

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto



**Análise e controlo de interações entre operações
unitárias mineiras**

Diogo Filipe Pereira Queiroz

VERSÃO FINAL

Dissertação realizada no âmbito do
Mestrado em Engenharia de Minas e Geo-Ambiente

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Júlio Machado Leite

Co-orientador: Eng. Vinicius Gouveia de Miranda

11/08/2019

MESTRADO EM ENGENHARIA DE MINAS E GEO-AMBIENTE 2018/2019

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS

Tel. +351-22-508 1986

+351-22-508 1960

Fax +351-22-508 1448

✉ minas@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ feup@fe.up.pt

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado em Engenharia de Minas e Geo-Ambiente - 2018/2019 - Departamento de Engenharia de Minas, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2019.*

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.

© Queiroz 2019

Resumo

É conhecida a importância do controlo das interações entre atividades unitárias em operações da indústria extrativa. Em desmontes de maciços rochosos a céu aberto, recorrendo ao uso de explosivos, o controlo da composição granulométrica do material desmontado, através da construção e análise de curvas suas granulométricas, poderá ter relevantes implicações na eficiência das operações que antecedem a detonação e nas subseqüentes de carga e transporte desse material até unidades posteriores de transformação, apresentando-se esse controlo como um parâmetro fulcral em processos de otimização.

Nesta Dissertação, os principais objetivos gerais serão os de identificar eventuais correlações de granulometrias de material produzido com a detonação de pegas de fogo, comparando curvas granulométricas previstas e as realmente produzidas, quando se operam alterações em diversos parâmetros dessas mesmas pegas de fogo. Ao mesmo tempo, procura-se encontrar correlações entre o tempo de carga de pilhas do material desmontado com algumas características da composição granulométrica desse material.

Assim, procura-se neste trabalho compreender a influência dos parâmetros do desmonte, afastamento, espaçamento, tamponamento, quilogramas de explosivos, consumo específico, etc. com a respetiva fragmentação produzida no maciço, e por sua vez como esta está interligada com o tempo de ciclo de um equipamento de carga.

Para procurar atingir os objetivos propostos, e como meio metodológico prático, foram recolhidos dados no ambiente de uma pedreira concreta, próxima a Vila Pouca de Aguiar, no distrito de Vila Real, explorada pela *DST - Domingos da Silva Teixeira*, e em todo este processo podemos contar com o apoio da empresa O-PitBlast, Lda, na qual esta Dissertação de Mestrado se realiza ao abrigo de um Contrato para a realização de Dissertação de Mestrado em Ambiente Empresarial.

Com base nos dados recolhidos foram elaborados modelos representativos dos fenómenos presentes, procurando-se com eles, obter indicações úteis para a otimização global das operações unitárias estudadas.

Página em branco

Abstract

The importance of controlling the interactions between unitary activities in extractive industry operations is known. In the break and fragment rocks in the open pit, using explosives, the control of the particle size composition of the disassembled material, through the construction and analysis of the theoretical curves of the granulometric, may have relevant implications in efficiency of the operations that precede the detonation and subsequent loading and transport of this material to later units of transformation, presenting this control as a key parameter in optimization processes.

In this dissertation, the main general objectives will be to identify possible correlations of material granulometry produced with the detonation of blast, comparing predicted granulometric curves and those produced, when operating changes in various parameters of these same blast. At the same time, it seeks to find correlations between the load time of the material in disassembled pile, to the characteristics of the granulometric composition of this material.

Thus, it is sought in this work to understand the influence of the parameters of blast, burden, spacing, stemming, kilograms of explosives, powder factor, etc. with the respective fragmentation produced, and in turn as this is interconnected with the cycle time of a loading equipment.

To seek to achieve the proposed objectives, and as a practical methodological means, data will be collected in a quarry environment, namely in the quarry in Vila Pouca de Aguiar, on district the Vila Real, exploited by DST-Domingos da Silva Teixeira, and we shall count on the support of the company O-PitBlast, Lda, in which this master's dissertation is carried out under a contract for the achievement of a master's thesis in business environment.

Based on the collected data will be elaborated model's representative of phenomena present and will seek to obtain useful indications for the overall optimization of the unit operations studied.

Página em branco

Agradecimentos

Os meus primeiros agradecimentos vão para os meus pais, que ao longo de todos estes anos de percurso académico foram os que mais me motivaram e me encorajaram a levar esta aventura até ao seu final. E claro não me poderia esquecer da minha irmã, ela que me chateou durante todos estes anos, mas que, ao mesmo tempo tanto me apoio-o.

Não poderia deixar de agradecer ao meu orientador, o Professor Alexandre Leite, que ao longo desta jornada de elaboração Dissertação-muito me ajudou na sua e também pela insistência saudável em me apressar na escrita e para sua apresentação em tempo útil.

O meu grande obrigado ao Eng. Vinivius Miranda, meu coorientador, pela enorme ajuda, vontade e sempre disponibilidade no auxílio de tarefas realizadas. Também na recolha de dados, foi um dos grandes impulsionadores desta aventura. Não podia deixar de agradecer ao restante pessoal que compõe a O-Pitblast, Lda, que em muito me ajudaram na tarefa de recolha de dados, mas também, sempre disponíveis para me receberem nas suas instalações.

Este trabalho não seria possível sem a recolha dos dados em ambiente de pedreira, e por isso este obrigado vai para eles, em especial para o Diogo Fonseca que me acolheu e me proporcionou todas as condições necessárias para essa mesma tarefa. Ao Engº. Nuno Faria, Engº. Paulo Cabral, ao Manuel Gonçalves, ao S. Armando e restantes, a todos devo o meu agradecimento.

Por fim, mas não menos importante, os agradecimentos vão para os meus amigos e colegas de curso, os Discentes, que me acompanharam nesta jornada de 5 anos. E os tantos cafés tomamos em Hidráulica enquanto se discutiam assuntos, por vezes sem qualquer interesse, e outros considerados os pilares de muitas coisas. Ao pessoal de Baião, onde os cafés eram saboreados no Tasco, o meu obrigado.

Página em branco

Índice

Índice.....	xi
1. Introdução	21
1.1. Tema da Dissertação.....	21
1.2. Importância do tema	21
1.3. Objetivo geral e objetivos específicos	22
1.4. Motivação	22
1.5. Metodologia a seguir	23
2. Atividades e operações mineiras unitárias	25
2.1. Cadeia produtiva	25
2.2. Importância da definição e controlo das interações numa perspetiva Mine to Mill (M2M)	27
3. Ciclo produtivo de Desmonte de rocha	31
3.1. Maciços Rochosos.....	31
3.2. Decomposição das atividades do desmonte	33
3.2.1. Aquisição de dados	33
3.2.2. Variáveis de uma pega de fogo	34
3.2.3. Planeamento do diagrama de Fogo.....	36
3.2.4. Afastamentos críticos	39
3.2.5. Escolha dos Explosivos	41
3.2.6. Forma e posição da pilha	42
3.2.7. Previsão da distribuição de calibres.....	44
4. Ciclo das operações de Carga e Transporte	47
4.1. Decomposição das atividades em operações elementares	47
4.2. Importância do controlo da variabilidade dos tempos de atividade	51

4.3.	Interligação entre o desmonte e a granulometria	52
4.4.	Efeito da fragmentação na produtividade de um equipamento de carga	53
4.5.	A operação de carga	54
4.5.1.	Fator de enchimento e tempo de escavação	57
4.6.	Disciplinas de posicionamento e de operação	58
5.	Recolha e Análise dos dados	63
5.1.	Recolha de informação	63
5.2.	Análise dos dados recolhidos.....	69
5.2.1.	Dados totais e por equipamento	69
5.2.2.	Dados por desmonte	76
5.2.3.	Calibre médio versus Tempo de carga	79
6.	Modelação e simulação	85
7.	Análise de resultados	89
8.	Conclusões	97
8.1.	Trabalhos para futuro.....	98
	Referências	ci
	Anexos.....	ciii
	Anexo 1 - Atividades realizadas em cada desmonte	cv
	Anexo 2 - Dados Gerais - Equipamentos nº 55 e 70	cvii
	Anexo 3 - Dados e análises por desmonte	cxiii
	Anexo 4 - Gráficos de dispersão referentes à simulação	cxxvii
	Anexo 5 - Código elaborado para a simulação	cxxix

Lista de figuras

Figura 1 - Sequência de acontecimentos do processo produtivo no desmonte de rochas	26
Figura 2 - Diagrama exemplificativo de uma cadeia produtiva segundo o conceito de Mine to Mill, englobando peças de software de identificação de interações, controlo e busca global de otimização. (Cameron, 2017).....	28
Figura 3 - Classificação da escavabilidade de maciços rochosos tendo por base o espaçamento entre descontinuidades (m) e a resistência à compressão uniaxial (MPa) (adaptado de Franklin et al, 1971, in López Jimeno e Díaz Méndez, 1997)	32
Figura 4 - Representação das variáveis de uma pega de fogo em bancada (Dyno Nobel Asia-Pacific Pty Limited, 2017)	37
Figura 5 - Medição dos afastamentos críticos com o auxílio da Plataforma O-Pitblast.....	40
Figura 6 - Exemplos de formas e dispersão da pilha de material resultante do desmonte (Choudhary B. S., 2013)	43
Figura 7 - Atividades elementares de uma Pá-Carregadora frontal (Miranda H. S., 1986)	48
Figura 8 - Decomposição do transporte em atividades elementares (Miranda H. S., 1986)....	50
Figura 9 - Equipamento de carga na rotação para a descarga final	56
Figura 10 - Representação de uma atividade de carga otimizada com recurso a uma carregadora frontal (Society for Mining, Metallurgy, and Exploration (SME), 2011).....	60
Figura 11 - Posicionamento do dumper em apenas um lado do equipamento de carga (Society for Mining, Metallurgy, and Exploration (SME), 2011)	61
Figura 12- Posicionamento do <i>dumper</i> em dois locais à volta do equipamento de carga (Society for Mining, Metallurgy, and Exploration (SME), 2011)	62
Figura 13 - Recolha dos dados referentes à carga e tamponamento real do desmonte	65
Figura 14 - Exemplo de colocação de barras sinalizadoras na pilha para recolha da informação para fragmentação	66
Figura 15 - Análise, por cor, do tamanho dos fragmentos encontrados na pilha	67

Figura 16 - Exemplo dos resultados obtidos através do WipFrag para a fragmentação	67
Figura 17 - Histograma dos ciclos de carga recolhidos	70
Figura 18 - Gráfico de dispersão com a frequência relativa dos dados totais referentes aos ciclos de carga	72
Figura 19 - Frequências relativas e modelo com base numa distribuição de Poisson de média 16,5 segundos	73
Figura 20 - Frequências relativas e modelo com base numa distribuição de Poisson de média 18 segundos que descreve o comportamento do equipamento nº 55	75
Figura 21 - Frequências relativas e Distribuição de Poisson de média 16,5 segundos que caracteriza o equipamento nº 70	76
Figura 22 - Histograma dos ciclos de carga para o equipamento nº 55 da pilha formada pelo desmonte DST - 043	78
Figura 23 - Gráfico de dispersão da frequência relativa dos dados de carga do desmonte DST - 043 com o equipamento nº 55	78
Figura 24 - Gráfico de correlação entre o calibre médio e o tempo médio de carga por ciclo	80
Figura 25 - Tempo médio de ciclo de carga em relação ao calibre médio, por equipamento	81
Figura 26 - Gráfico de dispersão por clusters, e as respetivas equações que descrevem a relação entre D50 e tempo médio de ciclo	83
Figura 27 - Gráfico com a relação entre Coeficiente de Uniformidade e tempo médio de ciclo de carga por desmonte acompanhado	84
Figura 28 - Esquema representativo da aproximação de uma reta com limitações superior e inferior conferidas por um intervalo de confiança para uma distribuição normal (Fiúza, 2003)	86
Figura 29 - Fluxograma do processo de simulação	88
Figura 30 - Influência do afastamento nos custos de carregamento, custos de desmonte e os custos totais de ambas as operações	91
Figura 31 - Simulação dos custos de desmonte, de carregamento e totais da variação do diâmetro de perfuração	92
Figura 32 - Resultados da variação do tamponamento nos custos de carregamento, desmonte e totais	93

Figura 33 - Gráficos de dispersão com a variação de alguns dos parametros do demsonte e o seu efeito nos custos do desmonte, custo da carga e nos custos totais	96
Figura 34 - Histograma dos dados recolhidos e validados referentes ao equipamento nº 55	cviii
Figura 35 - Gráfico de dispersão com a frequência relativa dos ciclos registados da giratória nº 55	cviii
Figura 36 - Histograma dos dados recolhidos do equipamento nº 70 e validados	cx
Figura 37 - Gráfico de dispersão dos dados recolhidos da operação de carga do equipamento nº 70	cx
Figura 38 - Histograma dos dados recolhidos referentes à pilha de material do desmonte DST - 038 e carregada com recurso ao equipamento nº 70	cxiii
Figura 39 - Gráfico de dispersão da frequência relativa dos dados do desmonte DST - 038, com a retroescavadora nº70	cxiii
Figura 40 - Histograma dos ciclos de carga efetuados pelo equipamento nº 70 para carregar a pilha do desmonte DST- 039.....	cxiv
Figura 41 - Frequências relativas dos ciclos de carga resultantes da pega DST - 039 com o equip. nº 70	cxiv
Figura 42 - Histograma dos dados da carga realizada pela giratória nº 55 da pilha do desmonte DST - 040.....	cxv
Figura 43 - Frequências relativas da carga da pilha do desmonte DST - 040 com recurso ao equipamento nº 55.....	cxv
Figura 44 - Histograma dos dados / Desmonte DST - 041 / equipamento nº 70	cxvi
Figura 45 - Gráfico de dispersão dos ciclos de carga / DST - 041 / equipamento nº70.....	cxvi
Figura 46 - Histograma dos dados da pilha do desmonte DST - 042 / Equipamento nº 55 ...	cxvii
Figura 47 - Gráfico de dispersão da frequência relativa dos ciclos de carga / DST - 042 / Equipamento nº 55.....	cxvii
Figura 48 - Histograma dos ciclos de carga da pilha / DST - 042 / Equipamento nº 70.....	cxviii
Figura 49 - Gráfico de dispersão da frequência relativa dos ciclos de carga / DST - 042 / Equipamento nº 70	cxviii

Figura 50 - Histograma dos ciclos totais recolhidos pela carga da pilha do desmonte DST - 042 / Equip. nº55 e 70	cxix
Figura 51 - Histograma dos ciclos recolhidos com a carga da pilha do desmonte DST - 043 com recurso ao equipamento nº 70	cxx
Figura 52 - Gráfico de dispersão com as frequências relativas ciclo de carga do desmonte DST - 043 / Equipamento nº 70	cxx
Figura 53 - Histograma dos ciclos totais da carga da pilha do DST - 043	cxxi
Figura 54 - Gráfico de dispersão dos ciclos / DST - 043 / Equipamento nº 55 e 70	cxxi
Figura 55 - Histograma dos ciclos recolhidos do DST - 045 / Equipamento nº 70	cxxii
Figura 56 - Frequências relativas dos ciclos recolhidos do DST - 045 / Equipamento nº 70.	cxxii
Figura 57 - Histograma dos ciclos recolhidos do DST - 045 / Equipamento nº 55	cxxiii
Figura 58 - Frequências relativas dos ciclos recolhidos do DST - 045 / Equipamento nº 70	cxxiii
Figura 59 - Histograma dos dados totais recolhidos do DST - 045 / Equip. nº 55 e 70	cxxiv
Figura 60 - Frequências relativas dos dados totais recolhidos no DST - 045 / Equip. nº 55 e 70	cxxiv
Figura 61 - Histograma dos dados totais do DST - 047 / Equip. nº 55	cxxv
Figura 62 - Frequências relativas dos dados recolhidos do DST - 047 / Equip. nº 55	cxxv
Figura 63 - Relação entre o Espaçamento e os custos de desmonte, de carregamento e os custos totais através da simulação realizada	cxxvii
Figura 64 - Relação entre a subperfuração e os custos de desmonte, de carregamento e os custos totais através da simulação realizada	cxxvii
Figura 65 - Relação entre a densidade do explosivo e os custos de desmonte, de carregamento e os custos totais através da simulação realizada	cxxviii

Lista de equações

Equação 3.1	37
Equação 3.2	38
Equação 3.3	38
Equação 3.4	39
Equação 3.5	44
Equação 3.6	45
Equação 3.7	45
Equação 3.8	46
Equação 3.9	46
Equação 4.1	57
Equação 5.1	70
Equação 5.2	74
Equação 5.3	74

Lista de tabelas

Tabela 1 - Powder Factor recomendado consoante o tipo de rocha encontrada.....	35
Tabela 2 - Exemplo da informação recolhida em cada ciclo de carga	68
Tabela 3- Capacidades máximas de carga dos equipamentos acompanhados (Cimertex, 2019).....	69
Tabela 4 - Dados estatísticos dos dados originais e dos dados após validação	71
Tabela 5 - Dados estatísticos sobre os dois equipamentos de carga referentes aos ciclos recolhidos	71
Tabela 6 - Tempos médios de ciclos de carga, por desmonte, e total de ciclos validados por equipamento de carga.....	77
Tabela 7 - Tempos médios por desmonte e por equipamento de carga	79
Tabela 8 - Individualização dos clusters, através da separação dos desmontes da bancada nº2 e do desmonte DST -041	82
Tabela 9 - Valores de referência para a exploração da simulação	90
Tabela 10 - Valores de referência para os parâmetros da pega de fogo utilizados na pedreira onde foram recolhidos os dados	95
Tabela 11 - Frequências relativas, Distribuição de Poisson de média 16,5 e desvios entre a realidade e o modelo	cvii
Tabela 12 - Cálculo da Distribuição Relativa, do modelo e os erros associados à modelação do equipamento nº 55	cix
Tabela 13 - Cálculo da Distribuição Relativa, do modelo e os erros associados à modelação do equipamento nº 70	cxix

1. Introdução

1.1. Tema da Dissertação

O tema desta Dissertação procura entender qual a interação e dependência entre as características inerentes a um desmonte a céu-aberto de rocha, recorrendo ao uso de explosivos, com o subsequente sistema de carga do material desmontado em pilha, que recorre a unidades de carga e de transporte, movendo esse material com destino a uma unidade de transformação desse material. Isto é, como é que a fragmentação do maciço rochoso, transformando-o em partículas, resultante do processo de desmonte com explosivos, por exemplo, dificulta a penetração dos baldes dos equipamentos de carga na pilha, bem como procurar entender como esse grau de maior ou menor dificuldade, influência a produtividade desses equipamentos de carga. Assim, para tal, foram acompanhadas as implementações de diversas pegas de fogo na Pedreira de Gouvães da Serra, tendo como objetivo recolher informação real dos diversos parâmetros dessas pegas realizadas, das características do material fragmentado e dos respetivos tempos de carga necessárias para mobilizar a pilha desse material formada pelo desmonte.

1.2. Importância do tema

Com o tema eleito, procura-se provar que a interação entre o modo como se opera a operação de desmonte e a capacidade / facilidade de realização da operação de carga do material desmontado, é espectável que ambas as operações estão interligadas. Será de realçar que o custo de desmontar a rocha, recorrendo ao uso de explosivos, é consideravelmente mais baixo quando comparado com o processo de carga e transporte, e é por isso de extrema importância modelar e entender o(s) eventual mecanismo(s) que os relaciona. Uma vez que uma otimização do desmonte pode acarretar uma diminuição dos custos de carga e transporte, se tal for conseguido, obter-se-á, seguramente, um aumento de produtividade destes equipamentos.

1.3. Objetivo geral e objetivos específicos

Com este estudo, pretende-se encontrar as formas como se relaciona a fragmentação operada no desmonte com a atividade de carga. Para tal é necessário criar pontos de vista sobre a operação unitária de desmonte e recolher dados e informações passíveis de serem analisado, com base nestes, tentar construir modelos que descrevam as fenomenologias presentes. Tendo por base esses eventuais modelos procurar-se-á parametrizar as operações de modo a encontrar pontos ótimos que conduzam a uma minimização dos custos para a exploração da massa mineral. Além destes objetivos é pretendido relacionar o tamanho das partículas resultantes do desmonte com os conhecidos conceitos de *Diggability* e o *Fill Factor*, que estão diretamente relacionados com a produtividade dos equipamentos de carga e, por sua vez, com a produtividade global de exploração.

1.4. Motivação

Os custos dos processos de carga e transporte numa exploração mineira, seja ela de rochas industriais ou minérios, são de uma enorme ordem de grandeza, ultrapassando em grande escala os custos do desmonte, quando este é realizado com recurso a explosivos. Os custos de carga e transporte podem mesmo ultrapassar os 50% dos custos globais de uma exploração mineira (Miranda H. S., 1986). Deste modo, é de extrema importância tentar reduzir os custos dos processos de movimentação das massas minerais, mesmo que tal possa implicar aumentar ligeiramente o custo do desmonte. Contudo é necessário perceber que os processos seguintes de britagem, classificação e apuramento podem ser influenciados negativamente. É por isso, essencial ter em conta todo o ciclo produtivo envolvido para encontrar um ponto global ótimo para a produtividade, mas também para os inerentes custos operacionais envolvidos. Afigura-se, então, este tema de procura de pontos ótimos de produtividade e minimização de custos globais das operações, como um tema importante e, como tal, motivador para a investigação realizada e a realizar.

1.5. Metodologia a seguir

Para concretizar os objetivos atrás definidos, foi necessário começar por entender os mecanismos associados ao fenómeno de rutura de rocha quando esta é realizada com recurso aos explosivos. Mas também entender como promover o desmonte e as suas consequências no grau de fragmentação do maciço rochoso. Foram também estudadas as teorias que preveem a fragmentação da pilha *a priori*, isto é, apenas com os parâmetros geométricos do desmonte e cargas explosivas associadas. Contudo, e para uma fiel relação entre desmonte e fragmentação resultante, foram acompanhados desmontes, desde a marcação da pega de fogo no maciço, passando pela operação de perfuração, seguida da medição dos comprimentos, inclinações e orientações dos furos, bem como pelo registo da carga explosiva e tamponamento para cada furo realizado.

Após a detonação de cada desmonte, foram recolhidas imagens referenciadas para posterior análise através do *software WipFrag*, com o objetivo de contruir curvas granulométricas das pilhas de material que cada desmonte produzia.

Mas, como anteriormente referimos, para os objetivos deste Dissertação, era essencial recolher informação sobre os ciclos de carga do material desmontado em unidade de transporte e, em especial, dando enfase ao tempo de carga efetiva do balde do equipamento de carga. Assim, foram recolhidos os tempos necessários para que o balde da máquina de carga, neste caso uma retroescavadora, ficasse cheio.

Após esta recolha sistemática de dados, estes foram analisados e tratados por forma a tentar encontrar funções matemáticas ajustadas aos mesmos, numa busca de modelos estatísticos passíveis de evidenciarem interações das que atrás referimos e, dessas evidências, eventualmente, se tirarem algumas conclusões sobre as relações de interatividade entre as operações em estudo.

2. Atividades e operações mineiras unitárias

2.1. Cadeia produtiva

Qualquer cadeia produtiva é, em geral, constituída por um conjunto mais ou menos numeroso de operações elementares interligadas. Será da capacidade de otimização dessas operações singulares que poderão resultar otimizações globais significativas de todo o processo produtivo, minimizando a probabilidade de quebras de produção e maximizando a diminuição dos custos operacionais de cada uma das operações elementares presentes.

Sem exceção, a cadeia produtiva inerente à indústria extrativa mineira é constituída por uma sequência, mais ou menos bem definida, de diferentes unidades operacionais que interagem entre si, permitindo retirar da crosta terrestre frações de material que, após os diferentes estágios, permitirão obter um produto final a apresentar ao mercado possuído de um valor económico sustentável para a indústria.

O desmonte da rocha é o primeiro elo da cadeia desta indústria, seguindo-se o da carga e transporte deste material até a instalação de beneficiação. Em ambiente de pedreira, para produção de rocha industrial, todo o processo produtivo é iniciado pela atividade de perfuração. Esta seguirá o desenho do respetivo plano de fogo projetado. A operação seguinte é a do carregamento do explosivo nos furos realizados e o respetivo estabelecimento das sequências de conexão, tendo em vista o plano de temporização das detonações de cada furo. Da detonação da pega de fogo, produzir-se-á uma pilha de material fragmentado, que então necessita de ser carregado e transportado, em geral, até uma estação de britagem. Estando na instalação de beneficiação, os fragmentos são consecutivamente fragmentados e classificados até obterem granulometrias próprias para o mercado externo/interno e, no caso dos minérios, até se estabelecerem granulometrias que promovam a libertação de diferentes minerais presentes nesses minérios (Figura 1).

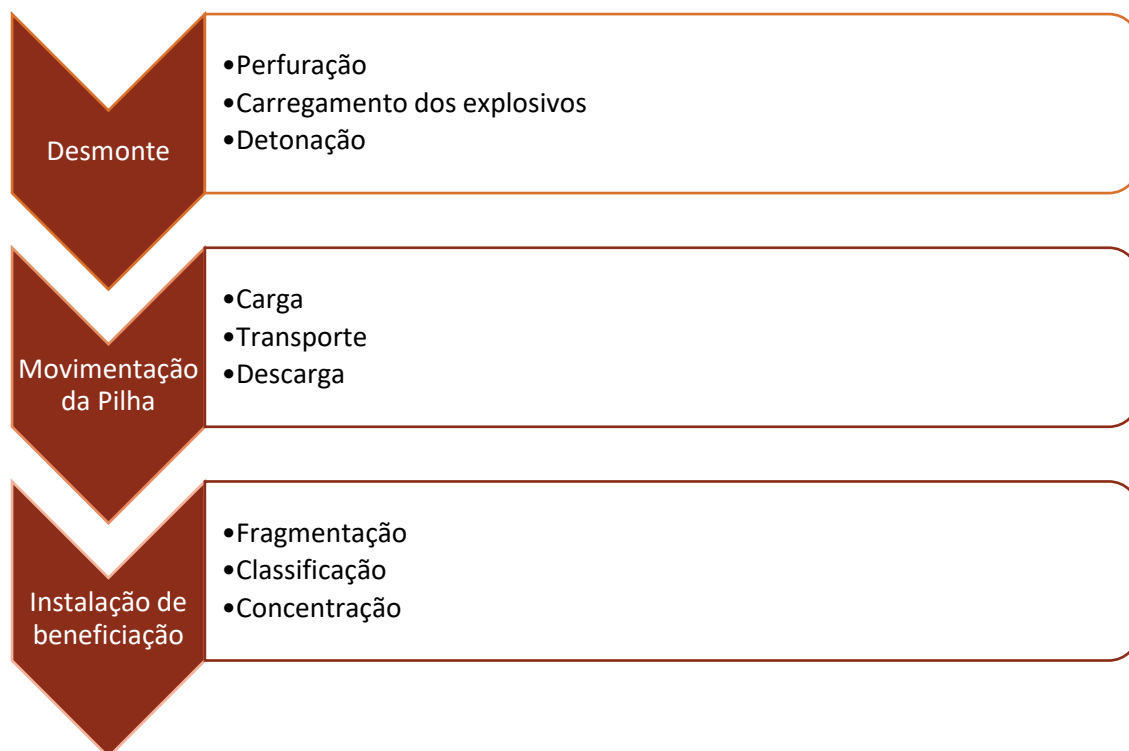


Figura 1 - Sequência de acontecimentos do processo produtivo no desmonte de rochas

Terá influência preponderante nesta sequência de elos da cadeia produtiva, a forma e granulometria da pilha de material desmontado disperso, nomeadamente nas suas repercussões para os sistemas de carga e transporte, e também para a subsequente etapa de beneficição. Mas como anteriormente afirmamos, ela terá características resultantes das operações que a originam e que, naturalmente antecedem a sua criação.

Este processo de interação dos elos da cadeia produtiva definido é repetido, em ciclo, continuamente até que as reservas da massa geológica deixem de ser rentáveis. Seja a massa mineral destinada para exploração de rochas industriais ou para minérios. Embora seja possível individualizar todo este processo, como idealizado no esquema da Figura 1, seria errado olhar para a discretização explicitada e deduzir da existência de independência entre as operações elementares presentes uma vez que todo o processo produtivo está interligado. Por exemplo, um mau desmonte, que produz elevadas quantidades de blocos, quando não há interesse em produzi-los, acarreta elevados custos de transporte e taqueio e inúmeros problemas na sua fragmentação na instalação de beneficição. Este é um de vários exemplos que evidenciam a importância de dedicar atenção cuidadosa à interdependência entre os elos que compõem a cadeia produtiva na indústria extrativa, e em particular na produção de rochas particuladas.

2.2. Importância da definição e controlo das interações numa perspetiva Mine to Mill (M2M)

A modelação, seguida de simulação, permitindo a realização de estudos que interligam as diversas operações mineiras presentes no ciclo global produtivo, tem o seu início de desenvolvimento nos anos 70 do século passado (DJMcKee, 2013).

Em 1984, Kai Nielsen, Engenheiro de Minas da Universidade Norueguesa de Ciência e Tecnologia de Trondheim, conduziu um dos primeiros estudos que envolvia a ligação das operações de extração às do processamento. Este Engenheiro, desenvolveu técnicas e construiu modelos económicos para as etapas de extração e processamento de minérios na Mina de ferro de Sydvaranger na Noruega. Com esses seus trabalhos, demonstrou que tanto a produtividade como os custos operacionais poderiam ser otimizados quando se procura realizar uma integração, mais ou menos fidedigna, de todas as etapas presentes na cadeia de produção da indústria extrativa (DJMcKee, 2013). Na Figura 2, é esquematizado um processo de informação relativa a diversas operações de um processo produtivo completo de extração e processamento, segundo o conceito de *Mine to Mill* (1999). Conjugam-se, neste diagrama, modelos de estima de curvas granulométricas de material desmontado, com modelos previsionais e de controlo das operações de moagem intrínsecas ao tratamento de minério. Das conclusões destes seus estudos, fazia parte o conceito da real redução dos consumos energéticos presentes nos processos de britagem e moagem quando, nas operações de desmonte, se garante uma boa gama de calibres da rocha extraída, previamente determinada, recorrendo a fragmentações com explosivos devidamente projetadas. Foram estas conclusões que permitiram, na década de 80 do século passado, o aparecimento e progressivo desenvolvimento de modelos previsionais de curvas granulométricas resultantes dos processos de desmonte com explosivos. Estas passaram a afirmar-se como fundamentais para a otimização global da mineração, conceito que se começava a afirmar como possível e inevitável para as boas práticas mineiras. Estava em desenvolvimento e afirmação o conceito de *Mine to Mill* (M2M) (DJMcKee, 2013).

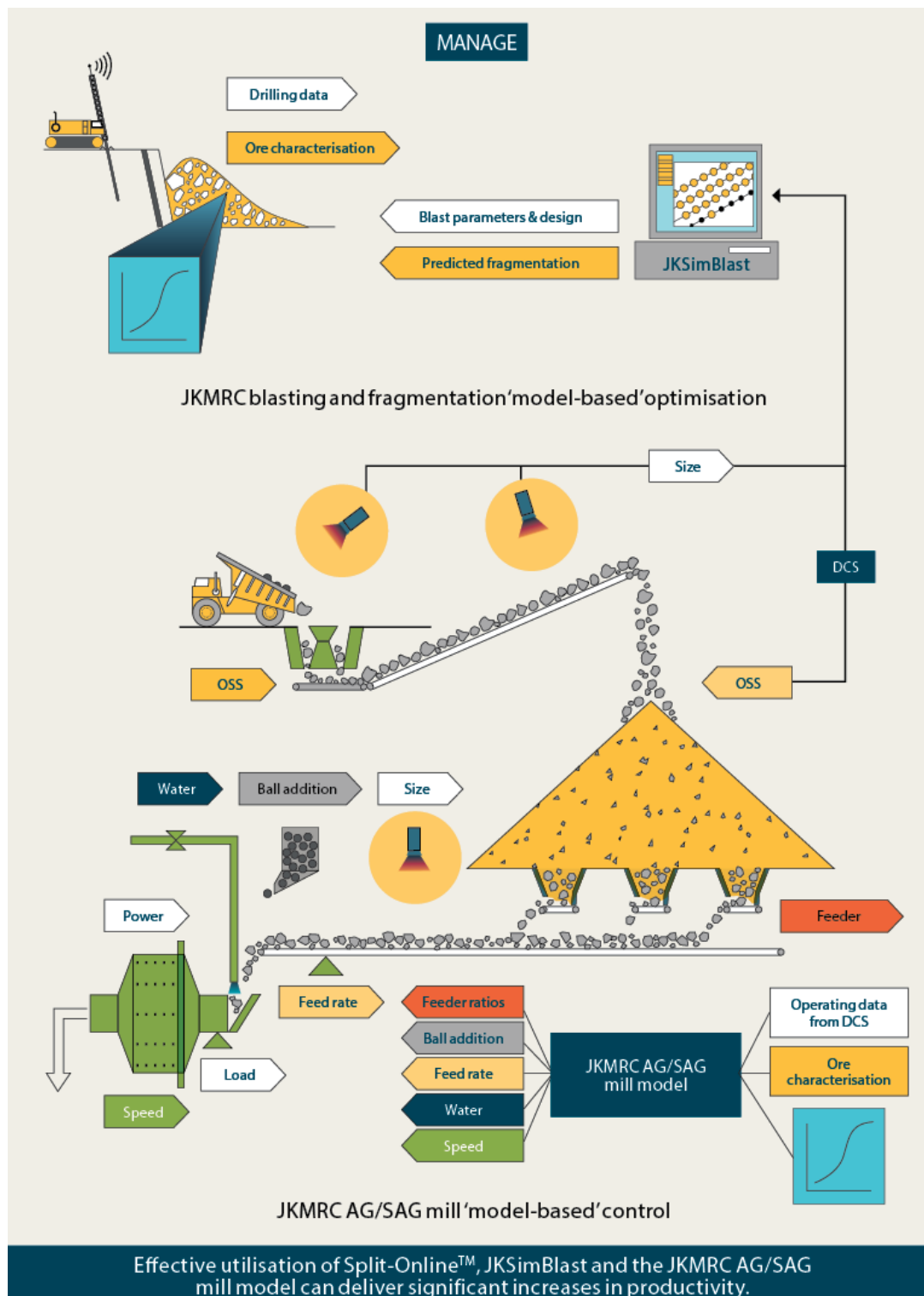


Figura 2 - Diagrama exemplificativo de uma cadeia produtiva segundo o conceito de Mine to Mill, englobando peças de software de identificação de interações, controlo e busca global de optimização. (Cameron, 2017)

O conceito de Mine to MILL (M2M), segundo Adel et al (2006), é uma forma de otimização do processo de extração e beneficiação de determinados produtos minerais. No âmbito deste conceito, o que pretende é minimizar os consumos energéticos durante todo o processo de redução de calibres desses produtos (Adel, Kojovic, & Thornton, 2006).

