



**Instituto Superior de Engenharia do Porto**

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOTÉCNICA



## **Fragmentação de materiais rochosos: análise e influência de parâmetros que interferem no consumo energético e na geometria dos produtos finais**

**Mariana Gomes Soares**



**isep** Instituto Superior de Engenharia do Porto

**P. PORTO**

**2017**





**Instituto Superior de Engenharia do Porto**

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOTÉCNICA

**Fragmentação de materiais rochosos: análise e influência de parâmetros que interferem no consumo energético e na geometria dos produtos finais**

**Mariana Gomes Soares**

**1120575**

*Dissertação apresentada 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 do Departamento de Engenharia Geotécnica do ISEP.*



## **Júri**

### **Presidente**

Doutor Helder Gil Iglésias de Oliveira Chaminé  
*Professor Coordenador com Agregação, Instituto Superior de Engenharia do Porto*

Doutor José Augusto de Abreu Peixoto Fernandes  
*Professor Coordenador, Instituto Superior de Engenharia do Porto*

Doutora Sílvia Vieira Pinto Alves da Costa Spínola  
*Professora Adjunta, Instituto Superior de Engenharia do Porto*

Doutor Fernando Pedro Ortega de Oliveira Figueiredo  
*Professor Auxiliar, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade de Coimbra*

---

*A tese de **mestrado em engenharia geotécnica e geoambiente (MEGG)** foi apresentada e defendida em prova pública, pela Licenciada **Mariana Gomes Soares**, no Auditório de Geotecnia do Departamento de Engenharia Geotécnica (ISEP) em 13 de Novembro de 2017 mediante o júri nomeado, em que foi atribuída, por unanimidade, a classificação final de **18 (dezoito) valores**, cuja fundamentação se encontra em acta. Todas as correções pontuais determinadas pelo júri, e só essas, foram efectuadas.*

---

*“Quando alguém quer alguma coisa, todo o Universo conspira para que possa realizá-la”.*

*In: O Alquimista, Paulo Coelho*



## **Agradecimentos**

São devidos agradecimentos a todas as pessoas, colegas de curso e docentes do Departamento de Geotecnia, que contribuíram de uma forma ou de outra na concretização desta etapa da minha vida. Face à realização da presente dissertação, quero agradecer em particular:

Ao meu orientador, Professor José Augusto Fernandes pela disponibilidade em orientar a minha dissertação, assim como o apoio e importante ajuda prestada durante esta fase da minha vida académica. Quero agradecer-lhe ainda, como Diretor do Laboratório de Geotecnia e Materiais de Construção (LGMC), pelas facilidades outorgadas para que realizasse os ensaios laboratoriais no ISEP.

Ao Professor Helder I. Chaminé e à Doutora Sílvia Spínola pela ajuda disponibilizada no esclarecimento de dúvidas relativas à geologia e aos aspectos geomecânicos dos vários materiais estudados.

À empresa Cimpor Agregados, na pessoa do Engenheiro João Brito e Cunha, Gerente de Área /Agregados, pelas amostras e dados fornecidos sobre as pedreiras de Sangardão e Vale Grande nº2 para a realização deste trabalho.

À empresa Elevo Agregados, na pessoa do Engenheiro Luís Ramos, pelas amostras e dados fornecidos das pedreiras de Fornelo e de Serdedelo para a concretização dos ensaios.

À Engenheira Isilda Costa e ao Senhor Carlos Ferreira por toda a ajuda disponibilizada e prestada durante a minha permanência no Laboratório de Geotecnia e Materiais de Construção (LGMC).

À Dr.ª Liliana Freitas (LABCARGA|ISEP), pelo apoio na realização das figuras relativas à cartografia constantes neste estudo.

Aos meus colegas de curso e amigos, em especial à Sara Duarte e José Silva, que se mostraram sempre disponíveis em ajudar quando foi preciso “outra mãozinha” na realização dos ensaios laboratoriais.

À minha família, especial aos meus Pais e Irmão, por tudo o que me proporcionaram e ajudaram a concretizar quer a nível pessoal como na minha formação até ao momento. A eles, devo o que sou hoje! Destaco ainda a minha prima Anabela, que apesar de não ter conhecimentos na área de estudo, me ajudou a rever os textos da dissertação.

A todos os meus amigos, aos que permaneceram ao longo destes anos a meu lado e aos novos que levo desta passagem pelo ISEP, o meu mais sincero obrigado por todos os momentos passados juntos e por cada palavra que partilharam comigo.

Muito obrigada!



## **Palavras-chave**

Agregados, Consumo energético, Geometria das partículas, Índice de fragmentabilidade.

## **Resumo**

O processo de fragmentação, numa instalação de britagem, consiste em reduzir os materiais rochosos em partículas de menores dimensões, com recurso à utilização dos fragmentadores. Como as rochas não apresentam características petrográficas e mineralógicas iguais, quando sujeitas a forças externas provocadas pelos fragmentadores, não se fragmentam de forma idêntica.

De forma a comprovar estas afirmações, o estudo objeto desta dissertação baseou-se nessa análise. Numa primeira parte foram abordados temas ligados à redução de calibre processada pelos fragmentadores e mecanismos de fragmentação, assim, como parâmetros que influenciam a forma do produto. Com vista à identificação dos parâmetros geométricos, físicos e mecânicos que interferem na fragmentação dos materiais rochosos, concretizaram-se ensaios laboratoriais. Foram analisadas as propriedades de quatro amostras de litologias diferentes: duas de granito (pedreira de Fornelo e Serdedelo) e duas de calcário (pedreira de Sangardão e Vale Grande n°2). Após o tratamento dos dados laboratoriais, realizou-se uma interpretação estatística das variáveis analisadas nos ensaios, com vista a relacioná-las com o índice de fragmentabilidade.

Na produção de rochas industriais, a operação de fragmentação é a que acarreta maior consumo de energia. Por isso, numa última abordagem, elaborou-se uma análise do consumo energético na etapa de fragmentação onde foram recolhidas as amostras em estudo. Para determinar a energia específica desse estágio, recorreu-se à aplicação da fórmula de Bond.

Perante os resultados obtidos, concluiu-se que as propriedades dos materiais rochosos, como textura, dureza dos minerais, grau de alteração, resistência e a sua constituição são parâmetros que interferem na redução das partículas na fragmentação. No processo de fragmentação na instalação de britagem, a geometria do produto depende do fragmentador utilizado. Quanto ao consumo energético, está parcialmente dependente do tipo de fragmentador e da sua abertura de saída, assim como, o tamanho da alimentação.



**Keywords**

Aggregates, Energy consumption, Particles geometry, Crushability index.

**Abstract**

The fragmentation process, in a crushing plant, consists on reducing the size of the rocky materials to small particles, using the so-called crushers. Since rocks do not have identical petrographic and mineral characteristics, when under the influence of external forces caused by the crushers, they will not break in the same way.

In order to prove these claims, the dissertation was focused on this analysis. In the first part of this work the themes are related to the caliber reduction by the crushers and the crushing mechanisms, as well as, the parameters which influence the product's shape. With the object to identify the geometrical, physical, and mechanical parameters of rock materials, laboratory tests were made. The properties of four different samples were analyzed: two samples of granite (Fornelo and Serdedelo quarries) and two limestone samples (Sangardão and Vale Grande nº2 quarries). After data analysis, a statistical interpretation of the variable behavior in the tests was done, aiming to compare them with the crushability index.

In the production of industrial rocks, the crushing operation is responsible for the higher energy consumption. Therefore, in a last effort, the energy consumption in the crushing step was evaluated on the place where the study samples were collected. To calculate the specific energy of this stage, the Bond formula was employed.

With the results obtain previously, it was concluded that the properties of the rock materials, such as, texture, minerals hardness, degree of alteration, resistance and its constitution are parameters that interfere with the reduction of the particles in the fragmentation. In fragmentation process in the crushing plant, the geometry of the product depends of the utilized crusher. As for the energy consumption, it is partially dependent of the type of crusher and the opening of the exit, as well as, the size of the feed.



## Índice

<b>1. Introdução .....</b>	<b>3</b>
1.1. Enquadramento do tema da dissertação.....	3
1.2. Objetivos .....	4
1.3. Estrutura da dissertação .....	4
1.4. Identificação das características em estudo .....	5
<b>2. Estado da arte .....</b>	<b>9</b>
2.1. Considerações iniciais .....	9
2.2. Processo de fragmentação.....	10
2.2.1. Mecanismos de fragmentação .....	10
2.2.2. Etapas de fragmentação.....	12
2.2.3. Relação de redução .....	12
2.3. Britadores.....	13
2.3.1. Britador de maxilas .....	15
2.3.2. Britador giratório.....	16
2.3.3. Britador cónico.....	17
2.3.4. Britador de impacto .....	18
2.4. Forma das partículas.....	18
2.4.1. Influência dos materiais rochosos .....	21
2.4.2. Influência do britador.....	24
2.5. Consumo de energia na fragmentação .....	28
<b>3. Metodologias .....</b>	<b>33</b>
3.1. Análise granulométrica .....	33
3.2. Análise química .....	35
3.3. Análise mineralógica .....	37
3.4. Brittleness test .....	37
3.5. Determinação da forma das partículas .....	37
3.5.1. Índice de achatamento.....	37
3.5.2. Índice de forma .....	38
3.6. Determinação da resistência ao desgaste .....	40
3.7. Determinação da resistência à fragmentação .....	42
<b>4. Casos de estudo .....</b>	<b>47</b>
4.1. Pedreira de Fornelo .....	48
4.1.1. Localização geográfica e acessos à pedreira .....	48
4.1.2. Geologia .....	49
4.2. Pedreira de Serdedelo .....	50
4.2.1. Localização geográfica e acessos à pedreira .....	50

4.2.2.	Geologia .....	51
4.3.	Pedreira de Sangardão .....	52
4.3.1.	Localização geográfica e acessos à pedreira .....	52
4.3.2.	Geologia .....	53
4.4.	Pedreira Vale Grande nº2.....	54
4.4.1.	Localização geográfica e acessos à pedreira .....	54
4.4.2.	Geologia .....	55
<b>5.</b>	<b>Ensaiois laboratoriais .....</b>	<b>59</b>
5.1.	Análise química .....	60
5.2.	Análise mineralógica .....	62
5.3.	Análise granulométrica .....	63
5.4.	Ensaiois de determinação da forma (índice de achatamento e de forma).....	65
5.5.	Ensaio de friabilidade – Brittleness test.....	66
5.6.	Ensaio de micro-Deval .....	67
5.7.	Ensaio de Los Angeles .....	67
5.8.	Síntese dos resultados obtidos .....	68
<b>6.</b>	<b>Análise dos resultados e cálculo do consumo energético .....</b>	<b>71</b>
6.1.	Interpretação estatística .....	71
6.1.1.	Propriedades dos materiais rochosos na determinação do índice de fragmentabilidade ....	72
6.1.1.1.	Características petrográficas e mineralógicas dos materiais rochosos .....	74
6.1.1.2.	Geometria e resistência dos materiais rochosos .....	80
6.1.2.	Propriedades do processo de fragmentação na determinação da geometria do produto ...	82
6.1.2.1.	Porcentagem de finos (f) .....	83
6.1.2.2.	Geometria do produto .....	84
6.1.2.3.	Influência da malha de perfuração na geometria do produto .....	86
6.2.	Consumo energético .....	87
<b>7.</b>	<b>Conclusões .....</b>	<b>91</b>
<b>8.</b>	<b>Referências bibliográficas.....</b>	<b>97</b>
<b>9.</b>	<b>Anexos .....</b>	<b>103</b>
	Anexo I – Relatórios dos ensaios laboratoriais. ....	105
	Anexo II – Base de dados dos ensaios. ....	105
	Anexo III – Concentração dos óxidos.....	105
	Anexo IV – Dados de apoio à análise mineralógica. ....	105
	Anexo V – Base de dados das correlações e fórmula de Bond .....	105
	Anexo VI – Catálogos dos fragmentadores. ....	105
	Anexo VII – Curvas granulométricas dos fragmentadores. ....	105

## Índice de Figuras

Figura 1 – Esquema dos pontos-chave da dissertação. ....	6
Figura 2 – Níveis do sistema de processamento de agregados numa pedreira (adaptado de Metso Corporation, 2015). ....	9
Figura 3 – Forças de tensão mecânica das rochas (adaptado de Metso Corporation, 2015). ....	10
Figura 4 – Distribuição das partículas de acordo com o mecanismo de fragmentação [adaptado de: a) Carvalho, 2012; b) <a href="https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/3779571243358/CMIT_AulaT6.pdf">https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/3779571243358/CMIT_AulaT6.pdf</a> ]. ....	11
Figura 5 – Etapas de fragmentação (adaptado de Fernandes, 2013; Luz et al., 2010; Santos, 2016). ....	12
Figura 6 – Características a ter em conta na escolha dos fragmentadores (adaptado de Teotónio, 2010). ....	13
Figura 7 – Representação esquemática do britador de maxilas (adaptado de Ribeiro, 2011). ....	15
Figura 8 – Representação esquemática do britador giratório. ....	16
Figura 9 – Representação esquemática do britador cónico. ....	17
Figura 10 – Tipos de abertura da posição aberta do britador cónico. ....	18
Figura 11 – Correlação entre o índice de achatamento e o coeficiente de Los Angeles (adaptado de Metso Minerals, 2008). ....	23
Figura 12 – Comparação entre as percentagens dos óxidos com a percentagem do desgaste no ensaio de Los Angeles (adaptado de Guimaraes et al., 2007). ....	23
Figura 13 – Formas das partículas provenientes do britador de impacto de eixo vertical e do britador cónico (Zanella, 2013). ....	25
Figura 14 – Comparação entre o tamanho médio da alimentação e o índice de achatamento do produto (adaptado de Bengtsson & Evertsson, 2006). ....	26
Figura 15 – Relação entre o índice de achatamento e o tamanho final das partículas com a variação da abertura na posição fechada e o tamanho da alimentação (adaptado de Bengtsson & Evertsson, 2006). ....	26
Figura 16 – Relação entre o índice de forma e o tamanho final das partículas com a variação da abertura na posição fechada e o tamanho da alimentação (adaptado de Bengtsson et al., 2015). ....	27
Figura 17 – Dados relativos ao consumo energético nas etapas de fragmentação (adaptado de Fernandes, 2013). ....	29
Figura 18 – Peneiros de ensaio – ASTM. ....	34
Figura 19 – Exemplo de curva granulométrica obtida no ensaio de análise granulométrica (adaptado de <a href="https://repositorio.ipcb.pt/bitstream/10400.11/2900/1/2013_ICEUBI2013_%20MATERIAIS%20DAS%20ESC OMBREIRAS%20DAS%20PEDREIRAS%20DO%20POIO%20EM.pdf">https://repositorio.ipcb.pt/bitstream/10400.11/2900/1/2013_ICEUBI2013_%20MATERIAIS%20DAS%20ESC OMBREIRAS%20DAS%20PEDREIRAS%20DO%20POIO%20EM.pdf</a> ). ....	35
Figura 20 – Equipamento portátil Thermal Scientific modelo Niton XL3t 900. ....	35
Figura 21 – Esquema do funcionamento do equipamento de análise química (Spínola, 2015). ....	36
Figura 22 – Sequência da preparação do copo de amostra. ....	37
Figura 23 – Peneiros de barras. ....	38
Figura 24 – Paquímetro digital. ....	39
Figura 25 – Sequência da colocação do material no cilindro do micro-Deval. ....	41

Figura 26 – Equipamento micro-Deval e carga abrasiva. ....	42
Figura 27 – Equipamento de Los Angeles e carga abrasiva. ....	43
Figura 28 – Mapa de Portugal Continental com as respetivas localizações das amostras em estudo (Fonte do mapa de Portugal: <a href="http://resistir.info/portugal/fusao_destrutiva.html">http://resistir.info/portugal/fusao_destrutiva.html</a> ; figuras das áreas de exploração: google earth, 2017). ....	47
Figura 29 – Extrato da carta militar, folha 97 (Trofa), escala 1/25 000 (IGeoE, 2011). ....	48
Figura 30 – Extrato da carta geológica, folha 9 – A (Póvoa de Varzim), escala 1/50 000 (adaptado de Teixeira & Cândido de Medeiros, 1965). ....	49
Figura 31 – Extrato da carta militar, folha 28 (Ponte de Lima), escala 1/25 000 (IGeoE, 2015). ....	50
Figura 32 – Extrato da carta geológica, folha 5 – A (Viana do Castelo), escala 1/50 000 (adaptado de Cândido de Medeiros & Teixeira, 1970). ....	51
Figura 33 – Extrato da carta militar, folha 250 (Soure) e 251 (Condeixa-a-Nova), escala 1/25 000 (IGeoE, 2001 e IGeoE, 2002). ....	52
Figura 34 – Extrato da carta geológica, folha 19 – C (Figueira da Foz), escala 1/50 000 (adaptado de Manuppella et al., 1976). ....	53
Figura 35 – Extrato da carta militar, folha 376 (Alenquer), escala 1/25 000 (IGeoE, 1992). ....	54
Figura 36 – Extrato da carta geológica, folha 30 – D (Alenquer), escala 1/50 000 (adaptado de França et al., 1962). ....	55
Figura 37 – Esquartelamento na amostra integral da pedreira de Serdedelo. ....	59
Figura 38 – Copos das amostras ensaiadas na análise química (F – Fornelo; SE – Serdedelo; SA – Sangardão; VG – Vale Grande nº2). ....	61
Figura 39 – Gráficos de dispersão relativo ao índice de fragmentabilidade e as percentagens dos óxidos nas amostras analisadas (F – Fornelo, SE – Serdedelo, SA – Sangardão e VG – Vale Grande nº2). ....	75
Figura 40 – Gráficos de dispersão relativo ao índice de fragmentabilidade e minerais presentes nas amostras analisadas (F – Fornelo, SE – Serdedelo, SA – Sangardão e VG – Vale Grande nº2). ....	76
Figura 41 – Gráficos de correlação do índice de fragmentabilidade com os índices de forma obtidos nos ensaios laboratoriais. ....	80
Figura 42 – Gráficos de correlação do índice de fragmentabilidade com os coeficientes obtidos nos ensaios laboratoriais. ....	80
Figura 43 – Relação das percentagens de finos com o tamanho da alimentação (gráfico da esquerda) e a abertura de saída dos fragmentadores secundários (gráfico da direita). ....	84
Figura 44 – Relação do índice de achatamento (FI) com o tamanho da alimentação (gráfico da esquerda) e a abertura de saída dos fragmentadores secundários (gráfico da direita). ....	85
Figura 45 – Relação do índice de forma (SI) com o tamanho da alimentação (gráfico da esquerda) e a abertura de saída dos fragmentadores secundários (gráfico da direita). ....	85
Figura 46 – Relação entre os índices de achatamento (FI) e de forma (SI) face ao tamanho da alimentação e abertura de saída dos fragmentadores secundários nas amostras ensaiadas. ....	86

