



Instituto Superior de Engenharia do Porto

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOTÉCNICA

Ferramenta informática para modelação de instalação de britagem. Caso de estudo: pedreira de Fornelo

Linda Marta Ribeiro Passos



2022

(página propositadamente em branco)



Instituto Superior de Engenharia do Porto

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOTÉCNICA

Ferramenta informática para modelação de instalação de britagem. Caso de estudo: pedreira de Fornelo

Computer tool for modelling crushing plants. Case study: Fornelo quarry

Linda Marta Ribeiro Passos

1191738

*Projeto apresentado ao Instituto Superior de Engenharia do Porto para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de **Mestre em Engenharia Geotécnica e Geoambiente**, realizada sob a orientação do Professor Doutor José Augusto de Abreu Peixoto Fernandes, Professor Coordenador no Departamento de Engenharia Geotécnica do ISEP.*

(página propositadamente em branco)

Júri

Presidente

Doutor João Paulo Meixedo dos Santos Silva

Professor Coordenador, Departamento de Engenharia Geotécnica, Instituto Superior de Engenharia do Porto

Doutor José Augusto de Abreu Peixoto Fernandes

Professor Coordenador, Departamento de Engenharia Geotécnica, Instituto Superior de Engenharia do Porto

Doutor José António Ganilho Lopes Velho

Professor Associado com Agregação, Departamento de Geociências, Universidade de Aveiro

*A dissertação de mestrado em engenharia geotécnica e geoambiente (MEGG) foi apresentada e defendida em prova pública, por **Linda Marta Ribeiro Passos**, em 15 de Novembro de 2022 mediante o júri nomeado, em que foi atribuída, por unanimidade, a classificação final de **14 (catorze) valores**, cuja fundamentação se encontra em acta. Todas as correções pontuais determinadas pelo júri, e só essas, foram efectuadas.*

Agradecimentos

Gostaria de expressar o meu agradecimento a todas as pessoas, colegas de curso e docentes do Departamento de Engenharia Geotécnica do ISEP, que de uma forma direta ou indireta contribuíram para a concretização do presente trabalho. Mas, gostaria de agradecer em particular:

- Ao Professor José Augusto Fernandes, orientador científico desta dissertação, por toda a disponibilidade, orientação e ajuda durante a realização do trabalho.
- À METSO, pela cedência do simulador “Bruno”, na pessoa do Engenheiro Paulo Leitão;
- Ao Engenheiro Vítor Oliveira, por toda ajuda cedida no simulador “Bruno”;
- À empresa ElevoAgregados, na pessoa do Engenheiro Hélder, pelas amostras e dados fornecidos da pedreira de Fornelo;
- À Professora Sílvia Spínola e ao Técnico Sr. Carlos Ferreira (LGMC|ISEP) pela ajuda disponibilizada nos ensaios laboratórios;
- Aos meus colegas de curso e amigos, que me apoiaram durante a minha vida de estudante, principalmente a Inês Oliveira pela ajuda e troca de ideias;
- Ao meu namorado, pelo apoio incondicional, principalmente quando eu queria desistir e que apesar de não perceber nada da área em estudo, ajudou-me a rever o texto e na formatação.
- A toda a minha família, mas em especial aos meus Pais e ao meu Irmão, por todo o apoio deste do início, e por estarem sempre ao meu lado. O que sou hoje deve-se a eles.

(página propositadamente em branco)

Palavras-chave

Fragmentação, britagem, classificação, curva granulométrica, simulador.

Resumo

Numa instalação de britagem, o processo de fragmentação consiste em reduzir os materiais rochosos em fragmentos de menor dimensão, através dos fragmentadores, originando lotes comercializáveis com diferentes granulometrias. Neste sentido, é possível obter a curva granulométrica para cada lote, através do ensaio de granulometria. Todavia, existe um *software* que permite obter esta curva granulométrica e o consumo energético, a partir dos equipamentos que existem na instalação, ou seja, o simulador “Bruno”. Para verificar se o simulador “Bruno” é fidedigno, consideraram-se os valores obtidos através deste, tendo como linha de comparação os valores dos ensaios de laboratório sobre materiais obtidos na instalação de britagem em estudo e os dados fornecidos pela empresa ElevoAgregados, proprietária da referida instalação. Assim, numa fase inicial foram abordados todos os temas necessários à instalação de britagem, aos ensaios laboratoriais e ao simulador “Bruno”. Foram analisadas amostras da Pedreira de Fornelo e, após o tratamento de todos os dados, realizou-se uma comparação entre os dados obtidos na simulação e os dados reais, ou seja, na instalação atualmente em funcionamento e sobre a qual recaiu este estudo. Perante os resultados obtidos, concluiu-se que o simulador “Bruno” é uma ferramenta importante e com elevado potencial, na fase de projeto ou como instrumento de controle de uma instalação em funcionamento e que pode ser utilizado, seja para obter as curvas granulométricas, as produções ou até mesmo para o cálculo do consumo energético.

(página propositadamente em branco)

Keywords

Crushing, crushing plant, particle size curve, screening, simulation tool.

Abstract

In a crushing plant, the fragmentation process involves reducing rocky materials into smaller particles through shredders, creating batches with different particle sizes. In this sense, obtaining the particle size curve for each batch through the particle size test is possible. However, the software allows obtaining this granulometric curve and the energy consumption from the equipment that exists in the installation, that is, the “Bruno” simulator. In order to verify if the “Bruno” simulator is trustworthy, we will take into account the values obtained through it, having as a line of comparison the values of the laboratory tests and the data provided by the company ElevoAgregados. Therefore, in the initial phase, all topics necessary for crushing installation, laboratory tests and the “Bruno” simulator were addressed. Samples from the Fornelo Quarry were analyzed, and after processing all the data, a comparison was made between the data obtained in the simulation and the real data, that is, in the installation currently in operation and on which this study was carried out. The results concluded that the simulator “Bruno” is reliable and can be used to obtain particle size curves, productions or even to calculate energy consumption.

(página propositadamente em branco)

Índice

1.	Introdução.....	3
1.1.	Âmbito.....	3
1.2.	Objetivos.....	3
1.3.	Organização da dissertação.....	4
2.	Estado da arte.....	7
2.1.	Fragmentação.....	7
2.1.1.	Mecanismo de fragmentação.....	7
2.1.1.1.	Fragmentação por compressão.....	9
2.1.1.2.	Fragmentação por abrasão.....	9
2.1.1.3.	Fragmentação por impacto.....	9
2.1.1.4.	Fragmentação por atrito.....	9
2.1.2.	Etapas da fragmentação.....	10
2.1.3.	Leis de fragmentação.....	10
2.1.3.1.	Lei de Rittinger.....	11
2.1.3.2.	Lei de Kick.....	11
2.1.3.3.	Lei de Bond.....	11
2.2.	Movimentação de materiais – alimentadores.....	12
2.2.1.	Alimentador vibratório.....	14
2.3.	Britadores.....	15
2.3.1.	Britadores de maxilas.....	15
2.3.2.	Britadores giratório.....	16
2.3.3.	Britador Cónico.....	16
2.3.4.	Britadores de impacto.....	17
2.4.	Classificadores (crivos).....	19
2.4.1.	Classificação geométrica.....	19
2.4.1.1.	Peneiração.....	19
2.4.2.	Classificação por equivalência.....	20
2.4.2.1.	Classificadores de corrente horizontal.....	21
2.4.2.1.1.	Cones de sedimentação.....	21
2.4.2.1.2.	Classificadores mecânicos.....	22
2.4.2.2.	Classificadores de corrente verticais.....	23
2.4.3.	Hidrociclones.....	24
2.5.	Correias transportadoras.....	26
3.	Metodologia.....	31
3.1.	Análise granulométrica por peneiração.....	31
3.1.1.	Aparelhos e utensílios.....	32
3.1.2.	Procedimento de ensaio.....	33
3.2.	Índice de forma.....	33
3.2.1.	Aparelhos e utensílios.....	34
3.3.	Procedimento de ensaio: (Provetes em que de $D \leq 2d$, caso em estudo).....	34
3.4.	Simulador “Bruno”.....	34
4.	Caso em estudo: Pedreira de Forno.....	43
4.1.	Apresentação da empresa.....	43
4.2.	Localização da Pedreira.....	43
4.3.	Caracterização Geológica.....	44
4.4.	Instalação atual de britagem.....	45
5.	Resultados dos ensaios laboratoriais.....	49
5.1.	Análise granulométrica.....	49
5.2.	Resultados do ensaio de determinação da forma.....	55
6.	Simulador “Bruno” - Instalação de britagem da Pedreira de Forno.....	59

6.1.	Simulação A	64
6.2.	Simulação B	65
6.3.	Simulação C	66
6.4.	Simulação D	67
6.5.	Simulação E	68
6.6.	Simulação F	69
7.	Análise e discussão dos resultados	73
7.1.	Interpretação das curvas granulométricas	73
7.2.	Consumo energético	75
7.3.	Valor do produto final	77
8.	Conclusões	81
	Referências bibliográficas	85

Índice de figuras

Figura 1. Objetivos a alcançar no estudo realizado.....	4
Figura 2. Síntese dos capítulos abordados nesta dissertação.	4
Figura 3. Exemplo de rompimento do material por forças externas (Londe & Finzer, 2017).	8
Figura 4. Efeitos dos esforços aplicados em zonas de fratura (Londe & Finzer, 2017).	8
Figura 5. As forças de tensão mecânica das rochas (adaptado de (Metso Corporation, 2005)).....	9
Figura 6. Distribuição das partículas de acordo com a fragmentação utilizada (Carvalho, 2012).....	10
Figura 7. Classificação das epatas de fragmentação (Carvalho, 2012).....	10
Figura 8. Alimentador vibratório apoiado (Metso minerals, 2005).....	14
Figura 9. Alimentador vibratório suspenso (Metso minerals, 2005).....	14
Figura 10. Britador de maxilas com um eixo; b: Britador de maxilas com dois eixos (adaptado de (Metso minerals, 2005).....	16
Figura 11. Britador giratório (Metso minerals, 2005).....	16
Figura 12. Britador Cónico (Metso minerals, 2005).	17
Figura 13. Britador de impacto horizontal (Metso minerals, 2005).	18
Figura 14. Britador de impacto vertical (Metso minerals, 2005).....	18
Figura 15. Crivo inclinado da Metso (Metso minerals, 2005).....	20
Figura 16. Representação esquemática de um cone duplo (Luz, Sampaio, & França, 2010).	21
Figura 17. Representação esquemática do classificador de arraste (ORG) (Luz, Sampaio, & França, 2010). .	22
Figura 18. Representação esquemática do classificador de ancinhos (Rake) (Luz, Sampaio, & França, 2010).	22
Figura 19. Representação esquemática do classificador espiral (Luz, Sampaio, & França, 2010).....	23
Figura 20. Representação esquemática de um classificador vertical (Luz, Sampaio, & França, 2010).	24
Figura 21. Representação esquemática de um hidrociclone convencional (Luz, Sampaio, & França, 2010)..	25
Figura 22. Sistema Transportador – Componentes básicos (https://www.ctborracha.com/borracha-sintese-historica/aplicacoes/correias-transportadoras/sistema-transportador-2/ , acedido em Set 2021).....	27
Figura 23. Forma de operação de correias transportadoras (https://www.ctborracha.com/borracha-sintese-historica/aplicacoes/correias-transportadoras/correias-transportadoras-especiais-2/ , acedido em Set 2021).	28
Figura 24.Exemplo de curva granulométrica obtida num ensaio de análise granulométrica (https://www.teconursos.com.br/questoes/172860).	32
Figura 25. A-Peneiros de ensaio -ASTM; B-Balança de precisão; C-Estufa ventilada.	32
Figura 26. Lavagem das amostras.	33
Figura 27. Paquímetro digital.	34
Figura 28. Simulação com equipamentos isolados (à esquerda- simulação com britador; à direita – simulação com um crivo) (Nunes & Ono, 2020).	35
Figura 29. Simulação num sistema simples (Nunes & Ono, 2020).	36
Figura 30. Simulação num sistema complexo (Nunes & Ono, 2020).....	36
Figura 31. Área de trabalho do Simulador "Bruno".....	37
Figura 32. Barra de tarefa com a respetiva legenda.....	37
Figura 33. Exemplo de uma curva granulometria obtida no "Bruno".	38
Figura 34. Modo Process Report no "Bruno".	39
Figura 35. Entrada de dados da alimentação no Simulador "Bruno".	39
Figura 36. Equipamentos integrados no simulador "Bruno".....	40
Figura 37. Localização da Pedreira de Fornelo (Adaptada de (https://bityli.com/fjMnRvqes)).....	44
Figura 38. Extrato da carta geológica, folha 9-A, a escala 1/5000 (adaptada de (Geoportal, 1965)).....	45
Figura 39. Diagrama de processamento da instalação de britagem do Centro de Produção de Vila Verde nº2.	46
Figura 40. Diagrama de britagem obtido no simulador "Bruno" para os lotes a obter.	60
Figura 41. Simulação A da instalação de britagem.....	64
Figura 42. Simulação B da instalação de britagem.	65
Figura 43. Simulação C da instalação de britagem.	66
Figura 44. Simulação D da instalação de britagem.....	67
Figura 45. Simulação E da instalação de britagem.	68
Figura 46. Simulação F da instalação de britagem.	69

(página propositadamente em branco)

Índice de tabelas

Tabela 1. Características gerais dos alimentadores (Metso minerals, 2005).	13
Tabela 2. Principais britadores e as respectivas características (adaptado de (Carvalho, 2012), (M.S. Guimarães, 2006) e (Metso Corporation, 2005)).	15
Tabela 3. Projetos da Elevo (Elevogroup, 2021).	43
Tabela 4. Dados da análise granulométrica dos diferentes lotes.	55
Tabela 5. Equipamentos na instalação e os equivalentes da Metso.	59
Tabela 6. Produção dos lotes por 1000h.	63
Tabela 7. Diversas simulações para estudo.	63
Tabela 8. Produção por 1000 horas e consumo de energia da instalação de fregmentação.....	70
Tabela 9. Valores utilizados na fórmula de Bond tendo em conta as modelações em estudo, para primeira etapa de fragmentação.	76
Tabela 10. Valores utilizados na fórmula de Bond tendo em conta as modelações em estudo, para a segunda etapa de fragmentação.	76
Tabela 11. Valores utilizados na fórmula de Bond tendo em conta as modelações em estudo, para a terceira etapa de fragmentação.	76
Tabela 12. Valores médios do consumo de energia dos fragmentadores das modelações em estudo.....	77
Tabela 13. Valor do produto de cada lote.	77
Tabela 14. Valores comercias por lote para diferentes simulações.	78

(página propositadamente em branco)

Índice de Equações

Equação 1. Lei de Rittinger (Luz, Sampaio, & França, 2010)	11
Equação 2. Lei de Kick (Luz, Sampaio, & França, 2010).....	11
Equação 3. Lei de Bond (Luz, Sampaio, & França, 2010).....	11
Equação 4. Percentagem de material retido no peneiro, pela norma (NP EN 933-1 2002, 2002).....	31
Equação 5. Percentagem de finos (f) que passam no peneiro de 0,063mm, pela norma (NP EN 933-1 2002, 2002).....	31
Equação 6. Índice de forma para provetes em que $D \leq 2d$, pela norma (NP EN 933-4 2002, 2002).....	33
Equação 7. Índice de forma para provetes em que $D > 2d$, pela norma (NP EN 933-4 2002, 2002).....	33

(página propositadamente em branco)

Índice de Gráficos

Gráfico 1. Curva Granulométrica de Fornelo fornecida pelo Elevo do lote 0/4.	49
Gráfico 2. Curva Granulométrica de Fornelo fornecida pelo Elevo do lote 4/14.	50
Gráfico 3. Curva Granulométrica de Fornelo fornecida pelo Elevo do lote 12 20.	50
Gráfico 5. Curva Granulométrica de Fornelo fornecida pelo Elevo do lote 0 32I.	51
Gráfico 6. Curva Granulométrica de Fornelo fornecida pelo Elevo do lote 0 32II.	52
Gráfico 7. Curva Granulométrica de Fornelo obtida no ensaio de laboratório do lote 0 4.	53
Gráfico 8. Curva Granulométrica de Fornelo obtida no ensaio de laboratório do lote 4 14.	53
Gráfico 9. Curva Granulométrica de Fornelo obtida no ensaio de laboratório do lote 12 20.	54
Gráfico 10. Curva Granulométrica de Fornelo obtida no ensaio de laboratório do lote 20 40.	54
Gráfico 12. Curva granulométrica do lote 0 4 obtido no simulador "Bruno".	61
Gráfico 13. Curva granulométrica do lote 4 8 obtido no simulador "Bruno".	61
Gráfico 14. Curva granulométrica do lote 8 14 obtido no simulador "Bruno".	62
Gráfico 15. Curva granulométrica do lote 12 20 obtido no simulador "Bruno".	62
Gráfico 16. Curva granulométrica do lote 20 40 obtido no simulador "Bruno".	63
Gráfico 17. Curva granulométrica_ Laboratório/Simulador "Bruno" /Elevo_Lote 0 4.	73
Gráfico 18. Curva granulométrica_ Laboratório/Simulador "Bruno" /Elevo_Lote 12 20.	74
Gráfico 19. Curva granulométrica_ Laboratório/Simulador "Bruno" /Elevo_Lote 20 40.	75

(página propositadamente em branco)

Capítulo I

Introdução

(página propositadamente em branco)

1. Introdução

1.1. Âmbito

A presente dissertação enquadra-se na unidade curricular ‘Dissertação/Projeto/Estágio’, do 2º ano, do Curso de Mestrado em Engenharia Geotécnica e Geoambiente do Departamento de Engenharia Geotécnica (DEG) do Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP), do Politécnico do Porto. A elaboração e defesa pública da presente dissertação, em formato “Projeto”, são imperativos para a conclusão do 2º ciclo e a consequente obtenção do grau de Mestre em Engenharia Geotécnica e Geoambiente.

1.2. Objetivos

Neste sentido, o principal objetivo desta dissertação é a comparação entre os dados reais obtidos em campo (material rochoso a fragmentar, quantidade de material na alimentação da instalação, os equipamentos de fragmentação e classificação, as quantidades produzidas por lote comercializável e algumas características físicas dos materiais produzidos, na instalação de britagem da pedreira de Fornelo, do Grupo Elevo, e os valores obtidos através do simulador “Bruno”, para a mesma condição de serviço. Para tal, foi necessário obter informações sobre o centro de produção e as amostras dos lotes comercializados pela empresa em questão. Através dos dados adquiridos, foi então possível exportá-los para o *software* e, assim, verificar os resultados fornecidos pelo mesmo com o intuito de avaliar se existe alguma concordância entre ambos sob os pontos de vista da produção e características dos materiais. Assim, com as amostras produzidas, na unidade industrial objeto deste estudo, foi possível chegar à distribuição granulométrica dos lotes produzidos e ao respetivo índice de forma, sendo por fim, analisados todos os dados, verificando eventuais diferenças existentes entre o real (instalação de produção) e o esperado (conforme projeção do *software*). Agora torna-se então possível enumerar sub-objetivos para melhor compreensão do trabalho realizado (Figura 1):

- Obtenção de informações da unidade produtora em estudo;
- Obtenção de amostras dos lotes produzidos e comercializados;
- Tratamento e simulação com os dados obtidos no simulador “Bruno”;
- Realização de ensaios laboratoriais sobre as amostras recolhidas;
- Procura de erros entre o real e o esperado;
- Interpretação e comparação dos dados obtidos.

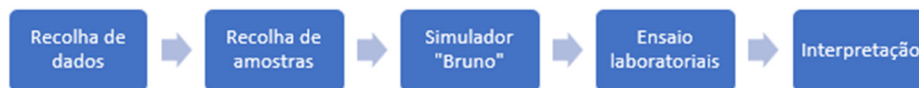


Figura 1. Objetivos a alcançar no estudo realizado.

1.3. Organização da dissertação

O presente trabalho está organizado em três etapas. A primeira etapa, diz respeito aos capítulos de 1 a 4, fazendo a contextualização teórica, na qual são apresentados os conceitos, as metodologias e os equipamentos usualmente utilizados neste tipo de unidades produtoras de agregados. A segunda etapa corresponde aos capítulos 5 e 6, nos quais se apresentam os resultados obtidos em laboratório relativamente aos trabalhos práticos realizados. Por fim, a última etapa corresponde ao capítulo 7, no qual se faz uma análise dos resultados obtidos e respetiva interpretação, assim como as ilações que se podem retirar do estudo realizado (Figura 2).

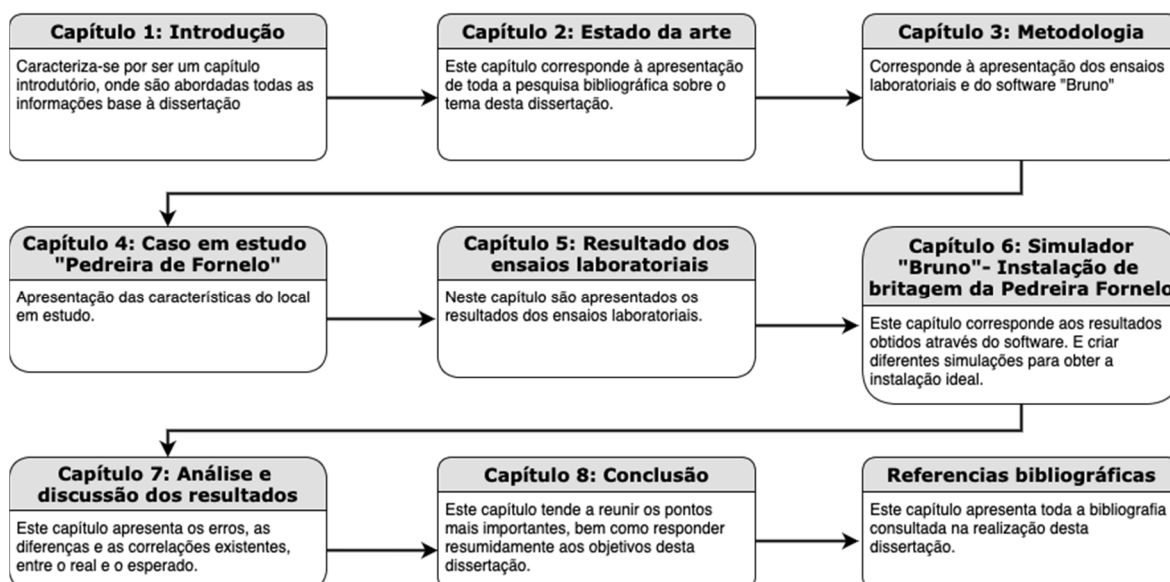


Figura 2. Síntese dos capítulos abordados nesta dissertação.

Capítulo II

Estado da Arte

(página propositadamente em branco)

2. Estado da arte

Atendendo ao facto de se pretender verificar as similaridades entre o projeto de uma instalação de britagem, simulada com *software* específico para o efeito, e uma unidade de produção real a funcionar, entendeu-se importante apresentar as operações de processamento, principais e acessórias, industrialmente envolvidas (fragmentações e classificações), assim como os tipos e as características dos equipamentos (alimentadores, britadores, crivos e correias transportadoras) habitualmente nelas aplicados.

2.1. Fragmentação

O processo de fragmentação, para beneficiamento de minério ou produção de agregados, utiliza um grupo de técnicas e equipamentos que têm como propósito reduzir, por ação mecânica externa e por vezes interna, um bloco de determinado tamanho em fragmentos de granulometria menor. A fragmentação de um material rochoso pode ter como finalidades: i) libertar os materiais mais valiosos, ou minerais, das respetiva(s) ganga(s) (quando se trata do tratamento de minérios), ii) reduzir para o tamanho necessário, a fim da sua comercialização e utilização, tal como acontece na produção de agregados. Assim sendo, a operação de fragmentação inclui diversos estágios, os quais correspondem a sucessivas reduções de calibre, em função das relações de redução mais apropriadas a cada fragmentador.

2.1.1. Mecanismo de fragmentação

Os mecanismos de fragmentação são muito diversos tendo em conta a enorme variedade estrutural de materiais sólidos e as diferentes granulometrias finas pretendidas. Estes mecanismos dão-se a partir da aplicação de tensões que provocam fissuras no material a fragmentar. Desta forma, a concentração de esforço atinge um valor crítico, quando todas as ligações atómicas de um certo plano se quebram, levando a um rápido crescimento e ramificação das fissuras, que pode ser provocado por forças externas (Figura 3) (Londe & Finzer, 2017).

O material ideal rompe-se quando o limite de rotura é ultrapassado, isto significa que, todas as ligações atómicas de um certo plano se rompem. Estas formas podem ser geradas pelas cargas de tensão ou de compressão, uma vez que como as rochas e os minerais são geomateriais heterogêneos, anisotrópicos e contém falhas e fraturas, pelo que este rompimento não ocorre facilmente (Londe & Finzer, 2017).

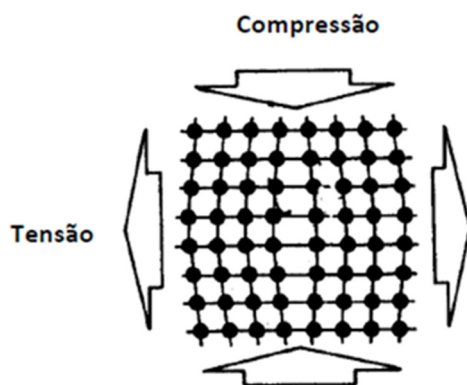


Figura 3. Exemplo de rompimento do material por forças externas (Londe & Finzer, 2017).

