha como ponto de partida, foi de seguida feita uma recolha de contatos pelo LinkedIn, com parâmetros de seleção semelhantes aos que foram utilizados para os nossos clientes, adicionando os contatos filtrados à lista de contatos.

O passo seguinte foi construir um formulário (anexo A), que tinha como objetivo obter quase toda a informação necessária para o estudo dos componentes focados no cliente. O formulário foi enviado para todos os contatos recolhidos anteriormente, tanto por email como pelo LinkedIn. De seguida, apresentam-se alguns dos resultados obtidos ao longo das 3 semanas em que o formulário esteve ativo.

O gráfico da Figura 18, refere-se ao utilizador ter ou não familiaridade em ter usado ou estar a usar atualmente algum tipo de software para o controlo da diluição. Com esta

questão conseguiu-se perceber que cerca de 30% dos questionados ainda não usam ou nunca usaram nenhum software para esta finalidade o que demonstra uma boa abertura no mercado para a entrada deste produto. Devido a uma das questões seguintes também foi possível perceber que dos quase 70%, que já usaram ou usam atualmente software, na sua maioria utilizam os Blast Movement Monitors da empresa Blast Movement Technologies e/ou usam OrePro3D da empresa Orica, para a sua previsão do movimento da massa desmontada e controlo da diluição mineral.

If yes, did you ever use any software to detect the blast movement or to control the ore dilution?
33 respostas

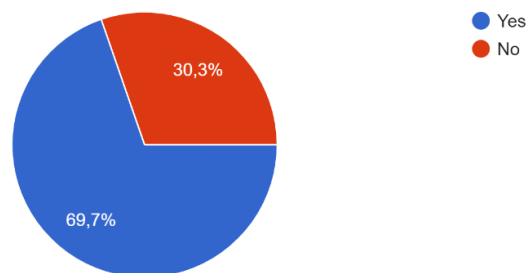


Figura 18 - Percentagem de contatos que já usaram algum tipo de software para o controlo da diluição

A Figura 19, que exibe informação sobre as maiores dificuldades que existem atualmente com este tipo de software é a sua complexidade, que resulta numa grande dificuldade de utilização por utilizadores inexperientes. A não capacidade do software poder ser utilizado em modo offline é outras das más características apontadas unanimemente.

If yes, what were your biggest challenges with the software?
25 respostas

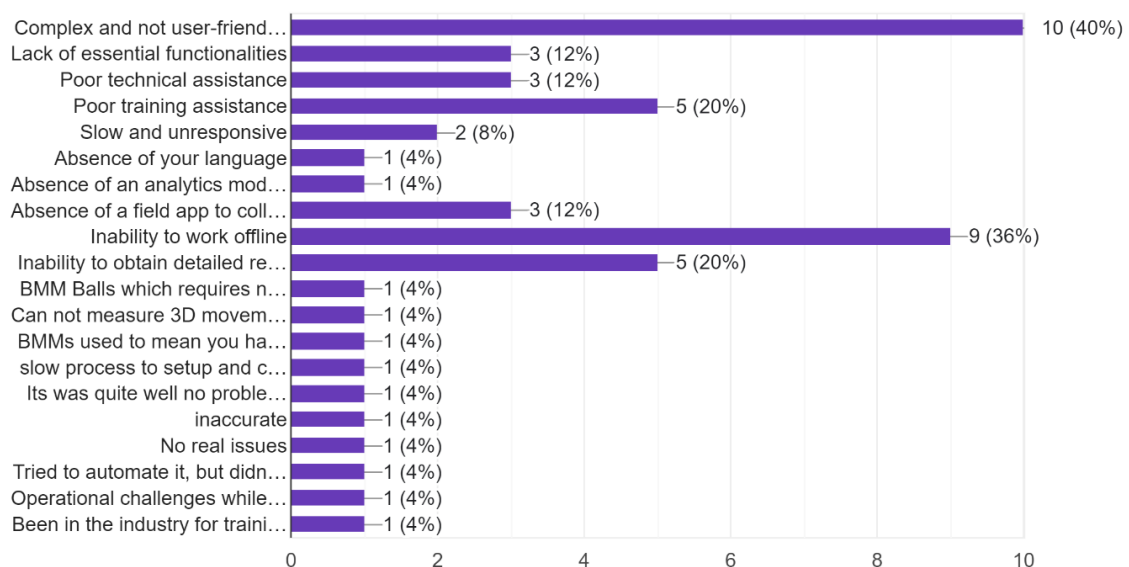


Figura 19 - Maiores desafios encontrados nos softwares para esta finalidade no mercado

A Figura 20 e a Figura 21, apresentam as ferramentas essenciais e as características mais valorizadas num produto deste género, respetivamente. Estes resultados revelaram-se como algo de elevada importância para a equipa de desenvolvimento, pois permitiu uma melhor definição das metas para que este seja um futuro produto comercialmente viável.

Which tools do you consider essential to have in a blast movement and ore dilution control software?

33 respostas

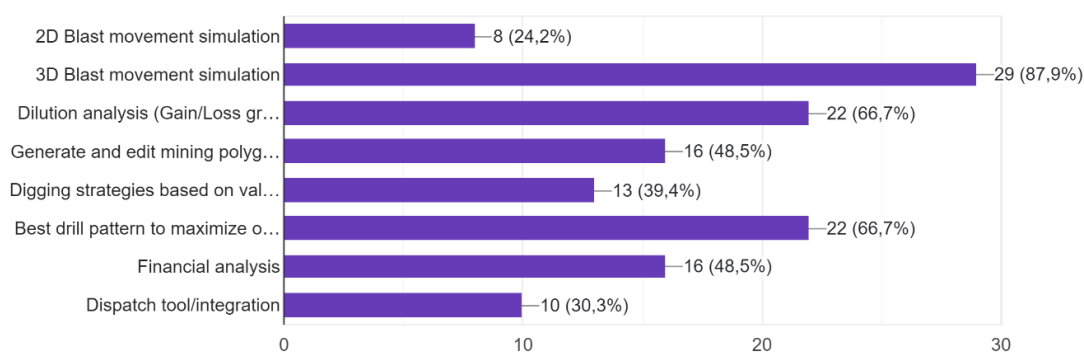


Figura 20 - Ferramentas mais essenciais num software de previsão e controlo de diluição

What do you value the most in a software that can detect and predict blast movement and control ore dilution?

33 respostas

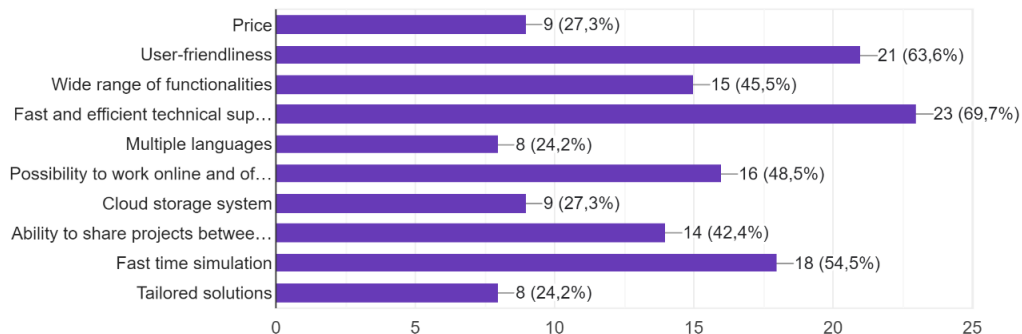


Figura 21 - Características mais valorizadas num software de previsão e controlo de diluição

As expectativas que a equipa de desenvolvimento da O-Pitblast tinha durante a construção deste formulário, foram na sua maioria confirmadas pelos resultados do mesmo. Isto permitiu um início favorável na prova de conceito devido à validação das ideias iniciais sobre a receptividade do mercado a este produto e à reformulação das ferramentas essenciais a atingir que a equipa de desenvolvimento tinha para este projeto.

5.2. Pesquisa e análise de competitividade

Benchmarking é um processo de comparação de produtos, serviços e práticas empresariais, e é uma ferramenta de gestão importante para as empresas. O Benchmarking é realizado através de inquéritos para comparar as ações de cada empresa. Neste caso, estamos a

analisar empresas concorrentes que têm software que simula e otimiza operações para controlo da diluição.

De seguida serão listadas as empresas revistas na presente pesquisa e análise de concorrência, onde estará presente, quando possível, uma breve explicação do produto que essa empresa comercializa, os benefícios desse produto em função de outros do mercado e o preço do produto.

5.2.1. JKTech – JK Value Bases Ore Control (JKVBOC)

Em 2019, a empresa JKTech lançou um novo software para simulação e previsão do movimento de rochas em operações de desmonte a céu aberto. O software foi criado com base na investigação dos anos 80 e também em conjunto com a SMI (JKTech, s.d.).

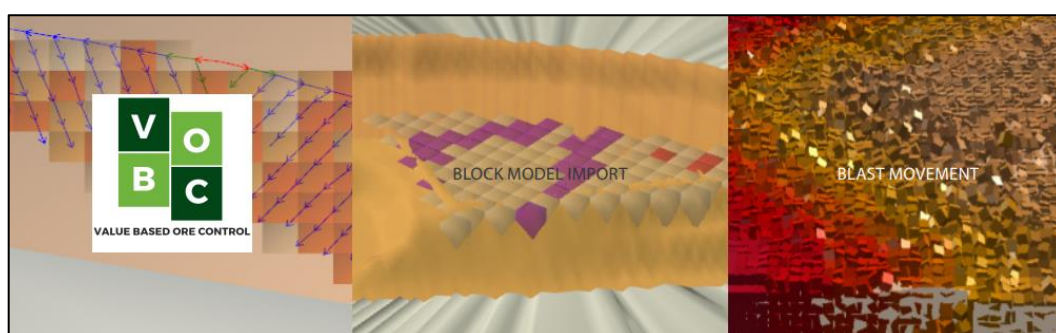


Figura 22 - JKVBOC software

Para o processo de simulação, o software deve ter os seguintes inputs:

- Padrão da malha de furos;
- Propriedades das rochas;
- Temporização dos furos;
- Modelo de blocos;
- Informação topográfica;
- Carga explosiva.

A partir destas entradas, o tempo total de simulação está algures entre 30 e 90 minutos, dependendo da dimensão do desmonte (JKTech, s.d.).

JKVBOC permite que o utilizador faça certas ações como (JKTech, s.d.):

- Executar diariamente múltiplas simulações para avaliar desenhos de detonação alternativos para melhorar o controlo da perda e diluição de minério;
- Modelar o movimento e fragmentação da detonação num período de tempo realista;
- Encontrar as melhores práticas para maximizar o valor do minério;

- Desenvolver estratégias de escavação baseadas no valor e não na classificação.

Benefícios do JKVBOC (JKTech, s.d.):

- Padrões reais de desmonte, propriedades explosivas e rochosas utilizadas para simular o deslocamento;
- O curto tempo de simulação permite a execução diária de múltiplas simulações num computador comercial padrão de secretária ou portátil;
- Distribuição 3D pós-detonação para controlo do minério e avaliação do padrão de detonação para estimar, gerir, e minimizar a perda e diluição do minério;
- Não é necessária energia humana na bancada após a calibração;
- Qualquer informação no modelo de bloco pode ser mapeada após a detonação, permitindo a otimização de explosões polivalentes (controlo do minério, gestão ambiental, etc.) com base na informação original do modelo de bloco.

5.2.2. Orica - OREPRO™3D

Este software foi adquirido pela Orica em 2021. É um software que modela com precisão o movimento da detonação, permitindo uma consciência situacional e um melhor controlo da classificação (Orica, s.d.).

Como é possível ver na Figura 23, o OrePro3D não considera os vetores de movimento para o controlo da diluição.

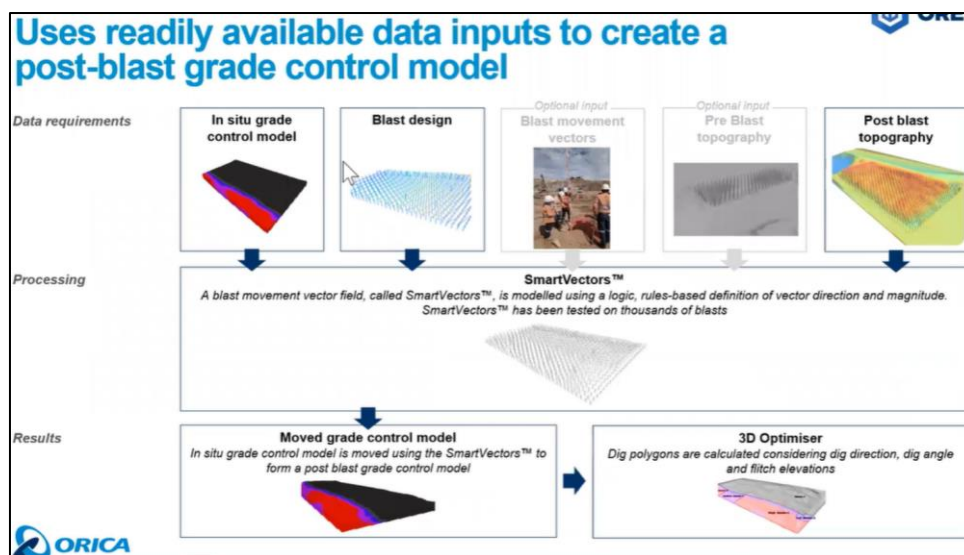


Figura 23 - Fluxograma do processo de funcionamento do OrePro3D (Orica, s.d.)

O OrePro™3D tem como benefícios (Orica, s.d.):

- Permite ajustar o seu modelo de controlo de teor com a desmonte para criar um modelo movido;
- Leva em consideração o movimento da detonação em 3D;

-
- Geração e edição rápida de polígonos mineiros otimizados;
 - A Ferramenta de Análise Financeira permite a comparação imediata do valor do cenário de desmonte, proporcionando uma comparação direta e dinâmica entre polígonos otimizados e os gerados convencionalmente.
 - Pode comparar cenários para diferentes direções de escavação para maximizar o valor;
 - Facilidade de comunicação e integração de dados com sistemas de gestão de frota tais como Modular, Wenco, Jigsaw, e Minestar;
 - Ter confiança na classificação e reconciliação de materiais;
 - Cenários demoram apenas alguns segundos a calcular;
 - No futuro, terão o software em qualquer linguagem.

O software tem uma ferramenta chamada "Vetores Inteligentes" que mede a direção e a magnitude de cada bloco para indicar o movimento. A Figura 24 demonstra o resultado após utilização da ferramenta "Vetores Inteligentes" (Orica, s.d.).

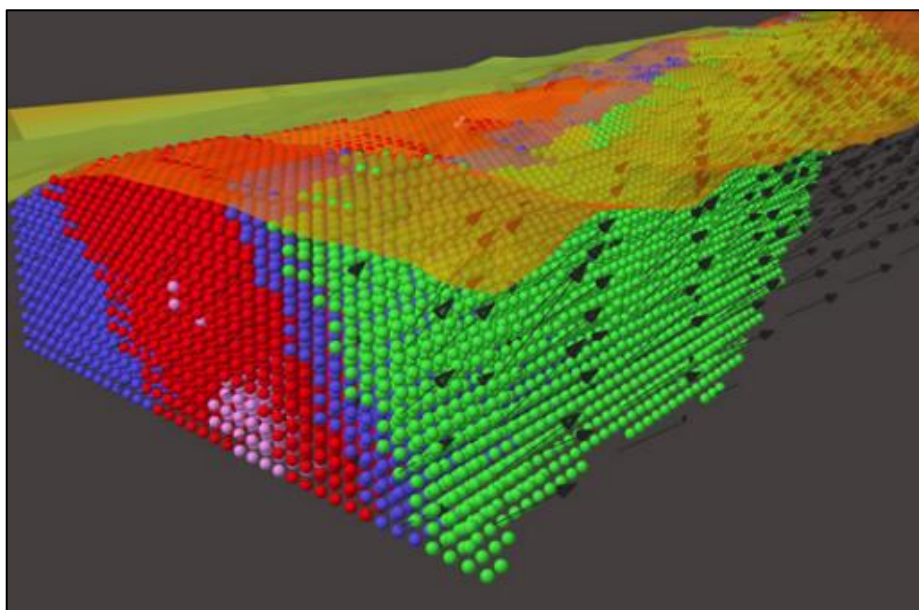


Figura 24 – Localização pós-desmonte utilizando os "SmartVetors"

Os únicos inputs que o utilizador deve ter de utilizar são (Orica, s.d.):

- Modelo de controlo de classificação;
- Parâmetros de desmonte;
- Topografia pós-detonção.