Figura 47 – Frações granulométricas da amostra de Vale Grande n°2 em diferentes etapas de fragmentação. .... 86

Figura 48 – Relação entre as malhas de perfuração do desmonte e os índices de achatamento e de forma. 87



## Índice de Tabelas

Tabela 1 – Relações de redução dos equipamentos de fragmentação (adaptado de Carvalho, 2012; Fernandes, 2013).....	13
Tabela 2 – Comparação dos britadores de maxilas, giratório, de cone e de impacto (adaptado de Guimaraes et al., 2007; Metso Minerals, 2008; Luz et al., 2010; Carvalho, 2012; Eironova, 2012). ....	14
Tabela 3 – Relação entre os parâmetros dos britadores, dos materiais, da alimentação e do produto (Evertsson & Bearman, 1997).....	20
Tabela 4 – Dados referentes ao estudo desenvolvido por Olaleye sobre a resistência à compressão, carga pontual e tempo de fragmentação (Olaleye, 2010). ....	21
Tabela 5 – Propriedades dos agregados e respetivos ensaios. ....	33
Tabela 6 – Dados obtidos na análise química por fluorescência de Raios X. ....	61
Tabela 7 – Análise mineralógica das amostras em estudo (adaptado de INETI/LNEG, 2017; Ramos, 2008). .	62
Tabela 8 – Dados da análise granulométrica da amostra ensaiada de Fornelo. ....	63
Tabela 9 – Dados da análise granulométrica da amostra ensaiada de Serdedelo. ....	63
Tabela 10 – Dados da análise granulométrica da amostra ensaiada de Sangardão. ....	64
Tabela 11 – Dados da análise granulométrica da amostra ensaiada de Vale Grande n°2. ....	64
Tabela 12 – Pontos analisados nas curvas granulométricas em estudo. ....	64
Tabela 13 – Dados dos índices de achatamento e de forma das amostras ensaiadas.....	65
Tabela 14 – Gráficos dos índices de forma por fração nas amostras ensaiadas. ....	65
Tabela 15 – Gráficos dos índices de achatamento por fração nas amostras ensaiadas.....	66
Tabela 16 – Dados do ensaio de friabilidade (Brittleness test). ....	66
Tabela 17 – Dados dos coeficientes de micro-Deval das amostras ensaiadas. ....	67
Tabela 18 – Dados dos coeficientes de Los Angeles nas amostras ensaiadas.....	68
Tabela 19 – Tabela síntese dos ensaios laboratoriais.....	68
Tabela 20 – Descrição das amostras em estudo. ....	72
Tabela 21 – Matriz de correlação das variáveis em análise. ....	73
Tabela 22 – Composição química de um granito de referência e das amostras de granito em estudo.....	77
Tabela 23 – Composição química de calcários de referência e das amostras de calcário em estudo. ....	77
Tabela 24 – Síntese da influência dos óxidos e dos minerais nos índices de fragmentabilidade.....	79
Tabela 25 – Dados fornecidos pelas empresas Elevo Agregados e Agrepor Cimpor sobre o processo de fragmentação. ....	83
Tabela 26 – Dados para análise da relação do processo de fragmentação e geometria do produto. ....	83
Tabela 27 – Valores utilizados na fórmula de Bond face às amostras em estudo. ....	88



## Índice de Equações

Equação 1 – Índice de achatamento do produto (Bengtsson & Evertsson, 2006). .....	27
Equação 2 – Fórmula de Bond para o cálculo da energia específica na fragmentação (Coutinho, 2015). ....	28
Equação 3 – Fórmula de Hukki para determinar a energia específica na fragmentação (Itävuori et al., 2013).	29
Equação 4 – Percentagem de material retido no peneiro (NP EN 933 – 1: 2000). .....	34
Equação 5 – Percentagem de finos (f) que passam no peneiro de 63 µm (NP EN 933 – 1: 2000). .....	34
Equação 6 – Índice de achatamento – FI (NP EN 933 – 3: 2011). .....	38
Equação 7 – Índice de forma (SI) para provetes em que $D \leq 2d$ (NP EN 933 – 4: 2002). .....	39
Equação 8 – Índice de forma (SI) para provetes em que $D > 2d$ (NP EN 933 – 4: 2002). .....	39
Equação 9 – Coeficiente micro-Deval – $M_{DE}$ (NP EN 1097 – 1: 2012). .....	41
Equação 10 – Coeficiente de Los Angeles – LA (NP EN 1097 – 2: 2011). .....	43

## Índice de Anexos

Anexo I – Relatórios dos ensaios laboratoriais. ....	105
Anexo II – Base de dados dos ensaios. ....	105
Anexo III – Concentração dos óxidos. ....	105
Anexo IV – Dados de apoio à análise mineralógica. ....	105
Anexo V – Base de dados das correlações e fórmula de Bond. ....	105
Anexo VI – Catálogos dos fragmentadores. ....	105
Anexo VII – Curvas granulométricas dos fragmentadores. ....	105



## Lista de siglas/acrónimos

<b>AGE</b>	<i>Agregado Granulometria Extensa</i>
<b>APF</b>	<i>Abertura na posição fechada</i>
<b>APA</b>	<i>Abertura na posição aberta</i>
<b>ASTM</b>	<i>American Society for Testing and Materials</i>
<b>CCDRn</b>	<i>Comissão de Coordenação e Desenvolvimento Regional do Norte</i>
<b>EN</b>	<i>Norma Europeia</i>
<b>INETI</b>	<i>Instituto Nacional de Engenharia Tecnologia e Inovação, I.P.</i>
<b>ISEP</b>	<i>Instituto Superior de Engenharia do Porto</i>
<b>LGMC</b>	<i>Laboratório de Geotecnia e Materiais de Construção</i>
<b>LNEG</b>	<i>Laboratório Nacional de Energia e Geologia</i>
<b>NP</b>	<i>Norma Portuguesa</i>

## Lista da Simbologia

<b><math>d_i</math></b>	<i>Menor dimensão da fração granulométrica</i>
<b><math>D_i</math></b>	<i>Maior dimensão da fração granulométrica</i>
<b><math>f</math></b>	<i>Percentagem de finos</i>
<b>FI</b>	<i>Flakiness Index – Índice de achatamento</i>
<b><math>I_f</math></b>	<i>Índice de fragmentabilidade</i>
<b>LA</b>	<i>Coeficiente de Los Angeles</i>
<b><math>M_{DE}</math></b>	<i>Coeficiente micro-Deval</i>
<b>SI</b>	<i>Shape Index – Índice de forma</i>
<b><math>W_i</math></b>	<i>Work Index</i>



## ***1. Introdução***



# 1. Introdução

---

No âmbito da unidade curricular de Dissertação/Estágio/Projeto do segundo ano do curso de Mestrado de Engenharia Geotécnica e Geoambiente, do Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP), foi elaborada a presente dissertação para conclusão do mestrado e obtenção do Grau de Mestre, que tem o seguinte título: *“Fragmentação de materiais rochosos: análise e influência de parâmetros que interferem no consumo energético e na geometria dos produtos finais”*.

O presente estudo consiste em analisar quatro amostras, de duas litologias diferentes, granitos e calcários, recolhidas de quatro locais distintos, sendo os granitos da região norte de Portugal e os calcários do centro e sul do país.

O objetivo é comparar as amostras e perceber quais os fatores que estão relacionados com a respetiva fragmentação, através de dados disponibilizados pelas empresas responsáveis das pedreiras e pelos resultados alcançados no trabalho prático da dissertação.

## 1.1. Enquadramento do tema da dissertação

A indústria extrativa é composta por cinco etapas cruciais para a extração e transformação dos materiais rochosos, operações que dependem de um bom funcionamento em cadeia. A última operação dessa cadeia é a britagem, processo ligado à redução das partículas e transformação do produto com os requisitos essenciais para que possa ser comercializado, observando as exigências da Marcação CE, como é o caso da construção ferroviária, no pavimento rodoviário, na proteção costeira e contenções, na preparação de bases e camadas drenantes, assim como no fabrico do betão, entre outros. Todavia, nem sempre é fácil garantir essas especificidades devido às composições dos materiais rochosos e ao processo de fragmentação.

De um modo geral, estes fatores estão diretamente relacionados com o tamanho das partículas, fator predominante no estudo desta dissertação. Para entender como se correlacionam estes dois fatores, um elo de ligação é a realização de estudos laboratoriais, baseados na análise e comparação das propriedades geométricas, físicas e mecânicas das amostras. Os ensaios que analisam as propriedades geométricas têm por objetivo caracterizar os agregados provenientes do processo de fragmentação, quanto à sua distribuição granulométrica e forma. Já os ensaios que permitem

averiguar as propriedades físicas e mecânicas, caracterizam-se por estudar os comportamentos dos agregados face a fatores externos a eles, como é o caso do ensaio de micro-Deval que pretende analisar a resistência ao desgaste quando as partículas são sujeitas a uma carga abrasiva.

Porém, devido à exigência e necessidade de cumprir com os requisitos necessários, as instalações de britagem têm maior rigor na transformação do material, de forma a garantir uma declaração de desempenho eficiente. Só que esse rigor, muitas vezes, requer elevados consumos de energia e uma produção excessiva de finos, trazendo impactos a nível financeiro, por causa do custo, e ambiental, devido às elevadas emissões de CO<sub>2</sub> por parte dos equipamentos envolvidos no processo.

## **1.2. Objetivos**

Esta dissertação tem como principal objetivo, determinar quais os parâmetros que interferem na fragmentação dos materiais rochosos, através da análise da variação das características dos agregados durante o processo de fragmentação nas instalações de britagem e na realização dos ensaios laboratoriais. Por sua vez, também se pretende determinar os parâmetros que influenciam o consumo energético nas etapas de fragmentação das amostras em estudo.

## **1.3. Estrutura da dissertação**

Em termos de estrutura, a dissertação está organizada em três etapas de trabalho. A primeira etapa (capítulos 1 ao 4), de contextualização teórica onde são apresentados os conceitos e metodologias que serão abordados ao longo da tese. A segunda etapa (capítulos 5 e 6) é composta pelos trabalhos práticos realizados, a qual finaliza com a discussão dos resultados. A última etapa (capítulo 7) é assinalada pelas conclusões obtidas através dos trabalhos realizados.

### **Síntese dos capítulos:**

*Capítulo 1 – Introdução:* caracteriza-se por ser o capítulo introdutório da dissertação, onde é exposto o tema central, o enquadramento do estudo e os principais objetivos a alcançar com o desenvolvimento do plano de trabalhos.

*Capítulo 2 – Estado da arte:* neste capítulo é apresentada toda a pesquisa bibliográfica sobre o tema da dissertação, a qual se apresenta dividida em quatro partes, nomeadamente o processo de fragmentação, as principais características dos britadores, o desenvolvimento do trabalho em

estudo, apresentando os parâmetros dos materiais rochosos e dos britadores que influenciam a distribuição granulométrica, a orientação da fratura nos materiais rochosos, a forma, qualidade e resistência do produto, e por fim, o consumo de energia no processo de fragmentação.

Capítulo 3 – Metodologias: apresenta os ensaios laboratoriais que vão ser executados nas amostras em estudo.

Capítulo 4 – Casos de estudo: neste capítulo são caracterizadas as zonas envolventes das quatro pedreiras a nível da localização e geologia.

Capítulo 5 – Ensaios laboratoriais: este capítulo é composto pelos resultados dos ensaios laboratoriais.

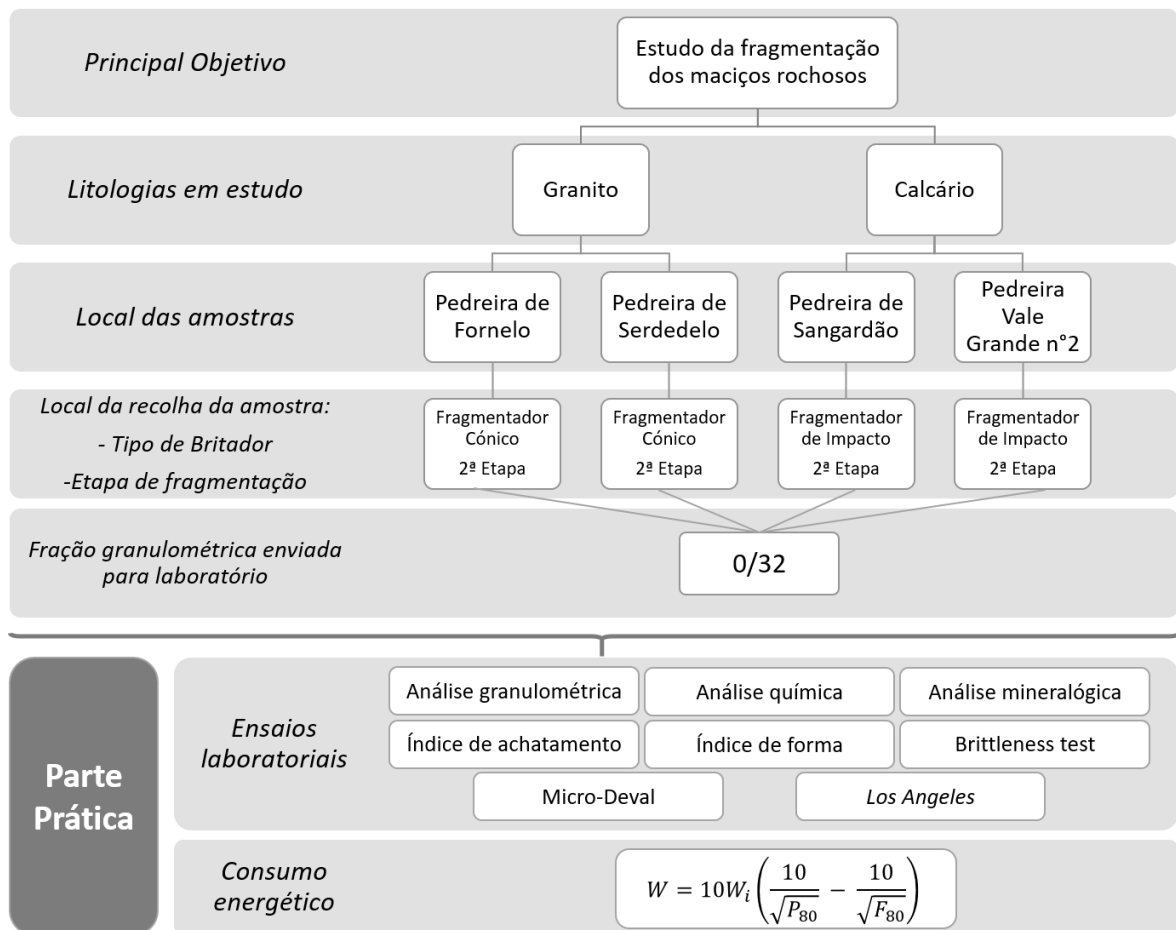
Capítulo 6 – Análise dos resultados e cálculo do consumo energético: está dividida em duas fases. Na primeira fase, são correlacionados os dados apresentados no capítulo 5, de forma a determinar os parâmetros que interferem na fragmentação dos materiais rochosos. Numa segunda fase, através da fórmula de Bond, é realizado o estudo do consumo energético das amostras em estudo.

Capítulo 7 – Conclusões: tende a responder aos objetivos mencionados no capítulo 1 e apresentar as conclusões retiradas no desenvolvimento do trabalho prático. Este capítulo, tem como subtópico as “Perspetivas Futuras”, onde são expostas as sugestões a serem adotadas em futuros trabalhos com tema idêntico ao da dissertação.

Capítulo 8 – Referências bibliográficas: o capítulo apresenta a bibliografia consultada na elaboração da dissertação.

#### **1.4. Identificação das características em estudo**

A planificação dos trabalhos realizados, tendo em vista a satisfação dos objetivos propostos, está apresentada na Figura 1, a qual sintetiza e realça os pontos-chave deste estudo.



**Figura 1** – Esquema dos pontos-chave da dissertação.

A dissertação contempla o estudo de duas litologias (granito e calcário) através da análise de quatro amostras com granulometria 0/32. Quanto à parte prática, relativamente a cada amostra serão apresentados resultados de oito ensaios laboratoriais e será calculado, pela fórmula indicada na Figura 1, o consumo de energia por parte do fragmentador durante o processo de fragmentação na segunda etapa.

## ***2. Estado da arte***



## 2. Estado da arte

### 2.1. Considerações iniciais

A indústria extrativa, que engloba as pedreiras e minas, é composta por cinco principais operações de extração e transformação de rocha: perfuração, carregamento-detonação, fragmentação secundária, carga-transporte e britagem, que “*funcionam em cadeia, de uma forma sequencial, sendo que a qualidade/rentabilidade com que uma operação é realizada depende da anterior e influencia a seguinte*” (Galiza *et al.*, 2011). Das operações enunciadas, destaca-se a britagem como tema base da dissertação em estudo. A rentabilidade do processo de britagem depende da qualidade de execução das operações de perfuração e desmonte, procedimentos que devem ser executados de forma a que o material resultante do desmonte esteja em conformidade com as dimensões dos equipamentos de carga, transporte e britador primário (Galiza *et al.*, 2011).

Uma instalação de britagem é composta por diferentes operações, o que obriga a um conjunto diverso de equipamentos, desde britadores, crivos e correias de transporte (Figura 2), entre outros. Para garantir o máximo rendimento da instalação, as operações de fragmentação, classificação e transporte devem seguir uma sequência ordenada e sempre que possível, apresentar um menor número de equipamentos (Fernandes, 2013).

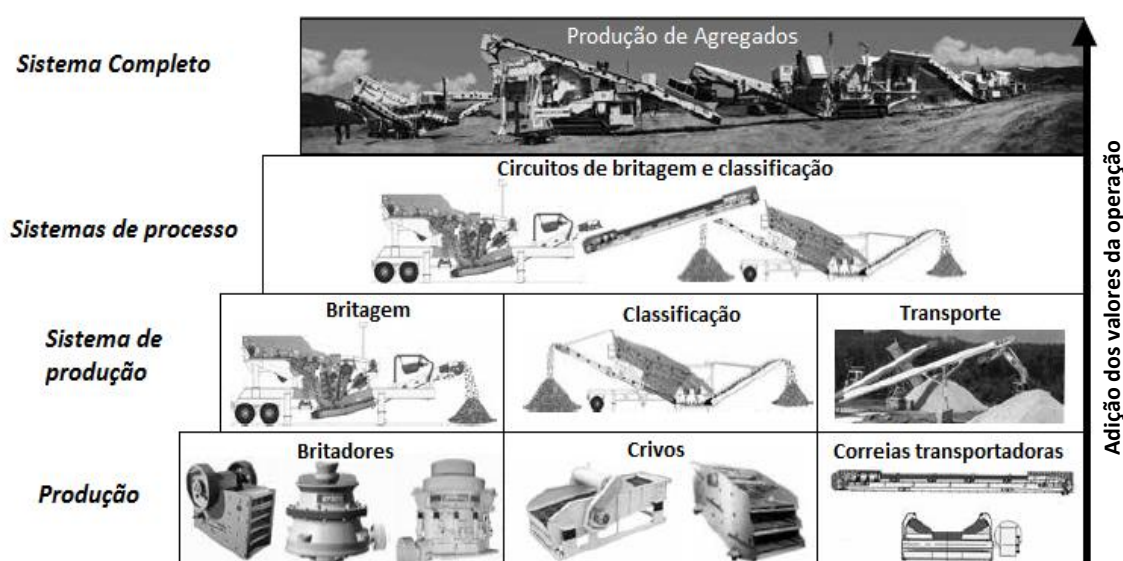


Figura 2 – Níveis do sistema de processamento de agregados numa pedreira (adaptado de Metso Corporation, 2015).