Quando existem falhas microscópicas, nas ciências dos materiais, estas são chamadas de deslocamentos, enquanto na mecânica das rochas são designadas como “gretas de *griffith*”. A existência dessas falhas explica a baixa resistência mecânica dos materiais. A teoria da fratura estuda a formação de gretas a partir de falhas e sua propagação no sólido.

Quando as partículas são submetidas a forças uniformes, as pressões internas são irregularmente distribuídas, isto porque as rochas são constituídas por diversas variedades de minerais dispersos, com tamanhos de grão diferenciados. A distribuição das forças não depende só das propriedades mecânicas de cada mineral, mas depende principalmente da presença de gretas e falhas no corpo mineral tal como pode ser observado na Figura 4 que como sítios de concentração de forças (Londe & Finzer, 2017).

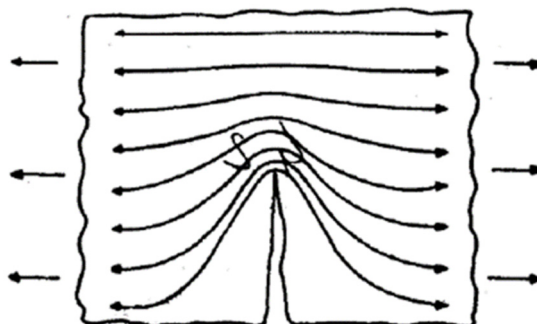


Figura 4. Efeitos dos esforços aplicados em zonas de fratura (Londe & Finzer, 2017).

A energia mecânica necessária para a fragmentação é aplicada pelos seguintes mecanismos (Figura 5):

- ✓ Compressão ou clivagem;
- ✓ Impacto ou corte;
- ✓ Força de cisalhamento ou abrasão;
- ✓ Atrito.

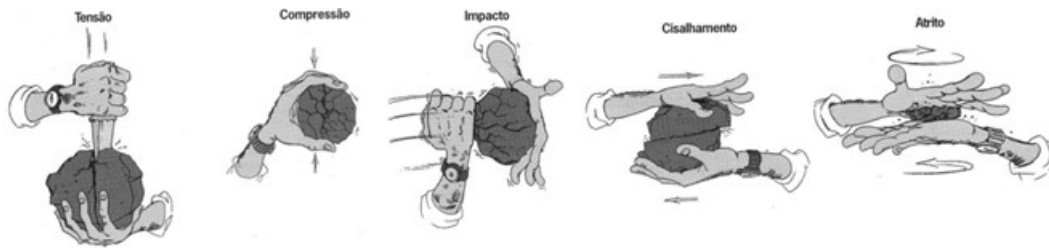


Figura 5. As forças de tensão mecânica das rochas (adaptado de (Metso Corporation, 2005)).

2.1.1.1. Fragmentação por compressão

A fragmentação por compressão, ou clivagem, ocorre quando a energia aplicada é apenas suficiente para fraturar a partícula, resultando assim em partículas pequenas e partículas com um tamanho muito próximo da partícula original. Esta fragmentação é apropriada para reduzir fragmentos com grandes granulometrias, sendo comum utilizar britadores em estágios primários e secundários, como são os britadores de maxilas, os giratórios e os cónicos (Figura 6) (911metallurgist, s.d.).

2.1.1.2. Fragmentação por abrasão

A fragmentação por abrasão é provocada por um esforço de cisalhamento na superfície das partículas, originando fragmentação superficial, resultando assim um produto final com uma reduzida quantidade de partículas finas e uma elevada quantidade de partículas grosseiras (Figura 6) (Magalhães, 2013).

2.1.1.3. Fragmentação por impacto

Na fragmentação por impacto, as partículas que entram na câmara do britador são submetidas a um grande esforço compressivo, resultado assim uma elevada distribuição granulométrica, dando lugar à presença de materiais finos até grosseiros (Figura 6), sendo que os britadores utilizados são os britadores de impacto (Magalhães, 2013).

2.1.1.4. Fragmentação por atrito

A fragmentação por atrito acontece devido às interações partícula-partícula e podem ocorrer ao longo do percurso do material dentro do britador. Se este for alimentado muito rapidamente pode provocar um contacto maior entre as partículas aumentando assim o atrito, resultando num material muito fino, que por vezes é indesejável (Luz, Sampaio, & França, 2010).

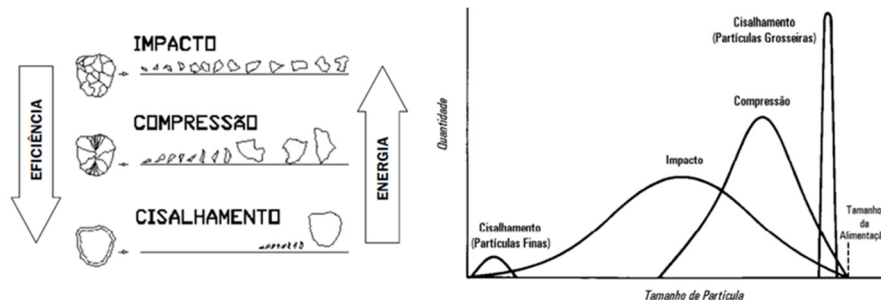


Figura 6. Distribuição das partículas de acordo com a fragmentação utilizada (Carvalho, 2012).

2.1.2. Etapas da fragmentação

A etapa inicial da fragmentação pode ser considerada o desmonte que corresponde a fragmentação primária das rochas *“in situ”*, através do desmonte de rocha com recurso a explosivos, originando blocos, conhecida pela etapa de lavra.

A segunda etapa corresponde à britagem, sendo esta uma operação que fragmenta os blocos que surgem da primeira etapa, sendo que existem diversos equipamentos para a realização este objetivo, tendo em conta as características da rocha a fragmentar, as capacidades pretendidas e as especificidades dos produtos a obter com vista à respetiva comercialização, entre outros. A operação pode ser repetida diversas vezes, em equipamentos com características diferentes e adaptados à respetiva fase de redução de calibre, para que se obtenha um material adequado para a alimentação da moagem (quando exista).

Após a britagem, passa-se à etapa da moagem, na qual, e porque se trata ainda de uma operação de redução de calibre, se atua sobre partículas de reduzida dimensão. A Figura 7 apresenta as etapas de fragmentação.

Etapa	Britagem Primária	Britagem Secundária	Britagem Terciária	Britagem Quaternária	Moagem Grossa	Moagem Fina
Tamanho Máximo da alimentação (mm)	500-2000	100-635	10-100	5-76	9,5-19	13
Tamanho máximo da produção (mm)	100-305	19-102	1-25	0,8-1,5	0,8-1,5	Fino
Relação de Redução	8:1	6:1 a 8:1	4:1 a 6:1	até 20	até 20	100:1 a 200:1

Figura 7. Classificação das etapas de fragmentação (Carvalho, 2012).

2.1.3. Leis de fragmentação

Apesar de todos os estudos realizados para o mecanismo de fragmentação, ainda não existe uma teoria geral que seja satisfatória para aplicar na prática. Uma relação que permita calcular a energia necessária à fragmentação de um material até um certo tamanho, já é uma pretensão antiga.

Neste seguimento, as leis habitualmente utilizadas para o efeito são:

- ✓ Lei de Rittinger
- ✓ Lei de Rick;
- ✓ Lei de Bond.

2.1.3.1. Lei de Rittinger

A lei de Rittinger é a relação mais antiga e foi estabelecida por P. Ritter Von Rittinger e diz que “a área da nova superfície produzida por fragmentação é diretamente proporcional ao trabalho útil consumido”, traduzindo-se na Equação 1 apresentada em seguida, sendo que só pode ser aplicada à fragmentação muito fina (Luz, Sampaio, & França, 2010):

Equação 1. Lei de Rittinger (Luz, Sampaio, & França, 2010).

$$E = K(S_1 - S_0), \text{ em que:}$$

$E = \text{energia específica}; K = \text{fator de proporcionalidade};$
 $S_1 = \text{área do produto}; S_0 = \text{área inicial}.$

2.1.3.2. Lei de Kick

A lei de Kick é a segunda lei e foi formulada por F. Kick e mostra-nos que “o trabalho requerido é proporcional à redução em volume das partículas envolvidas”. Esta lei traduz-se pela Equação 2 apresentada seguidamente, e deve ser aplicada de preferência, à fragmentação de rochas de grande dimensão (Luz, Sampaio, & França, 2010):

Equação 2. Lei de Kick (Luz, Sampaio, & França, 2010).

$$E = C \log \frac{D_0}{D_1}, \text{ em que:}$$

$C = \text{constante}; D_0 = \text{diâmetro inicial}; D_1 = \text{diâmetro final}.$

2.1.3.3. Lei de Bond

A lei de Bond surgiu porque as leis de Rittinger e Kick não abrangem todos os casos encontrados na prática e também pela necessidade de haver regras para a classificação dos materiais quanto às suas fragmentações, sendo designada como a 3ª lei de fragmentação. Neste sentido, esta lei diz que “a energia consumida para reduzir o tamanho de um material é inversamente proporcional à raiz quadrada do tamanho”, sendo que o tamanho corresponde a abertura da peneira pela qual passa 80% do material, traduzindo-se na Equação 3 (Luz, Sampaio, & França, 2010).

Equação 3. Lei de Bond (Luz, Sampaio, & França, 2010).

$$E = 10W_i \left(\frac{1}{\sqrt{P}} - \frac{1}{\sqrt{F}} \right) \text{ em que :}$$

$W_i = \text{índice de trabalho em kWh/t};$
 $P = \text{abertura da peneira onde passam 80\% da massa do produto, em } \mu\text{m};$
 $F = \text{abertura da peneira onde passam 80\% da massa da alimentação, em } \mu\text{m}.$

O W_i (Work Index), ou índice de trabalho, é valor atribuído ao consumo de energia gasta na fragmentação, tendo em conta a distribuição do produto no fragmentador e o tipo de material a fragmentar. Pelas razões apontadas esta foi a lei utilizada neste trabalho para o cálculo da energia necessária à fragmentação.

2.2. *Movimentação de materiais – alimentadores*

Os alimentadores têm como principal função movimentar os materiais até aos fragmentadores primários. Existem diversos tipos de alimentador, nomeadamente:

- ✓ Alimentador de sapatas;
- ✓ Alimentador vibratório;
- ✓ Alimentador de gaveta;
- ✓ Alimentador de correia;
- ✓ Calha vibratória;
- ✓ Calha de alta vibração

A Tabela 1 apresenta as características gerais dos alimentadores da empresa Metso, no caso em estudo é o alimentador vibratório sendo que as suas características serão mais pormenorizadas posteriormente.

Tabela 1. Características gerais dos alimentadores (Metso minerals, 2005).

Alimentador	Alimentador de sapatas	Alimentador vibratório *Apoiado **Suspensão	Calha vibratória	Alimentador de gaveta	Calha de alta vibração (vibraline)	Alimentador de correia
Capacidade	Até 10 000 t/h	Até 2 000 t/h	Até 300 t/h	Até 160 t/h	Até 1500 t/h	Até 5000 t/h
Tamanho Máximo de material	Até 50 % da largura da esteira	Até 80 % da largura da mesa	Até 30 % da largura da mesa	Até 30 % da largura da gaveta	Até 20 % da largura da mesa	Até 50 % da largura da correia
Principais Aplicações	<ul style="list-style-type: none"> ○ Serviços pesados; ○ Alimentação primária; ○ Retomada de grandes volumes. 	<ul style="list-style-type: none"> ○ Serviços pesados; ○ Alimentação de britadores primários* ○ Retomadas de materiais graúdos ** 	<ul style="list-style-type: none"> ○ Retomada de materiais de granulometria média de silos e pilas 	<ul style="list-style-type: none"> ○ Alimentação de transportadores de correia 	<ul style="list-style-type: none"> ○ Alimentação de circuitos que requerem dosagens precisas e taxas médias e altas de alimentação 	<ul style="list-style-type: none"> ○ Retomada de materiais finos e/ ou húmidos sob silos e pilas.
Vantagens	<ul style="list-style-type: none"> ○ Alta resistência ao impacto ○ Alta carga admissível por unidade de área ○ Descarga direta na esteira ○ Boa regulação de fluxo ○ Pode elevar o material ○ Comprimento conforme a necessidade ○ Pode reduzir a altura da instalação ○ Manuseia bem materiais argilosos com alto teor de humidade 	<ul style="list-style-type: none"> ○ Alta segurança de funcionamento ○ Pequena altura ○ Separação prévia dos finos ○ Pouca e fácil manutenção ○ Bom controlo da alimentação ○ Baixo Custo 	<ul style="list-style-type: none"> ○ Baixo custo ○ Pouca e fácil manutenção ○ Pequenas dimensões ○ Boa segurança de funcionamento 	<ul style="list-style-type: none"> ○ Bom controlo de alimentação ○ Baixo custo ○ Baixa potência instalada 	<ul style="list-style-type: none"> ○ Ótimo controlo de alimentação ○ Baixa potência instalada ○ Alta capacidade ○ Pequenas dimensões ○ Baixo ruído operacional 	<ul style="list-style-type: none"> ○ Bom controlo de alimentação ○ Baixo custo ○ Manuseia bem materiais argilosos com alto teor de humidade
Desvantagens	<ul style="list-style-type: none"> ○ Alto custo ○ Má vedação (acumula finos por baixo, necessitando de correia ou alimentador de corrente para manter a limpeza) ○ Não classifica nem escalpa finos 	<ul style="list-style-type: none"> ○ Não pode ser carregado diretamente ○ Há necessidade de um pré-silo ○ Não pode ser usado para elevar o material ○ Comprimento limitados ○ Alta potência instalada ○ Capacidade cai em função da quantidade de material argiloso podendo até, em certas condições, se torna inoperante 	<ul style="list-style-type: none"> ○ Regulação de fluxo difícil (imprecisa) ○ Não pode trabalhar com matérias maiores que 10" ○ Capacidade cai em função da quantidade de material argiloso podendo até, em certas condições, se torna inoperante 	<ul style="list-style-type: none"> ○ Rápido desgaste do revestimento ○ Manutenção cara ○ Tamanho máximo do material 6" ○ Capacidade cai em função da quantidade de material argiloso podendo até, em certas condições, se torna inoperante 	<ul style="list-style-type: none"> ○ Tamanho máximo de material limitado ○ Alto custo de controlo elétrico ○ Capacidade cai em função da quantidade de material argiloso podendo até, em certas condições, tornar-se inoperante 	<ul style="list-style-type: none"> ○ Tamanho máximo do material limitado ○ Alto desgaste das correias

2.2.1. Alimentador vibratório

Os alimentadores vibratórios podem ser apoiados ou suspensos. A figura 8 apresenta um alimentador do tipo apoiado e a Figura 9 um alimentador do tipo suspenso.

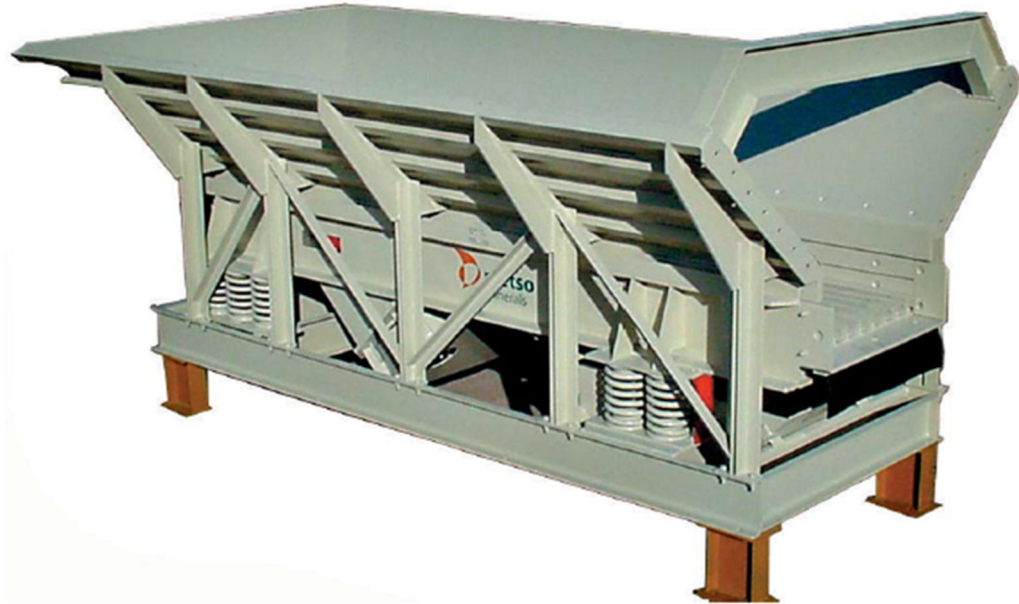


Figura 8. Alimentador vibratório apoiado (Metso minerals, 2005).



Figura 9. Alimentador vibratório suspenso (Metso minerals, 2005).

Estes tipos de alimentadores têm como aplicações principais: serviços pesados, o transporte de materiais com maior calibre para a alimentação de britadores primários, alimentação de transporte de correia e retoma de materiais graúdos.

2.3. Britadores

A escolha do britador deve ser efetuada tendo em vista as condições de trabalho, o tamanho da alimentação, a capacidade pretendida e as características físicas, de forma a minimizar os custos (Metso Corporation, 2005). A Tabela 2 apresenta os principais tipos de britadores e as respetivas características.

Tabela 2. Principais britadores e as respetivas características (adaptado de (Carvalho, 2012), (M.S. Guimarães, 2006) e (Metso Corporation, 2005)).

	Britador de Maxilas	Britador Giratório	Britador Cónico	Britador de Impacto
Etapas de fragmentação	Primária	Primária e Secundária	Secundária e Terciária	Primária, Secundária e Terciária
Relação de redução	4:1 a 6:1	6:1 a 8:1	3:1 a 7:1	6:1 a 40:1
Capacidade de produção (ton/h)	Baixa a média (até 1300)	Média a alta (até 10000)	Baixa a média (até 2400)	Baixa a média (até 2400)
Energia consumida por Tonelada	Baixo Consumo	Alto Consumo	Médio Consumo	Alto Consumo
Tamanho máximo da alimentação (mm)	Até 1500	Até 1600	Até 500	Até 1500
Granulometria do produto final	Pouco finos, com tendência a produzir agregados lamelares	Granulometria uniforme com pouco finos, agregados com formato mais cúbicos	Granulometria uniforme, agregados tendem a ter um formato mais cúbico	Produção excessiva de finos, mas os agregados apresentam um formato cúbico

Todos os britadores podem ser classificados em dois grupos principais (Metso minerals, 2005):

- ✓ Britadores de compressão, que no fundo esmagam o material até o quebrar;
- ✓ Britadores de impacto, os quais utilizam o princípio do rápido impacto para despedaçar o material.

2.3.1. Britadores de maxilas

Os britadores de maxilas (mandíbulas) são principalmente utilizados como britadores primários (Luz, Sampaio, & França, 2010). Este tipo de britadores tem como objetivo principal reduzir o material até a um tamanho pequeno para que possa ser transportado pelas correias até aos próximos estágios de britagem. Os britadores de maxilas apresentam um formato em V e são compostos por duas maxilas metálicas, uma das quais uma é fixa e a outra é móvel.

Ainda assim, existem dois tipos de britadores de maxilas, ou seja, um de um eixo e outro de dois eixos, também conhecido por britador tipo *Blake*. Nos britadores com dois eixos, os movimentos das maxilas são pendulares, enquanto no de um eixo, os movimentos são elípticos, sendo que os britadores de dois eixos são normalmente utilizados para materiais rochosos mais abrasivos, uma vez que o movimento pendular conduz a uma menor redução no desgaste do revestimento das

maxilas, contribuindo assim para a diminuição dos custos operacionais (Metso minerals, 2005). A Figura 10 mostra os dois tipos de britadores de maxilas.

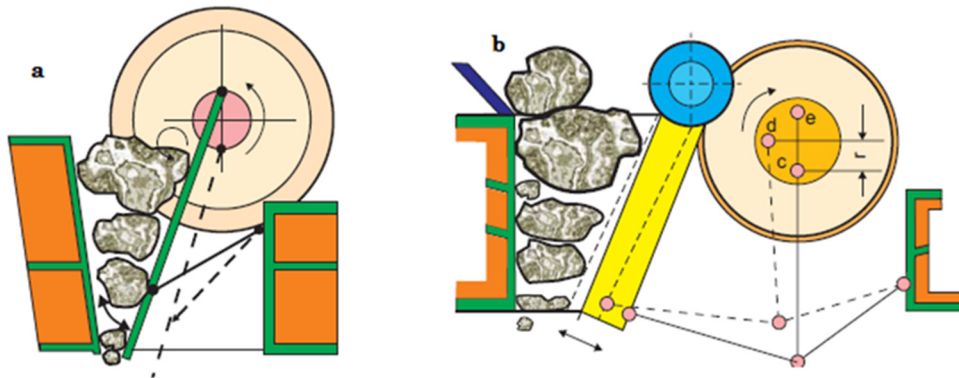


Figura 10. Britador de maxilas com um eixo; b: Britador de maxilas com dois eixos (adaptado de (Metso minerals, 2005)).

2.3.2. Britadores giratório

Os britadores giratórios possuem um eixo oscilante e são normalmente utilizados como britadores primários ou secundários, sendo que este deve ser utilizado como primário quando existe uma grande quantidade de material a fragmentar, com blocos de maiores dimensões e quando se pretende partículas menos lamelares. Quando o material é introduzido neste tipo de fragmentador, conseqüentemente é reduzido numa cavidade de britagem, entre um elemento fixo externo e um elemento móvel interior, montado no conjunto do eixo oscilante (Figura 11) (Metso Outotec, 2022).

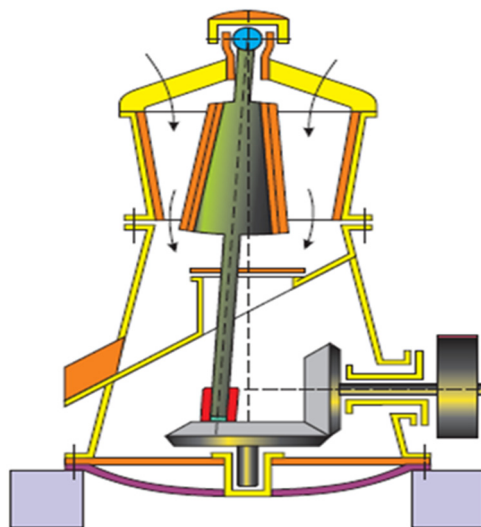


Figura 11. Britador giratório (Metso minerals, 2005).

2.3.3. Britador Cónico

O britador cónico assemelha-se ao britador giratório do ponto de vista tecnológico, mas ao contrário destes, os cónicos não são utilizados na britagem primária, mas sim nos estágios de britagem secundária, terciária e quarternária, caso existam. Eventualmente, se o material a

processar apresenta um tamanho do grão suficiente pequeno por natureza e o estágio de britagem primária tradicional não for necessário, os britadores cónicos podem realizar a primeira britagem. Desta forma, estes britadores possuem um eixo oscilante e o material é britado numa cavidade de britagem, entre um elemento fixo externo chamado revestimento do reservatório e um elemento móvel interno conhecido como manto, montado no conjunto do eixo oscilante (Figura 12) (Metso Outotec, 2022).

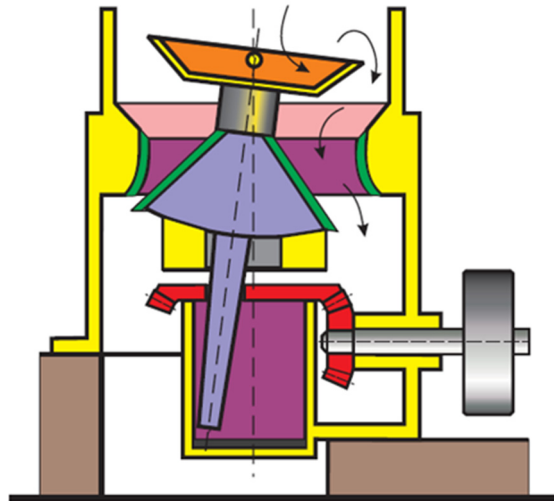


Figura 12. Britador Cónico (Metso minerals, 2005).

2.3.4. Britadores de impacto

O britador de impacto, tal como o nome sugere, acelera o material de alimentação a alta velocidade e, em seguida, lança os fragmentos de rochas em movimento rápido contra as paredes da câmara de britagem e entre si, fazendo com que a fragmentação ocorra até ao calibre pretendido. Os britadores de impacto podem ser de dois tipos: i) britadores de impacto verticais e ii) horizontais, e caracterizam-se pela alta taxa de redução e pelo facto de conferir uma forma cúbica ao produto.

Nos britadores de impacto horizontais conhecidos por *HSI (Horizontal Shaft Impact)*, o material de alimentação é submetido a impactos altamente intensivos, originando movimentos rotacionais rápidos de martelos ou barras fixadas ao rotor do britador. As partículas obtidas são mais reduzidas dentro do britador à medida que chocam contra as peças do britador e entre si, havendo assim um produto final mais fino e com um coeficiente de forma melhor (Figura 13) (Metso Outotec, 2022).

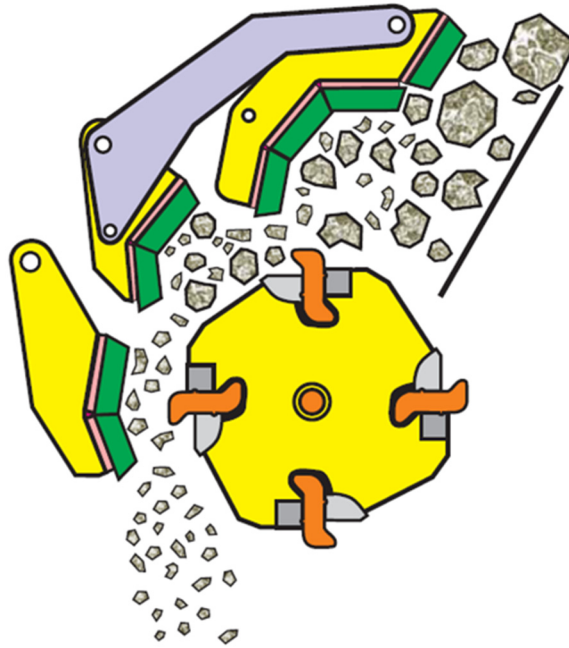


Figura 13. Britador de impacto horizontal (Metso minerals, 2005).