Tem interesse mencionar que a Orica tem uma presença mundial contando com mais de 400 minas onde aplicam atualmente os seus serviços de venda (Orica, s.d.).



Figura 25 - Representação da presença da Orica no mundo (Orica, s.d.)

5.2.3. DNA Blast – I-Blast Ultimate

No website DNA Blast não se fala muito sobre como funciona o controlo da diluição com base em projeções após a detonação. No entanto, esta empresa tem uma ferramenta para prever o movimento da detonação chamada de I-Blast Ultimate (Group, s.d.).

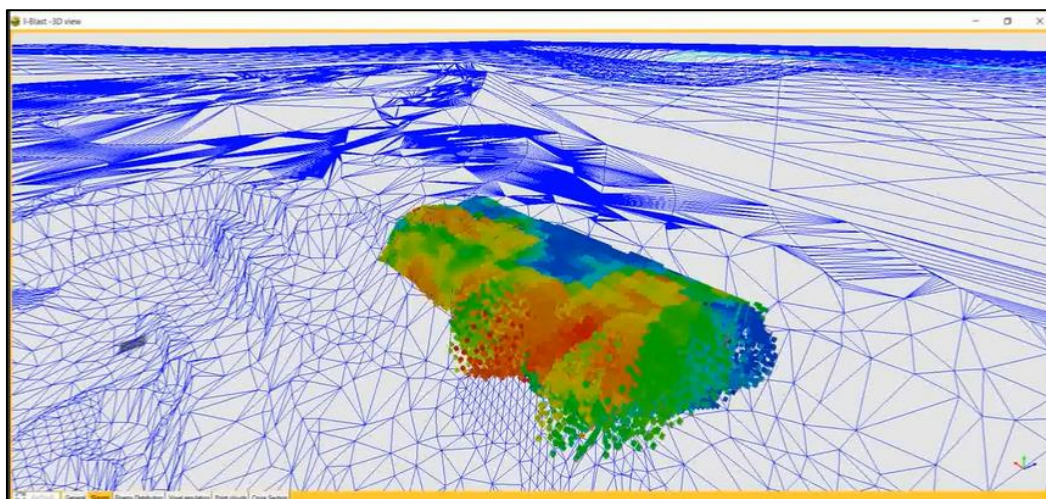


Figura 26 – I-Blast Ultimate software (Group, s.d.)

Na Figura 27 está representado um exemplo de simulação com o tempo de processamento do I-Blast Ultimate.

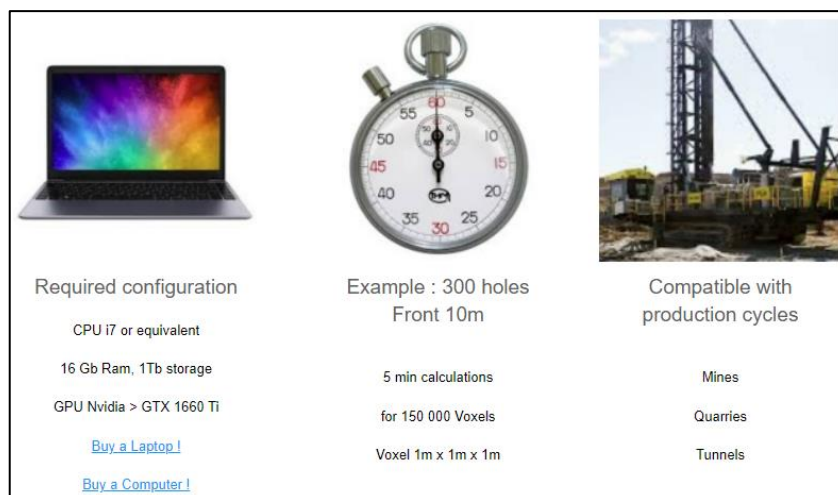


Figura 27 - Exemplo que a DNA Blast dá para o tem de processamento do software (Group, s.d.)

A DNA Blast tem atualmente 8 escritórios em todo o mundo (América e Europa), servindo um pouco mais de 80 empresas (Group, s.d.).

5.2.4. Augment Technologies – Ore Movement Policy (OMP)

Esta é uma nova empresa australiana no campo das tecnologias para a indústria de quebra de rochas. Têm clientes na Austrália, África e América (Technologies A. , s.d.).

Atualmente o seu software funciona com machine learning, pelo que existe um período de implementação e calibração, antes de a solução poder entrar em funcionamento na operação. Os inputs necessários para que o software funcione são (Technologies A. , s.d.):

- Modelo de bloco 3D;
- Dados da malha de furos;
- Análise do terreno pós desmonte.

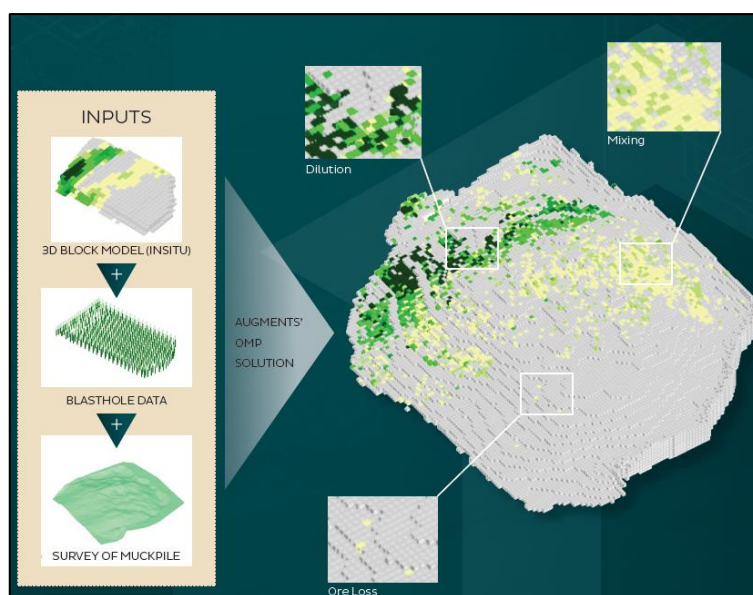


Figura 28 – Ore Movement Policy software (Technologies A. , s.d.)

OMP permite ao utilizador as seguintes soluções (Technologies A. , s.d.):

- Algoritmos robustos de machine learning que asseguram que o movimento considera todas as variáveis importantes específicas da mina - parâmetros de detonação, características das rochas, estruturas, etc.;
- Abordagem orientada por software - uma vez recolhidos os dados de geologia padrão, detonação e levantamento, o algoritmo específico do local processará os resultados em minutos;
- O sistema pode integrar-se com o software da mina - geologia, perfuração e detonação, levantamento e planeamento, podem ser parâmetros importados diretamente;
- Os resultados são comunicados numa interface personalizável, adaptada às necessidades de todos os interessados;
- Implementação remota - a nossa única solução de software significa que não é necessária qualquer visita ao local para implementar, otimizar e apoiar o OMP;
- Abre a porta a novas e excitantes oportunidades digitais, como a mineração virtual em 3D e a reconciliação ao vivo.

5.2.5. Blast Movement Technologies – Blast Movement Monitors (BMMs)

A Blast Movement Technologies é uma empresa mineira com mais de 133 clientes em 41 países. Oferecem sensores de deslocamento, chamados de Blast Movement Monitors, BMMs para abreviar, que acompanham e registam o movimento após a detonação. Trabalham com minas a céu aberto, numa gama de tipos de depósitos e mercadorias: ouro, cobre, lítio, ferro, níquel, platina, prata, urânio e zinco. Neste momento, têm 282.644 de BMMs a serem utilizados (Technologies B. M., s.d.).

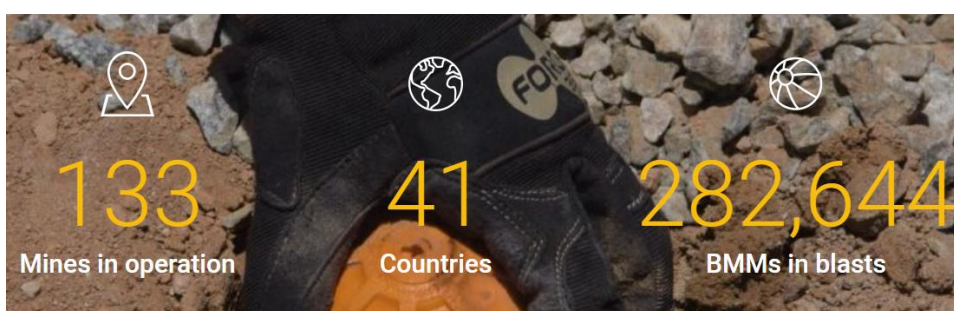


Figura 29 - Presença da BMT no mundo (Technologies B. M., s.d.)

A Figura 30 mostra algumas das companhias com quem a Blast Movement Technologies faz negócio.



Figura 30 - Alguns dos clientes da BMT (Technologies B. M., s.d.)

O Sistema de BMMs é uma solução única que mede o movimento tridimensional (3D) do desmonte na exploração de rochas. O Sistema BMM consiste em transmissores direcionais, BMMs, que são colocados dentro do volume de desmonte antes da detonação. Aconselhável que sejam colocados em furos de controlo, perto dos furos de carga, para capturar com maior precisão o movimento do solo. Estes são localizados após a detonação com um detetor especialmente concebido para este efeito (Technologies B. M., s.d.).

O software BMM Explorer calcula o vetor de movimento 3D de cada BMM, redefine os limites do minério ou os níveis de escavação para ter em conta o movimento medido, e calcula o valor do minério recuperado, diluição e classificação errada. Em suma, o software calcula a localização do movimento 3D pós- detonação dos polígonos de minério e produz as novas linhas de escavação (Technologies B. M., s.d.).

O seu processo de monitorização da detonação, funciona em 7 etapas, que também se encontram representadas na Figura 31 (Technologies B. M., s.d.):

1. Ativar os sensores BMM;
2. Instalar os BMMs em orifícios de monitorização dedicados antes da detonação e registar a sua posição;
3. Fazer o desmonte;
4. Detetar os BMMs com recurso ao detetor para localizar a posição 3D de cada sensor de BMM;
5. Combinar os dados de perfuração e desmonte, geologia e sistema BMM no software, BMM Explorer;
6. O software trata de definir os polígonos pós-detonação;
7. Escavar nova localização precisa do minério para maximizar a sua recuperação.

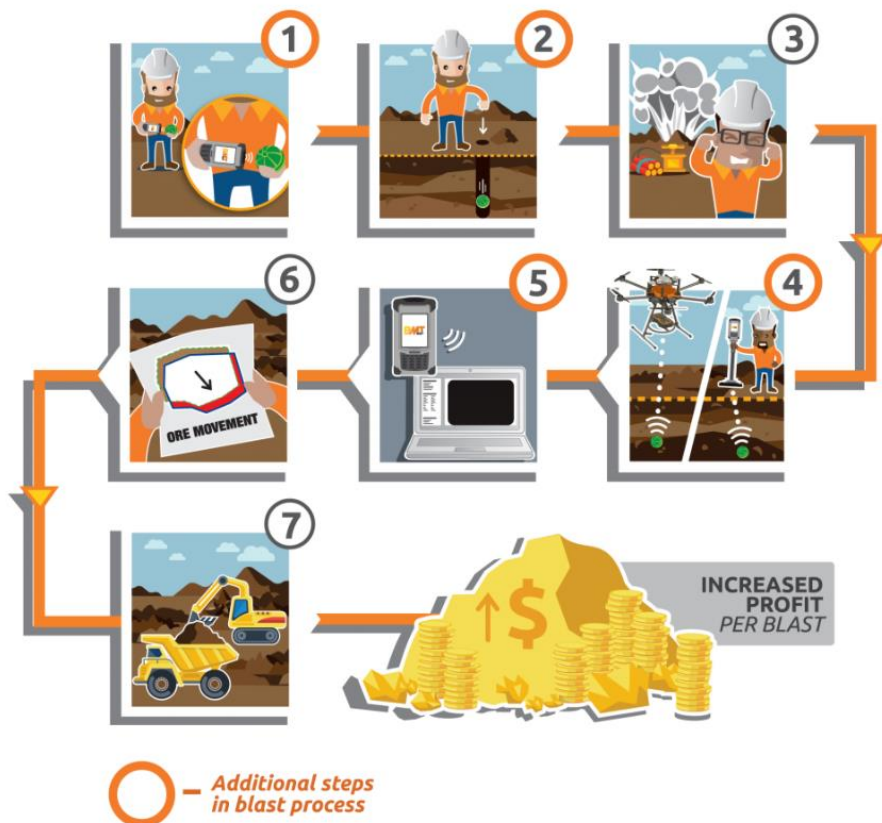


Figura 31 - Etapas de funcionamento do sistema da BMT (Technologies B. M., s.d.)

Os benefícios da utilização desta tecnologia são (Technologies B. M., s.d.):

- Obtenha mais do seu recurso - O Sistema BMM é o mais preciso e mais rentável método de monitorização de movimento de detonação 3D disponível.
- Reduzir a perda de minério, que se traduz em lucro puro – Como ainda se extrai a mesma quantidade de rocha, ao enviar-se o mesmo número de camiões para a fábrica, processa-se a mesma quantidade de minério. A única diferença é que com o Sistema BMM, há uma melhor identificação do mineral produzido.
- Mais receitas por um custo incremental - Ao adicionar apenas alguns centimos por tonelada ao custo do desmonte de minério, pode-se reduzir significativamente a perda e diluição do minério, melhorar as reconciliações e potencialmente ganhar milhões de dólares de minério extra. Sem sensores BMM, esse valor seria perdido para o depósito de resíduos, nunca sendo convertido em receitas.

5.2.6. Análise comparativa

Depois de olhar para os softwares acima listados, foi construída a Tabela 5, com o objetivo de facilitar a comparação dos diferentes parâmetros de entrada que cada software utiliza.

Tabela 5 - Parâmetros de entrada em função do software de mercado

	SOFTWARE INPUTS					
	JKVBOC	OREPRO™ 3D	I-Blast Ultimate	OMP - Augment Technologies	BMT	O-Pitblast (Prediction)
Drilled pattern	x	x	x	x	x	x
Rock properties	x		x	x	x	x
Blast hole data (Timing, charge and etc.)	x	x	x	x	x	x
Block model	x	x	x	x		
Sensor movement detection					x	
Pre blast topography	x		x			x
Post blast topography		x		x		x

A Tabela 6, também fornece uma comparação entre os mesmos softwares listados, mas esta foi baseada nas diferentes ferramentas que cada software fornece para o utilizador.

Tabela 6 - Funcionalidades em função do software de mercado

	SOFTWARE TOOLS					
	JKVBOC	OREPRO™ 3D	I-Blast Ultimate	OMP - Augment Technologies	BMT	O-Pitblast (Prediction)
Model blast fragmentation	x					x
Model blast movement 2D	x			x	x	x
Model blast movement 3D	x	x	x	x		x
Dilution analysis	x	x	x	x		x
Generate and edit optimized mining polygons		x			x	x
Digging strategies based on value grade	x	x			x	x
Best pattern to maximize the value of the orebody	x					
Multiple language		x			x	x
The financial analysis tool		x				x
Dispatch tool/integration		x		x	x	
Fast time simulation		x	x		x	x
Tailored solutions				x		x

5.2.7. Análise VRIO

A Análise VRIO é uma técnica analítica para a avaliação dos recursos da empresa e, portanto, da vantagem competitiva. VRIO é um acrónimo a partir das iniciais dos nomes das dimensões da avaliação que esta análise utiliza: Valor, raridade, imitabilidade e organização (Siteware, 2019).