Outra definição é proposta por Scott et al (2002), que indica que o processo de Mine to Mill envolve a otimização do processo de fragmentação da rocha desde quando esta se encontra no seu estado natural, *in situ*, até ao seu estado final, seja ela a expedição ou uma concentração (Scott, Morrell, & Clark, 2002).

Com base nestas definições, é plausível que o objetivo proposto pelo conceito Mine to Mill é o que todas as explorações procuram, uma vez que a minimização dos custos operacionais que permitem um aumento dos lucos é sempre benéfico, uma vez que permite uma redução dos gastos de exploração, mas também permite um maior investimento desse benefício em projetos que melhorem as condições de trabalho, ambientais, em tecnologias e técnicas cada vez mais baratas do ponto de vista da exploração.

Assim, sempre que se pretenda aplicá-la é necessário conhecer e estudar todo o processo produtivo, uma vez que as melhorias têm de ser imperativamente globais, inerente a todo o processo. De notar que a otimização de um só elo da cadeia produtiva pode originar enormes vantagens, quando só se reflete sobre esse determinado momento do processo. Contudo, pode provocar um enorme aumento de custos ou uma diminuição de produção quando se aprecia a totalidade da cadeia produtiva. A necessidade do estudo e conhecimento de todos os elos do processo é dispendioso e por vezes difícil, contudo para uma melhor gestão do sistema, é necessário tal esforço.

Este trabalho pretende encontrar princípios que ajudem à definição de um ponto de equilíbrio entre o desmonte de rocha e o tempo de carga da pilha de material gerada. Para tal, e como já referido, foram recolhidos dados sobre o grau de fragmentação gerado pelo desmonte e de tempos de ciclo de carga, para conhecer melhor os fenómenos presentes e a partir deste conhecimento modelar e otimizar o desmonte sem que este prejudique as operações seguintes.

3. Ciclo produtivo de Desmonte de rocha

3.1. Maciços Rochosos

Os maciços rochosos são a matéria-prima que alimenta qualquer ciclo produtivo na indústria extrativa. Com base no seu grau de fragmentação sucessivo ao longo da cadeia produtiva, e dependendo da capacidade de aproveitamento tecnológico das espécies minerais úteis nele presentes, é possível obter produtos finais economicamente viáveis para comercialização. Contudo, os maciços rochosos existentes apresentam uma variabilidade em muitas das suas características. Propriedades, como por exemplo, o grau de alteração do maciço, as resistências à compressão e à tração da rocha, a resistência à penetração com aços de perfuração, a orientação da fissuração, a presença de água, etc., necessariamente terão de ser consideradas uma vez que condicionarão as operações de desmonte. Não devemos esquecer, também, a variabilidade de teores das substâncias úteis, propriedade que é fundamental conhecer a fim de minimizar a diluição das espécies minerais úteis presentes. Para tal é necessário proceder a estudos que nos permitam conhecer o mais corretamente possível o maciço a desmontar, para que seja possível dimensionar corretamente as pegas de fogo a executar que são o primeiro elo da cadeia produtiva.

Além destes aspetos que, como afirmamos, deverão ser conhecidos à partida e que deverão requer atenção durante o decorrer da exploração, existem muitos outros, e muitos deles de extrema importância, que têm de ser recolhidos de forma sistemática durante todo o decorrer da vida útil da exploração. Nas pegas de fogo para desmonte de maciços para produção de inertes, o grande foco desta Dissertação, é recomendado que sejam realizados levantamentos topográficos das frentes livres, e respetivas bancadas, em permanente modificação. Essa informação, sob a forma de modelos digitais de terreno, é extremamente importante, uma vez que permitiria um melhor dimensionamento das pegas de fogo, contribuindo para obtenção de desmontes mais de acordo com o projeto estabelecido, mas também por questões de segurança, por exemplo, possibilitando prever e, desse modo anular, eventuais fenómenos de lançamento de rochas.

Como referimos, o conhecimento das condições geológicas do maciço rochoso, nomeadamente as suas características geomecânicas, são fundamentais na escolha do método de exploração, para o bom e correto dimensionamento das pegas de fogo. Para obter tal reconhecimento é

frequente levar a cabo campanhas de prospeção geológica e geofísica que permitem recolher informação como a referida anteriormente, em particular, prever o comportamento do maciço quando este é sujeito as tensões de rutura.

Todo este estudo preliminar irá possibilitar definir a forma de promover o desagregar do maciço rochoso, nomeadamente se o desmonte será implementado por via mecânica ou se com recurso a explosivos. Uma classificação comumente utilizada é a de Franklin et al, 1971, onde com o espaçamento das descontinuidades e a resistência à compressão uniaxial, é possível encontrar o método de escavação indicado, tal representação encontra-se na Figura 3.

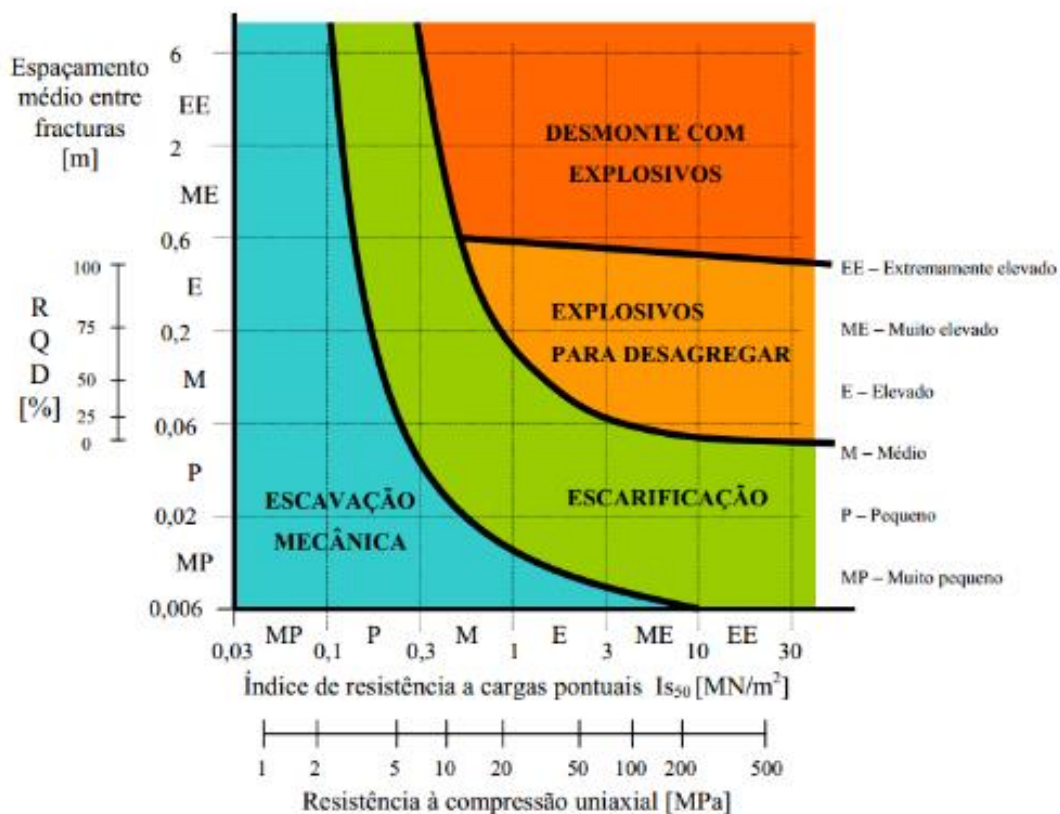


Figura 3 - Classificação da escavabilidade de maciços rochosos tendo por base o espaçamento entre descontinuidades (m) e a resistência à compressão uniaxial (MPa) (adaptado de Franklin et al, 1971, in López Jimeno e Díaz Méndez, 1997)

Dentro do desmonte com recurso a explosivos existe, dependendo do estado de fracturação do maciço, o desmonte em que a função do explosivo se resume a empurrar e desagregar a rocha,

mas, quando o maciço rochoso é relativamente são, surgirá a necessidade da ação dos explosivos para promover a fracturação da rocha e a subsequente desagregação e movimentação do material em direção ao terreno adjacente à frente livre da bancada. Será a partir das pilhas de material, assim formadas que operarão máquinas de carga em ações de carga.

3.2. Decomposição das atividades do desmonte

As atividades necessárias para promover o desmonte de rochas, de forma sucinta abordadas no Figura 1, compreendem a perfuração, que pode ser antecedida por decapagem, quando esta é necessária, seguida do carregamento de explosivo nos furos realizados, estabelecimento das ligações para promoção da temporização planeada e terminando com a detonação. Desta, resultará uma pilha de material com forma e localização também passível de ser pré-determinada. Contudo a perfuração segue um padrão geométrico que cumpre regras que dependem de características intrínsecas à bancada, dos explosivos a usar, do calibre máximo admissível no britador primário, de questões de segurança, em particular as das minimizações de projeções e de vibrações produzidas. Estas são algumas das condicionantes do planeamento do desmonte que se devem ter em conta no planeamento de uma pega de fogo.

3.2.1. Aquisição de dados

A aquisição de alguns parâmetros inerentes à geometria da bancada é sempre importante, uma vez que permitirá um mais eficiente planeamento da pega de fogo. Como exemplo deste tipo de parâmetros que devem ser recolhidos salientam-se os:

- Altura da bancada;
- Comprimento da frente;
- Ângulo da frente;
- Volume de rocha a desmontar.

Para tal recolha é frequente a realização de um levantamento topográfico de toda a bancada a desmontar e, em particular, da forma da sua frente livre. Este levantamento pode ser realizado com recurso ao perfilómetro laser ou com o auxílio de drone, técnicas economicamente, cada vez mais, acessíveis, de simples e rápida execução. Estes métodos

encontram-se já introduzidos nas pedreiras nacional da indústria extrativa, encontrando-se muitas das empresas exploradoras já na posse de equipamentos para esse fim. Os referidos levantamentos, possibilitam obter bases de dados georreferenciados que conduzem à construção de modelos digitais de terreno. No momento do planeamento das pegas de fogo, esses modelos digitais de terreno são fundamentais para que com a promoção dos desmontes não surjam problemas, e se possam prevenir acidentes. Tais modelos ajudam a dimensionar corretamente a perfuração necessária para o desmonte do volume de rocha calculado e subsequente quantidade de explosivos. Mas também são um excelente recurso para visualização do ângulo e forma da frente livre do talude, indicação fundamental para o dimensionamento dos furos das primeiras fiadas de cada pega de fogo.

Contudo, o processo de planeamento de uma pega de fogo é um processo iterativo, isto é, com o decorrer da exploração, o conhecimento do resultado de pegas anteriores vai-nos permitir melhorar as pegas seguintes. Assim, a experiência adquirida nas pegas anteriores deve-nos permitir selecionar o melhor diâmetro de perfuração, melhores relações de espaçamento / afastamento, inclinações de furos mais adequadas, eventualmente outro tipo de explosivos e sequência de disparo que permitam, para aquela determinada exploração, diminuir os custos operacionais (Society for Mining, Metallurgy, and Exploration (SME), 2011).

3.2.2. Variáveis de uma pega de fogo

Segundo Llera et al 2003, as variáveis controláveis, no planeamento de uma pega de fogos, podem dividir-se em três grupos:

- Geométricas;
- Físico-químicas dos explosivos utilizados;
- Temporais.

As variáveis geométricas prendem-se nas características da própria bancada, desde a sua altura, ângulo da frente, o diâmetro de perfuração, afastamento entre filas de furos, espaçamento entre furos da mesma fila, sobperfuração e altura de perfuração, carga de fundo, carga de coluna de explosivo e tampão. Tais variáveis encontram-se esquematizadas na Figura 4, onde se representa uma bancada de altura BH tendo uma malha quadrada de furação com espaçamento S e afastamento B.

Já as variáveis físico-químicas dos explosivos vão estar interligadas com a densidade dos explosivos utilizados, velocidades de detonação dos mesmos, diâmetros comercializados e produção de gases. Estes fatores vão influenciar predominantemente a fragmentação do material que originará a pilha, tendo por base as características geotécnicas do maciço original.

Com base no tipo de rocha é possível ter uma estimativa da quantidade de explosivo necessária para a fragmentação da rocha através do consumo específico, isto é, quilogramas de explosivos por metro cúbico de rocha. Segundo Llera et al 2003 no *Manual Perforacion y Voladura de Rocas*, os consumos específicos, para os determinados tipos de rochas devem-se situar entre:

Tabela 1 - Powder Factor recomendado consoante o tipo de rocha encontrada

TIPO DE ROCHA	POWDER FACTOR (kg/m ³)
ROCHA MACIÇA E RESISTENTE	0,60 - 1,50
ROCHA DE RESISTÊNCIA MÉDIA	0,30 - 0,60
ROCHA MUITO FRATURADA E/OU ALTERADA	0,10 - 0,30

Em relação às variáveis temporais estas estão interligadas com as temporizações da pega, isto é, os tempos de retardo entre furos que promovem a detonação. Um bom dimensionamento de uma pega de fogo inclui um bom plano de iniciação do explosivo. Este plano deve assegurar que cada furo carregado, no momento da sua detonação, tenha uma frente suficientemente grande e livre que permita ao explosivo fraturar e projetar as partículas para esse espaço livre. Além disto, as temporizações de ligadores de superfície e os de fundo de furo, devem assegurar a máxima segurança, como por exemplo a de iniciação de todos os detonadores de fundo de furo antes da ignição do explosivo do primeiro furo, garantindo com este procedimento que todos os furos com explosivos foram devidamente acionados. As temporizações estão também relacionadas com a fragmentação do material uma vez que temporizações entre furos muito curtas vai aumentar o poder de fragmentação, no próprio momento da detonação, mas também no trajeto que as partículas vão percorrem no ar e que colidem entre si.

A variável de temporização da iniciação dos explosivos permite também uma gestão eficaz das vibrações induzidas no maciço pelo desmonte, que pode ser um dos grandes entraves no

planeamento de um desmonte. Por exemplo, um bom plano de temporização da iniciação da dos furos da pega de fogo, poderá garantir que não existam furos a detonar ao mesmo tempo.

3.2.3. Planeamento do diagrama de Fogo

Para um correto planeamento do diagrama da pega de fogo é necessário ter em atenção as características do maciço, tais como aquelas que já foram abordadas. Contudo, e tendo por base tais características, é possível manipular parâmetros do desmonte que permitem otimizá-lo.

Assim, como parâmetros manipuláveis, encontramos as variáveis geométricas, estas estão também esquematizadas na Figura 4, onde se pode destacar:

- Altura da bancada (H);
- Diâmetro de perfuração (D);
- Afastamento (B);
- Espaçamento (S);
- Subperfuração (J);
- Inclinação dos furos (α);
- Tampão (T).

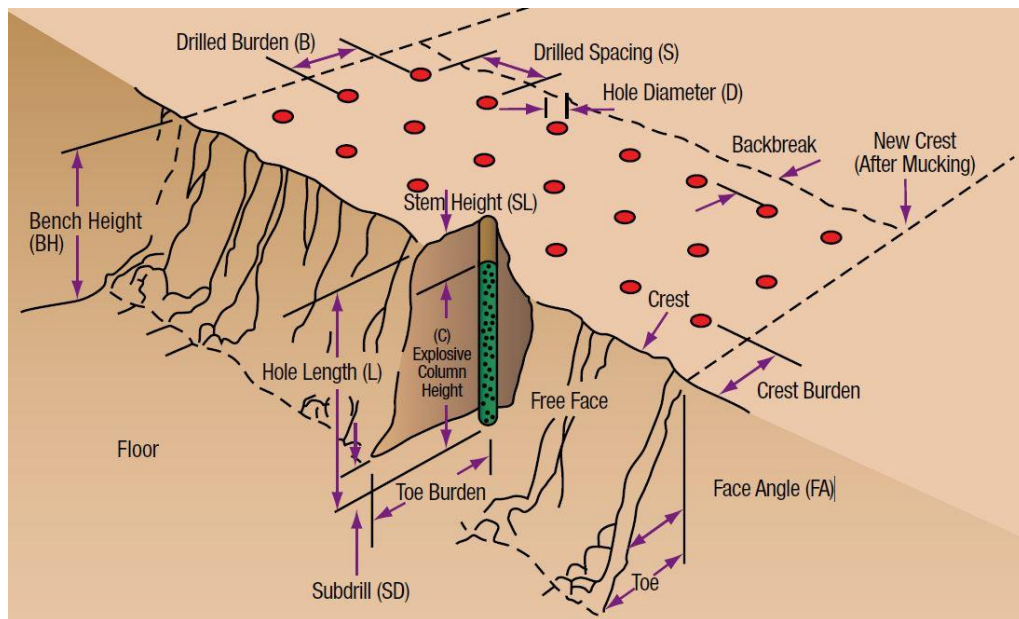


Figura 4 - Representação das variáveis de uma pega de fogo em bancada (Dyno Nobel Asia-Pacific Pty Limited, 2017)

Existem diversos autores que avançam com expressões que servem de ponto de partida para o planeamento da pega de fogo, tais como Bhandari, 1997; Hustrulid, 1999; Alonso et al, 2013; Llera et al, 2003; etc.. Contudo, os parâmetros geométricos a usar no digrama de pega de fogo de uma determinada exploração, deverão, sempre que possível, ter em consideração os parâmetros e resultados da pega anterior, e assim com base nesta, melhorar a que se planeia.

Segundo Bhandari em 1997 e tendo como ponto de partida a altura da bancada (H), é possível calcular o diâmetro (D) indicado para a perfuração através da expressão:

$$D(m) = \frac{H(m)}{120} \quad \text{Equação 3.1}$$

Já em relação ao afastamento (B), que indica a distância média da primeira linha furos à crista da frente livre, mas também a distância entre linhas de furos, é estimada com base no diâmetro de perfuração e num parâmetro K, pela fórmula proposta por Hustrulid em 1999:

$$B(m) = K * D(m) \quad \text{Equação 3.2}$$

Nesta última equação, o parâmetro K é dependente da resistência da rocha e da densidade do explosivo que vai ser empregue no desmonte. Já para o cálculo do espaçamento (S), em metros, distância entre furos consecutivos da mesma linha da perfuração, segundo autor Hustrulid em 1999, é obtida através da expressão:

$$S(m) = 1,15 * B(m) \quad \text{Equação 3.3}$$

Outro fator geométrico manipulável é a subperfuração. Bhandari, 1997 indica que este valor deve estar compreendido entre 30% a 50 % do afastamento (B). Este parâmetro é dependente da inclinação dos furos e está relacionado com a necessidade de uma perfuração para além da base da bancada inferior, a fim de assegurar um eficaz nivelamento da plataforma de carga e transporte. Se no momento da rutura da rocha pelo explosivo, este fator de subperfuração não tiver sido tido em consideração, ditará a existência de um fenómeno de repé entre furos de linhas consecutivas.

As inclinações dos furos da pega de fogo estão relacionadas, entre outros fatores, com a geometria da frente livre, mas também com o grau de fragmentação pretendida, bem como com a dispersão e forma da pilha após desmonte. Em relação à inclinação dos furos da fiada mais próxima à frente livre, estes devem ter uma inclinação que tenha em conta as distâncias, a cada profundidade dos furos, relativamente à frente livre. Um mau dimensionamento deste parâmetro, para situações de afastamento diminuto, pode provocar lançamento de partículas, e para afastamentos exagerados, poderá promover a formação de blocos tipo “matacões”, que necessitarão de passar por operações de taqueio antes de serem introduzidos em britadores primários.

Em relação aos outros furos das restantes fiadas, é também necessário assegurar um suficiente afastamento entre os furos que os rodeiam, uma vez que pequenas distâncias podem provocar iniciação não planeada de explosivos.

As inclinações médias para furos de uma pega de fogo em bancadas a céu aberto, estão compreendidas normalmente entre os 0° e 20°. (Bhandari, 1997). Contudo, estas inclinações estão igualmente dependentes dos objetivos que queremos atingir com o desmonte. Por

exemplo, quando queremos que o desmonte desenvolva uma superfície de talude final, onde as inclinações dos furos, nessa zona, devem ter a mesma inclinação que a pretendida no talude, essa condição deverá ser previamente planeada para que o resultado pretendido seja assegurado.

O Tampão ou tamponamento (T) é uma zona do furo que recebe material inerte e de granulometria selecionada. Este fator é dependente do explosivo usado, diâmetro de perfuração e de outras características da pega de fogo. O tamponamento tem de selar o furo para que no momento da detonação, os gases produzidos pelos explosivos fiquem confinados, para que estes sejam eficazmente utilizados na fragmentação e dispersão dos fragmentos.

Segundo Bhandari, 1997, este parâmetro geométrico deve relacionar-se com o afastamento pela seguinte equação, onde a seleção do valor a multiplicar pelo afastamento, deve ter em conta as condições do maciço e a fragmentação pretendida:

$$T(m) = (0,7 \text{ a } 1,5) * B(m) \quad \text{Equação 3.4}$$

Assim, tendo como ponto de partida o valor obtido através das expressões anteriores é possível dimensionar uma pega de fogo para uma determinada situação. Nunca é demais referir que um correto dimensionamento deve ser um processo iterativo, tendo como primeira aproximação os resultados aqui obtidos, e os seguintes desenhos devem ter em conta os resultados obtidos da pega anterior, desde a fragmentação produzida, vibrações induzidas ao maciço e projeções.

3.2.4. Afastamentos críticos

Um aspeto essencial a ter em conta é o dos denominados afastamentos críticos. Estes são as distâncias incorretas, a diferentes profundidades entre a cana do furo relativamente à frente livre. Um incorreto dimensionamento deste parâmetro, que na realidade são valores de afastamento, pode provocar elevados problemas de lançamentos quando esses afastamentos são diminutos e, por sua vez, colocar em causa questões de segurança do pessoal e dos equipamentos presentes na exploração. Se esses valores forem exagerados, poderão ser

responsáveis pela geração de blocos de dimensões exageradas e que necessitarão de passar por operações de taqueio.

A medição e previsão dos afastamentos críticos não é fácil. Esta, é no entanto, facilitada pela utilização de recursos que modelem a frente de trabalho e aparelhos que determinem a posição, comprimentos, direções e inclinações. Na Figura 5, recorrendo a uma Plataforma de planeamento de desmontes, é possível ver uma representação conjunta da posição de um furo relativamente a uma frente livre devidamente digitalizada. A cada profundidade do furo, corresponde um valor de afastamento mensurável. Estas medições podem ser realizadas por Perfilómetro laser ou com auxílio de Drones que varrem a frente da bancada e permitem uma eficaz modelação da área de trabalho e da localização das bocas dos furos. Já em relação aos furos é de extrema importância o conhecimento da real perfuração efetuada, uma vez que esta pode estar erradamente realizada.

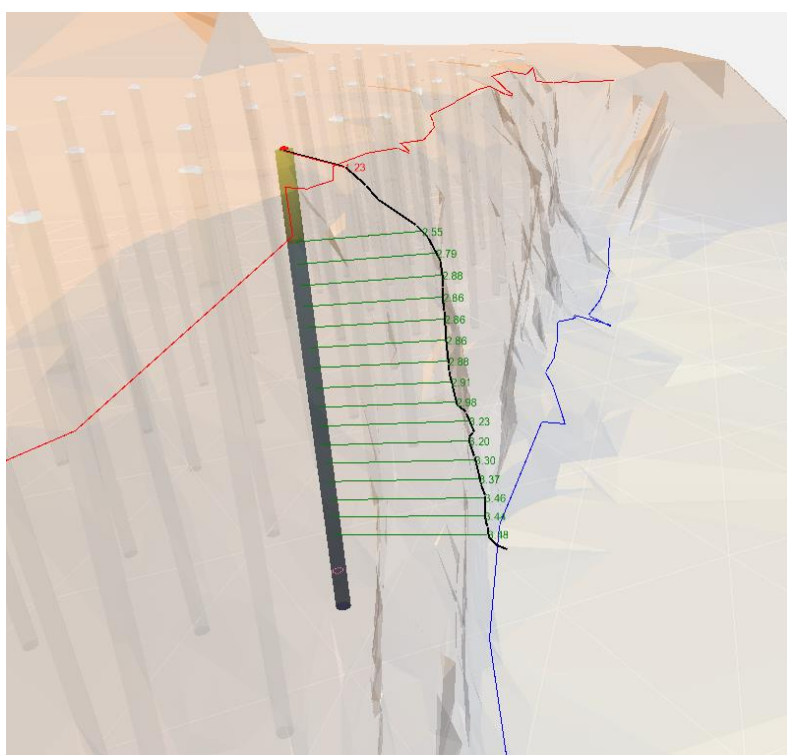


Figura 5 - Medição dos afastamentos críticos com o auxílio da Plataforma O-Pitblast

No dimensionamento geral da pega de fogo, é normal assumir-se uma inclinação uniforme da frente livre tal como a sua regularidade, projetando-se os furos para essa expectativa, onde as bocas dos furos e respetivos pés dos furos se encontram a um afastamento médio seguro em relação a essa frente livre. Contudo a realidade pode não ter nada a ver com o planeado, e é

frequente encontrar-se frentes de bancada em muito mau estado, com muitas irregularidades e com ângulos de inclinação variáveis em toda a frente de bancada. Estes problemas podem estar inerentes a uma pega anterior mal dimensionada.

Nestas circunstâncias, para contornar situações de risco como as referidas, é recomendada a utilização de modelos das frentes de trabalho complementada com a inclusão de informações relativas a eventuais desvios de furos, obtidas com o auxílio de apetrechos do tipo, que permitem conhecer a geometria total da perfuração real do furo. Com base na compilação destas informações, frente e furos reais, é possível prevenir situações de projeções, formação de matacões, onda aérea, ruídos e vibrações. Como medidas mitigadoras destes eventuais problemas, poder-se-á recorrer a uma distribuição diferenciada de explosivos ao longo dos furos, ao uso de Air-Decks ou no caso limite, a não carga desses furos.

3.2.5. Escolha dos Explosivos

A escolha dos explosivos a empregar numa pega de fogo, deve ter em conta vários aspetos, tais como fatores económicos, as condições geomecânicas da rocha a desmontar, os resultados pretendidos com o desmonte, bem como características inerentes aos explosivos presentes no mercado. Estes são os fatores a ter em conta na seleção dos explosivos segundo Bhandari, 1997, embora possam ser considerados outros.

Em relação ao fator económico este prende-se com o preço praticado para a venda de cada explosivo. Naturalmente que, a escolha irá quase sempre recair nos explosivos mais baratos que satisfaçam minimamente os requisitos de fragmentação desejados. O ANFO é, em norma, o explosivo mais barato que se pode encontrar no mercado. Contudo, a não possibilidade de utilização em ambientes com presença de água torna este explosivo muito limitado. O explosivo que é normalmente utilizado e que satisfaz geralmente as necessidades é a Emulsão, que apresenta características intrínsecas que lhe permite ser aplicada em muitas situações e o custo é relativamente baixo, especialmente se for comercializada a granel. Outro fator económico dominante é o custo de perfuração, isto porque, esta influência o tipo e diâmetro de explosivo, bem como a sua densidade. Um aumento dum destes parâmetros, pode induzir um aumento do poder de fragmentação, isto é, um aumento do consumo específico. Naturalmente que, também irá ocorrer um aumento dos custos dos explosivos e de perfuração. Além desses custos é necessário ter em atenção que a variação da carga, em diâmetro, pode

diferenciar a velocidade de detonação do explosivo, e por isso é necessário ter em atenção se o diâmetro do explosivo é compatível com o resultado esperado.

Já os aspetos inerentes ao explosivo referem-se à energia do mesmo, e que se relaciona com a energia que o explosivo possui para romper e projetar as partículas. Esta informação pode ser retirada pelo RWS, (Relative Weight Strength), que mede a energia do explosivo por unidade de peso do explosivo e assim, tendo como comparação o ANFO, ter uma ideia da quantidade de energia disponibilizada pelo explosivo. Outro fator importante ao explosivo compreende a sua resistência à água, que pode ser decisiva no momento de escolha. Há ainda o fator da sensibilidade do explosivo e como ela é realizada. Este fator vai condicionar a sua utilização, uma vez que nem todos os tipos de explosivos podem ser utilizados em situações de explorações que apresentem bancadas de alturas elevadas, já que o seu emprego acarretaria riscos de segurança para os operadores.

Há ainda fatores que dependem das características da própria rocha a desmontar e das condições em que se vai realizar o desmonte. Um dos principais fatores é o diâmetro da carga. É de realçar que a utilização de explosivos encartuchados traduz uma diminuição da carga máxima, uma vez que há a necessidade do explosivo usado ser de diâmetro inferior ao diâmetro de perfuração. Já se o explosivo de coluna for bombeado ou carregado a granel, a ocupação do explosivo é a máxima dentro do furo, maximizando a carga. Outros aspetos fundamentais relacionam-se com o estado de fragmentação que o próprio maciço apresenta bem como e a sua dureza, naturalmente relacionada com a mineralogia da rocha e o seu estado de alteração. Estas exigências irão ditar a apropriada utilização dos explosivos tendo por base os requisitos exigidos do material resultante do desmonte.

3.2.6. Forma e posição da pilha

A forma e posição da pilha do material desmontado, irá depender da carga explosiva utilizada, do plano de temporizações, do ângulo de inclinação dos furos, do grau de confinamento da bancada a desmontar, da geologia da bancada e das próprias características geomecânicas. As características de posicionamento e geometria que a pilha pode tomar vão depender da trajetória dos fragmentos no momento da detonação. Os vários exemplos dos tipos de pilhas que podem ser formadas na pega de fogo estão demonstradas na Figura 6, onde se encontram as pilhas com uma maior dispersão e menor altura, que ajudaria a carga para uma carregadora frontal. E as restantes pilhas menos dispersas, mas a representação central, apresenta uma

altura excessiva o que pode prejudicar a carga e pôr em causa a segurança do equipamento e do seu manobrador. Este tipo de pilhas está mais direcionado para retroescavadoras giratórias.

É de notar que uma boa dispersão da pilha pode ser útil, podendo, no entanto, não eliminar problemas relacionados com aumentar o tempo de carga e transporte. Assim é necessário ajustar os tempos de atrasos entre furos e entre filas que permitam, para além da dispersão, uma adequada forma da pilha. Há ainda que colocar uma adequada atenção nas questões relacionadas com as vibrações que estão diretamente ligadas com as temporizações e as cargas explosivas.

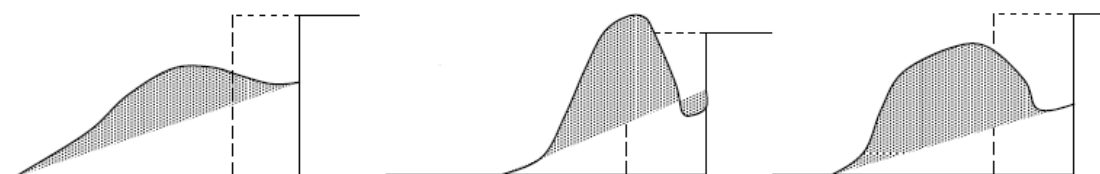


Figura 6 - Exemplos de formas e dispersão da pilha de material resultante do desmonte (Choudhary B. S., 2013)

O formato e posição da pilha também deve estar dependente do tipo de equipamento de carga do material desmontado a utilizar. Esta característica do desmonte deve propiciar uma boa frente de ataque ao equipamento de carga e por isso um aumento do seu rendimento, sem pôr em causa a sua integridade e segurança dos operadores.

Um caso particular, e simples, do método de aumento da dispersão da pilha é a utilização de afastamentos mais pequenos que permitirá um aumento da capacidade do explosivo em empurrar os blocos, uma vez que haverá menos material entre a frente livre e o furo. Contudo este método pode causar problemas de segurança, uma vez que no momento do disparo pode ocorrer projeções, decorrente do excesso de energia produzida pelo explosivo.

Quando temos na operação de carga retroescavadoras giratórias a altura da pilha deve permitir uma boa e facilitada carga, assegurando igualmente a segurança. Nestes casos, a fragmentação e forma da pilha não devem ser grandes, uma vez que o equipamento tem uma baixa locomoção e baixa área de abrangência. Quanto à fragmentação, esta deve também ser melhor uma vez que o balde, em norma mais pequeno nestes equipamentos em comparação com as carregadoras frontais de igual peso. Já quando temos pás-carregadoras frontais a pilha deve

possuir menor altura e deve estar mais dispersa, uma vez que permite otimizar as manobras elementares da operação de carga por parte do equipamento.

3.2.7. Previsão da distribuição de calibres

As previsões dos calibres das partículas resultantes do desmonte podem ser estimadas através de modelos desenvolvidos ao longo das últimas décadas, destacando-se os modelos de Larsson's (1974), Swedish Detonic Research Foundation e de Kuz-Ram (2005). Tendo por base os parâmetros geométricos da pega, propriedades dos explosivos e propriedades do maciço, é possível prever os calibres obtidos. Contudo, estas aproximações são um pouco grosseiras, isto é, os fatores inerentes aos explosivos e à geologia podem não representar a realidade, em especial o fator de rocha que é inúmeras vezes mal avaliado.

A equação de Larsson, de 1974, pretende determinar o calibre, onde 50% do material fica retido num crivo de igual malha, que o desmonte produzirá, através da seguinte equação:

$$K_{50} = s \cdot e^{\left(0.58 \cdot \ln(B) - 0.145 \cdot \ln\left(\frac{S}{B}\right) - 1.18 \cdot \ln\left(\frac{CE}{c}\right) - 0.82\right)} \quad \text{Equação 3.5}$$

Onde: **B** é Afastamento (m); **S/B** é o Espaçamento sobre o Afastamento; **CE** a carga específica (kg/m³); **c** é constante da rocha, e é o equivalente ao consumo específico da dinamite necessária para a fragmentação da rocha, normalmente entre 0,3 a 0,5 kg/m³; **s** - constante de fragilidade, que é o fator que tem em conta a heterogeneidade e descontinuidades da massa da rocha. Em rochas muito fissuradas, **s** = 0,6, rocha pouco fraturada, **s** = 0,55, rocha normal com muito pequenas fissuras, **s** = 0,5, rocha relativamente homogénea, **s** = 0,45, rocha homogénea, **s** = 0,4.