## 2.2. Processo de fragmentação

A operação de fragmentação numa instalação de britagem tem o propósito de reduzir os blocos provenientes do desmonte, com recurso à utilização de britadores, também designados por fragmentadores, em partículas de menores dimensões (Teotónio, 2010; Silva, 2014). A desagregação do material rochoso acontece, segundo Silva (2014), “quando é aplicada uma força que ultrapasse a tensão de rotura” das partículas. Para garantir um maior controlo na redução do tamanho dos fragmentos e que o produto tenha a distribuição granulométrica pretendida, o processo de fragmentação deve ser composto por várias etapas de fragmentação.

### 2.2.1. Mecanismos de fragmentação

Segundo Silva (2014), “quando se inicia o processo de fragmentação é aplicada uma força externa que obriga a reorganização das tensões internas, estas tensões não se distribuem uniformemente, mas sim concentrando-se nas zonas sadias em volta das zonas que apresentam fragilidades, ocorrendo assim a fracturação numa primeira fase nos pontos de fraqueza, ou seja, fissuras de formação”.

Deste modo, na segmentação das partículas é essencial ter conhecimento das forças de tensão mecânica das rochas (Figura 3), que resultam da combinação com a densidade e dureza dos materiais rochosos e influenciam o dimensionamento e o desgaste dos equipamentos durante o processo de fragmentação (Metso Corporation, 2015). No caso dos britadores, o mecanismo de fracturação das partículas pode ser executado por três métodos diferentes: abrasão/forças de cisalhamento, compressão/clivagem e impacto/corte.

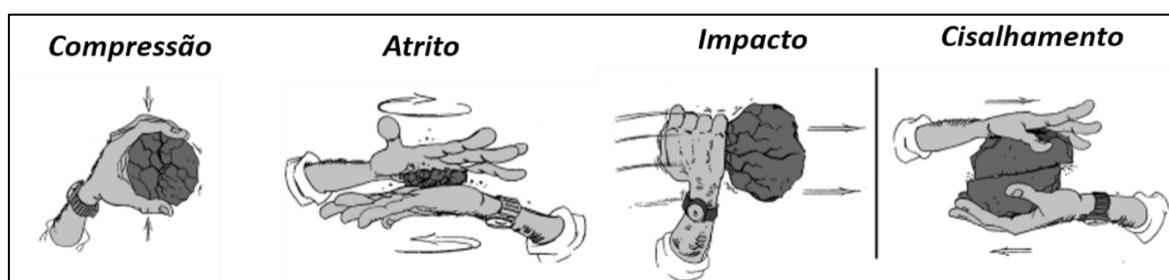


Figura 3 – Forças de tensão mecânica das rochas (adaptado de Metso Corporation, 2015).

### Método de fragmentação por abrasão

Este método provoca esforços de cisalhamento na superfície da partícula e como não tem energia suficiente para quebrar os fragmentos, origina uma fragmentação apenas superficial, desgastando as partes mais fracas dos materiais rochosos (Magalhães, 2013; Omwenga *et al.*, 2014; Metallurgist,

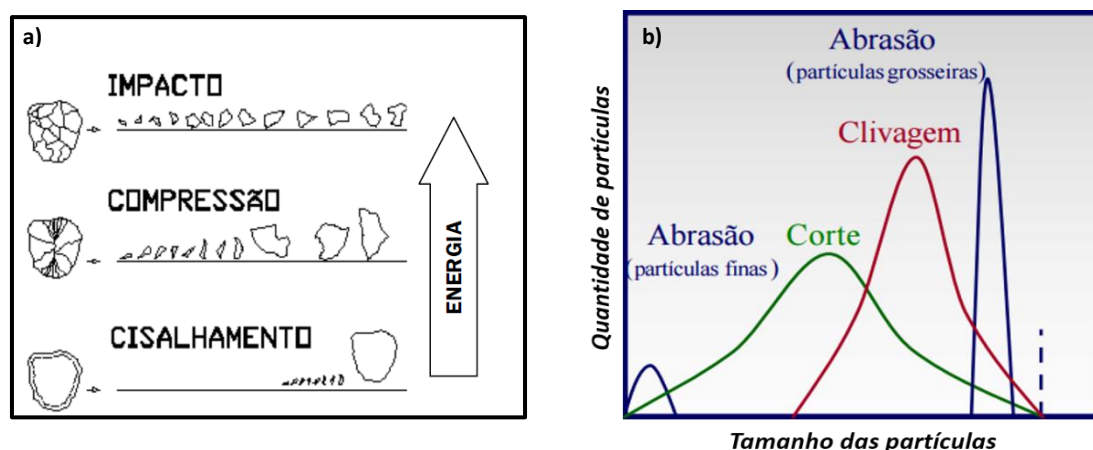
2016). O produto final é composto por uma quantidade reduzida de partículas finas e uma quantidade elevada de partículas grosseiras (Figura 4b).

### Método de fragmentação por compressão

No método de compressão ou clivagem, a energia aplicada é suficiente para provocar fraturas nas partículas (Figura 4a). Contudo, em alguns casos, só tem energia para dividir a partícula em dois fragmentos de tamanhos aproximadamente iguais (Omwenga *et al.*, 2014; Metallurgist, 2016). Como se visualiza na Figura 4, o método de compressão origina partículas de pequenos tamanhos e partículas com tamanho relativamente próximo do tamanho original (Metallurgist, 2016). Ao ser um método apropriado para fragmentar partículas de tamanho elevado, é comum ser utilizado em britadores primários e secundários, como é o caso, do britador de maxilas, do giratório e do cónico (Omwenga *et al.*, 2014; Metallurgist, 2016).

### Método de fragmentação por impacto

De acordo com a Figura 4a, a energia aplicada no método de fragmentação por impacto ou corte é elevada em comparação aos métodos mencionados até ao momento. Neste mecanismo, a partícula que entra na câmara do britador é sobrecarregada de esforços compressivos, o que dá origem a uma elevada distribuição granulométrica com a presença desde materiais finos até partículas mais grosseiras (Magalhães, 2013), como se pode ver na Figura 4b. Os britadores que aplicam este mecanismo são os britadores de impacto (Omwenga *et al.*, 2014).



**Figura 4** – Distribuição das partículas de acordo com o mecanismo de fragmentação [adaptado de: a) Carvalho, 2012; b) [https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/3779571243358/CMIT\\_AulaT6.pdf](https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/3779571243358/CMIT_AulaT6.pdf)].

### 2.2.2. Etapas de fragmentação

O processo de desmonte pode ser considerado a primeira etapa de fragmentação, ao produzir blocos através do arranque de rocha com recurso a explosivos. Posteriormente, esses blocos são encaminhados para a alimentação do fragmentador primário (Santos, 2016).

Na instalação de britagem, é comum utilizar-se várias fases de fragmentação para evitar que o processo de redução seja executado numa só etapa. Com apenas uma etapa de segmentação, os *“tempos de residência das partículas nos equipamentos seriam de tal modo superiores que não seriam fragmentados além do necessário como o desgaste do próprio equipamento seria francamente mais elevado”* (Sousa, 2014). Para evitar esse inconveniente, as etapas de fragmentação costumam ser divididas em primária, secundária e terciária (Carvalho, 2012). Na Figura 5 estão identificadas essas etapas segundo *Hukki*.

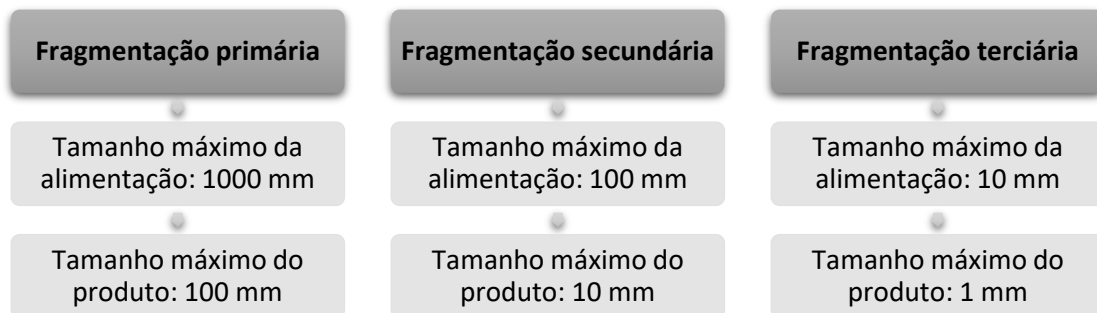


Figura 5 – Etapas de fragmentação (adaptado de Fernandes, 2013; Luz *et al.*, 2010; Santos, 2016).

Todavia, os valores indicados na Figura 5 variam de autor para autor. É difícil avaliar esses intervalos devido à relação de redução do fragmentador escolhido, que depende do tamanho máximo das partículas na alimentação. Por exemplo, a Sandvik Tamrock Corporation (1999) considera que o tamanho típico da alimentação do britador primário é de 200 a 500 mm, do secundário de 100 a 400 mm e do terciário de 10 a 100 mm.

### 2.2.3. Relação de redução

Para selecionar o britador e a relação de redução adequada à etapa de fragmentação é preciso ter em consideração a dimensão das partículas na alimentação e no tamanho do produto pretendido. O parâmetro relação de redução é a conexão entre a composição granulométrica da alimentação e a do produto final (Fernandes, 2013). Como não é possível fazer um quociente entre as duas distribuições granulométricas, a razão é realizada com recurso a peneiros que retêm 85, 90 ou 95 % do material de cada lote (Carvalho, 2012; Fernandes, 2013).

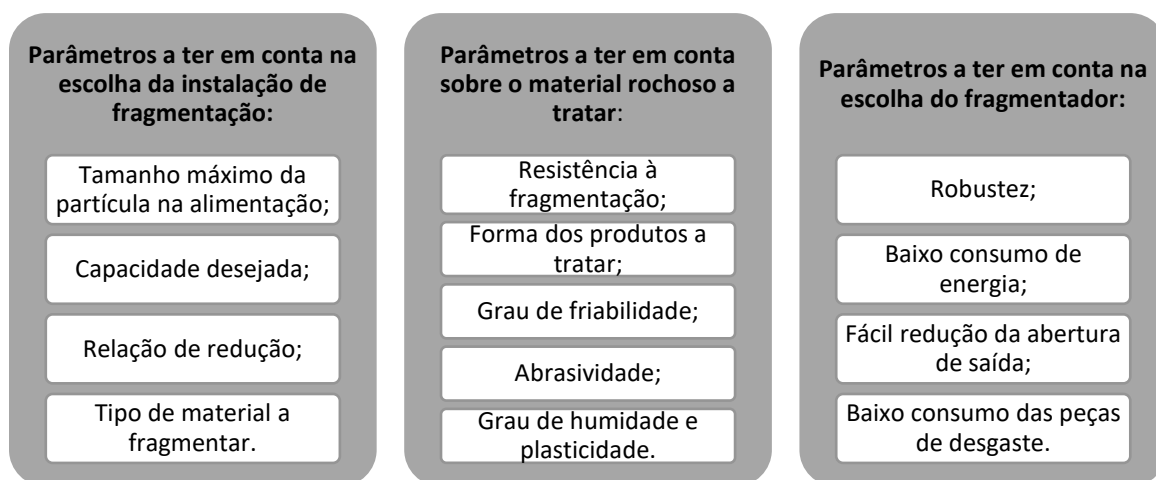
A relação de redução dos britadores é escolhida em conformidade com os equipamentos e com a distribuição do tamanho das partículas. Na Tabela 1 estão identificadas as relações de redução mais utilizadas nos fragmentadores indicados.

**Tabela 1** – Relações de redução dos equipamentos de fragmentação (adaptado de Carvalho, 2012; Fernandes, 2013).

<b>Equipamentos de fragmentação</b>	<b>Relação de redução</b>
<i>Britador de maxilas</i>	4:1 a 6:1
<i>Britador giratório</i>	6:1 a 8:1
<i>Britador cónico</i>	3:1 a 7:1
<i>Britador de impacto</i>	6:1 a 40:1
<i>Britador de disco</i>	4:1 a 10:1
<i>Britador de cilindro lisos</i>	2:1 a 4:1
<i>Britador de rolo dentado</i>	4:1 a 5:1

### 2.3. Britadores

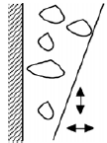
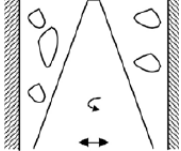
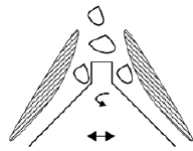
Para minimizar os custos que o processo de fragmentação tem a nível de investimento, operação e manutenção, é essencial que a escolha do britador seja efetuada tendo em vista as condições de trabalho, o tamanho da alimentação, a capacidade pretendida e as características físicas do material rochoso (Teotónio, 2010; Carvalho, 2012; Metso Corporation, 2015). Na Figura 6 estão indicadas algumas particularidades a ter em consideração no dimensionamento e escolha dos fragmentadores.



**Figura 6** – Características a ter em conta na escolha dos fragmentadores (adaptado de Teotónio, 2010).

A Tabela 2 contém informações dos britadores de maxilas, giratório, cónico e de impacto, relevantes para o caso em estudo.

**Tabela 2** – Comparação dos britadores de maxilas, giratório, de cone e de impacto (adaptado de Guimaraes *et al.*, 2007; Metso Minerals, 2008; Luz *et al.*, 2010; Carvalho, 2012; Eironova, 2012).

	<b>Britador de Maxilas</b>	<b>Britador Giratório</b>	<b>Britador Cónico</b>	<b>Britador de Impacto</b>
<b>Etapas de fragmentação</b>	Primária	Primária e secundária	Secundária e terciária	Primária, secundária e terciária
<b>Relação de redução</b>	4:1 a 6:1	6:1 a 8:1	3:1 a 7:1	6:1 a 40:1
<b>Capacidade de produção (ton/h)</b>	Baixa a média (em média, entre 700 a 800, mas tem capacidade até as 1 300)	Média a alta (em média, entre 700 a 7 600, mas tem capacidade até as 10 000)	Baixa a média (até 2 400)	Baixa a média (até 2 400)
<b>Energia consumida por tonelada</b>	Baixo consumo	Alto consumo	Consumo médio	Alto consumo
<b>Tamanho máximo da alimentação (mm)</b>	Até 1 500	Até 1 600	Até 500	Até 1 500
<b>Granulometria do produto final</b>	Há produção de pouco finos. Contudo, há tendência de produzir agregados lamelares.	Ao contrário do de maxilas, este britador produz agregados de menores dimensões e com um formato mais cúbico. Apresenta uma distribuição granulométrica uniforme, com presença de poucos finos.	Este britador apresenta um maior controlo face ao tamanho do produto, garantindo que haja uma distribuição granulométrica uniforme e que os agregados tendam a ter um formato mais cúbico.	Neste caso, há uma produção excessiva de finos, mas os agregados apresentam um formato cúbico.
<b>Características dos materiais rochosos a utilizar na alimentação</b>	Indicado para maciços duros e abrasivos, que na sua génese não apresente minerais coesivos.	Britador pouco indicado para maciços que apresentem minerais coesivos. Aplicar em maciços abrasivos.	Apropriado para maciços duros e abrasivos. Pouco indicado a utilizar sobre minerais coesivos.	Evitar o contacto com rochas frágeis ou elásticas. Indicado para maciços abrasivos.
<b>Movimentos dos britadores na fragmentação</b>				---

Segundo Weidmann (2008), os britadores podem ser classificados em dois grupos:

- Britadores de compressão: como o britador de maxilas, giratório e cônico, em que o material é comprimido no interior da câmara até ser quebrado.
- Britadores de impacto: neste grupo, estão os britadores de impacto de eixo horizontal e de eixo vertical. Nestes britadores, o material sofre impacto contra uma peça de metal ou contra a própria rocha.

Outro parâmetro que distingue os dois tipos de britadores é o consumo de energia. Os britadores de impacto registam uma taxa superior de energia face aos de compressão por exercerem maior força e velocidade para fragmentar as partículas (Donovan, 2003).

### 2.3.1. Britador de maxilas

O britador de maxilas é utilizado, maioritariamente, na fragmentação primária por ter capacidade de receber blocos de grandes dimensões (Luz *et al.*, 2010). A câmara do britador de maxilas exhibe um formato em V e é composta por duas maxilas metálicas, uma é fixa e outra é móvel (Figura 7). A maxila móvel está ligada a uma peça rotativa que lhe permite realizar o movimento de aproximação e afastamento da maxila fixa (Carvalho, 2012; Omwenga *et al.*, 2014). Para que o tamanho do produto seja o pretendido é fundamental que a abertura de saída do equipamento esteja regulada e ajustada ao caso em estudo, principalmente, a abertura na posição fechada (APF) (Ribeiro, 2011).