Is it valuable?	Is it rare?	Is it difficult to imitate?	Is the company organized to exploit it?	What is the result?
NO				COMPETITIVE DISADVANTAGE
YES	NO			COMPETITIVE EQUALITY / PARITY
YES	YES	NO		TEMPORARY COMPETITIVE ADVANTAGE
YES	YES	YES	NO	UNUSED COMPETITIVE ADVANTAGE
YES	YES	YES	YES	LONG-TERM COMPETITIVE ADVANTAGE

Figura 32 - Modelo de análise VRIO (Siteware, 2019)

O resultado para o O-PitDilution foi:

- Valor: SIM! É um produto valioso que pode minimizar os custos das minas/pedreiras e aumentar as suas receitas;
- Raro: SIM! Baixa concorrência no mercado na área do software com soluções integradas;
- Imitar: SIM! É um software possível, mas difícil de imitar;
- Organização: SIM! A organização é capaz de desenvolver este produto no caso de aplicar as técnicas mais aprofundadas de machine learning e de modelos de blocos, quando obtiver um maior conjunto de dados.

Com base nos resultados desta análise, pode ser afirmado que existe a possibilidade de criação deste novo produto, por parte da empresa O-Pitblast.

6. DESENVOLVIMENTO DO MODELO DE PREVISÃO

Como já referido previamente, este estudo tem como objetivo o desenvolvimento de um modelo de previsão do movimento associado ao desmonte de uma massa mineral, sobre o qual se irá desenvolver um produto de controlo da diluição chamado O-PitDilution. Devido à complexidade de um produto como este, o projeto foi planeado para diferentes fases de desenvolvimento do mesmo. Nesta fase inicial, por exemplo, o modelo está a ser construído para a previsão do movimento ao nível superficial, mas com expectativa para evoluir para o controlo do movimento interno numa das fases seguintes.

6.1. Editor de código e linguagem de programação utilizada

O desenvolvimento do modelo de previsão tem sido feito em Visual Studio Code, usando a linguagem de programação Python 3, no repositório fechado da O-Pitblast. A escolha deste editor de código, deve-se ao facto de este ser um dos mais simples do mercado e para alguém que nunca tinha usado um editor de código isto foi um ponto fulcral. Já a escolha da linguagem foi pensada devido à similaridade em funcionamento com o Matlab, sobre o qual já tinha alguma experiência de programação o que facilitou a interpretação dos procedimentos de programação.

6.1.1. Visual Studio Code

Visual Studio Code (conhecido como VS Code) é um editor de texto de código aberto gratuito da Microsoft. O VS Code está disponível para Windows, Linux e macOS. Embora o editor seja relativamente leve, inclui algumas características poderosas que fizeram do VS Code uma das ferramentas de ambiente de desenvolvimento mais populares nos últimos tempos (Mustafeez, s.d.).

VS Code suporta uma vasta gama de linguagens de programação desde Java, C++, e Python até CSS, Go e Dockerfile. Além disso, o VS Code permite-lhe adicionar e até criar novas extensões incluindo analisadores de código, depuradores e suporte ao desenvolvimento de Cloud e Web (Mustafeez, s.d.).

A interface do utilizador do VS Code permite uma grande interação em comparação com outros editores de texto. Para simplificar a experiência do utilizador, o VS Code está dividido em cinco regiões principais (Mustafeez, s.d.):

- A. A barra de atividades
- B. A barra lateral
- C. Grupos editoriais
- D. O painel
- E. A barra de estado

A Figura 33 mostra como essas regiões são estruturalmente exibidas.

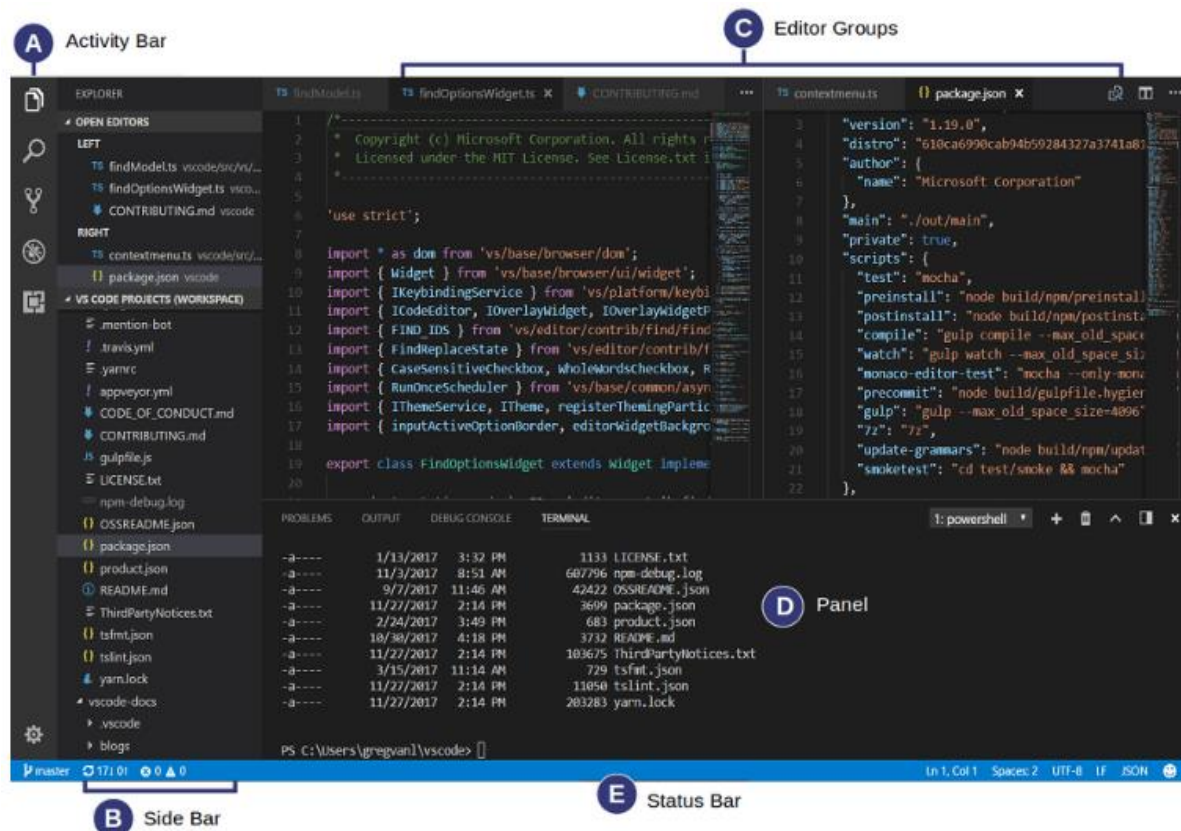


Figura 33 - VS Code com a identificação das diferentes regiões de atividade (Mustafeez, s.d.)

6.1.2. Python 3.0

Python é uma linguagem de programação interativa de uso geral, interpretada e orientada para objectos simples e de alto nível. Foi criada por Guido van Rossum durante 1985- 1990. A versão Python 3.0 foi lançada em 2008. Tal como Perl, o código fonte Python também está disponível sob a Licença Pública Geral GNU (GPL). O seu nome “Python” teve origem do antigo programa de TV chamado “Monty Python’s Flying Circus” (tutorialspoint, 2014).

Python é uma grande linguagem para os programadores de nível principiante e suporta o desenvolvimento de uma vasta gama de aplicações, desde o simples processamento de texto até navegadores WWW e jogos. Para além dessa simplicidade com uma elevada gama de funcionalidades, o Python 3 apresenta outras vantagens em relação a outras linguagens do mercado como (tutorialspoint, 2014):

- O processamento ser em tempo de execução pelo intérprete, não sendo necessário compilar o programa antes de o executar;
- Ser interativo, fazendo com que o utilizador consiga interagir diretamente com o intérprete durante a escrita do programa;
- Tem orientação para objetos, devido ao facto que suporta estilos ou técnicas de programação orientadas para o encapsulamento do código dentro de objetos.

6.2. A importação de bibliotecas

As bibliotecas são utilizadas para se referir a uma coleção de módulos que serão utilizados repetidamente em vários programas sem haver a necessidade de os escrever de raiz. Esses módulos, referem-se a qualquer ficheiro guardado com a extensão “.py” e normalmente contêm códigos como funções, classes e declarações que podem ser importados e utilizados dentro de outros programas.

A Figura 34, mostra a célula de importação das bibliotecas necessárias para a programação deste modelo de previsão. Para enumerar alguns exemplos, a biblioteca “pandas” foi importada para o seu uso na importação de informação sobre o desmonte, a biblioteca “numpy” serviu para o tratamento numérico e vetorial dos dados, os módulos “Point” e “Polygon” serviram para as células de deteção das zonas.

```
import pandas as pd
import numpy as np
from scipy import stats
from scipy.spatial import Delaunay
import matplotlib.pyplot as plt
from IPython.core.pylabtools import figsize
import alphashape
from descartes import PolygonPatch
import pyclipper
from os import remove
from shapely.geometry import Point
from shapely.geometry.polygon import Polygon
import warnings
from cmath import pi
```

Figura 34 - Conjunto de bibliotecas importadas para o funcionamento do modelo

6.3. Os parâmetros de entrada

Para a fase inicial de construção do modelo foi necessário a criação de vários CSVs, com toda a informação de parâmetros relativos ao desmonte, como o padrão e localização de todos os furos da malha, a quantidade de explosivo em cada um dos furos, a temporização cumulativa dos detonadores utilizados e os parâmetros geométricos de cada um dos furos. Ao todo foram feitos 4 conjuntos de ficheiros CSV, utilizando o O-PitSurface por motivos de maior facilidade no controlo da informação.

6.3.1. Os diferentes casos testados

Como mencionado previamente, foram feitos 4 diferentes conjuntos de ficheiros CSV de teste, que tentavam reproduzir algumas situações de desmonte, para serem usados durante a fase inicial de construção do modelo. De seguida mencionaremos as diferentes características entre cada um e as situações específicas para quais eles foram feitos:

- 1- Desmorte com 2 zonas, malha regular, parâmetros geométricos constantes e temporização direcionada para a frente livre, como mostra na Figura 35.

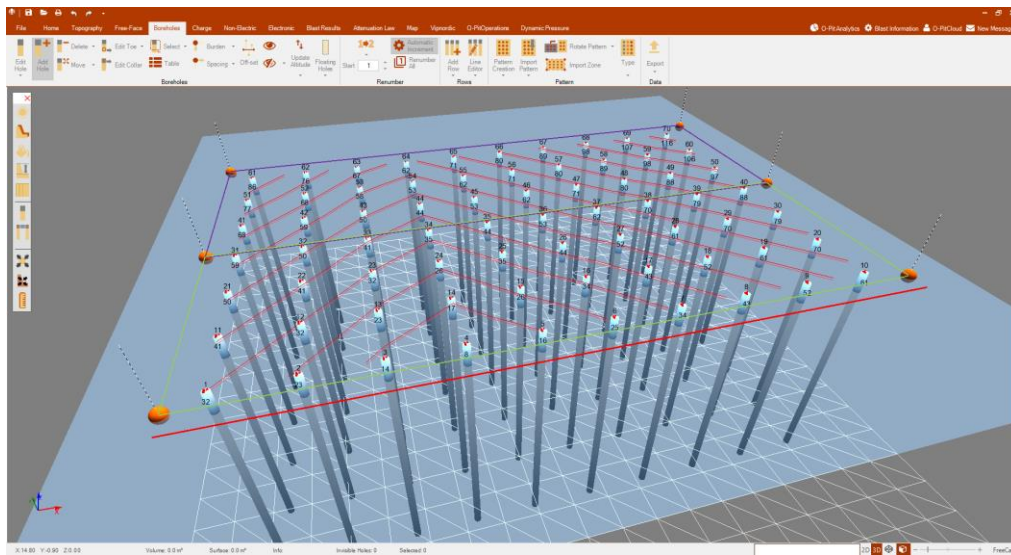


Figura 35 - Visualização do caso 1 no O-PitSurface

- 2- Desmorte com 2 zonas, malha irregular, parâmetros geométricos constantes e temporização direcionada para o canto direito da frente livre, como mostra na Figura 36.

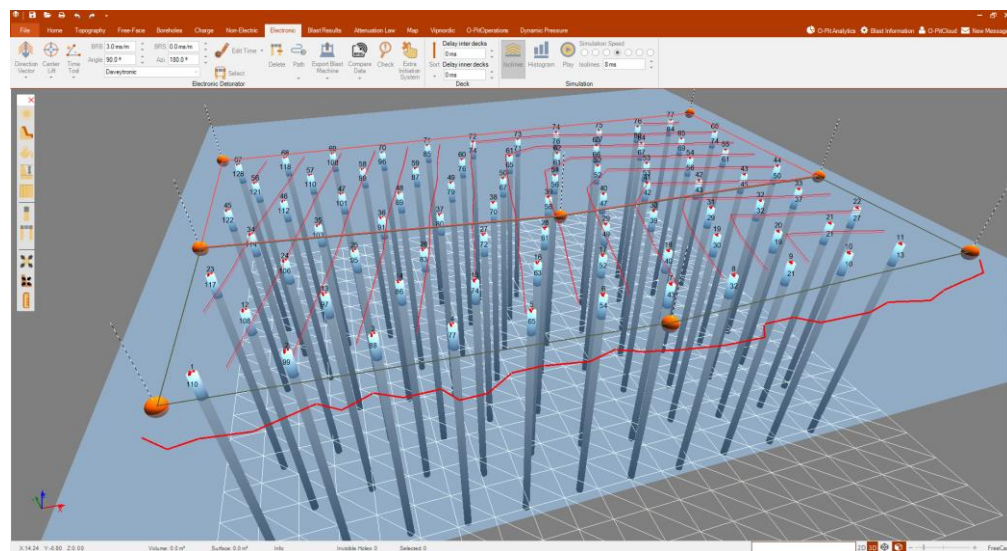


Figura 36 - Visualização do caso 2 no O-PitSurface

- 3- Desmorte com 4 zonas, malha irregular, parâmetros geométricos constantes e temporização direcionada para o canto direito da frente livre, como mostra na Figura 37.

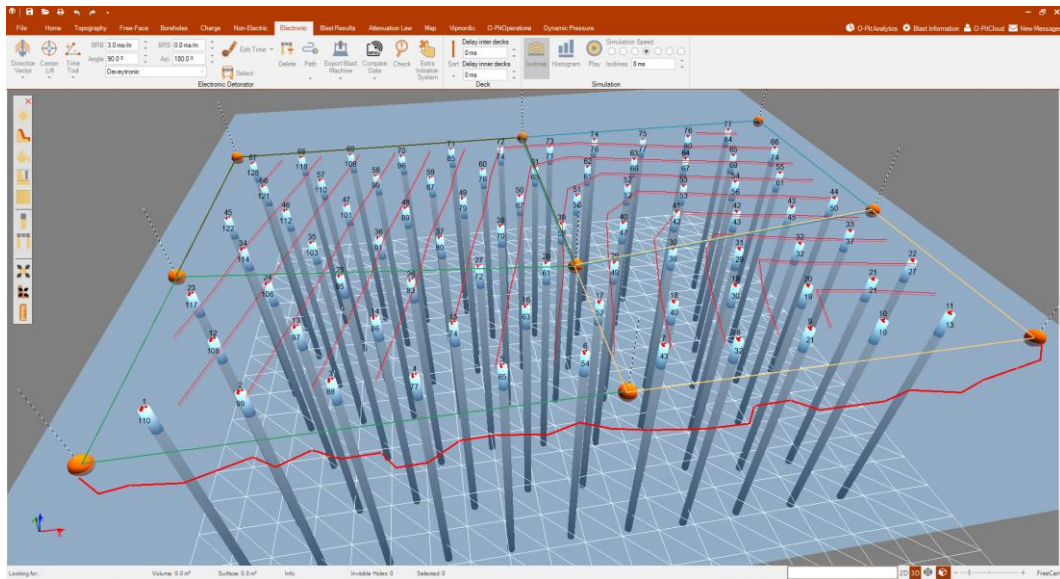


Figura 37 - Visualização do caso 3 no O-PitSurface

- 4- Desmorte com 4 zonas, malha irregular, parâmetros geométricos constantes e temporização em direção ao centro do desmorte (centerlift), como mostra na Figura 38.