Nos britadores de impacto verticais, também conhecidos com *VSI* (*Vertical Shaft Impact*), o material triturável é alimentado através do centro do rotor, onde é acelerado a alta velocidade antes de sair pelas aberturas na periferia do rotor. O material sofre redução de calibre quando atinge ou bate contra o corpo externo a alta velocidade e quando os fragmentos de rocha colidem entre si (Figura 14).

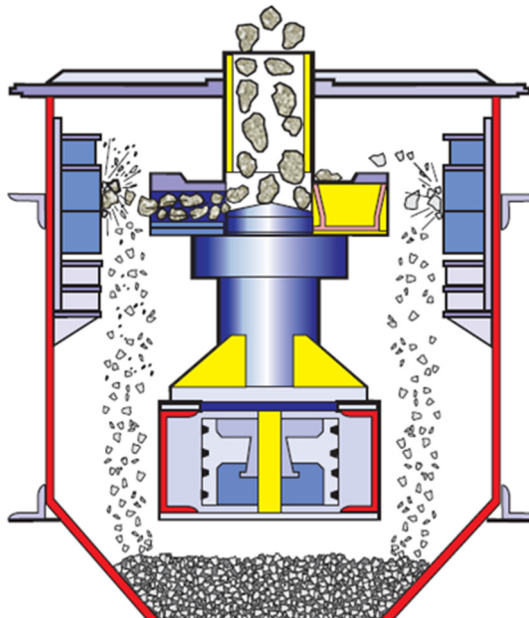


Figura 14. Britador de impacto vertical (Metso minerals, 2005).

Estes tipos de britadores são geralmente utilizados no último estágio de fragmentação, principalmente na indústria de produção de agregados. Além disso, também podem ser utilizados na preparação de alimentação do material para moinhos em operações de mineração.

2.4. Classificadores (crivos)

A classificação é uma operação do processamento de minerais que tem como finalidade separar o material em frações distintas. Consiste essencialmente em obter lotes constituídos por partículas de calibres definidos em função das exigências dos produtos finais a produzir e das eventuais necessidades de posteriores processamentos.

A classificação dos materiais pode fazer-se por processos diretos, habitualmente designadas por classificações geométricas, realizadas em função do calibre das partículas (forma e dimensão) ou por processos indiretos, estes também podem designar-se de classificações por equivalência, as quais ocorrem no seio de um fluido (ar ou água), em função do calibre e densidade das partículas a separar.

Esta operação serve para dar cumprimento às especificações de venda, que podem ser:

- ✓ Químicas;
- ✓ Conteúdo mínimo em substância mineral útil;
- ✓ Conteúdo máximo em substâncias consideradas nocivas;
- ✓ Granulométricas;
- ✓ Calibre máximo e mínimo;
- ✓ Eliminação de partículas finas;
- ✓ Controlo da marcha de uma instalação;
- ✓ Outras.

2.4.1. Classificação geométrica

2.4.1.1. Peneiração

Trata-se de uma classificação realizada em telas (decks) inclinadas para um desempenho de separação fiável e nas quais as partículas descrevem um movimento circular. A linha de eixo é posicionada no centro de gravidade resultando num movimento circular em todos os pontos da tela. As partículas são movidas para a frente pelo movimento da tela e pelo efeito da gravidade resultante do ângulo do *deck*. A velocidade de deslocação do material é uniforme ao longo de todas as telas.

As telas inclinadas são totalmente configuráveis com opções que as tornam adequadas mesmo para as aplicações mais exigentes. Graças à sua versatilidade, estes equipamentos são adequados para as separações mais grosseiras e para as mais finas. O ângulo de inclinação é ajustável, de 12-22°, para favorecer quer a precisão quer a capacidade e quando combinado com o movimento circular proporciona uma boa eficiência de classificação para a generalidade das situações.

Os parâmetros de curso e rotações por minuto (rpm) podem ser configurados dentro de uma vasta gama para satisfazer um ótimo desempenho. A caixa de alimentação pode ser integrada e deve ser suficientemente profunda e longa para permitir uma interface fácil com a correia de alimentação, proporcionando deste modo uma distribuição imediata de partículas ao longo da primeira fila do painel do tabuleiro superior, assegurando uma maior eficiência.

Os crivos inclinados também são capazes de operar por via húmida, incluindo lavagem ou enxaguamento. Aplicam-se na classificação de rocha abrasiva, rocha macia, cascalho, reciclagem, materiais industriais e escória. Podem ser equipados com painéis de peneiração tensionados ou painéis modulares de encaixe. Os painéis modulares são elementos-chave para alcançar um bom desempenho de peneiramento, especialmente em aplicações abrasivas, e para reduzir os custos operacionais (Figura 15).



Figura 15. Crivo inclinado da Metso (Metso minerals, 2005).

2.4.2. Classificação por equivalência

Esta separação é realizada tendo como base o conceito de velocidade em que os grãos atravessam um certo meio fluido, sendo que o meio fluido mais utilizado é a água. Existem três grandes tipos de classificadores, dependendo da direção do fluxo da corrente de transporte: i) classificadores de

corrente horizontal e ii) classificadores de corrente vertical e iii) hidrociclones (Luz, Sampaio, & França, 2010).

2.4.2.1. *Classificadores de corrente horizontal*

Os classificadores horizontais são usualmente do tipo de sedimentação em “queda livre” e são muito utilizados quando se pretende uma separação apenas por tamanhos. Estes classificadores estão divididos em: i) cones de sedimentação, ii) classificadores mecânicos e iii) classificadores espirais.

2.4.2.1.1. *Cones de sedimentação*

Os cones de sedimentação são os classificadores mais simples, sendo utilizados na separação de sólidos e de líquidos, ou seja, como unidades desaguadoras em operações de pequena escala. Por norma são construídos em betão ou aço, tendo um coletor de produtos grossos no fundo e um lavador no topo para que as partículas ultrafinas não sejam arrastadas. O cone de sedimentação mais comum é o cone duplo (Figura 16), e é composto por um cone externo fixo e um cone interno concêntrico e regulável, sendo que entre os dois cones existe um espaço por onde a água sobe sob pressão, transbordando pelas canaletas laterais colocadas na periferia do cone.

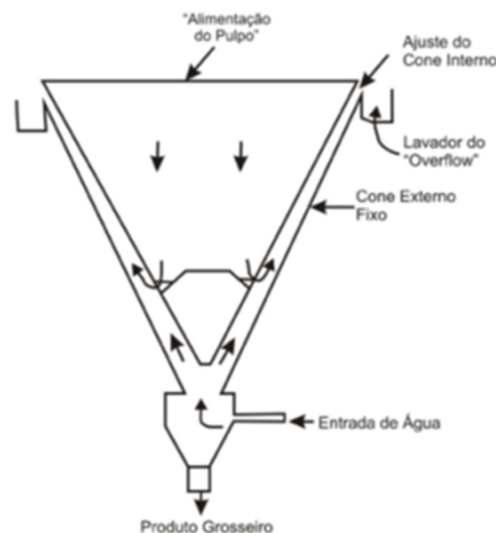


Figura 16. Representação esquemática de um cone duplo (Luz, Sampaio, & França, 2010).

2.4.2.1.2. Classificadores mecânicos

Os classificadores mecânicos encontram-se aplicados em operações de circuito fechado de moagem e na classificação de produtos de indústrias de lavagem de minério. Segundo Trajano, R, Perry, R.H. Chilton, Wills, B.A E Jain, S.K., os classificadores espirais são considerados também classificadores mecânicos. Na classificação mecânica podem-se distinguir dois tipos de classificadores: i) de arraste (Figura 17) e ii) de ancinhos (Figura 18), sendo que por norma apresentam-se na forma de tanques retangulares ou de bacias, tendo por base o mesmo princípio de funcionamento. A diferença que existe entre os dois classificadores é o modo como underflow (fração mais grosseira) é retirado do classificador, podendo ser transportado por arrasto ou por uma serie de ancinhos. A alimentação é feita dentro de uma calha inclinada e sedimenta no tanque. As partículas que apresentam altas velocidades de queda, dirigem-se para o fundo do tanque, enquanto as partículas com baixas velocidades mantêm-se na mesma superfície até serem escoadas como um overflow (partículas de menor calibre). Uma característica operacional destes classificadores é que permitem obter uma faixa de separação bem definida, desde que sejam alimentados com uma polpa diluída, o que conduz a um overflow com baixa percentagem de sólidos. Será necessária a introdução de uma etapa de engrossamento, antes que a concentração se realize. Isso pode vir a constituir uma desvantagem da utilização desse tipo de equipamentos.

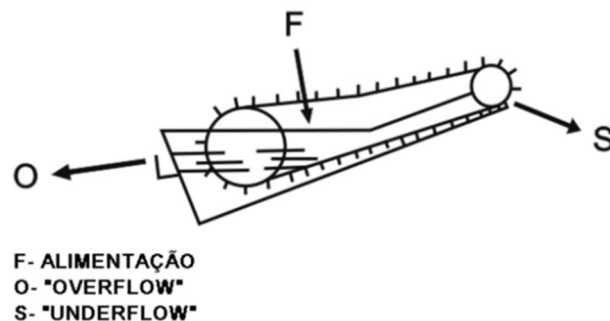


Figura 17. Representação esquemática do classificador de arraste (ORG) (Luz, Sampaio, & França, 2010).

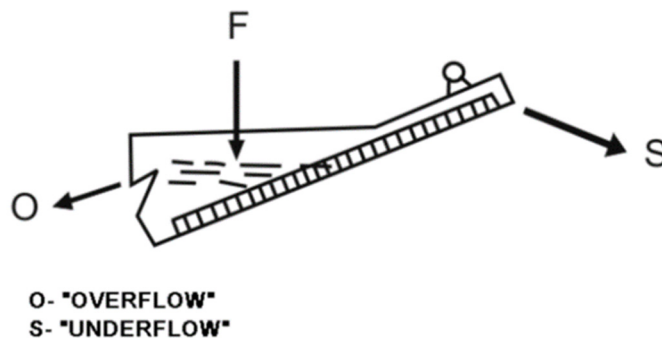


Figura 18. Representação esquemática do classificador de ancinhos (Rake) (Luz, Sampaio, & França, 2010).

Os classificadores de parafuso em espiral (Figura 19) são muito utilizadas em instalações de pequenas capacidades, sendo o seu campo de aplicação restrito a cortes na faixa granulométrica entre 0,833mm e 0,074mm. Estes classificadores são constituídos por uma calha, na qual existe um eixo envolvido por uma ou mais hélices, que se encontram girando, mantendo assim a polpa em suspensão. O parafuso tem a função de remover o material sedimentado do fundo da calha, ou seja, a fração mais grosseira. O conjunto todo, apresenta vários níveis de inclinação. Em relação ao classificador de ancinhos, apresenta como vantagem o facto de remover o material de maneira mais eficiente, devido ao declive mais íngreme, evitando assim o retorno do material. O classificador espiral é normalmente caracterizado pelo diâmetro e velocidade do parafuso.

A alimentação do classificador é feita abaixo do nível da polpa, sendo que o material mais pesado afunda e é transportado pelo parafuso ao longo da inclinação, sendo posteriormente descarregado na parte superior através de uma abertura que existe na base da calha, acima do nível de água. O material com uma granulometria fina transborda pela parte superior da calha, na zona inferior do equipamento. (Luz, Sampaio, & França, 2010).

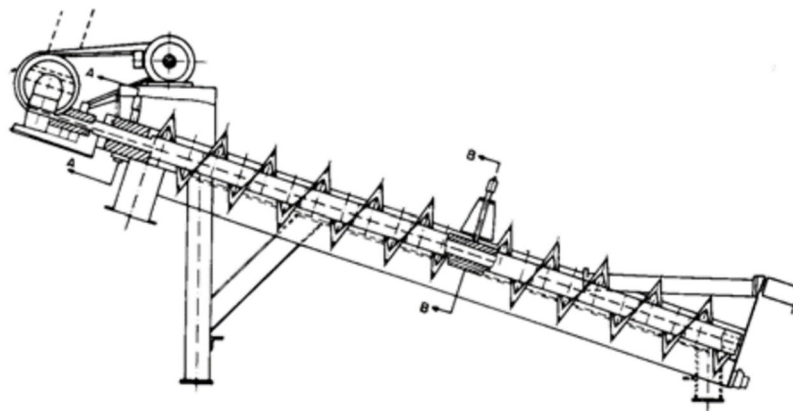


Figura 19. Representação esquemática do classificador espiral (Luz, Sampaio, & França, 2010).

2.4.2.2. *Classificadores de corrente verticais*

Os classificadores verticais, também designados de classificadores hidráulicos, são normalmente utilizados em regime de sedimentação impedida e têm em conta o efeito da densidade das partículas. O princípio de operação do classificador vertical (Figura 20) baseia-se na injeção de água à polpa de alimentação, com o fluxo de água no sentido oposto ao das partículas sedimentadas. Estes classificadores são normalmente constituídos por uma série de colunas nas quais as partículas em contra-corrente com a água sedimentam de acordo com as suas densidades. Esta sedimentação seletiva acontece porque existe um controle de velocidade das correntes ascendentes de água, que decresce da primeira até a última coluna de classificação. As partículas mais grosseiras e mais

densas depositaram-se na primeira coluna, enquanto as mais finas na última coluna, sendo que as lamas são obtidas através do transbordo.

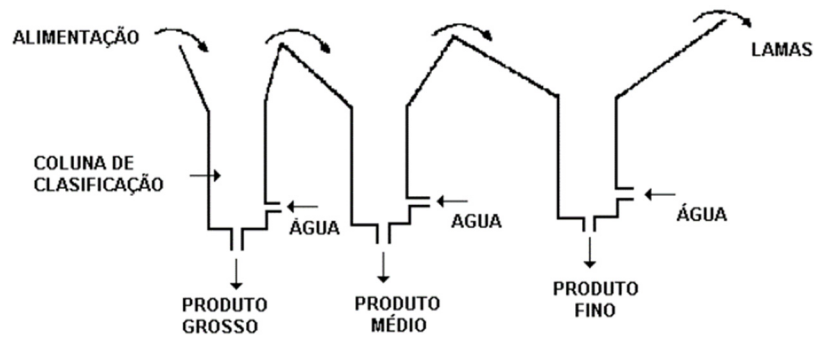


Figura 20. Representação esquemática de um classificador vertical (Luz, Sampaio, & França, 2010).

2.4.3. Hidrociclones

Os hidrociclones, como os classificadores mecânicos, são utilizados maioritariamente no controle de calibres em circuitos fechados de moagem. O princípio básico da separação deste classificador é a sedimentação centrífuga, sendo que o seu desempenho é influenciado pelas suas dimensões, pelas variáveis operacionais (pressão e percentagem de sólidos na polpa) e pelas propriedades físicas dos sólidos. Um hidrociclone convencional (Figura 21) é constituído por uma câmara cilíndrico-cônica com uma entrada tangencial e duas saídas. A polpa é injetada sob pressão no aparelho, através de um tubo situado na parte superior da câmara cilíndrica e, como resultado de uma entrada tangencial, é gerado um remoinho no interior. As partículas mais grossas e mais densas são lançadas às paredes e descarregadas na abertura interior e inferior, o apex, constituindo o underflow. Por outro lado, as partículas mais finas, menos densas e grande parte da fase líquida são dirigidas para o centro de hidrociclone e saem na parte superior do equipamento, designado vortex finder, constituindo o overflow.

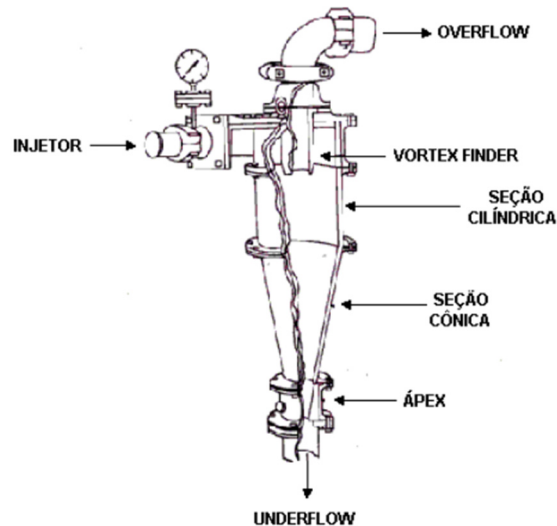


Figura 21. Representação esquemática de um hidrociclone convencional (Luz, Sampaio, & França, 2010).
As principais aplicações dos hidrociclones são, segundo Trawinski (Luz, Sampaio, & França, 2010):

- ✓ Espessamento - elimina a maior parte da água de uma polpa;
- ✓ Deslamagem - elimina as partículas mais finas (separação magnética via húmida, filtração, entre outras);
- ✓ Classificação - utilizado normalmente em circuitos fechados de moagem onde o underflow do hidrociclone volta ao moinho;
- ✓ Classificação seletiva - por meio de uma configuração de hidrociclones em série, é possível obter um conjunto de produtos com granulometria definida;
- ✓ Pré-concentração – com hidrociclones de fundo chato, consegue-se realizar a concentração gravítica onde os minerais mais densos são descartados pelo underflow.

As principais vantagens dos hidrociclones são (Luz, Sampaio, & França, 2010):

- ✓ Elevada capacidade em relação ao seu volume e à área ocupada;
- ✓ Controlo operacional relativamente simples;
- ✓ Custo baixo
- ✓ Como é de baixo custo e ocupa pouco espaço, é possível manter unidades de reserva.

Por outro lado, apresenta as seguintes desvantagens (Luz, Sampaio, & França, 2010):

- ✓ O facto de não ser possível realizar ajustes para minimizar os efeitos causados pelas oscilações na alimentação (caudal, densidade da polpa e pressão de funcionamento);
- ✓ Necessidade de instalações complexas, para que exista um controlo efetivo no processo;

-
- ✓ Quando utilizados com material abrasivo, o custo de manutenção pode ser relativamente elevado.

2.5. Correias transportadoras

As correias transportadoras são equipamentos de transporte ou movimento de materiais, sendo que as mais utilizadas são as de borracha. As correias transportadoras são as mais utilizadas para o transporte de produtos secos e variam de acordo com o tipo de produto a transportar, a distância a percorrer e a altura a vencer. Assim, constituem um método contínuo e económico de transporte de grandes volumes de material.

As correias transportadoras podem ser de sistemas fixos ou sistemas móveis. As principais vantagens das correias transportadoras são:

- ✓ a eficiência energética, na ordem de 75% em relação aos 45% dos equipamentos de transporte (dumpers) - esta diferença acentua-se à medida que aumenta o desnível no perfil do transporte;
- ✓ necessitam de menos energia elétrica;
- ✓ a capacidade de transporte é independente da distância.

Como principais inconvenientes podem apontar-se:

- ✓ a necessidade de maiores investimentos iniciais;
- ✓ a pouca versatilidade para aumentar ou modificar a produção, requerendo, portanto, uma cuidadosa planificação.

A correia transportadora é o componente fundamental de um sistema transportador. O sistema transportador como se apresenta na Figura 22, é constituído por:

- ✓ polia da cabeça (zona de descarga);
- ✓ polia da cauda ou de retorno (zona de carga);
- ✓ polia de alta tensão;
- ✓ polia motora.

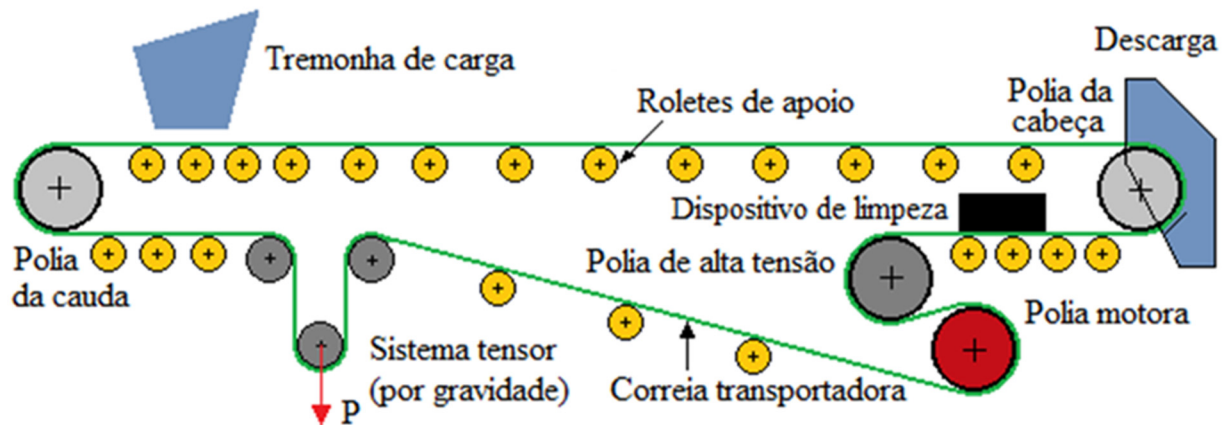


Figura 22. Sistema Transportador – Componentes básicos (<https://www.ctborracha.com/borracha-sintese-historica/aplicacoes/correias-transportadoras/sistema-transportador-2/>, acessado em Set 2021).

Na polia da cauda, a correia é mantida em tensão através de um sistema tensor, podendo ser por gravidade ou parafuso. A correia transportadora é suportada por diversas roletes de apoio, no trecho de carga e de retorno. A alimentação do material é feita através de uma tremonha de carga.

As correias podem operar de diferentes formas, como apresenta a Figura 23:

- A correia 1 é uma correia plana, opera através de um sistema constituído por apenas uma polia ou rolete.
- A correia 2 opera num sistema constituída por dois roletes.
- A correia 3 opera num sistema constituída por três roletes, com ângulos variáveis;
- As correias 4 e 5 operam num sistema constituído por 5 roletes, com ângulos variáveis, sendo conhecido como sistema Garland;
- As correias 6 e 7 operam através de um sistema constituído por três roletes em forma de U;
- A correia 8 tem uma configuração tubular, esta fecha-se sob a forma de um cilindro.

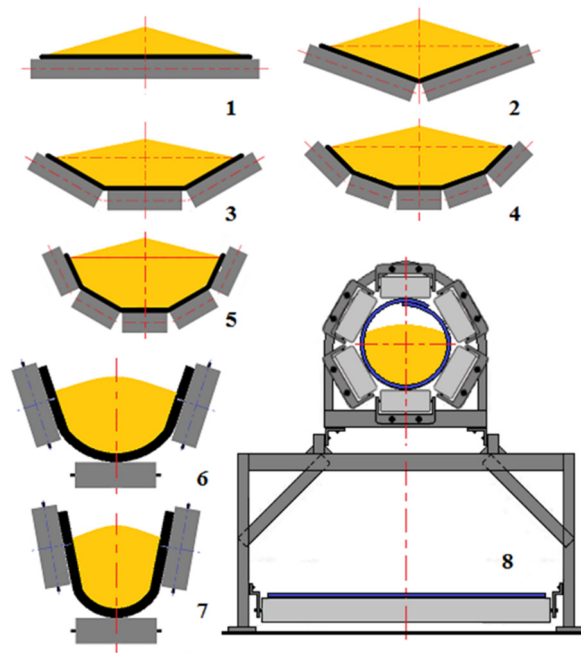


Figura 23. Forma de operação de correias transportadoras (<https://www.ctborracha.com/borracha-sintese-historica/aplicacoes/correias-transportadoras/correias-transportadoras-especiais-2/>, acedido em Set 2021).

Existem outros tipos de correias, considerados especiais, nomeadamente: correias com nervuras ou travessas, correias com superfície rugosa (vários graus de rugosidade), correias em forma de U, correias tubulares, correias com perfil de centragem, correias elevadoras, correia em sanduiche e correias com bordos de contenção.

Capítulo III

Metodología

(página propositadamente em branco)

3. Metodologia

Neste capítulo serão abordadas as metodologias utilizadas no decorrer do trabalho, sendo estas:

- ✓ Análise Granulometria por peneiração, pela norma (NP EN 933-1 2002, 2002);
- ✓ Determinação da forma das partículas, pela norma (NP EN 933-4 2002, 2002);
- ✓ Simulação no *software* “Bruno”.

Por outro lado, segue-se de perto, a síntese metodológica esboçada por Gomes (2017). Logo, para pormenores dos materiais e métodos a síntese anteriormente referida.

3.1. Análise granulométrica por peneiração

A norma NP EN 933 – 1- 2000 (Agregados), tem como objetivo definir um método, usando peneiros de ensaio, para análise granulométrica dos agregados, sendo que é aplicada aos agregados de origem natural ou artificial, sejam estes agregados leves, com dimensão nominal até 63mm.

A análise granulométrica, segundo a norma, consiste na separação, com recurso a um conjunto de peneiros, de material em diferentes classes de granulometria decrescentes. Os peneiros serão escolhidos conforme a natureza da amostra e a precisão exigida.

Assim sendo, este ensaio começa por uma peneiração com lavagem e posteriormente com peneiração a seco. Este procedimento resulta do facto de a lavagem poder alterar as características físicas dos agregados leves. Todavia, em agregados isentos de partículas aglomeradas a peneiração a seco acaba por ser um método alternativo, mas em caso de dúvida o método eleito é a lavagem seguida de peneiração (NP EN 933-1 2002, 2002).