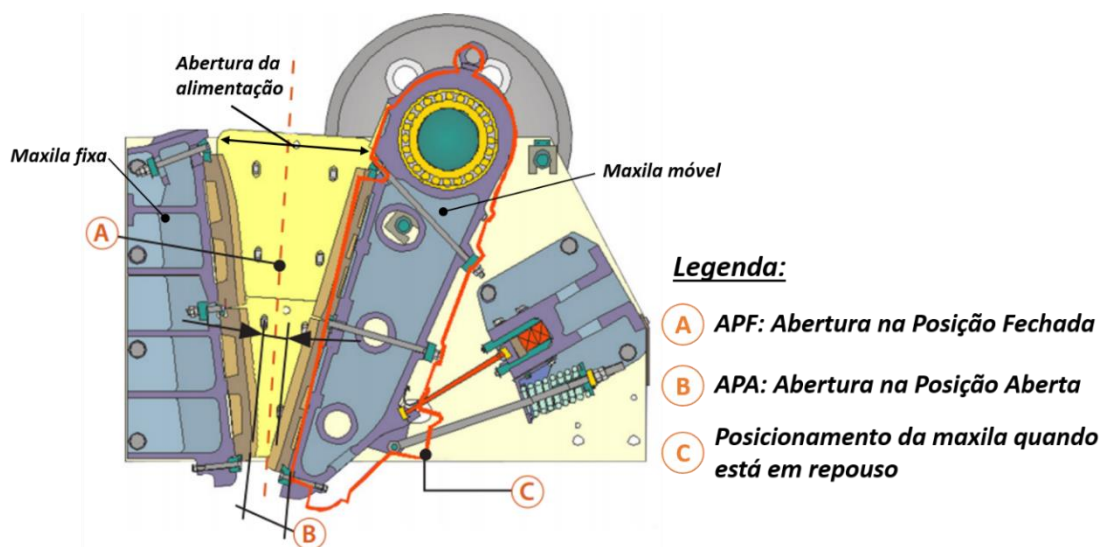


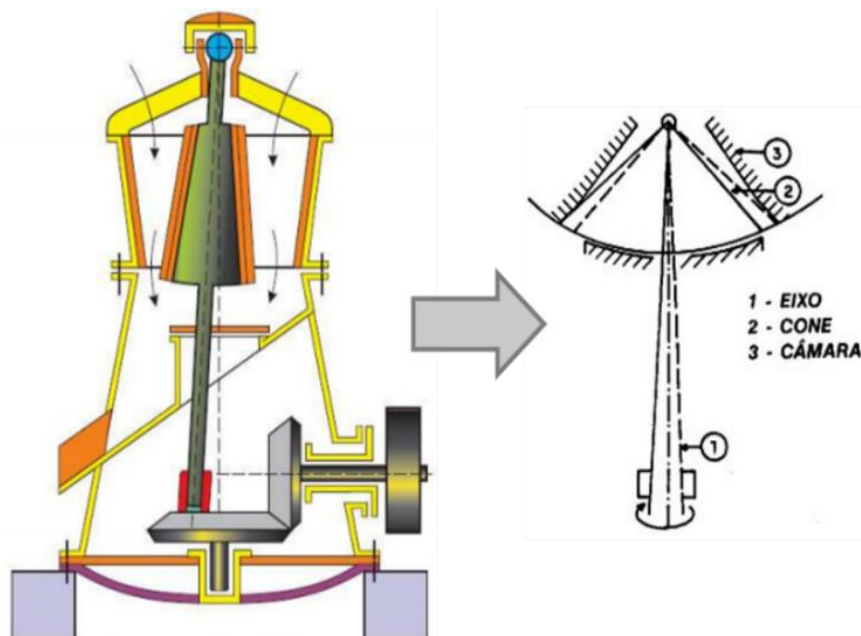
Figura 7 – Representação esquemática do britador de maxilas (adaptado de Ribeiro, 2011).

De acordo com o mecanismo de movimentação da maxila móvel, o britador pode ser constituído por um eixo e ter um movimento simples elíptico, como é o caso do britador *Dodge*, ou ser composto por dois eixos e apresentar um movimento composto oscilatório, que é o exemplo do britador *Blake*.

### 2.3.2. Britador giratório

O britador giratório é usado na etapa de fragmentação primária e secundária. Como apresenta um elevado custo de manutenção, este britador deve ser empregue na etapa primária quando há elevadas quantidades de material a fragmentar e o britador de maxilas não apresenta capacidade suficiente para realizar a fragmentação (Carvalho, 2012).

O mecanismo de fracturação das partículas neste britador (Figura 8) baseia-se na movimentação de aproximação e afastamento do cone central (pião) em relação ao revestimento do interior da câmara. O movimento do pião, que ronda os 85 a 150 rpm, obriga a que toda a área da câmara seja empregue durante o processo de fragmentação, o que garante uma melhor operação de segmentação relativamente ao britador de maxilas (Portal Metalica, 2010).

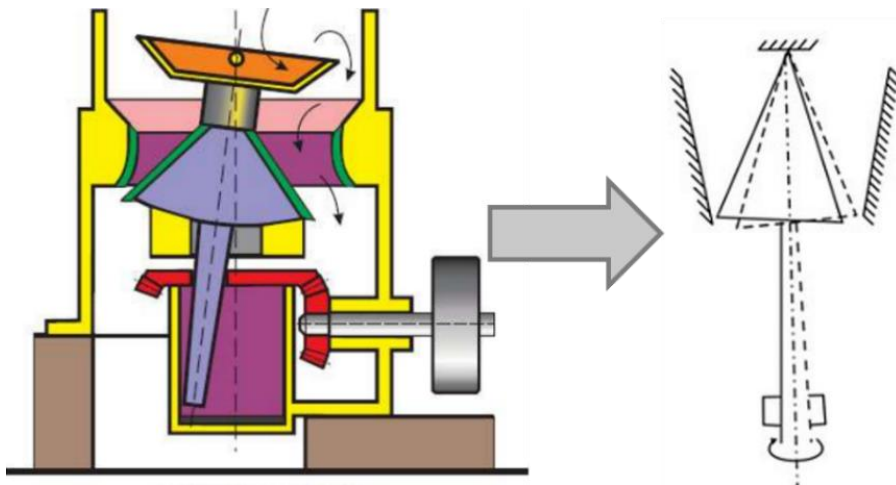


**Figura 8** – Representação esquemática do britador giratório  
(Fonte: Figura da esquerda - [https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/308177/mod\\_resource/content/3/Aula%206.pdf](https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/308177/mod_resource/content/3/Aula%206.pdf); Figura da direita - <http://wwwo.metalica.com.br/artigos-tecnicos/britadores-e-moinhos>).

### 2.3.3. Britador cónico

O britador cónico apresenta o mesmo mecanismo de operação que o giratório, mas por ser menos robusto e de pequeno porte é utilizado nas etapas de fragmentação secundária e terciária.

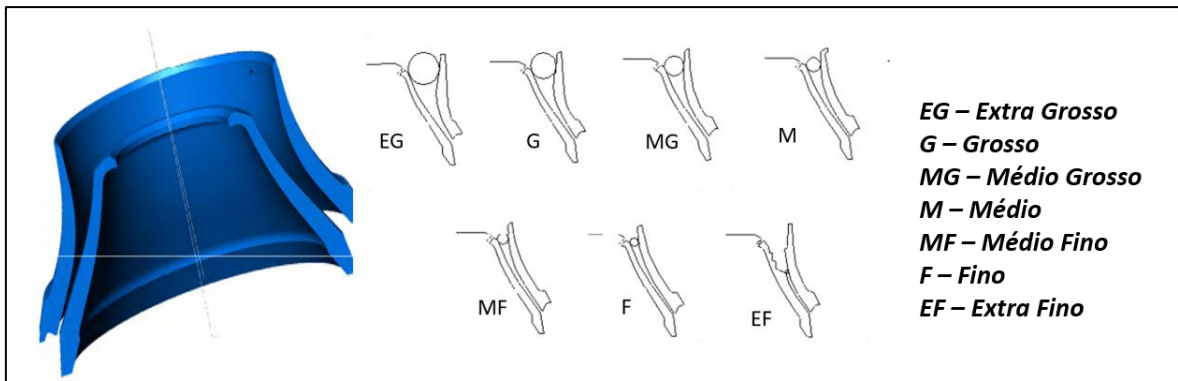
Na Figura 9 pode observar-se que a câmara do britador cónico é composta por longas superfícies planas, o que permite reter por mais tempo as partículas naquela área (Luz *et al.*, 2010; Carvalho, 2012). O movimento vertical do cone central obriga a que toda a área da câmara do britador seja utilizada no processo de fragmentação, o que proporciona uma maior aptidão da operação e controlo sobre a abertura de saída do material (Luz *et al.*, 2010; Carvalho, 2012; Zanella, 2013).



**Figura 9** – Representação esquemática do britador cónico  
(Figura da esquerda - [https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/308177/mod\\_resource/content/3/Aula%206.pdf](https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/308177/mod_resource/content/3/Aula%206.pdf); Figura da direita - <http://wwwo.metalica.com.br/artigos-tecnicos/britadores-e-moinhos>).

Quando a câmara do britador cónico está relativamente cheia, há uma maior eficiência no processo de fragmentação, dando origem a partículas com formato cúbico e em contrapartida, produzindo finos (Weidmann, 2008; Zanella, 2013). Em comparação com outros britadores, o cónico é apropriado para a redução e controlo do tamanho das partículas (Metso Corporation, 2015), uma vez que há possibilidade de adaptar a câmara do britador às dimensões das partículas a fragmentar, como se vê na Figura 10.

Os britadores cónicos podem ser britadores *Hydrocone* ou *Symons* e a grande diferença entre os britadores é a alteração da abertura na posição fechada. O *Hydrocone* permite alterar a abertura na posição fechada durante o processo de fragmentação, enquanto o *Symons* só admite alterar a abertura quando não contém material no seu interior, ao ser necessário rodar a estrutura do britador para mudar a abertura (Itävuo *et al.*, 2013).



**Figura 10** – Tipos de abertura da posição aberta do britador cônico (adaptado de <https://www.911metallurgist.com/blog/wp-content/uploads/2015/01/Crushing-Principles-of-Mechanical.pdf>).

### 2.3.4. Britador de impacto

Ao contrário dos britadores descritos nos tópicos anteriores, o britador de impacto é composto por um mecanismo de fragmentação por impacto, o que causa um maior desgaste nas peças que constitui a câmara (Portal Metalica, 2010; Carvalho, 2012).

Este tipo de britador pode ser utilizado em qualquer etapa de fragmentação ao ser composto por um leque variado de relações de redução (Carvalho, 2012). Todavia, quando é utilizado como fragmentador primário, para além de garantir um formato mais cúbico aos fragmentos, produz uma quantidade elevada de finos (Carvalho, 2012) que são provocados pela excessiva energia que atua nas partículas à medida que passam na câmara do britador (Metallurgist, 2016).

### 2.4. Forma das partículas

Durante o processo de fragmentação, a forma das partículas é condicionada pelas relações entre as propriedades dos materiais rochosos e as características dos britadores. No final do processo, as partículas apresentam um formato anguloso predominado por arestas e vértices bem definidos.

Ao contrário de uma areia natural, a forma do agregado pode ser classificada segundo a sua aparência e divide-se em dois grupos: partículas cúbicas e partículas não cúbicas, em que no último grupo estão inseridos os fragmentos com formato alongado e achatado (Fernandes, 2005; Weidmann, 2008; Bengtsson *et al.*, 2010). Define-se partícula alongada quando o comprimento da partícula é maior do que a espessura e largura da mesma. Já uma partícula achatada ou lamelar é composta por uma espessura relativamente mais pequena em relação as outras dimensões (Coutinho, 1999).

A forma das partículas afeta as características do betão, influenciando parâmetros como a trabalhabilidade, a compacidade e a resistência do mesmo (Coutinho, 1999; Fernandes, 2005). Um agregado que apresente uma forma angular com alta esfericidade, ou seja, agregados com partículas cúbicas que se caracterizam por apresentarem uma angularidade em relação aos seus bordos e uma relação elevada entre a área superficial das partículas face ao seu volume (esfericidade), caracterizam-se por serem as mais indicadas para a produção de betão (Coutinho, 1999; Fernandes, 2005).

As partículas lamelares ou achatadas afetam as características do betão, ao diminuir a trabalhabilidade do betão (Coutinho, 1999; Fernandes, 2005). Deste modo, devem aparecer em percentagens reduzidas nos agregados utilizados no fabrico do betão.

Salienta-se que a forma cúbica das partículas pode influenciar em alguns casos o custo monetário do produto final. Segundo Briggs & Evertsson (1998), um dos atributos dos agregados utilizados na construção ferroviária, é que o balastro de *classe I* seja composto por cerca de 90 % de partículas que apresentem um índice de forma (relação entre o comprimento e espessura das partículas) inferior a 3. Caso essa exigência não seja executada, o custo do balastro sofre uma redução de cerca de 25 %.

Em ensaios laboratoriais, o estudo da forma das partículas tem o objetivo de analisar as propriedades intrínsecas dos agregados e determinar os índices de achatamento e de forma que estão relacionados com a análise das partículas não cúbicas.

Em seguida são apresentados dois casos de estudo onde os autores relacionam as propriedades dos materiais rochosos com as características dos britadores.

#### ➤ **Estudos que relacionam as propriedades dos materiais rochosos com as características dos britadores**

Evertsson & Bearman (1997) relacionaram os fatores que interferem na fragmentação de um britador cónico e avaliaram as dependências que existem entre os parâmetros dos britadores, as propriedades dos materiais rochosos e as características principais da alimentação e do produto (Tabela 3).

Na Tabela 3, o termo “I” identifica os parâmetros independentes, aqueles que não precisam da intervenção de outro parâmetro para o seu desenvolvimento no processo de fragmentação. O termo “D” designa os parâmetros que estão dependentes de outros fatores (assinalados por “✓”) para a sua eficiência no processo de fragmentação.

**Tabela 3** – Relação entre os parâmetros dos britadores, dos materiais, da alimentação e do produto (Evertsson & Bearman, 1997).

		<i>Propriedades dos britadores</i>							<i>Propriedades dos materiais</i>		<i>Alimentação</i>			<i>Produto</i>			
		Tipo de parâmetro	Velocidade excêntrica	APF	Pancada	Geometria da câmara	Pressão hidráulica	Potência	Capacidade	Resistência do material	Resistência ao atrito	Distribuição do tamanho	Forma da partícula	Resistência do material	Distribuição do tamanho	Forma da partícula	Resistência do material
<i>Propriedades dos britadores</i>	Velocidade excêntrica	<i>I</i>	-														
	APF	<i>I</i>		-													
	Pancada	<i>I</i>			-												
	Geometria da câmara	<i>D</i>		✓	✓	-											
	Pressão hidráulica	<i>D</i>	✓	✓	✓	✓	-										
	Potência	<i>D</i>	✓	✓	✓	✓	✓	-									
	Capacidade	<i>D</i>	✓	✓	✓	✓		✓	-								
<i>Propriedades dos materiais</i>	Resistência do material	<i>I</i>							✓	-							
	Resistência ao atrito	<i>I</i>							✓		-						
<i>Alimentação</i>	Distribuição do tamanho	<i>D</i>							✓	✓	✓	-					
	Forma da partícula	<i>D</i>							✓	✓			-				
	Resistência do material	<i>D</i>							✓	✓				-			
<i>Produto</i>	Distribuição do tamanho	<i>D</i>	✓	✓	✓	✓	✓	✓		✓	✓	✓	✓	✓	-		
	Forma da partícula	<i>D</i>	✓	✓	✓	✓	✓	✓		✓		✓	✓	✓		-	
	Resistência do material	<i>D</i>	✓	✓	✓	✓	✓	✓		✓				✓			-

Perante os dados indicados na Tabela 3, certos parâmetros não dependem de outros fatores para interferir na fragmentação, como é o caso da velocidade excêntrica, a abertura na posição fechada e das propriedades dos materiais rochosos. Contudo, há outros aspetos que estão sujeitos a um ou mais fatores para que o seu resultado seja o mais eficaz na fragmentação. Por exemplo, a geometria da câmara que depende de parâmetros ligados ao britador e às características do produto para o seu correto dimensionamento.

Num estudo desenvolvido por Olaleye (2010), o autor interligou as propriedades de resistência do material rochoso com o comportamento do britador de maxilas, numa forma de relacionar a resistência da rocha com o tempo que as partículas demoram a ser fragmentadas. Nesse estudo foram utilizados quatro tipos de materiais rochosos: mármore, calcário, granito e dolomite. Do material recolhido, cerca de 5 kg de cada amostra foram fragmentadas num britador de maxilas de laboratório para determinar e avaliar o tempo de fragmentação de cada amostra. O restante material das amostras, foi utilizado na elaboração dos ensaios de compressão uniaxial e de carga pontual (PLT). Na Tabela 4 estão indicados os valores obtidos no caso de estudo desenvolvido por Olaleye.

**Tabela 4** – Dados referentes ao estudo desenvolvido por Olaleye sobre a resistência à compressão, carga pontual e tempo de fragmentação (Olaleye, 2010).

	<b>Granito</b>	<b>Mármore</b>	<b>Calcário</b>	<b>Dolomite</b>
<i>Ensaio de compressão uniaxial (MPa)</i>	125	86,11	81,94	34,72
<i>PLT (MPa)</i>	8,61	5,28	3,68	1,98
<i>Tempo de fragmentação (s)</i>	21	14	11	5

Perante os resultados alcançados, o autor concluiu que o tempo de fragmentação está diretamente relacionado com a resistência do material em estudo. Quanto mais dura for a rocha, maior é o valor da resistência à compressão uniaxial e maior é o tempo de fragmentação sob o mecanismo do britador de maxilas.

#### **2.4.1. Influência dos materiais rochosos**

Segundo Zanella (2013), *“o processo de produção nas pedreiras pode afetar significativamente a qualidade dos agregados, pela eliminação das camadas mais fracas da rocha e pelo efeito da britagem na forma da partícula e na graduação do agregado”*.

As características dos materiais rochosos que mais influenciam o processo de fragmentação são a forma e textura dos materiais, a resistência mecânica e a composição mineralógica das rochas. Estas particularidades afetam o índice de achatamento, fator que avalia a regularidade das partículas dos agregados (Saraiva, 2009).

A resistência à compressão e dureza das rochas manipulam o consumo de energia na fragmentação. Um material duro e resistente necessita que o britador exerça uma maior força para conseguir vencer a resistência do material e o fragmentar. Contudo, quando o fragmento é composto por

uma elevada resistência à compressão, por vezes, o processo de fragmentação não é eficiente, provocando um menor número de fraturas nas partículas.

As composições petrográficas e mineralógicas das rochas condicionam o mecanismo de fragmentação ao apresentarem diferentes minerais na constituição da amostra. Os parâmetros de dureza e resistência dos minerais influenciam a orientação da fratura das partículas.

➤ **Influência da textura dos materiais rochosos no processo de fragmentação**

Kekec *et al.* (2006) investigaram as propriedades da textura das rochas em dois parâmetros ligados à fragmentação: a distribuição granulométrica do produto e a configuração do processo de fragmentação. Porém, também relacionaram as características físicas e mecânicas das rochas com a textura das mesmas. Quanto às particularidades mecânicas das rochas, vários autores referem que o tamanho da partícula e a área superficial da mesma são critérios importantes quando se analisam amostras com a mesma morfologia. Já o parâmetro “textura” refere-se ao tamanho, forma e distribuição dos minerais numa rocha, dando informação de como foi formada a estrutura da rocha.