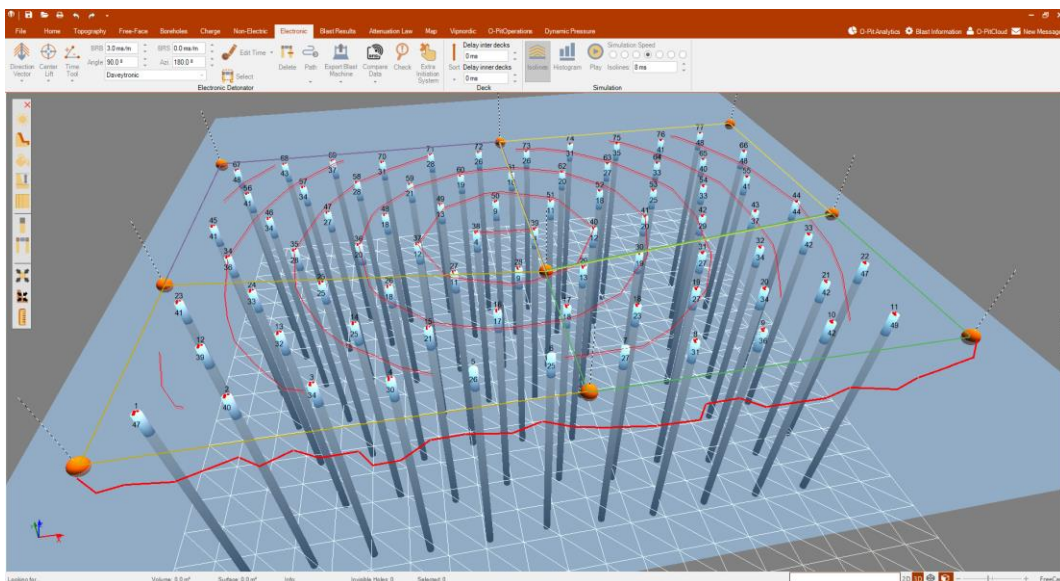


Figura 38 - Visualização do caso 4 no O-PitSurface

6.3.2. A importação de todo os parâmetros no modelo

Toda a informação é passada por um total de 3 ficheiros CSVs. O primeiro passa a informação em termos de parâmetros, relativamente aos furos; o segundo passa a informação relativa às zonas; e o terceiro passa a informação relativa à crista da frente livre.

A Figura 39, mostra as 2 células onde foram colocados todos os comandos necessários para a importação dos parâmetros de desmorte.

```
Data Files Group Selection

#Input of the files group number
files_group=4
#NOTE: dont use group 2 since model not ready for contacts with 3 points

Data Files Importation

#Files importation according to the inputed file group number
try:
    if files_group==1:
        holes=pd.read_csv(r'C:\Users\Francisco Monteiro\OneDrive - Forcit Oy\Ambiente de Trabalho\O-PitDilution\Dados\Holes 1 - Regular.csv',sep=";")
        zones=pd.read_csv(r'C:\Users\Francisco Monteiro\OneDrive - Forcit Oy\Ambiente de Trabalho\O-PitDilution\Dados\Zones 1 - Regular.csv',sep=";")
        crest=pd.read_csv(r'C:\Users\Francisco Monteiro\OneDrive - Forcit Oy\Ambiente de Trabalho\O-PitDilution\Dados\Crest 1 - Regular.csv',sep=";")
    elif files_group==2:
        holes=pd.read_csv(r'C:\Users\Francisco Monteiro\OneDrive - Forcit Oy\Ambiente de Trabalho\O-PitDilution\Dados\Holes 2 - Irregular.csv',sep=";")
        zones=pd.read_csv(r'C:\Users\Francisco Monteiro\OneDrive - Forcit Oy\Ambiente de Trabalho\O-PitDilution\Dados\Zones 2 - Irregular.csv',sep=";")
        crest=pd.read_csv(r'C:\Users\Francisco Monteiro\OneDrive - Forcit Oy\Ambiente de Trabalho\O-PitDilution\Dados\Crest 2 - Irregular.csv',sep=";")
    elif files_group==3:
        holes=pd.read_csv(r'C:\Users\Francisco Monteiro\OneDrive - Forcit Oy\Ambiente de Trabalho\O-PitDilution\Dados\Holes 3 - 4 zones.csv',sep=";")
        zones=pd.read_csv(r'C:\Users\Francisco Monteiro\OneDrive - Forcit Oy\Ambiente de Trabalho\O-PitDilution\Dados\Zones 3 - 4 zones.csv',sep=";")
        crest=pd.read_csv(r'C:\Users\Francisco Monteiro\OneDrive - Forcit Oy\Ambiente de Trabalho\O-PitDilution\Dados\Crest 3 - 4 zones.csv',sep=";")
    elif files_group==4:
        holes=pd.read_csv(r'C:\Users\Francisco Monteiro\OneDrive - Forcit Oy\Ambiente de Trabalho\O-PitDilution\Dados\Holes 4 - 4 Centerlift.csv',sep=";")
        zones=pd.read_csv(r'C:\Users\Francisco Monteiro\OneDrive - Forcit Oy\Ambiente de Trabalho\O-PitDilution\Dados\Zones 3 - 4 zones.csv',sep=";")
        crest=pd.read_csv(r'C:\Users\Francisco Monteiro\OneDrive - Forcit Oy\Ambiente de Trabalho\O-PitDilution\Dados\Crest 3 - 4 zones.csv',sep=";")
    else:
        print('Those data group files dont exist')
except:
    print('Those data group files dont exist')
```

Figura 39 - Células de importação dos CSVs que contêm os parâmetros do desmonte

Para além desta foi necessário colocar também uma célula adicional, representada pela Figura 40, que contem parâmetros que não são exportados pelo O-PitSurface, mas que seriam necessários para o funcionamento do modelo.

```
Additional Data

off_set=3 #Distância máxima a considerar após o perímetro definido pelos furos externos da malha
belly_calc_step_number=10 #Valor do step a considerar para o cálculo dos pontos das barrigas das zonas
bench_height=10 #Valor a considerar para a altura da bancada
```

Figura 40 - Célula com a informação adicional

6.4. A definição das funções

Como referido durante a importação das bibliotecas, alguns dos módulos importados contém funções que seriam necessárias para o funcionamento deste modelo. No entanto, logo desde início, percebeu-se que seria necessário construir funções para as tarefas mais específicas. As funções definidas nesta secção, serão chamadas ao longo do código, por isso todas elas devem ser definidas logo no início do código.

6.4.1. Função “getTimeOutsideTriangulation”

Para a representação do movimento superficial após desmonte foi necessário que o modelo construísse uma grelha um pouco maior que a malha dos furos. Essa grelha seria composta por pontos igualmente distanciados, que ao usar esta função iriam obter uma temporização em função da triangulação dos 3 furos mais próximos. A Figura 41 mostra como foi definida esta função no código do modelo.

Get Point Time When Outside Triangulation

```
#Função de procurar a temporização fora dos pontos da triangulação
def getTimeOutsideTriangulation(px,py,tri,holes):
    try:
        minDist=10000

        selectedTriangle=""

        p=np.array([(px,py)])

        for triangle in tri.simplices:

            if len(triangle)==1:
                triangle=triangle[0]

            i1=triangle[0]
            i2=triangle[1]
            i3=triangle[2]

            h1=holes.iloc[[i1]].reset_index()
            h2=holes.iloc[[i2]].reset_index()
            h3=holes.iloc[[i3]].reset_index()

            A=np.array([(h1['x']][0],h1['y']][0]))
            B=np.array([(h2['x']][0],h2['y']][0]))
            C=np.array([(h3['x']][0],h3['y']][0]))

            center=A/3+B/3+C/3

            vectorDist=p-center

            distance=np.linalg.norm(vectorDist)

            cross=np.linalg.norm(np.cross(B-A,C-A))

            if distance<minDist and cross>0.1:
                selectedTriangle=triangle
                minDist=distance

        if len(selectedTriangle)==1:
            selectedTriangle=selectedTriangle[0]

        i1=selectedTriangle[0]
        i2=selectedTriangle[1]
        i3=selectedTriangle[2]

        h1=holes.iloc[[i1]].reset_index()
        h2=holes.iloc[[i2]].reset_index()
        h3=holes.iloc[[i3]].reset_index()

        t1=h1['tempos']][0]
        t2=h2['tempos']][0]
        t3=h3['tempos']][0]

        A=np.array([(h1['x']][0],h1['y']][0]))
        B=np.array([(h2['x']][0],h2['y']][0]))
        C=np.array([(h3['x']][0],h3['y']][0]))

        u=B-A
        v=C-A

        M=np.matrix([[u[0,0],v[0,0]],[u[0,1],v[0,1]]])

        factors=np.linalg.inv(M)*(p-A).transpose()

        deltaT1=t2-t1
        deltaT2=t3-t1

        newTime=t1+factors[0,0]*deltaT1+factors[1,0]*deltaT2

        return True, newTime
    except:
        return False,0
```

Figura 41 - Função "getTimeOutsideTriangulation"

Basicamente esta função trabalha em 2 fases da seguinte maneira:

a) 1ª fase:

- 1- Selecionar um ponto qualquer da grelha (P);
- 2- Procurar o triângulo de furos mais próximo (F_1 , F_2 e F_3);
- 3- Criar 2 vetores que seguem o sentido e direção das laterais do triângulo de furos, saindo do furo mais afastado do ponto ($\vec{u}$ e $\vec{v}$);
- 4- Calcular os coeficientes associados a cada vetor (λ_1 e λ_2).

A Figura 42, representa os passos acima listados para encontrar os coeficientes de cada vetor.

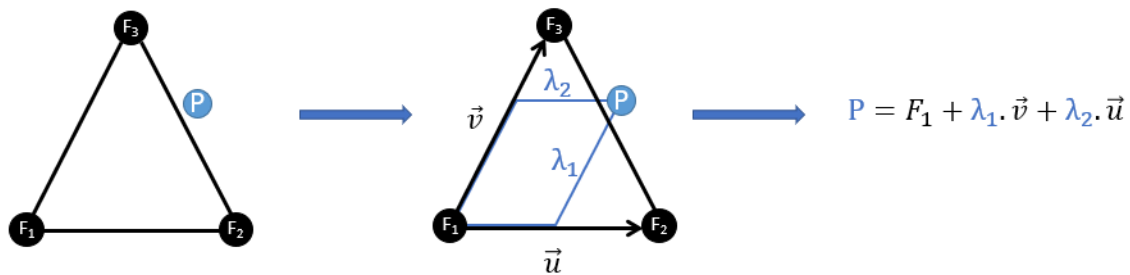


Figura 42 - Representação da 1ª fase da função "getTimeOutsideTriangulation"

De seguida, entra a 2ª fase onde está presente a Equação 10 que é utilizada para o cálculo da temporização de um ponto qualquer da grelha de pontos.

b) 2ª fase:

- 1- Procurar a temporização de cada furo do triângulo;
- 2- Calcular a temporização do ponto P, através da equação 10.

$$Temp_P = Temp_{F_1} + \lambda_1 * (Temp_{F_3} - Temp_{F_1}) + \lambda_2 * (Temp_{F_2} - Temp_{F_1}) \quad (10)$$

6.4.2. Função "getPointTime"

Esta função é extremamente parecida com a função "getTimeOutsideTriangulation", a diferença é que esta é usada para quando queremos obter a temporização de um ponto da grelha que se encontra dentro da triangulação. No seu funcionamento segue o mesmo processo de 2 fases.

A Figura 43 mostra como foi definida esta função no código do modelo.

Get Point Time

```
#Função de procurar a temporização dos pontos dentro da triangulação
def getPointTime(px,py,tri,holes):

    try:
        p=np.array([(px,py)])
        index=tri.find_simplex(p)

        if len(index)>1:
            index=index[0]

        newTime=-1

        if index==-1:

            getTime=getTimeOutsideTriangulation(px,py,tri,holes)

            if getTime[0]:
                newTime=getTime[1]
                if newTime<0:
                    newTime=0

                return True,newTime
            else:
                return False,getTime[1]

        else:
            result=True
            triangle=tri.simplices[index]

            if len(triangle)==1:
                triangle=triangle[0]

            i1=triangle[0]
            i2=triangle[1]
            i3=triangle[2]

            h1=holes.iloc[[i1]].reset_index()
            h2=holes.iloc[[i2]].reset_index()
            h3=holes.iloc[[i3]].reset_index()

            t1=h1['tempos'][0]
            t2=h2['tempos'][0]
            t3=h3['tempos'][0]

            A=np.array([(h1['x'][0],h1['y'][0])])
            B=np.array([(h2['x'][0],h2['y'][0])])
            C=np.array([(h3['x'][0],h3['y'][0])])

            u=B-A
            v=C-A

            M=np.matrix([[u[0,0],v[0,0]],[u[0,1],v[0,1]]])

            factors=np.linalg.inv(M)*(p-A).transpose()

            deltaT1=t2-t1
            deltaT2=t3-t1

            newTime=t1+factors[0,0]*deltaT1+factors[1,0]*deltaT2

        return result,newTime

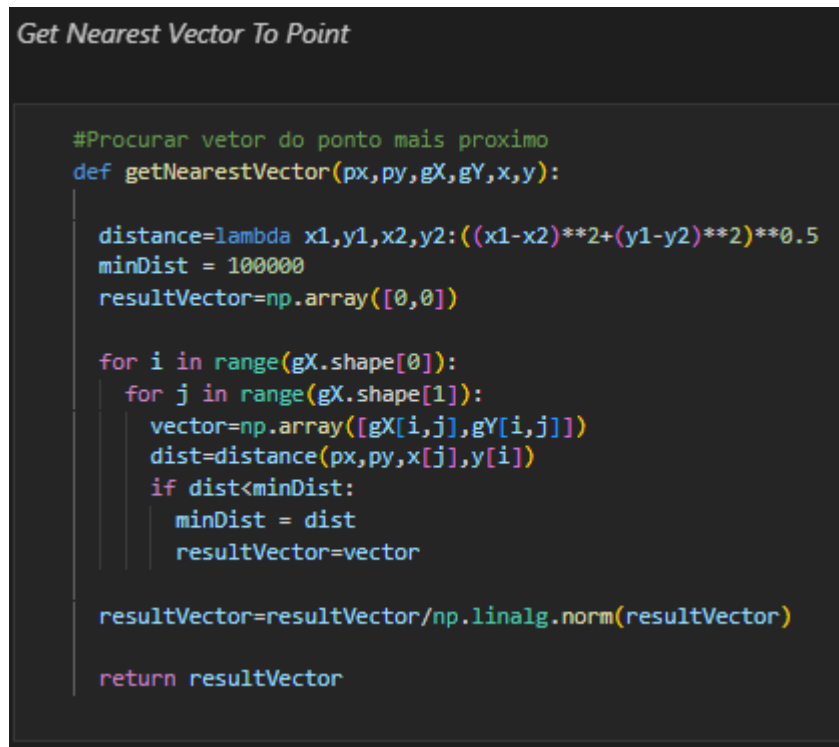
    except:
        return False,0
```

Figura 43 - Função "getPointTime"

6.4.3. Função “getNearestVector”

Com as funções descritas em 6.4.1. e 6.4.2., obteve-se a temporização associada à grelha de pontos, através da triangulação dos furos mais próximos, como já referido anteriormente. Com essa grelha de pontos, foi possível sobrepor as zonas delimitadas pelo utilizador, que foram importadas no CSV das zonas, permitindo obter a temporização para os limites das zonas e para os contatos entre zonas.