Terminado o ensaio, é necessário determinar a percentagem de material retido em cada um dos peneiros (Equação 4) e a percentagem de finos que passa no peneiro de 0,063mm, ou seja, a menor dimensão (Equação 5).

Equação 4. Percentagem de material retido no peneiro, pela norma (NP EN 933-1 2002, 2002).

$$\text{Percentagem de material retido} = \frac{R_i}{M_1} \times 100, \text{ em que:}$$

R_i – Material retido e, quilogramas(Kg);0

M_1 – Massa seca do provete de ensaio, em quilogramas (Kg).

Equação 5. Percentagem de finos (f) que passam no peneiro de 0,063mm, pela norma (NP EN 933-1 2002, 2002).

$$f = \frac{(M_1 - M_2) + P}{M_1} \times 100, \text{ em que:}$$

f – Percentagem de finos(%);

M_1 – Massa seca do provete de ensaio, em quilogramas (Kg).

Todos os resultados obtidos dos ensaios de análise granulométrica são representados numa curva granulométrica (Figura 24), que relaciona numa escala logarítmica as medidas dos peneiros com a percentagem de material acumulado em cada um dos peneiros.

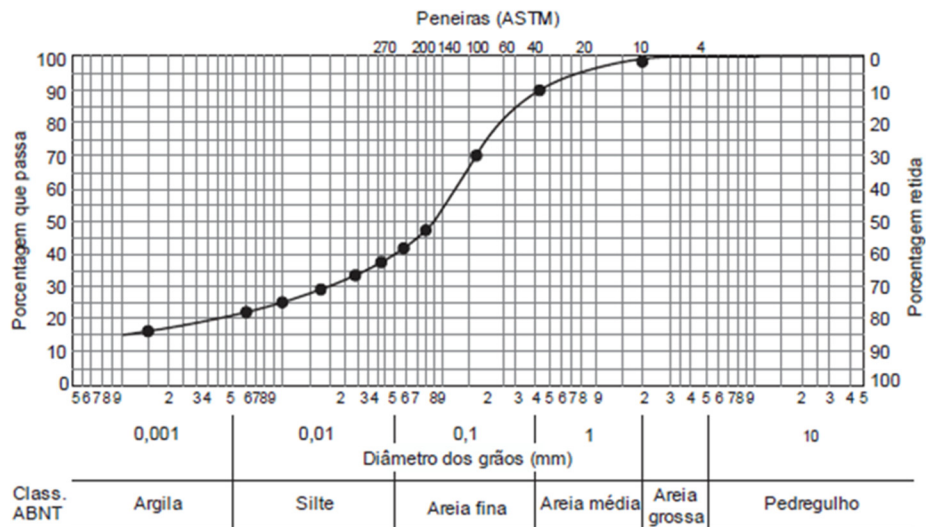


Figura 24. Exemplo de curva granulométrica obtida num ensaio de análise granulométrica (<https://www.teconcurso.com.br/questoes/172860>).

3.1.1. Aparelhos e utensílios

Para realização deste ensaio são necessários os seguintes utensílios e equipamentos (NP EN 933-1 2002, 2002):

- ✓ Peneiros de ensaio: 0,063mm; 0,125mm; 0,250mm; 0,500mm; 1mm; 2mm; 4mm; 8mm; 10mm; 16mm; 31.5mm; 63mm, tampa e recipiente do fundo adaptados aos peneiros (Figura 25- A);
- ✓ Balança com precisão de $\pm 0.1\%$ da massa do provete (Figura 25- B);
- ✓ Estufa ventilada com temperatura de $110 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$ (Figura 2-C);
- ✓ Tabuleiro.

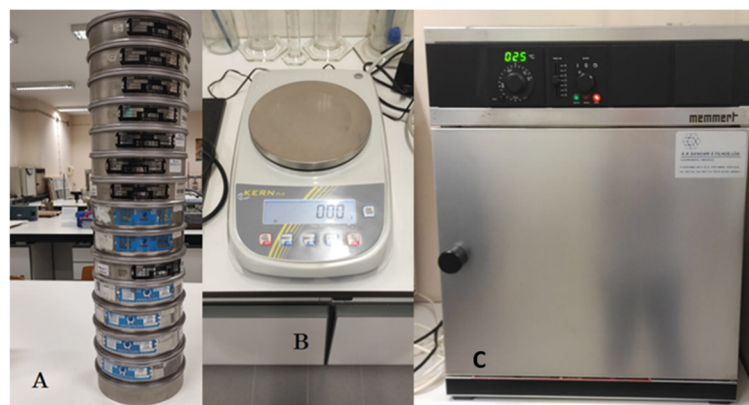


Figura 25. A-Peneiros de ensaio -ASTM; B-Balança de precisão; C-Estufa ventilada.

3.1.2. Procedimento de ensaio

1. Seleção de aproximadamente 2,5 quilogramas de cada amostra, tendo sido a fração de cada amostra pesada.
2. Todas as frações de amostras depois de selecionadas foram lavadas (Figura 26), e secadas na estufa durante 6 horas a uma temperatura de $110\pm 5^{\circ}\text{C}$. Deixam-se arrefecer e, de seguida, faz-se a pesagem.
3. Colocar o material lavado e seco na coluna de peneiros e agitar as colunas.
4. Retirar os peneiros um a um, começando pela malha maior e agitar manualmente cada peneiro para garantir que não existe perda de material.
5. Pesagem do material retido em cada peneiro.



Figura 26. Lavagem das amostras.

3.2. Índice de forma

O índice de forma é determinado através da relação comprimento (L) e a espessura (E) das partículas. “O índice de forma é calculado como a massa das partículas com uma razão $L/E > 3$, expressa em percentagem da massa total seca das partículas ensaiadas” (NP EN 933-4 2002, 2002).

As equações 6 e 7 apresentam o cálculo do índice de forma.

Equação 6. Índice de forma para provetes em que $D \leq 2d$, pela norma (NP EN 933-4 2002, 2002).

$$SI = \frac{M_2}{M_1} \times 100, \text{ em que:}$$

M_1 – Massa do provete de ensaio, em gramas (g);
 M_2 – Massa das partículas não cúbicas, em gramas (g).

Equação 7. Índice de forma para provetes em que $D > 2d$, pela norma (NP EN 933-4 2002, 2002).

$$SI = \frac{\sum M_{2i}}{\sum M_{1i}} \times 100, \text{ em que:}$$

$\sum M_1$ – Soma das massas, das partículas de cada uma das frações granulométricas ensaiadas, em gramas (g);
 $\sum M_2$ – Soma das massas, das partículas não cúbicas de cada uma das frações granulométricas ensaiadas, em gramas (g).

3.2.1. Aparelhos e utensílios

Para realização deste ensaio são necessários os seguintes utensílios e equipamentos:

- ✓ Peneiros de ensaio: 0,063mm; 0,125mm; 0,250mm; 0,500mm; 1mm; 2mm; 4mm; 8mm; 16mm; 31.5mm; 63mm, tampa e recipiente do fundo adaptados aos peneiros;
- ✓ Paquímetro (Figura 27);
- ✓ Balança com precisão de $\pm 0.1\%$ da massa do provete;
- ✓ Estufas ventiladas com temperatura de 110 ± 5 °C;
- ✓ Tabuleiro.



Figura 27. Paquímetro digital.

3.3. Procedimento de ensaio: (Provete em que $D \leq 2d$, caso em estudo)

1. Separação granulométrica através dos peneiros.
2. Rejeitar qualquer partícula menor que d_i e maior que D_i ;
3. Registrar a massa da fração granulométrica d_i/D_i como M1.
4. Medir o comprimento (L) e a espessura (E) utilizando o paquímetro e separar as partículas que têm uma relação $L/E > 3$, sendo estas partículas designadas como não cúbicas.
5. Pesar as partículas não cúbicas e registrar a massa como M2.

3.4. Simulador “Bruno”

O simulador “Bruno” foi criado pelo Bruno V. Nordberg fundador da Nordberg Manufacturing Company, dos Estados Unidos da América, sendo que foi desenvolvido na Finlândia com ajuda de especialistas nos Estados Unidos e na França. Este simulador pertence à empresa Metso.

O “Bruno” é um *software* que simula o processo de produção de agregados, com o objetivo de criar um processo de produção de agregados ideal, que utiliza todos os equipamentos necessários da Metso, como os alimentadores, britadores e peneiras. Este é um dos simuladores mais eficientes e

mais utilizados à escala mundial. O *software* apresenta processamentos muito rápidos, arquivos leves e os resultados podem considerar-se fidedignos, sendo assim uma boa escolha de simulador de instalações de britagem. Este é um *software* que se encontra sempre em atualização para poder acompanhar todas as evoluções tecnológicas de processos de processamento e respetivos equipamentos (Nunes & Ono, 2020).

O “Bruno” pode ser utilizado:

- ✓ Em equipamentos isolados (Figura 28) – aqui o simulador faz a análise isolada de operações de processamento, nomeadamente a operação de fragmentação em britador giratório (com indicação da tonelagem a tratar, da regulação da abertura de saída do fragmentador e a quantidade percentual a obter) e a operação de classificação em crivo e também com a indicação dos calibres de corte em cada “deck”, assim como as quantidades percentuais a obter em cada lote a produzir;

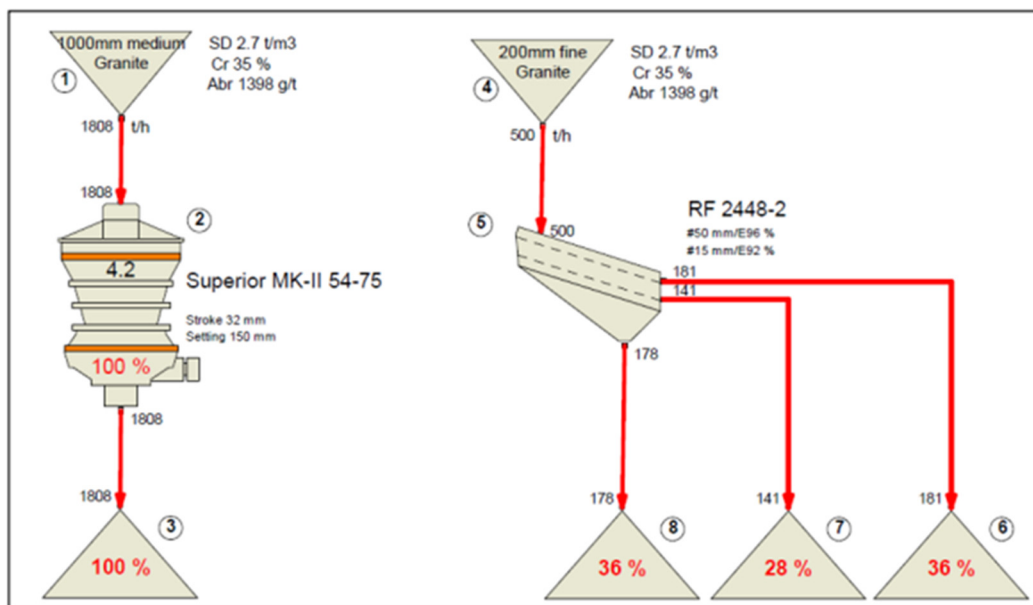


Figura 28. Simulação com equipamentos isolados (à esquerda- simulação com britador; à direita – simulação com um crivo) (Nunes & Ono, 2020).

Em sistemas simples (Figura 29), pela análise conjugada da operação de classificação (com crivo e calibre de corte por “deck” e com indicação da quantidade percentual a obter por lote produzido) e da operação de fragmentação em circuito fechado, com indicação da abertura de saída do fragmentador e característica da câmara de britagem);

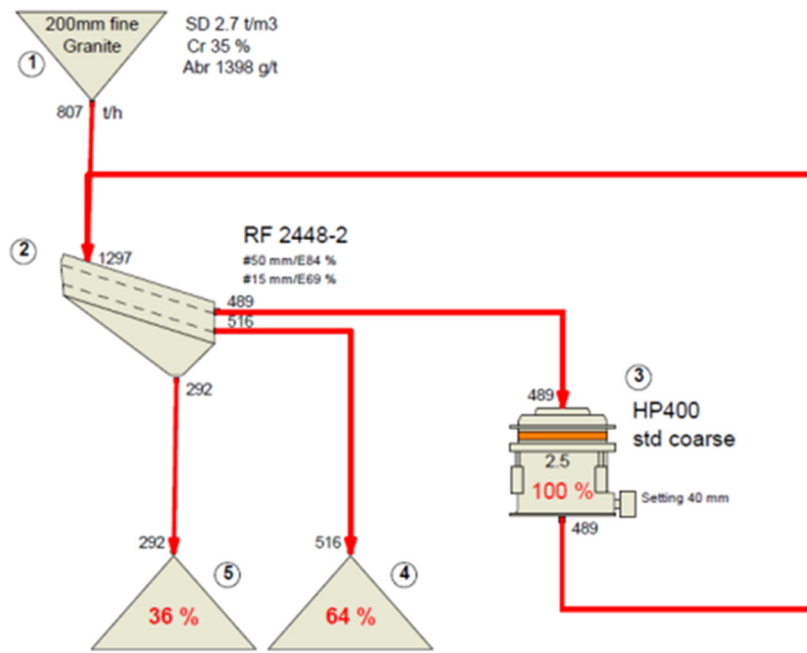


Figura 29. Simulação num sistema simples (Nunes & Ono, 2020).

Em sistema complexo (Figura 30) – este sistema contempla todos os estágios de fragmentação, de classificação e características dos diferentes equipamentos utilizados nas diversas operações de processamento.

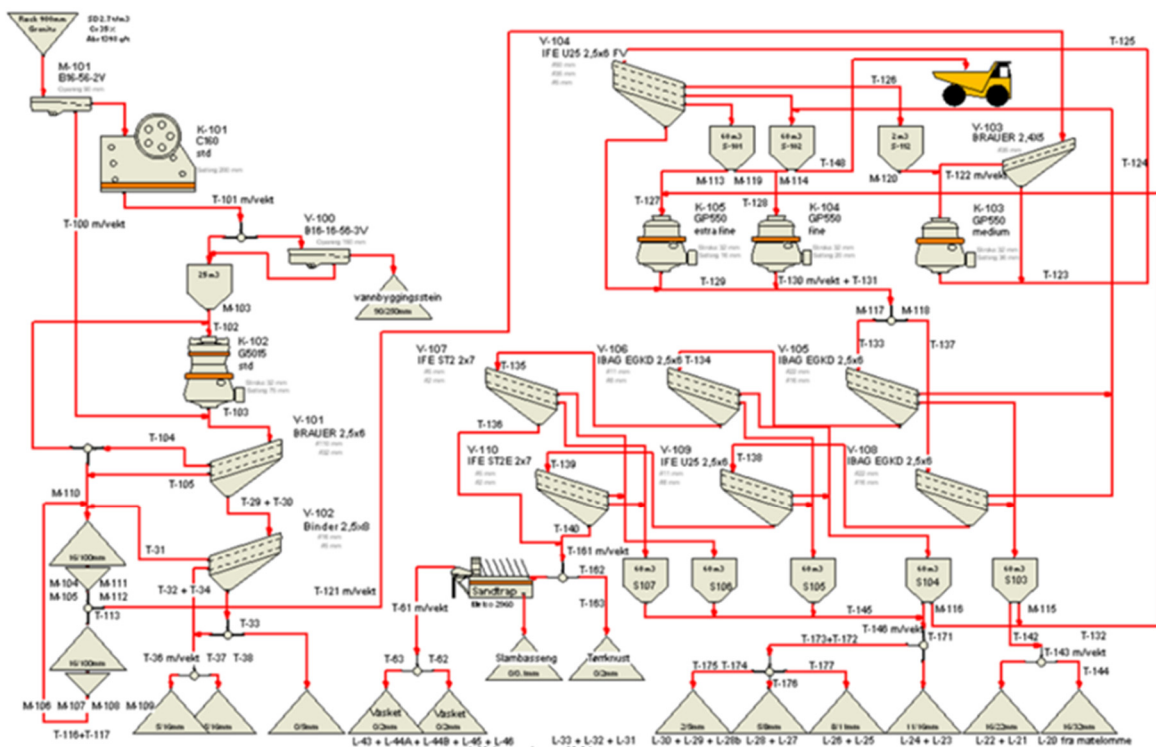


Figura 30. Simulação num sistema complexo (Nunes & Ono, 2020).

Este simulador tem algumas limitações, não sendo fiável quando:

- ✓ As simulações nos classificadores utilizam malhas muito finas (1mm), porque podem apresentar grandes desvios;
- ✓ As simulações consideram minérios argilosos, pois podem originar grandes desvios ou, eventualmente, não permitir o respetivo cálculo.

Em seguida apresenta-se uma breve explicação relativamente a este simulador. As Figuras 31 e 32 apresentam a área de trabalho do *Software*, a barra de tarefas e os comandos legendados, para uma melhor compreensão das funções do simulador.

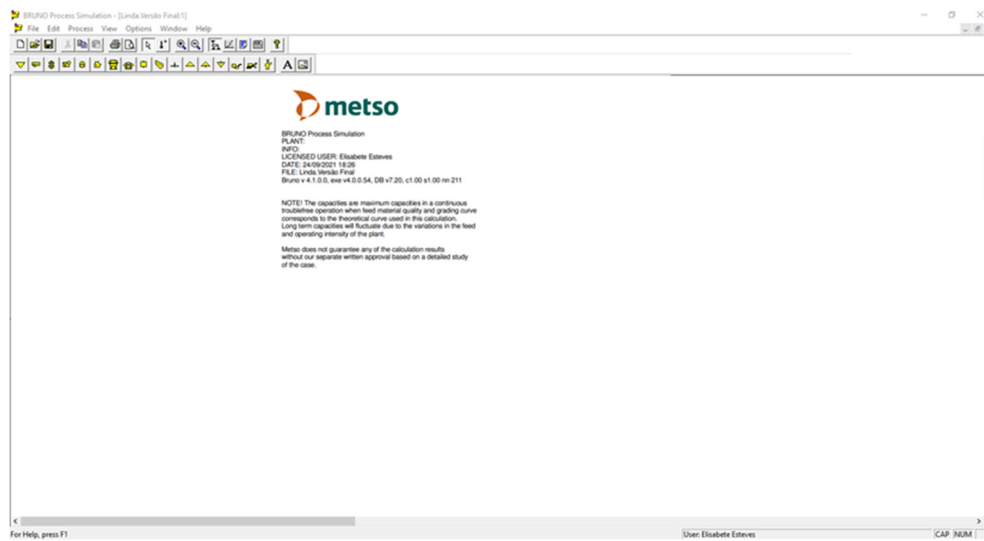


Figura 31. Área de trabalho do Simulador "Bruno".

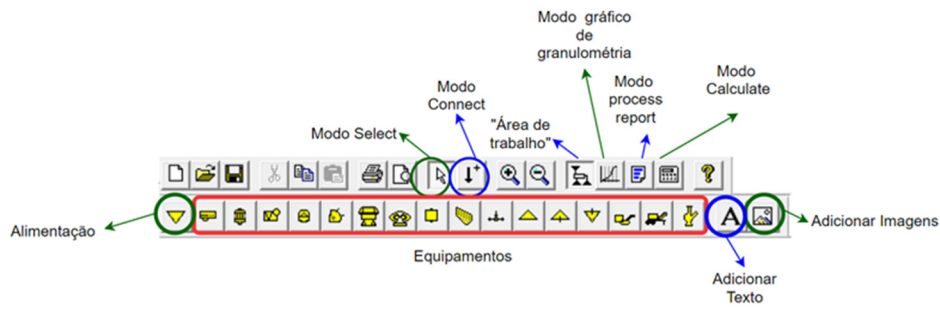


Figura 32. Barra de tarefas com a respetiva legenda.

O *modo Select* serve para seleccionar, configurar e alterar as configurações dos ícones, enquanto o *modo Connect* é utilizado para fazer conexões entre os ícones. Quando seleccionamos “área de trabalho” retomamos ao esquema de simulação. O *modo gráfico* de granulometria como o próprio nome indica, quando submetido, apresenta um gráfico com a curva granulométrica do ícone pretendido ou no sistema completo (Figura 33).

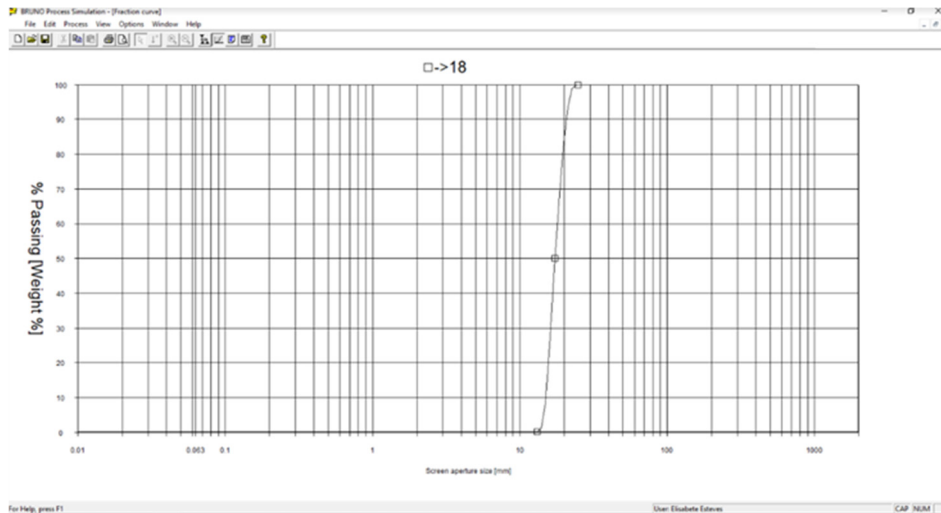


Figura 33. Exemplo de uma curva granulometria obtida no "Bruno".

Quando carregado no *modo process report*, surgem duas opções: (Figura 34)

- ✓ *Process report*, servindo para obter o relatório sobre todo o sistema que contém:
 - Resultados de cálculo de cada equipamento;
 - Uma listagem de todos os equipamentos do fluxograma;
 - Caso um algum dos equipamentos não esteja ligado ou não for calculado, a lista inclui apenas uma linha de informações deste equipamento;
 - Se existir avisos durante o cálculo, alguns deles são mostrados na lista após o valor que causou o aviso.

- ✓ *Cost/1000h report*, servindo para obter um relatório de custo por 1000h de trabalho, que contém:
 - Tabelas de produção e custos para 1000 horas;
 - Tabelas para cada equipamento de Produto e Custo/1000h
 - Uma tabela de produtos com produção por 1000 horas de trabalho e que mostra as etapas médias de britagem dessa pilha de produtos.
 - Um gráfico de custo/1000h que mostra os custos de energia, peças de desgaste e manutenção por 1000 horas.
 - Nas últimas 2 colunas, é apresentado o custo de uma máquina específica e qual a percentagem desse custo relativamente ao custo total do processo.

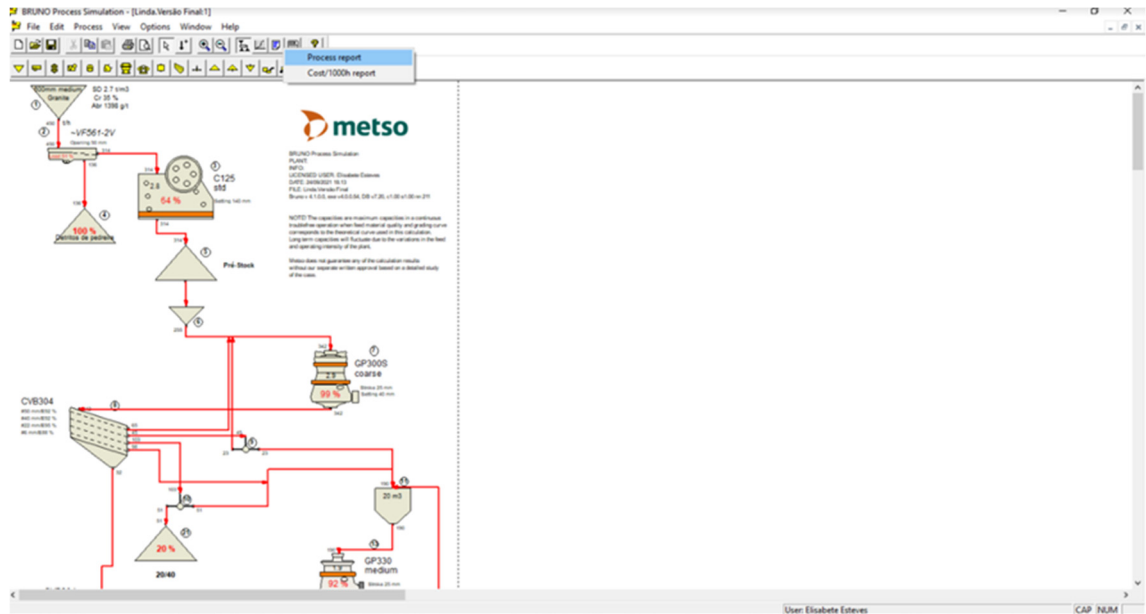


Figura 34. Modo Process Report no “Bruno”.

O *modo calculate* serve para simular o processo de produção de agregados. O modo de alimentação corresponde ao início do sistema, isto é, à entrada de dados. Os dados iniciais necessários são a taxa de alimentação (t/h), o tipo de material e a dimensão do material (Figura 35).

Figura 35. Entrada de dados da alimentação no Simulador "Bruno".

O *software* exibe ainda diversos equipamentos, para seleção em função da operação de processamento, sendo que são todos da Metso (Figura 36).