A equação proposta pela Swedish Detonic Research Fundation (SVEDEFO) permite igualmente estimar qual o D50 que o desmonte irá provocar, e que segue a Equação 3.6, onde encontramos presentes diversas variáveis geométricas do desmonte, bem como fatores semelhantes ao anterior modelo. Está têm em conta o efeito da altura da bancada/furo (**L**) e o tamponamento (**T**) utilizado, em metros, algo que o método anterior desprezava.

$$K_{50} = S * \left[1 + 4.67 \left(\frac{T}{L} \right)^{2.5} \right] * e^{0.29 * \ln(B^2) * \sqrt{\frac{S}{1.25}} - 1.18 * \ln\left[\frac{CE}{c}\right]^{-0.82}} \quad \text{Equação 3.6}$$

Contudo, o modelo mais utilizado e que permite, uma estimativa do calibre médio, possibilita a construção aproximada de uma curva cumulante que descreve todo o desmonte. Este método foi proposto por Cunningham em 1983 e revisto em 2005 pelo próprio, procurando obter curvas que representem melhor a dispersão de calibres do desmonte. Este modelo é baseado em três equações, sendo uma primeira que permite calcular o calibre médio dos fragmentos, em centímetros, uma segunda que permite calcular o índice de uniformidade do material e por fim, uma terceira equação que permite calcular a cumulante do material fragmentado.

Assim, para a aproximação do calibre médio usa-se a equação de Kuznetsov, tendo por base a quantidade de explosivos por furo - **Q** (kg), o consumo específico - **K** (kg/m³), as características rochosas - **A**, e o **RWS** fator dependente do explosivo utilizado.

A Equação 3.7 permite calcula o calibre médio, em centímetros, que o desmonte pode produzir:

$$x_m = AK^{-0.8} Q^{1/6} \left(\frac{115}{RWS_{ANFO}} \right)^{\frac{19}{30}} \quad \text{Equação 3.7}$$

Onde encontramos: O fator de rocha - **A** - pretende aferir o estado do maciço, este se se apresentar como extremamente fraco, **A** deve ser igual a 1. Se o maciço apresentar uma dureza média este fator deve ser 7. Já se o maciço apresentar uma grande fracturação, mas a rocha apresenta-se com bastante dureza este deve de rondar os 10. Em último caso, em que o maciço apresenta pouca fracturação, sendo um maciço relativamente são, o fator de rocha deve ser 13.

A Equação 3.8, que permite encontrar o coeficiente de uniformidade - **n** - tem em conta os parâmetros geométricos da pega de fogo e das cargas explosivas utilizadas. Assim, com base no Afastamento - **B** (m), o espaçamento - **S** (m), o diâmetro de furação - **d** (mm), **W** - desvio padrão da precisão de furação (m), **h_f** - carga de fundo (m), **h_c** - comprimento da carga de coluna (m), comprimento da carga explosiva total - **L** (m) e a altura da bancada - **H** (m).

$$n = \left(2,2 - \frac{14B}{d}\right) * \sqrt{\frac{1 + \frac{S}{B}}{2}} * \left(1 - \frac{W}{B}\right) * \left(\left|\frac{h_f - h_c}{L}\right| + 0,1\right)^{0,1} * \frac{L}{H} \quad \text{Equação 3.8}$$

Tendo calculados o calibre médio (x_n) e o coeficiente de uniformidade, é possível, através da equação de Rosin-Ramler (Equação 3.9), calcular a curva da distribuição de classes granulométricas cumulante estimada do material desmontado. Equação P(X) que permite tal cálculo e em que apenas é necessário introduzir nela o valor do calibre (X) que pretendemos saber qual a percentagem de material de passará num crivo de igual luz (X).

$$P(X) = 1 - e^{-0,693\left(\frac{X}{x_n}\right)^n} \quad \text{Equação 3.9}$$

4. Ciclo das operações de Carga e Transporte

4.1. Decomposição das atividades em operações elementares

O ciclo de carga e transporte são duas das atividades subsequentes à operação extrativa de um depósito mineral, a segunda etapa e das mais onerosas de todo o processo, seguindo-se a elas, a beneficiação na instalação de britagem e crivagem. São por isso duas das etapas importantes, sobre as quais se requer apurado conhecimento e para antecipar problemas e diminuir os custos operacionais. Contudo, esta é também uma área de extrema dificuldade em ser controlada, em virtude da grande quantidade de equipamentos presentes, a complexidade dos percursos e interações existentes, bem como pela presença de variáveis (principalmente tempos de atividade) não determinísticas, pelo facto de muitas vezes estas dependerem de uma forte componente humana. Esta, na grande maioria de casos, ainda inevitável componente humana, traduz-se na presença de variáveis aleatórias, quando muito passíveis de serem estudadas estatisticamente, acarretando elevada complexidade à construção de modelos representativos das realidades presentes nas unidades produtivas. Porém, conseguidos e minimamente validados esses modelos, haverá sempre lugar a processos de simulação e deles, partir para tomadas de decisão em direção ao procurado aumento de produtividade.

Começando pela tarefa de carga do material resultante do desmonte, esta apresenta-se como complexa e o seu correto dimensionamento, isto é, a escolha correta do equipamento de carga e do seu modo operação, são fundamentais para a diminuição dos custos. Esta escolha de equipamentos de carga deve estar interligada com a forma da pilha, que, por sua vez, depende do planeamento da pega de fogo. Além desta interação com as características do desmonte, existe ainda a fragmentação das partículas a carregar e a produtividade necessária.

Em relação à operação de carga, esta pode em geral ser realizada, recorrendo a um equipamento munido de um balde de carga na sua frente, normalmente designada como pá - carregadora frontal, ou com recurso a uma retroescavadora, vulgarmente chamada de giratória

Quando a carga é realizada com recurso a uma pá-carregadora frontal, o seu modo de operação pode ser subdividido em diversos movimentos elementares, tais como Miranda em 1986, identificou, e que se encontram representados na Figura 7, e podendo ser descritos da seguinte forma:

- 1- Avanço até à pilha de material;

- 2- Carga do balde com o material do desmonte;
- 3- Retorno ao ponto de manobra;
- 4- Manobra - mudança de direção de avanço;
- 5- Avanço até ao equipamento de transporte;
- 6- Descarga;
- 7- Regresso à posição de manobra;
- 8- Manobra - mudança de direção para a pilha;
- 9- Retorno à pilha.

Este ciclo é repetido continuamente até a capacidade da máquina de transporte, por exemplo, um *dumper*, estar completa. Durante este processo é frequente as interrupções devido à necessidade de arrumação e limpeza da praça onde se movimenta a máquina de carga. Após o término da carga deste hipotético *dumper* é necessário assegurar que há outro para se carregar, ou então a pá-carregadora entra em paragem, que implica um custo que não apresenta qualquer vantagem económica.

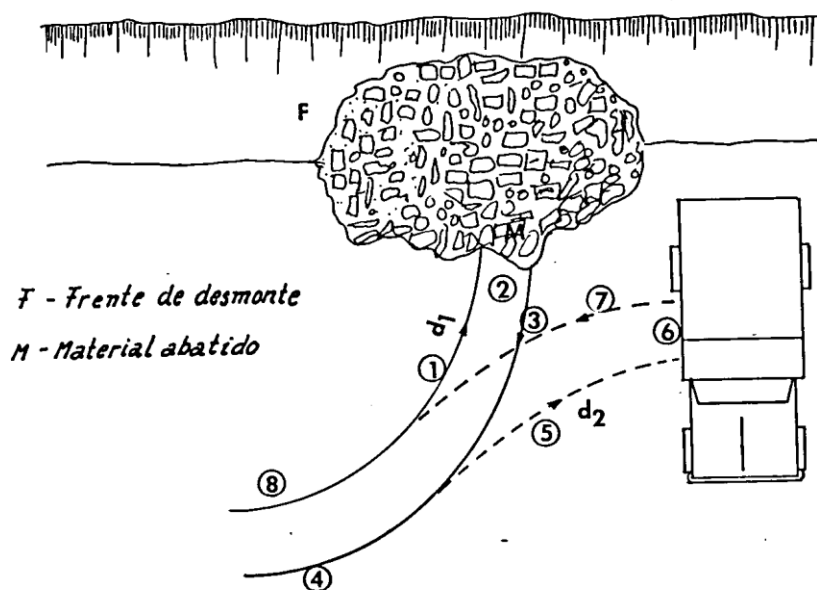


Figura 7 - Atividades elementares de uma Pá-Carregadora frontal (Miranda H. S., 1986)

Já quando a tarefa é realizada com o auxílio de uma retroescavadora, a operação de carga é ligeiramente diferente, uma vez que não há um frequente movimento de translação do equipamento de carga na praça, muito pelo contrário, o equipamento de carga, em geral, deve

tomar uma posição fixa sobre a pilha que permita operar a carga dos *dumpers*. A altura da base de trabalho que deverá ser compatível com as dimensões do braço da carregadora e garantindo-se a estabilidade e segurança do equipamento e do seu operador. Estando na posição adequada para a operação de carga, os movimentos devem restringir-se à rotação do corpo do equipamento e às manobras do braço e balde para recolha e descarga de material. Assim, o ciclo de carga destes equipamentos, após a sua estabilização na base de trabalho, pode-se resumir da seguinte maneira:

1. Rotação até ao local pretendido de carga;
2. Carga do balde;
3. Rotação até à caixa do *dumper*;
4. Descarga do material;
5. Rotação até ao local de carga;

A repetição deste ciclo permite uma carga quase continua e com menores tempos por ciclo, em relação ao anterior método de carga. Contudo, a arrumação e limpeza da praça é igualmente exigida. Neste método os equipamentos de transporte têm de estar mais perto da giratória, o que por vezes implica mais manobras para o *dumper*.

Já em relação ao ciclo de transporte esta é uma atividade dispendiosa e que é dependente do método de carga, da distância entre o ponto de carga e o ponto de descarga, bem como do ritmo de libertação de espaço nesse mesmo ponto de descarga, em geral uma tolva, para acolher novo volume de material. Já em relação às atividades elementares estas podem-se decompor em seis, estas também esquematizadas na Figura 8 :

1. Momento de carga;
2. Ida do *Dumper* até ao local de descarga;
3. Manobra para o local de descarga;
4. Descarga para a torva do britador primário;
5. Retorno até ao local de partida;
6. Posicionamento para o local de carga.

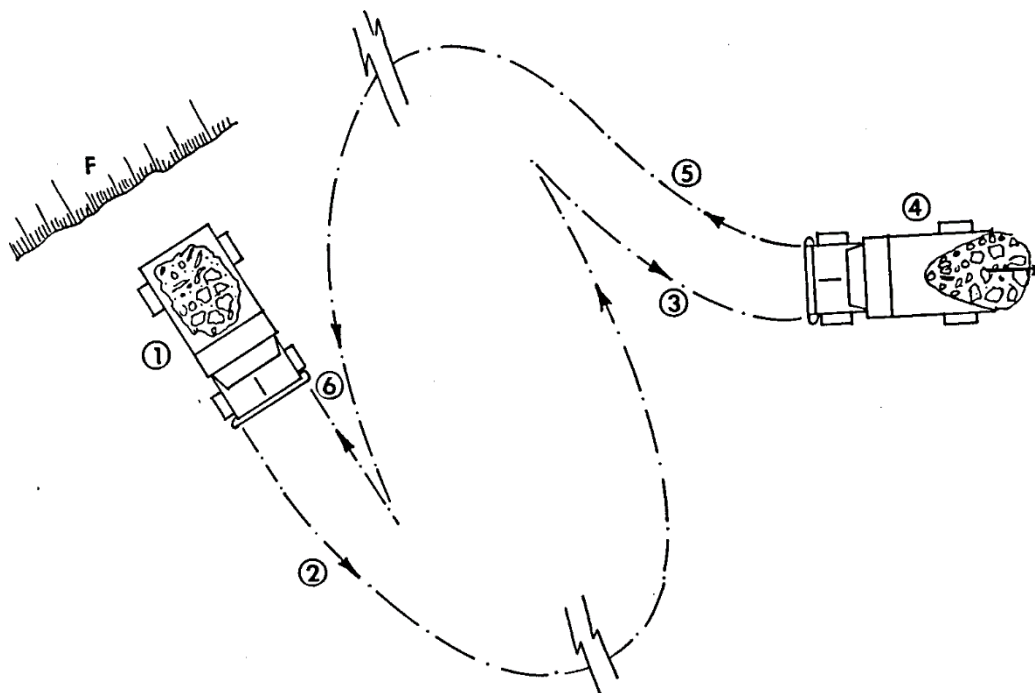


Figura 8 - Decomposição do transporte em atividades elementares (Miranda H. S., 1986)

O ciclo é repetido inúmeras vezes ao longo de um turno de trabalho, sendo que existem frequentemente ainda tempos de espera, não intencionais, ou para a carga junto das frentes de desmonte ou para a descarga no britador. Estes tempos representam períodos dispendiosos, que não apresentam qualquer tipo de rentabilidade/produção à exploração. Estes tempos de espera são materializados nas denominadas filas de espera para a carga e para a descarga, ocorrendo muitas vezes situações em que várias viaturas de transporte são visíveis em fila indiana à espera para se operar sua carga ou a descarga do material transportado. Do lado da carga, um reduzido número de máquinas de carga pode ser responsável pelas inatividades das máquinas de transporte e do lado da descarga, esses tempos podem ocorrer por baixa capacidade ou encravamentos do britador ou por um sub-dimensionamento da tolva armazém de alimentação do britador primário.

Aos ciclos de atividade produtiva das máquinas presentes para as operações de carga, e transporte, medido em unidades de tempo, costuma associar-se o termo de Ciclo Mínimo. Já quando a esse tempo se adicionam os intervalos de tempo de inatividade das máquinas, contabilizados em tempos de espera, o ciclo para a denominar-se de Ciclo Efetivo.

4.2. Importância do controlo da variabilidade dos tempos de atividade

Tanto os ciclos de carga como os de transporte podem apresentar uma variabilidade temporal muito dispersa. Essa variabilidade, ao ser estudada, é passível de ser representada sob a forma de histogramas de frequência e a eles serem ajustados a modelos que permitam conhecer e interpretar melhor esses ciclos. O grau de dispersão evidenciada por esses modelos serão uma imagem de que as condições de carga ou transporte não são constantes ao longo do tempo.

Coloquemos a nossa atenção na operação de carga e nos diversos parâmetros que são passíveis de incorporar nela a variabilidade no seu Ciclo Mínimo. Começemos pela pilha de material a ser carregada. A sua forma, maior ou menor dispersão na praça, bem como o arranjo que os fragmentos assumem nesta pilha, varia de momento para momento. A própria granulometria será variável nas sucessivas formas de pilha, o que conduzirá a uma variabilidade do tipo de carga de balde para balde. Se atendermos aos movimentos elementares realizados pelas máquinas de carga, sendo estas comandadas por um operador, será espectável que os tempos desses movimentos variem ao longo de uma jornada de trabalho. Esses tempos também serão influenciados pelo posicionamento relativo das máquinas de transporte relativamente à pilha e à zona de operação das máquinas de carga.

Sendo então, praticamente inevitável, a presença de tempos de movimentos elementares aleatórios, isso não significa que não seja possível obter valores médios desses tempos ou mesmo um valor de tempo mais frequente e que será claramente dominante. Ao mesmo tempo, poderão ser identificados valores extremos, superiores e inferiores, a esses valores dominantes, abrindo-se caminho para identificação das razões de tais ocorrências.

Ao sabermos que, por exemplo, em média um determinado *dumper* necessita de X segundos para ser cheio, o facto de nós depararmos com tempos de carga muito anómalos, imperativamente necessitamos de conhecer o motivo. Quando o tempo é significativamente inferior ao valor médio, ou valor mais frequente, pode indicar uma facilidade/eficácia da operação de carga. Já um aumento do tempo do ciclo de transporte, em geral é provocado por um aumento dos tempos de espera, de que falaremos de seguida, ou na carga ou na descarga (ou em ambas as situações), já que os tempos de viagem, de ida e de volta, são normalmente o mais uniformes.

Há ainda questões relacionados com os tempos de espera de que estes equipamentos de carga por vezes sofrem, por razões de não existência de equipamentos de carga no local ou por necessidade de limpar e arrumar a praça onde opera. Esses tempos são por vezes negligenciados, mas são, todavia, muito importantes. Mas quando se trata de modelar este fenómeno, os tempos “mortos” são por vezes descartados, e apenas se recolhem dados dos tempos efetivos de carga. Contudo a recolha da informação total do ciclo dar-nos-ia uma maior informação da totalidade do evento, olhando-o como um Ciclo Efetivo, possibilitando criar modelos mais reais de todo o processo de carga. Criar-se-ão, deste modo, condições para a identificação de problemas que estão a acontecer e reagir atempadamente a outros que possam surgir.

Quando falamos em ciclos de transporte o panorama é semelhante. Existem tempos muito diversos que compõem toda a azáfama da atividade de um equipamento de transporte. Além dos tempos de carga, descarga, de viagens, há ainda os tempos de espera, no local de carga e descarga, os tempos de manobras que não representam qualquer valor positivo à operação, mas que fazem parte do ciclo. São estas algumas das razões da grande dispersão dos tempos de ciclo, mas também o grande conjunto de interações humanas como um grande fator de dispersão desses tempos.

A construção de modelos representativos das atividades de carga e transporte numa pedreira, para além de necessariamente terem de ser validados a vários níveis, não será de esquecer que os mesmos terão de ser reajustados à sucessiva realidade evolutiva dessa pedreira. As frentes evoluem no tempo, as pistas são sucessivamente mais longas, ou mais curtas, as máquinas vão tendo cada vez mais horas de trabalho, etc. são fatores a serem tidos em conta para a atualização dos modelos que se construírem como representativos da realidade. Só assim, é que haverá mais segurança ao nível das decisões que se tomarem para permitir aumentos de produtividade através de reajustes pontuais, ou globais, das diversas atividades.

4.3. Interligação entre o desmonte e a granulometria

Há necessariamente uma interligação entre o desmonte e a granulometria, como já referido no anterior capítulo. Existe, como é sabido, uma clara interligação entre o consumo específico, e as dimensões do espaçamento, afastamento e tampão, com o estado final de fragmentação do desmonte. É natural que quanto maior a quantidade de explosivo utilizado por metro cúbico de rocha a desmontar, mais fragmentada a rocha irá ficar. Há ainda a realçar que, para além

da quantidade de explosivos empregues no desmonte, é necessário ter em atenção o tipo de explosivo que é empregue como carga de fundo e de coluna.

Tendo assim em atenção que a granulometria do material desmontado influencia a operação de carga, é importante refletir e melhorar as condições do desmonte para a obtenção de ciclos igualmente produtivos do equipamento de carga. A procura deverá ir na direção da implementação de menores tempos possíveis da operação de carga, mas tendo sempre em atenção os requisitos necessários ao material para a entrada no britador primário e estados subsequentes de beneficiação. É por isso um interessante desafio, não isento de alguma dificuldade, encontrar o ponto ótimo de todas estas as relações singulares.

Há ainda o aspeto da temporização do plano de fogo, que irá em grande medida influenciar também a granulometria do material. Aspetos de assegurar que o furo a detonar tem a frente de rocha, a uma distância não superior ao afastamento estimado, provoca uma melhoria na fragmentação e na de segurança da operação de detonação, mas também permite um melhor empurre/movimento das partículas e a sua consequente fragmentação.

Outra questão é a geologia do maciço, quando um maciço é muito fraturado e/ou relativamente brando, a fragmentação irá ser muito superior quando utilizado o mesmo consumo específico, em comparação com um desmonte num maciço são e pouco fraturado.

4.4. Efeito da fragmentação na produtividade de um equipamento de carga

A fragmentação é talvez a mais importante característica da pilha de material desmontado, para além da forma, compactação, altura, etc. A fragmentação pode ser caracterizada por:

- Gama de classes granulométrica;
- Índice de uniformidade;
- Percentagem de finos e de blocos.

Quando as partículas que compõem a pilha apresentam um grande índice de uniformidade, isto indica que as partículas são todas semelhantes, isto é, apresentam granulometrias muito próximas e isso vai prejudicar em grande medida o fator de enchimento do balde, uma vez que

mais espaços vazios serão criados no momento da carga. Isto pode acarretar uma diminuição da produtividade, já que, em cada ciclo de carga há uma diminuição da tonelagem carregada. Assim, para uma melhor carga, é aconselhável que o material a carregar seja representado por uma cuva granulométrica relativamente extensa, com um baixo índice de uniformidade. Tal característica, permitirá diminuir os espaços vazios dentro do balde, e por consequência, um aumento da quantidade de material carregado em cada ciclo.

Há também a questão do tempo de escavação/enchimento sobre a pilha por parte do equipamento de carga, que é influenciado pelo tipo de partículas encontradas na pilha e pela quantidade de espaços vazios. Quanto maior a quantidade de espaços vazios existentes na pilha, maior é facilidade com que o balde penetra na mesma, isto porque, há possivelmente menores espaços de contacto entre partículas o que não contribui como força de repulso ao balde. Mas também uma diminuição do tamanho médio das partículas provoca uma diminuição do tempo de escavação, já que há uma maior facilidade de penetração do balde, e também porque o operador não necessita de promover movimentos para acomodar as partículas de grande calibre no balde.

Em resumo, pode-se indicar que uma diminuição do calibre médio e do coeficiente de uniformidade, provoca uma diminuição do tempo de carga e um aumento do fator de enchimento do balde e por consequência um aumento da produtividade.

4.5. A operação de carga

A operação de carga é composta por diversas atividades elementares, às quais já demos destaque no subcapítulo - **Decomposição das atividades em operações elementares** - onde se abordou o esquema de carga praticado por dois tipos de equipamentos distintos. Não existindo um equipamento de carga dominante, a abordagem tornar-se-á genérica.

Numa exploração de pequena dimensão, do tipo pedreira a céu aberto, a carga é realizada com pequenos equipamentos compatíveis com a produção exigida. Contudo isso não significa que os seus custos, em relação aos custos totais, sejam menores. É por isso importante ter em atenção a operação, uma vez que os elevados custos operacionais, nos quais se contabilizam custos de combustíveis, óleos, pneus, de manutenções, dos operadores e ainda custos de aquisição, têm de ser inferiores aos benefícios que o equipamento traz à exploração.

Uma máquina de carga inicia o seu ciclo operacional quando assume uma posição concreta para essa atividade, isto é, após, por exemplo, uma ação de limpeza e arrumo do material na praça, seguida de um posicionamento num ponto intermédio da pilha, estando assim pronta para iniciar a operação de carga. Havendo movimentação e introdução do balde da máquina na pilha, segue-se um momento de enorme tensão no equipamento. É, por vezes, neste momento que os equipamentos são levados a regimes mais altos de dispêndio de energia e em que necessitam de maior potência empregue para poderem escavar da pilha do material fragmentado.

Há que realçar que existe neste momento da efetiva ação de carga do balde, duas grandes variáveis presentes, o tempo de escavação e a quantidade de material carregado. Estes dois fatores são importantes para aferir a produtividade e também a sustentabilidade do equipamento. O tempo de escavação, é o tempo desde a entrada no balde na pilha até a sua retirada carregado. Contudo, este é um fator que é influenciado pelas características do material da pilha, nomeadamente a quantidade de material de cada classe granulométrica presente, bem como pela dispersão e compactação do material da pilha. Em relação a quantidade de material carregado, este traduz-se, em geral, em percentagem, correspondendo à quantidade de material que o balde transporta em comparação ao volume do balde, isto é, da quantidade que permite encher o balde até a linha que une dois pontos do balde na transversal, como a representada na Figura 9.



Figura 9 - Equipamento de carga na rotação para a descarga final

Além destes fatores que influenciam a produtividade do equipamento de carga, há a considerar ainda o referido fator da componente humana presente, através da necessária presença de um operador da máquina, que irá, naturalmente, interferir também com o fator de enchimento e com o tempo de escavação. Essa interferência estará relacionada com a maior ou menor capacidade dos operadores em manobrar as máquinas. A formação teórica, mas principalmente prática, dos operadores é fundamental ser garantida, pois se ela for existente, poderão ser adicionados significativos incrementos à produção. Um operador com reduzida experiência pode provocar grandes atrasos na carga dos *dumpers*, uma vez que podem ter que se mais movimentos de descarga de material do que os necessários, por exemplo, por um deficiente enchimento do balde. Ou então pela ineficaz penetração do balde na pilha de material, o que igualmente provoca atrasos e possíveis quebras de produção.

Assim, na operação de carga é importante que tanto os equipamentos, como os operadores tenham e estejam nas melhores condições de trabalho, para que haja uma correta produtividade, assegurada pelo mínimo tempo de escavação e pelo máximo fator enchimento do balde. Uma última nota sobre a influência humana nas operações de máquinas com manobreadores: o grau de aleatoriedade intrínseco a estas atividades de manobra, poderá também ser influenciado por questões de caráter psicológico e emocional que estejam a ocorrer na vida dos operadores. Daí que, uma atenção especial a esses aspetos, no âmbito da

gestão de pessoal, deverá ser tida em conta, pois dela, poder-se-ão antecipar a deteção de problemas de produtividade e mesmo eliminar potenciais situações de risco.

4.5.1. Fator de enchimento e tempo de escavação

Como já referido, na operação de carga existem fatores que permitem avaliar a correta ação de carga, estes estão também, diretamente ligados à produtividade de uma operação. Estes fatores são o fator de enchimento e o tempo de escavação.

O tempo de escavação é a facilidade com que o balde do equipamento de carga é cheio. É a medida de tempo que é necessário para encher o balde, é por isso muito dependente da fragmentação. Numa situação ideal o operador conseguiria encher o balde com apenas um movimento, mas por exemplo, com a presença de blocos essa tarefa é muito dificultada.

Este fator é influenciado, igualmente, pela compactação da pilha e pela sua forma, repare-se que se a pilha for muito apertada será necessário mais do que um movimento para conseguir uma carga completa. A detonação, a sequência de disparo e frente de desmonte, vão influenciar em grande medida esta forma e compactação. Estas características devem também estar dependentes do tipo de equipamento de carga.

Em relação ao fator de enchimento do balde este mede a quantidade volumétrica da quantidade de rocha carregada pelo balde em comparação com a carga nominal do balde, como a esquematizada na Figura 9, com a reta vermelha que liga dois pontos do balde. Este parâmetro pode ser resumido pela Equação 4.1.

$$\text{Fator de enchimento (\%)} = \frac{\text{Volume do material carregado no balde}}{\text{Volume nominal do balde}} * 100 \quad \text{Equação 4.1}$$

Há, contudo, alguns aspetos que influenciam este parâmetro, como por exemplo, a presença de grandes blocos, pode aparentar um enchimento maior do que o realmente é, uma vez, que grande parte do volume do balde não está ocupado, estando apenas as partículas amontoadas de forma diferente. É por isso importante obter calibres muito dispersos na pilha, isto vai

permitir que todos os espaços vazios no balde sejam devidamente ocupados, e este fator possa realmente ser uma medida de produtividade do equipamento de carga.

Infelizmente, a otimização de ambos os fatores não é possível, uma vez, que a melhoria de um fator pode provocar um mau desempenho noutro. Por vezes para o aumento do fator de enchimento incita a um aumento do tempo de carga, é por isso importante entender como estes parâmetros estão interligados. Além das características do desmonte e da consequente pilha de material há ainda a interação com o operador do equipamento de carga e esta é a talvez a maior dificuldade que uma melhoria da produtividade pode enfrentar, uma vez que a interação humana não é possível de modificar, apenas de aperfeiçoamentos que permitem diminuir os tempo de ciclos e/ou percas de tempo desnecessária em tarefas não programadas.

4.6. Disciplinas de posicionamento e de operação

Existem diversas variantes de técnicas e recomendações sobre o tipo de posicionamentos que devem ser praticados pelos equipamentos de carga e transporte, no momento da operação de carga, para que se possa otimizar ambos os sistemas. Um bom posicionamento dos equipamentos de carga e de transporte permitirá uma diminuição significativa do ciclo de operação de cada equipamento, uma maior eficiência dos próprios equipamentos e uma minimização das ações dos operadores que não necessitarão de promover manobras mais complexas e inseguras. Quantificações, em ambiente experimental, de movimentações de pás carregadoras frontais que operam a carga de viatura de transporte mal posicionadas junto das pilhas de material a carregar, permitiram contabilizar mais de 400Km / ano, realizados a mais por essas pás carregadoras, relativamente a situações de um bom posicionamento das viaturas de transporte nesses cenários.

Algumas das técnicas propostas encontram-se no Mining Engineering Handbook - Society for Mining, Metallurgy, and Exploration (SME), 2011, e que pretendem retratar três situações distintas de posicionamento dos equipamentos de carga e transporte nas proximidades das pilhas de material desmontado. Nesse livro, sugere-se que um eficiente planeamento e seleção do equipamento de carga, apenas exigirá uma repetição de três ou quatro ciclos para completar uma carga completa de, por exemplo, um *dumper*. Naturalmente que, esse número estará

dependente da relação entre a capacidade do balde da máquina de carga e a capacidade da caixa de transporte do *dumper*. Porém, a experiência dita que esses três ou quatro ciclos, contribuirão para uma maior eficácia dos sistemas de carga e transporte.

No posicionamento destes equipamentos, é necessário ter em atenção o espaço disponível, e será com base nesse espaço, que decisões de posicionamento devem ser tomadas. Em espaços confinados é mais complexo a manobra o *dumper* mas também as do equipamento de carga. E essa complexidade será acrescida se esta operação for realizada através de carregadora frontal, que necessita de mais espaço de manobra. Aqui as condições da pista e praça de trabalho também são influenciadoras da produtividade, uma vez que más condições provocam mais atrasos, mais desgastes nos pneus e menor ciclos efetuados. Se a carga for efetuada com carregadoras frontais sob pneus a quebra de produção é ainda maior se não existir uma boa manutenção e preservação das pistas e locais de manobras.

Quando se recorre a máquinas carregadoras do tipo retroescavadora, estas estão montadas sob lagartas, o que impede a locomoção da mesma a uma grande velocidade, estando limitadas a espaços mais reduzidos. Contudo apresenta uma enorme vantagem que é sua versatilidade quando colocada em espaços mais apertados. Este equipamento permite normalmente um tempo de ciclo de carga mais pequeno, uma vez que a manobra, desde a posição de carga até ao momento da descarga, é efetuada com uma simples rotação do corpo da máquina, não havendo lugar a qualquer movimento de translação. As posições relativas entre as máquinas de carga e transporte, no momento da carga, não devem exceder um ângulo de 45° (ver Figura 10). Note-se que quanto maior for o ângulo entre os locais de carga e descarga mais tempo é necessário para a movimentação da máquina de carga, ou do braço de uma giratória, o que terá como consequência uma clara diminuição da produtividade do processo. Uma otimização deste ângulo, que como dissemos, deverá tender para os 45° permitirá uma maior repetição de ciclos por jornada de trabalho e um menor desgaste do equipamento.

O método de utilização de uma carregadora de pá frontal permite normalmente mais volume de rocha transportada por ciclo, contudo o aumento do tempo de manobras e a necessidade de pilhas mais dispersas, torna o método mais desvantajoso, contudo muito utilizado. A recomendação da SME para este tipo de carga deve permitir um otimizado ângulo tal como anteriormente referido.

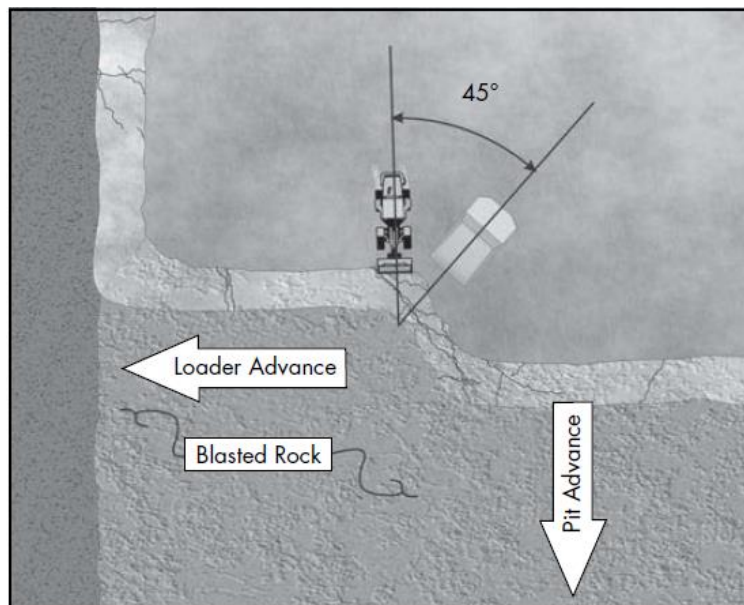


Figura 10 - Representação de uma atividade de carga otimizada com recurso a uma carregadora frontal (Society for Mining, Metallurgy, and Exploration (SME), 2011)

Esta técnica de carga é muito dependente da interação humana, por que existem manobras mais longas e de maior dificuldade, que testam a perícia do operador da pá-carregadora, e como já abordado, a variação do ângulo pode diminuir a produtividade. Há também a variável que está intrínseca ao próprio equipamento que é o ângulo máximo de viragem que este pode tomar, esta também pode ser uma variável que influencia o ciclo de carga. Com este tipo de equipamentos de carga, normalmente sob pneus, a limpeza da praça é mais facilmente assegurada tal como a sua mobilidade, que é muito superior em comparação com os equipamentos movidos sob rastos.