A Figura 44, mostra a célula de código onde está escrita esta função no modelo.



```
Get Nearest Vector To Point

#Procurar vetor do ponto mais proximo
def getNearestVector(px,py,gX,gY,x,y):

    distance=lambda x1,y1,x2,y2:((x1-x2)**2+(y1-y2)**2)**0.5
    minDist = 100000
    resultVector=np.array([0,0])

    for i in range(gX.shape[0]):
        for j in range(gX.shape[1]):
            vector=np.array([gX[i,j],gY[i,j]])
            dist=distance(px,py,x[j],y[i])
            if dist<minDist:
                minDist = dist
                resultVector=vector

    resultVector=resultVector/np.linalg.norm(resultVector)

    return resultVector
```

Figura 44 - Função "getNearestVector"

6.4.4. Função “getInfluenceArea”

Como referido no ponto 6.4.1., o modelo aceita pontos fora da malha de furos para a criação da grelha de pontos. Para isso foi necessário definir uma distância máxima após o perímetro da malha de furos e calcular os novos pontos exteriores que serão os delimitadores da grelha de pontos.

A Figura 45 mostra a célula referente a essa “expansão” dos limites da grelha.

Get Influence Area

```
#Offset a partir do convexhull dos furos
def getInfluenceArea(x,y,offset):
    points=[]
    for i in range(len(x)):
        points.append((x[i],y[i]))

    alpha=alphashape.optimizealpha(points)

    hull=alphashape.alphashape(points,alpha)
    hull_pts=hull.exterior.coords.xy

    points=[]

    for i in range(len(hull_pts[0])):
        points.append((hull_pts[0][i],hull_pts[1][i]))

    pco=pyclipper.PyclipperOffset()
    pco.AddPath(points,pyclipper.JT_MITER,pyclipper.ET_CLOSEDPOLYGON)

    solution=pco.Execute(offset)

    points=[]

    for i in range(len(solution[0])):
        points.append([solution[0][i][0],solution[0][i][1]])

    return points

    if False:
        fig,ax=plt.subplots()
        ax.scatter(hull_pts[0],hull_pts[1],color='red')
        ax.add_patch(PolygonPatch(hull,fill=False,color='green'))

        x=list(map(lambda x:x[0],points))
        y=list(map(lambda x:x[1],points))
        plt.plot(x,y,'bo')
```

Figura 45 - Função "getInfluenceArea"

6.4.5. Função "ZoneDistToGridPoints"

Esta função é complementar à função descrita em 6.4.3., visto que calcula a distância de cada ponto que delimita as zonas importadas e cada ponto da grelha. Basicamente esta função calcula todas as distâncias e a 6.4.3. procura a menor distância e adiciona o vetor do ponto da grelha mais próximo ao ponto do contato.

Na Figura 46 está representada a célula desta função "ZoneDistToGridPoints".

Calculate the zone points distance to the grid points

```
#Procurar distancia minima para criação dos vetores de cada zona
def ZoneDistToGridPoints(a,b):
    return np.array([[np.linalg.norm(i-j) for j in b] for i in a])
```

Figura 46 - Função "ZoneDistToGridPoints"

6.4.6. Função "PolyArea"

A célula representada na Figura 47, mostra uma função que é utilizada para o cálculo da área das zonas. Como as zonas foram definidas no O-PitSurface, estas são construídas através de linhas não-curvas, logo o cálculo da sua área pode ser calculado através do método de "Shoelace".

Calculate The Zones Areas

```
#Calculo não-regular (qualquer formato)
def PolyArea(x,y):
    return 0.5*np.abs(np.dot(x,np.roll(y,1))-np.dot(y,np.roll(x,1)))
```

Figura 47 - Função "PolyArea"

O método de "Shoelace", também conhecido como "Gauss's area formula" ou "Surveyor's formula" é um algoritmo matemático para a determinação da área de um polígono simples cujos vértices estão definidos pelas suas coordenadas cartesianas 2D. É chamada de "Shoelace" devido à constante multiplicação cruzada das coordenadas que compõem o polígono, assemelhando-se a uns cordões, como mostra a Figura 48 (Shoelace formula, 2022).

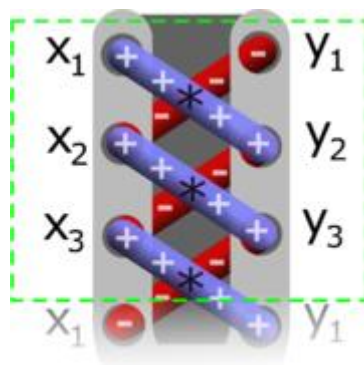
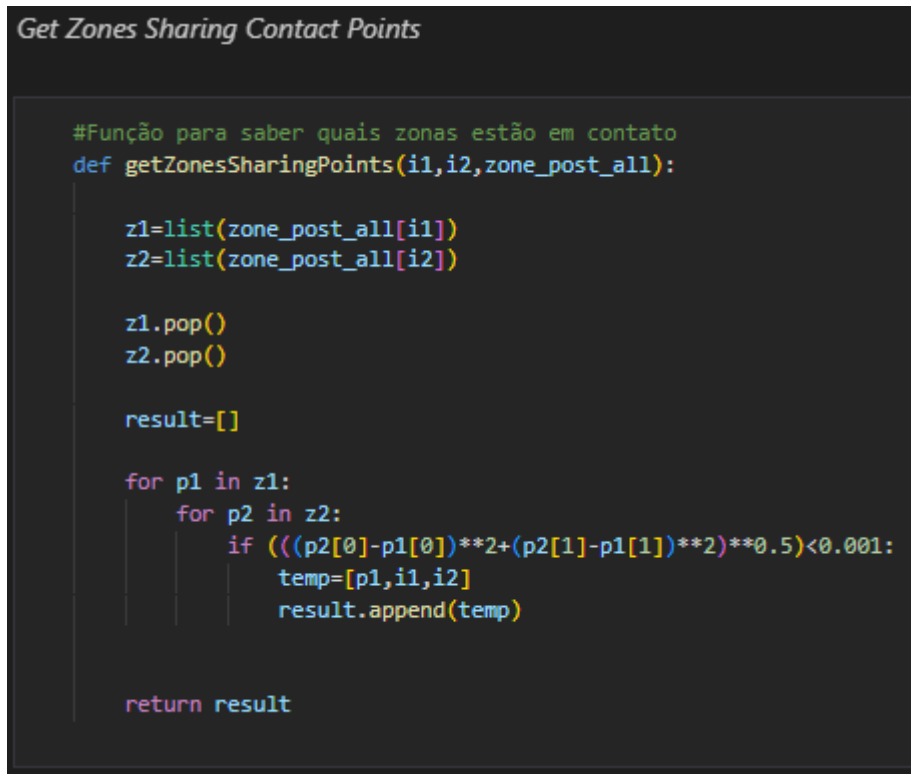


Figura 48 - Esquema de cálculo da área do polígono pelo método de "Shoelace" (Shoelace formula, 2022)

6.4.7. Função "getZonesSharingPoints"

A última função adicionada ao modelo está na célula descrita na Figura 49. Esta função, tal como indica o seu nome, serviu para encontrar zonas que partilhavam pontos de contato e guardar esses pontos de contato.



```
Get Zones Sharing Contact Points

#Função para saber quais zonas estão em contato
def getZonesSharingPoints(i1,i2,zone_post_all):

    z1=list(zone_post_all[i1])
    z2=list(zone_post_all[i2])

    z1.pop()
    z2.pop()

    result=[]

    for p1 in z1:
        for p2 in z2:
            if (((p2[0]-p1[0])**2+(p2[1]-p1[1])**2)**0.5)<0.001:
                temp=[p1,i1,i2]
                result.append(temp)

    return result
```

Figura 49 - Função "getZonesSharingPoints"

6.5. A análise dos parâmetros de desmonte

Em paralelo ao desenvolvimento deste modelo de previsão, o Doutor Engenheiro Vinicius Miranda, desenvolveu um modelo matemático, com machine learning, que recebia informação dos parâmetros de desmonte e comparava com desmontes com parâmetros semelhantes, dando um valor provável para a intensidade de deslocamento de cada furo.

Inicialmente esse modelo matemático considerava os seguintes parâmetros:

- Powder factor;
- Quilogramas de explosivo;
- Afastamento;
- Espaçamento;
- Tamanho do furo;
- Tamponamento;
- Subfuração
- Energia do explosivo
- Linha do furo;
- Temporização/afastamento;
- Temporização/espacamento.

Os dados usados para o desenvolvimento deste modelo matemático foram recolhidos na Mina de Cobre de Las Cruces. Para além dos parâmetros listados acima, também foi recolhida a informação relativa à posição dos furos pré-desmonte (coordenadas iniciais x_i e y_i) e pós-desmonte (coordenadas finais x_f e y_f), para ser possível calcular o deslocamento real e validar o resultado obtido pela previsão do deslocamento previsto.

Por motivos de confidencialidade não me é possível mostrar o código usado para a construção do modelo matemático, pois este não é da minha autoria. Apenas posso confirmar que o modelo matemático contém:

- Importação das bibliotecas necessárias;
- Importação dos dados de mina de cobre de Las Cruces;
- Definição das funções estatísticas necessárias;
- Análise estatística dos parâmetros;
- Tratamento dos dados (filtragem dos valores anómalos);
- Análise individual de cada parâmetro em função do deslocamento (construção dos histogramas);
- Análise de correlação de cada parâmetro em função do deslocamento;
- Filtragem dos parâmetros que não apresentaram correlação com o deslocamento;
- Ordenação dos parâmetros que apresentaram correlação com o deslocamento;
- Calibração dos coeficientes de machine learning relativos às opções de classificação;
- Visualização dos resultados calculados e dos resultados reais;
- Cálculo da raiz quadrada do erro médio, dos resultados calculados e dos resultados reais;
- Ordenação dos resultados em função do menor erro;
- Exportação do modelo treinado e da sua escala.

Apesar de não ser possível partilhar o código do modelo matemático, alguns dos resultados obtidos estarão dispostos no capítulo 7 “Resultados e discussão” deste documento, para discussão dos resultados.

6.6. A importação do modelo treinado e a sua escala

Para a importação do modelo e da escala provenientes do modelo matemático, foi necessária a adição de novas células. Na Figura 50, estão presentes 3 células:

- 1- a primeira célula é referente à importação de uma biblioteca que foi necessária para a leitura dos ficheiros .pkl, visto que até aqui só tinha necessitado de importar CSVs;
- 2- a segunda célula é referente à definição da função de cálculo do deslocamento através da importação do modelo e escala;
- 3- a terceira célula é referente ao cálculo do deslocamento usando a função definida na célula anterior.

```

Import the library

from pickle import load as loadModelAndScaler

Define the funtion to load the model and scaler files

def getModelAndScaler():
    # load the model
    model = loadModelAndScaler(open('Model & Scaler\model.pkl', 'rb'))
    # load the scaler
    scaler = loadModelAndScaler(open('Model & Scaler\scaler.pkl', 'rb'))
    return model, scaler

Define the funtion used to calculate the hole displacement

model, scaler = getModelAndScaler()
#parameters = Powder_Factor_calculado, Explosive_Kg, Burden, Spacing, Hole_Length, Stemming, Subdrill, Row_Number

def getDisplacement(parameters):
    vector=[parameters]
    X_test_scaled = scaler.transform(vector)
    return model.predict(X_test_scaled)[0]+0.5

```

Figura 50 - Células referentes à importação e cálculo do deslocamento a partir da escala e do modelo treinado

6.7. O tratamento dos dados

Na posse de toda a informação importada, é então possível dar início ao processo de tratamento dos dados. Os próximos subcapítulos listam os passos que foram tomados pela sua ordem de execução.

6.7.1. A construção da triangulação

A triangulação foi o melhor método para interpolação da temporização, para os pontos sem informação, que encaixou neste modelo de previsão. Como já referido no ponto 6.4.1. deste documento, a temporização da grelha de pontos foi calculada através da triangulação dos furos da malha.

A Figura 51 mostra como ficou definida a triangulação para os furos da malha do 3º caso referido em 6.3.1. deste documento.

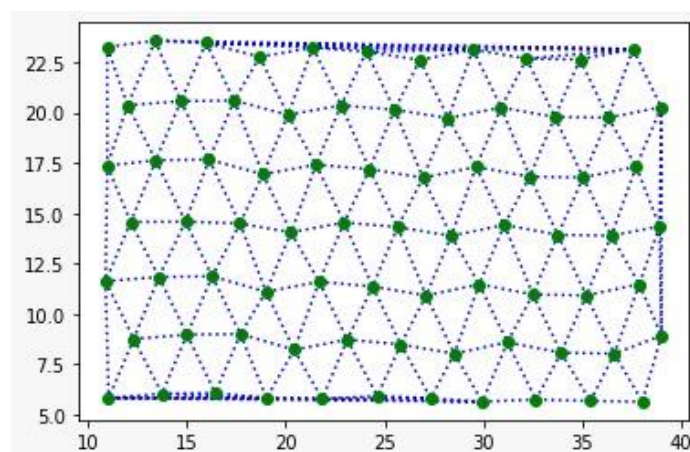


Figura 51 - Representação dos furos da malha (verde) e a triangulação feita (azul)

Na Figura 52 está representada a célula usada para a execução dessa triangulação.

```
Triangulation

#criacao de array vazio
points=np.empty([0,0])

#preencher os pontos com as posicoes x e y
for index, hole in holes.iterrows():
    if len(points)==0:
        points=np.array([[hole['x'],hole['y']]])
    else:
        points=np.append(points,[[hole['x'],hole['y']]], axis=0)
#triagular
tri=Delaunay(points)

newTriangles=np.empty([0,0])

for triangle in tri.simplices:

    i1=triangle[0]
    i2=triangle[1]
    i3=triangle[2]
    |
    h1=holes.iloc[[i1]].reset_index()
    h2=holes.iloc[[i2]].reset_index()
    h3=holes.iloc[[i3]].reset_index()

    A=np.array([(h1['x'])[0],h1['y'])[0]])
    B=np.array([(h2['x'])[0],h2['y'])[0]])
    C=np.array([(h3['x'])[0],h3['y'])[0]])

    center=A/3+B/3+C/3

    cross=np.linalg.norm(np.cross(B-A,C-A))

    if cross>1:
        if len(newTriangles)==0:
            newTriangles=np.array([triangle])
        else:
            newTriangles=np.append(newTriangles,[triangle],axis=0)

tri.simplices=newTriangles
```

Figura 52 - Célula referente à triangulação de cada conjunto de 3 furos da malha

6.7.2. O cálculo dos gradientes

Agora, com a triangulação feita e o cálculo dos tempos de detonação definidos para todos os pontos da grelha, foram construídas as células que calculam os gradientes. Na Figura 53 é possível visualizar que no 4º ponto da grelha da linha de cima, foi mal calculado. Isto aconteceu porque o método de triangulação tem alguns problemas no cálculo para triângulos com ângulos muito fechados e isso é o acontece se olharmos para o mesmo local na Figura 51.