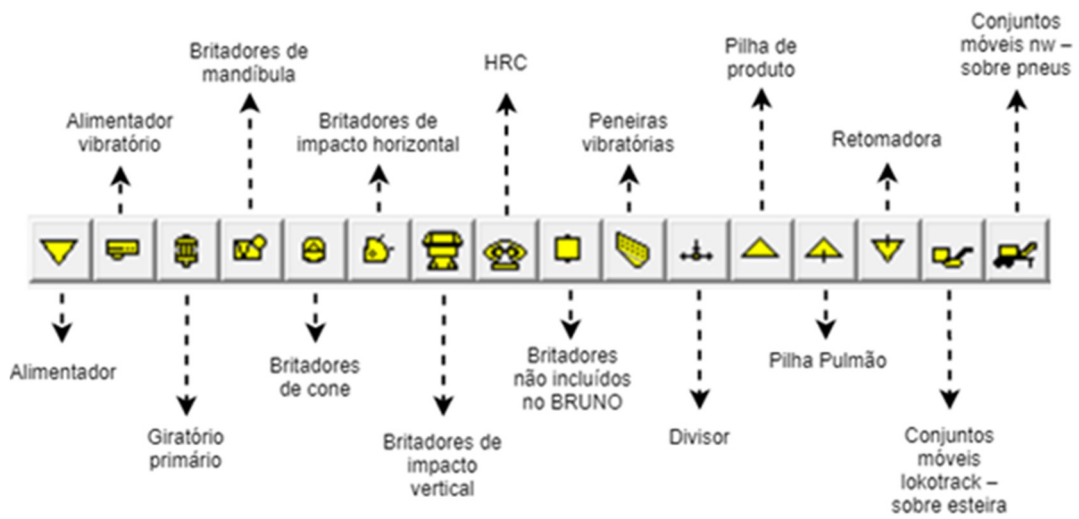


Figura 36. Equipamentos integrados no simulador "Bruno".

Capítulo IV

Caso em estudo: Pedreira de Fornelo

(página propositadamente em branco)

4. Caso em estudo: Pedreira de Fornelo

4.1. Apresentação da empresa

A Elevo é um grupo português de engenharia e construção e resultou da fusão da Edifer, Monte Adriano Engenharia e Construção, Eusébios e Hagen Engenharia. A palavra ELEVO, partiu de 2 sinónimos de construção, elevação e evolução. No seguimento, a Elevo tem escritórios espalhados pelo mundo, nomeadamente em África, Ásia, América do Sul e Europa e apresenta estaleiros em Angola, Cabo Verde, Moçambique e Portugal. Os projetos da Elevo são a engenharia, construção civil e atividades especializadas (Tabela 3) (Elevogroup, 2021).

Tabela 3. Projetos da Elevo (Elevogroup, 2021).

Projetos de engenharia	Projetos de construção civil	Projetos de atividades especializadas
<ul style="list-style-type: none">✓ Infraestruturas<ul style="list-style-type: none">• rodoviárias;• ferroviárias• metropolitanas;• aeroportuárias;✓ Barragens✓ Obras marítimas;✓ Infraestruturas ambientais;✓ Infraestruturas urbanas e paisagísticas.	<ul style="list-style-type: none">✓ Habitação;✓ Habitação de custos controlados;✓ Hospitais e infraestruturas de saúde;✓ Hotéis e instalações turísticas;✓ Postos de abastecimento;✓ Escritórios e centros comerciais;✓ Instalações industriais e tecnológicas;✓ Infraestruturas de ensino;✓ Infraestruturas culturais e desportivas;✓ Edifícios institucionais;✓ Reabilitação de edifícios.	<ul style="list-style-type: none">✓ Fundações e geotecnia;✓ Fachadas metálicas e carpintaria industrial;✓ Serviço de ambiente e energia;✓ Produção de agregados e betuminosos;✓ Obras subterrâneas, perfurações e reabilitação;✓ Investigação, desenvolvimento e inovação.

4.2. Localização da Pedreira

A pedreira de Vila Verde nº2, também conhecida como pedreira de Fornelo, localiza-se na União de freguesias de Fornelo e Vairão (Figura 37), no concelho de Vila de Conde, distrito do Porto. A área em estudo encontra-se na parte Sul da bacia do Rio Ave.



Figura 37. Localização da Pedreira de Fornelo (Adaptada de (<https://bityli.com/fjMnRvqes>)).

4.3. Caracterização Geológica

Tendo em conta a carta geológica 9- A, à escala 1/50 000 (Figura 38), a pedreira encontra-se no chamado granito de Póvoa de Varzim, em terrenos de rochas eruptivas, num afloramento granítico alcalino (Monteadriano – Engenharia E Construção, SA, 2014).

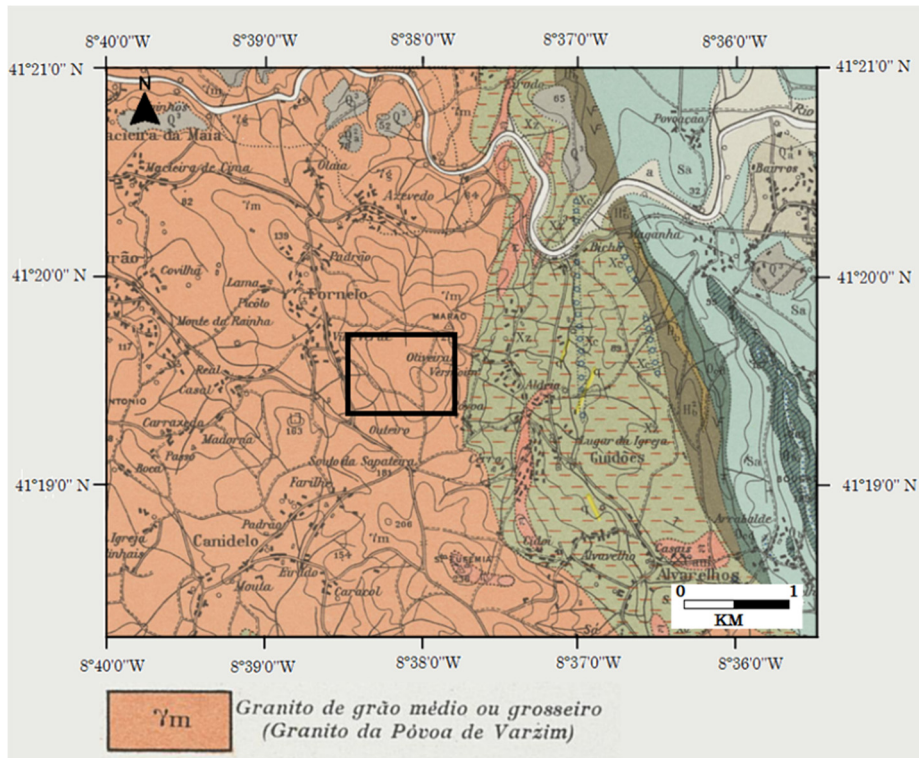


Figura 38. Extrato da carta geológica, folha 9-A, a escala 1/5000 (adaptada de (Geoportal, 1965)).

Em análises petrográficas que o Grupo Elevo realizou foi possível caracterizar a litologia da pedraira como um “granito ígneo plutónico, hercínico, constituído essencialmente por quartzo (2 a 8mm), feldspatos (2 a 20 mm), micas (0,5 a 2 mm) e outros. Apresenta estrutura compacta, com textura holocristalina, fanerítica, grão médio com tendência porfiróide”.

O granito presente na pedraira tem um perfil alterado, devido “a existência de um horizonte esquelético de terra vegetal e um horizonte de saibro granítico, esbranquiçado com espessura variável em função do tipo de transição para a rocha sã”, com “um horizonte de rocha sã constituída por blocos graníticos intactos” (Monteadriano – Engenharia E Construção, SA, 2014).

4.4. Instalação atual de britagem

A instalação atual da britagem é constituída por tolva de armazenamento, alimentador vibratório, três fragmentadores, dois crivos e várias correias transportadoras, traduzindo-se no final em 5 lotes de produto para comercialização. A Figura 39 representa, sob a forma de diagrama, a instalação de britagem de Vila Verde nº2.

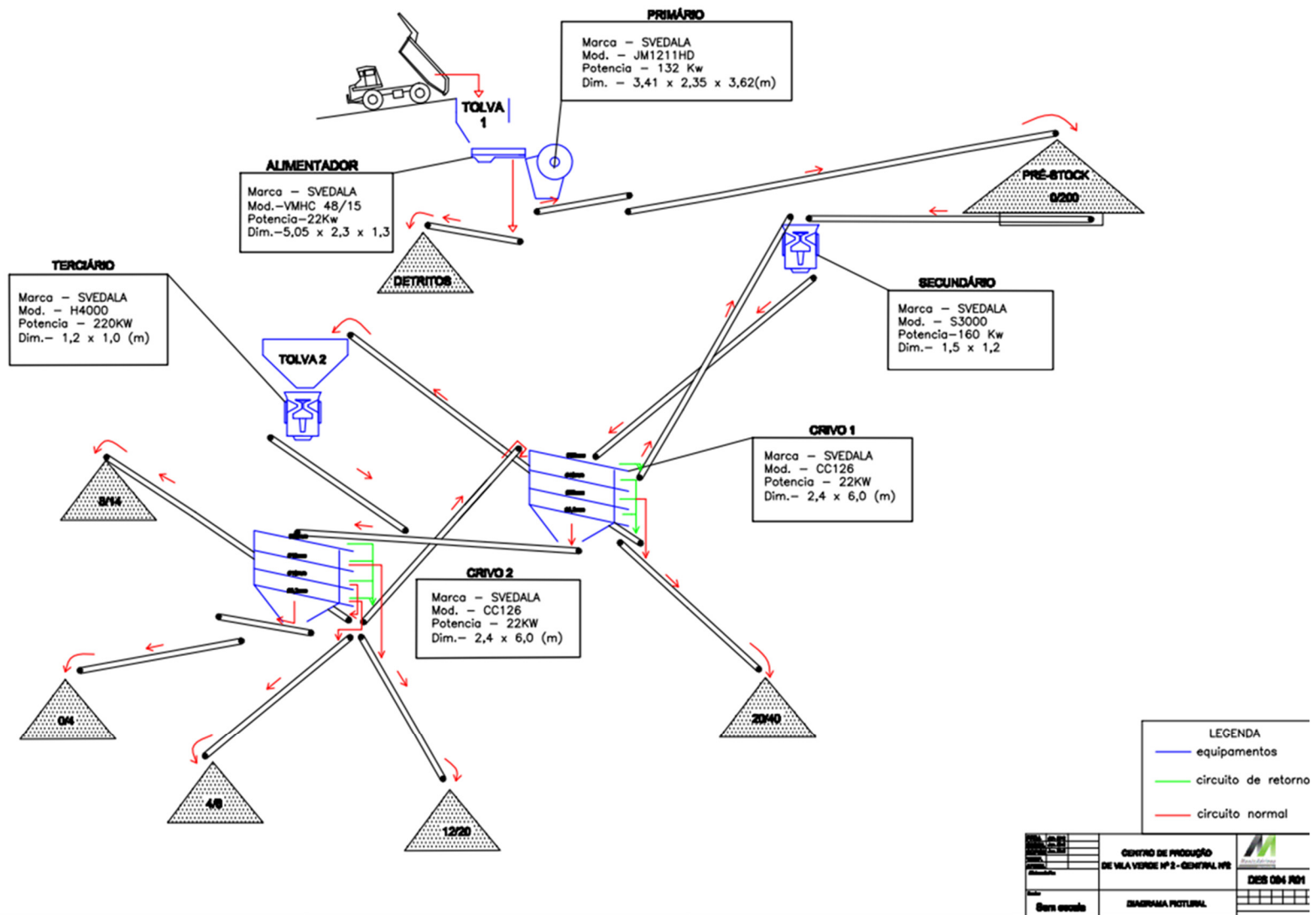


Figura 39. Diagrama de processamento da instalação de britagem do Centro de Produção de Vila Verde nº2.

Capítulo V

Resultados obtidos nos ensaios laboratoriais

(página propositadamente em branco)

5. Resultados dos ensaios laboratoriais

5.1. Análise granulométrica

A análise granulométrica é realizada com o intuito de conhecer as diferentes curvas granulométricas do caso em estudo. Os gráficos 1, 2, 3, 4, 5, 6 e 7 correspondem às curvas granulométricas de cada lote atualmente produzido na instalação de britagem. Os dados utilizados para a execução destes gráficos foram fornecidos pela empresa Elevo Group (Anexo I).

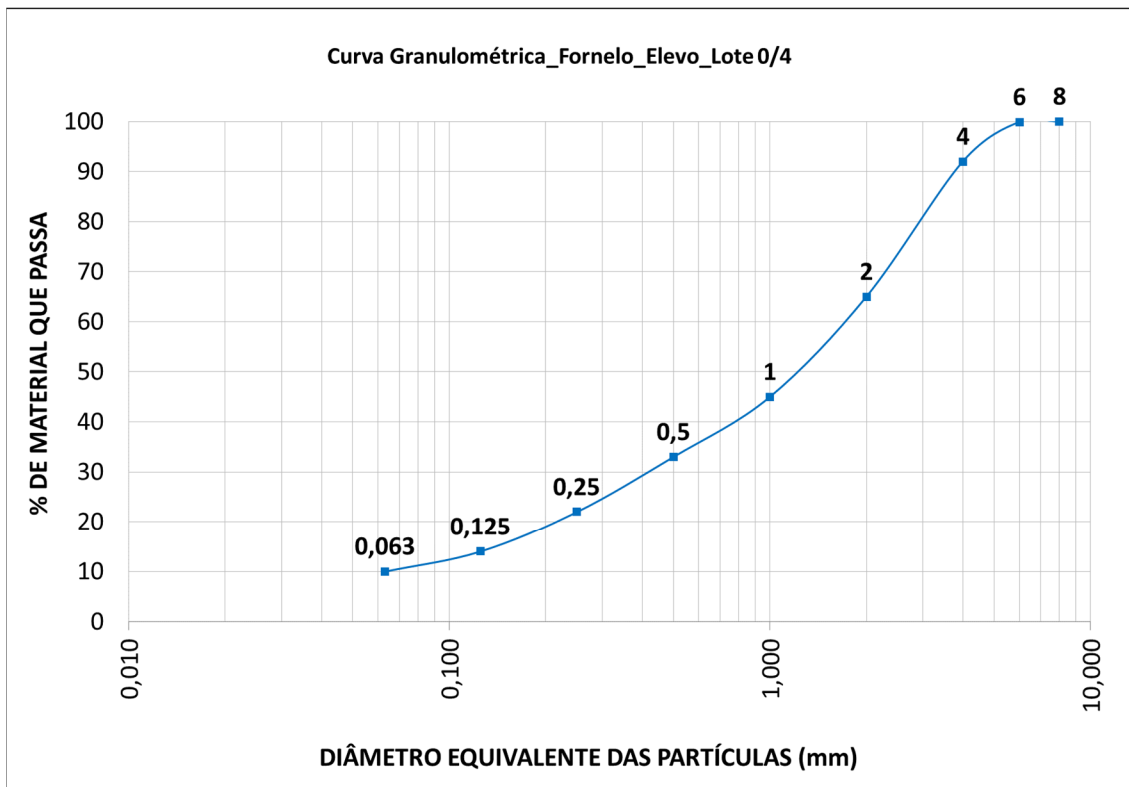


Gráfico 1. Curva Granulométrica de Furnelo fornecida pelo Elevo do lote 0/4.

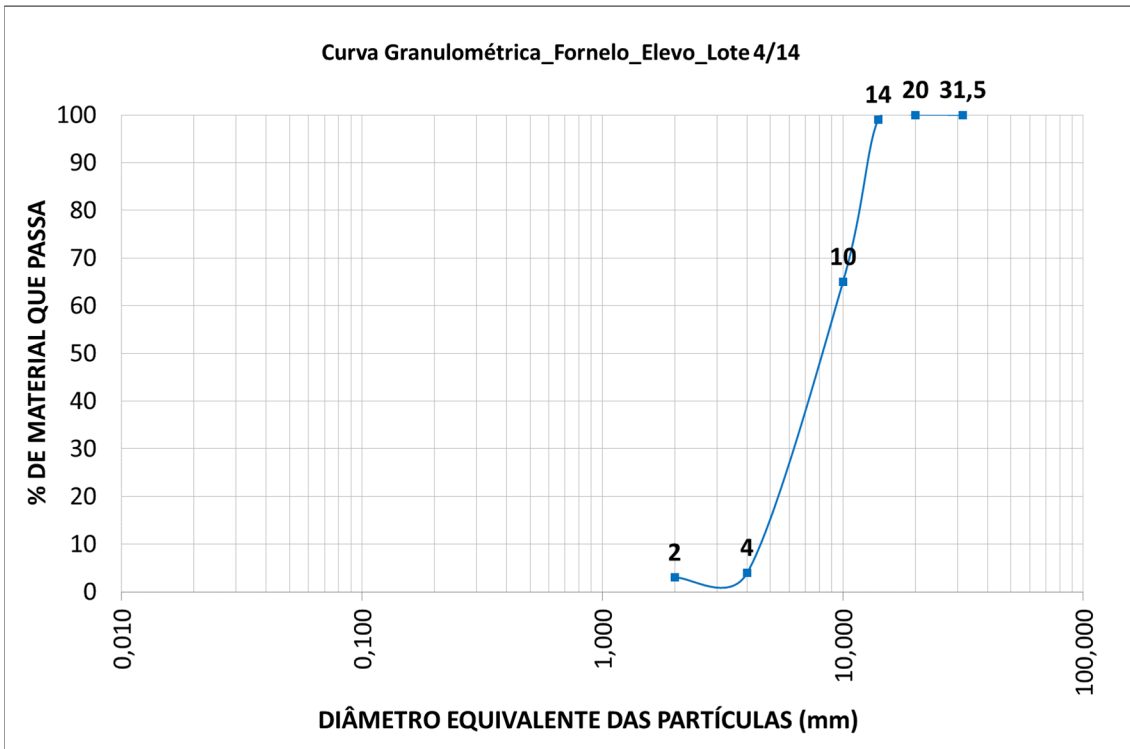


Gráfico 2. Curva Granulométrica de Fornelo fornecida pelo Elevo do lote 4/14.

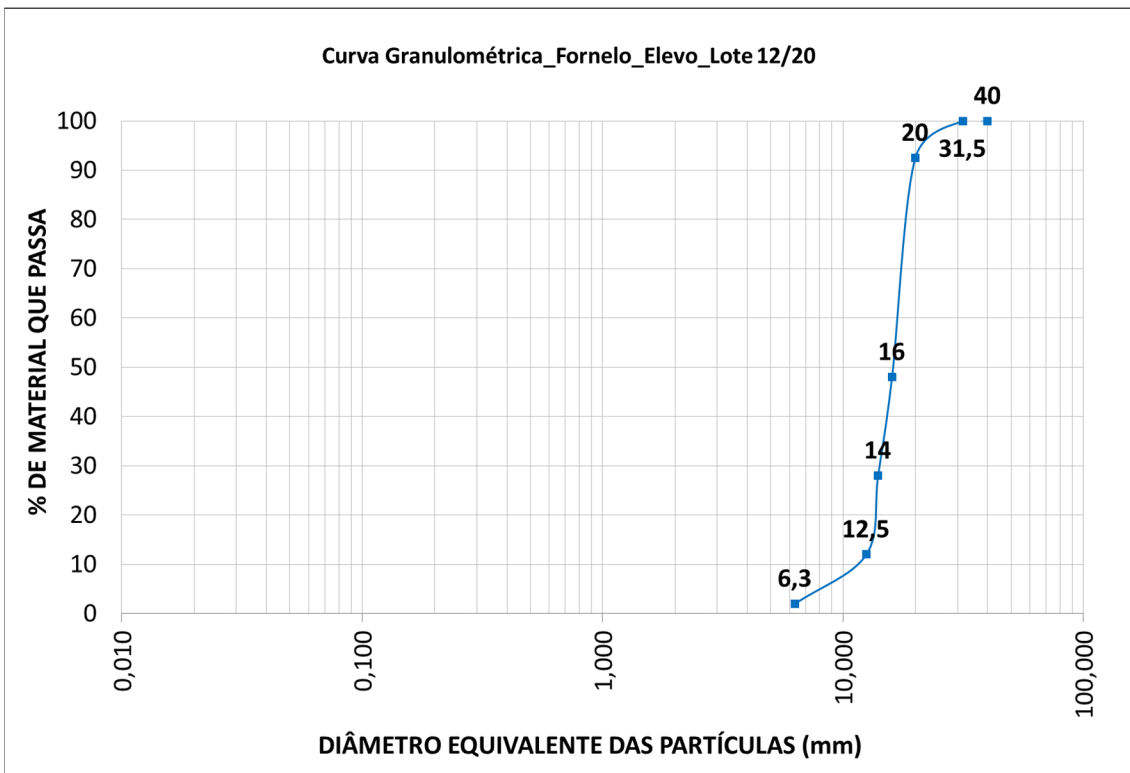


Gráfico 3. Curva Granulométrica de Fornelo fornecida pelo Elevo do lote 12/20.

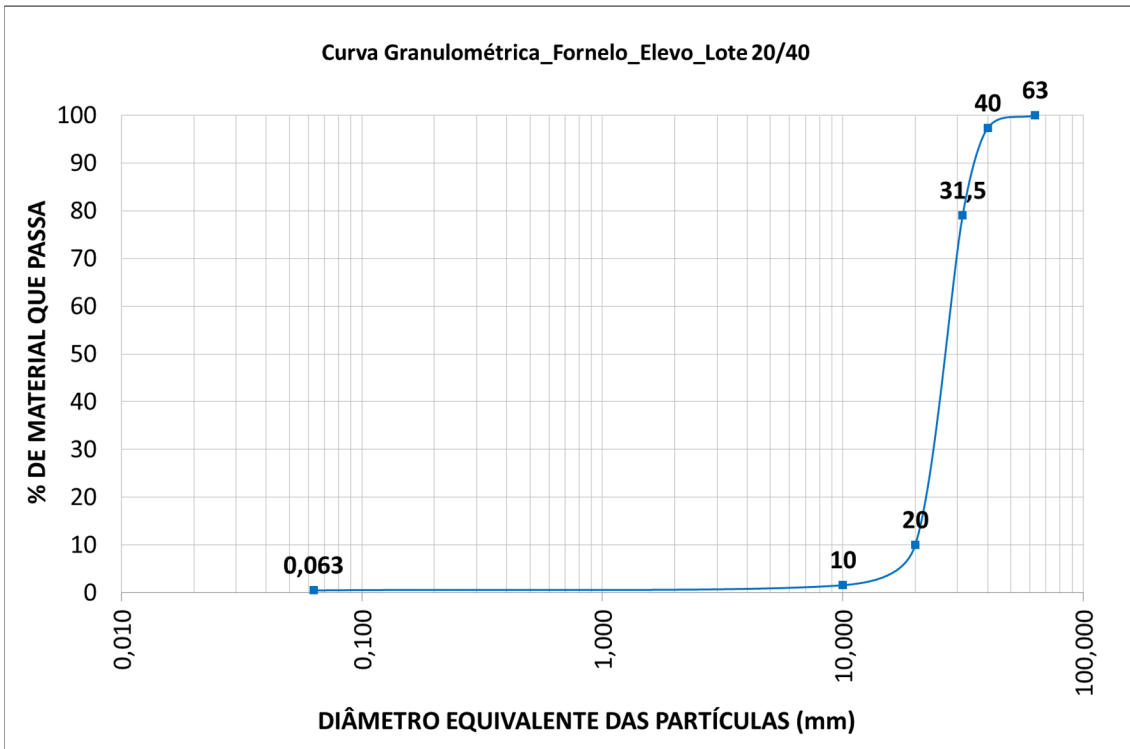


Gráfico 4. Curva Granulométrica de Furnelo fornecida pelo Elevo do lote 20|40.

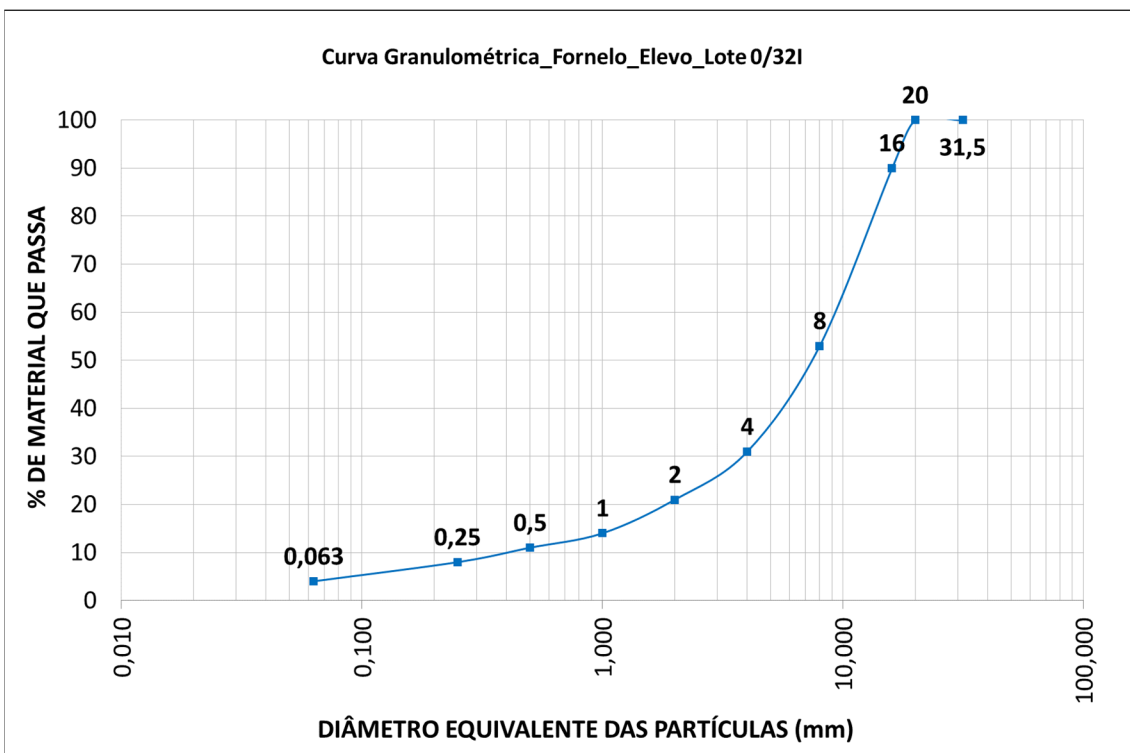


Gráfico 5. Curva Granulométrica de Furnelo fornecida pelo Elevo do lote 0|32I.