Quando existe relativamente pouco espaço, é preferível que apenas num dos lados da carregadora se encontrem *dumpers* estacionados para serem carregados, tal como mostra a Figura 11, onde também encontramos o trajeto que deve ser praticado pelo equipamento de transporte. Neste caso, em que a carga é realizada por uma escavadora frontal - *shovel* - esta não se encontra num ponto mais alto, isto é, numa parte intermédia da pilha, mas sim no piso de trabalho. Quando o processo é realizado com recurso a uma retroescavadora giratória, esta está numa posição mais elevada em relação ao *dumper*, mas a localização de ambos é semelhante à esquematizada. Neste caso, o *dumper*, em vez que se colocar numa posição lateral, pode colocar-se mais próximo da giratória. Esta técnica tem a vantagem de o equipamento de carga não ter de parar para que o *dumper* possa ser substituído. Além da técnica representada, existe uma pequena variante que indica que o *dumper* pode esperar

vazio no ponto de inversão de marcha, isto é, no ponto anterior ao início da manobra que se seguirá, e que será a viagem de ida para o local de carga.

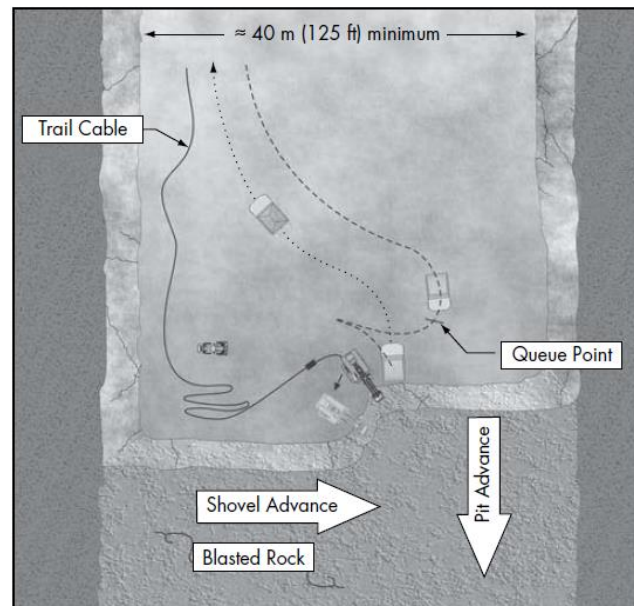


Figura 11 - Posicionamento do dumper em apenas um lado do equipamento de carga (Society for Mining, Metallurgy, and Exploration (SME), 2011)

Um outro método utilizado, recorre à possibilidade de posicionamento de dois *dumpers* para serem carregados, um de cada lado da carregadora, tal como o representado na Figura 12. Isto permite que os tempos de espera para o posicionamento das viaturas de transporte sejam significativamente menores. No entanto, esta solução obriga a uma melhor coordenação entre operados de todos equipamentos e à existência de mais espaço na praça de carga para que possam existir a coabitação de tantos equipamentos nesta área. Há ainda, a possibilidade de os *dumpers* esperarem no local indicado na figura, ou como na anterior situação, já numa posição de poder iniciar a marcha à retaguarda para ir para o local de carga. Esta solução requiere ainda mais atenção dos operadores dos camiões uma vez que é necessário assegurar que o *dumper* carregado já se encontre suficientemente afastado, para que não ocorram eventuais choques entre viaturas.

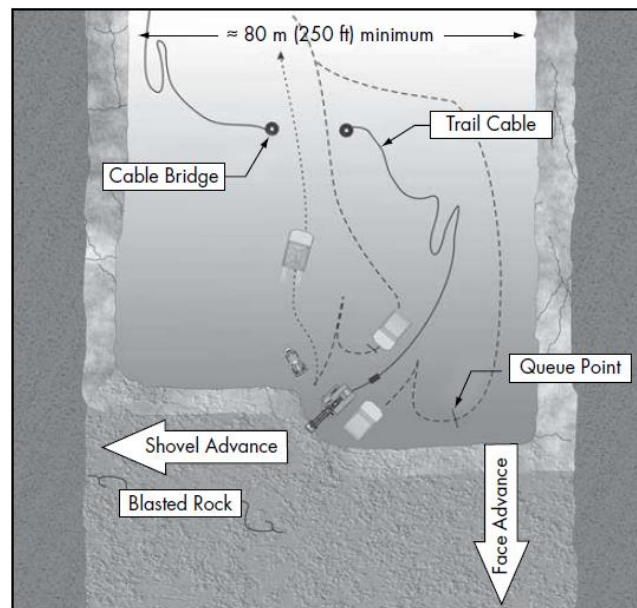


Figura 12- Posicionamento do *dumper* em dois locais à volta do equipamento de carga
(Society for Mining, Metallurgy, and Exploration (SME), 2011)

5. Recolha e Análise dos dados

5.1. Recolha de informação

Com o objetivo de entender como é que a fragmentação provocada pelo desmonte pode influenciar o ciclo de carga, e em especial na atividade elementar de carga, foi necessário recolher diversos dados para entender este fenómeno. Prestou-se particular atenção a dados provenientes do desmonte, nomeadamente relacionados com a pilha de material fragmentado e dos tempos de carga dos equipamentos. Foi assim desenvolvido um plano de recolha de informação, acordada entre o autor desta Dissertação, a empresa O-Pitblast,lda e com a Tagregados, do grupo DST - Domingos da Silva Teixeira.

Tendo como local para recolha de informação uma pedreira no norte de Portugal, muito próxima de Vila Pouca de Aguiar, num maciço granítico relativamente pouco alterado apresentando afloramentos de grande extensão. A parte superficial do maciço apresenta um granito amarelo e de baixa resistência o que acarretava a necessidade de operações de decapagem frequentes.

Esta zona alterada encontrava-se entre os cinquenta centímetros e os três metros, de profundidade, contudo, já eram realizadas pegas de fogo em algumas dessas zonas, o que produzia blocos de grande dimensão na zona do tamponamento, provocando frequentes atrasos na operação de carga, uma vez que eram necessários diversos momentos para o afastamento desses blocos. Quanto ao granito encontrado a uma maior profundidade este é classificado como um granito biotítico com plagioclase cálcica, que apresenta um grão médio a grosseiro, de textura porfiroide e coloração esbranquiçada. Quanto à fracturação encontrada esta é predominantemente subverticais, com duas famílias, uma com a direção NNE - SSW e NE - SW, e outra NNW - SSE e NW - SE, e uma terceira família sub-horizontal e que é normalmente paralela à superfície topográfica. (IBERDROLA GENERACIÓN S.A.U., 2012)

Em relação à caracterização geral do maciço este é considerado são, pouco fraturado e com um RQD (Rock Quality Designation) de 100%, na sua zona não alterada, isto é, após a camada superficial.

Após a realização da decapagem ou a retirada de todo o material desmontado da pega anterior, são recolhidos dados da nova bancada e da perfuração realizada para ter lugar uma nova pega de fogo. Recolheram-se informações de:

- Dados para modelação da frente da bancada;
- Localização pormenorizada das bocas dos furos;
- Medição da profundidade dos furos;
- Medição da inclinação dos furos.

Os dados referentes à frente de desmonte, foram recolhidos através da utilização do Perfilómetro Laser, do Departamento de Minas da FEUP. A partir desses dados, foi possível construir modelos digitais do terreno, evidenciando pormenores da frente, informação muito relevante quando se pretende estimar de forma eficaz dimensões de espaçamento e afastamento.

Quanto à mediação do comprimento dos furos, numa primeira fase ela foi realizada recorrendo a uma fita métrica, que permitiu observar a perfuração real realizada pelo perfurista. Numa fase posterior de recolha de informação a profundidade e inclinação dos furos foi realizada com recurso a um equipamento desenvolvido pela O-Pitblast, Lda, que permitiu obter os referidos parâmetros com o auxílio de uma aplicação instalado no *smartphone*. A conjugação destas informações, com o modelo digital da bancada, permitiu realizar uma estimativa dos afastamentos críticos e de possíveis problemas de projeções no momento da detonação, bem como a geração de blocos de rocha com dimensões exageradas relativamente à máxima pretendida, cerca de 1300 mm.

Foi também feito um registo da carga explosiva por furo e do respetivo comprimento do tamponamento. A recolha desta informação foi realizada recorrendo a um processo de identificação de cada furo e associando-o ao respetivo desmonte, tal como o exemplo que se encontra na Figura 13. Estes dados foram recolhidos com auxílio de uma *software* desenvolvido pela O-Pitblast utilizando apenas o telemóvel. Com esta aplicação é possível visualizar o planeamento do desmonte bem como identificar a localização de cada furo.

The image displays two screenshots of a mobile application interface for data collection. The left screenshot, titled "Borehole (22)", shows a form with sections for "BEHAVIOR", "CHARGE (KG)", and "GEOMETRY (METERS)". The "BEHAVIOR" section includes toggle switches for "Deleted:", "Water Presence:", and "Re-Drill", each with an information icon. The "CHARGE (KG)" section shows "Total Charge" as 59.8 with a right arrow and information icon. The "GEOMETRY (METERS)" section includes input fields for "Length:" (12), "Stemming:" (1.8), "Subdrilling:" (0.8), and "Angle:" (10), each with an information icon. The right screenshot, titled "Borehole (22) Charge", shows a list of charges. The first charge is "Cartucho DST - 60 - Extra Rouge" with a quantity of 1 (1.78 kg x 1). The second charge is "Emulsão - DST" with a quantity of 58. A red circular button with a white plus sign is located at the bottom right of the right screenshot.

Figura 13 - Recolha dos dados referentes à carga e tamponamento real do desmonte

Foi ainda realizada a recolha de informação do processo de detonação de cada desmonte através de filmagem em alta velocidade, realizada através de uma câmara que era colocada num local que permitia observar o desmonte em segurança. Esta captura de imagens que serviram para a identificação, por exemplo, de projecções, maus tamponamentos e iniciação de explosivos mais cedo do que o previsto.

Após o desmonte e respetiva dissipação dos gases tóxicos, eram colocadas barras sinalizadoras que serviam de escala, sobre a pilha do material desmontado e tiradas fotos, em diversas áreas da mesma para posterior tratamento, tendo em vista obter informação relativa às classes granulométricas geradas pelo processo de fragmentação com os explosivos. A recolha é então feita para cada desmonte, tal como exemplo demonstrado na Figura 14.



Figura 14 - Exemplo de colocação de barras sinalizadoras na pilha para recolha da informação para fragmentação

Após esta recolha, é realizada uma análise do grau de fragmentação com o auxílio da ferramenta digital WipFrag, desenvolvida pela WipWare, que permite estimar uma curva granulométrica cumulante do material desmontado. Este software, permite ainda calcular o D50 (ou k50) e o índice de uniformidade do material da pilha (n), gerando no final um documento semelhante à Figura 16.

No decorrer do processo de encontro das características da pilha, através do WipFrag, são elaboradas imagens que permitem reter uma informação parcial da fragmentação, tal exemplo encontra-se na Figura 15, onde através da cor e forma, é possível antecipar empiricamente o resultado. Sendo que é através deste tipo de análise que é elaborada a curva cumulante.

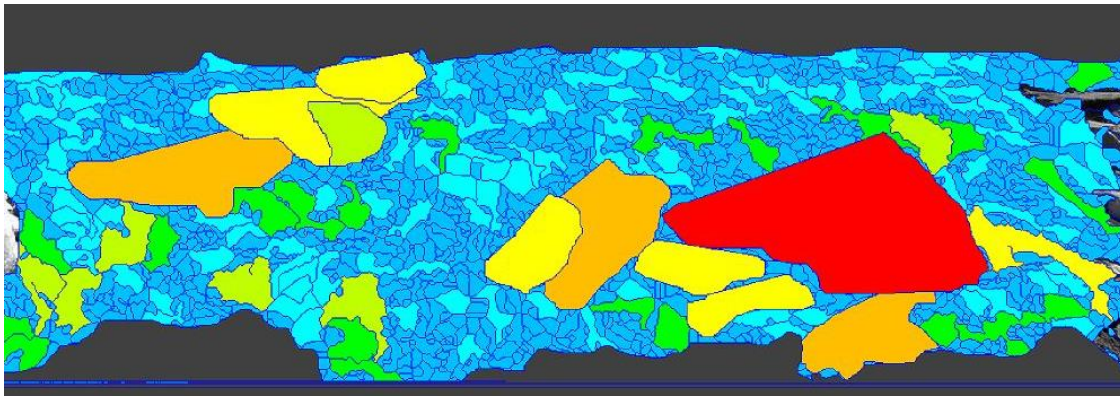


Figura 15 - Análise, por cor, do tamanho dos fragmentos encontrados na pilha

Posteriormente é elaborada a respetiva curva cumulante. Isto permite encontrar o K50, neste caso considerado D50, e o coeficiente de uniformidade, n , da pilha de material. Para melhor caracterizar a pilha total, esta é dividida em partes e são recolhidas imagens e realizada a análise no WipFrag, de cada parte. No final, é encontrada a curva granulometria do desmonte tendo por base as curvas cumulantes de cada parte.

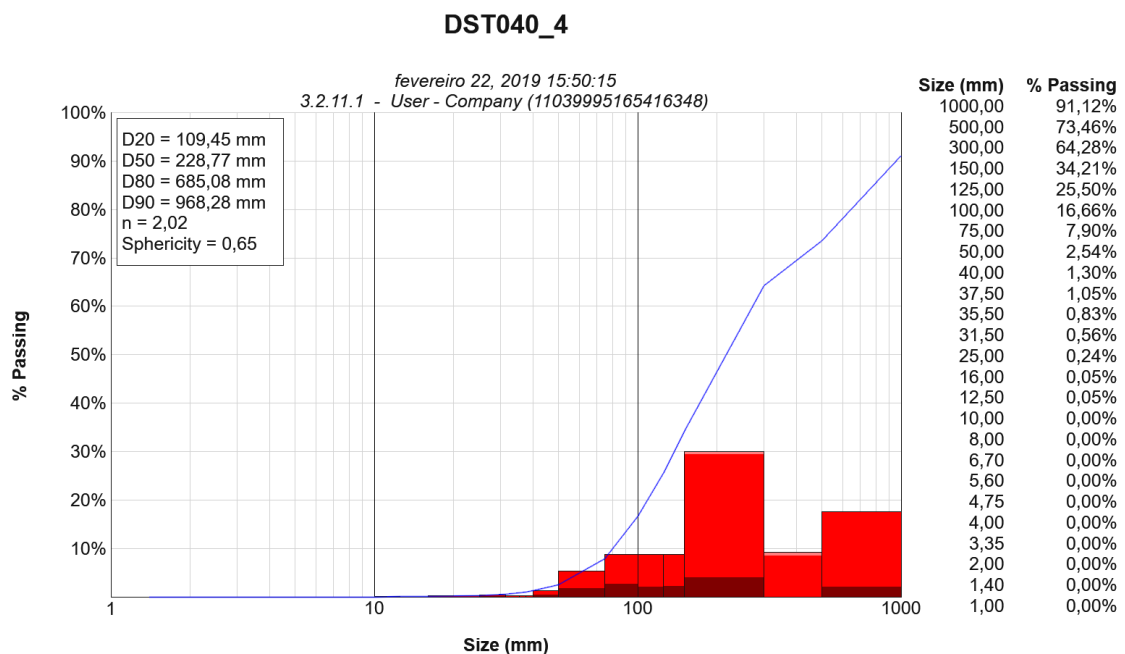


Figura 16 - Exemplo dos resultados obtidos através do WipFrag para a fragmentação

Contudo e para compreender a interação existente entre o grau de fragmentação e o tempo de ciclo de carga, é necessário recolher mais dados, que permitam correlacionar as características da pilha de material e esse tempo de ciclo do equipamento de carga.

A tarefa de carga, na referida, pedreira era assegurada por retroescavadoras giratórias, que se colocavam num ponto intermédio da pilha. Desta posição fixa, e por movimento de rotação, o braço e balde destas máquinas acediam a diversos pontos do material desmontado, e depois de carregado o balde, movimentavam-no em direção à caixa do respetivo *dumper* estacionado para ser carregado. Para uma uniformização na recolha dos tempos, foi considerado que o ciclo se iniciava quando a giratória começa a rotação de retorno ao local de carga, e o fim do ciclo como o momento que o equipamento descarrega por completo o conteúdo do seu balde. Além do tempo do ciclo foi também registada uma estimativa do fator de enchimento do balde, quantificada em percentagem de enchimento do balde, por uma observação visual simples, levada a cabo pela pessoa que estava a recolher tempos de ciclo (ver Figura 9).

Os valores das variáveis em estudo, foram inicialmente registadas manualmente e com auxílio de um cronómetro. De seguida, eram transferidos para uma folha Excel. Numa fase seguinte, Colegas desta empresa parceira O-Pitblast, deste trabalho de Dissertação, projetaram e implementaram uma aplicação para *smartphone*, que permitia a recolha de todos os dados e depois tratá-los e analisá-los. A informação recolhida era armazenada de forma simplificada como demonstrada na Tabela 2.

Tabela 2 - Exemplo da informação recolhida em cada ciclo de carga

Data	Desmonte	Fator de enchimento (%)	Nº. Equipamento	Tempo de ciclo (s)
12/02/2019	DST - 038	120	70	14,37
18/02/2019	DST - 039	140	70	16,14
18/03/2019	DST - 042	90	55	13,46

Os dados referem-se a ciclos de carga de dois equipamentos distintos, distinguidos através do número que lhes foi atribuído. Com o número 55, o equipamento de carga era uma Komatsu PC360LC/NLC - 11. O outro equipamento monitorizado era uma Komatsu PC490/NLC - 11, que apresentava o número 70. Os dados foram devidamente separados tendo em atenção o modelo do equipamento que carregava o material da pilha. As capacidades dos baldes das máquinas eram diferentes, ficando essa discrepância bem evidenciada através da Tabela 3.

Tabela 3- Capacidades máximas de carga dos equipamentos acompanhados (Cimertex, 2019)

Equipamento de carga	Capacidade do Balde (m³)	Potência (kW / HP)
Komatsu PC360LC/NLC - 11	2,66	202 / 271
Komatsu PC490/NLC - 11	3,50	270 / 363

5.2. Análise dos dados recolhidos

5.2.1. Dados totais e por equipamento

A análise dos dados foi realizada tendo como objetivo entender os fenómenos de interação entre o desmonte e a carga, mas também permitir a modelação da atividade de carga. Os tempos recolhidos neste tipo de atividades apresentam maioritariamente uma grande aleatoriedade exibindo, no entanto, e como seria de esperar, valores médios e/ou valores de maior frequência. Há ainda valores muito afastados dos valores médios, que embora façam parte do sistema, são descartados uma vez que prejudicam a interpretação dos dados, ou interferem na análise realizada sobre os mesmos.

A análise dos dados inicia-se com uma representação gráfica dos valores das variáveis medidas, através de um histograma de frequências que permite visualizar os valores que apresentam maior frequência absoluta dos dados recolhidos. Esta representação permite igualmente uma caracterização da população. No histograma da Figura 17, é possível observar um exemplo deste tipo de representação relativa a uma atividade. Neste exemplo, a totalidade de ciclos recolhidos ascende a 6284 registos agrupados em classes de tempos de ciclo compreendidos entre os 6 e os 40 segundos.

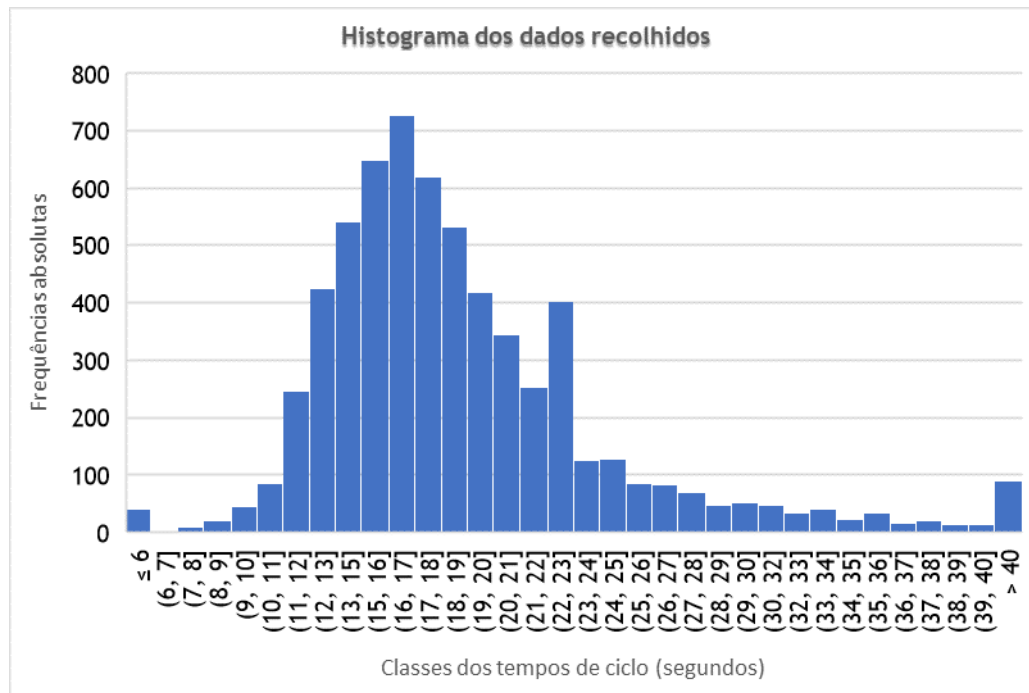


Figura 17 - Histograma dos ciclos de carga recolhidos

Há, contudo, muitos valores que não representam o fenómeno da carga, ou porque foram mal recolhidos ou porque são valores muito longínquos do valor médio, e por isso devem ser descartados. Esta seriação faz parte do processo de validação, e foi implementada através da seguinte equação de exclusão dos valores anómalos, onde t é o tempo de ciclo a ser avaliado; μ é a média e σ o desvio padrão da totalidade dos dados.

$$se: t < \mu + 2 * \sigma \quad E \quad t > \mu - 2 * \sigma \quad \text{Equação 5.1}$$

Assim, a validação é conseguida com recurso à média, ao desvio padrão e uma constante (2) que assegura que os dados recolhidos não estejam muito dispersos e que garante 95,45% de grau confiança de que o valor que melhor representa o ciclo de carga se encontra nesse intervalo de tempo, eliminando os restantes valores que iriam influenciar negativamente a análise dos dados. Esta tarefa vai limitar os dados aos que estão compreendidos entre os 7 e os 32 segundos por ciclo, sendo os restantes valores descartados.

Na Tabela 4 estão representados dados globais originais e os dados após a análise anteriormente referida, o que permite comparar as duas situações. Relativamente à população total de dados recolhida, ela surge com uma média de 19,3 segundos por cada ciclo de escavação. Já em

relação aos dados validados, isto é, aqueles que sofreram uma filtragem, a média passa para os 18 segundos por ciclo de carga. É de notar que há uma efetiva eliminação de ciclos a tratar, cerca de 323, o que significa uma perda de aproximadamente 5% em relação à totalidade de ciclos registados.

Tabela 4 - Dados estatísticos dos dados originais e dos dados após validação

	Dados originais	Dados validados
Média	19,3	18
Desvio padrão	6,0	4,3
Total de dados	6284	5961

Além da análise global, é possível efetuar uma divisão dos dados entre os equipamentos de carga em uso. Esta informação separada permite obter os valores médios dos tempos de carga para cada equipamento, o que permitirá mais a diante neste trabalho, efetuar uma modelação do processo e assim poder estimar produtividades das diferentes máquinas, detetar e prevenir problemas a elas associados. Os histogramas dos tempos de carga para cada equipamento encontram-se no Anexo 2 deste documento, respetivamente nas Figura 34 e Figura 36. Os dados utilizados para a construção dos histogramas referidos, são dados já validados, isto é, dados que já passaram pelo “filtro” que anteriormente foi apresentado e que está dependente da média e do desvio padrão dos respetivos dados referentes a cada retroescavadora giratória.

Em relação aos dados por equipamento, podemos encontrar na Tabela 5 a informação relativa ao tempo médio de ciclo, desvio padrão e total de ciclos analisados e validados. Isto permite afirmar que o equipamento que apresenta menor capacidade tem um tempo médio de ciclo maior em relação ao equipamento de maior capacidade. Há que realçar que os ciclos analisados para o equipamento Komatsu PC360 (55) foram menores do que os recolhidos para o outro equipamento de carga.

Tabela 5 - Dados estatísticos sobre os dois equipamentos de carga referentes aos ciclos recolhidos

Nº. Equipamento	Média (s)	Desvio padrão (s)	Ciclos validados
55	19,1	5,4	1950
70	17,0	3,9	4002

Para procurar melhor entender esta atividade de carga, foram realizados diversos gráficos de pontos com as frequências relativas dos tempos de ciclo, o que possibilita visualizar a dispersão dos dados em torno do valor mais alto, mas também o comportamento do sistema. Na Figura 18 encontramos um destes gráficos referentes aos dados gerais, isto é, a totalidade dos dados recolhidos pelos dois equipamentos de carga e posteriormente validados. Em relação aos gráficos de dispersão com as frequências relativas dos ciclos de carga dos diferentes equipamentos de carga, estes decidiu-se serem disponibilizados em anexo, dado o seu elevado número. Em relação ao equipamento nº 55, o gráfico de dispersão encontra-se na Figura 35 do Anexo 2. Já na Figura 37 do mesmo anexo, encontramos o mesmo gráfico, mas relativo aos ciclos de carga realizados pelo equipamento nº 70.

Quando se analisam estes três gráficos de dispersão, percebemos que não há grandes discrepâncias entre si. Destaca-se que os dados do equipamento nº 55 se encontram mais dispersos, uma vez que o valor do desvio padrão é significativamente maior. Em relação aos dados do equipamento nº 70, estes apesar de estarem mais constrangidos, apresentam um comportamento muito semelhante ao do outro equipamento, mas como já vimos, apresenta um valor médio mais baixo. Realizando uma apreciação dos gráficos de dispersão para cada equipamento e os dos dados gerais, é de notar que os todos os gráficos apresentam um comportamento semelhante, em especial ao valor de frequência relativa mais elevada.

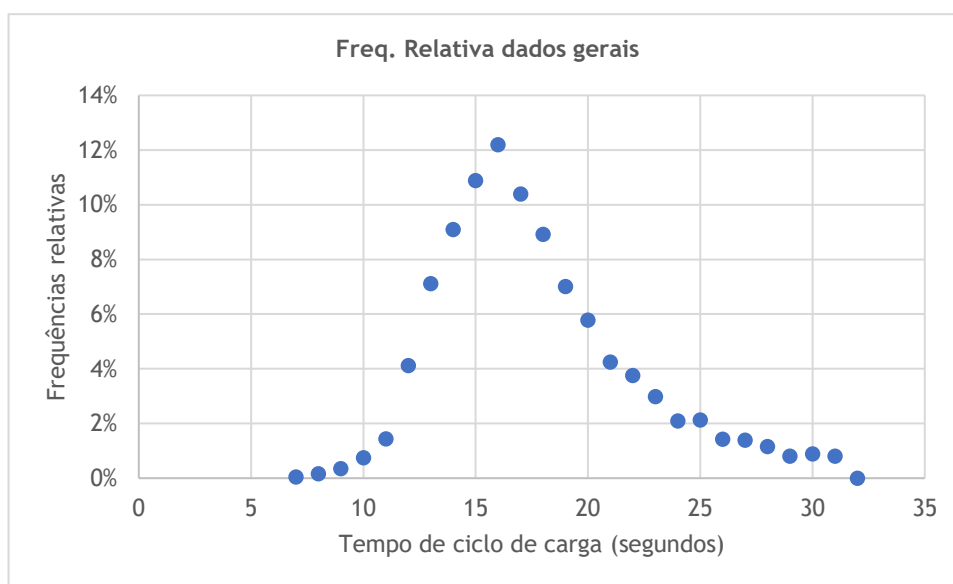


Figura 18 - Gráfico de dispersão com a frequência relativa dos dados totais referentes aos ciclos de carga

Para melhorar o conhecimento da atividade em estudo, é possível passar-se de uma amostragem pontual, para uma situação de análise contínua, isto é, a substituição de uma amostragem pontual, pela construção de um modelo que permita representar a atividade, exibindo aproximações mais fidedignas para todos os pontos das frequências relativas.

Assim, com base nas frequências relativas, é possível representar o comportamento do equipamento em estudo na realidade ajustando-o a uma curva com um comportamento de uma distribuição tipo Poisson, tal como a observada na Figura 19.

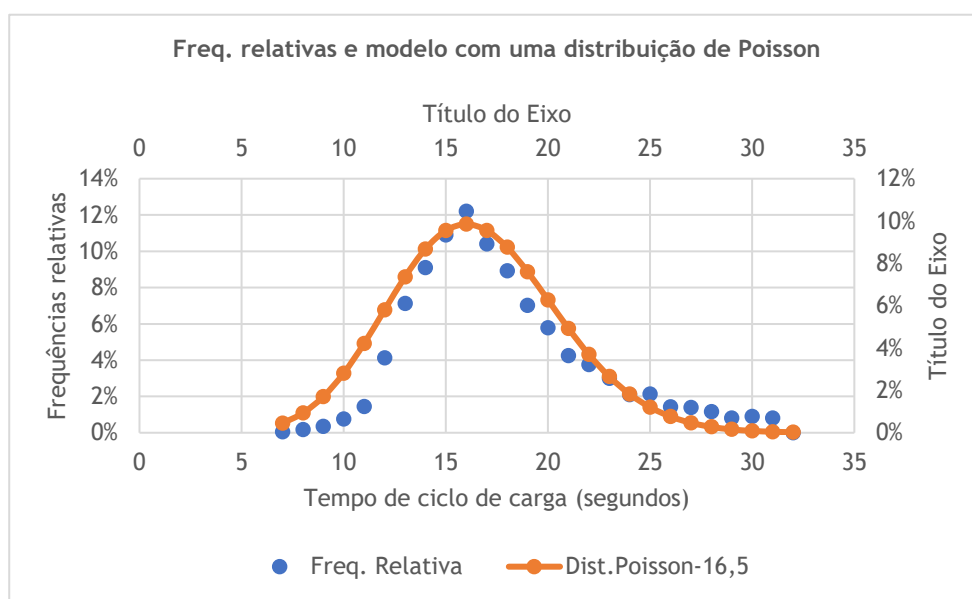


Figura 19 - Frequências relativas e modelo com base numa distribuição de Poisson de média 16,5 segundos

Uma aproximação da realidade a um modelo, naturalmente, traz erros associados. Contudo, um modelo como o de uma distribuição de Poisson, em que é possível conhecer qual a probabilidade de cada ciclo demorar um determinado tempo, traz inúmeras vantagens, destacando-se o seu aproveitamento para a dimensionamento de um correto tempo de carga para uma determinada pilha de material.

Uma distribuição de Poisson é descrita pela Equação 5.2, onde x é o valor para o qual queremos encontrar a frequência ($f(x)$) através do conhecimento da média λ .

$$f(x) = \frac{\lambda^x * e^{-\lambda}}{x!} \quad \text{Equação 5.2}$$

Quanto à função densidade de probabilidade desta mesma distribuição, esta é descrita através da Equação 5.3, e que permite calcular qual a probabilidade de um ciclo demorar um determinado tempo. Esta expressão não é mais que o somatório infinitesimal da anterior expressão.

$$F(x) = P(X \leq x) = \sum_{k=0}^x \frac{\lambda^k * e^{-\lambda}}{k!} \quad \text{Equação 5.3}$$

Esta distribuição permite analisar problemas que envolvam uma variável aleatória, como os ciclos de carga, e que se distribuem ao longo do tempo ou do espaço. Outra característica a ela inerente, diz-nos que os diversos acontecimentos são independentes, e que estes também acontecem em intervalos de tempos distintos.

No caso da Figura 19, onde está representada a totalidade dos dados recolhidos, o modelo da distribuição de Poisson apresenta uma média de 16,5. Será importante realçar que esta média pode ser diferente da média real dos dados. Neste caso a média global é de 17,7 segundos por ciclo de carga. Assim, é sempre necessário realizar uma aproximação do modelo, e da média escolhida, através da sensibilidade, isto é, através da observação do comportamento real e do comportamento do modelo. Quando realizado sob a forma de minimização dos desvios entre o modelo e a realidade, faz com que o modelo apresente a curva com a média próxima à real, mas o comportamento da curva é muito distante do comportamento que foi recolhido no campo. O processo de cálculo dos desvios encontra-se na Tabela 11 do Anexo 2, o qual permite reconhecer que existe um erro associado a este modelo de 22%. Contudo, o comportamento da curva modelada é em tudo semelhante ao das frequências relativas.

Como já referido, a modelação do ciclo de carga por equipamento, permitirá caracterizar cada máquina giratória e prever os tempos de carga de uma determina pilha resultante de um desmonte. Para esse efeito, na Figura 20 encontramos as frequências relativas recolhidas do equipamento nº 55 e o respetivo modelo ajustado, tendo por base uma distribuição de Poisson de média 17,5 segundos. Repare-se que os valores recolhidos apresentam uma média de 19,1 segundos por ciclo de carga. Em relação aos erros associados a esta modelação, eles ascendem a 26%, sendo de realçar que as maiores diferenças se encontram à esquerda da média.

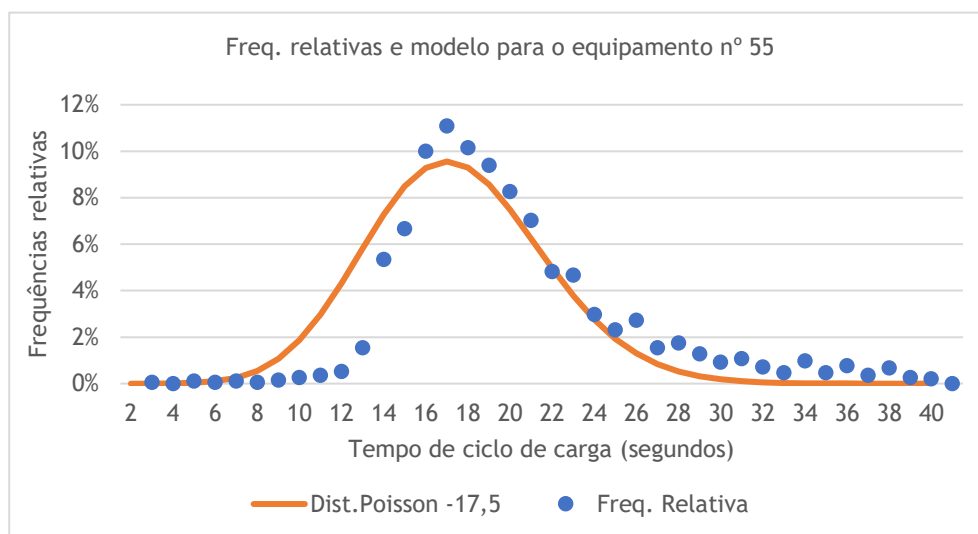


Figura 20 - Frequências relativas e modelo com base numa distribuição de Poisson de média 18 segundos que descreve o comportamento do equipamento nº 55

Quanto ao equipamento nº 70, equipamento de maior dimensão e maior capacidade, a modelação é igualmente obtida através de uma distribuição de Poisson, mas neste caso com média 16,5 segundos. Contudo, a média dos valores recolhidos é de 17, o que ao contrário do que normalmente acontece, não se afastam muito as respetivas médias. A representação do modelo, tendo por base as frequências relativas deste equipamento, encontram-se na Figura 21 .