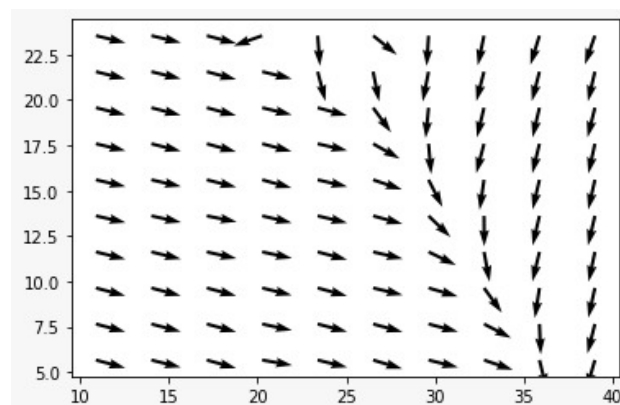


Figura 53 – Representação dos gradientes calculados para cada ponto da grelha

O método usado para o cálculo dos gradientes foi feito sabendo que o movimento será feito perpendicularmente às isolinhas geradas pela temporização associada a cada ponto da grelha. Na está representada a célula usada para o cálculo de todos os gradientes.

```

Gradients

#encontrar limites para criacao de malha
minX=min(points[:,0]+0.01)
maxX=max(points[:,0]-0.01)
minY=min(points[:,1]+0.01)
maxY=max(points[:,1]-0.01)

#vetores x e y
x=np.linspace(minX,maxX,num=10,retstep=False)
y=np.linspace(minY,maxY,num=10,retstep=False)
X,Y=np.meshgrid(x,y)

Z=np.zeros([len(y),len(x)])

indexx=0
indexy=0

for i in x:
    for j in y:
        getTime=getPointTime(i,j,tri,holes)
        if getTime[0]:
            Z[indexy,indexx]=getTime[1]
            indexy+=1
        indexy=0
        indexx+=1

gX=np.zeros([len(y),len(x)])

#gradiente na direcao x
for i in range(len(y)):
    for j in range(len(x)):
        if j==0:
            gX[i,j]=-(Z[i,j+1]-Z[i,j])/(x[j+1]-x[j])
        elif j==len(y)-1:
            gX[i,j]=-(Z[i,j]-Z[i,j+1])/(x[j]-x[j+1])
        else:
            gX[i,j]=-(Z[i,j+1]-Z[i,j])/(x[j+1]-x[j])/2-(Z[i,j]-Z[i,j+1])/(x[j]-x[j+1])/2

gY=np.zeros([len(y),len(x)])

#gradiente na direcao y
for j in range(len(x)):
    for i in range(len(y)):
        if i==0:
            gY[i,j]=-(Z[i+1,j]-Z[i,j])/(y[i+1]-y[i])
        elif i==len(y)-1:
            gY[i,j]=-(Z[i,j]-Z[i+1,j])/(y[i]-y[i+1])
        else:
            gY[i,j]=-(Z[i+1,j]-Z[i,j])/(y[i+1]-y[i])/2-(Z[i,j]-Z[i+1,j])/(y[i]-y[i+1])/2

#normalizacao dos vetores (gradiente)
for i in range(len(x)):
    for j in range(len(y)):
        u=np.array([gX[j,i],gY[j,i]])
        u=np.linalg.norm(u)
        gX[j,i]=u[0,0]
        gY[j,i]=u[0,1]

```

Figura 54 - Célula referente ao cálculo dos gradientes de cada ponto da grelha

6.8. Os parâmetros de saída

Neste tópico estarão representadas todas as células usadas para obter todos os parâmetros de saída do modelo.

6.8.1. Cálculo da área pré-desmonte

A Figura 55, mostra a célula que estava encarregue pelo cálculo da área pré-desmonte das zonas importadas.

```

Areas Calculation (Pre-Blast)

#Get array of the different zones
dif_zones=zones['zone'].unique()

#Separate different zones in the zones file
zones_sep=[]
for values in dif_zones:
    tempZone=zones[zones['zone']==values].reset_index()
    zones_sep.append(tempZone)

#Pre-blast area calculation for each zone
total_area_pre_blast_sep=[]
area_zones_pre=[]
for z in zones_sep:
    myX=z[['x']].values
    myY=z[['y']].values

    zone_number_pre=z['zone'].unique()
    to_pr_bl=PolyArea(myX.reshape(len(myX)),myY.reshape(len(myY)))
    total_area_pre_blast_sep=np.append(total_area_pre_blast_sep,to_pr_bl)
    area_zones_pre.append(PolyArea(myX.reshape(len(myX)),myY.reshape(len(myY))))
    print('Zone Area',str(zone_number_pre).strip('['','']),'Pre-Blast =',PolyArea(myX.reshape(len(myX)),myY.reshape(len(myY))))

```

Figura 55 - Célula para obtenção do cálculo das áreas pré-desmonte de cada zona importada

6.8.2. Cálculo da área pós-desmonte

Com a grelha de pontos agora criada e já com os gradientes definidos para cada ponto dela, foi possível procurar os pontos da zona que estavam em contato com os pontos da grelha, obtendo assim os gradientes para as zonas. A Figura 56, mostra a célula que estava encarregue pelo cálculo da área pós-desmonte das zonas importadas.

```

Areas Calculation (Post-Blast)

#Transform grid points into matrix
grid=np.vstack([(X,Y)]).T
grid=grid.reshape((100,2))

#transform gradiente points into matrix
gradgrid=np.vstack([(gX,gY)]).T
gradgrid=gradgrid.reshape((100,2))

#Get zone coordinates for each zone
total_area_post_blast_sep=[]
zone_post_all=[]
area_zones_post=[]
for i in range(len(zones_sep)):
    #calculate distances of grid points to zone points
    ZDTGP=ZoneDistToGridPoints(grid,z_coord_all[i])

    #get closest points index to zone
    min_pos=[]
    for j in range(len(z_coord_all[i])):
        auxflo=float(np.argmin(ZDTGP[:,j]))
        min_pos.append(int(auxflo))

    #get gradiente for the closest point index to zone
    gradmingrid=gradgrid[min_pos]

    #calculate post-blast zone points locations
    zone_post=np.add(z_coord_all[i],final_zone_vec_x_y[i])

    zone_post_all.append(zone_post)
    zone_x_post=zone_post[:,0]
    zone_y_post=zone_post[:,1]

    #add zones coordinates to dataframe
    zones_sep[i]['postX']=zone_x_post
    zones_sep[i]['postY']=zone_y_post

    #find unique zone numbers
    zone_number_post=zones_sep[i]['zone'].unique()

    #calculate post-blast zone area
    to_po_bl=PolyArea(zone_x_post,zone_y_post)
    total_area_post_blast_sep=np.append(total_area_post_blast_sep,to_po_bl)
    area_zones_post.append(PolyArea(zone_x_post,zone_y_post))
    print('Zone Area',str(zone_number_post).strip('['','']),'Post-Blast =',PolyArea(zone_x_post,zone_y_post))

```

Figura 56 - Célula para obtenção do cálculo das áreas pós-desmonte de cada zona importada

6.8.3. Cálculo dos ganhos e perdas com a exclusão das barrigas

Nesta fase da construção do modelo de previsão, pensei que seria uma mais valia fazer o cálculo normalmente, ou seja, com a inclusão das barrigas, mas também dar a possibilidade ao responsável pelo desmonte de querer tirar as barrigas do cálculo. Ao início pode parecer algo sem sentido, mas dar a possibilidade de não incluir as barrigas no cálculo, mostrou-se favorável pela razão de em vez do utilizador importar 4 zonas de entrada e obter 4 zonas de saída, com as barrigas incluídas, isto permitiria ao utilizador importar 4 zonas de entrada e obter 4 zonas de saída e 4 barrigas. Isto mostrou oferecer mais possibilidades ao utilizador por exemplo na escolha de material para blending. Então a Figura 57 mostra a célula de cálculo dos ganhos e perdas em massa de minério com a exclusão das barrigas.

Calculation of the losses and gains, for each zone, in mass quantity and percentage, with the exclusion of the bellies

```
for i in range(len(final_info_dafn['Zone ID'])):
    if final_info_dafn['Ore Mass Pre Blast'][i] > final_info_dafn['Ore Mass Post Blast Excluding Belly'][i]:
        loss_mass=final_info_dafn['Ore Mass Pre Blast'][i]-final_info_dafn['Ore Mass Post Blast Excluding Belly'][i]
        print('Loss in mass for the zone',final_info_dafn['Zone ID'][i], '=', loss_mass.round(3), 'kg')
        loss_percentage=((final_info_dafn['Ore Mass Pre Blast'][i]-final_info_dafn['Ore Mass Post Blast Excluding Belly'][i])/final_info_dafn['Ore Mass Pre Blast'][i])*100
        print('Loss in percentage for the zone',final_info_dafn['Zone ID'][i], '=', loss_percentage.round(2), '%')
    if final_info_dafn['Ore Mass Pre Blast'][i] < final_info_dafn['Ore Mass Post Blast Excluding Belly'][i]:
        gain_mass=final_info_dafn['Ore Mass Post Blast Excluding Belly'][i]-final_info_dafn['Ore Mass Pre Blast'][i]
        print('Gain in mass for the zone',final_info_dafn['Zone ID'][i], '=', gain_mass.round(3), 'kg')
        gain_percentage=((final_info_dafn['Ore Mass Post Blast Excluding Belly'][i]-final_info_dafn['Ore Mass Pre Blast'][i])/final_info_dafn['Ore Mass Pre Blast'][i])*100
        print('Gain in percentage for the zone',final_info_dafn['Zone ID'][i], '=', gain_percentage.round(2), '%')
```

Figura 57 - Célula para obtenção dos ganhos e perdas de minério com exclusão das barrigas

6.8.4. Cálculo dos ganhos e perdas com a inclusão das barrigas

E a Figura 58, mostra o cálculo dos ganhos e perdas em massa de minério, mas neste caso com a inclusão das barrigas.

Calculation of the losses and gains, for each zone, in mass quantity and percentage, with the inclusion of the bellies

```
for i in range(len(final_info_dafn['Zone ID'])):
    if final_info_dafn['Ore Mass Pre Blast'][i] > final_info_dafn['Ore Mass Post Blast Including Belly'][i]:
        loss_mass=final_info_dafn['Ore Mass Pre Blast'][i]-final_info_dafn['Ore Mass Post Blast Including Belly'][i]
        print('Loss in mass for the zone',final_info_dafn['Zone ID'][i], '=', loss_mass.round(3), 'kg')
        loss_percentage=((final_info_dafn['Ore Mass Pre Blast'][i]-final_info_dafn['Ore Mass Post Blast Including Belly'][i])/final_info_dafn['Ore Mass Pre Blast'][i])*100
        print('Loss in percentage for the zone',final_info_dafn['Zone ID'][i], '=', loss_percentage.round(2), '%')
    if final_info_dafn['Ore Mass Pre Blast'][i] < final_info_dafn['Ore Mass Post Blast Including Belly'][i]:
        gain_mass=final_info_dafn['Ore Mass Post Blast Including Belly'][i]-final_info_dafn['Ore Mass Pre Blast'][i]
        print('Gain in mass for the zone',final_info_dafn['Zone ID'][i], '=', gain_mass.round(3), 'kg')
        gain_percentage=((final_info_dafn['Ore Mass Post Blast Including Belly'][i]-final_info_dafn['Ore Mass Pre Blast'][i])/final_info_dafn['Ore Mass Pre Blast'][i])*100
        print('Gain in percentage for the zone',final_info_dafn['Zone ID'][i], '=', gain_percentage.round(2), '%')
```

Figura 58 - Célula para obtenção dos ganhos e perdas de minério com inclusão das barrigas

6.8.5. Cálculo dos ganhos e perdas de cada zona importada

Para complementar os cálculos dos ganhos e perdas em massa de minério, que foram apresentados nos subtópicos anteriores, a Figura 59 mostra a célula de cálculo para a obtenção dos ganhos e perdas de cada zona, mas agora em percentagem.

Calculation of the losses and gains, for each zone, in grade percentage

```
for i in range(len(final_info_dafn['Zone ID'])):
    if final_info_dafn['Grade Pre Blast'][i] > final_info_dafn['Grade Post Blast Including Belly'][i]:
        loss_grade=(final_info_dafn['Grade Pre Blast'][i]-final_info_dafn['Grade Post Blast Including Belly'][i])
        print('Loss in grade for the zone',final_info_dafn['Zone ID'][i], '=', loss_grade.round(2), '%')
    if final_info_dafn['Grade Pre Blast'][i] < final_info_dafn['Grade Post Blast Including Belly'][i]:
        gain_grade=(final_info_dafn['Grade Post Blast Including Belly'][i]-final_info_dafn['Grade Pre Blast'][i])
        print('Gain in grade for the zone',final_info_dafn['Zone ID'][i], '=', gain_grade.round(2), '%')
    if final_info_dafn['Grade Pre Blast'][i] == final_info_dafn['Grade Post Blast Including Belly'][i]:
        print('There was no change in grade for the zone',final_info_dafn['Zone ID'][i])
```

Figura 59 - Célula para obtenção dos ganhos e perdas de minério em percentagem

6.8.6. Visualização dos limites das zonas pré-desmonte e pós-desmonte

Por fim, a Figura 60 mostra a célula usada para a obtenção visual dos limites de todas as zonas, tanto para o pré-desmonte como para o pós-desmonte.

```
Plots

plt.figure()
fig,ax=plt.subplots(figsize=(10,10))
CS=ax.contour(X,Y,Z)
ax.clabel(CS,inline=1,fontsize=10)
for zone in zones_sep:
    #ax.quiver(zone['x'],zone['y'],zone['gradX'],zone['gradY'])
    plt.plot(zone['x'].values,zone['y'].values)
    plt.plot(zone['postX'].values,zone['postY'].values,':')
    plt.plot(middle_points_dafr['middle_pre_point_x'].values,middle_points_dafr['middle_pre_point_y'].values,'o')
    plt.plot(middle_points_dafr['middle_post_point_x'].values,middle_points_dafr['middle_post_point_y'].values,'o')
    plt.plot(middle_points_dafr['belly_max_x'].values,middle_points_dafr['belly_max_y'].values,'o')
for i in range(len(belly_points_final_x_arr_splited)):
    plt.plot(belly_points_final_x_arr_splited[i],belly_points_final_y_arr_splited[i],':g')
plt.show()

for zone in zones_sep:
    plt.figure()
    fig,ax=plt.subplots()
    ax.quiver(zone['x'],zone['y'],zone['gradX'],zone['gradY'])
    plt.plot(zone['x'].values,zone['y'].values)
    plt.plot(zone['postX'].values,zone['postY'].values,':')
    ax.set_xlim([minX-2.5,maxX+2.5])
    ax.set_ylim([minY-2.5,maxY+2.5])
plt.show()
```

Figura 60 - Célula para visualização em gráfico dos limites das zonas pré-desmonte e pós-desmonte

7. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo serão apresentados os resultados de todo este estudo, começando pelos resultados obtidos no modelo matemático, avançando de seguida para os resultados obtidos no modelo de previsão.

7.1. Resultados do modelo matemático

O modelo matemático, superou as expectativas na determinação do deslocamento em função dos parâmetros de desmonte importados, da mina de cobre de Las Cruces. A nossa baixa expectativa devia-se ao facto de que os modelos em machine learning normalmente necessitam de milhares de linhas de informação para darem previsões precisas. Neste caso, isso não foi possível.

A empresa O-Pitblast apesar de ter muita informação de desmontes, desmontes com informação de deslocamento são muito raros. O trabalho e a dificuldade associados com a recolha de informação referente ao deslocamento é algo que a maior parte dos clientes da O-Pitblast acaba por dispensar. Ao todo apenas 137 linhas de informação dos parâmetros foram importadas para o modelo matemático.

7.1.1. Análise estatística

Os resultados da análise estatística, da amostra de dados recolhidos na mina de cobre de Las Cruces, estão descritos na Tabela 7. Esta análise ajudou a perceber a natureza dos dados e a tentar filtrar logo à partida possíveis parâmetros de comportamento estranho.

Tabela 7 - Análise estatística dos parâmetros de desmonte importados

	Blast	Deslocamento	Powder_Factor	Powder_Factor_calculado	Explosive_Kg	Burden	Spacing	Hole_length	Stemming	Subdrill	Explosive_Energy_kJ	Row_Number	Ms_Burden	Ms_Spacing
count	137.000000	137.000000	137.000000	137.000000	137.000000	137.000000	137.000000	137.000000	137.000000	137.000000	137.000000	137.000000	137.000000	137.000000
mean	713.861314	3.255118	0.545787	0.602711	54.145985	4.138225	4.640632	4.973382	2.512838	0.503018	134282.043796	2.810219	77.378959	5.505693
std	6.615693	2.672869	0.147449	0.245954	16.890887	1.127548	0.622264	0.592588	0.511021	0.556514	41889.399564	1.949860	23.898595	0.914565
min	707.000000	0.342576	0.177778	0.155927	20.000000	1.323100	2.972000	3.100000	1.000000	-1.200000	49600.000000	1.000000	21.956628	4.329604
25%	709.000000	1.246522	0.464000	0.435019	44.000000	3.906000	4.525600	4.600000	2.434329	0.100000	109120.000000	1.000000	66.570509	5.002301
50%	712.000000	2.484263	0.545787	0.596962	55.000000	4.005400	4.610000	4.900000	2.600000	0.500000	136400.000000	2.000000	74.898887	5.422993
75%	717.000000	4.899157	0.648148	0.705499	65.000000	4.506500	4.997700	5.200000	2.800000	0.800000	161200.000000	4.000000	76.804916	5.524129
max	733.000000	14.922627	0.968789	1.809197	111.000000	13.663300	5.774200	6.900000	3.489208	2.300000	275280.000000	11.000000	226.740231	8.411844

7.1.2. Análise de correlação

Após confirmação de que os dados de todas as colunas estavam em conformidade entre si e que os intervalos de variação eram aceitáveis, foi feita uma análise de correlação, cujos resultados podem ser consultados na Figura 61.