No estudo de Kekec *et al.* (2006), as amostras foram analisadas pelo método ótico, através da observação de uma fina camada de material rochoso num microscópio petrográfico. Os autores concluíram que a textura influencia a fragmentação das rochas quando os minerais apresentam uma constituição semelhante. Contudo, a composição mineralógica das amostras não tem influência significativa na distribuição do tamanho do produto.

➤ **Relação entre a forma das partículas e a resistência à fragmentação por abrasão**

Um dos estudos desenvolvidos nos laboratórios da Metso Minerals foi a correlação entre a resistência à fragmentação e a forma das partículas em diferentes distribuições granulométricas. Para tal, foi necessário relacionar os resultados do ensaio de *Los Angeles* com os do índice de achatamento (*F<sub>I</sub>*) (Figura 11). Segundo os ensaios realizados pela Metso Minerals (2008), há uma certa correlação entre os valores de *Los Angeles* e a forma do produto. Em média, à medida que o valor do coeficiente de *Los Angeles* aumenta, o índice de achatamento é mais pequeno, indicando um melhor formato do material. Contudo, este estudo não é muito preciso por não haver informações das composições mineralógicas e do grau de alteração dos provetes de ensaio, o que dificulta a interpretação do gráfico da Figura 11.

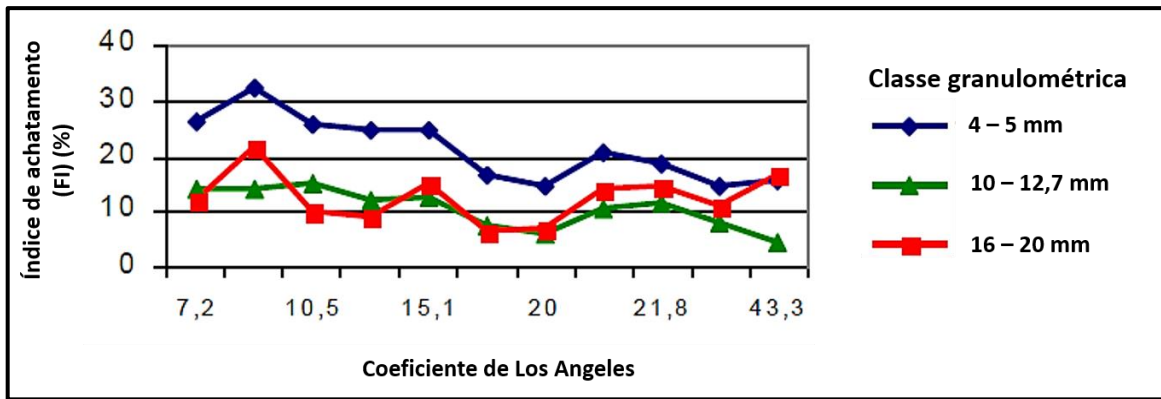


Figura 11 – Correlação entre o índice de achatamento e o coeficiente de *Los Angeles* (adaptado de Metso Minerals, 2008).

➤ **Relação entre a composição mineralógica dos agregados e a resistência à fragmentação por abrasão**

Guimaraes *et al.* (2007) desenvolveram um estudo, em amostras de granito, que relaciona a fragmentação por abrasão (ensaio de *Los Angeles*) com a composição de cada mineral (dureza e densidade). Nesse estudo, as amostras são constituídas por quartzo, biotite, anortite e ortóclase (os últimos dois minerais não interferem no estudo).

Face aos resultados do estudo de Guimaraes *et al.* (2007) (Figura 12), concluíram que o quartzo (indicado como  $\text{SiO}_2$ ), que tem uma dureza de 7 na escala de *Mohs* e uma densidade de 2,65, provoca um maior desgaste na rocha no ensaio de *Los Angeles*, ao fazer com que os minerais de menor dureza se fragmentem. Já a biotite (caracterizada no estudo como  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), que tem dureza inferior à do quartzo e densidade de 2,82, a sua presença faz diminuir o desgaste no ensaio de *Los Angeles* ao reduzir os efeitos das tensões de impacto na amostra (Guimaraes *et al.*, 2007).

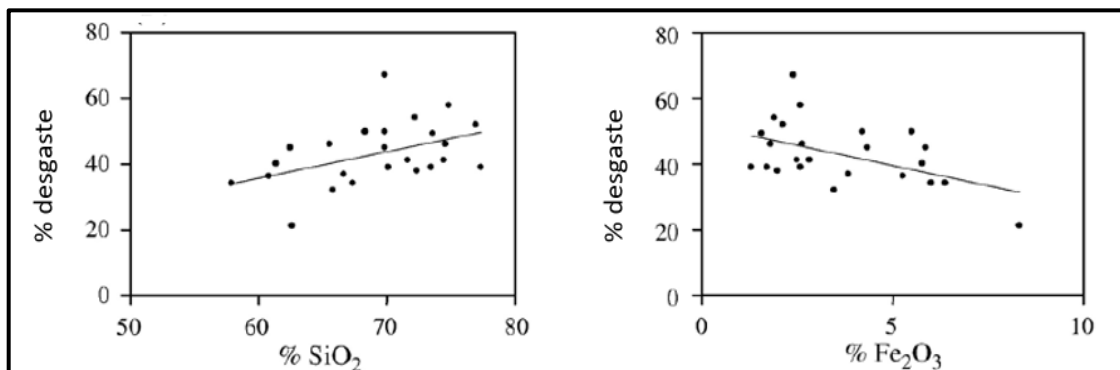


Figura 12 – Comparação entre as porcentagens dos óxidos com a porcentagem do desgaste no ensaio de *Los Angeles* (adaptado de Guimaraes *et al.*, 2007)

### 2.4.2. Influência do britador

Segundo Bengtsson & Evertsson (2006), a forma das partículas é influenciada maioritariamente pelo tamanho médio das partículas na alimentação e pela abertura na posição fechada (APF), o que afeta diretamente o índice de achatamento do produto final. Contudo, há outros fatores como a geometria da câmara, a velocidade excêntrica do eixo do britador e o mecanismo de fragmentação que também condicionam o formato do produto final (Bengtsson & Evertsson, 2006). No dimensionamento da câmara do britador deve-se considerar o tamanho e forma do produto que se pretende obter, uma vez que a otimização da câmara está ligada à redução do tamanho das partículas e à percentagem do índice de achatamento (Gang *et al.*, 2009).

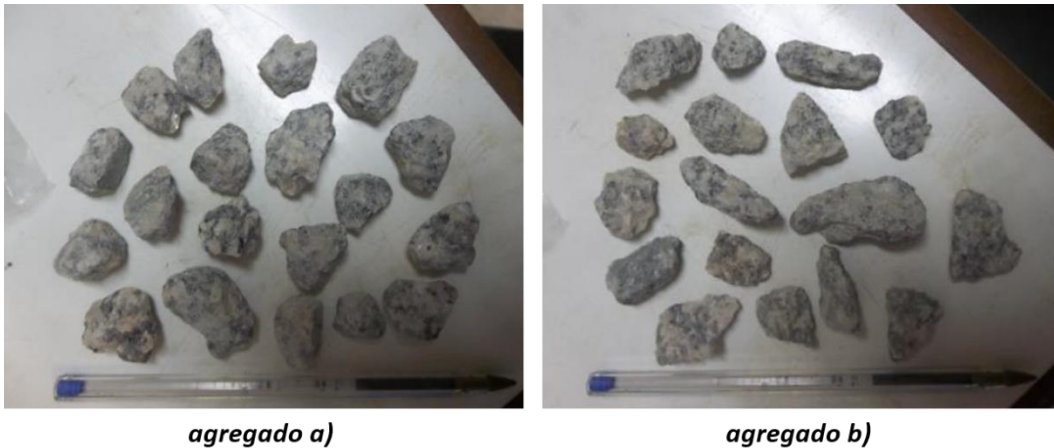
Já a velocidade excêntrica do fragmentador manipula a segmentação das partículas, estando ligada à distribuição granulométrica e forma do produto final (Evertsson, 1998). Bengtsson *et al.* (2010) relacionaram a influência da velocidade excêntrica e de lançamento sobre o mecanismo de fragmentação das partículas num britador cónico. Essencialmente, tentaram interligar a compressão exercida pelo britador com o aumento da velocidade, avaliando a intervenção na forma do produto. Se a alimentação do britador for constituída por uma única partícula, o aumento da velocidade de lançamento provoca partículas achatadas devido à falta de contacto por ter dois apoios, as superfícies metálicas do britador. Quando a alimentação é composta por várias partículas, como há mais pontos de contacto entre elas, o aumento da velocidade provoca partículas mais cúbicas no produto. Portanto, a forma da partícula tende a ser menos cúbica à medida que há um aumento da velocidade e um menor número de pontos de contacto entre as partículas.

De um modo geral e como já foi mencionado (*no tópico 2.3. – Britadores*), a configuração das partículas modifica consoante o britador escolhido. Mas, nem todos exibem controlo sobre o formato das partículas, como é o caso do britador de maxilas e do giratório que produzem partículas alongadas e achatadas em vez de cúbicas.

A forma do produto é afetada também pela carga de material que é introduzido na alimentação. Se a capacidade da alimentação tiver completa, origina partículas mais cúbicas do que uma com fluxo menor (Eironova, 2012).

Na Figura 13 pode-se analisar duas amostras de granito obtidas em diferentes etapas de fragmentação e britadores. A amostra designada por “agregado a)” foi obtida através de um britador de impacto de eixo vertical na terceira etapa de fragmentação, que anteriormente, passou pelo britador de maxilas na etapa primária e por um britador cónico na segunda etapa. Quanto à amostra “agregado b)” foi retida do britado cónico na etapa secundária.

As duas amostras apresentam geometrias diferentes. Na amostra do britador de impacto, houve um controlo na forma das partículas, visto que aparentam ter um formato semelhante e cúbico. No caso do britador cónico, há uma discrepância na forma das partículas, com fragmentos cúbicos e achatados. Neste caso, a fragmentação não é eficaz e corretamente controlada.

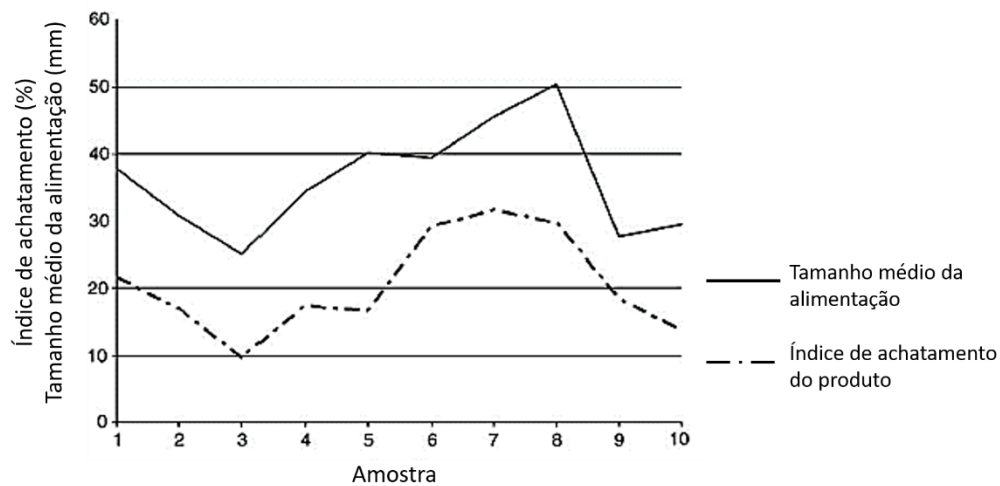


**Figura 13** – Formas das partículas provenientes do britador de impacto de eixo vertical e do britador cónico (Zanella, 2013).

Vários autores tentaram relacionar o tamanho das partículas na alimentação com os índices de achatamento ( $FI$ ) e de forma ( $SI$ ) dos produtos em fragmentadores cónicos.

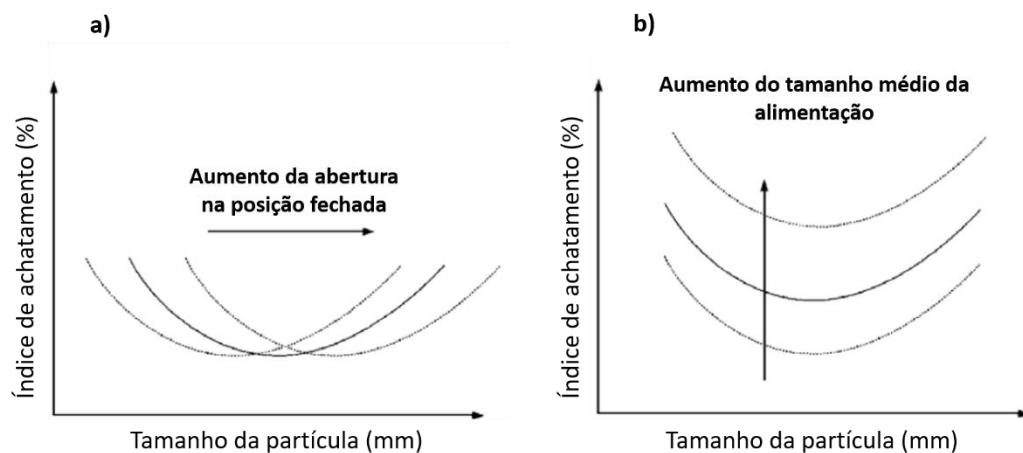
➤ **Relação entre o tamanho das partículas na alimentação e o índice de achatamento ( $FI$ )**

Bengtsson & Evertsson (2006) estabeleceram uma ligação entre o tamanho médio das partículas na alimentação do britador cónico com o índice de achatamento do produto (Figura 14). No estudo desenvolvido foram utilizadas dez amostras (duas das amostras eram granitos, sendo que um deles era um granito alcalino) de diferentes materiais rochosos. Ao analisar o gráfico da Figura 14 observa-se que, apesar das diferentes características petrográficas das amostras, existe a mesma correlação entre o tamanho das partículas na alimentação e o índice de achatamento. Comparando as amostras da Figura 14, pode observar-se que uma alimentação com fragmentos maiores tem um índice de achatamento superior, como é o caso da amostra 8 em comparação com a amostra 3. Logo, quanto menores forem as partículas na alimentação, menor é a quantidade de partículas achatadas no produto (menor índice de achatamento).



**Figura 14** – Comparação entre o tamanho médio da alimentação e o índice de achatamento do produto (adaptado de Bengtsson & Evertsson, 2006).

Contudo, Bengtsson & Evertsson (2006) expuseram um modelo baseado em estudos desenvolvidos anteriormente por Eloranta. O modelo analisa como o índice de achatamento e o tamanho das partículas se alteram com a variação da abertura na posição fechada (APF) ou com o aumento do tamanho da alimentação (Figura 15).



**Figura 15** – Relação entre o índice de achatamento e o tamanho final das partículas com a variação da abertura na posição fechada e o tamanho da alimentação (adaptado de Bengtsson & Evertsson, 2006).

A Figura 15a compara o efeito da alteração da abertura na posição fechada, quando não há variação a nível do tamanho da alimentação. Com o aumento da abertura na posição fechada, o gráfico tende a movimentar-se horizontalmente, indicando que, para o mesmo tamanho da alimentação, o índice de achatamento não varia com o aumento do tamanho do produto. Já no gráfico da Figura 15b há uma modificação a nível do tamanho da alimentação e não se altera a abertura da posição

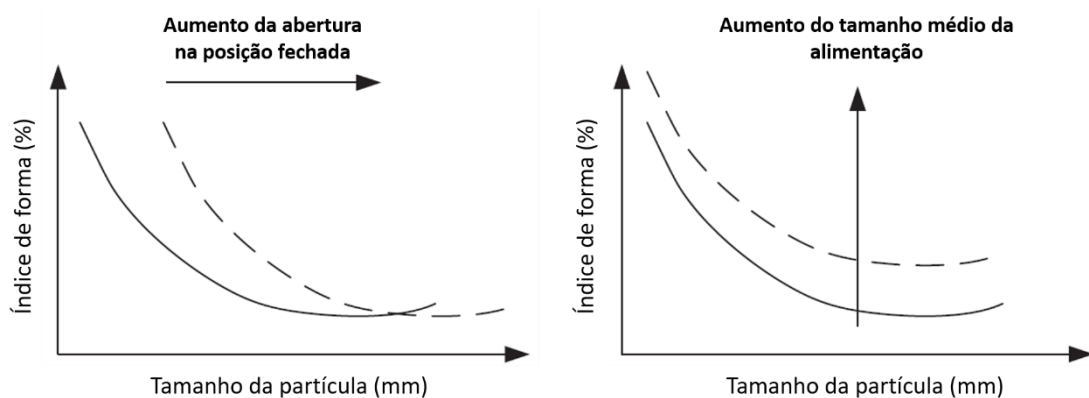
fechada. Neste caso, o gráfico move-se verticalmente com o aumento do tamanho dos fragmentos da alimentação. Esta alteração afeta o índice de achatamento do produto, o qual tende a aumentar. Baseado nos gráficos apresentados na Figura 15, Bengtsson & Evertsson (2006) desenvolveram um modelo empírico (Equação 1) para estimar o achatamento das partículas do produto num britador cônico, conhecendo os valores referentes ao tamanho do produto ( $p$ ) em mm, à abertura na posição fechada ( $APF$ , designado em inglês por  $CSS$  – *closed side setting*) em mm, e ao tamanho médio da alimentação ( $\bar{x}$ ), em mm.

$$FI(\bar{x}, CSS, p) = \frac{0,24}{\bar{x}} \times \left( \frac{1,25 \times \bar{x} + 20}{CSS} \right)^2 \times p^2 - \left( \frac{1,25 \times \bar{x} + 20}{CSS} \right) \times p + 1,25 \times \bar{x}$$

**Equação 1** – Índice de achatamento do produto (Bengtsson & Evertsson, 2006).

➤ **Relação entre o tamanho das partículas e o índice de forma (SI)**

Noutro estudo aprofundado por Bengtsson *et al.* (2015), foi comparado o índice de forma ( $SI$ ) com o tamanho das partículas quando se modifica a abertura na posição fechada e o tamanho médio da alimentação (Figura 16).



**Figura 16** – Relação entre o índice de forma e o tamanho final das partículas com a variação da abertura na posição fechada e o tamanho da alimentação (adaptado de Bengtsson *et al.*, 2015).

Ao analisar a Figura 16, observa-se que a percentagem do índice de forma aumenta à medida que o tamanho das partículas da alimentação cresce e o tamanho do produto permanece igual. Por contrapartida, quando se altera a abertura da posição fechada, a dimensão do produto tende a aumentar, mas a percentagem de partículas achatadas permanece inalterável. Portanto, o índice de forma tem uma reação parecida com o índice de achatamento apresentado na Figura 15, sofrendo alteração quando há uma variação do tamanho das partículas na alimentação.