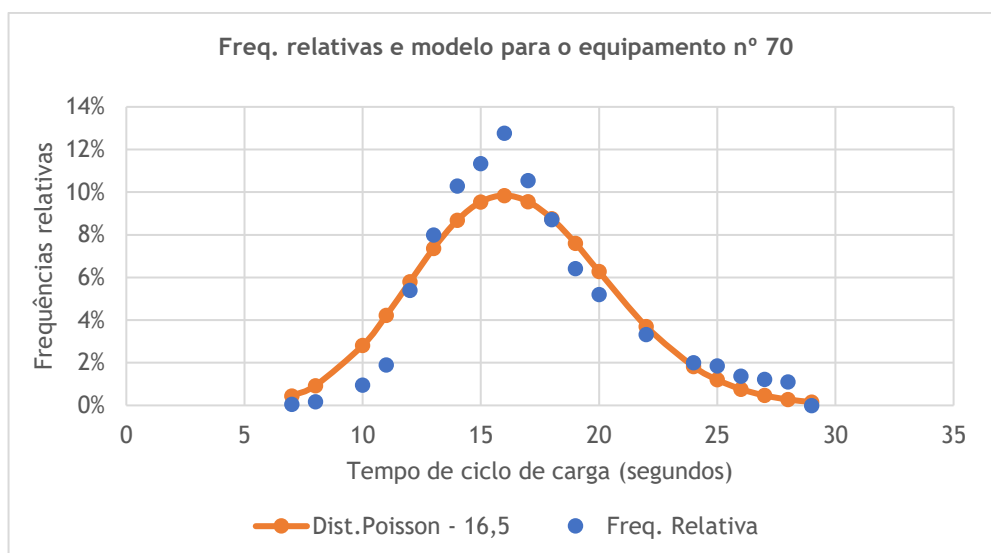


Figura 21 - Frequências relativas e Distribuição de Poisson de média 16,5 segundos que caracteriza o equipamento nº 70

5.2.2. Dados por desmonte

Processo semelhante ao anterior, pode ser realizado para cada desmonte acompanhado e monitorizado, o que veio permitir conhecer melhor as condições do arranque de material fragmentado da pilha. Foram acompanhados um total de sete desmontes, com o respetivo registo dos tempos de ciclos de carga, sendo que ainda foi acompanhada mais uma operação de carga isolada. Ocorreram, por vezes, situações em que ambos os equipamentos carregaram a mesma pilha e, por isso, foi necessário separar a informação recolhida por desmonte e posteriormente por equipamento de carga. Mas, tal como na anterior situação, aqui também foi realizada a validação com recurso à média total dos dados e o respetivo desvio padrão, o que permitiu uma seleção dos valores que se encontram em torno da média.

No cômputo geral, foram obtidos valores médios da demora da realização do ciclo de carga, em segundos, para cada desmonte. Esses valores encontram-se na Tabela 6, e dizem respeito a valores médios relativos a ambos os equipamentos de carga. Podemos encontrar igualmente a contagem de ciclos de carga validados por equipamento de carga acompanhado, perfazendo um total de 6103 ciclos.

Tabela 6 - Tempos médios de ciclos de carga, por desmonte, e total de ciclos validados por equipamento de carga

Desmonte	Tempo médio (s)	Equip. nº 55	Equip. nº 70
		Total de ciclos	Total de ciclos
DST - 038	18,6	0	725
DST - 039	17	0	1680
DST - 040	15,5	183	0
DST - 041	16,4	0	537
DST - 042	19	881	56
DST - 043	17,8	370	751
DST - 045	19,3	352	456
DST - 047	17,4	112	0
	Total	1898	4205

É notório, pela anterior tabela, que há desmontes muito bem caracterizados através da recolha de tempos de ciclos de carga, embora dois deles apresentem um baixo valor de dados recolhidos. Mesmo assim, estes serão analisados. Um dos desmontes acompanhados foi o DST - 043, em que a pilha por ele formada é carregada com o auxílio dos dois equipamentos disponíveis. Mais uma vez, em ambos os casos, a abordagem será em tudo semelhante. Para este caso, a média dos dados validados é de 19,3 segundos para os tempos de ciclo do equipamento nº 55. O respetivo histograma encontra-se na Figura 22. Contudo os valores mais dominantes encontram-se ligeiramente mais baixos. Quanto ao histograma referente aos dados de ciclos de carga realizados pelo equipamento nº 70, estes encontram-se representados na Figura 51 no subcapítulo Dados e análises do desmonte: DST - 043 do Anexo 2.

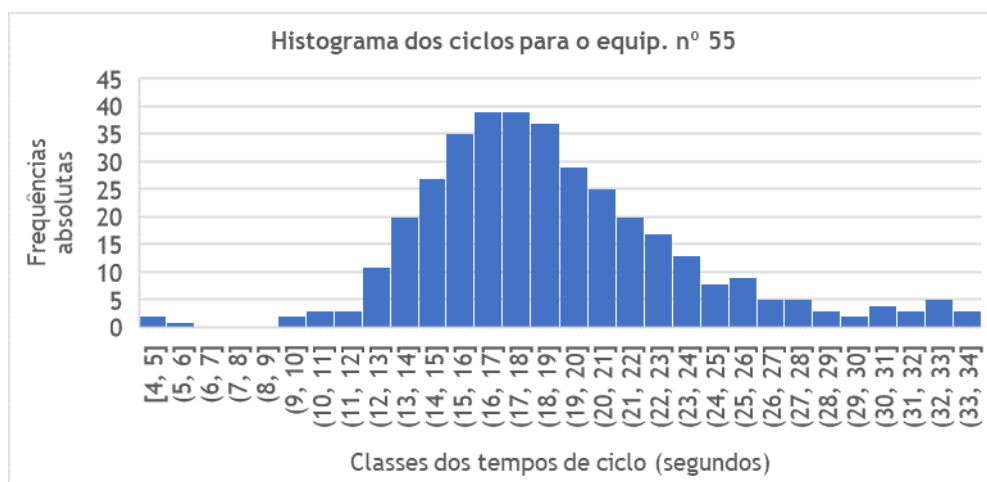


Figura 22 - Histograma dos ciclos de carga para o equipamento nº 55 da pilha formada pelo desmonte DST - 043

Já referente ao gráfico de dispersão das frequências relativas destes mesmos dados, eles podem ser observados na Figura 23. Nela podemos constatar que existe uma forma muito característica da representação deste tipo de eventos, realçando-se a respetiva aleatoriedade, bem como uma gama de valores que apresentam maior frequência de ocorrência.

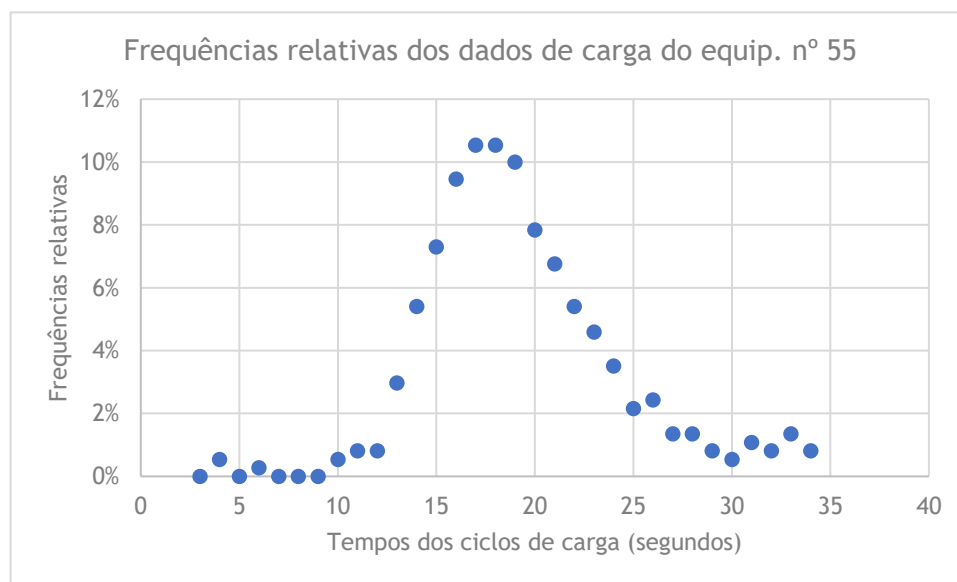


Figura 23 - Gráfico de dispersão da frequência relativa dos dados de carga do desmonte DST - 043 com o equipamento nº 55

Para os restantes desmontes e para os diferentes equipamentos que carregaram a pilha de material para os *dumpers*, semelhantes histogramas e gráficos de dispersão foram construídos e encontram-se no Anexo 3 deste documento. Já em relação às médias de cada desmonte, estas encontram-se na Tabela 7. Para além da informação por desmonte, está também realçada a média de demora por ciclo, para cada retroescavadora giratória utilizada. Esta informação, complementada com a informação do desmonte, irá permitir perceber o tipo de comportamento que há entre a fragmentação e o respetivo tempo de carga do material desmontado.

Tabela 7 - Tempos médios por desmonte e por equipamento de carga

Desmonte	Tempo médio combinado (s)	Equip. nº 55	Equip. Nº 70
		Média real (s)	Média real (s)
DST - 038	18,6	-	18,6
DST - 039	17	-	17
DST - 040	15,5	15,5	-
DST - 041	16,4	-	16,4
DST - 042	19	19	18,9
DST - 043	17,8	19,3	17
DST - 045	19,3	20,6	18,2
DST - 047	17,4	17,4	-

Com dados encontrados na tabela acima é evidenciado que o equipamento nº 55, apresenta valores médios de ciclo superiores ao equipamento nº70, embora este último tenha uma capacidade superior.

5.2.3. Calibre médio versus Tempo de carga

Para uma aproximação ao proposto como objetivo desta Dissertação, é necessário relacionar o calibre médio do material desmontado com o tempo efetivo de carga da respetiva pilha constituída por esse material. Para tal, tem-se por base a informação já apresentada, restringida aos dados mais centrais e que melhor representam o ciclo de carga, bem como a

informação recolhida através da análise de imagens realizada no software WipFrag e que permitem uma aproximação real da granulometria do desmonte. Recorrendo a estes dados, foi construído o gráfico da Figura 24, onde se encontram representados cada desmonte, através do D50 dos fragmentos da respetiva pilha de material, correlacionados com o tempo médio de ciclo. Neste caso não há distinção entre os diferentes equipamentos que podem carregar a pilha. É de notar que existem dois grupos de dados, um que se encontra a calibres inferiores a 300 mm e outro com valores de calibres médios acima desse patamar. O D50, é o calibre onde cinquenta por cento do material que compõem a pilha passa por uma determinada malha. Assim, e a título de exemplo, um D50=500 mm, indica que 50% do material da pilha passaria por um crivo de 500 mm, ou de outra forma, que 50% do material apresenta um calibre inferior ou igual a 500 mm.

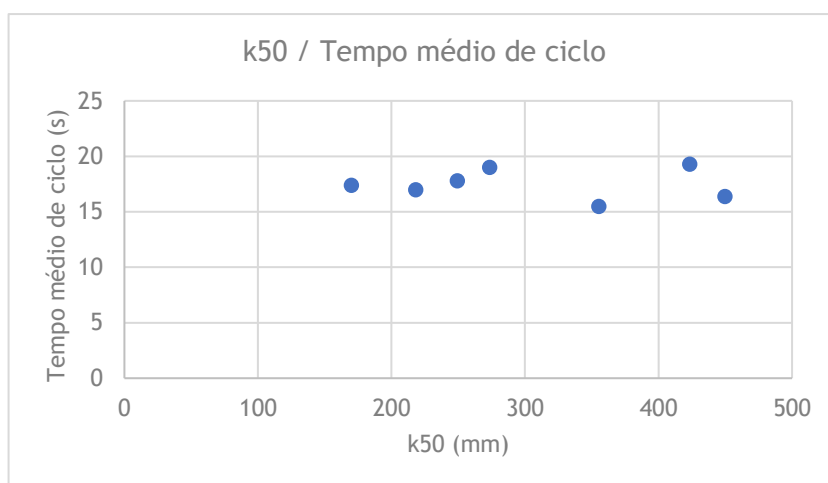


Figura 24 - Gráfico de correlação entre o calibre médio e o tempo médio de carga por ciclo

Quando realizada uma análise semelhante, mas distinguindo-se os equipamentos de carga que realizaram tal tarefa, tal como a representação da Figura 25, onde também aqui existe uma clara separação em dois grupos dos dados, isto leva-nos a admitir que existem propriedades que distinguem esses dois grupos. É de referir que, com base nestes dados, não é possível admitir que quanto maior é o D50 maior será o tempo de ciclo de carga, algo que seria de espetável.

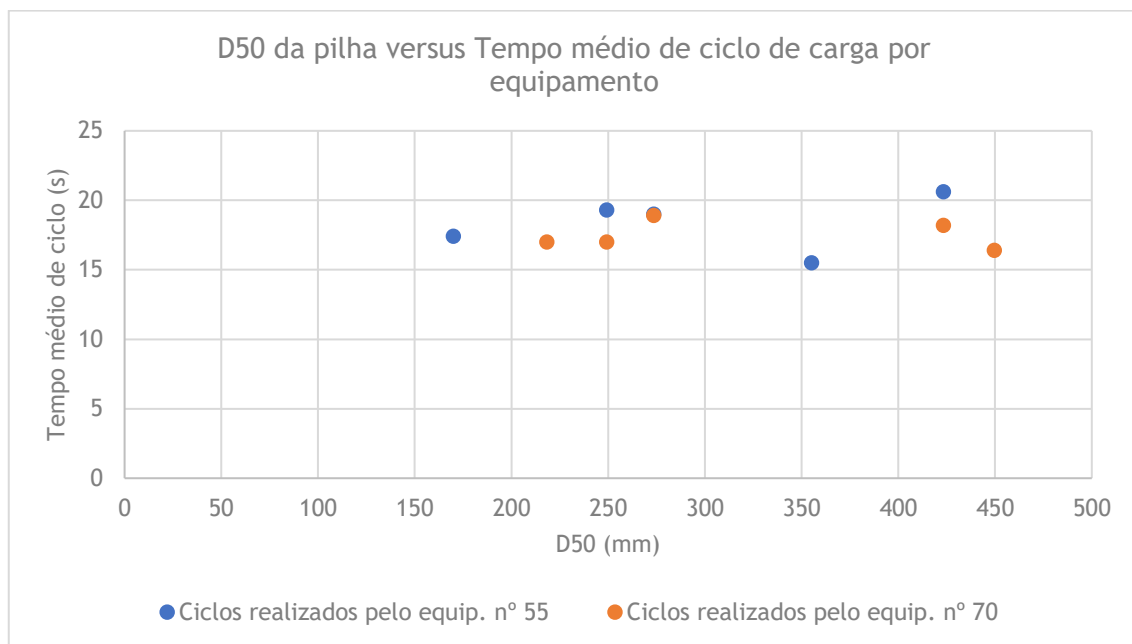


Figura 25 - Tempo médio de ciclo de carga em relação ao calibre médio, por equipamento

Realizando uma análise por clusters, isto é, famílias de pontos que se evidenciam na anterior figura, tentou-se encontrar razões para tal separação, uma vez que esta ocorria em ambos os equipamentos de carga. O fator que estaria a decompor os dados em duas famílias poderia estar relacionado com a interação humana, com questões meteorológicas, propriedades intrínsecas do próprio maciço ou razões relacionadas com o desmonte realizado.

Constatou-se que as razões da separação eram derivadas da localização do desmonte, isto é, bancada diferentes na pedreira que tinham propriedades distintas entre si e fatores relacionados com os explosivos empregues numa das pegadas de fogo. Para evidenciar tal situação foram levados a cabo estudos de correlação entre os dados totais e os dados separados por clusters.

Num panorama total dos dados, a correlação era praticamente nula. Já quando apenas relacionamos o calibre médio da pilha com os tempos médios de carga do equipamento de carga nº 55, esta correlação é da ordem 0,24, o que permite apenas afirmar que existe uma pequena correlação positiva entre os dados. Já a correlação dos dados recolhidos para o equipamento nº 70, esta indica algo muito enganador, uma vez que a correlação era negativa.

Como concluímos que os clusters existentes podem estar relacionados com a localização da bancada de origem e com respectivo explosivo utilizado? Na pedreira onde foram recolhidos os dados existiam, três bancadas distintas onde eram realizados os desmontes, duas das quais numa zona do maciço que se apresentava sem grandes fraturas nem muito meteorizado, e uma outra apresentando muito pouco uniforme, exibindo uma camada superficial que ascendia a largos metros, de granito alterado que produzia blocos de grandes dimensões e que deixava escapar a emulsão bombeada através das fissuras que apresentava. Já em relação a um desmonte específico, identificado como DST - 041, as substâncias explosivas ou iniciadoras poderão ter tido algum tipo de alteração do seu normal estado, uma vez que foi possível identificar explosivos não iniciados durante o decorrer da carga da pilha.

Assim, foi feita uma separação dos restantes desmontes do desmonte DST - 041, bem como dos desmontes realizados na bancada 1 e 3 dos desmontes da bancada nº 2. A separação dos grupos de dados resultantes do desmonte DST - 041 e dos realizados na bancada 2, encontra-se na Tabela 8.

Tabela 8 - Individualização dos clusters, através da separação dos desmontes da bancada nº2 e do desmonte DST -041

Equipamento	Desmonte	k50 (mm)	Média real (s)	Bancada
Desmontes bancada 1 e 3 exceto DST - 041				
55	47	170,00	17,4	3
55	43	249,23	19,3	3
55	42	273,50	19	1
70	39	218,18	17	1
70	43	249,23	17	3
70	42	273,50	18,9	1
Desmontes bancada 2 incluindo DST - 041				
55	40	355,15	15,5	2
55	45	423,31	20,6	2
70	41	449,67	16,4	3
70	45	423,31	18,2	2

Realizando uma análise de correlação entre os dados de cada parte da tabela, obtemos melhores resultados sobre a interação entre calibre médio e tempo de ciclo de carga. Na parte inicial da tabela encontramos os dados da bancada 1 e 3 com exceção do DST - 041, onde foi obtido um fator de correlação de 0,62. Isto mostra uma tendência positiva, que é o que esperávamos, a maiores calibres corresponderão maiores tempo de carga. Já em relação aos

dados dos desmontes realizados na bancada 2 e o desmonte DST - 041, estes mostram uma tendência igualmente positiva, contudo, o fator de correlação é de apenas 0,42.

Na Figura 26 estão representadas as famílias de pontos anteriormente identificadas. É de destacar que existe um claro distanciamento entre os dois clusters o que aponta para a existência de duas equações que descrevem o fenómeno. Uma primeira para fenómenos recorrentes, em que é reconhecido que o desmonte é mais homogêneo, isto é, há uma maior dispersão das granulometrias, e uma outra, correspondente à reta mais à direita, representante de desmontes, que por ineficiência do explosivo, da geologia da bancada, ou outro aspeto, produz fragmentos de muito maior calibre do que o esperado, o que acarreta um aumento do tempo médio de carga.

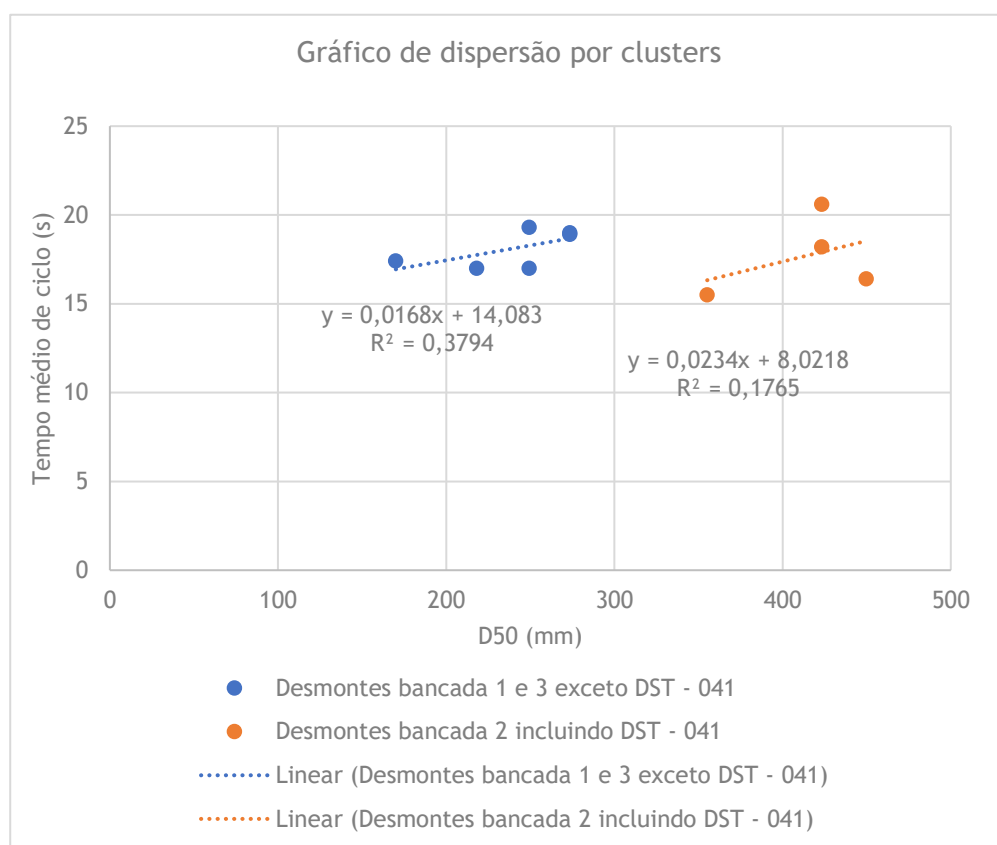


Figura 26 - Gráfico de dispersão por clusters, e as respetivas equações que descrevem a relação entre D50 e tempo médio de ciclo

Há ainda outro fator, relativo à fragmentação da pilha, que pode influenciar o tempo de ciclo de carga, em especial no momento da carga e penetração da pilha pelo balde. Esse fator é o índice de uniformidade, o qual poderá ainda estar relacionado com a quantidade de material que o próprio balde carrega, isto é, o fator de enchimento do balde. Contudo, só será abordado a interação entre o coeficiente de uniformidades das partículas com o tempo de ciclo. Para tal foi elaborado o gráfico da Figura 27, onde encontramos para cada desmante, representadas relações estabelecidas entre o coeficiente de uniformidade, n , e tempo médio do ciclo de carga para cada desmante. Neste caso também foi realizada uma análise de correlação entre os dados que permitiu reconhecer a existência de uma ligação entre os parâmetros avaliados. Tal correlação é da ordem de 0,71, o que indica uma correlação relativamente forte. Tendo por base este valor é possível avaliar que um aumento do coeficiente de uniformidade irá aumentar o tempo de carga.

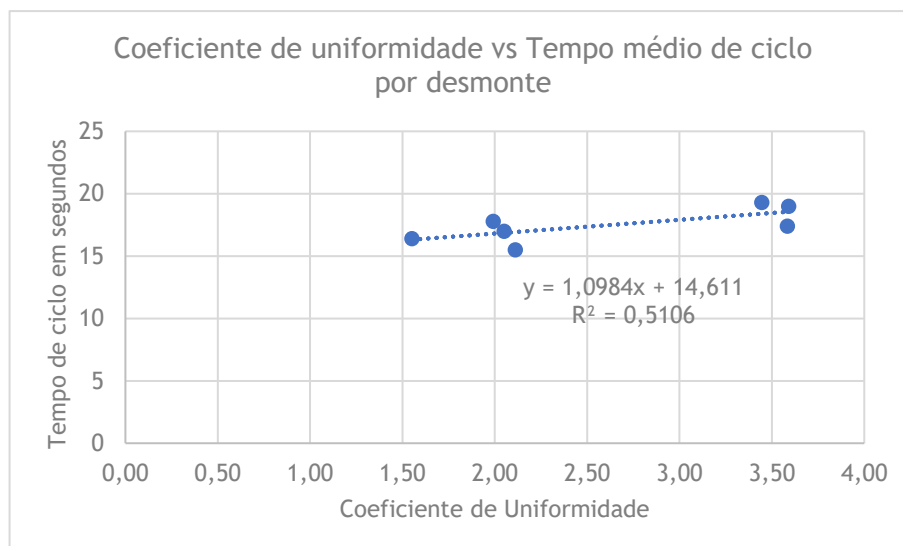


Figura 27 - Gráfico com a relação entre Coeficiente de Uniformidade e tempo médio de ciclo de carga por desmante acompanhado

Com base no cálculo da correlação e com a respetiva dispersão dos dados, foi possível construir uma equação da reta que descreve o fenómeno. A equação representada na Figura 27, permite ter em conjunto com a equação que descreve a relação entre calibre médio e o tempo médio do ciclo de carga, uma percepção do tempo necessário para a carga de uma determinada pilha de material resultante de um desmante.

6. Modelação e simulação

A modelação do processo de interação do tempo médio de carga de uma pilha com o calibre médio do material nela contido, isto permitirá antecipar e prever os tempos de carga de um determinado volume de material fragmentado.

O processo de modelação realizado pretende, através da informação disponibilizada pelo utilizador, principalmente os parâmetros geométricos da pega de fogo, encontrar um tempo de carga total da pilha produzida por esse mesmo desmonte. Tal ajustamento deve-se em grande medida à recolha de dados e ao ajuste de retas conseguido que representam a interação entre calibre e tempo individual de ciclo de carga. Este processo de modelação, seguido de simulação, foi realizado recorrendo ao software Matlab e o código aí desenvolvido encontra-se no Anexo 5 deste documento.

A modelação realizada, usa as equações das retas encontradas no anterior capítulo e usufrui da possibilidade de um ajustamento a uma distribuição de Poisson da atividade de carga, que ficou comprovado que é possível fazer aproximar uma curva desta distribuição aos dados referentes às atividades de carga dos equipamentos acompanhados. Já a simulação realizada sobre o modelo construído, pretende permitir obter resultados de custos do desmonte, mas também dos custos da carga da pilha, a partir da introdução dos custos unitários de cada operação.

A escrita do código é subdividida em vários script's, sendo que o primeiro destina-se a uma introdução dos parâmetros geométricos da pega de fogo, tais como, afastamento, espaçamento, altura da bancada, diâmetro de perfuração, tamponamento, etc. e um outro para a introdução dos valores unitários dos custos, custos de perfuração por metro linear, custos por quilograma de explosivos, custo médio por sistemas de iniciação e os custos horários do equipamento de carga.

Tendo por base as características geométricas da pega, é possível através de Equação de Kuznetsov do modelo de Kuz-Ram (Equação 3.7), obter o D50 esperado para a pega de fogo. Tendo por base este calibre médio é possível, através das equações que relacionam k50 com tempo médio de ciclo de carga, uma aproximação do tempo total de carga. Contudo, o tempo real pode não ser o exatamente calculado pela equação. Então foi proposta uma abordagem diferente, na qual, após a determinação do tempo médio, é calculado outro valor aleatório dentro de uma distribuição normal, tendo como média o valor calculado, para um intervalo de confiança de 95% e em que o valor máximo e mínimo para o tempo médio esteja compreendido

dentro desses limites. Esta condição é influenciada, em grande medida, pelos dados recolhidos no campo e baixa representatividade dos valores. A sua dispersão faz com que, por vezes, os limites superior e inferior sejam muito distantes. Há ainda casos de que o limite inferior é negativo, isto é, um tempo negativo para o ciclo de carga. Esta limitação foi ultrapassada pela imposição de que, nestes casos, o valor do limite inferior seja o mínimo valor observado no campo. Em suma, este método coloca uma distribuição normal sobre o ponto da reta calculado e através dos limites de confiança, existe uma seleção aleatória de um valor compreendido nesta área. Representação deste método, para a escolha de um valor aleatório, encontra-se representado na Figura 28.

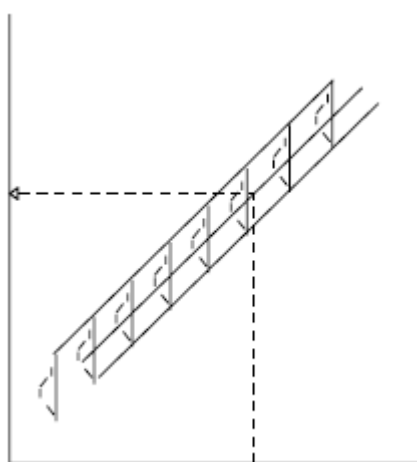


Figura 28 - Esquema representativo da aproximação de uma reta com limitações superior e inferior conferidas por um intervalo de confiança para uma distribuição normal (Fiúza, 2003)

Utilizando esse valor aleatório do tempo do ciclo de carga, foi construída uma distribuição de Poisson tendo como média precisamente esse valor. Com um intervalo de confiança de 95%, procede-se à criação de um valor igualmente aleatório dentro desta mesma distribuição. A combinação deste método e o anterior, isto é, a utilização dos limites superior e inferior através de uma aproximação de uma distribuição normal em torno do ponto da reta que representa o tempo médio de ciclo de carga em relação ao D50, será possível estabelecer uma aproximação mais realista do fenómeno.

O processo de obtenção de tempos aleatórios é repetido tantas vezes quantas as necessárias para a carga total da pilha, simulação de Monte Carlos, uma vez que o volume desmontado é considerado como dado de entrada, e tendo por base a capacidade de carga do equipamento, considerando um fator de enchimento do balde, variável entre os 90 e os 100%, é possível

calcular o tempo total necessário para a carga da pilha. Pode ser ainda possível a consideração de tempos de espera para o equipamento de carga devido à falta de equipamentos de transporte para carregar.

Este processo de cálculo, do tempo necessário para cada ciclo de carga para completar o carregamento da pilha, perfaz o processo de simulação. Após este processo de simulação é realizado um somatório dos tempos necessários para o processo de carga, isto permitiu encontrar o tempo total de carga de uma determinada pilha de material. Há a possibilidade, para uma aproximação mais fiel à realidade, é de fazer mais do que uma iteração, isto é, a repetição do processo de procura de um valor que esteja dentro da distribuição normal, que compõe a reta que modela o processo, e assim, voltar a repetir todo o processo anteriormente descrito. Quando isto é realizado, os valores finais apresentados são uma média de todos os tempos totais de ciclo de carga simulados. Em resumo, as iterações permitem encontrar tanto o tempo médio de ciclo de carga, para o mesmo D50, quanto o número de iterações pretendidas, e uma nova repetição da simulação da operação de carga da pilha. Isto eleva a simulação de modo a encontrar, com mais fiabilidade, o total de horas necessárias para a carga de uma pilha de material desmontado.

Havendo a possibilidade de introdução dos custos unitários dos processos envolvidos na exploração de uma pedreira, como sendo o preço da perfuração por metro linear, o preço do explosivo por quilograma, os custos médios por sistemas de iniciação e por último o custo por hora do sistema de carga, será possível calcular os custos da totalidade das operações, distinguindo-as por custos de desmonte, custos de carregamento e custos totais do desmonte. Isto permitirá também uma comparação entre os parâmetros geométricos da pega de fogo com custos dessa mesma pega de fogo.

Para uma mais intuitiva e rápida perceção do processo de simulação foi elaborado um pequeno fluxograma com os principais momentos desta tarefa, tal ilustração encontra-se na seguinte figura. É de notar, que se for realizada mais do que uma iteração, para a obtenção de valores mais realistas o processo deve ser repetido, a partir do processo “cálculo do tempo médio de ciclo de carga ($T_{\text{médio}}$)”, não inclusive, o número de repetições requeridas.