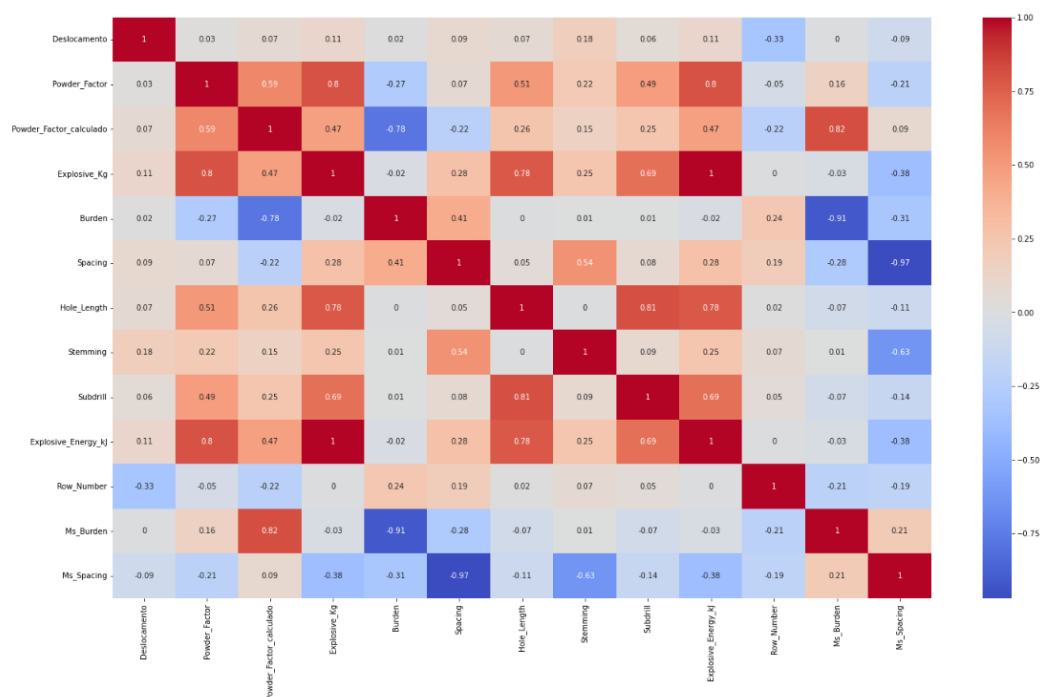


Figura 61 - Análise de correlação de todos os parâmetros com o deslocamento

Após a obtenção dos índices de correlação, estes foram listados por ordem decrescente, na Tabela 8. Aqui foi possível perceber que o parâmetro “quilogramas de explosivo” e o parâmetro “energia do explosivo” são dependentes, logo procedeu-se à filtragem, retirando o parâmetro “energia do explosivo” do estudo. Também os parâmetros relativos à temporização foram retirados, pois já eram levados em consideração no modelo de previsão para o cálculo dos gradientes. Por fim, retirou-se também a coluna referente ao “Powder Factor”, pois já estávamos a levar em consideração o “Powder Factor calculado”.

Tabela 8 - Índices de correlação de cada parâmetro por ordem decrescente

Deslocamento	
Deslocamento	1.000000
Row_Number	0.329050
Stemming	0.178033
Explosive_Kg	0.107477
Explosive_Energy_kJ	0.107477
Ms_Spacing	0.093266
Spacing	0.091826
Powder_Factor_calculado	0.070204
Hole_Length	0.067773
Subdrill	0.058559
Powder_Factor	0.028180
Burden	0.015439
Ms_Burden	0.004283

7.1.3. Resultado do modelo matemático

Após este tratamento de dados, o modelo matemático foi executado. Com a informação disponível, a previsão feita pelo modelo matemático está representada na Figura 62.

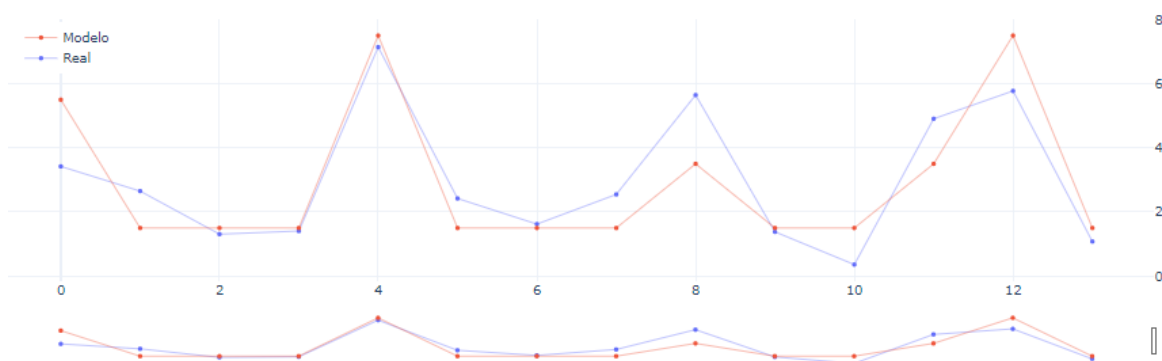


Figura 62 - Gráfico dos valores reais (azul) e dos valores previstos pelo modelo matemático (vermelho)

Com os resultados foi então calculada a raiz quadrada do erro médio e a acuracidade dos resultados, obtendo os valores da Tabela 9.

Tabela 9 - Resultado do cálculo da raiz quadrado do erro médio e o nível de acuracidade da previsão

Rmse	Accuracy
1.159799	0.357143

Para a baixa quantidade de informação disponível para este estudo em machine learning, o modelo matemático conseguiu, acertar corretamente em quase 36% dos valores. Para os outros 64%, o modelo conseguiu dar previsões bastante próximas dos valores reais.

Com este resultado, o modelo foi então exportado e integrado no modelo de previsão, que estava a ser produzido em Python.

7.2. Resultados do modelo de previsão

Antes de mais é de frisa que apesar dos testes do modelo terem sido feitos para os 4 casos de desmonte apresentados em 6.3.1., por motivos de facilidade de demonstração os resultados apresentados serão referentes ao caso 3, que foi o desmonte mais complexo dos 4 utilizados, sendo visto como o melhor para demonstrar diferentes propriedades e comportamentos do modelo. Como por exemplo a ocorrência daquele problema durante a triangulação, que causou um erro no cálculo dos gradientes, que está descrito em mais detalhe no ponto 6.7.2..

7.2.1. Cálculo das áreas pré-desmonte

Os resultados obtidos para este cálculo da área pré-desmonte foram confirmados como estando corretos pelo software O-PitSurface.

```

Zone Area 1 Pre-Blast = 189.10000000000002
Zone Area 2 Pre-Blast = 176.90000000000001
Zone Area 3 Pre-Blast = 124.0
Zone Area 4 Pre-Blast = 116.0

```

Figura 63 - Resultados do cálculo das áreas das zonas pré-desmonte

7.2.2. Cálculo dos vetores de movimento

Na Figura 64, estão listados os resultados para o cálculo dos vetores de movimento, através do modelo matemático, de todos os pontos das zonas importadas, em função dos parâmetros de desmonte.

final zone vector x	final zone vector y
0.515077	-0.124882
1.562076	-1.247072
0.217200	-0.050490
2.933023	-0.660488
0.515077	-0.124882
1.562076	-1.247072
-0.243779	-0.702835
-0.611485	-2.611454
0.217200	-0.050490
1.562076	-1.247072
2.933023	-0.660488
0.561123	-0.149652
2.732122	-0.817865
0.217200	-0.050490
2.933023	-0.660488
-0.611485	-2.611454
-0.798523	-2.759043
2.732122	-0.817865
0.217200	-0.050490
-0.611485	-2.611454

Figura 64 - Vetores de movimento calculados para todos os pontos das zonas

7.2.3. Cálculo das áreas pós-desmonte

A confirmação destes resultados não pode ser feita no O-PitSurface, como a confirmação anterior, mas a partir do Excel foi possível fazer essa validação.

```

Zone Area 1 Post-Blast = 173.3994232905086
Zone Area 2 Post-Blast = 165.52976593974063
Zone Area 3 Post-Blast = 123.70034836376175
Zone Area 4 Post-Blast = 102.74283657590979

```

Figura 65 - Resultados do cálculo das áreas das zonas pós-desmonte

7.2.4. Cálculo das áreas das barrigas

Para a confirmação destes resultados, da mesma forma que no cálculo anterior, foi necessário recorrer-se ao Excel, onde pelo cálculo das áreas pelo método dos trapézios, foi possível obter os valores da Figura 66.

```

Belly Area for the contact between the zones 1 and 2 = 14.197530554639826
Belly Area for the contact between the zones 1 and 3 = 2.123597091140845
Belly Area for the contact between the zones 2 and 4 = 17.93448546377022
Belly Area for the contact between the zones 3 and 4 = 9.611173585560044

```

Figura 66 - Resultados do cálculo das áreas das barrigas

7.2.5. Cálculo da massa de material de cada zona

Tanto neste subtópico como nos 2 subtópicos a seguir, a informação foi estruturada de maneira a mostrar 3 colunas (pré-desmonte, pós-desmonte sem barriga, pós-desmonte com barriga) de informação. A Figura 67 é referente aos cálculos de massa total de material contido dentro de cada zona.

	Zone ID	Mass Pre Blast	Mass Post Blast Excluding Belly	Mass Post Blast Including Belly
0	1	5673.0	5201.983	4712.349
1	2	7076.0	6621.191	6329.737
2	3	3968.0	3958.411	3714.562
3	4	4060.0	3595.999	4620.936

Figura 67 - Resultados do cálculo da massa total de cada zona

7.2.6. Cálculo da massa de minério de cada zona

Os resultados da Figura 68, são validados com os valores dos cálculos da Figura 69 e da Figura 70. Fazendo a diferença entre os valores das colunas “Ore Mass Post Blast Excluding Belly” e “Ore Mass Pre Blast” da Figura 68, obtém-se os valores da Figura 69. Fazendo a diferença entre os valores das colunas “Ore Mass Post Blast Including Belly” e “Ore Mass Pre Blast” da Figura 68, obtém-se os valores da Figura 70.

	Zone ID	Ore Mass Pre Blast	Ore Mass Post Blast Excluding Belly	Ore Mass Post Blast Including Belly
0	1	453.84	416.159	376.988
1	2	212.28	198.636	211.188
2	3	198.40	197.921	187.639
3	4	162.40	143.840	180.739

Figura 68 - Resultados do cálculo da massa de minério de cada zona

```

Loss in mass for the zone 1 = 37.681 kg
Loss in percentage for the zone 1 = 8.3 %
Loss in mass for the zone 2 = 13.644 kg
Loss in percentage for the zone 2 = 6.43 %
Loss in mass for the zone 3 = 0.479 kg
Loss in percentage for the zone 3 = 0.24 %
Loss in mass for the zone 4 = 18.56 kg
Loss in percentage for the zone 4 = 11.43 %

```

Figura 69 - Resultados do cálculo dos ganhos e perdas de minério em kg e %, sem barrigas

```

Loss in mass for the zone 1 = 76.852 kg
Loss in percentage for the zone 1 = 16.93 %
Loss in mass for the zone 2 = 1.092 kg
Loss in percentage for the zone 2 = 0.51 %
Loss in mass for the zone 3 = 10.761 kg
Loss in percentage for the zone 3 = 5.42 %
Gain in mass for the zone 4 = 18.339 kg
Gain in percentage for the zone 4 = 11.29 %

```

Figura 70 - Resultados do cálculo dos ganhos e perdas de minério em kg e %, com barrigas

7.2.7. Cálculo do teor de cada zona

Olhando para a Figura 71, vê-se que os teores associados com o pós-desmonte, quando não se consideram as barrigas, são iguais aos teores associados com o pré-desmonte, o que faz sentido porque nas barrigas é que acontece a mistura de material levando à diluição mineral. No entanto quando consideramos a inclusão das barrigas, os valores de teor das zonas para o pós-desmonte, já são diferentes dos teores das zonas para o pré-desmonte. Fazendo a diferença entre os valores das colunas “Grade Post Blast Including Belly” e “Grade Pre Blast” da Figura 71, obtém-se os valores da Figura 72.

Da mesma maneira que no subtópico anterior,

	Zone ID	Grade Pre Blast	Grade Post Blast Excluding Belly	Grade Post Blast Including Belly
0	1	8	8.0	8.00
1	2	3	3.0	3.34
2	3	5	5.0	5.05
3	4	4	4.0	3.91

Figura 71 - Resultados do cálculo do teor de cada zona

```

There was no change in grade for the zone 1
Gain in grade for the zone 2 = 0.34 %
Gain in grade for the zone 3 = 0.05 %
Loss in grade for the zone 4 = 0.09 %

```

Figura 72 - Resultados do cálculo dos ganhos e perdas de cada zona em termos de teor

7.2.8. Visualização final dos limites das zonas pré-desmonte e pós-desmonte

Na Figura 73 temos a representação dos gradientes e das isolinhas, onde se consegue ver nitidamente a perpendicularidade entre estes 2 elementos.

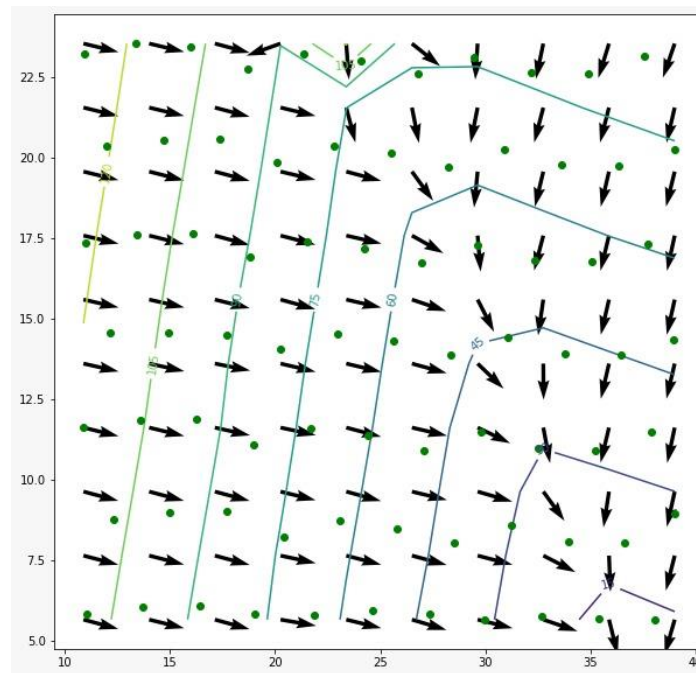


Figura 73 - Representação da grelha de gradientes, das isolinhas de temporização e dos furos da malha

Por fim, foi obtida a representação final das zonas do desmorte, Figura 74, onde se tem delimitada com linha contínua os limites das zonas pré-desmorte e com linha pontilhada os limites das zonas pós-desmorte. À primeira vista, o modelo prevê que o movimento das zonas ocorra em direção a Sudeste, que era o que já se esperava se olha também para as isolinhas de temporização. Também as barrigas parecem estar de acordo com a direção de movimento.