## 2.5. Consumo de energia na fragmentação

Nos últimos anos, a energia despendida na fragmentação tem sido alvo de vários estudos na tentativa de minimizar o seu consumo e as emissões de CO<sub>2</sub> produzidas no processo, mas também devido ao seu elevado custo (Legendre & Zevenhoven, 2014; Grupta & Yan, 2016). A energia consumida pelos britadores durante a fragmentação é relativamente reduzida (abaixo dos 10 %), em comparação à energia que é dissipada pela forma de calor ou ruído durante esse processo (Donovan, 2003; Legendre & Zevenhoven, 2014).

Segundo Legendre & Zevenhoven (2014), a fragmentação sempre foi identificada como uma indústria com baixas taxas de eficiência energética, dando mais importância ao facto de alcançar o tamanho pretendido do produto do que assegurar um baixo consumo de energia.

Ao longo de vários anos, diversos autores desenvolveram fórmulas para determinar a energia específica consumida no processo de fragmentação. Um desses autores foi F.C. Bond que desenvolveu a chamada “terceira lei da fragmentação”, que indica que “a energia consumida para reduzir o tamanho de um material é inversamente proporcional à raiz quadrada do tamanho” (Luz *et al.*, 2010; Coutinho, 2015). A fórmula de Bond (Equação 2) considera uma constante designada por *Work Index*,  $W_i$ . O *Work Index* ou Índice de Trabalho é um valor teórico atribuído ao consumo de energia despendido na fragmentação tendo em consideração a distribuição do produto no fragmentador e o tipo de material a segmentar.

Devido aos valores do Índice de Trabalho,  $W_i$ , abrangerem uma distribuição alargada das dimensões das partículas, é possível aplicar a fórmula de Bond em quase todos os equipamentos de fragmentação existentes no mercado (Legendre & Zevenhoven, 2014).

$$W = 10 W_i \left( \frac{10}{\sqrt{P_{80}}} - \frac{10}{\sqrt{F_{80}}} \right)$$

**Equação 2** – Fórmula de Bond para o cálculo da energia específica na fragmentação (Coutinho, 2015).

Onde:

$W$  – Energia específica, em kWh/t;

$W_i$  – Índice do trabalho (*Work Index*), em kWh/t;

$P_{80}$  – Calibre do material correspondente a 80 % de passados no produto, em  $\mu m$ ;

$F_{80}$  – Calibre do material correspondente a 80 % de passados na alimentação, em  $\mu m$ .

Em 1962, Hukki relacionou as três leis básicas da fragmentação (a de Kick, 1885, a de Rittinger, 1867, e a de Bond, 1952) e desenvolveu uma nova fórmula (Equação 3) para determinar a quantidade de energia necessária na fragmentação, relacionando o consumo de energia com o

tamanho das partículas (Itävuo *et al.*, 2013). Contudo, esta expressão não considera a eficiência do fragmentador nem o mecanismo de fragmentação utilizado (Itävuo *et al.*, 2013).

$$dE = -C \times \frac{dx}{x^{f(x)}}$$

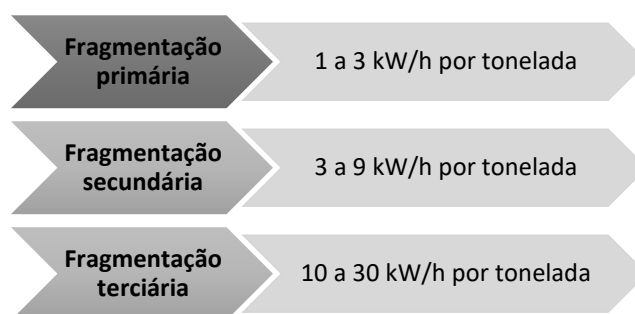
**Equação 3** – Fórmula de Hukki para determinar a energia específica na fragmentação (Itävuo *et al.*, 2013).

Onde:

- E – Energia específica necessária na fragmentação;
- C – Constante que deriva do tipo de material rochoso fragmentado;
- x – Parâmetro que caracteriza o tamanho da alimentação/produto;
- f(x) – Expoente relativo ao tamanho da partícula.

Segundo Itävuo *et al.* (2013), há necessidade de aumentar o consumo de energia à medida que o tamanho das partículas diminui. Assim sendo, quando há uma excessiva produção de finos não desejada, o consumo energético é relativamente baixo.

Nas etapas de fragmentação, o consumo de energia difere de etapa para etapa devido ao tamanho das partículas (Figura 17). Sabe-se que a energia por tonelada tratada tende a aumentar à medida que o tamanho dos segmentos diminui e há um aumento da área superficial das partículas no interior da câmara do britador (Lindquist, 2008; Legendre & Zevenhoven, 2014; Fernandes, 2013; Grupta & Yan, 2016). Deste modo, com o avançar das etapas de fragmentação é cada vez mais difícil de fraturar as partículas, necessitando que haja um aumento da força máxima exercida por parte do fragmentador, levando ao aumento do consumo de energia (Gang *et al.*, 2009), como se pode visualizar na Figura 17.



**Figura 17** – Dados relativos ao consumo energético nas etapas de fragmentação (adaptado de Fernandes, 2013).

Quanto aos mecanismos de fragmentação, os britadores que apresentam o método de segmentação por compressão (fragmentador de maxilas, giratório ou cônico) são mais eficientes

em termos de energia em comparação aos outros métodos, ao precisar de menos força para desagregar os materiais rochosos (*ver tópico 2.2.1. Mecanismos de fragmentação*) (Quist & Evertsson, 2016). Segundo Johansson *et al.* (2017), o rendimento de um britador de maxilas varia entre os 30 e os 1200 ton/h.

Para finalizar, o melhoramento e controlo do consumo energético numa instalação de britagem, essencialmente nos fragmentadores, leva a que haja um menor consumo de energia por cada atividade de produção e um custo menor do produto final. Apesar das várias tentativas dos investigadores, ainda não existe uma solução exacta para estimar o consumo de energia na redução do tamanho das partículas (Legendre & Zevenhoven, 2014).

### ***3. Metodologias***



### 3. Metodologias

---

Neste capítulo, são apresentadas as metodologias que foram aplicadas nas amostras dos casos em estudo. Na Tabela 5 estão indicadas as propriedades que se pretendem analisar com o respetivo ensaio laboratorial e norma aplicada. Os ensaios laboratoriais foram realizados no Laboratório de Geotecnia e Materiais de Construção (LGMC), do ISEP.

**Tabela 5** – Propriedades dos agregados e respetivos ensaios.

<b>Propriedades a analisar</b>	<b>Ensaio</b>	<b>Norma</b>	
<b>Granulometria da amostra</b>	<i>Análise granulométrica</i>	<i>NP EN 933 – 1: 2000</i>	
<b>Composição química a nível quantitativa e qualitativa da amostra</b>	<i>Análise química</i>	<i>Procedimento LGMC</i>	
<b>Composição da amostra</b>	<i>Análise mineralógica</i>	---	
<b>Friabilidade dos agregados</b>	<i>Brittleness test</i>	---	
<b>Forma das partículas</b>	<i>Índice de achatamento</i> <i>Índice de forma</i>	<i>NP EN 933 – 3: 2011</i> <i>NP EN 933 – 4: 2002</i>	
<b>Resistência mecânica ao choque</b>	<i>Los Angeles</i> <i>micro-Deval</i>	<i>NP EN 1097 – 2: 2011</i> <i>NP EN 1097 – 1: 2012</i>	
<b>Dureza</b>	<i>Brittleness test</i> <i>Los Angeles</i> <i>micro-Deval</i>	---	<i>NP EN 1097 – 2: 2011</i> <i>NP EN 1097 – 1: 2012</i>

#### 3.1. Análise granulométrica

Segundo Saraiva (2009), “a granulometria é uma das propriedades mais importantes dos agregados, pois é a base para a realização de qualquer outro ensaio. É através da análise granulométrica, que se sabe qual a dimensão máxima e mínima do agregado, logo se se trata de um agregado monogranular ou de um agregado de granulometria extensa”. O ensaio de análise granulométrica consiste em passar o provete de ensaio numa série de peneiros ASTM (Figura 18) que estão colocados de forma decrescente quanto à abertura das malhas, ou seja, na parte superior os peneiros com as aberturas mais largas e, na parte inferior, os que tem aberturas menores (Coutinho, 1999).



**Figura 18** – Peneiros de ensaio – ASTM.

O objetivo do ensaio de análise granulométrica é separar o provete em várias frações à medida que passa pelos peneiros (Coutinho, 1999). No fim do ensaio, após separação dos peneiros, determina-se a percentagem de material retido em cada um (Equação 4) e a percentagem de finos que passa no peneiro de abertura 0,063 mm (Equação 5).

$$\text{Percentagem de material retido} = \frac{R_i}{M_1} \times 100$$

**Equação 4** – Percentagem de material retido no peneiro (NP EN 933 – 1: 2000).

Onde:

$R_i$  – Material retido, em quilogramas (kg);

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

$$f = \frac{(M_1 - M_2) + P}{M_1} \times 100$$

**Equação 5** – Percentagem de finos ( $f$ ) que passam no peneiro de 63  $\mu\text{m}$  (NP EN 933 – 1: 2000).

Onde:

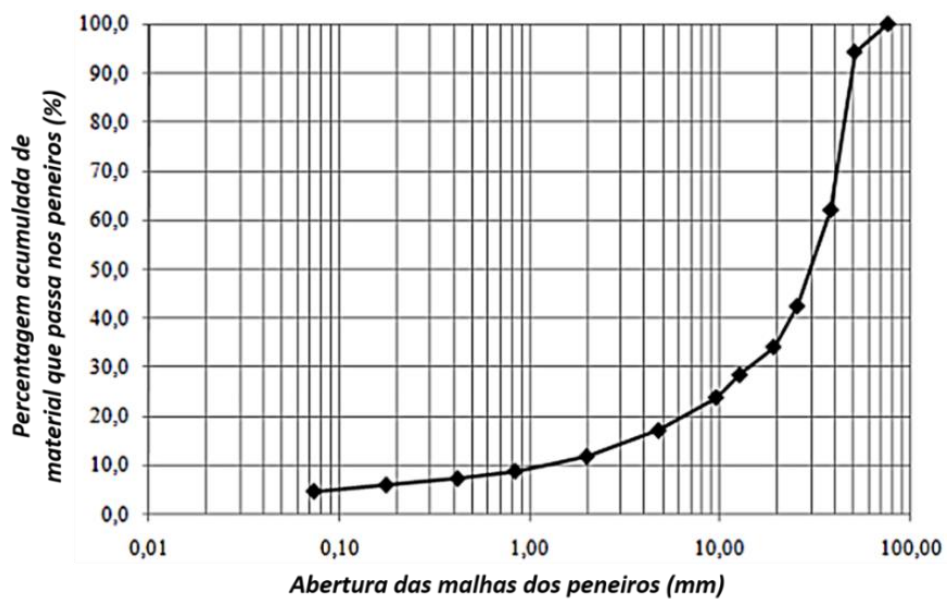
$f$  – Percentagem de finos (%);

$M_1$  – Massa seca do provete de ensaio, em quilogramas (kg);

$M_2$  – Massa seca do material com granulometria superior a 0,063 mm, em quilogramas (kg);

$P$  – Massa do material peneirado retido no recipiente do fundo, em quilogramas (kg).

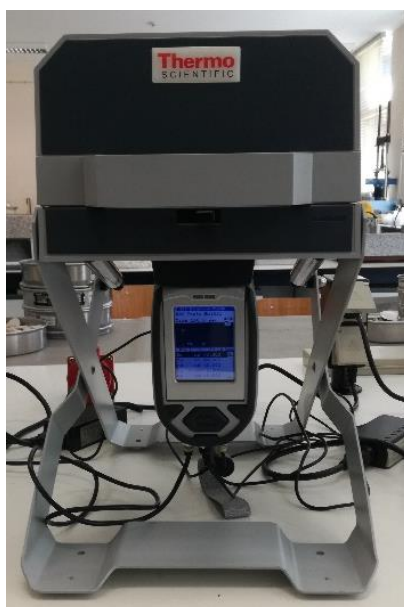
Os resultados do ensaio de análise granulométrica são representados numa curva granulométrica (Figura 19), que relaciona numa escala logarítmica as aberturas dos peneiros (eixo das abcissas) com a percentagem de material acumulado em cada um (eixo das ordenadas).



**Figura 19** – Exemplo de curva granulométrica obtida no ensaio de análise granulométrica (adaptado de [https://repositorio.ipcb.pt/bitstream/10400.11/2900/1/2013\\_ICEUBI2013\\_%20MATERIAIS%20DAS%20ESC%20OMBREIRAS%20DAS%20PEDREIRAS%20DO%20POIO%20EM.pdf](https://repositorio.ipcb.pt/bitstream/10400.11/2900/1/2013_ICEUBI2013_%20MATERIAIS%20DAS%20ESC%20OMBREIRAS%20DAS%20PEDREIRAS%20DO%20POIO%20EM.pdf)).

### 3.2. Análise química

O ensaio de análise química é realizado por espectrometria de fluorescência de Raios X com recurso a um equipamento portátil, um analisador *Thermo Scientific* modelo *Niton XL3t 900* (Figura 20).

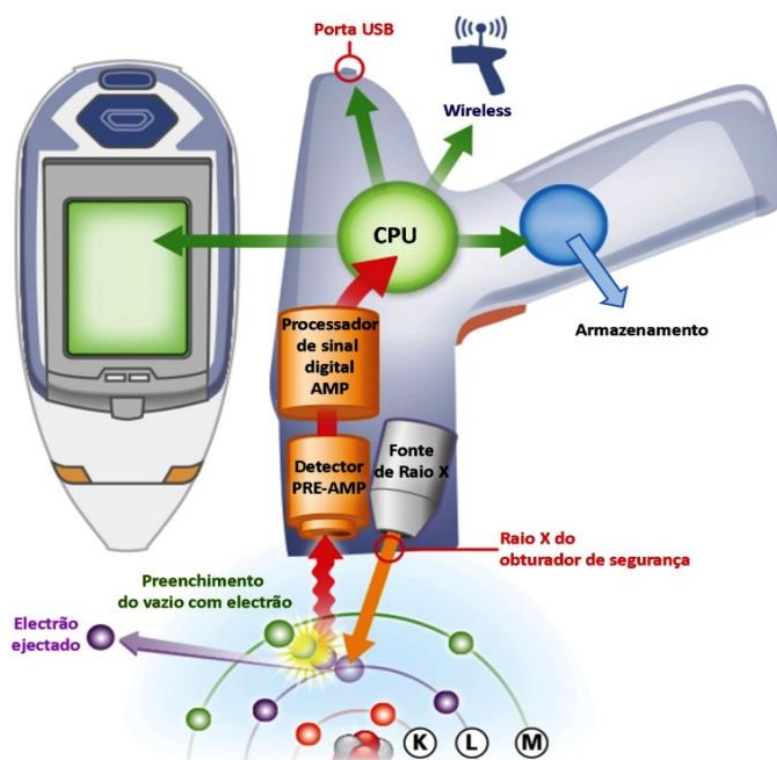


**Figura 20** – Equipamento portátil *Thermo Scientific* modelo *Niton XL3t 900*.

O objetivo deste ensaio é a determinação quantitativa e qualitativa da composição química das amostras moídas, permitindo num processo rápido a análise em simultâneo de mais de 35 elementos químicos que estejam presentes na amostra (Spínola, 2015).

O processo de análise química por fluorescência de Raios X consiste nas seguintes fases (Coutinho, 2015; Spínola, 2015):

- 1ª Fase – Emissão dos Raios X por parte do analisador que provoca a excitação dos elementos químicos que compõem a amostra (Figura 21);
- 2ª Fase – Dispersão dos espectros de linha emitidos pela amostra (Figura 21);
- 3ª Fase – Detecção dos espectros de linha contínua das amostras pelo analisador (Figura 21);
- 4ª Fase – Ligação do analisador a um computador que tenha o *software* NDT para permitir a transferência de dados e analisar os diversos elementos químicos e as suas quantidades, em termos de percentagem presentes na amostra.



**Figura 21** – Esquema do funcionamento do equipamento de análise química (Spínola, 2015).

A preparação da amostra (Figura 22) para o ensaio consiste na moagem e peneiração do provete de ensaio até adquirir cerca de 5 g com dimensão inferior a 0,125 mm para ser colocado num copo de amostra. A amostra é colocada no interior do copo devidamente compactada para evitar espaços vazios e irregulares. O espaço vazio do copo deve ser ocupado por fibras de recheio de poliéster para evitar o movimento da amostra.



Figura 22 – Sequência da preparação do copo de amostra.

### 3.3. Análise mineralógica

Na presente dissertação, a análise mineralógica não foi realizada no laboratório do ISEP. Os dados apresentados sobre este ensaio, foram consultados na análise macroscópica e microscópica descrita no catálogo *online* das rochas ornamentais portuguesas, no site do INETI/LNEG.

### 3.4. *Brittleness test*

Através da realização do *Brittleness test* (S20) pretende-se executar o ensaio de friabilidade, que consiste em analisar numa amostra de material rochoso com fração granulométrica de 11,2 a 16 mm, a facilidade que tem em fragmentar.

Desta forma, o procedimento deste ensaio é o seguinte: “numa amostra de rocha depois de fragmentada no britador, é crivada na fração 11,2 a 16 mm, 0,5 kg de amostra com 2,65 kg/dm<sup>3</sup>. Essa amostra é sujeita a 20 impactos de uma massa de 14 kg caída de uma altura de 25 cm” (Ramos, 2008). O valor S20 corresponde à percentagem de material que apresenta granulometria inferior a 11,2 mm e o resultado é alcançado após realização de 3 ensaios.

### 3.5. Determinação da forma das partículas

No estudo da forma dos agregados, é necessário ter em consideração alguns parâmetros geométricos, como a espessura, largura e comprimento das partículas (Ribeiro, 2009). A determinação da forma das partículas faz-se através do índice de achatamento (*FI*) e do índice de forma (*SI*).

#### 3.5.1. Índice de achatamento

O índice de achatamento tem como objetivo avaliar o achatamento e a regularidade das partículas que constituem a amostra de ensaio (Saraiva, 2009). Este ensaio consiste na realização de duas operações de peneiração.

Na primeira separação, utilizam-se os peneiros de ensaio para separar o provete em várias frações granulométricas, onde se pesa e regista a massa que passa no peneiro de 4 mm e a que fica retida no peneiro de 80 mm. Numa segunda separação, as frações obtidas entre os 4 e os 80 mm, voltam a ser separadas em peneiros de barras com ranhuras paralelas (Figura 23). No fim, deve-se pesar e registar cada fração granulométrica adquirida pelo peneiro de barras.