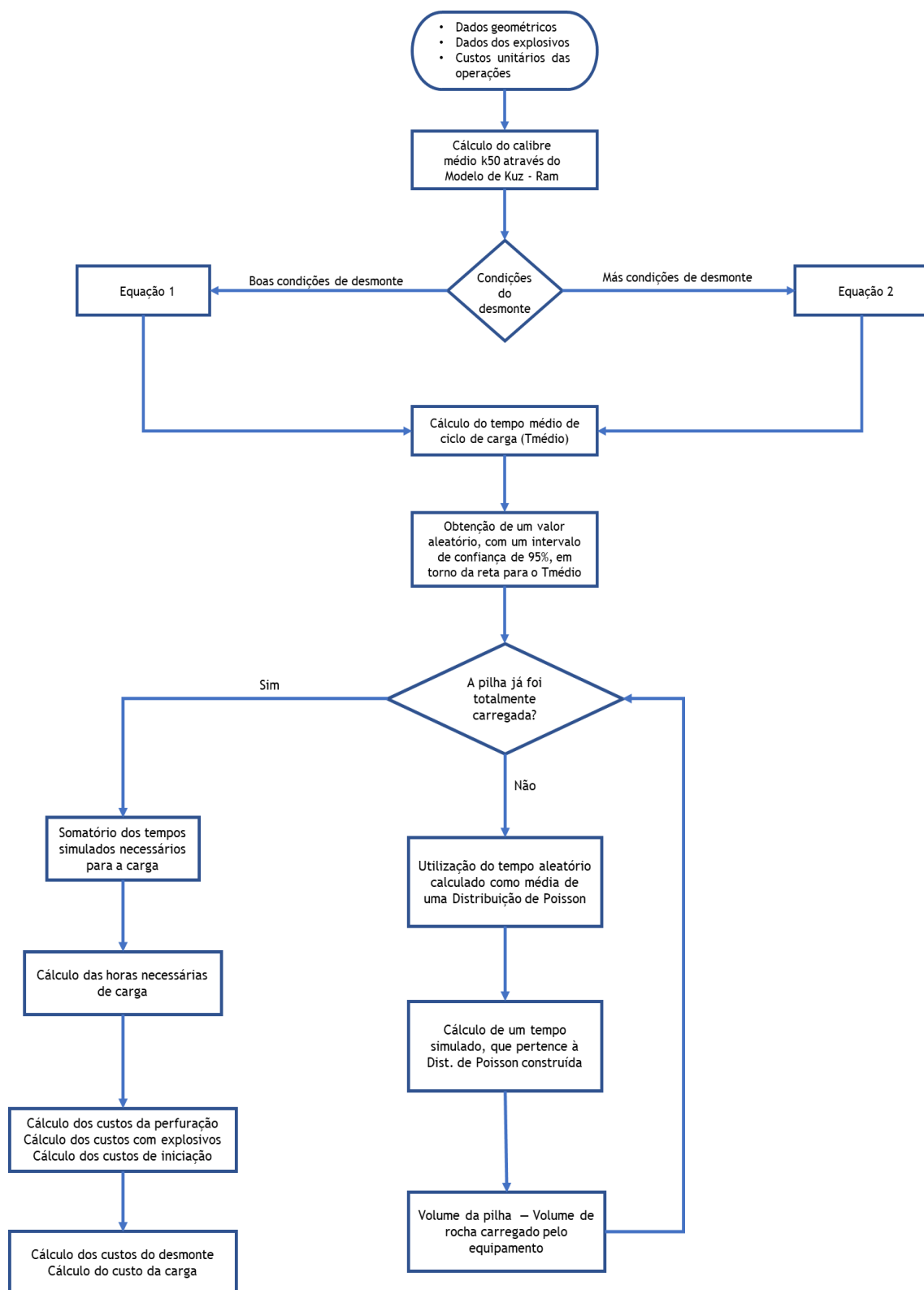


Figura 29 - Fluxograma do processo de simulação

7. Análise de resultados

Recorrendo ao modelo construído, e depois de planeado e executado um projeto de simulação como o anteriormente descrito, foi possível a obtenção de gráficos que ilustram a relação entre os custos do desmonte, custos de carregamento da pilha e dos custos totais, o que permitirá entender e encontrar os pontos singulares desses gráficos equivalentes a valores mínimos globais, tendo em atenção os fatores geométricos e os fatores relacionados com os explosivos.

Esta tarefa será inicialmente concretizada para alguns casos genéricos, em que os parâmetros de entrada no modelo, são testados a partir de valores baixos até um outro valor fixado. Por exemplo, para o caso do afastamento, é elaborado um gráfico de dispersão, onde este parâmetro varia entre 0.5 até 10 metros. Esta simulação permitirá conhecer o comportamento teórico dos custos de desmonte e dos custos da carga da pilha através do ciclo operativo da máquina giratória. Contudo, em relação aos restantes parâmetros, nesta simulação, eles permanecerão constantes. Uma variável que se manterá constante é o número de iterações, que nos casos aqui apresentados, ascendem a 100 iterações, isto permite a obtenção, para o mesmo k50, a obtenção de cem tempos médios.

Os dados iniciais sem qualquer manipulação encontram-se na Tabela 9. No decorrer desta simulação, será criado um gráfico para ver a evolução dos custos de carga e de desmonte para algumas das variáveis aí encontradas, esta manipulação será realizada individualmente, isto é, apenas é simulada os custos com a variação de um dos parâmetros, os restantes são mantidos constantes e apresentam o valor de referência.

Tabela 9 - Valores de referência para a exploração da simulação

Afastamento (m)	3
Espaçamento (m)	3
Diâmetro (mm)	89
Tampão (m)	3
Subperfuração (m)	0.9
Altura da bancada (m)	10
Fator de rocha	14
Volume desmontado (m³)	10 000
Densidade do explosivo (kg/m³)	1100
RWS (%)	106
Custo de perfuração (€ / m)	2.3
Custo de explosivos (€ / kg)	1.8
Custos de iniciação (€ / furo)	6
Custos de carregamento (€ / h)	75
Volume de carregamento (m³/ciclo)	3.5

Neste capítulo, apenas serão apresentados alguns dos exemplos, sobe a forma de gráfico, dos valores dos custos parcelares e totais em função da variabilidade de alguns dos parâmetros atrás referidos. Contudo, os restantes gráficos poderão ser encontrados no Anexo 4.

Como vimos anteriormente existem duas equações de retas que descrevem a interação entre tempo de ciclo de carga e o calibre médio do material desmontado em pilha. Na presente análise, serão considerados somente as fenomenologias associadas às bancadas onde o desmonte produz uma granulometria mais uniforme.

Iniciamos a apresentação dos resultados das simulações com o exemplo, atrás referido, relativo à introdução de variabilidade do parâmetro afastamento. Os resultados desta simulação são apresentados na Figura 30.

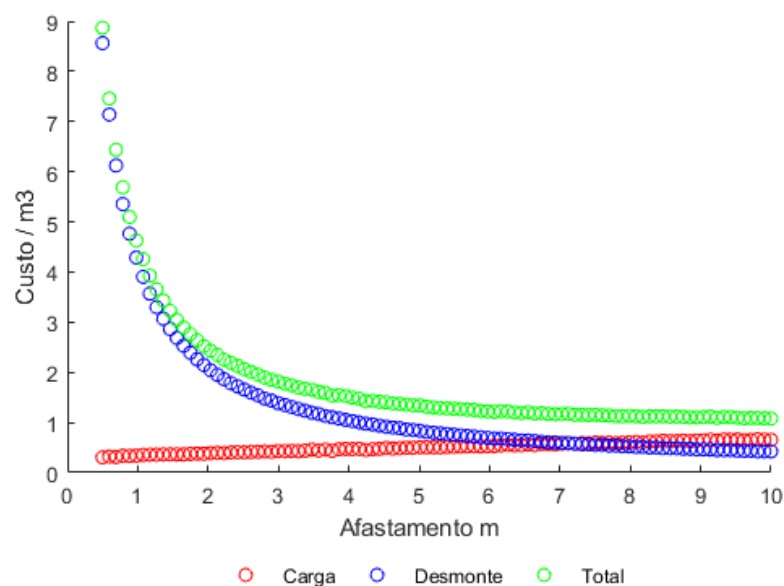


Figura 30 - Influência do afastamento nos custos de carregamento, custos de desmonte e os custos totais de ambas as operações

É de notar que existe uma tendência para a diminuição dos custos, por metro cúbico, com o aumento do afastamento, até um determinado valor. Seria espectável que, com a continuação da diminuição deste parâmetro geométrico, a partir de determinado valor, o custo do carregamento aumentasse substancialmente, ultrapassando em grande escala o aumento dos custos do desmonte. É compressível que um diminuto afastamento, permita um consumo específico elevado e por consequência o calibre médio seja igualmente pequeno. Este tipo de desmonte teria um baixo tempo de ciclo de carga e por isso os custos, por metro cúbico, da operação de carga, seriam naturalmente menores. Já os custos do desmonte seriam elevadíssimos uma vez que existiriam mais furos a executar na construção da pega de fogo e por isso maiores custos de perfuração, de explosivos e de iniciação. Mais uma vez, é de referir que os restantes parâmetros da pega se mantêm constantes seguindo os valores da Tabela 9.

Igual comportamento é evidenciado quando se considera a variação do parâmetro espaçamento. É possível constatar este facto na Figura 63, do Anexo 4. De igual modo, como na análise anterior, ter-se-á valores de consumo específico muito elevados, com custos de desmonte também muito elevados, relacionados com maiores quantidades de explosivos a usar, mais custos de iniciação, etc. Por sua vez, e também de igual maneira, terão lugar ciclo de

carga com tempos menores, com equivalentes custos também mais reduzidos. Já quando os valores do espaçamento ou afastamento são elevados, o processo inverso acontece. Embora haja uma diminuição dos custos totais, por metro cúbico de rocha desmontada, em grande medida influenciada pela descida do custo do desmonte, contudo, os valores do carregamento da pilha surgem aumentados. Naturalmente que tal se deve ao facto de, com o aumento do espaçamento ou afastamento, se diminuir à capacidade de fragmentação do maciço rochoso com repercussões na operação de carga.

Outro parâmetro interessante analisado, diz respeito à variação do diâmetro de perfuração, mantendo todas as outras características da pega de fogo inalteradas. Tal situação, permitirá um aumento do consumo específico, sem uma alteração significativa do plano de fogo. Na Figura 31, apresentam-se resultados de simulação, tendo apenas como variável os diâmetros normalmente utilizados na exploração de pedreiras que são respetivamente, os 76, 89, 102, 140 e 165 milímetros.

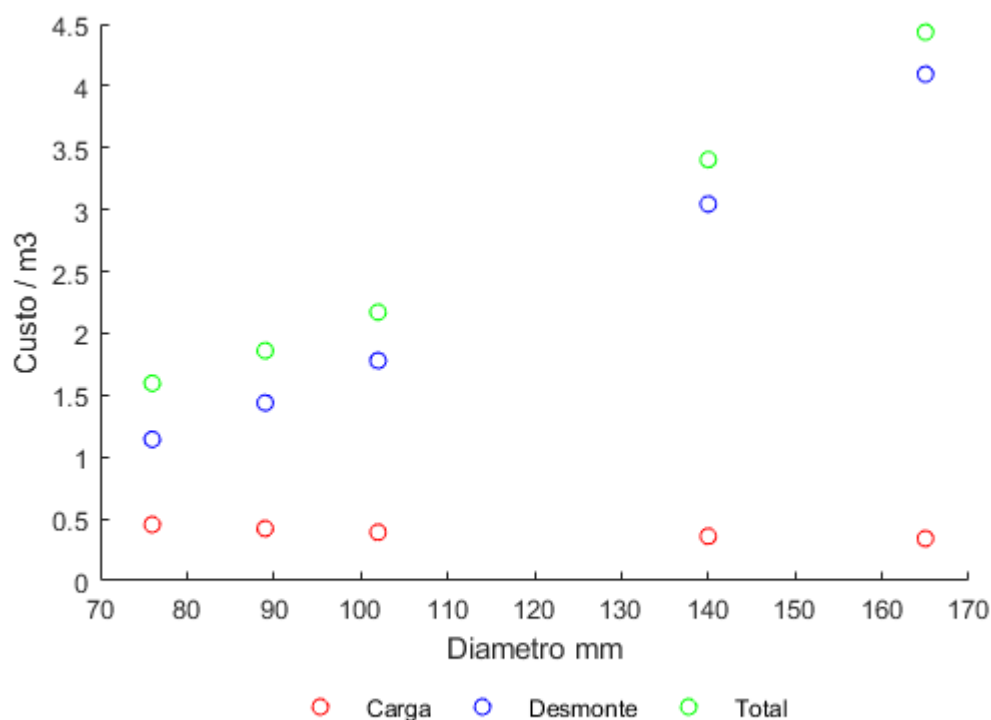


Figura 31 - Simulação dos custos de desmonte, de carregamento e totais da variação do diâmetro de perfuração

Mais uma vez se evidencia que o aumento do diâmetro faz aumentar o consumo específico e por sua vez, diminuir o calibre médio e o tempo de ciclo de carga. Tal realidade permitirá uma diminuição significativa do custo da operação de carga. Contudo, irá ocorrer um aumento do consumo de explosivo na pega de fogo, com os inerentes custos superiores contabilizados, enquanto que os custos de iniciação se manterão constantes. É de referir que nesta simulação realizada não há uma distinção entre os custos de perfuração para os diferentes diâmetros, sendo o custo de perfuração considerado um valor médio.

Quanto à simulação, considerando uma variação dos valores do comprimento do tampão (atacamento), a um aumento desse parâmetro é expectável que corresponda uma diminuição do custo do desmonte, contudo, a falta de energia, para a fragmentação do maciço, faz com que haja um aumento do tempo médio de ciclo de carga, uma vez que é provável que ocorra um escape de gases. Tal expectativa é comprovada pelos resultados obtidos na simulação e que se encontram exibidos na Figura 32.

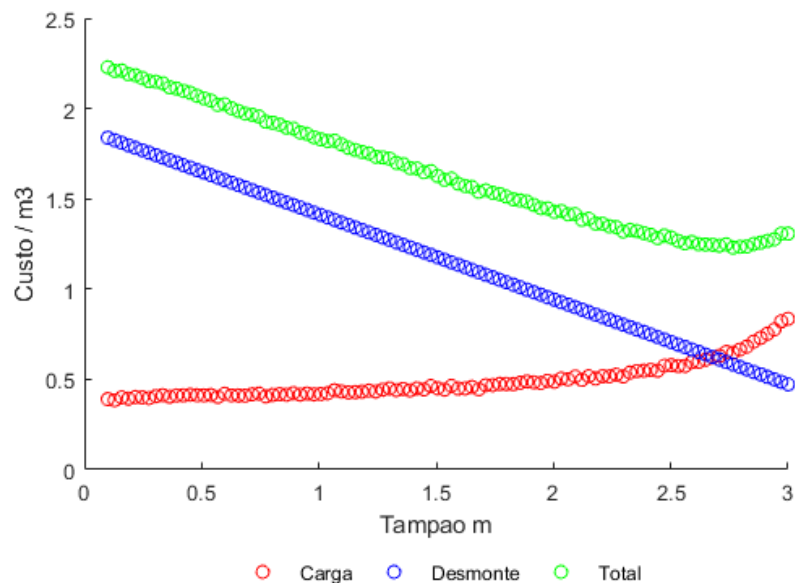


Figura 32 - Resultados da variação do tamponamento nos custos de carregamento, desmonte e totais

Outros parâmetros que podem ser considerados neste estudo são, por exemplo, a subperfuração e a densidade do explosivo. No caso da subperfuração, ocorre um acontecimento inverso em relação aos custos de desmonte e aos de carga, tal como está representado na Figura 64 do Anexo 4. Aqui um aumento do valor da subperfuração faz aumentar o consumo e respetivos custos de explosivos. Contudo, este aumento da quantidade de energia disponível facilitará a operação de carga do material desmontado. Porém, os valores não são significativamente opostos na medida em que o aumento dos custos com o desmonte é em larga medida ultrapassado pela diminuição dos custos da operação de carga.

Em relação à densidade do explosivo empregue no desmonte, esta irá influenciar o consumo específico, uma vez que um aumento deste parâmetro, mantendo fixo o diâmetro de perfuração de 89 mm, irá aumentar o peso de explosivos presentes nos furos. Isto permitirá uma diminuição ligeira do calibre médio e, por sua vez, do custo da operação de carga, mas acarretaria um aumento dos custos com os explosivos. A simulação levada a cabo para uma variação da densidade do explosivo, encontra-se na Figura 65 do quarto Anexo.

Uma outra análise pode ser realizada tendo por base as características geométricas das pegas de fogo dos desmontes realizados e acompanhados na pedreira onde foram recolhidos os dados. Tal análise, permitiu perceber quais os custos inerentes a todo o processo de desmonte e carga, tendo por base valores unitários de custos introduzidos na simulação. Seguiu-se uma metodologia de manipulação desses mesmos parâmetros individualmente, tal como sucedido anteriormente. Tal variação dos parâmetros, conduziu-nos à possibilidade de nos aproximarmos da descoberta de encontrar um ponto ótimo entre os custos da operação de carga e do desmonte.

Mais uma vez, começamos pela apresentação dos valores de referência que serviram como constantes no momento da simulação (Tabela 10), nesta será apenas simulada a variação de uma das características da pega, enquanto que as restantes se manterão iguais aos valores de referência, tal como sucedeu na exposição anterior.

É de notar que o custo individual das operações se mantém inalterado uma vez que não houve a possibilidade da obtenção dos valores reais praticados nessa mesma pedreira, o que acarretará erros nos cálculos dos custos totais das operações. No caso dos explosivos, nesta exploração era utilizada emulsão bombeada, o que irá diminuir significativamente os valores dos custos dos mesmos, uma vez que o valor utilizado para o cálculo do custo, é referente a explosivo encartuchado. Essa diminuição poderá mesmo atingir o valor de 1 euros por quilograma de explosivo utilizado.

Tabela 10 - Valores de referência para os parâmetros da pega de fogo utilizados na pedreira onde foram recolhidos os dados

Afastamento (m)	2.8
Espaçamento (m)	3.7
Diâmetro (mm)	76
Tampão (m)	1.9
Subperfuração (m)	0.9
Altura da bancada (m)	10
Fator de rocha	14
Volume desmontado (m³)	8 000
Densidade do explosivo (kg/m³)	1140
RWS (%)	96
Custo de perfuração (€ / m)	2.3
Custo de explosivos (€ / kg)	1.8
Custos de iniciação (€ / furo)	6
Custos de carregamento (€ / h)	75
Volume de carregamento (m³/ciclo)	3.5

Como se pode observar nos vários gráficos da Figura 33, os comportamentos das curvas mantêm-se semelhante aos anteriormente descritos. Por exemplo, quando ocorre um aumento do diâmetro de perfuração, esse aumento permite um aumento do consumo específico e por isso, em princípio, uma diminuição do D50, o que facilitará a carga e, por consequência, a diminuição do custo a ela associado. É de referir que o mesmo fenómeno pode ser observado por um aumento da densidade do explosivo, contudo os custos do desmonte irão, certamente, subir. Este aumento do consumo específico pode ser obtido pela manipulação da emulsão ou pelo uso de outro tipo de explosivo, possivelmente encartuchado.

Em relação ao afastamento, espaçamento e tamponamento, tal como idealizado, o aumento de cada um desses fatores permite uma diminuição dos custos genéricos, até a um determinado valor limite. Contudo, nos gráficos aqui apresentados, é perceptível que esse mesmo aumento provoca uma substancial diminuição dos custos do desmonte. Porém, os custos de carregamento aumentam, uma vez que o calibre médio é maior, acarretando um também maior tempo de ciclo de carga.

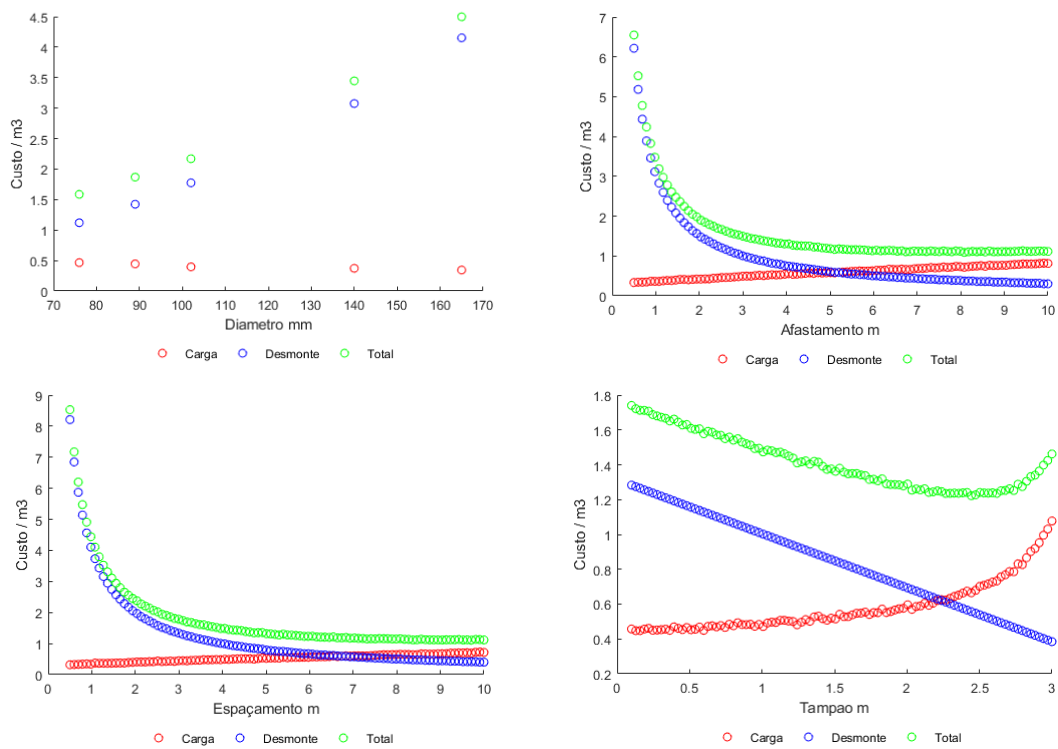


Figura 33 - Gráficos de dispersão com a variação de alguns dos parametros do demsonte e o seu efeito nos custos do demsonte, custo da carga e nos custos totais

8. Conclusões

No decorrer deste trabalho, foi possível observar diversos fenômenos relacionados com o desmonte de rocha com explosivos, em exploração a céu aberto, assim como com o ciclo de carga do material desmontado realizado. Tal observação, permitiu também a recolha de informação real de desmonte, principalmente dados relacionados com as características da pilha de material formada após cada detonação de pega de fogo, destacando-se os valores do D50 e o índice de uniformidade. Outros dados recolhidos são referentes aos tempos de ciclos de carga do material desmontado para o seu transporte posterior com destino a unidade de transformação. O acompanhamento de sete desmontes e respetivas atividades posteriores de carga, permitiram elaborar uma correlação entre as características da pilha de material e o respetivo tempo de carga. Os estudos de tratamento estatístico dos dados dos ciclos de carga comprovaram a existência de uma boa correlação da distribuição de classes de tempos desses ciclos com a distribuição de Poisson.

Na análise dos dados recolhidos e no estabelecimento de correlação entre as variáveis, calibre médio do material desmontado e tempo de ciclo da operação de carga, verificou-se a existência de dois grupos de pontos, ou clusters, que evidenciavam comportamentos distintos. Esta discrepância foi justificada como sendo resultante de pilhas material de bancadas diferentes ou de o explosivo utilizado apresentar deficiências no seu modo de fabrico ou de funcionamento. Tal problema permitiu calcular a correlação entre pontos da mesma família. Uma primeira apresentava uma correlação positiva de 0.62 enquanto que o segundo cluster apresentava uma correlação de 0.42. Isto enalteceu a premissa de que um aumento do calibre médio do desmonte fazia aumentar o tempo médio por ciclo de carga. Situação semelhante observada, relaciona-se com o índice de uniformidade e o respetivo ciclo de carga, na qual o fator de correlação encontrado é de 0.72, o que permite concluir que um aumento de partículas do mesmo calibre faz aumentar o tempo de carga.

Encontradas as relações entre calibre médio e o índice de uniformidade da pilha e tempo médio relativamente ao ciclo de carga, foi possível a construção de um simulador, que tendo por base em alguns parâmetros da pega de fogo, os custos unitários da perfuração, dos explosivos, da iniciação e por fim os custos do carregamento, que veio permitir o cálculo dos custos do desmonte e do carregamento da própria pilha.

Todas as simulações realizadas não permitem uma extrapolação direta para a obtenção dos melhores valores dos parâmetros geométricos das pegas de fogo, uma vez, que o modelo não

contempla os custos do transporte, que são em regra, muito superiores aos custos de desmonte e de carga estudados. No entanto, este modelo permite sim, uma comparação entre os custos do desmonte com os custos de carregamento. É de realçar que, como processo de validação do modelo construído, os resultados das simulações realizadas corroboram a expectativa recolhida na bibliografia, onde se afirma que um aumento do espaçamento, do afastamento e do tamponamento, provoca um aumento do tempo médio de carga. Ao contrário acontece quando ocorre um aumento do valor da subperfuração.

Assim, com esta Dissertação foi possível entender as relações entre desmonte, calibre médio produzido e o tempo médio de ciclo de carga. Deste modo, avança-se com a possibilidade de, antecipadamente, poder prever os custos relacionados com o desmonte numa dinâmica de interação com os custos da operação de carga para a remoção da pilha de material resultante desse desmonte.

8.1. Trabalhos para futuro

Os dados analisados, embora representem grande quantidade de ciclos de carga, não são muito dispersos em relação aos desmontes acompanhados, apenas foram registados ciclos de sete pilhas de material distintas.

Um maior acompanhamento dos desmontes, das operações de carga, do planeamento e da obtenção das características da pilha do material desmontado, permitirá uma maior e melhor caracterização das realidades intrínsecas a estas operações. Dessa melhor caracterização, poderão ressaltar “imagens” mais fidedignas da interação existente entre o calibre médio e coeficiente de uniformidade do material desmontado com os tempos de carga desse mesmo material para ser trasladado. Isto permitirá complementar a informação recolhida e acrescentar rigor no momento de construção do modelo que se pretende que represente as fenomenologias existentes.

Uma recolha de dados referentes a outros equipamentos para implementar a operação de carga, permitiria melhorar o modelo construído, fazendo dele uma aproximação mais realista e mais genérico. Como os equipamentos de carga acompanhados são retroescavadoras giratórias, os tempos recolhidos são significativamente inferiores ao caso dos equipamentos de carga sobre rodas com balde frontal.

Para uma mais completa caracterização das interações presentes nestes elos da cadeia produtiva das unidades de extração de rocha, afigura interessante considerar os tempos de espera dos equipamentos de carga, dos *dumpers* e os eventuais tempos para arrumação da praça. Esta completa caracterização da atividade de carga permitiria uma total modelação e simulação dos custos desta operação.

Em desenvolvimentos posteriores a estes, a inclusão dos ciclos efetivos dos *dumpers* de transporte do material, representará uma significativa mais-valia para a construção progressiva de modelos auxiliares ao planeamento, aproximando-nos ainda mais da materialização do importante conceito de Mine to Mill (M2M) minimamente caracterizado nesta Dissertação.

Referências

- Adel, G., Kojovic, T., & Thornton, D. (junho de 2006). Mine-to-Mill Optimization of Aggregate Production.
- Agrawal, A., & Choudhary, B. S. (2017). *Study on Back Rows Delay and size of blast effect on Fragmentation and Muckpile shape Prameter*.
- Alonso, J. B., Gómez, J. C., & Herbert, J. H. (2013). *Perforación y voladura de rocas en minería*. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid.
- Bhandari, S. (1997). *Engineering Rock Blasting Operations*. Rotterdam: A.A. Balkema.
- Cameron, P. (Fevereiro de 2017). *The ABC of Mine to Mill and metal price cycles*. Obtido de Bulletin: <https://www.ausimmbulletin.com/feature/mill-operations-the-abc-of-mine-to-mill-and-metal-price-cycles/>
- Choudhary, B. S. (Setembro de 2013). Firing patterns and its effect on muckpile shape parameters and fragmentation in quarry blasts . *International Journal of Research in Engineering and Technology*, pp. 32-45.
- Choudhary, B. S., & Rai, P. (2013). Stemming Plug and Its Effect on Fragmentation and Muckpile Shape Parameters. *Int. J. of Mining and Mineral Engineering*, pp. 296-311.
- Cimertex. (05 de Junho de 2019). *Escavadora Hidráulica de Rastos*. Obtido de <https://cimertex.pt/produto/pc490lc-11/>
- Cottee, S. (2001). *Impact of fragmentation on truck and loader productivity*.
- Cunningham, C. V. (2005). The Kuz-Ram fragmentation model - 20 years on. *Brighton Conference Proceedings*. European Federation of Explosives Engineers.
- Dyno Nobel Asia-Pacific Pty Limited. (2017). *Explosives Engineers' Guide*.
- Fiúza, A. (2003). *Aquisição e Análise de Dados - Texto pedagógico* .
- Franklin, J. A., Broch, E., & Walton, G. (Janeiro de 1971). Logging the mechanical character of rock. *Mining Industry*.

- Hustrulid, W. (1999). *Blasting Principles for Open Pit Mining*. Rotterdam: A.A. Balkema.
- IBERDROLA GENERACIÓN S.A.U. (2012). *Plano de Lavra*. Madrid.
- Kaya, A., Bulut, F., & Alemdağ, S. (29 de Agosto de 2011). Applicability of excavatability classification systems in underground excavations: A case study.
- Larsson, B. (1974). Blasting of low and high benches - Fragmentation from production blasting. *The Swedish Rock Blasting Committee*, pp. 247-271.
- Llera, J., Urbina, F., Jimeno, C., & Jimeno, E. (2003). *Manual de Perforacion y Voladura de Rocas*. Madrid: Instituto Geologico y Minero de España.
- Miranda, H. S. (1986). *Transportes Mineiros*. Porto: Instituto Nacional de Investigação Científica.
- Miranda, V., Leite, F., & Frank, G. (2017). Blast Pattern Expansion - A numerical Approach. *Ninth EFEE World Conference Ninth EFEE World Conference*, pp. 51-61.
- Muller, B., Hausmann, J., & Hiedzwiedz, H. (2010). Control of rock fragmentation and muck pile geometry during production blasts (environmentally friendly blasting technique). *Rock Fragmentation by Blasting*.
- NARENDRULA, R. (2004). *Effect of fragmentation on productivity of loading equipment*. Sudbury, Ontario.
- Scott, A., Morrell, & Clark, D. (2002). Tracking and Quantifying Value from 'Mine to Mill' Improvement. Obtido em 22 de Abril de 22, de https://www.researchgate.net/publication/289602091_Tracking_and_Quantifying_Value_from_'Mine_to_Mill'_Improvement
- Society for Mining, Metallurgy, and Exploration (SME). (2011). *SME Mining Engineering Handbook*. United States of America: Peter Darling.
- The Cooperative Research Centre for Optimising Resource Extraction (CRC ORE). (2013). *Understanding Mine to Mill*. Austrália.