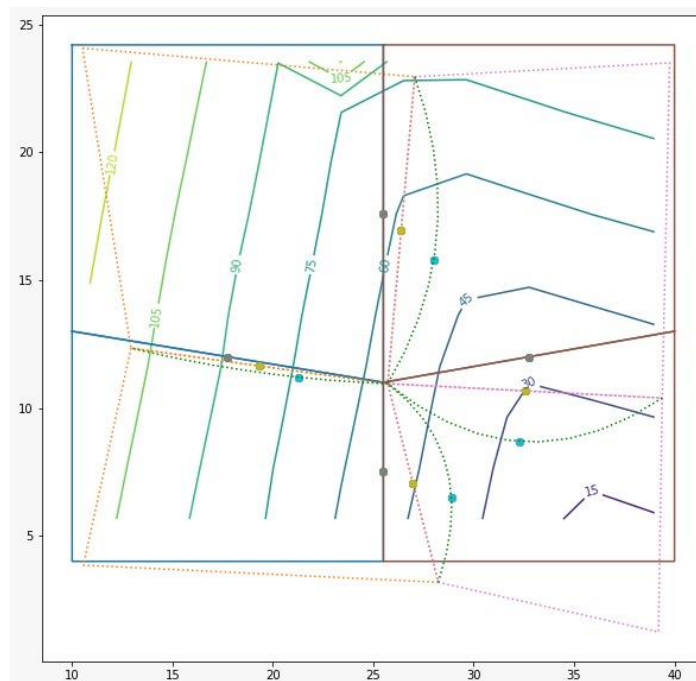


Figura 74 - Limites das zonas pré-desmorte (linha sólida) e do previsto para os limites das zonas pós-desmorte (linha pontilhada)

Quanto aos valores obtidos ao longo desta discussão, em termos matemáticos eles estão corretos, pois foram validados noutras fontes como o O-PitSurface e o Excel. No entanto, seria necessário testar o modelo em ambiente real, para não só comprovar e validar o funcionamento do modelo, mas também para testar a capacidade e a acuracidade de previsão do mesmo.

8. CONCLUSÃO E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Para a realização deste trabalho foi necessário que o autor fizesse uma formação de programação em Python de 3 semanas, seguidos de quase 4 meses de programação. O modelo de previsão conta atualmente com cerca de 3200 linhas de código.

8.1. *Conclusões*

Para além, do que já foi concluído ao longo do trabalho, enuncio aqui as conclusões finais.

Este trabalho foi desenvolvido, durante a minha estadia na empresa O-Pitblast por isso o grande objetivo deste trabalho era desenvolver um modelo que fizesse a previsão do deslocamento associado com o desmonte e o cálculo da diluição, para que fosse possível o controlo deste efeito através de alterações ao diagrama de fogo, levando em consideração os parâmetros que o O-PitSurface tem disponíveis.

Quanto à parte de previsão penso que fui na sua maioria bem-sucedido, o modelo funciona e demonstra resultados favoráveis à confirmação do seu funcionamento, no entanto este ainda necessita de ser testado em campo para que o seu funcionamento possa ser validado, sem especulações.

Quanto à parte do controlo da diluição, penso que os resultados obtidos no modelo permitem o utilizador fazer o ajuste manual dos parâmetros do desmonte e ter controlo sobre esse efeito, no entanto não acho que isso seja o suficiente. Para que eu possa dizer que fui bem-sucedido neste ponto, seria necessário que o utilizador ajustasse os parâmetros no próprio modelo e conseguisse comparar os resultados obtidos, para ter uma ideia geral de como é que o efeito da diluição vai variar no seu desmonte para cada alteração que ele faça no diagrama de fogo.

Um dos problemas que mais me afetou neste trabalho de Dissertação foi a falta de informação. A época de desenvolvimento deste estudo coincidiu com a época de férias da maioria das minas contatadas.

Em todas as operações de desmonte à superfície, existe uma necessidade de escolher um método de mineração específico preferencial aquela exploração, devido ao elevado número de fatores que influenciam essa decisão. Após pesagem de todos os fatores, pode ser tomada uma escolha, que por si acarreta diversos parâmetros que têm de ser ajustados para que se atinga o desejado.

O deslocamento do material desmontado após detonação é um problema se não for controlado. Dependendo do objetivo da mina, pode ser preferencial o choked blast, para negar o movimento, minimizando as misturas de material de diferentes teores, ou se o objetivo for separar o material em pilhas de minério e de estéril, então uma temporização mais complexa, com detonadores eletrónicos, será a solução mais indicada.

O controlo da diluição interna começa na correta e exaustiva classificação do material, enquanto que o controlo da diluição externa é feito durante o planeamento do desmonte, com a minimização da mistura de material diferente nos contactos entre zonas.

À partida existe um interesse elevado por parte das empresas mineiras em encontrarem soluções para o efeito da diluição, para a obtenção de resultados mais favoráveis em termos de sustentabilidade. Apesar do mercado estar a dar boa resposta a este problema com diversos produtos, não se pode negar que existe uma boa janela de oportunidade para novas empresas gerarem novas soluções de interesse.

Dos parâmetros do desmonte levados em consideração para o estudo e criação do modelo matemático, os que mais influenciavam o deslocamento de um furo da malha foram a proximidade desse furo à frente livre, o atacamento do furo e a quantidade de explosivo utilizada.

Até ao momento em que recebi a proposta deste tema, nunca tinha ouvido falar, mas confesso que o tema despertou logo interesse. Percebo agora a importância que o controlo da diluição tem para viabilidade económica de uma mina. Até ao momento não sabia que o tão importante processo de blending sequer existia.

8.2. *Desenvolvimentos/trabalhos futuros*

Em perspetiva de trabalhos futuros, seriam considerados os seguintes pontos:

- Obtenção de mais informação de desmontes sobre o deslocamento, para inserir no modelo matemático e perceber se o aumento de informação leva a uma previsão com menos erro;
- Corrigir os problemas de triangulação que foram mencionados neste documento, onde furos que formavam um triângulo com ângulos muito pequenos, causavam erros no cálculo dos gradientes;
- Agora que tenho mais experiência em programação, penso que refaria o código do início aplicando técnicas mais eficazes, durante os testes, o modelo foi cronometrado e para o desmonte com mais parâmetros, este demorou cerca de 43s a fazer a previsão. Isto pode parecer pouco tempo, mas considerando que esse desmonte tinha cerca de 77 furos com 4 zonas e que na O-Pitblast já trabalhei com clientes que tinham desmontes com mais de 1200 furos, isto poderá ser uma preocupação futura;
- Avançar para a próxima fase de previsão, ou seja, passar da previsão do deslocamento em 2D para a previsão do deslocamento em 3D. Pelo estudo de competitividade foi possível perceber que a maior parte da concorrência já trabalha com modelos de blocos para previsão 3D. Claro que ainda não tenho recursos nem experiência para começar agora, mas é essa a meta;

-
- Evoluir o modelo para considerar mais características do desmonte, como a fraturas, presença de água, furos inclinados, entre outros;
 - Inserir opções de controlo dos parâmetros diretamente no modelo para possibilitar a otimização do diagrama de fogo em função dos objetivos do utilizador;
 - Transformar o modelo num produto, para que este possa ser integrado no O-PitSurface, em menos de 1 ano.

Página em branco

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bernardo, P. (2014). Detonadores electrónicos. Análise comparativa de sistemas de iniciação. *TECNOLOGIAS INOVADORAS DE DESMONTE E ESCAVAÇÃO DE ROCHA* (p. 30). Orica Mining Services.
- Bhandari, S. (1997). *Engineering Rock Blasting Operations*. Jodhpur, India: Department of Mining Engineering, J.N.V. University.
- Caterpillar. (2006). *A Reference Guide to Mining Machine Applications*. Peoria, IL: Caterpillar.
- Daniel, F. (1999). *Manual de utilização de Explosivos em Explorações a Céu Aberto*. Divisão de Minas e Pedreiras do IGM.
- Darling, P. (Ed.). (2011). *SME MINING ENGINEERING HANDBOOK* (3^o ed.). Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc.
- Deloitte. (2022). *Tracking the trends 2022*.
- Domingo, J., Leite, F., Miranda, V., & Carrasco, I. (24-26 de 8 de 2015). Dilution, Ore Grade and Blast Movement Calculation Model. (A. Spathis, D. Gribble, A. Torrance, & T. Little, Edits.) *11th International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting*.
- Ebrahimi, A. (4 de 2013). The Importance Of Dilution Factor For Open Pit Mining Projects. *World Mining Congress*.
- ENAEX. (s.d.). *About Us*. Obtido de Enaex: <https://www.enaex.com/era/en>
- ENAEX. (s.d.). *Detonation Booster for Explosives*. Obtido de Mining Technology: <https://www.mining-technology.com/downloads/whitepapers/drilling/detonation-booster/>
- Gomes, J. P. (2016). *METODOLOGIA PARA ANÁLISE DE VIBRAÇÕES PROVOCADAS POR DESMONTES COM RECURSO A EXPLOSIVOS*. Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Gouvêa. (2011). O que é Desmonte de Rocha em suma definição?
- Gouveia, V., Leite, F., Brito, P., & Sobral, R. (2020). Novas Tecnologias para o Controlo e Otimização de Desmonte de Rochas. 6.
- Group, D. B. (s.d.). *I-Blast Ultimate*. Obtido de DNA Blast: <http://dnablast.com/i-blast-ultimate/?lang=en>
- Hartman, H. L. (1987). Introductory Mining Engineering. Em H. L. Hartman, *Introductory Mining Engineering* (p. 634). Richard Dennis Publications.
- Jimeno, C., Jimeno, E., & Bermúdez, P. (2003). *Manual De Perforación Y Voladura De Rocas*. Madrid: Carlos López Jimeno.
- Jimeno, C., Jimeno, E., & Carcedo, F.-a. (1995). *Drilling and Blasting of Rocks*. Rotterdam, Netherlands.
- JKTech. (s.d.). *JKTech Global Knowledge, Local Solutions*. Obtido de Mining Technology: <https://www.mining-technology.com/contractors/analysis/jktech/>
- Leite, F. (2018). Sistemas de iniciação. Porto, Portugal: O-Pitblast.

-
- Leite, F. (2021). *Controlo de diluição*. Porto, Portugal: O-Pitblast.
- Llera, J., Jimeno, C., Jimeno, E., & Urbina, F. ((s.d.)). *MANUAL DE PERFORACION Y VOLADURA DE ROCAS*. Madrid: Instituto Geologico y Minero de España.
- Mineiro, I. G. (1999). Obtido de INETI: http://eGeo.ineti.pt/geociencias/edicoes_online/diversos/boa_pratica/indice.htm
- Mineração. (2022). Obtido de Wikipédia: <https://pt.wikipedia.org/wiki/Minera%C3%A7%C3%A3o>
- Miranda, V., Leite, F., & Frank, G. (2018). Blast Pattern Expansion - A numerical approach. 8.
- Mustafeez, A. Z. (s.d.). *What is Visual Studio Code?* Obtido de educative: <https://www.educative.io/answers/what-is-visual-studio-code>
- Orica. (s.d.). *OrePro3D*. Obtido de Orica: <https://www.orica.com/Products-Services/Digital/orepro-3d#.YyUu9XbMKUk>
- Pratt, M. K. (s.d.). *Proof of concept (POC)*. Obtido de TechTarget: <https://www.techtarget.com/searchcio/definition/proof-of-concept-POC>
- Preece, D., & Silling, S. (2016). Ore Loss and Dilution Studies of Surface Mineral Blasting with 3D Distinct Element Heave Models. *42nd Annual Conference on Explosive and Blasting Technique, International Society of Explosives Engineers (ISEE)*.
- Shoelace formula. (2022). Obtido de Wikipedia: https://en.wikipedia.org/wiki/Shoelace_formula
- Siteware. (25 de 3 de 2019). *Entenda o que é modelo VRIO e como usá-lo para identificar vantagens competitivas na empresa*. Obtido de siteware: <https://www.siteware.com.br/gestao-estrategica/o-que-e-modelo-vrio/>
- Technologies, A. (s.d.). *Ore Movement Policy AI Driven 3D Blast Movement Software*. Obtido de Augment Technologies: <https://augmenttechnologies.ai/products/ore-movement-policy/>
- Technologies, B. M. (s.d.). *Blast movement monitoring*. Obtido de Blast Movement Technologies: <https://blastmovement.com/>
- tutorialspoint. (2014). *Python 3 Tutorial*. Obtido de tutorialspoint: <https://www.tutorialspoint.com/python3/index.htm>

ANEXOS

Anexo A - Formulário enviado para os possíveis clientes para a prova de conceito do novo produto de previsão e controle da diluição. Também disponível através do link https://docs.google.com/forms/d/e/1FAIpQLScORCMtwo_e9Q4SK_m5_puLV1fze0mhR8MushblQbMiUjzOfg/viewform

O-PitDilution - An O-Pitblast Module

Hi, we are O-Pitblast and we are always searching for improvements in delivering the best experience to our customers.

This time, we would like to know a bit more about your experience with blast movement and ore dilution control projects, can you help us with that?

We appreciate your time and patience while taking this survey - it will take about 3 minutes. The results are anonymous.

 **franciscomonteiro94@gmail.com** (não compartilhado) 
[Mudar de conta](#)

***Obrigatório**

Job Title *

A sua resposta

Your Age *

☐ 20 - 30

☐ 30 - 40

☐ 40 - 50

☐ 50 - 60

☐ + 60

Your Country *

Selecionar ▼

Do you work or have worked in activities related with blast movement and ore dilution control operations? *

☐ Yes

☐ No

If yes, did you ever use any software to detect the blast movement or to control the ore dilution?

☐ Yes

☐ No

If yes, what were your biggest challenges with the software?

☐ Complex and not user-friendly software

☐ Lack of essential functionalities

☐ Poor technical assistance

☐ Poor training assistance

☐ Slow and unresponsive

☐ Absence of your language

☐ Absence of an analytics module

☐ Absence of a field app to collect real data

☐ Inability to work offline

☐ Inability to obtain detailed reports

☐ Outra: _____

If you feel comfortable, can you share the software name with us?

A sua resposta _____

If you're using (or have used) a software to detect the blast movement or to control the ore dilution, how do you rate it in terms of fulfilling your needs?

1 2 3 4 5
Extremely Unsatisfied ○ ○ ○ ○ ○ Extremely Satisfied

In terms of technical support and customer assistance, how do you feel about the software you use to detect the blast movement or to control the ore dilution?

1 2 3 4 5
Extremely Unsatisfied ○ ○ ○ ○ ○ Extremely Satisfied

Which tools do you consider essential to have in a blast movement and ore dilution control software? *

- ☐ 2D Blast movement simulation
- ☐ 3D Blast movement simulation
- ☐ Dilution analysis (Gain/Loss graphs and reports)
- ☐ Generate and edit mining polygons
- ☐ Digging strategies based on value grade
- ☐ Best drill pattern to maximize orebody value
- ☐ Financial analysis
- ☐ Dispatch tool/integration
- ☐ Outra: _____

What do you value the most in a software that can detect and predict blast movement and control ore dilution? *

- ☐ Price
- ☐ User-friendliness
- ☐ Wide range of functionalities
- ☐ Fast and efficient technical support
- ☐ Multiple languages
- ☐ Possibility to work online and offline
- ☐ Cloud storage system
- ☐ Ability to share projects between co-workers
- ☐ Fast time simulation
- ☐ Tailored solutions
- ☐ Outra: _____

If you feel comfortable, can you tell us, approximately, how much you are paying annually, in \$USD for your software, to be able to control ore dilution and predict blast movement?

- ☐ < 7500
- ☐ 7500 - 15000
- ☐ 15000 - 30000
- ☐ 30000 - 45000
- ☐ 45000 - 60000
- ☐ > 60000
- ☐ I don't know the price
- ☐ Outra: _____

How much would you be willing to pay annually, in \$USD for a software, that would predict blast movement and help control ore dilution, considering that all your need would be fulfilled? *

☐ < 7500

☐ 7500 - 15000

☐ 15000 - 30000

☐ 30000 - 45000

☐ 45000 - 60000

☐ > 60000

☐ Outra: _____

Do you have any other feedback that you would like to share with us?

A sua resposta _____

Would you like to share with us your name and e-mail for further updates and communication?

A sua resposta _____

O-Pitblast

Thank you for your time! Stay tuned on our social networks for future announcements from O-Pitblast! www.o-pitblast.com

Enviar

Limpar formulário