**Figura 23** – Peneiros de barras.

O índice de achatamento (*FI*) é calculado através da Equação 6 que corresponde “à massa total de partículas que passam nos peneiros de barras, expressa em percentagem da massa total seca das partículas ensaiadas” (NP EN 933 – 3: 2011).

$$FI = \frac{M_2}{M_1} \times 100$$

**Equação 6** – Índice de achatamento – *FI* (NP EN 933 – 3: 2011).

Onde:

$M_1$  – Soma das massas, em gramas (g), das partículas secas constituintes de cada uma das frações granulométricas  $d_i/D_i$ ;

$M_2$  – Soma das massas, em gramas (g), das partículas secas de cada uma das frações granulométricas que passam pelo peneiro de barras correspondentes, com ranhura de largura  $D_i/2$ .

### 3.5.2. Índice de forma

O ensaio para determinar o índice de forma baseia-se na relação entre o comprimento ( $L$ ) e a espessura ( $E$ ) das partículas, utilizando um paquímetro para conseguir classificar os parâmetros

(Figura 24). “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).



Figura 24 – Paquímetro digital.

O procedimento a aplicar no provete de ensaio é escolhido de acordo com a fração granulométrica inicial da amostra. Se a amostra  $d_i/D_i$  respeitar o critério  $D_i \leq 2d_i$  (por exemplo, um agregado 8/16), deve-se seguir o procedimento indicado na norma para “*Provetes em que  $D \leq 2d$* ” e aplicar a Equação 7 para determinar o índice de forma. Caso a amostra  $d_i/D_i$  não respeite o critério que foi mencionado (por exemplo, um AGE 0/32), o procedimento aplicar é o indicado em “*Provetes em que  $D > 2d$* ” e utiliza-se a Equação 8 para obter o índice de forma.

$$SI = \frac{M_2}{M_1} \times 100$$

**Equação 7** – Índice de forma ( $SI$ ) para provetes em que  $D \leq 2d$  (NP EN 933 – 4: 2002).

Onde:

$M_1$  – Massa do provete de ensaio, em gramas (g);

$M_2$  – Massa das partículas não cúbicas, em gramas (g).

$$SI = \frac{\sum M_{2i}}{\sum M_{1i}} \times 100$$

**Equação 8** – Índice de forma ( $SI$ ) para provetes em que  $D > 2d$  (NP EN 933 – 4: 2002).

Onde:

$\Sigma M_1$  – Soma das massas, das partículas de cada uma das frações granulométricas ensaiadas, em gramas (g);

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

### 3.6. Determinação da resistência ao desgaste

O ensaio da determinação da resistência ao desgaste (micro-Deval) tem como objetivo “*medir o desgaste por abrasão e choque (fricção) das partículas do agregado (10/14 mm) e uma carga abrasiva num tambor rotativo, em dadas condições*” (Coutinho, 1999) com vista no final do ensaio determinar o coeficiente micro-Deval ( $M_{DE}$ ). Em comparação com o ensaio de *Los Angeles*, que é executado em meio seco, o ensaio micro-Deval avalia a capacidade e resistência à degradação do agregado em meio húmido, proporcionando resultados mais realistas das condições *in situ* que o agregado irá ser empregue (Gökalp *et al.*, 2016; Tanyu *et al.*, 2017).

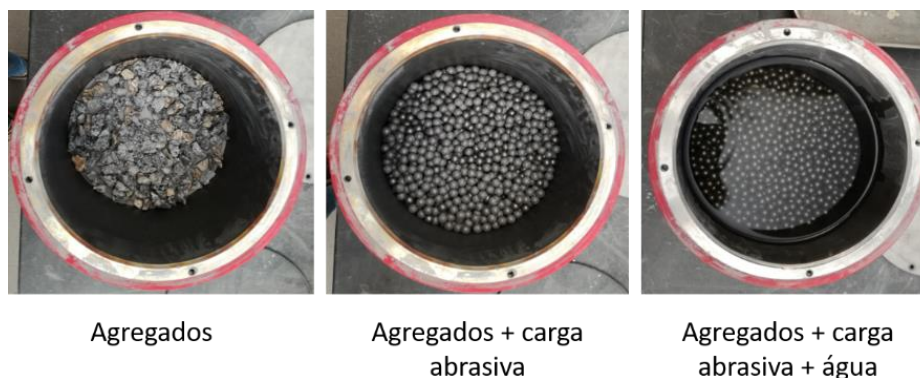
Segundo Coutinho (1999), quanto menor for o valor do coeficiente micro-Deval, maior é a resistência ao desgaste e, porventura, maior será a resistência mecânica do agregado. Outros estudos relacionam a quantidade de minerais brandos (com baixa dureza) com o coeficiente micro-Deval. Quanto maior for a quantidade de minerais brandos numa amostra de agregado, maior será o valor do coeficiente  $M_{DE}$  devido à fraca resistência dos minerais face ao desgaste abrasivo (Benediktsson, 2015).

#### **Procedimento do ensaio**

A amostra que contém granulometria entre os 10 e 14 mm, é peneirada com peneiros de abertura de 10, 12,5 e 14 mm, até obter os 2 kg mínimos de amostra inicial. É preciso ter em consideração que a massa que passa no peneiro de 12,5 mm deve respeitar o critério mencionado na norma, ou seja, corresponder a cerca de 60 % a 70 % da massa total.

Depois de obter a massa mínima de 2 kg, as frações devem ser lavadas e secadas na estufa em separado, para que após o arrefecimento das frações a temperatura ambiente, mistura-las até obter uma amostra laboratorial modificada. A amostra é reduzida a dois provetes, cada um com 500 ( $\pm 2$ ) g seguindo a NP EN 932 – 2 sobre os métodos de redução de amostras laboratoriais.

Seguidamente, cada provete é colocado num cilindro juntamente com 5000 ( $\pm 5$ ) g de esferas de aço e 2,5 ( $\pm 0,05$ ) dl de água (Figura 25), que após colocação da tampa do cilindro, vão ser rodados a uma velocidade de 100 ( $\pm 5$ ) rpm durante 12 000 ( $\pm 10$ ) voltas. No final das rotações, retira-se o material e as esferas do interior do cilindro e realiza-se a lavagem do interior e da tampa do cilindro.



**Figura 25** – Sequência da colocação do material no cilindro do micro-Deval.

O material fragmentado e a água recolhida da lavagem são depositados num peneiro de 1,6 mm, que se encontra protegido por um de 8 mm com o objetivo de separar as esferas de aço do material fragmentado. Por último, coloca-se num tabuleiro o provete fragmentado retido no peneiro de 8 mm e no de 1,6 mm, que é colocado numa estufa a secar. O coeficiente micro-Deval (Equação 9) corresponde à percentagem da amostra inicial de agregados 10/14 que foi reduzida a uma dimensão inferior a 1,6 mm durante a rotação do tambor.

$$M_{DE} = \frac{m_1 - m_2}{5}$$

**Equação 9** – Coeficiente micro-Deval –  $M_{DE}$  (NP EN 1097 – 1: 2012).

Onde:

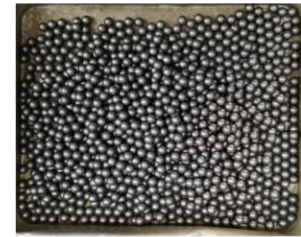
$M_{DE}$  – Coeficiente micro-Deval (no estado húmido);

$m_1$  – Massa inicial do provete, em gramas (g);

$m_2$  – Massa das partículas de dimensão superior a 1,6 mm, em gramas (g).

### **Equipamento micro-Deval**

O equipamento micro-Deval (Figura 26) é constituído por um a quatro cilindros de aço inoxidável ocos, fechados numa extremidade, estando a extremidade oposta aberta e com um tampo estanque. Os cilindros são colocados sobre dois veios que rodam segundo um eixo horizontal. A carga abrasiva utilizada neste equipamento é composta por esferas de aço com diâmetro de 10 mm.



**Carga abrasiva**

**Figura 26** – Equipamento micro-Deval e carga abrasiva.

### **3.7. Determinação da resistência à fragmentação**

Segundo a norma EN 1097-2: 2011, a determinação da resistência à fragmentação pode ser realizada através de dois ensaios: *Los Angeles* ou fragmentação por impacto. No estudo desta dissertação, será executado o ensaio de *Los Angeles*. O objetivo da elaboração do ensaio de *Los Angeles* em agregados grossos é avaliar o desgaste do material fragmentado através da sua capacidade de resistência à abrasão por meios mecânicos. Quanto menor for o valor do coeficiente de *Los Angeles*, melhores são as características do agregado quanto à resistência ao impacto e abrasão (Benediktsson, 2015).

#### **Procedimento do ensaio**

A amostra inicial deve conter no mínimo cerca de 15 kg de material entre a fração granulométrica de 10 a 14 mm, que seguidamente, é peneirada e separada por peneiros de 10, 12,5 e 14 mm. Como no ensaio de micro-Deval, a fração entre 10 e 12,5 mm deve respeitar a condição de estar entre 60 % a 70 % da massa inicial.

Depois de preparada a amostra segundo a norma de *Los Angeles* (lavagem, secagem na estufa, arrefecimento das frações a temperatura ambiente e mistura das frações até obter uma amostra laboratorial modificada), reduz-se a amostra para um provete de ensaio com cerca de 5000 ( $\pm 5$ ) g. O provete é colocado na máquina de *Los Angeles* juntamente com uma carga abrasiva (onze esferas de aço, com características específicas) (Figura 27) que vão rodar 500 voltas num cilindro rotativo a uma velocidade constante (entre 31 r/min a 33 r/min), de forma a que o material seja desgastado

e fragmentado. No final das rotações, retira-se todo o material do interior do cilindro para um tabuleiro colocado debaixo da máquina de *Los Angeles* e separa-se com cuidado as esferas do provete. O provete fragmentado é lavado e separado com um peneiro de 1,6 mm, em que a fração que fica retida é seca até obter uma massa constante.



**Carga abrasiva**

**Figura 27** – Equipamento de *Los Angeles* e carga abrasiva.

Por fim, determina-se o coeficiente de *Los Angeles* (Equação 10) que consiste na percentagem da amostra ensaiada que fica retida no peneiro de 1,6 mm.

$$LA = \frac{m_1 - m_2}{50}$$

**Equação 10** – Coeficiente de *Los Angeles* – LA (NP EN 1097 – 2: 2011).

Onde:

LA – Coeficiente de *Los Angeles*;

$m_1$  – Massa inicial do provete, em gramas (g);

$m_2$  – Massa retida no peneiro de 1,6 mm, em gramas (g).



## ***4. Casos de estudo***



## 4. Casos de estudo

Como já foi aludido, para realizar o trabalho em estudo da dissertação foram utilizadas quatro amostras com composições petrográficas e mineralógicas diferentes, uma vez que duas das amostras são granitos (pedreira de Fornelo e Serdedelo) e as outras duas, calcários (pedreira de Sangardão e Vale Grande nº2). No mapa da Figura 28 estão indicadas as localizações das pedreiras das amostras em estudo.



**Figura 28** – Mapa de Portugal Continental com as respetivas localizações das amostras em estudo (Fonte do mapa de Portugal: [http://resistir.info/portugal/fusao\\_destrutiva.html](http://resistir.info/portugal/fusao_destrutiva.html); figuras das áreas de exploração: google earth, 2017).

Os tópicos deste capítulo contêm uma síntese do enquadramento de cada pedreira, face à localização, acessos e geologia do local.

## 4.1. Pedreira de Fornelo

A pedreira de Fornelo é uma das pedreiras explorada pelo Grupo Elevo. O método de desmorte realizado na pedreira é em flanco de encosta e em corta, de acordo com o relevo do local de exploração (CCDRn, 2014; Monteiro, 2014). Quanto à instalação de britagem e classificação, a de Fornelo apresenta um processo de fragmentação realizado em três fases: primária com britador de maxilas, secundária e terciária com britadores cónicos (Monteiro, 2014).

### 4.1.1. Localização geográfica e acessos à pedreira

A pedreira de Fornelo localiza-se na união de freguesias de Fornelo e Vairão, concelho de Vila do Conde. As principais povoações situam-se a oeste em Vila Verde, na união de freguesias de Fornelo e Vairão, e a sudeste em Guidões, no concelho da Trofa (Figura 29). O acesso à pedreira é feito pela estrada municipal E.M.534, com um desvio a cerca de 330 m do cruzamento com a estrada Vairão – Porto (CCDRn, 2014; Monteiro, 2014).

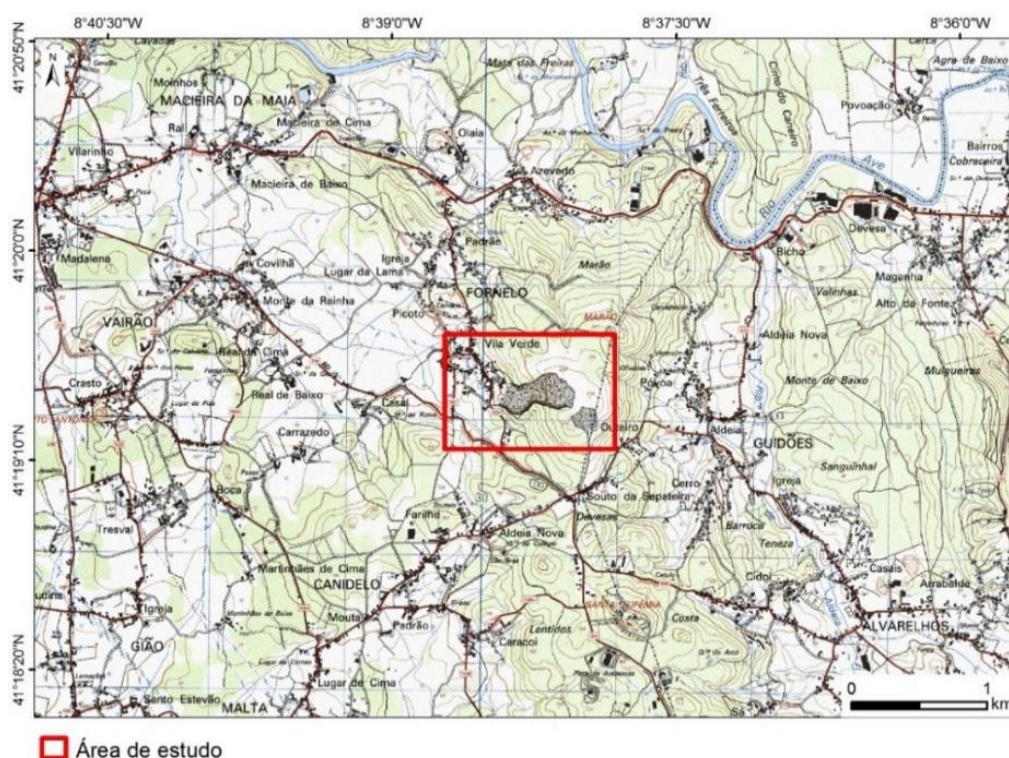
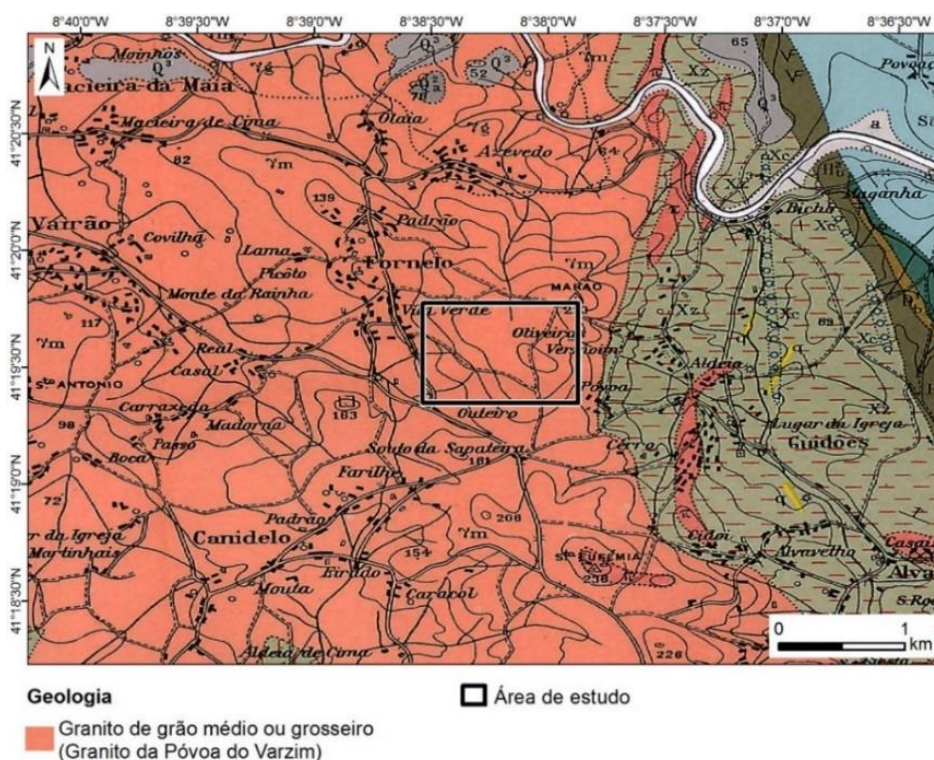


Figura 29 – Extrato da carta militar, folha 97 (Trofa), escala 1/25 000 (IGoE, 2011).

#### 4.1.2. Geologia

Segundo a carta geológica 9 – A à escala 1/50 000 (Figura 30), a pedra localiza-se no designado granito da Póvoa de Varzim, que se caracteriza por um afloramento granítico alcalino de grão médio a grosseiro com composição mineralógica composta por minerais de feldspato potássico, plagioclase, quartzo e biotite (CCDRn, 2014). Esses minerais “*surgem sem evidenciarem qualquer simetria à vista desarmada. São visíveis cristais de biotite e por vezes surgem raros megacristais, em geral com contornos arredondados, de feldspato potássico*” (Monteiro, 2014).

Na análise petrográfica que o Grupo Elevo realiza nas declarações de desempenho dos seus produtos, caracteriza a litologia da pedra de Fornelo como um “*granito ígneo plutónico, hercínico, constituído essencialmente por quartzo (2 a 8 mm), feldspato (2 a 20 mm), micas (0,5 a 2 mm) e outros. Estrutura compacta, com textura holocristalina, fanerítica, grão médio a grosseiro com tendência porfiróide*”.



**Figura 30** – Extrato da carta geológica, folha 9 – A (Póvoa de Varzim), escala 1/50 000 (adaptado de Teixeira & Cândido de Medeiros, 1965).

De acordo com CCDRn (2014), a área de exploração de Fornelo apresenta “*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*”, sendo ainda composto por um “*horizonte de rocha sã constituída por blocos graníticos intactos*”.