Anexos

Anexo 1 - Atividades realizadas em cada desmonte

DESMONTES/ ATIVIDADES	DST - 038	DST - 039	DST - 040	DST - 041	DST - 42	DST - 043	DST - 045	DST- 047
LASER DA FACE	X	X	✓	✓	✓	✓	X	X
LASER DOS FUROS	X	X	✓	X	✓	✓	X	X
MEDIÇÃO DA ALTURA DOS FUROS	X	X	✓	✓	✓	✓	✓	X
BORETRACK	X	X	X	X	X	X	X	✓
CONTROLO DE CARGA	X	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
CONTROLO DO TAMPÃO	X	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
VÍDEO DO DESMONTE	X	✓	✓	X	✓	✓	✓	X
WIPFRAG	X	✓	✓	X	✓	✓	✓	✓
TEMPOS DE CARGA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

✓ - Realizado

X - Não realizado

Data: 02/05/2019

Anexo 2 - Dados Gerais - Equipamentos nº 55 e 70

Tabela 11 - Frequências relativas, Distribuição de Poisson de média 16,5 e desvios entre a realidade e o modelo

Tempo de ciclo (s)	Freq. Relativa	Dist. Poisson	$\Delta\%$
7	0%	0%	0%
8	0%	1%	1%
9	0%	2%	1%
10	1%	3%	2%
11	1%	4%	3%
12	4%	6%	2%
13	7%	7%	0%
14	9%	9%	0%
15	11%	10%	1%
16	12%	10%	2%
17	10%	10%	1%
18	9%	9%	0%
19	7%	8%	1%
20	6%	6%	0%
21	4%	5%	1%
22	4%	4%	0%
23	3%	3%	0%
24	2%	2%	0%
25	2%	1%	1%
26	1%	1%	1%
27	1%	0%	1%
28	1%	0%	1%
29	1%	0%	1%
30	1%	0%	1%
31	1%	0%	1%
32	0%	0%	0%
	100%	100%	22%

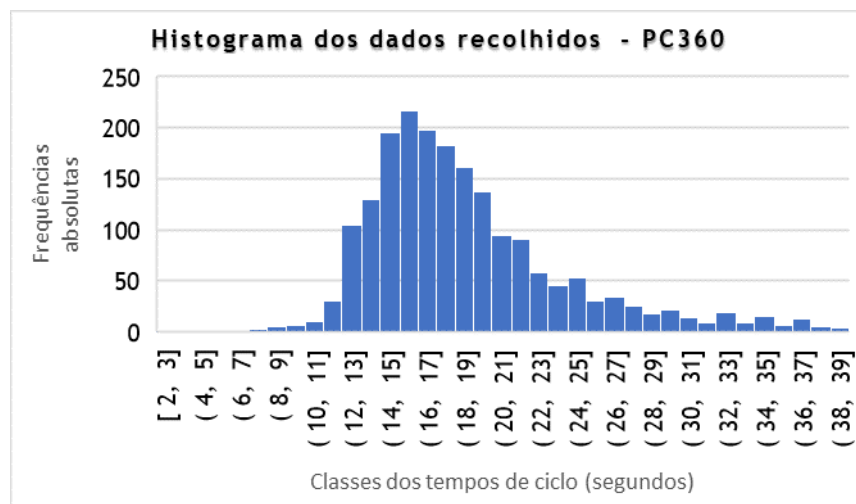


Figura 34 - Histograma dos dados recolhidos e validados referentes ao equipamento nº 55

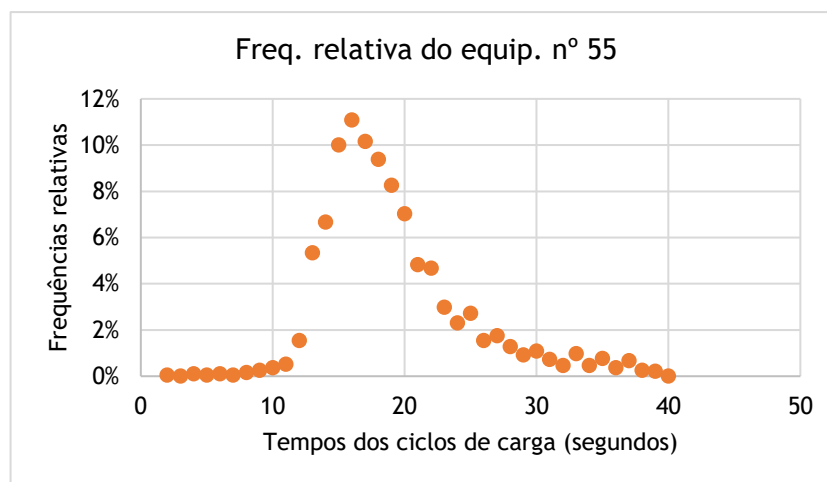


Figura 35 - Gráfico de dispersão com a frequência relativa dos ciclos registados da giratória nº 55

Tabela 12 - Cálculo da Distribuição Relativa, do modelo e os erros associados à modelação do equipamento nº 55

Tempo de ciclo (s)	Freq. Relativa	Dist. Poisson	Δ %
2	0%	0%	0%
3	0%	0%	0%
4	0%	0%	0%
5	0%	0%	0%
6	0%	0%	0%
7	0%	0%	0%
8	0%	0%	0%
9	0%	1%	1%
10	0%	1%	1%
11	1%	2%	2%
12	2%	4%	2%
13	5%	5%	0%
14	7%	7%	0%
15	10%	8%	2%
16	11%	9%	2%
17	10%	9%	1%
18	9%	9%	0%
19	8%	9%	1%
20	7%	8%	1%
21	5%	7%	2%
22	5%	6%	1%
23	3%	4%	1%
24	2%	3%	1%
25	3%	2%	0%
26	2%	2%	0%
27	2%	1%	1%
28	1%	1%	1%
29	1%	0%	0%
30	1%	0%	1%
31	1%	0%	1%
32	0%	0%	0%
33	1%	0%	1%
34	0%	0%	0%
35	1%	0%	1%
36	0%	0%	0%
37	1%	0%	1%
38	0%	0%	0%
39	0%	0%	0%
40	0%	0%	0%
	100%	100%	26%

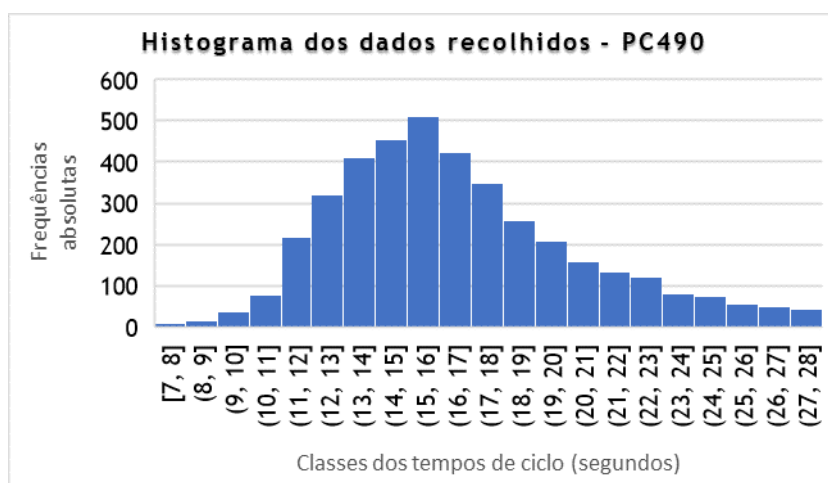


Figura 36 - Histograma dos dados recolhidos do equipamento nº 70 e validados

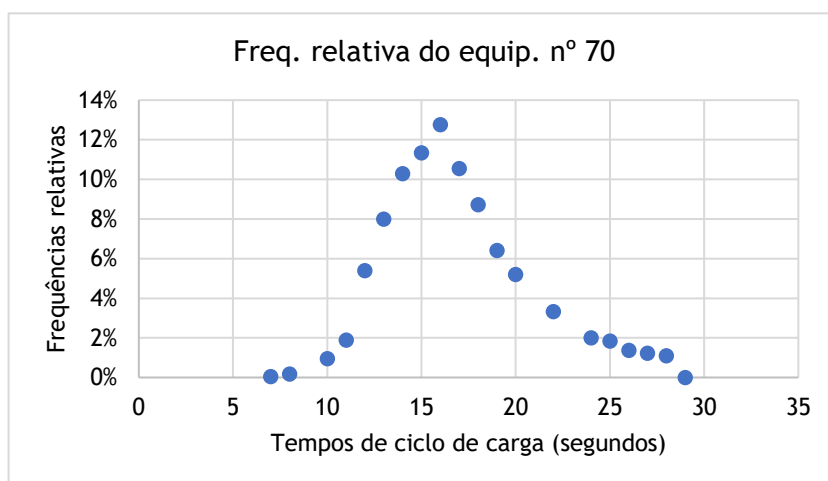


Figura 37 - Gráfico de dispersão dos dados recolhidos da operação de carga do equipamento nº 70

Tabela 13 - Cálculo da Distribuição Relativa, do modelo e os erros associados à modelação do equipamento nº 70

Tempo de ciclo (s)	Freq. Relativa	Dist. Poisson	Δ %
7	0%	0%	0%
8	0%	1%	1%
10	1%	3%	2%
11	2%	4%	2%
12	5%	6%	0%
13	8%	7%	1%
14	10%	9%	2%
15	11%	10%	2%
16	13%	10%	3%
17	11%	10%	1%
18	9%	9%	0%
19	6%	8%	1%
20	5%	6%	1%
22	3%	4%	0%
24	2%	2%	0%
25	2%	1%	1%
26	1%	1%	1%
27	1%	0%	1%
28	1%	0%	1%
29	0%	0%	0%
	100%	100%	22%

Anexo 3 - Dados e análises por desmonte

Dados e análises do desmonte: DST - 038

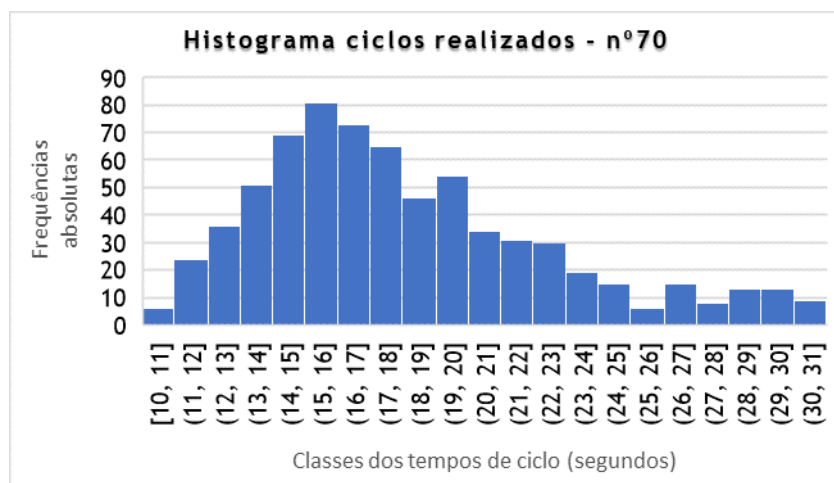


Figura 38 - Histograma dos dados recolhidos referentes à pilha de material do desmonte DST - 038 e carregada com recurso ao equipamento nº 70

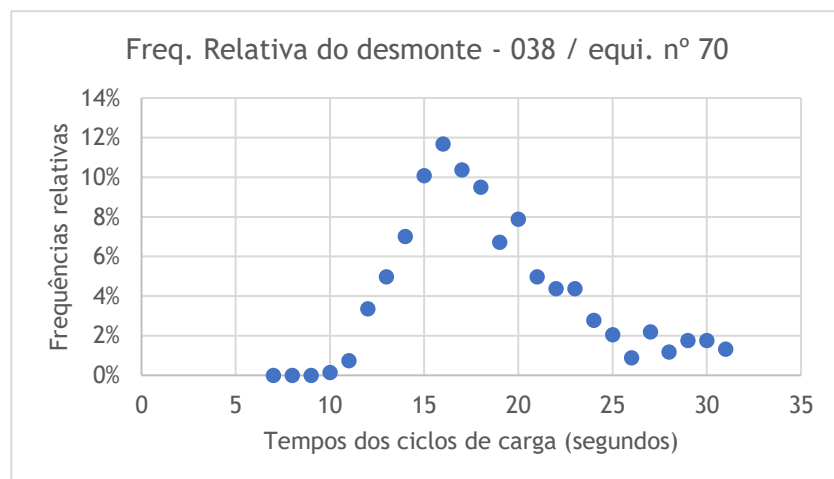


Figura 39 - Gráfico de dispersão da frequência relativa dos dados do desmonte DST - 038, com a retroescavadora nº70

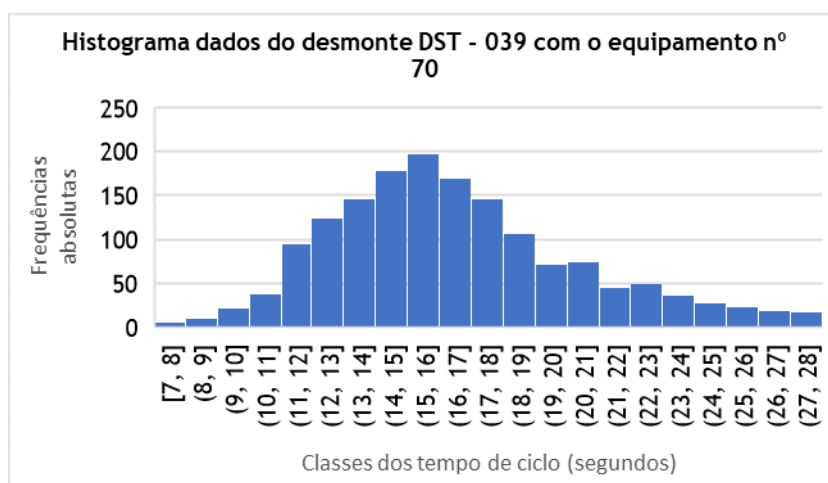


Figura 40 - Histograma dos ciclos de carga efetuados pelo equipamento nº 70 para carregar a pilha do desmonte DST- 039

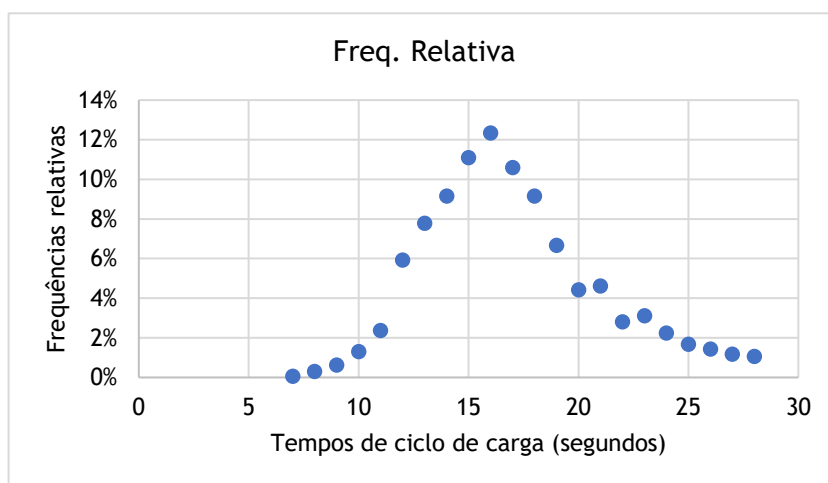


Figura 41 - Frequências relativas dos ciclos de carga resultantes da pega DST - 039 com o equip. nº 70

Dados e análises do desmonte: DST - 040

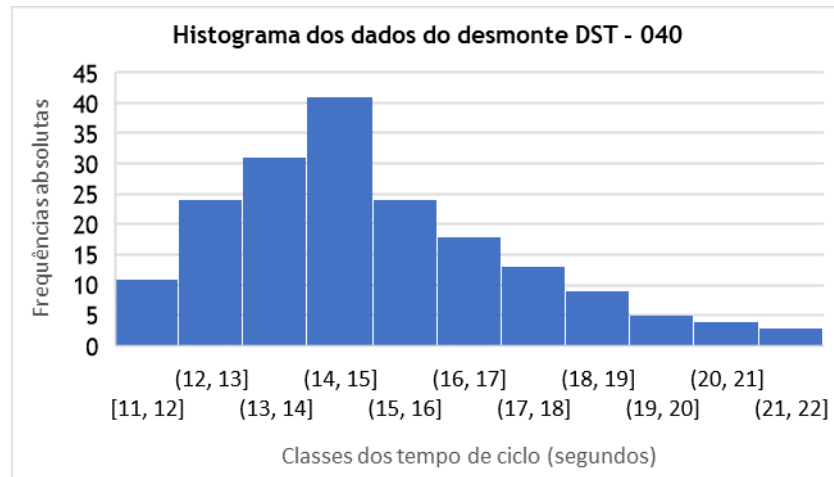


Figura 42 - Histograma dos dados da carga realizada pela giratória nº 55 da pilha do desmonte DST - 040

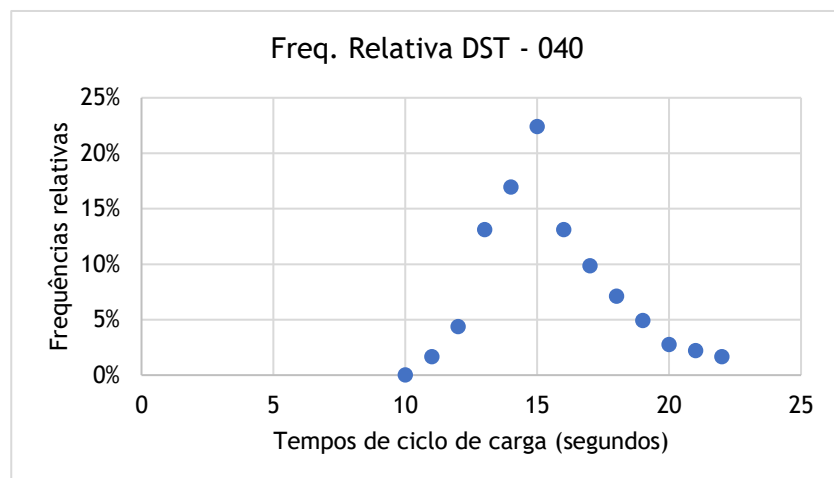


Figura 43 - Frequências relativas da carga da pilha do desmonte DST - 040 com recurso ao equipamento nº 55

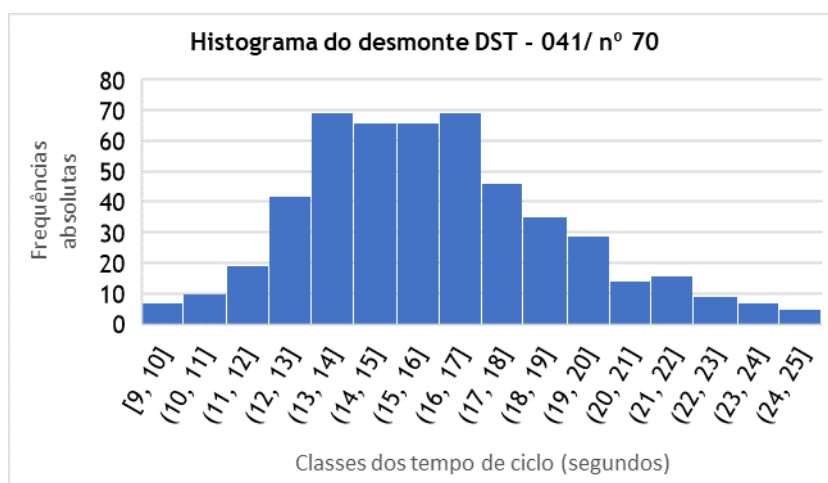


Figura 44 - Histograma dos dados / Desmonte DST - 041 / equipamento n° 70

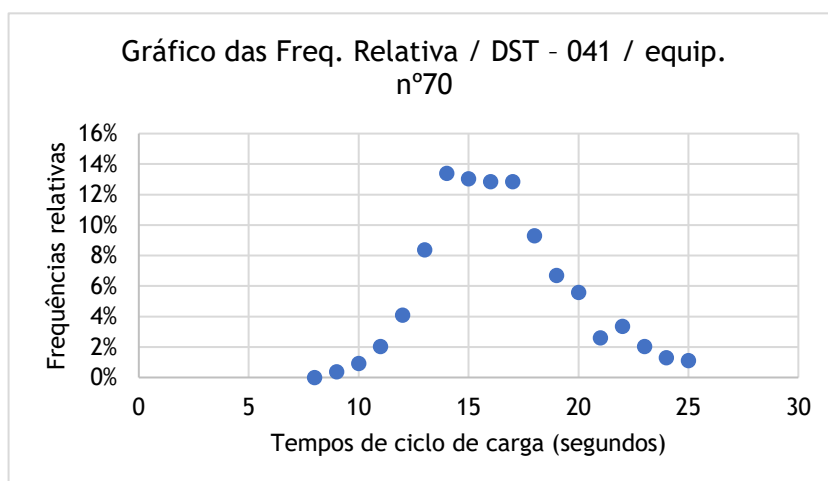


Figura 45 - Gráfico de dispersão dos ciclos de carga / DST - 041 / equipamento n°70

Dados e análises do desmonte: DST - 042

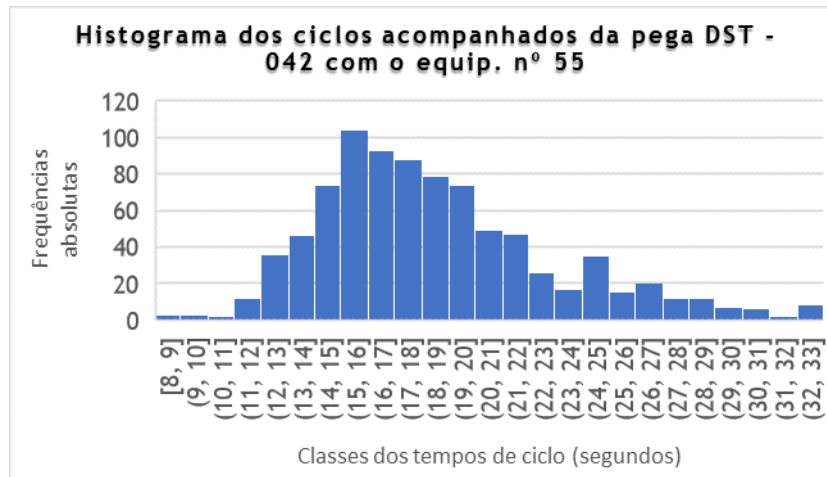


Figura 46 - Histograma dos dados da pilha do desmonte DST - 042 / Equipamento nº 55

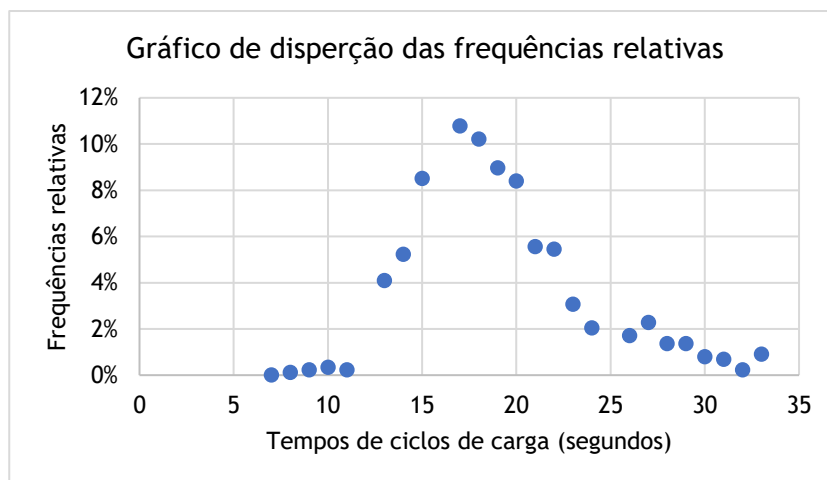


Figura 47 - Gráfico de dispersão da frequência relativa dos ciclos de carga / DST - 042 / Equipamento nº 55

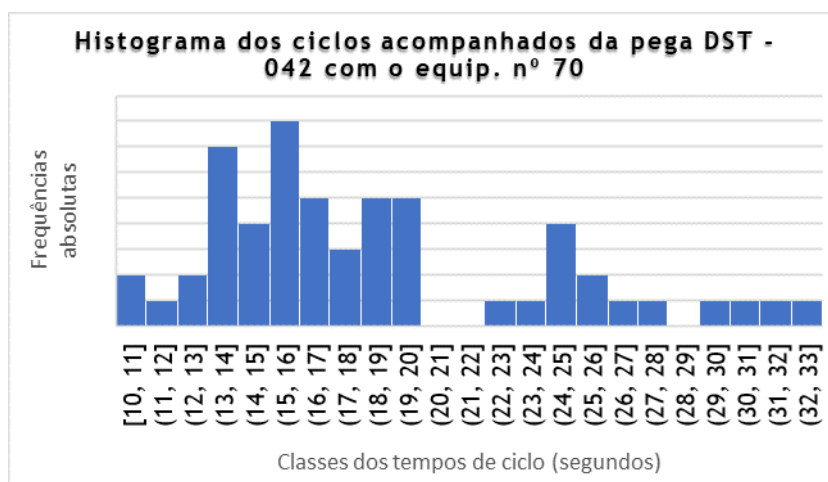


Figura 48 - Histograma dos ciclos de carga da pilha / DST - 042 / Equipamento nº 70

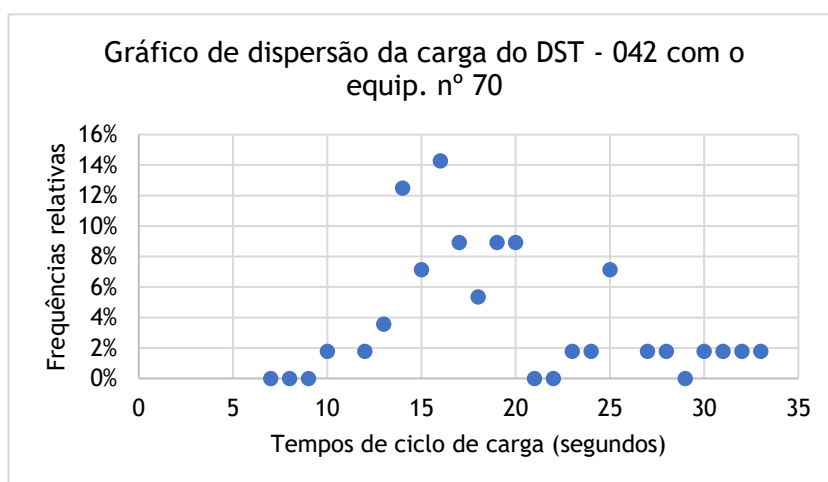


Figura 49 - Gráfico de dispersão da frequência relativa dos ciclos de carga / DST - 042 / Equipamento nº 70

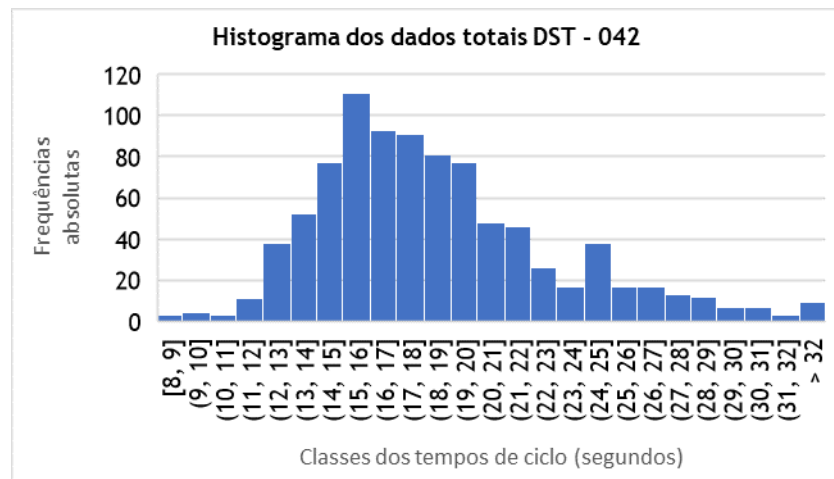


Figura 50 - Histograma dos ciclos totais recolhidos pela carga da pilha do desmonte DST - 042 / Equip. nº55 e 70

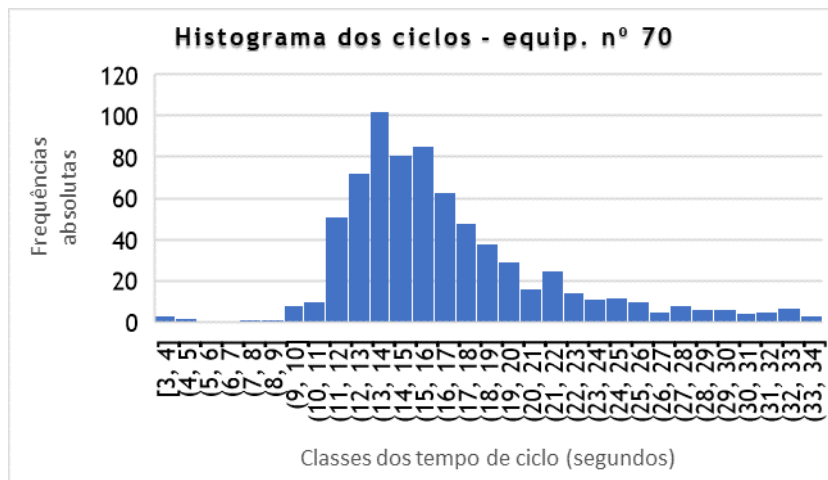


Figura 51 - Histograma dos ciclos recolhidos com a caga da pilha do desmonte DST - 043 com recurso ao equipamento nº 70

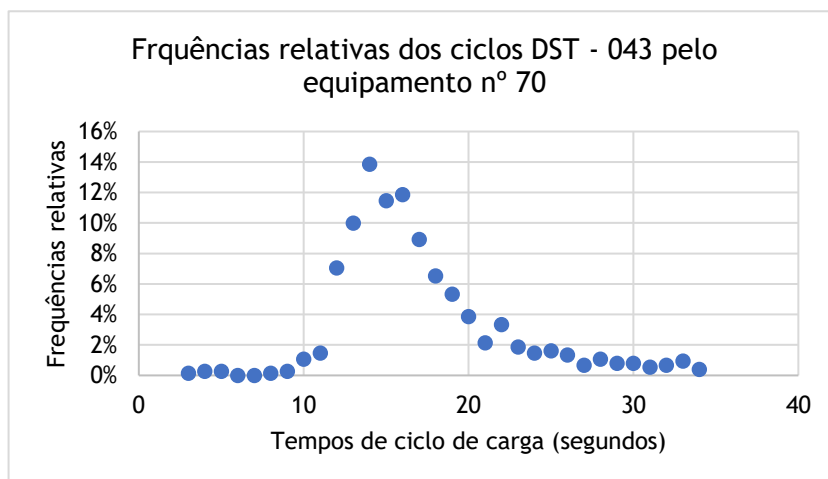


Figura 52 - Gráfico de dispersão com as frequências relativas ciclo de carga do desmonte DST - 043 / Equipamento nº 70

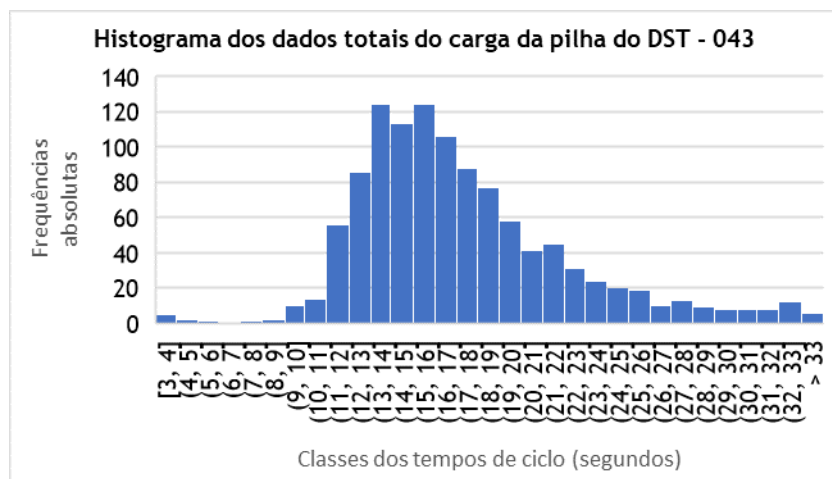


Figura 53 - Histograma dos ciclos totais da carga da pilha do DST - 043

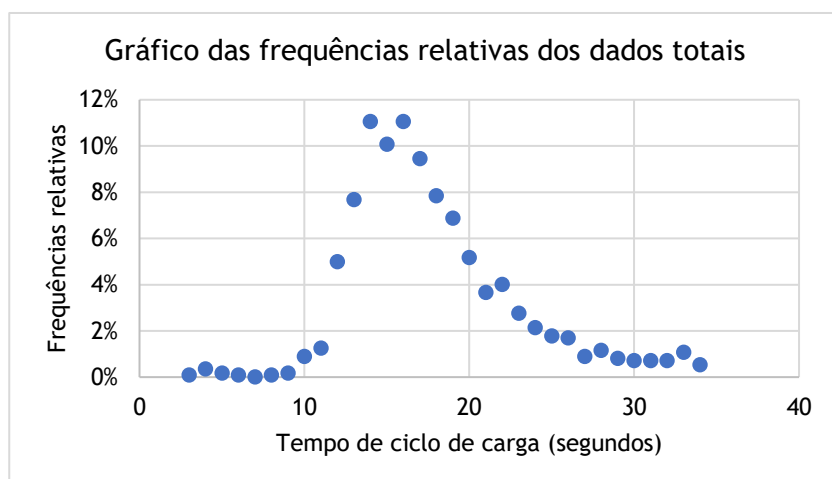


Figura 54 - Gráfico de dispersão dos ciclos / DST - 043 / Equipamento nº 55 e 70

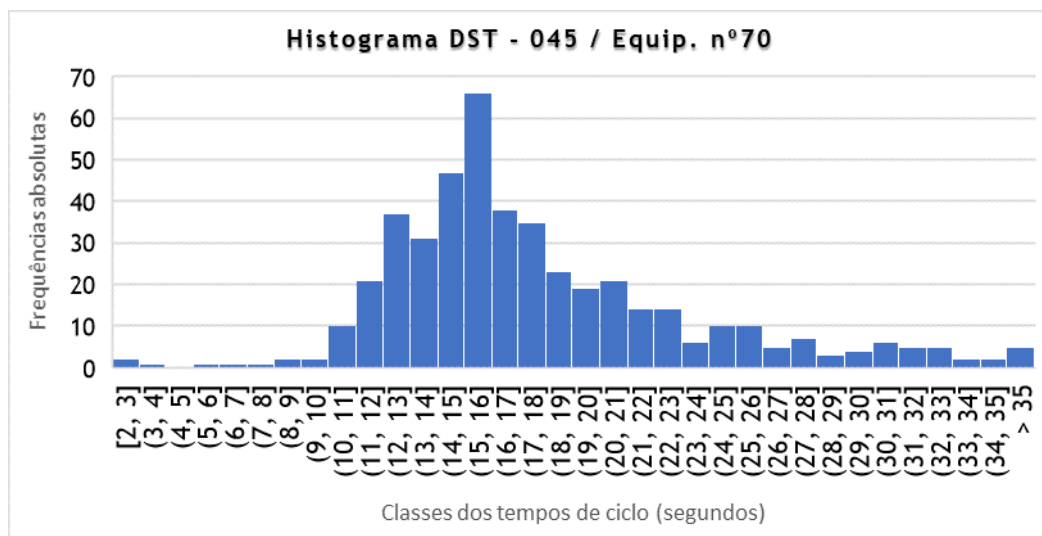


Figura 55 - Histograma dos ciclos recolhidos do DST - 045 / Equipamento nº 70

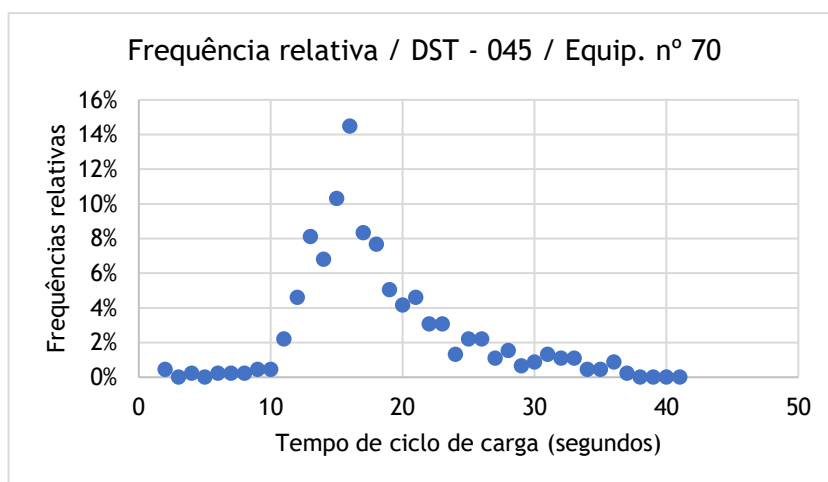


Figura 56 - Frequências relativas dos ciclos recolhidos do DST - 045 / Equipamento nº 70

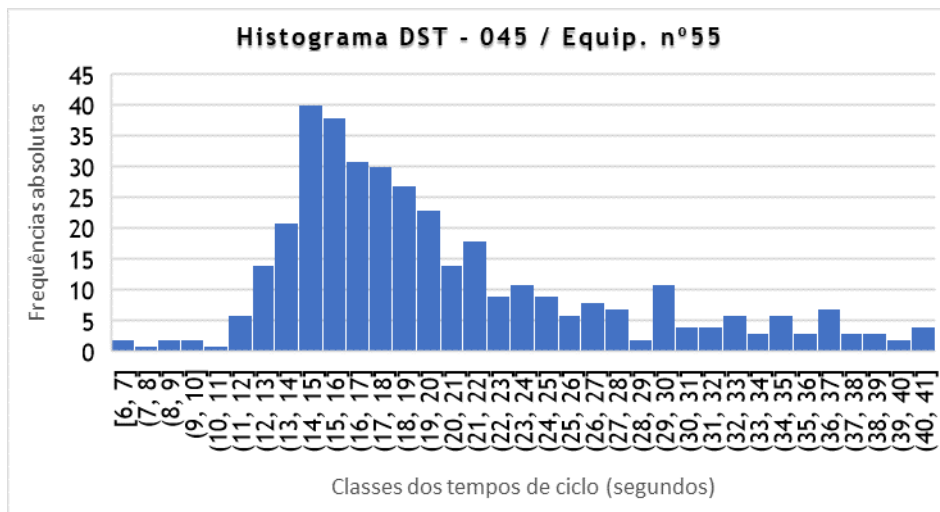


Figura 57 - Histograma dos ciclos recolhidos do DST - 045 / Equipamento nº 55

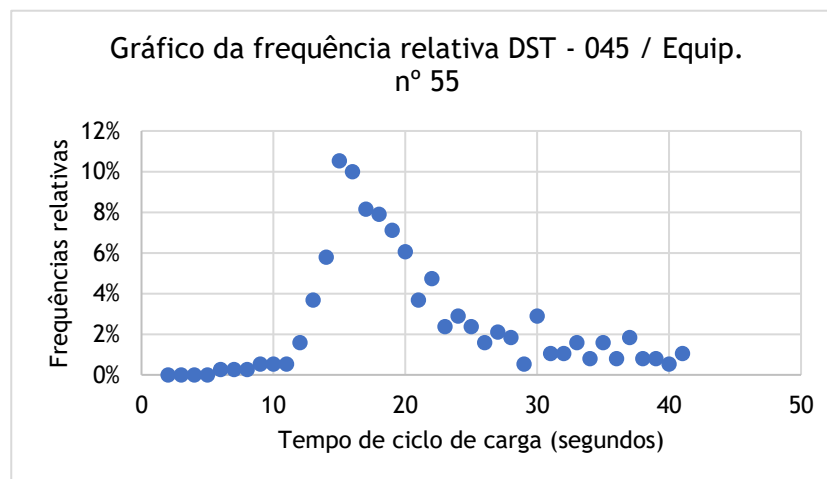


Figura 58 - Frequências relativas dos ciclos recolhidos do DST - 045 / Equipamento nº 70