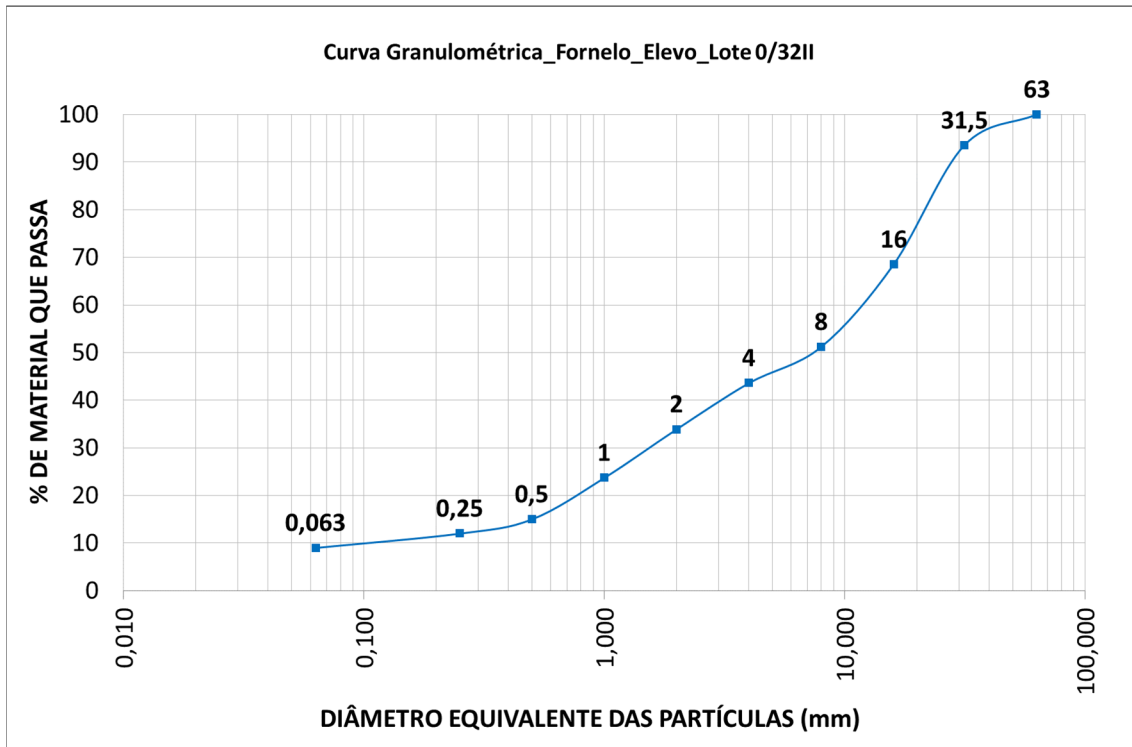


Gráfico 6. Curva Granulométrica de Furnelo fornecida pelo Elevo do lote 0/32II.

Através da análise granulométrica realizada em laboratório (LGMC – Laboratório de Geotecnia e Materiais de Construção, do DEG|ISEP) foi possível chegar à distribuição granulométrica dos mesmos lotes, para posterior comparação com os resultados obtidos pela empresa relativamente aos lotes em estudo. Assim, os resultados obtidos apresentam-se nos Gráficos 7, 8, 9 e 10 e os valores de ensaio utilizados para a respetiva elaboração constam do Anexo II.

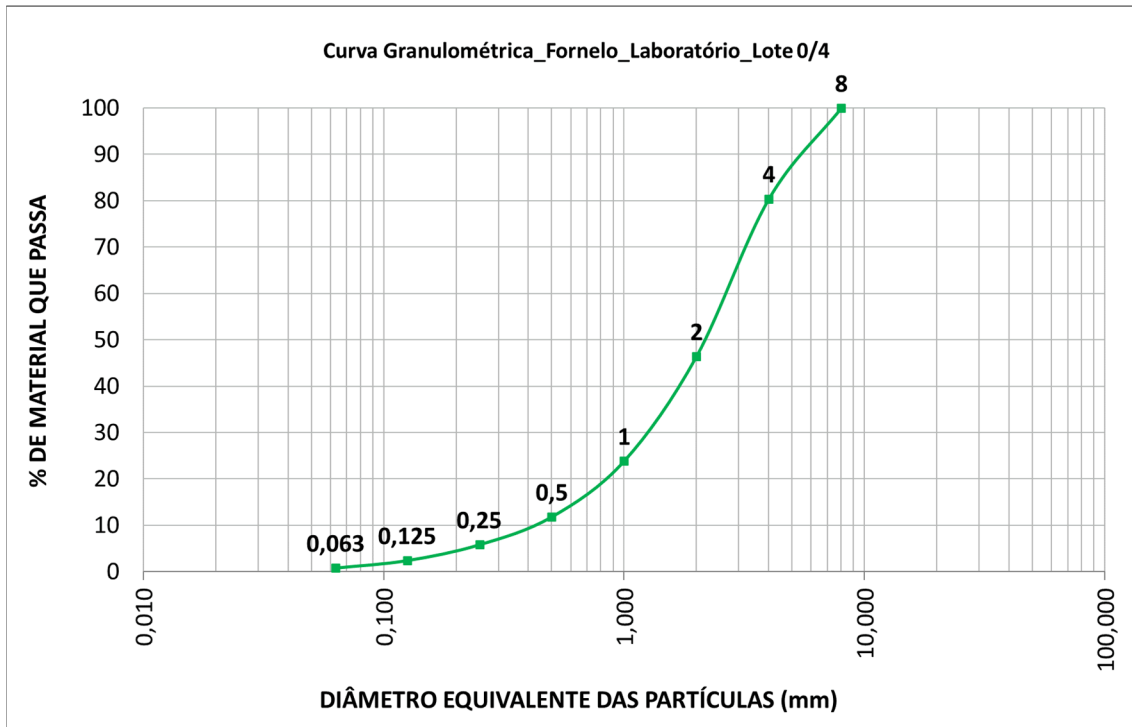


Gráfico 7. Curva Granulométrica de Furnelo obtida no ensaio de laboratório do lote 0/4.

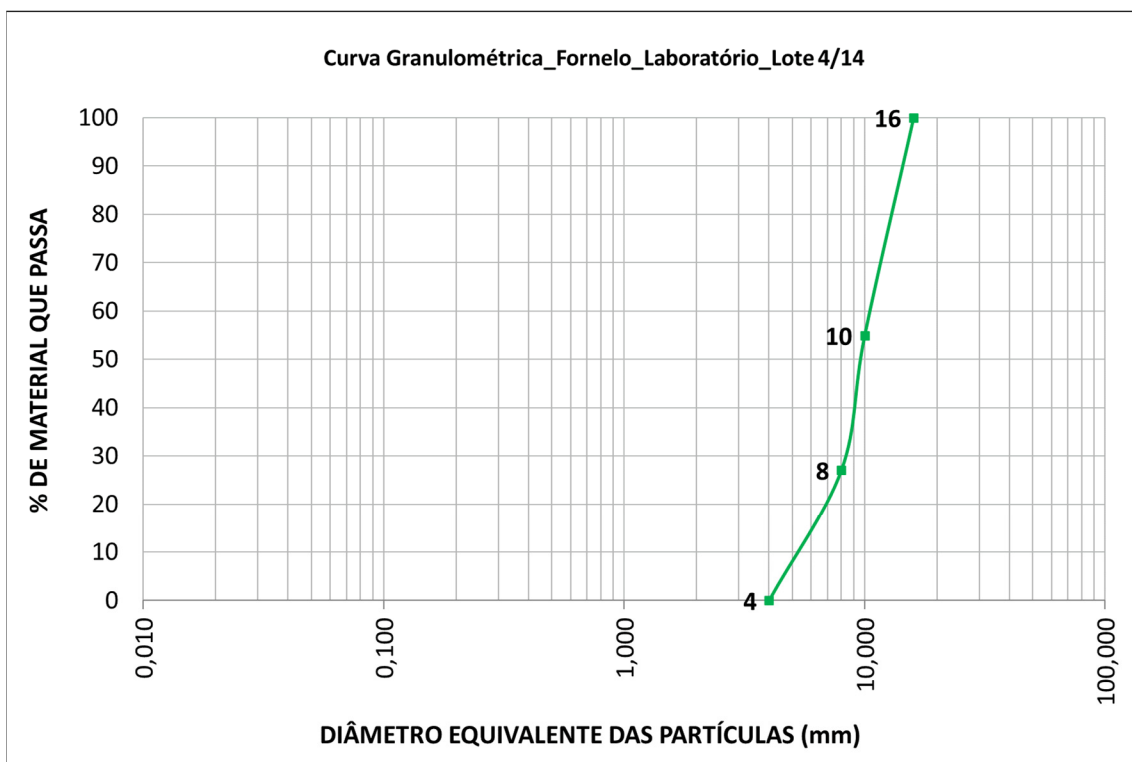


Gráfico 8. Curva Granulométrica de Furnelo obtida no ensaio de laboratório do lote 4/14.

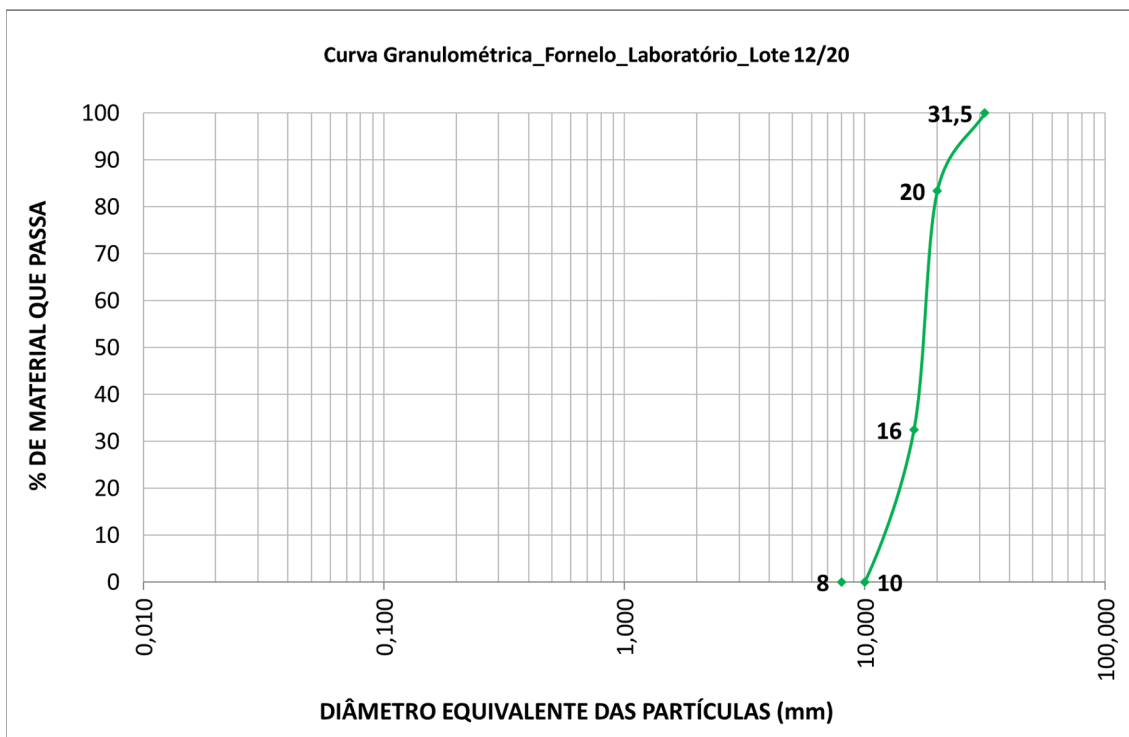


Gráfico 9. Curva Granulométrica de Furnelo obtida no ensaio de laboratório do lote 12|20.

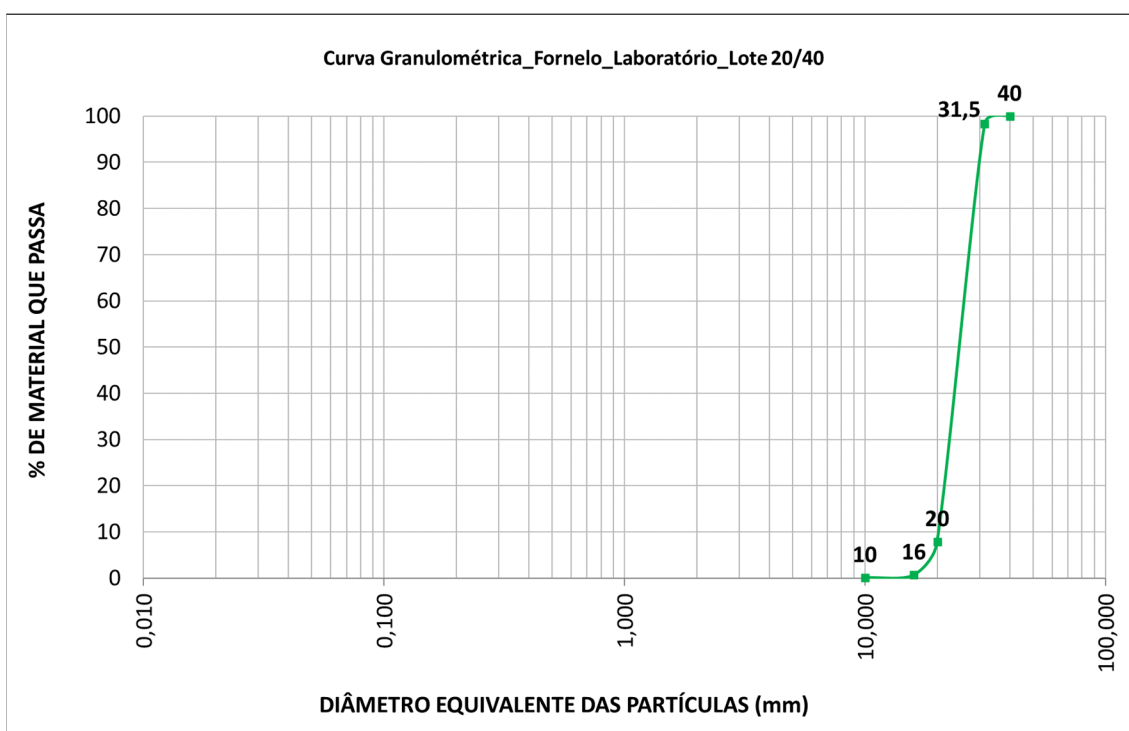


Gráfico 10. Curva Granulométrica de Furnelo obtida no ensaio de laboratório do lote 20|40.

Nos diferentes lotes foi possível verificar a fração granulométrica predominante, a menos influente e também a percentagem de finos (Tabela 4) (Anexo II).

Tabela 4. Dados da análise granulométrica dos diferentes lotes.

Identificação da amostra	Fração granulométrica predominante	Fração granulométrica menos influente	Percentagem de Finos
Fornelo 0/4 Laboratório	2/4 mm	0,063/0,125 mm	5,52%
Fornelo 4/14 Laboratório	10/16 mm	4/8 mm	1,58%
Fornelo 14/20 Laboratório	16/20 mm	20/31,50 mm	0,6%
Fornelo 20/40 Laboratório	20/31,50 mm	10/16 mm	1,04%

Perante a análise da Tabela 4 e dos Gráficos acima, conclui-se que as distribuições das diferentes frações granulométricas se encontram corretas nos lotes definidos pela Elevo Group, contudo na amostra Fornelo 20/40, obtida em laboratório, no LGMC, existe uma fração granulométrica inferior ao definido.

5.2. Resultados do ensaio de determinação da forma

O Gráfico 11 apresenta o índice de forma por fração das amostras ensaiadas. É possível verificar através do referido gráfico que as partículas das amostras analisadas são, de um modo geral, cúbicas. A forma das partículas está associada às sucessivas fragmentações a que os agregados são sujeitos, logo depende também do tipo de fragmentador.

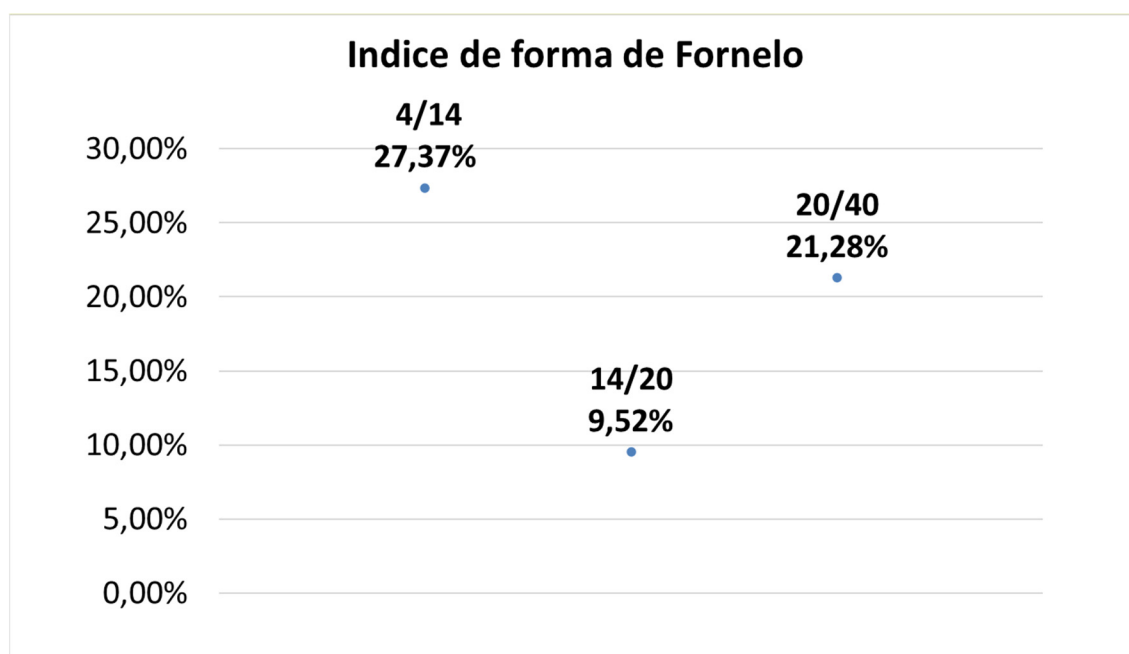


Gráfico 11. Índice de forma de amostras de Fornelo obtido no laboratório (LGMC).

Verifica-se, como seria de esperar, que os materiais exibem uma forma cúbica predominante, uma vez que o 2º e 3º estágio de fragmentação se realizam em fragmentadores do tipo cónico, os quais devido à respetiva conceção conferem formas mais arredondadas às partículas reduzidas.

Capítulo VI

Simulador “Bruno” - Instalação de britagem da Pedreira de Fornelo

(página propositadamente em branco)

6. Simulador “Bruno” - Instalação de britagem da Pedreira de Furnelo

No caso em estudo, os equipamentos da instalação não constam no catálogo da Metso, logo foi necessário encontrar equipamentos equivalentes para se proceder à simulação, tal como apresenta a Tabela 5.

Tabela 5. Equipamentos na instalação e os equivalentes da Metso.

Equipamento	Local	Equivalente da METSO
Alimentador	Svedala/ Sandvik VMHC 48/15	VF561-2V
Primário	Svedala/Sandvik JM12.11	C125 std
Secundário	Svedala/ Sandvik S3000	GP300S coarse
Terciário	Svedala/Sandvik H4000	GP330 mediun
Crivo	Svedala/ Sandvik CC126	CVB304

Através da equivalência dos equipamentos, foi possível obter o diagrama da instalação no simulador “Bruno” (Figura 40), tendo como pontos de partida: i) as características reais da alimentação; ii) os parâmetros de funcionamento dos equipamentos selecionados; e iii) as características dos lotes a produzir.

No software "Bruno", foi possível obter as curvas granulométricas correspondentes aos lotes produzidos pela empresa, as quais se apresentam nos Gráficos 12, 13, 14, 15 e 16, no Anexo III encontra-se os gráficos retirados do simulador e as curvas granulométricas para análise.

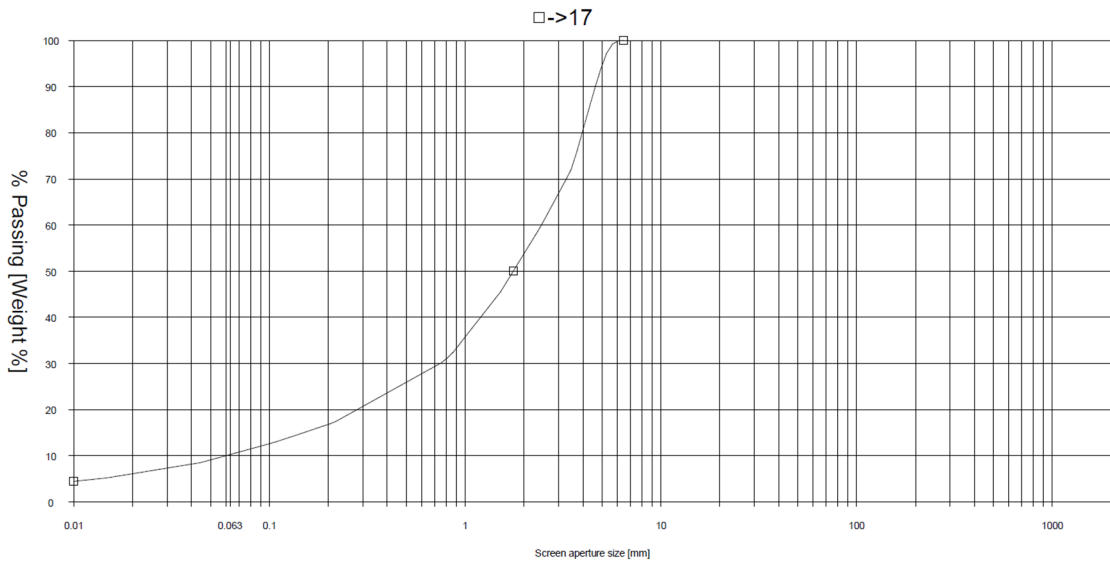


Gráfico 12. Curva granulométrica do lote 0/4 obtido no simulador "Bruno".

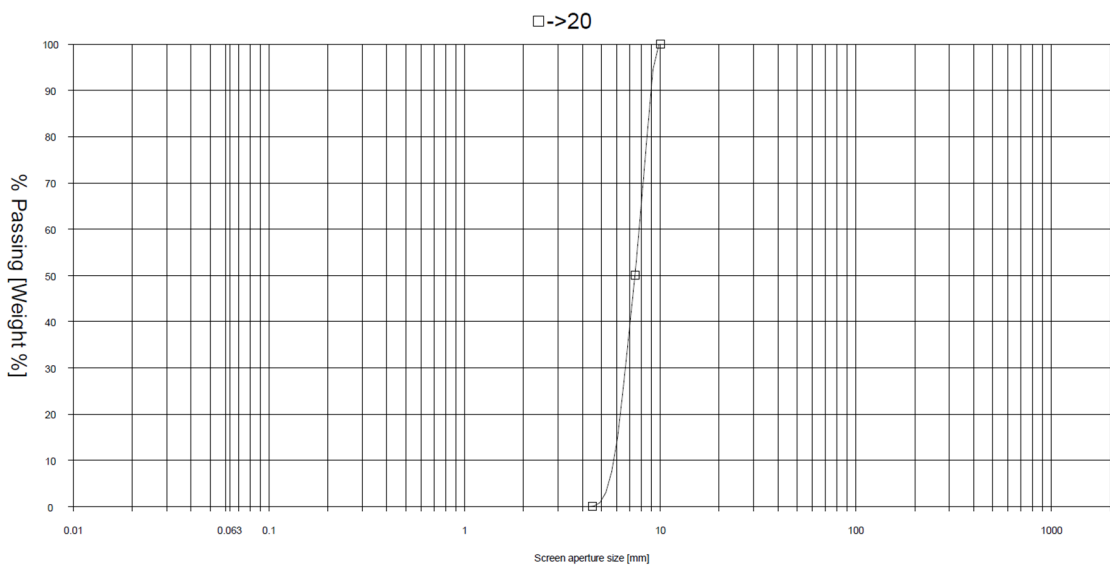


Gráfico 13. Curva granulométrica do lote 4/8 obtido no simulador "Bruno".