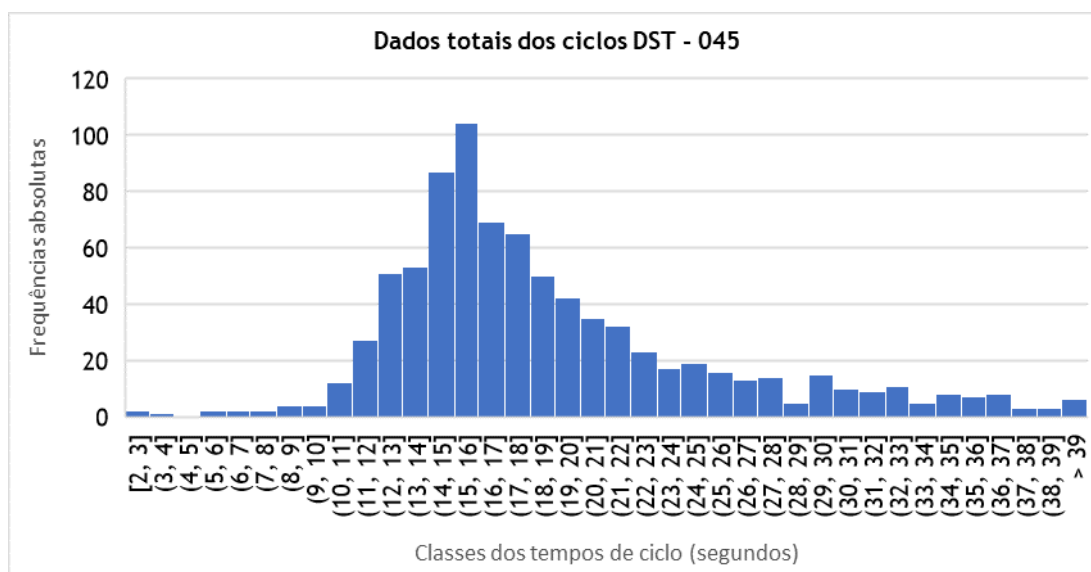


Figura 59 - Histograma dos dados totais recolhidos do DST - 045 / Equip. nº 55 e 70

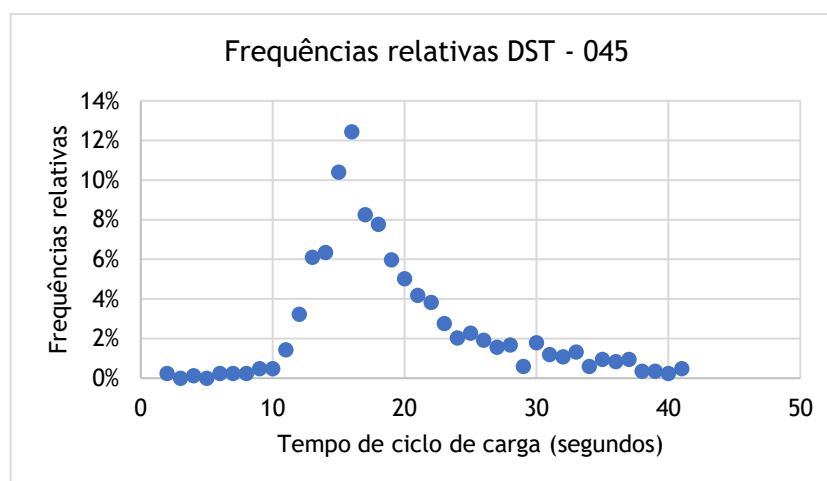


Figura 60 - Frequências relativas dos dados totais recolhidos no DST - 045 / Equip. nº 55 e 70

Dados e análises do desmonte: DST - 047

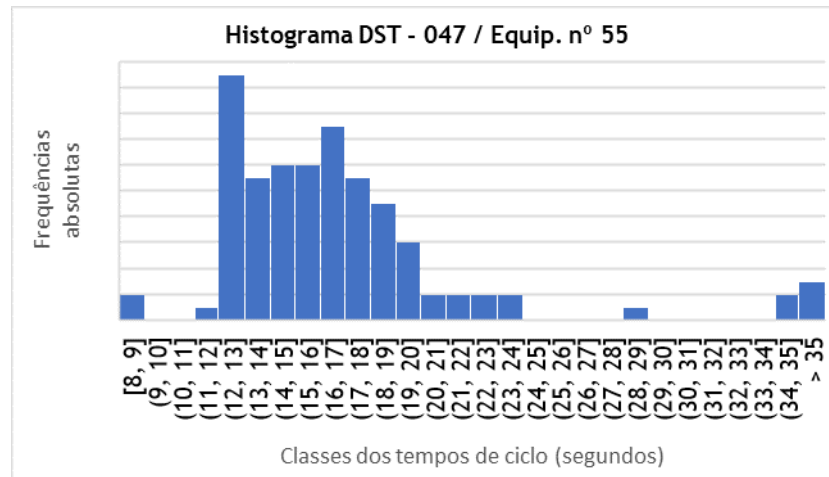


Figura 61 - Histograma dos dados totais do DST - 047 / Equip. nº 55

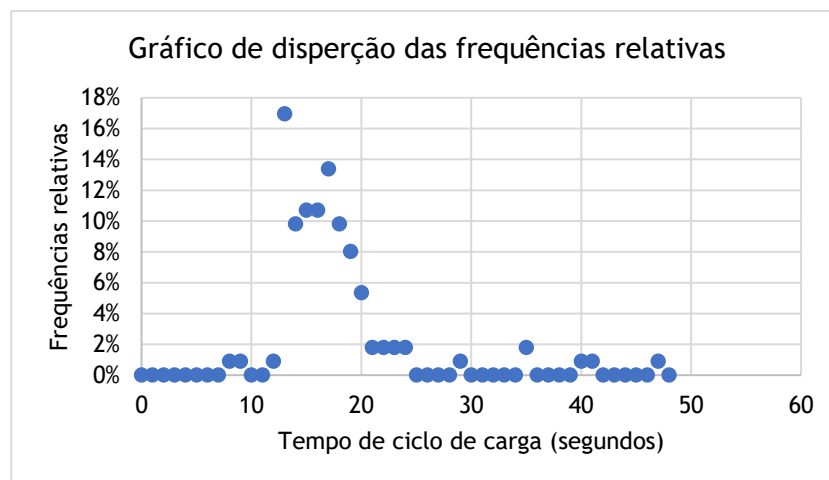


Figura 62 - Frequências relativas dos dados recolhidos do DST - 047 / Equip. nº 55

Anexo 4 - Gráficos de dispersão referentes à simulação

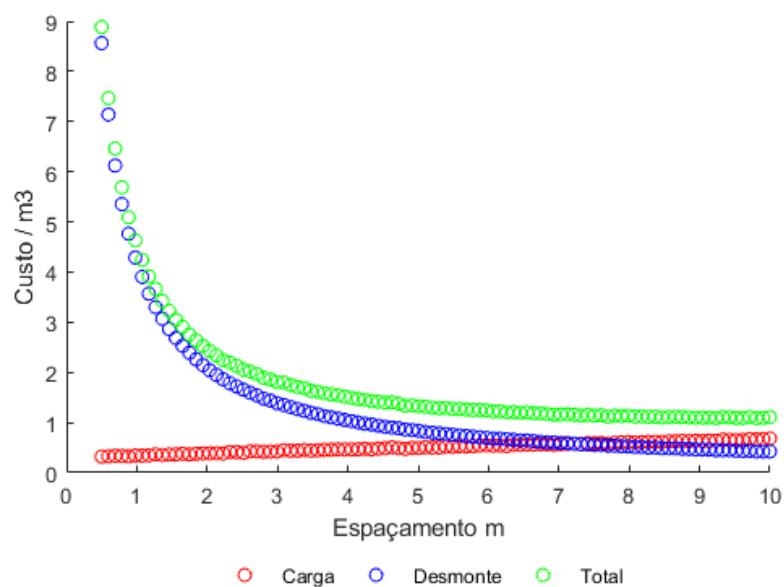


Figura 63 - Relação entre o Espaçamento e os custos de desmonte, de carregamento e os custos totais através da simulação realizada

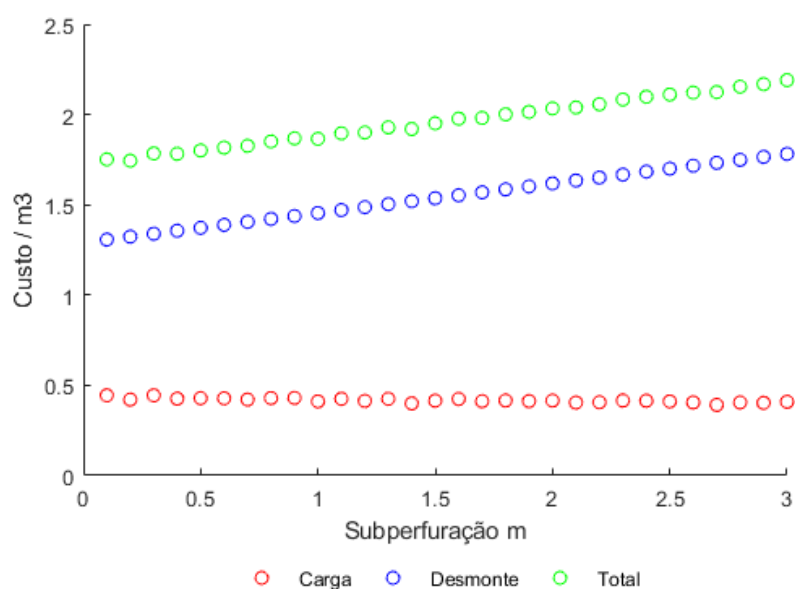


Figura 64 - Relação entre a subperfuração e os custos de desmonte, de carregamento e os custos totais através da simulação realizada

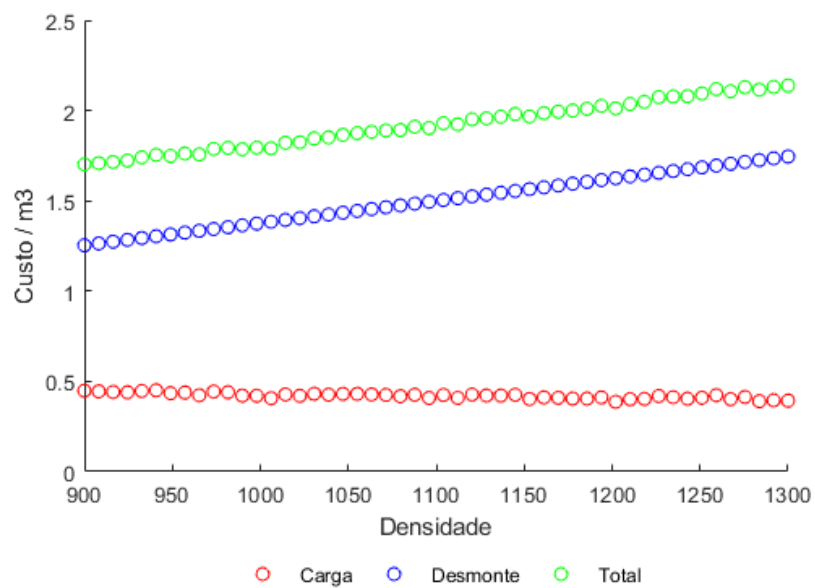


Figura 65 - Relação entre a densidade do explosivo e os custos de desmonte, de carregamento e os custos totais através da simulação realizada

Anexo 5 - Código elaborado para a simulação

Código elaborado pra a simulação - 1ª Parte

```
%Main function
clear;
clc;

fatorEmpolamento = 1.5;
numeroDeSimulacoes = 100;
diametros = [76 89 102 140 165];

custoDesmonte=[];
custoCarga=[];
powderFactor=[];

bancada = 1;

matriz = xlsread('dados.xlsx'); %leio os dados do arquivo excel
matriz = matriz(find(matriz(:,1)==bancada),2:end); %fico com os dados
apenas da bancada que quero

%separo as variáveis em dois vetores
x = matriz(:,1);
y = matriz(:,2);

% Influência do Diâmetro de perfuração

for j=1:length(diametros);

    for i=1:1;
        i+(j-1)*10;

        afastamento=3;
        espacamento=3;
        tampao=3;
        subperfuracao=0.9;
        alturaBancada=10;
        erroPerfuracao=0;
        volumeDesmontado=10000;
        densidade=1100;
        rws=106;
        custoPerfuracao=2.3;
        custoExplosivo=1.8;
        custoIniciacao=6;
```

```

        cargaCusto=75;
        fatorDeRocha=14;
        volumeCarregado=volumeDesmontado*fatorEmpolamento;

        pega =
PegaDeFogo (afastamento,espacamento,tampao,subperfuracao,alturaBancada,
...
            diámetros(j), erroPerfuracao,volumeDesmontado, densidade,
rws, custoPerfuracao,custoExplosivo,...
            custoIniciacao,cargaCusto, fatorDeRocha);

        simular = simulacao(pega,3.5,0.5,0.9,numeroDeSimulacoes);
        resultado = simular.simular(x,y,fatorEmpolamento);
        custoDesmonte=[custoDesmonte
(sum(pega.calcularCustos)/volumeDesmontado)];%estava por m3 isto é
[custoDesmonte (sum(pega.calcularCustos)/volumeDesmontado)]
        custoCarga = [custoCarga
(mean(resultado(:,2))/volumeDesmontado)];%estava por m3 isto é
[custoCarga (mean(resultado(:,2))/volumeDesmontado)]
        powderFactor =[powderFactor resultado(1,1)];
    end

end

%graficos custo por powder factor
scatter(powderFactor,custoCarga,[],'r')
hold on
scatter(powderFactor,custoDesmonte,[],'b')
scatter(powderFactor,custoDesmonte + custoCarga,[],'g')

legend('boxoff')
legend({'Carga','Desmonte','Total'},'Location','southoutside','Orienta
tion','horizontal')
legend('boxoff')
xlabel('Powder factor Kg/m3')
ylabel('Custo / m3');

figure();

scatter(powderFactor,custoCarga,[],'r')

legend('boxoff')
legend({'Carga'},'Location','southoutside','Orientation','horizontal')
legend('boxoff')
xlabel('Powder factor Kg/m3')
ylabel('Custo / m3');

%graficos custo por diâmetro
figure();

scatter(diámetros,custoCarga,[],'r')
hold on
scatter(diámetros,custoDesmonte,[],'b')
scatter(diámetros,custoDesmonte + custoCarga,[],'g')

legend('boxoff')

```

```

legend({'Carga','Desmonte','Total'},'Location','southoutside','Orientation','horizontal')
legend('boxoff')
xlabel('Diametro mm')
ylabel('Custo / m3');

figure();

scatter(diametros,custoCarga,[],'r')

legend('boxoff')
legend({'Carga'},'Location','southoutside','Orientation','horizontal')
legend('boxoff')
xlabel('Diametro mm')
ylabel('Custo / m3');

%%%INFLUENCIA DO ESPACAMENTO

custoDesmonte=[];
custoCarga=[];
powderFactor=[];

for j=2:2;

    for i=1:100;
        i+(j-1)*10;

        afastamento=3;
        espacamento=0.5 + (i-1)*0.1;
        tampao=3;
        subperfuracao=0.9;
        alturaBancada=10;
        erroPerfuracao=0;
        volumeDesmontado=10000;
        densidade=1100;
        rws=106;
        custoPerfuracao=2.3;
        custoExplosivo=1.8;
        custoIniciacao=6;
        cargaCusto=75;
        fatorDeRocha=14;
        volumeCarregado=volumeDesmontado*fatorEmpolamento;

        pega =
PegaDeFogo(afastamento,espacamento,tampao,subperfuracao,alturaBancada,
...
            diametros(j), erroPerfuracao,volumeDesmontado, densidade,
rws, custoPerfuracao,custoExplosivo,...
            custoIniciacao,cargaCusto, fatorDeRocha);

```

```

        simular = simulacao(pega,3.5,0.5,0.9,numeroDeSimulacoes);
        resultado = simular.simular(x,y,fatorEmpolamento);
        custoDesmonte=[custoDesmonte
(sum(pega.calcularCustos)/volumeDesmontado)];
        custoCarga = [custoCarga
(mean(resultado(:,2))/volumeDesmontado)];
        %powderFactor =[powderFactor resultado(1,1)];
    end

end

x1 = linspace(0.5,10,100);

figure()
scatter(x1,custoCarga,[],'r')
hold on
scatter(x1,custoDesmonte,[],'b')
scatter(x1,custoDesmonte + custoCarga,[],'g')

legend('boxoff')
legend({'Carga','Desmonte','Total'},'Location','southoutside','Orientation','horizontal')
legend('boxoff')
xlabel('Espaçamento m')
ylabel('Custo / m3');

figure();

scatter(x1,custoCarga,[],'r')

legend('boxoff')
legend({'Carga'},'Location','southoutside','Orientation','horizontal')
legend('boxoff')
xlabel('Espaçamento m')
ylabel('Custo / m3');

%%%Inflência do Tampão

custoDesmonte=[];
custoCarga=[];
powderFactor=[];

for j=2:2;

    for i=1:100;
        i+(j-1)*10;

        afastamento=3;
        espacamento=3;
        tampao=0.1 + (i-1)*0.1;
        subperfuracao=0.9;
        alturaBancada=10;
        erroPerfuracao=0;
        volumeDesmontado=10000;
        densidade=1100;
    end
end

```

```

        rws=106;
        custoPerfuracao=2.3;
        custoExplosivo=1.8;
        custoIniciacao=6;
        cargaCusto=75;
        fatorDeRocha=14;
        volumeCarregado=volumeDesmontado*fatorEmpolamento;

        pega =
PegaDeFogo (afastamento,espacamento,tampao,subperfuracao,alturaBancada,
...
            diámetros(j), erroPerfuracao,volumeDesmontado, densidade,
rws, custoPerfuracao,custoExplosivo,...
            custoIniciacao,cargaCusto, fatorDeRocha);

        simular = simulacao(pega,3.5,0.5,0.9,numeroDeSimulacoes);
        resultado = simular.simular(x,y,fatorEmpolamento);
        custoDesmonte=[custoDesmonte
(sum(pega.calcularCustos)/volumeDesmontado)];
        custoCarga = [custoCarga
(mean(resultado(:,2))/volumeDesmontado)];

        end

end

x1 = linspace(0.1,3,100);

figure()
scatter(x1,custoCarga,[],'r')
hold on
scatter(x1,custoDesmonte,[],'b')
scatter(x1,custoDesmonte + custoCarga,[],'g')

legend('boxoff')
legend({'Carga','Desmonte','Total'},'Location','southoutside','Orientation','horizontal')
legend('boxoff')
xlabel('Tampao m')
ylabel('Custo / m3');

figure();

scatter(x1,custoCarga,[],'r')

legend('boxoff')
legend({'Carga'},'Location','southoutside','Orientation','horizontal')
legend('boxoff')
xlabel('Tampao m')
ylabel('Custo / m3');

%%%Influência do Afastamento

```

```

custoDesmonte=[];
custoCarga=[];
powderFactor=[];

for j=2:2;

    for i=1:100;
        i+(j-1)*10;

        afastamento=0.5 + (i-1)*0.1;;
        espacamento=3;
        tampao=3;
        subperfuracao=0.9;
        alturaBancada=10;
        erroPerfuracao=0;
        volumeDesmontado=10000;
        densidade=1100;
        rws=106;
        custoPerfuracao=2.3;
        custoExplosivo=1.8;
        custoIniciacao=6;
        cargaCusto=75;
        fatorDeRocha=14;
        volumeCarregado=volumeDesmontado*fatorEmpolamento;

        pega =
PegaDeFogo(afastamento,espacamento,tampao,subperfuracao,alturaBancada,
...
            diametros(j), erroPerfuracao,volumeDesmontado, densidade,
rws, custoPerfuracao,custoExplosivo,...
            custoIniciacao,cargaCusto, fatorDeRocha);

        simular = simulacao(pega,3.5,0.5,0.9,numeroDeSimulacoes);
        resultado = simular.simular(x,y,fatorEmpolamento);
        custoDesmonte=[custoDesmonte
(sum(pega.calcularCustos)/volumeDesmontado)];
        custoCarga = [custoCarga
(mean(resultado(:,2))/volumeDesmontado)];

    end

end

x1 = linspace(0.5,10,100);

figure()
scatter(x1,custoCarga,[],'r')
hold on
scatter(x1,custoDesmonte,[],'b')
scatter(x1,custoDesmonte + custoCarga,[],'g')

legend('boxoff')
legend({'Carga','Desmonte','Total'},'Location','southoutside','Orienta
tion','horizontal')
legend('boxoff')
xlabel('Afastamento m')
ylabel('Custo / m3');

```

```

figure();

scatter(x1,custoCarga,[],'r')

legend('boxoff')
legend({'Carregamento'},'Location','southoutside','Orientation','horizontal')
legend('boxoff')
xlabel('Afastamento m')
ylabel('Custo / m3');

%%%Influência da Subperfuração
custoDesmonte=[];
custoCarga=[];
powderFactor=[];

for j=2:2;

    for i=1:30;
        i+(j-1)*10;

        afastamento=3;
        espacamento=3;
        tampao=3;
        subperfuracao=0.1 + (i-1)*0.1;
        alturaBancada=10;
        erroPerfuracao=0;
        volumeDesmontado=10000;
        densidade=1100;
        rws=106;
        custoPerfuracao=2.3;
        custoExplosivo=1.8;
        custoIniciacao=6;
        cargaCusto=75;
        fatorDeRocha=14;
        volumeCarregado=volumeDesmontado*fatorEmpolamento;

        pega =
PegaDeFogo(afastamento,espacamento,tampao,subperfuracao,alturaBancada,
...
            diametros(j), erroPerfuracao,volumeDesmontado, densidade,
rws, custoPerfuracao,custoExplosivo,...
            custoIniciacao,cargaCusto, fatorDeRocha);

        simular = simulacao(pega,3.5,0.5,0.9,numeroDeSimulacoes);
        resultado = simular.simular(x,y,fatorEmpolamento);
        custoDesmonte=[custoDesmonte
(sum(pega.calcularCustos)/volumeDesmontado)];
        custoCarga = [custoCarga
(mean(resultado(:,2))/volumeDesmontado)];

    end

```

```

end

x1 = linspace(0.1,3,30);

figure()
scatter(x1,custoCarga,[],'r')
hold on
scatter(x1,custoDesmonte,[],'b')
scatter(x1,custoDesmonte + custoCarga,[],'g')

legend('boxoff')
legend({'Carga','Desmonte','Total'},'Location','southoutside','Orientation','horizontal')
legend('boxoff')
xlabel('Subperfuração m')
ylabel('Custo / m3');

figure();

scatter(x1,custoCarga,[],'r')

legend('boxoff')
legend({'Carga'},'Location','southoutside','Orientation','horizontal')
legend('boxoff')
xlabel('Subperfuração m')
ylabel('Custo / m3');

% Influência do explosivo - RWS

custoDesmonte=[];
custoCarga=[];
powderFactor=[];

for j=2:2;

    for i=1:50;
        i+(j-1)*10;

        afastamento=3;
        espacamento=3;
        tampao=3;
        subperfuracao=1;
        alturaBancada=10;
        erroPerfuracao=0;
        volumeDesmontado=10000;
        densidade=1100;
        rws=80+(i-1)*1;
        custoPerfuracao=2.3;
        custoExplosivo=1.8;
        custoIniciacao=6;
        cargaCusto=75;
        fatorDeRocha=14;
        volumeCarregado=volumeDesmontado*fatorEmpolamento;
    end
end

```

```

        pega =
PegaDeFogo (afastamento,espacamento,tampao,subperfuracao,alturaBancada,
...
            diametros(j), erroPerfuracao,volumeDesmontado, densidade,
rws, custoPerfuracao,custoExplosivo,...
            custoIniciacao,cargaCusto, fatorDeRocha);

        simular = simulacao(pega,3.5,0.5,0.9,numeroDeSimulacoes);
        resultado = simular.simular(x,y,fatorEmpolamento);
        custoDesmonte=[custoDesmonte
(sum(pega.calcularCustos)/volumeDesmontado)];
        custoCarga = [custoCarga
(mean(resultado(:,2))/volumeDesmontado)];
        %powderFactor =[powderFactor resultado(1,1)];
    end

end

x1 = linspace(80,150,50);

figure()
scatter(x1,custoCarga,[],'r')
hold on
scatter(x1,custoDesmonte,[],'b')
scatter(x1,custoDesmonte + custoCarga,[],'g')

legend('boxoff')
legend({'Carga','Desmonte','Total'},'Location','southoutside','Orienta
tion','horizontal')
legend('boxoff')
xlabel('rws (%)')
ylabel('Custo / m3');

figure();

scatter(x1,custoCarga,[],'r')

legend('boxoff')
legend({'Carga'},'Location','southoutside','Orientation','horizontal')
legend('boxoff')
xlabel('rws (%)')
ylabel('Custo / m3');

% Influência do explosivo - Densidade

custoDesmonte=[];
custoCarga=[];
powderFactor=[];

for j=2:2;

    for i=1:50;

```

```

i+(j-1)*10;

afastamento=3;
espacamento=3;
tampao=3;
subperfuracao=1;
alturaBancada=10;
erroPerfuracao=0;
volumeDesmontado=10000;
densidade=900+(i-1)*10;
rws=106;
custoPerfuracao=2.3;
custoExplosivo=1.8;
custoIniciacao=6;
cargaCusto=75;
fatorDeRocha=14;
volumeCarregado=volumeDesmontado*fatorEmpolamento;

pega =
PegaDeFogo(afastamento,espacamento,tampao,subperfuracao,alturaBancada,
...
           diametros(j), erroPerfuracao,volumeDesmontado, densidade,
rws, custoPerfuracao,custoExplosivo,...
           custoIniciacao,cargaCusto, fatorDeRocha);

simular = simulacao(pega,3.5,0.5,0.9,numeroDeSimulacoes);
resultado = simular.simular(x,y,fatorEmpolamento);
custoDesmonte=[custoDesmonte
(sum(pega.calcularCustos)/volumeDesmontado)];
custoCarga = [custoCarga
(mean(resultado(:,2))/volumeDesmontado)];
%powderFactor =[powderFactor resultado(1,1)];
end

end

x1 = linspace(900,1300,50);

figure()
scatter(x1,custoCarga,[],'r')
hold on
scatter(x1,custoDesmonte,[],'b')
scatter(x1,custoDesmonte + custoCarga,[],'g')

legend('boxoff')
legend({'Carga','Desmonte','Total'},'Location','southoutside','Orienta
tion','horizontal')
legend('boxoff')
xlabel('Densidade')
ylabel('Custo / m3');

figure();

scatter(x1,custoCarga,[],'r')

legend('boxoff')
legend({'Carga'},'Location','southoutside','Orientation','horizontal')

```

```
legend('boxoff')  
xlabel('Densidade')  
ylabel('Custo / m3');
```

Código elaborado pra a simulação - 2ª Parte

```
classdef kuzRam

    properties

        pega;

    end

    methods
        %aqui estamos atribuindo o objeto
        function obj = kuzRam(pega)

            obj.pega = pega;

        end

        function x50 = calcularx50(obj)

            x50 = obj.pega.fatorDeRocha*obj.pega.pf^(-
0.8)*obj.pega.kilosPorFuro^(1.0/6.0)*(115/obj.pega.rws)^(19.0/30.0)*10
;

        end

    end
end
```

Código elaborado pra a simulação - 3ª Parte

%Essa classe contem todos as características das pegas de fogo

```
classdef PegaDeFogo

    properties

        %geometria da pega
        afastamento = 0; %m
        espacamento = 0; %m
        tampao = 0; %m
        subperfuracao = 0; %m
        alturaBancada = 0; %m
        diametro = 0; %mm
        erroPerfuracao = 0; %m
        volumeDesmontado = 0; %m3

        %explosivo
        densidade = 0; %kg/m3
        rws = 0;

        %custo das operações elementares
        custoPerfuracao = 0; %custo por metro perfurado
        custoExplosivo = 0; %custo por kg
        custoIniciacao = 0; %custo por furo
        custoCarga = 0; %custo por hora por equipamento

        %Características geológicas
        fatorDeRocha = 0;

        %Equações a serem calculadas na iniciacao
        longitudeFuro = 0;
        longitudeCarga = 0;
        cargaFundo = 0;
        cargaColuna = 0;
        kilosPorFuro = 0;
        volumeRochaArrancada = 0;
        numeroFuros = 0;
        pf=0;%powder factor ou consumo especifico
    end

    methods
        %aqui estamos atribuir o objeto
        function obj =
PegaDeFogo(afastamento,espacamento,tampao,subperfuracao,alturaBancada,
...
            diametro, erroPerfuracao,volumeDesmontado,
densidade, rws, custoPerfuracao,custoExplosivo,...
            custoIniciacao,custoCarga, fatorDeRocha)

            obj.afastamento = afastamento;
```

```

obj.espacamento = espacamento;
obj.tampao = tampao;
obj.subperfuracao = subperfuracao;
obj.alturaBancada = alturaBancada;
obj.diametro = diametro;
obj.erroPerfuracao = erroPerfuracao;
obj.volumeDesmontado = volumeDesmontado;
obj.densidade = densidade;
obj.rws = rws;
obj.custoPerfuracao = custoPerfuracao;
obj.custoExplosivo = custoExplosivo;
obj.custoIniciacao = custoIniciacao;
obj.custoCarga = custoCarga;
obj.fatorDeRocha = fatorDeRocha;

%equacoes
obj.longitudeFuro = obj.alturaBancada +
obj.subperfuracao;
obj.longitudeCarga = obj.longitudeFuro -
obj.tampao;
obj.cargaFundo = 0.2*obj.longitudeCarga;
obj.cargaColuna = 0.8*obj.longitudeCarga;
obj.kilosPorFuro =
pi*(obj.diametro/2000)^2*obj.longitudeCarga*obj.densidade;
obj.volumeRochaArrancada =
obj.afastamento*obj.espacamento*obj.alturaBancada;
obj.numeroFuros =
ceil(obj.volumeDesmontado/obj.volumeRochaArrancada);
obj.pf =
obj.kilosPorFuro/obj.volumeRochaArrancada;

end

%calcular os custos do desmonte
function custos = calcularCustos(obj)

custos=[];
custos=[custos
(obj.kilosPorFuro*obj.numeroFuros*obj.custoExplosivo)]; %custo
explosivo
custos=[custos (obj.numeroFuros*obj.custoIniciacao)];
%custo iniciacao
custos=[custos (obj.numeroFuros*obj.longitudeFuro*obj.
custoPerfuracao)]; %custo perfuracao

end

%calcular o tempo de ciclo de carga: devolve vetor com
digTime e
%número simulado
function digTime = calcularDigTime(obj,x ,y)

kr = kuzRam(obj); %crio um objeto da classe KUZ RAM

lm = fitlm(x,y); %regressao linear
coeficientes = lm.Coefficients; %coeficiente angular e
constante

```

```

        coeficientes = coeficientes{:,,:}; % transformar de
tabela para matriz
        coeficientes = coeficientes(:,1); %apenas os valores
sem os estatisticos
        digTime=[];
        digTime = [ digTime (coeficientes(1) +
coeficientes(2)*kr.calcularx50())]; %posso calcular o tempo

        %acessar os limites dos intervalos de confianca
        ic = coefCI(lm);
        ic = ic(1,:);

        digTime = [digTime ic(2) coeficientes(1) min(y)];

    end

end
end

```

Código elaborado pra a simulação - 4ª Parte

%Essa classe controla os eventos de simulacao

```
classdef simulacao
```

```
    properties
```

```
        pega;  
        capacidadeBalde = 0;  
        espera = 0;  
        ff = 0;  
        iteracoes = 0;
```

```
    end
```

```
    methods
```

```
        %aqui estamos instanciando o objeto
```

```
        function obj = simulacao(pega,  
        capacidadeBalde,espera,ff,iteracoes)
```

```
            obj.pega = pega;  
            obj.capacidadeBalde = capacidadeBalde;  
            obj.espera = espera;  
            obj.ff = ff;  
            obj.iteracoes = iteracoes;
```

```
    end
```

```
    %calcular os custos do sistema de carregamento
```

```
    function resultado = simular(obj,x , y, empolamento)
```

```
        digTime = obj.pega.calcularDigTime(x,y);
```

```
        resultado=[];
```

```
        %resultado=zeros(obj.iteracoes,2);
```

```
        for i=1:obj.iteracoes;
```

```
            aleatorio = (digTime(2) - digTime(3))/1.96*randn() +  
            digTime(1);%valor de 1.96 devido corresponde a um intervalo de  
            confiança de 95%
```

```
            if aleatorio<digTime(4)  
                %aleatorio = digTime(4);  
            end
```

```
            volume = obj.pega.volumeDesmontado*empolamento;  
            tempo = 0;
```

```
            while volume>0  
                tempo=tempo + poissrnd(aleatorio);  
                volume = volume - obj.capacidadeBalde*obj.ff;
```

```
        end

        tempo = tempo/(1-obj.espera);

        resultado = [resultado ; obj.pegapf
((tempo/3600)*obj.pegacustoCarga)];

    end

end

end

end
```