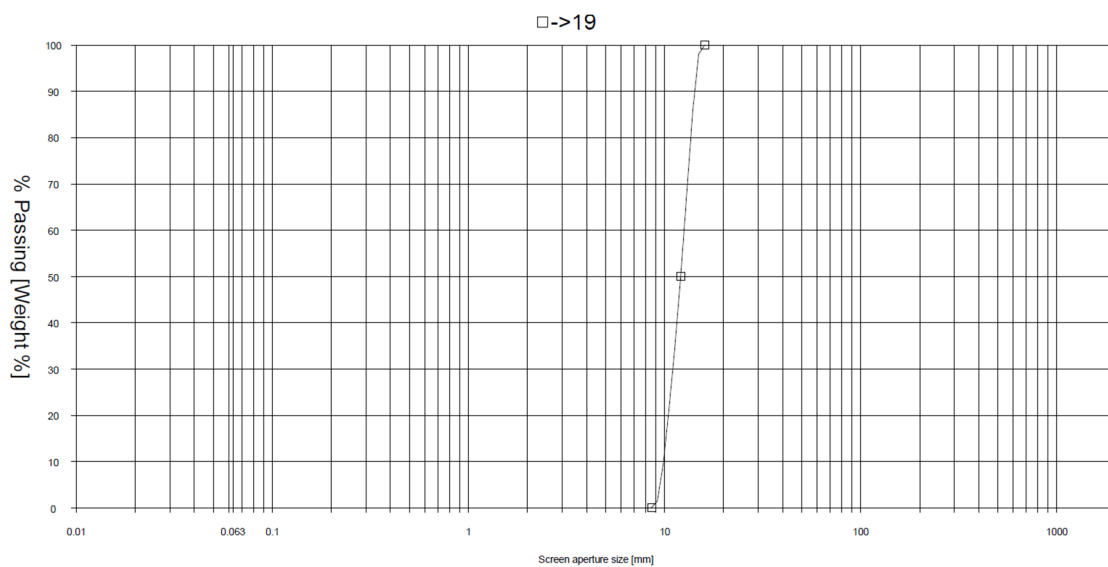


Gráfico 14. Curva granulométrica do lote 8/14 obtido no simulador "Bruno".

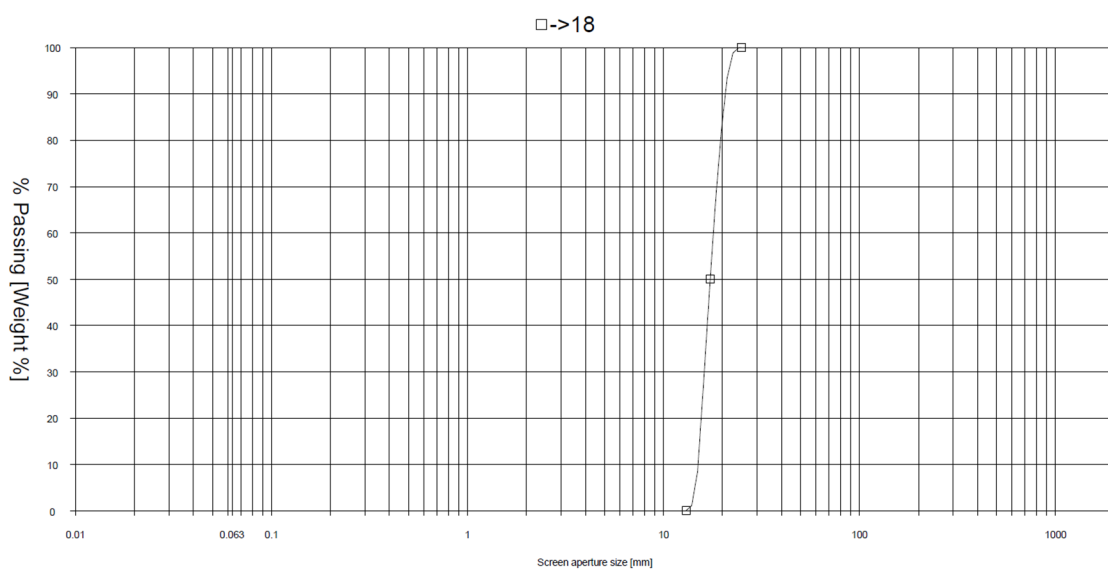


Gráfico 15. Curva granulométrica do lote 12/20 obtido no simulador "Bruno".

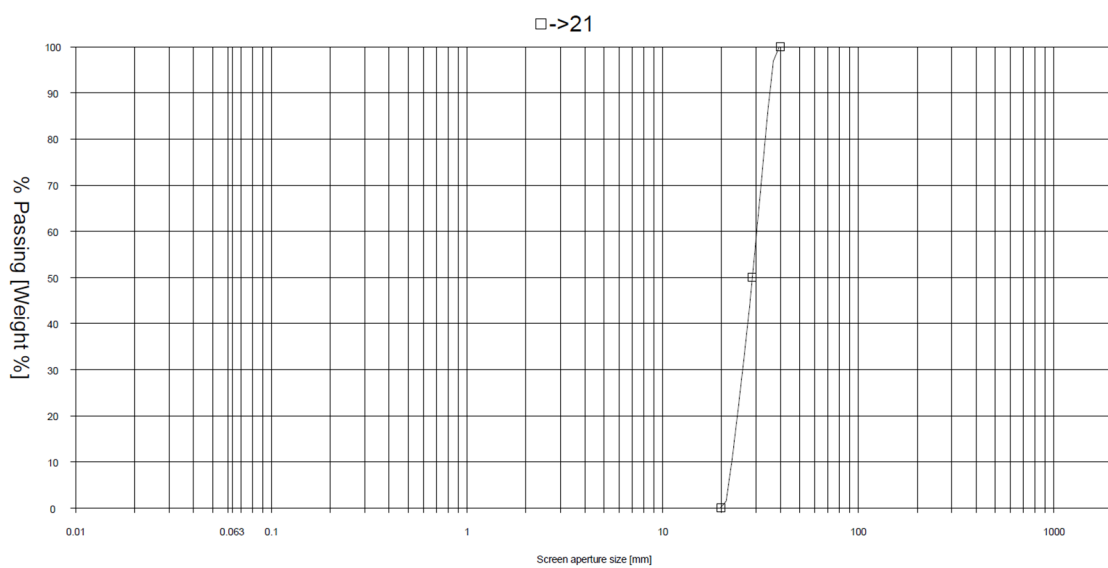


Gráfico 16. Curva granulométrica do lote 20/40 obtido no simulador "Bruno".

Tendo em conta o simulador "Bruno", foi possível obter a Tabela 6, com as toneladas produzidas para 1000h de trabalho.

Tabela 6. Produção dos lotes por 1000h.

Lote	Produção (t/1000h)
0/4	92841
4/8	26916
8/14	45852
12/20	37825
20/40	51564

Na tentativa de verificar a sensibilidade do software a diferentes possibilidades de regulação das aberturas de saída dos fragmentadores utilizados e otimizar as produções, assim como os respetivos consumos de energia, foram realizadas 6 simulações, de A a F, e comparadas com a situação a funcionar na instalação atualmente. A Tabela 7 apresenta as diversas simulações consideradas, nas quais se fez variar as aberturas de saída do fragmentador primário, secundário e terciário, cuja finalidade consistiu em avaliar a acuracidade do simulador Bruno.

Tabela 7. Diversas simulações para estudo.

Simulação	Calibre inicial (mm)	Abertura 1º Fragmentador (mm)	Abertura 2º Fragmentador (mm)	Abertura 3º Fragmentador (mm)
A	600	180	44	16
B	600	180	44	20
C	600	180	40	16
D	600	180	40	20
E	600	180	31	16
F	600	180	31	20

Da simulação A à F, os equipamentos considerados são os mesmos que a instalação de Fornelo utiliza atualmente, tendo sido modificadas apenas as aberturas de saída dos fragmentadores. A abertura de saída do 1º fragmentador nas simulações de A a F é igual em todas, sendo uma abertura de 180 mm. No 2º fragmentador existe uma variação da abertura de saída, com valores superiores e inferiores, em relação à instalação de Fornelo. No 3º fragmentador, alternou-se as aberturas de saída, entre 20mm e 16mm, relativamente à abertura de saída utilizada no 3º fragmentador de Fornelo.

6.1. Simulação A

A Figura 41 representada a simulação A, retirada do simulador “Bruno”.

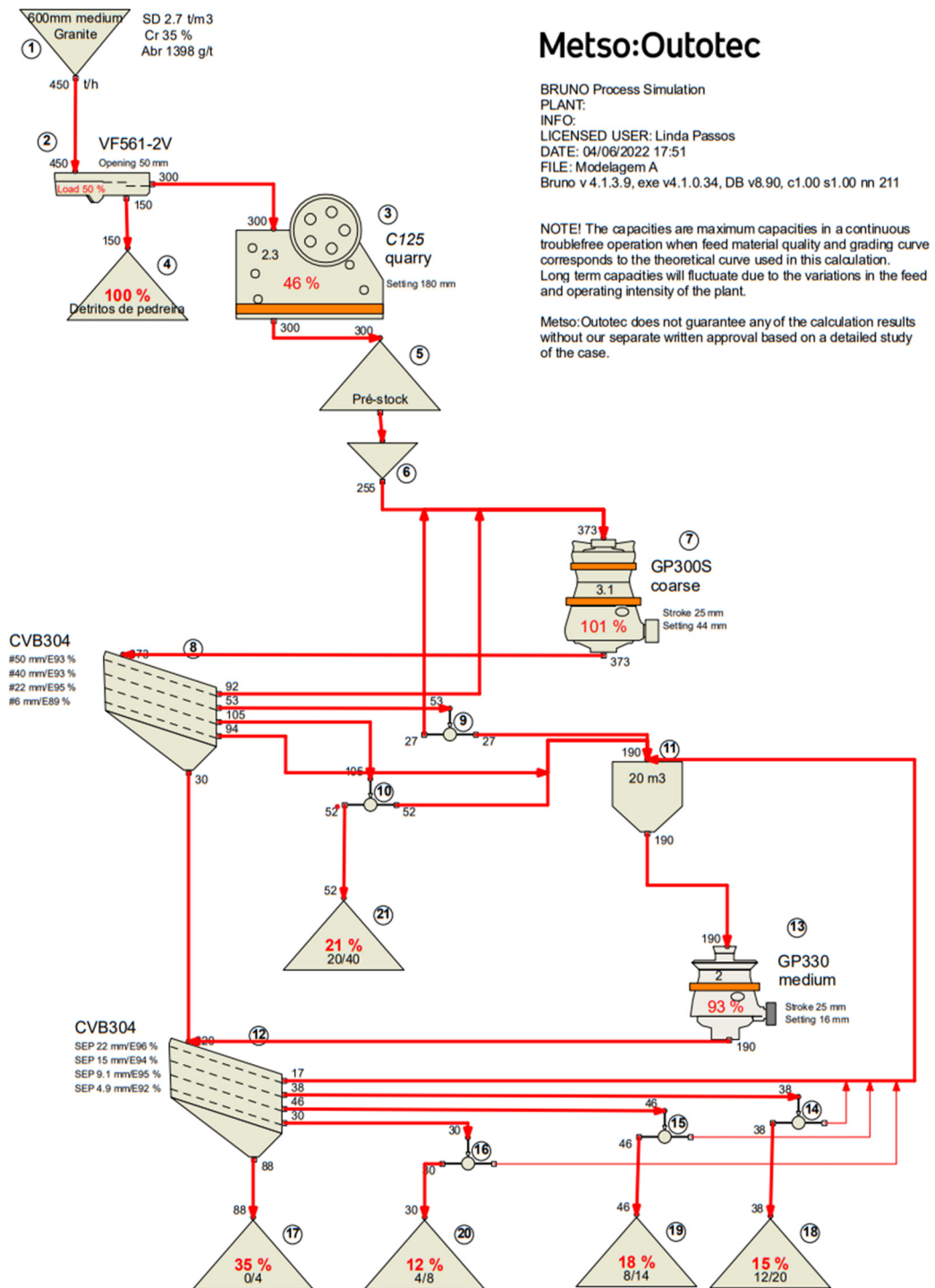


Figura 41. Simulação A da instalação de britagem.

6.2. Simulação B

A Figura 42 representada a simulação B, retirada do simulador “Bruno”.

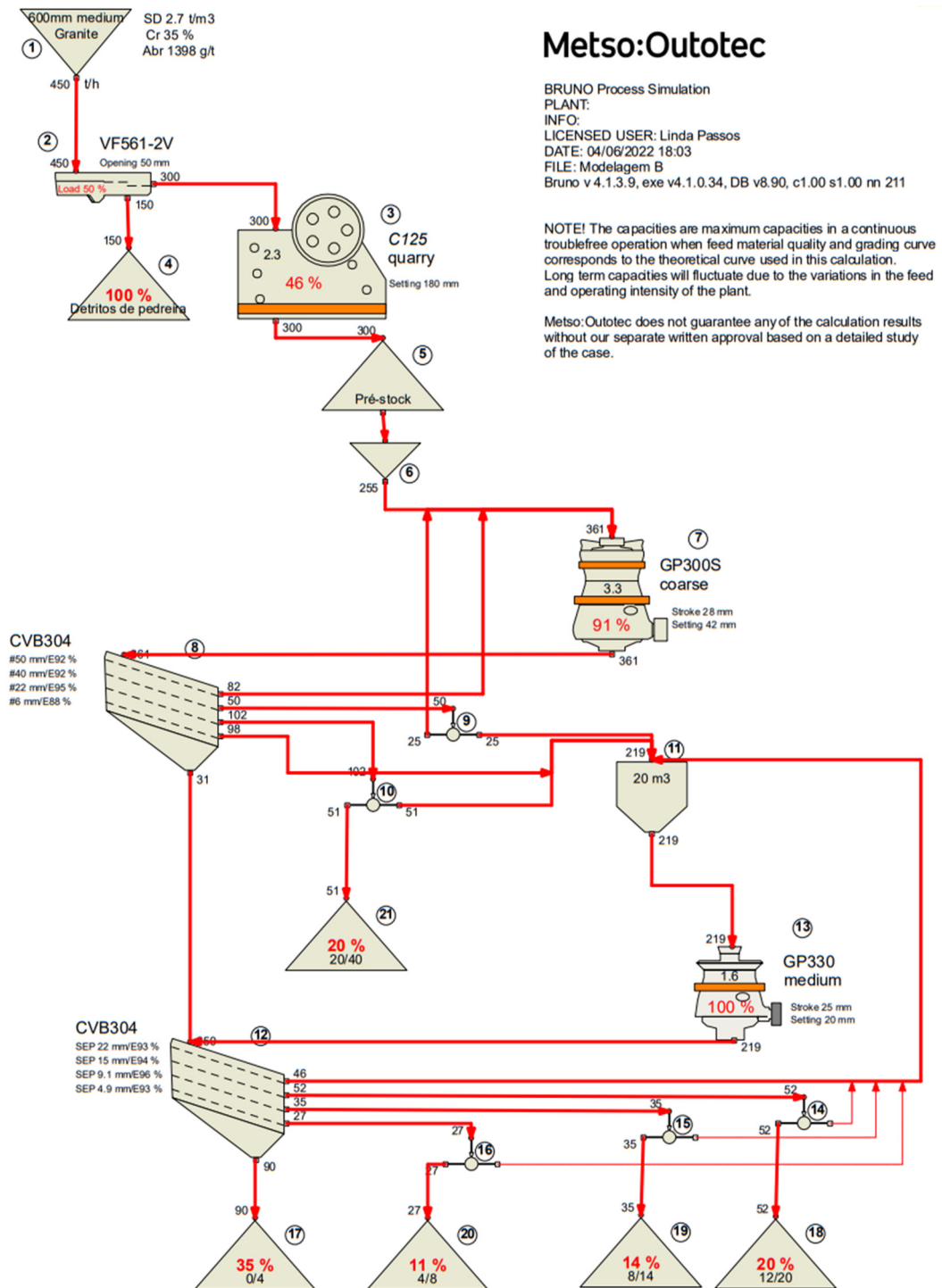


Figura 42. Simulação B da instalação de britagem.

6.3. Simulação C

A Figura 43 representada a simulação C, retirada do simulador “Bruno”.

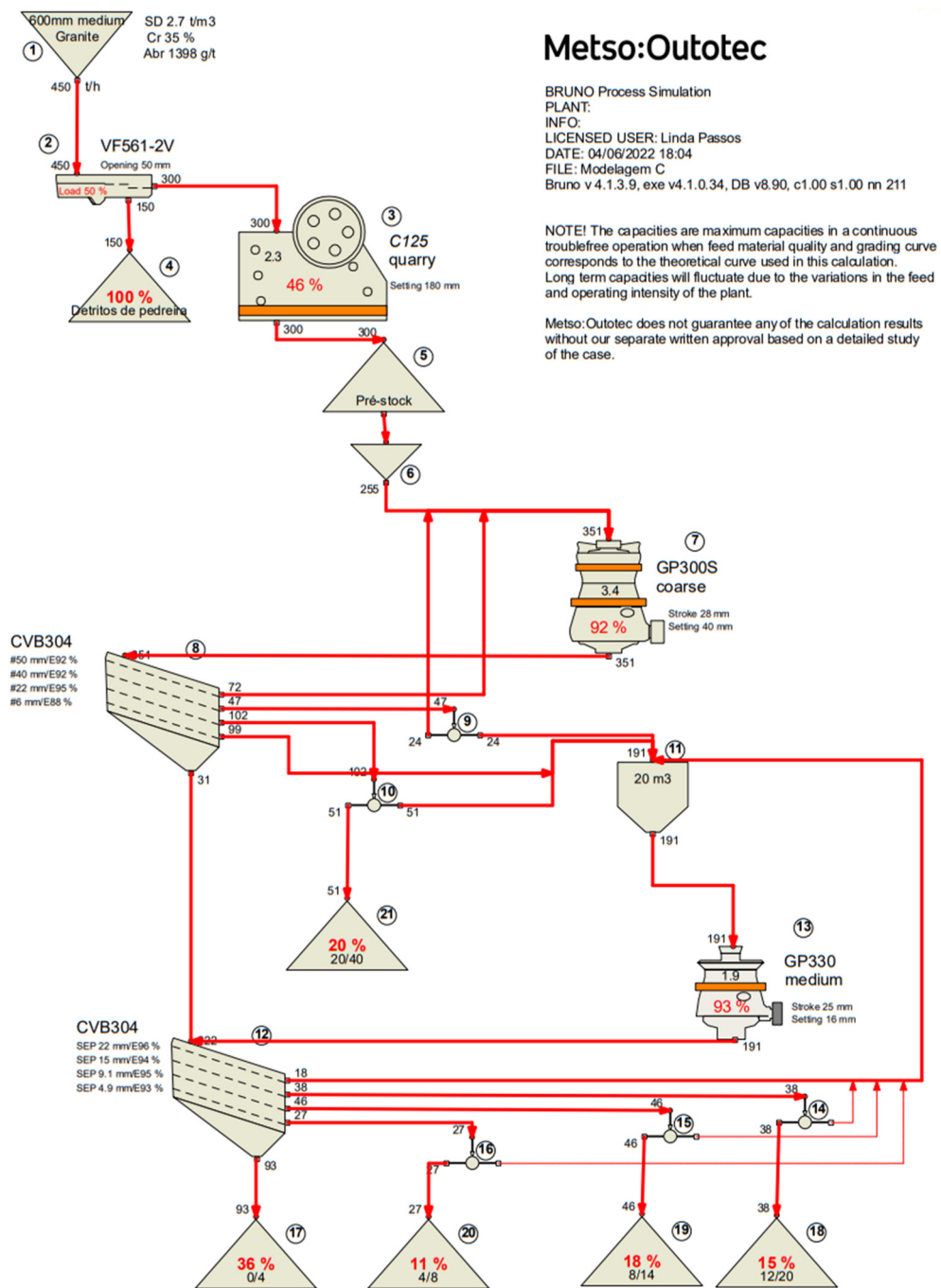


Figura 43. Simulação C da instalação de britagem.

6.5. Simulação E

A Figura 45 representada a simulação E.

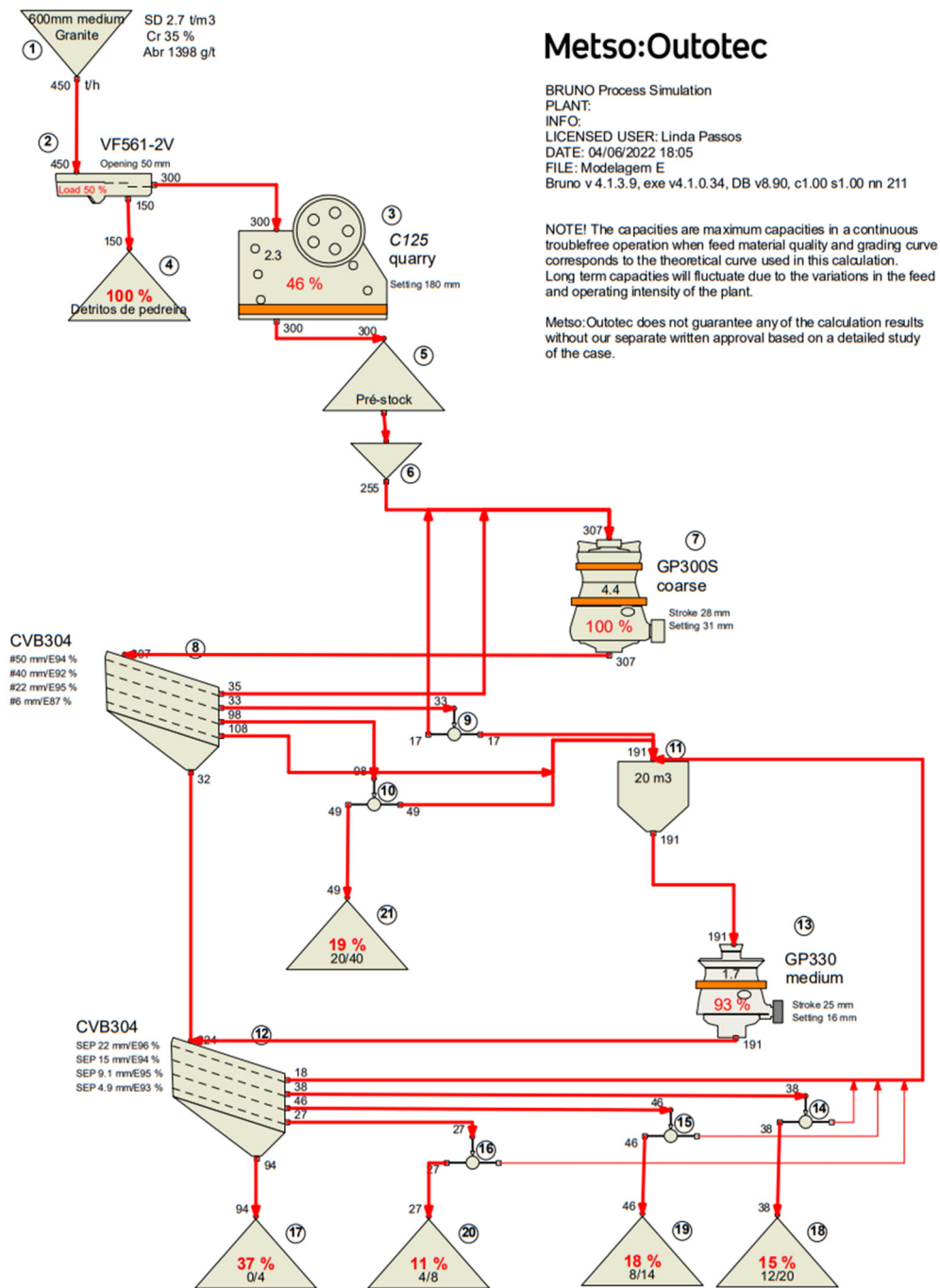


Figura 45. Simulação E da instalação de britagem.

6.6. Simulação F

A Figura 46 representada a simulação F.

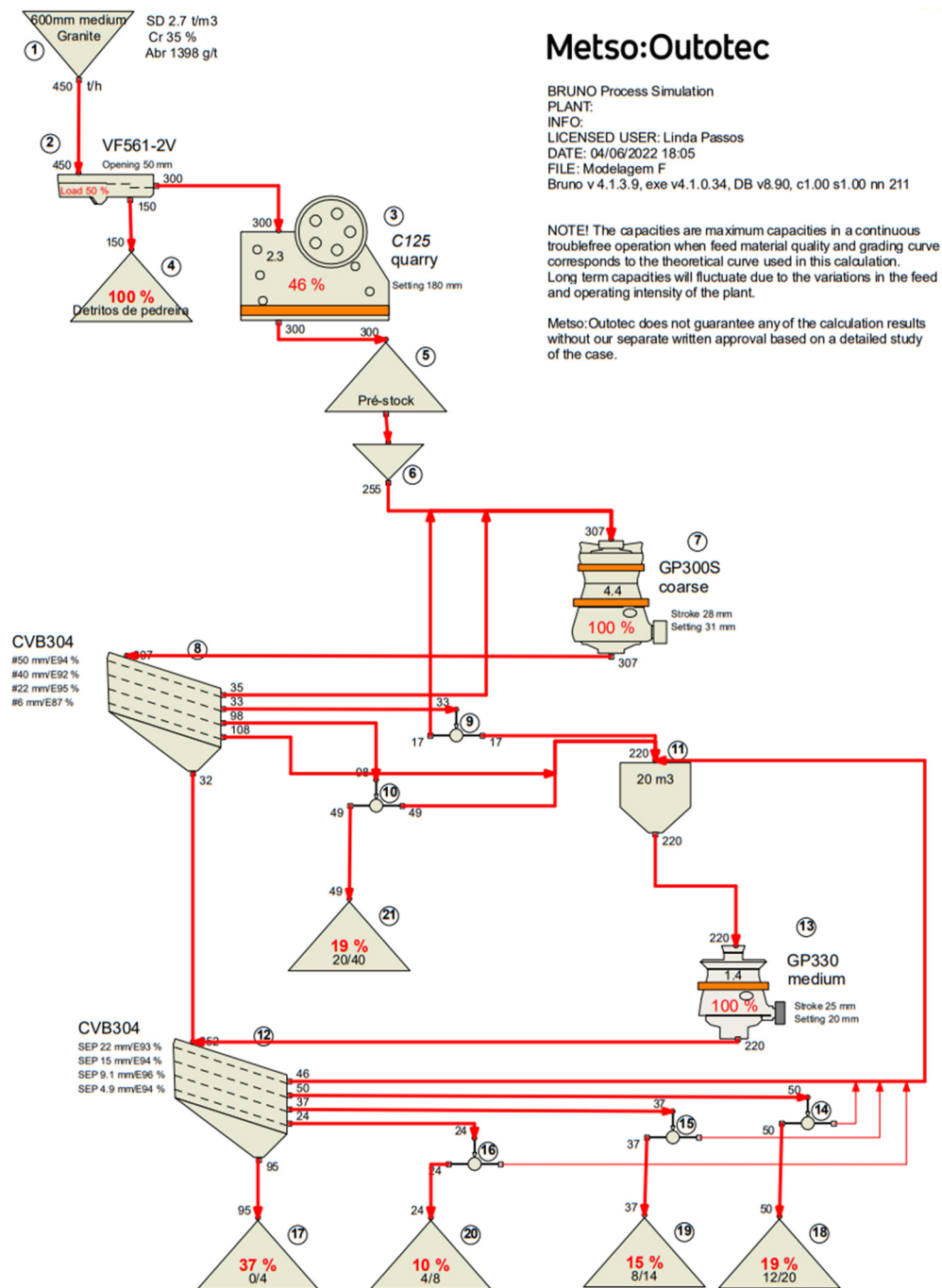


Figura 46. Simulação F da instalação de britagem.

A Tabela 8 apresenta a produção (toneladas) por cada 1000 horas de trabalho e referentes a cada lote produzido, e os respectivos consumos de energia.

Tabela 8. Produção por 1000 horas e consumo de energia da instalação de fregmentação.

Situação atual		Simulação A		Simulação B		Simulação C		Simulação D		Simulação E		Simulação F		
Aberturas de saída (mm)		Aberturas de saída (mm)		Aberturas de saída (mm)		Aberturas de saída (mm)		Aberturas de saída (mm)		Aberturas de saída (mm)		Aberturas de saída (mm)		
Ø inicial 600; 1º F 160; 2º F 40; 3º F 16		Ø inicial 600; 1º F 180; 2º F 44; 3º F 16		Ø inicial 600; 1º F 180; 2º F 44; 3º F 20		Ø inicial 600; 1º F 180; 2º F 40; 3º F 16		Ø inicial 600; 2º F 180; 3º F 40; 4º F 20		Ø inicial 600; 1º F 180; 2º F 31; 3º F 16		Ø inicial 600; 1º F 180; 2º F 31; 3º F 20		
Lotes	Produção t/1000 h	Consumo Kwh/t	Produção t/1000 h	Consumo Kwh/t	Produção t/1000 h	Consumo Kwh/t	Produção t/1000 h	Consumo Kwh/t	Produção t/1000 h	Consumo Kwh/t	Produção t/1000 h	Consumo Kwh/t	Produção t/1000 h	Consumo Kwh/t
0/4	92841	1,01	88276	0,95	89115	0,9	92780	0,96	90377	0,9	92284	0,97	95025	0,92
4/8	26916		30248		27019		28093		27109		27218		24295	
8/14	45852		34854		34760		37896		34841		16299		37206	
12/20	37825		37772		51704		37896		51825		38234		49504	
20/40	51564		52352		52352		50844		50844		48963		48963	
Total	254998		243502		254950		247509		254996		222998		254993	

Os resultados obtidos, nas diferentes simulações, permitem constatar que aumentado a abertura de saída do 1º fragmentador o consumo de energia diminui, mas também existe uma diminuição do consumo de energia quando aumentada a abertura de saída do 2º e 3º fragmentadores, podendo-se concluir que maiores aberturas conduzem a menores consumos e vice-versa.

Tendo em conta a produção é possível verificar que existe uma diminuição da produção quando se aumenta a abertura de saída do 1º fragmentador (situação atual para a simulação A), mas quando o 2º e 3º fragmentadores diminuem as aberturas de saída existe uma diminuição da produção, sendo assim possível concluir que valores de consumo de energia mais baixos correspondem a aberturas de saída maiores e, conseqüentemente, valores de produção superiores, tal como seria de esperar.

Capítulo VII

Análise e discussão dos resultados

(página propositadamente em branco)

7. Análise e discussão dos resultados

Neste capítulo serão apresentados dados concretos daquilo que foi produzido em Furnelo e os custos associados, desta forma, se poder analisar se o simulador “Bruno” é viável. Também serão comparadas as várias simulações realizadas no intuito de tentar apurar o que faz variar o consumo de energia, com a finalidade de otimizar de britagem, tornando-a mais rentável com os equipamentos que existem em Furnelo. Os valores de suporte dos gráficos utilizados neste capítulo encontram-se no Anexo IV.

7.1. Interpretação das curvas granulométricas

Os Gráficos 17,18 e 19, correspondem às curvas granulométricas dos lotes 0/4, 12/20 e 20/40, e encontram-se no Anexo IV. Estes foram obtidos através da compilação dos dados do laboratório LGMC, da empresa Elevo e do simulador “Bruno”.

No Gráfico 17 é possível verificar que o simulador “Bruno” consegue ter uma maior precisão quanto à curva granulométrica, pois aponta para o diâmetro de partículas mínimo 0,001 mm, enquanto para os dados da Elevo e do LGMC, o diâmetro de partícula mínima é 0,06 mm, em ambos os casos, apesar que poder existir a presença de finos, porém não são suscetíveis de determinação por peneiração. Efetivamente, observando o Gráfico 17, verifica-se que a curva granulométrica obtida no “Bruno” está mais próxima da curva obtida com os dados fornecidos pela empresa, para as frações granulométricas mais finas, e apresenta maior semelhança com a curva granulométrica obtida no LGMC, para as frações granulométricas mais grosseiras do lote 0/4mm.

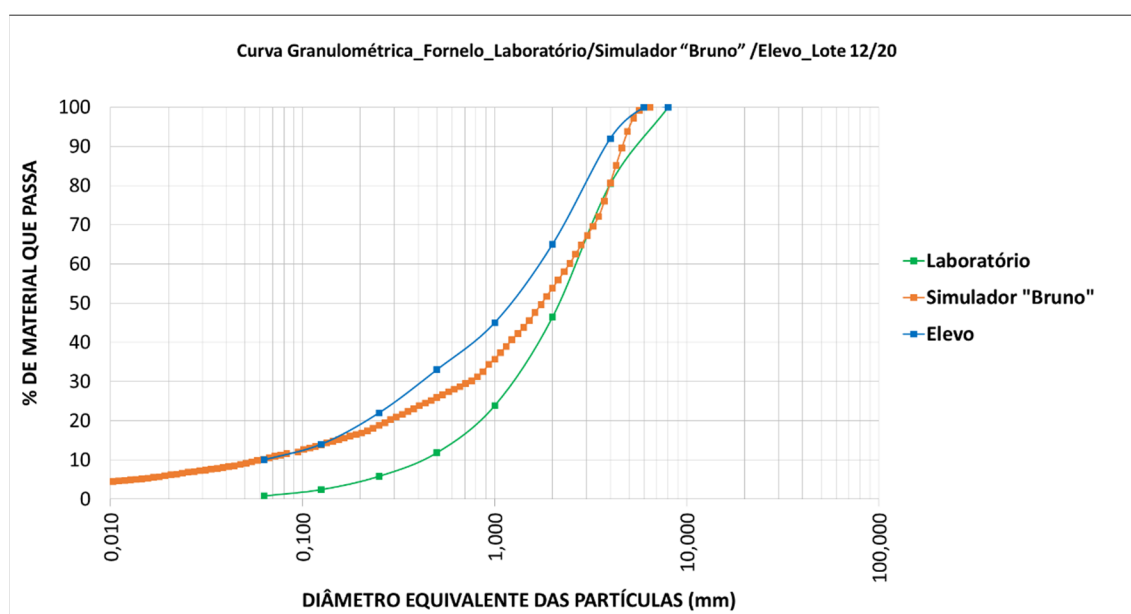


Gráfico 17. Curva granulométrica_ Laboratório/Simulador “Bruno” /Elevo_Lote 0/4.

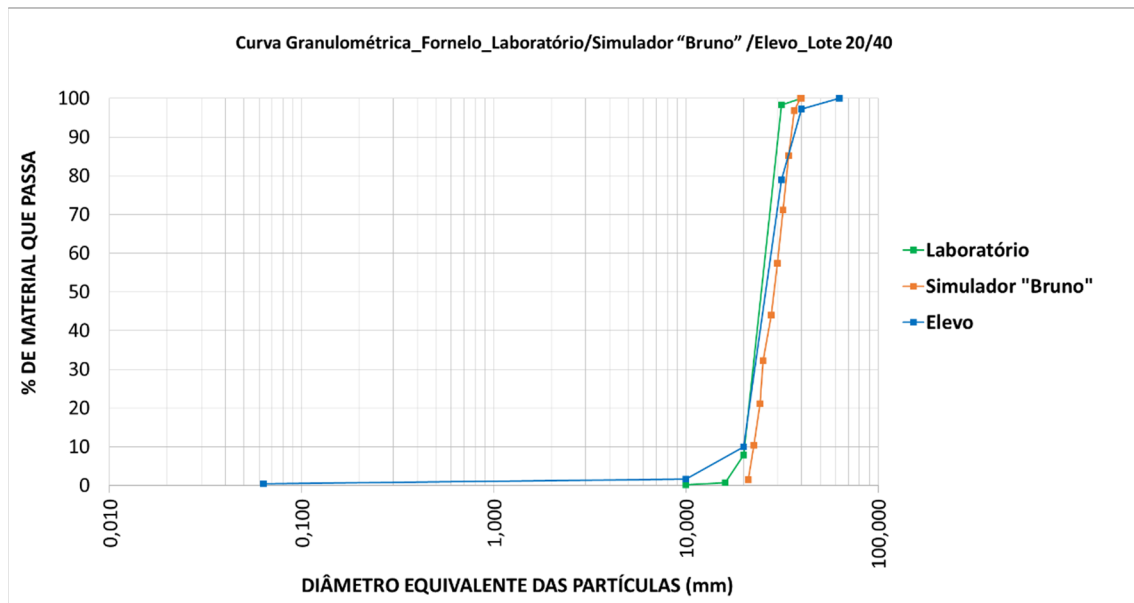


Gráfico 19. Curva granulométrica_Laboratório/Simulador "Bruno" /Elevo_Lote 20/40.

7.2. Consumo energético

O consumo energético de uma etapa de fragmentação está relacionado com o consumo de energia despendido pelo fragmentador para diminuir as partículas para a dimensão pretendida. Este consumo deriva do fragmentador utilizado, da abertura do fragmentador, o tamanho das partículas na alimentação e do tamanho do produto. O consumo energético será calculado através da fórmula de Bond (Equação 3), por esta ser a que se enquadra no caso em estudo, sendo então possível calcular o consumo energético, sendo necessário conhecer o tamanho correspondente a 80% de passados na alimentação (F) e no produto (P).

O consumo energético foi calculado para todas as hipóteses de modelação para as três etapas de fragmentação, recorrendo-se às curvas granulométricas dos catálogos da Metso, para determinar as percentagens correspondentes aos 80% passados na alimentação e nos produtos.

Como não foi possível realizar o ensaio para determinar os valores do Work Index (Wi) em relação às amostras em estudo, foi adotado para este tipo de granito um Wi de 16. As Tabelas 9, 10 e 11 apresentam os valores da energia específica gasta na primeira, na segunda e na terceira etapa de fragmentação de cada modelação, respetivamente.

Tabela 9. Valores utilizados na fórmula de Bond tendo em conta as modelações em estudo, para primeira etapa de fragmentação.

1º Fragmentador							
	Modelação Original	Modelação A	Modelação B	Modelação C	Modelação D	Modelação E	Modelação F
Wi (kWh/t)	16						
P (µm)	197 500	220 000	220 000	220 000	220 000	220 000	220 000
F(µm)	600 000	600 000	600 000	600 000	600 000	600 000	600 000
E (kWh/t)	0,153	0,135	0,135	0,135	0,135	0,135	0,135

Tabela 10. Valores utilizados na fórmula de Bond tendo em conta as modelações em estudo, para a segunda etapa de fragmentação.

2º Fragmentador							
	Modelação Original	Modelação A	Modelação B	Modelação C	Modelação D	Modelação E	Modelação F
Wi (kWh/t)	16						
P (µm)	47 500	51 600	51 600	47 500	47 500	36 100	36 100
F(µm)	200 000	260 000	260 000	260 000	260 000	260 000	260 000
E (kWh/t)	0,376	0,391	0,391	0,420	0,420	0,528	0,528

Tabela 11. Valores utilizados na fórmula de Bond tendo em conta as modelações em estudo, para a terceira etapa de fragmentação.

3º Fragmentador							
	Modelação Original	Modelação A	Modelação B	Modelação C	Modelação D	Modelação E	Modelação F
Wi (kWh/t)	16						
P (µm)	15 900	15 900	20 700	15 900	20 700	15 900	20 700
F(µm)	83 200	91 700	91 700	83 200	83 200	61 900	61 900
E (kWh/t)	0,714	0,741	0,584	0,714	0,557	0,626	0,469

Para interpretar os dados das Tabelas 9, 10 e 11, é necessário ter em conta o tamanho máximo das partículas na alimentação e a abertura de saída dos fragmentadores. Tendo em conta a Tabela 9, e relativamente ao 1º fragmentador, verifica-se que todas as modelações propostas apresentam um consumo de energia de 0,135 kWh/t, e a modelação original de 0,153 kWh/t. Tendo em conta os valores do consumo de energia, e abertura da saída do primeiro fragmentador, é possível verificar que quanto menor a abertura de saída maior o consumo de energia, isto porque a abertura de saída do fragmentador é mais reduzida, e este aplica uma maior energia mecânica sobre as partículas, refletindo-se no consumo de energia em virtude da menor produção obtida.

A Tabela 10 relativa ao 2º fragmentador, mostra que a modelação original apresenta o menor valor de consumo energia, com um valor de 0,376 kWh/t, mas tendo em conta as modelações propostas,

o valor menor encontra-se nas modelações A e B, com um valor de 0,391 kWh/t. Tal como para o 1º Fragmentador, o valor do consumo de energia aumenta quando diminui a abertura de saída.

A Tabela 11 relativa ao 3º fragmentador, mostra que a modelação F apresenta o menor consumo de energia, com um valor de 0,469 kWh/t. Tal como para o 1º e 2º Fragmentador, o valor do consumo de energia aumenta sempre que se aplica uma diminuição da abertura de saída.

A Tabela 12 mostra que a modelação B é a que apresenta o valor médio de consumo de energia menor enquanto a modelação E é a que apresenta maior consumo médio de energia. Ambas as modelações apresentam uma abertura de saída do 1º fragmentador de 180 mm, mas as aberturas do 2º e 3º fragmentadores são diferentes, sendo que a modelação B tem como abertura de saída do 2º fragmentador 44mm e do 3º fragmentador 20mm, enquanto a modelação E tem como abertura de saída do 2º fragmentador 31mm e do 3º fragmentador 16mm.

Por fim, e com base na Tabela 12, pode-se verificar que a modelação B é a que apresenta menor valor médio de consumo de energia, tal como se referiu, o que pode ser explicado pelo facto de esta simulação privilegiar a produção dos lotes de maior calibre, ou seja, os lotes 12/20 e 20/40, os quais correspondem às aberturas de saída superiores.

Tabela 12. Valores médios do consumo de energia dos fragmentadores das modelações em estudo.

Média do consumo de energia dos fragmentadores						
Modelação Original	Modelação A	Modelação B	Modelação C	Modelação D	Modelação E	Modelação F
E	0,415 kWh/t	0,422 kWh/t	0,370 kWh/t	0,423 kWh/t	0,371 kWh/t	0,430 kWh/t

7.3. Valor do produto final

Tendo em conta o valor de produto de cada lote, apresentados na Tabela 13, foi possível determinar qual das hipóteses de modelação seria mais rentável.

Tabela 13. Valor do produto de cada lote.

Lotes	Valor do produto (€/ton)
0 /4	4,2
4 /8	8,5
8 /14	8,3
12/ 20	8,1
20 /40	7,1

A Tabela 14 apresenta o valor comercial de cada lote para as diferentes simulações em análise.

Tabela 14. Valores comerciais por lote para diferentes simulações.

Lotes	Valor Final/Simulação Original	Valor Final/Simulação A	Valor Final/Simulação B	Valor Final/Simulação C	Valor Final/Simulação D	Valor Final/Simulação E	Valor Final/Simulação F
0/4	389 932,20 €	370 759,20 €	374 283,00 €	389 676,00 €	379 583,40 €	387 592,80 €	399 105,00 €
4/8	228 786,00 €	257 108,00 €	229 661,50 €	238 790,50 €	230 426,50 €	231 353,00 €	206 507,50 €
8/14	380 571,60 €	384 306,60 €	288 508,00 €	314 536,80 €	289 180,30 €	135 281,70 €	308 809,80 €
12/20	306 382,50 €	305 953,20 €	418 802,40 €	306 957,60 €	419 782,50 €	309 695,40 €	400 982,40 €
20/40	366 104,40 €	371 699,20 €	371 699,20 €	360 992,40 €	360 992,40 €	347 637,30 €	347 637,30 €
Total	1 671 776,70 €	1 689 826,20 €	1 682 954,10 €	1 610 953,30 €	1 679 965,10 €	1 411 560,20 €	1 663 042,00 €

A partir da Tabela 14 é possível verificar, face às variáveis contempladas neste estudo, que a modelação A é a que gera maior volume de negócio, correspondendo a um desvio favorável (valor máximo-valor mínimo) da ordem dos 278 266,00 €.

A Tabela 15 apresenta os valores do consumo de energia por tonelada produzida e o consumo de energia por 1000 horas de trabalho, obtidos no simulador Bruno. Para calcular o custo do consumo de energia utilizou-se o custo médio de 0,23 €/kWh (fonte: <https://bityli.com/jstGXGMR>).

Tabela 15. Diferença entre preço final e preço da energia para 1000 horas.

	Modelação Original	Modelação A	Modelação B	Modelação C	Modelação D	Modelação E	Modelação F
Consumo de Energia (kWh/t)	1,01	0,95	0,90	0,96	0,90	0,97	0,92
Consumo de Energia por 1000 h (kWh)	257 548	242 203	229 455	237 609	229 496	216 308	234 594
Custo médio de kWh (€/ kWh)				0,23			
Custo do consumo de Energia para 1000h (€)	24 339,56	23 634,30	21 696,25	24 804,09	21 758,81	22 054,50	22 110,44

Pela análise da Tabela 15, pode-se verificar que a modelação original apresenta o maior custo de energia e a modelação B apresenta o menor valor de custo de energia por 1000 horas de trabalho, tal como seria de esperar face às razões anteriormente referidas.

Capítulo VII

Conclusões

(página propositadamente em branco)

8. Conclusões

A presente dissertação tem como objetivo principal perceber se o simulador “Bruno” é um software fidedigno quando utilizado como ferramenta de apoio/controlo do funcionamento de uma unidade de produção de agregados ou, numa fase de projeto, constituir uma ferramenta de previsão relativamente a uma instalação de britagem a implementar.

Para a determinação da aptidão e adequabilidade do simulador foram utilizados os dados e amostras da Pedreira de Fornelo, com o objetivo de obter, para efeitos de comparação, as curvas granulométricas do simulador “Bruno” e dos ensaios de laboratório. A empresa Elevo forneceu também os dados das curvas granulométricas obtidas na instalação de britagem, logo após a produção dos lotes.

Através dos ensaios de laboratório também foi possível determinar o índice de forma, que apesar de não ser obtido do simulador, ajuda a caracterizar o material, permitindo concluir que a forma das partículas esta associada a sucessivas fragmentações, dependendo assim do tipo de fragmentador, ou seja, o índice de forma melhora da 1ª fragmentação para a última fragmentação, como era de prever, corroborando assim a adequabilidade do simulador.

O simulador “Bruno” permite obter as curvas granulométricas, as toneladas produzidas por 1000h de trabalho e a energia consumida por cada equipamento.

Uma vez obtidas todas as curvas granulométricas foi então possível proceder a uma comparação entre os diferentes lotes, tendo sido possível verificar que existe uma compatibilidade entre as curvas granulométricas obtidas nos ensaios laboratoriais, no “Bruno” e nos dados fornecidos pela empresa Elevo Group.

Através do simulador foi possível obter o número de toneladas produzidas por 1000h trabalho relativamente a cada lote, sendo o lote 0/4 o que apresenta mais toneladas produzidas, e o lote 4/14 o que apresenta menos toneladas produzidas, para o referido período (1000 horas).

Tendo em conta o consumo de energia, constata-se que o tamanho da alimentação e a abertura de saída são os fatores que interferem fortemente no consumo de energia. A modelação original apresenta uma abertura de saída relativamente reduzida em relação ao tamanho da alimentação, tendo maior consumo, uma vez que exige uma significativa relação de redução, ainda que adequada ao tipo de fragmentador (maxilas).

Em relação ao custo final, o simulador Bruno facilita o cálculo dos custos dando um valor final ganho e gasto numa instalação de britagem, antes de esta ser executada, sendo assim possível estimar o benefício a obter nas instalações britagem antes de produção, ou seja, ainda na fase de projeto.

Por fim, conclui-se que os ensaios de laboratório foram realizados corretamente e que o simulador “Bruno” é credível e pode ser utilizado quando necessário. O simulador apresenta ainda a vantagem de evidenciar as frações mais finas e as frações mais grosseiras suscetíveis de serem obtidas.

Trabalhos futuros

É de considerar, em trabalhos futuros, a utilização do simulador “Bruno” tendo em conta que poderá ser necessário realizar mais testes com diferentes equipamentos e aberturas de saída para melhor avaliar a acuracidade do simulador.

Entende-se importante, para dar mais robustez aos resultados obtidos, reproduzir na instalação de britagem as aberturas de saída dos diferentes fragmentadores utilizadas nas simulações, no intuito de comparar os valores à escala industrial com os valores obtidos nas simulações.

Julga-se, igualmente importante, que deverá ser utilizado um maior número de amostras, de cada lote produzido, para assegurar a respetiva representatividade e ainda permitir analisar outras características.

Referências bibliográficas

(página propositadamente em branco)

Referências bibliográficas

- Carvalho, M.X. (2012). Equipamentos de fragmentação: uma revisão avaliando circuitos alternativos para a moagem de finos. Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil. URI: <http://hdl.handle.net/1843/BUOS-9CAJ7H>, (Monografia).
- Guimarães, M.S., Valdes, J.R., Palomino, A.M., Santamarina, J.C. (2006). Aggregate production: Fines generation during rock crushing. *International Journal of Mineral Processing*, 81(4):237-247.
- Londe, T., Finzer, J. (2017). Micronização em moinho com jato de ar em espiral. In: *Actas do Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados*, Maringá - Paraná. 4 p.
- Luz, A.B., Sampaio, J. A., França, S.C. [Editores] (2010). Tratamento de minérios. 5ª edição, Centro de Tecnologia Mineral & Ministério da Ciência e Tecnologia, Rio de Janeiro, Brasil.
- Magalhães, F.N. (2013). Método simplificado da avaliação da britabilidade. Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Brasil (Projeto de Graduação). [<http://repositorio.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10007249.pdf>] (consultado em Novembro de 2021).
- Monteadriano – Engenharia E Construção, SA. (2014). Ampliação da área da pedreira Nº 4138 “Vila Verde Nº 2”. Monteadriano – Engenharia E Construção, SA. 15 p. (Relatório inédito).
- Metso Corporation (2005). Conceitos básicos em processamento de minerais. *Metso Minerals*, 16:32-38.
- Metso minerals (2005). Manual de Britagem. *Metso Minerals* 1:2-23; 2:1-4; 5:35.
- NP EN 933-1 2002 (2002). Ensaio das propriedades geométricas de agregados. Parte 1: Análise granulométrica. Método de peneiramento, pp. 8-12; 14.
- NP EN 933-4 2002 (2002). Ensaio das propriedades geométricas de agregados. Parte 4: Determinação das Formas das partículas- Índice de forma, pp. 7-16.
- Soares, M.G. (2017). Fragmentação de materiais rochosos: análise e influência de parâmetros que interferem no consumo energético e na geometria dos produtos finais. Instituto Superior de Engenharia do Porto, ISEP, Porto. URI: <http://hdl.handle.net/10400.22/10870> (dissertação de mestrado).

Sites de internet

- Nunes, E., Ono, L. (2020). *Simulador BRUNO. Obtido de Agregados:* https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/5689554/mod_resource/content/1/0%20-%20Treinamento%20BRUNO%20AGG%20-%20POLI.pdf
- 911metallurgist. (s.d.). *Metalliferous Mining - Processing. Obtido em 5 de dezembro de 2021, de* http://www.911metallurgist.com/blog/wp-content/uploads/2016/02/Crushing_Handbook.pdf.
- Elevogroup (22 de Setembro de 2021). *Elevogroup. Obtido de* http://www.elevogroup.com/fotos/editor2/apresentacao_institucional_do_grupo_elevo.pdf
- Metso Outotec (2022). *Britadores. Obtido em 21 de março de 2022, de* <https://www.mogroup.com/pt/produtos-e-servicos/plantas-e-equipamentos/britadores/>.
- Geoportal. (1965). https://geoportal.ineg.pt/pt/dados_abertos/cgp50k/09-A. Obtido em 3 de dezembro de 2021.

(página propositadamente em branco)

Anexos (CD-ROM)

Anexo 1- Curvas Granulométricas fornecidas pela Elevo.

Anexo 2- Curvas Granulométricas e Índice de forma no laboratório.

Anexo 3- Curvas granulométricas Simulador "Bruno".

Anexo 4- Comparação das curvas.

(página propositadamente em branco)