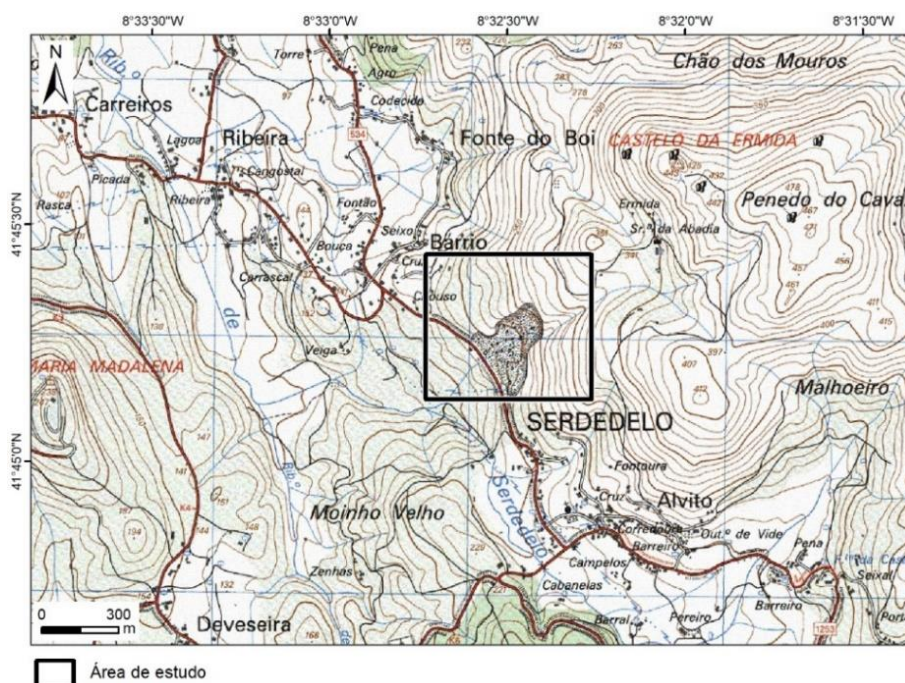
## 4.2. Pedreira de Serdedelo

A pedreira de Serdedelo é explorada pelo Grupo Elevo e apresenta um método de desmonte em flanco de encosta a céu aberto, tendo uma área de exploração composta por 5 bancadas, com alturas a variar entre os 12 e os 15 m (Cevalor, 2015).

A instalação de britagem e classificação de Serdedelo é formado por duas instalações de produção. A instalação principal é constituída por um fragmentador de maxilas e dois cónicos, que tem o objetivo de fragmentar o material até alcançar as especificações pretendidas da produção. A segunda instalação está interligada à primeira e destina-se à produção de areias com a classificação do agregado 0/6 (Cevalor, 2015).

### 4.2.1. Localização geográfica e acessos à pedreira

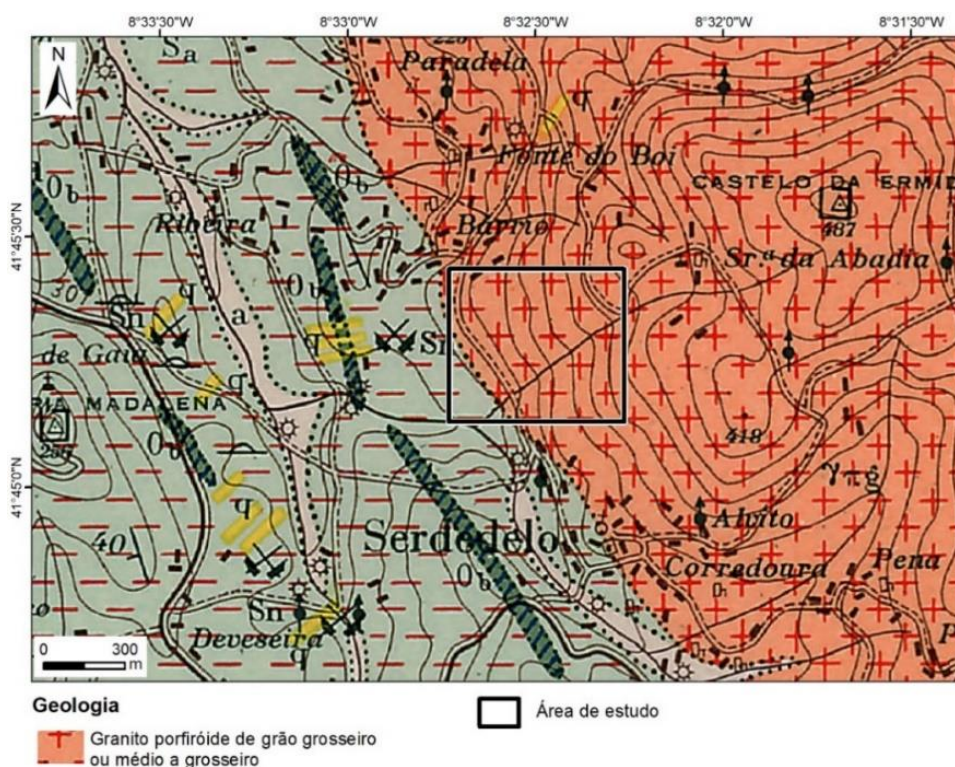
A pedreira de Serdedelo localiza-se entre as freguesias de Ribeira e Serdedelo (situada maioritariamente na freguesia de Ribeira), no concelho de Ponte de Lima, distrito de Viana do Castelo (Figura 31). Esta exploração apresenta um único acesso, através da estrada municipal 534 que se situa do lado noroeste da pedreira de Serdedelo e aproximadamente a 3 km da bifurcação da EN 203 para a EM 534 (Cevalor, 2015).



**Figura 31** – Extrato da carta militar, folha 28 (Ponte de Lima), escala 1/25 000 (IGeoE, 2015).

## 4.2.2. Geologia

A área de exploração de Serdedelo localiza-se na carta geológica 5 – A, Viana do Castelo (Figura 32) e situa-se num granito porfiróide de grão grosseiro ou médio a grosseiro, caracterizado por um granito calco-alcalino, “biotítico, exibindo uma foliação de fluxo materializada sobretudo pelo alinhamento dos cristais de biotite e, por vezes, de megacristais de plagioclase” (Ramos, 2008).



**Figura 32** – Extrato da carta geológica, folha 5 – A (Viana do Castelo), escala 1/50 000 (adaptado de Cândido de Medeiros & Teixeira, 1970).

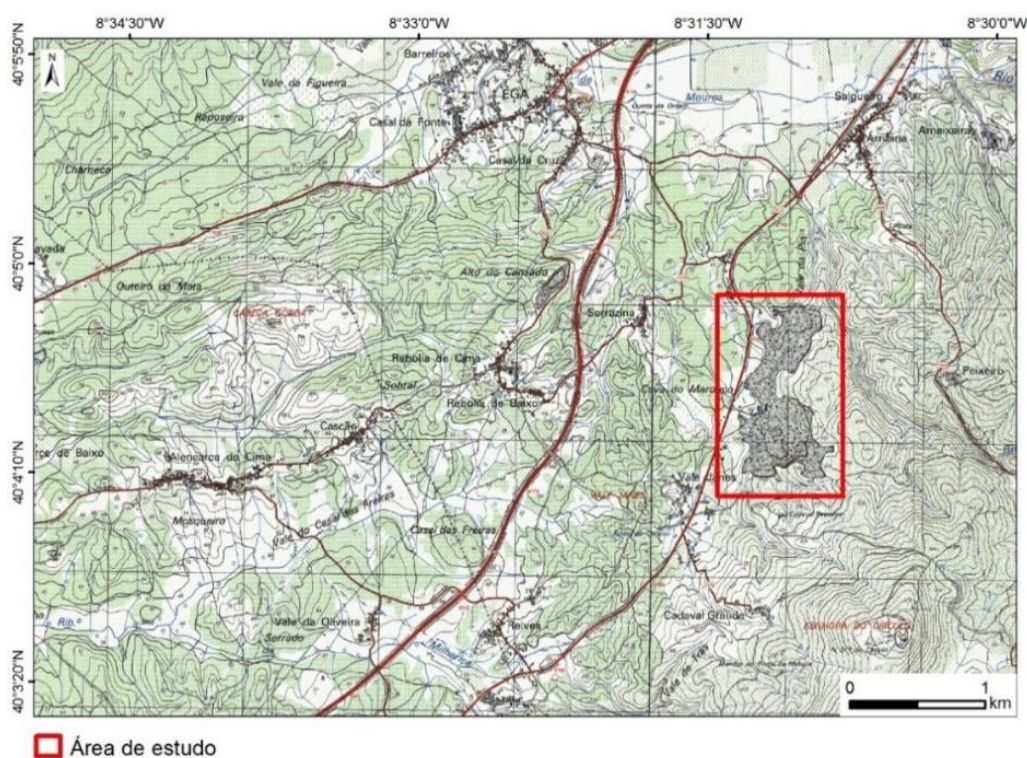
Segundo as declarações de desempenho do Grupo Elevo, a análise petrográfica da pedra de Serdedelo caracteriza-se por um “granito ígneo, hercínico, constituído essencialmente por quartzo (2 a 8 mm), feldspato (2 a 20 mm), micas (0,5 a 2 mm) e outros. Estrutura compacta, com textura holocristalina, fanerítica, grão médio a grosseiro com tendência porfiróide.” A estrutura granítica entra em contacto com “rochas metamorfolizadas tais como xistos e grauvaques com intercalações de xistos grafitosos e liditos, com graptólitos” (Cevalor, 2015). O perfil de alteração da área de escavação é idêntico à da pedra de Fornelo, apresentando uma fina camada de terra vegetal, seguida por uma camada de saibro granítico com espessura a variar consoante a transição para a rocha sã e por último, a rocha granítica sã (Cevalor, 2015).

### 4.3. Pedreira de Sangardão

A pedreira de Sangardão é explorada pela Agrepor Agregados, Extração de Inertes, S.A., do Grupo Cimpor da empresa *InterCement*. A pedreira de Sangardão apresenta um método de desmonte em flanco de encosta no sentido este – sudeste (E – SE) com cotas a variar, aproximadamente, entre 105 e 200 m (Queirós, 2014).

#### 4.3.1. Localização geográfica e acessos à pedreira

A pedreira de Sangardão localiza-se na freguesia de Furadouro, uma das freguesias situada a sudoeste do concelho de Condeixa-a-Nova, distrito de Coimbra, e na proximidade da freguesia de Ega. A área de exploração encontra-se enquadrada a norte pela pedreira do Vale da Pia (freguesia de Ega), a este e a sul pelas vertentes do Cruto e da elevação do Circulo, respetivamente (Figura 33).



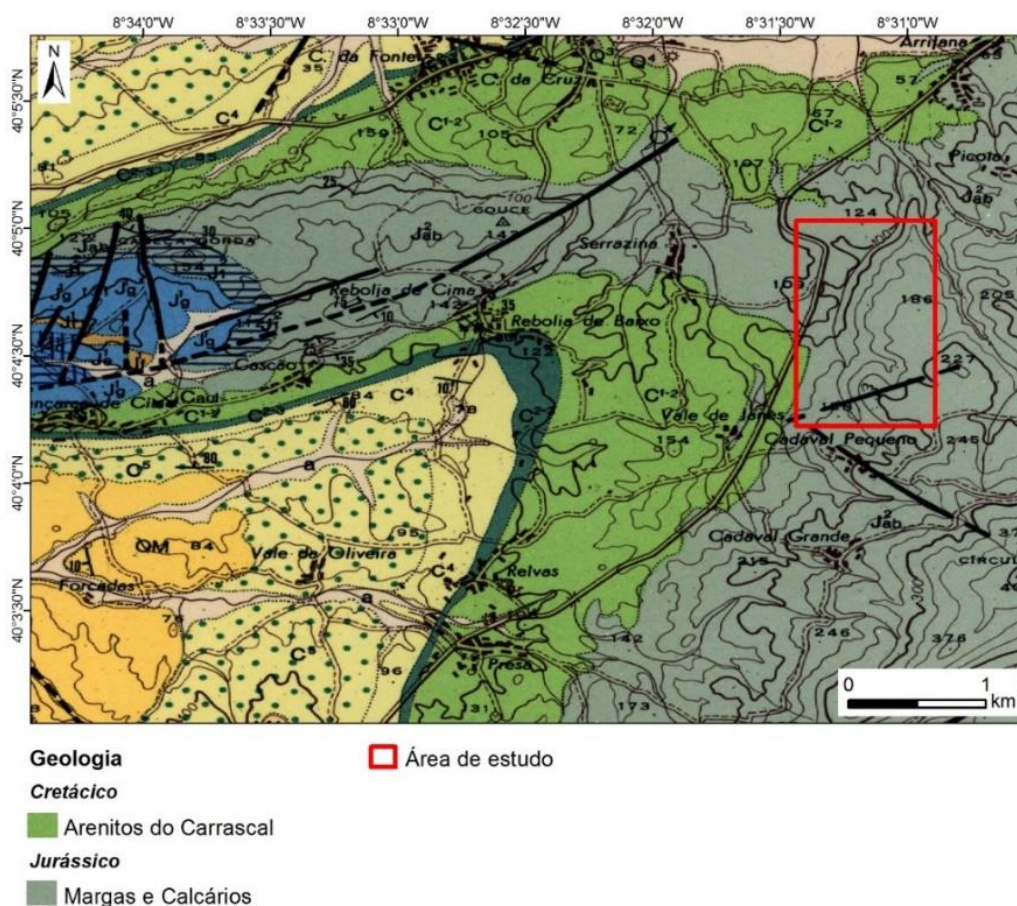
**Figura 33** – Extrato da carta militar, folha 250 (Soure) e 251 (Condeixa-a-Nova), escala 1/25 000 (IGeoE, 2001 e IGeoE, 2002).

Quanto aos acessos, a estrada nacional IC2 passa na extremidade oeste da pedreira de Sangardão (Figura 33). A autoestrada A1 também permite o acesso à pedreira, contudo, é necessário após saída da autoestrada circular por vias secundárias de acesso às povoações para chegar ao local.

### 4.3.2. Geologia

A área de exploração de Sangardão situa-se na carta geológica 19 – C, Figueira da Foz, e como se pode ver na Figura 34, localiza-se na formação do Jurássico Médio, mais precisamente no Bajociano e Batoniano, apresentando uma litologia de calcários compactos bem estratificados de cor cinzenta escura a bege (Queirós, 2014; Carvalhais *et al.*, 2016).

A formação calcária apresenta-se muito estratificada e encontra-se intercalada por falhas que tem espessura a variar entre poucos centímetros a cerca de 2 m (Queirós, 2014; Carvalhais *et al.*, 2016). As falhas apresentam um preenchimento composto por “*materiais argilosos ou areno-argilosos e apresentam, em geral, orientações sub-verticais, grosso modo concordantes com o padrão tectónico regional, evidenciado pela presença das famílias de fraturas NNE-SSW, NE-SW e com menor expressão, NW-SE*” (Carvalhais *et al.*, 2016).



**Figura 34** – Extrato da carta geológica, folha 19 – C (Figueira da Foz), escala 1/50 000 (adaptado de Manuppella *et al.*, 1976).

#### 4.4. Pedreira Vale Grande nº2

A pedreira Vale Grande nº2 é explorada pela Agrepor Agregados, Extração de Inertes, S.A., do Grupo Cimpor da empresa *InterCement*, e por se situar perto de outra pedreira explorada pelo mesmo grupo (pedreira Santa), partilham equipamentos e recursos humanos (Visa Consultores, 2008).

##### 4.4.1. Localização geográfica e acessos à pedreira

A pedreira Vale Grande nº2 situa-se na Serra de Ota, mais precisamente na freguesia de Meca, concelho de Alenquer, pertencendo ao núcleo de explorações de calcários de Alenquer Norte (Visa Consultores, 2008). As povoações que estão mais próximas da exploração é a de Bugarréus a noroeste, a Carapinha a sul, e por fim, Casais Pedreira do Lima, Canados e Fiandal que se localizam ambas a oeste (Figura 35).

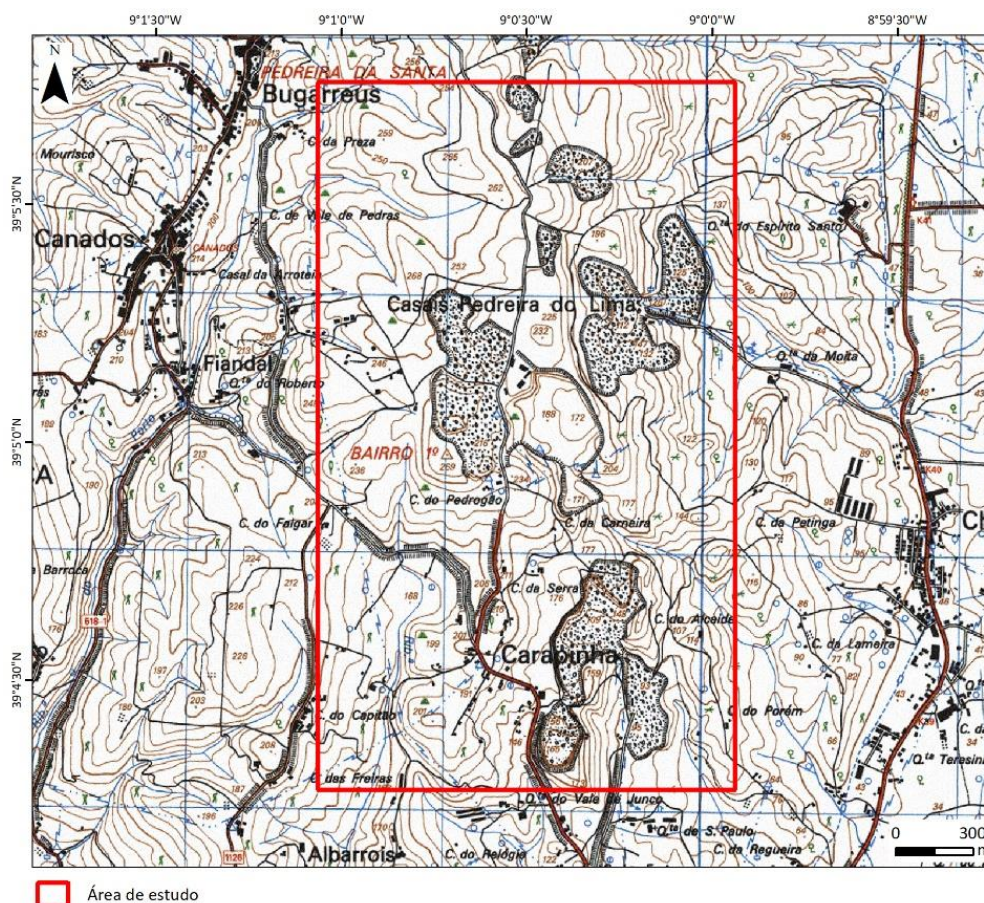


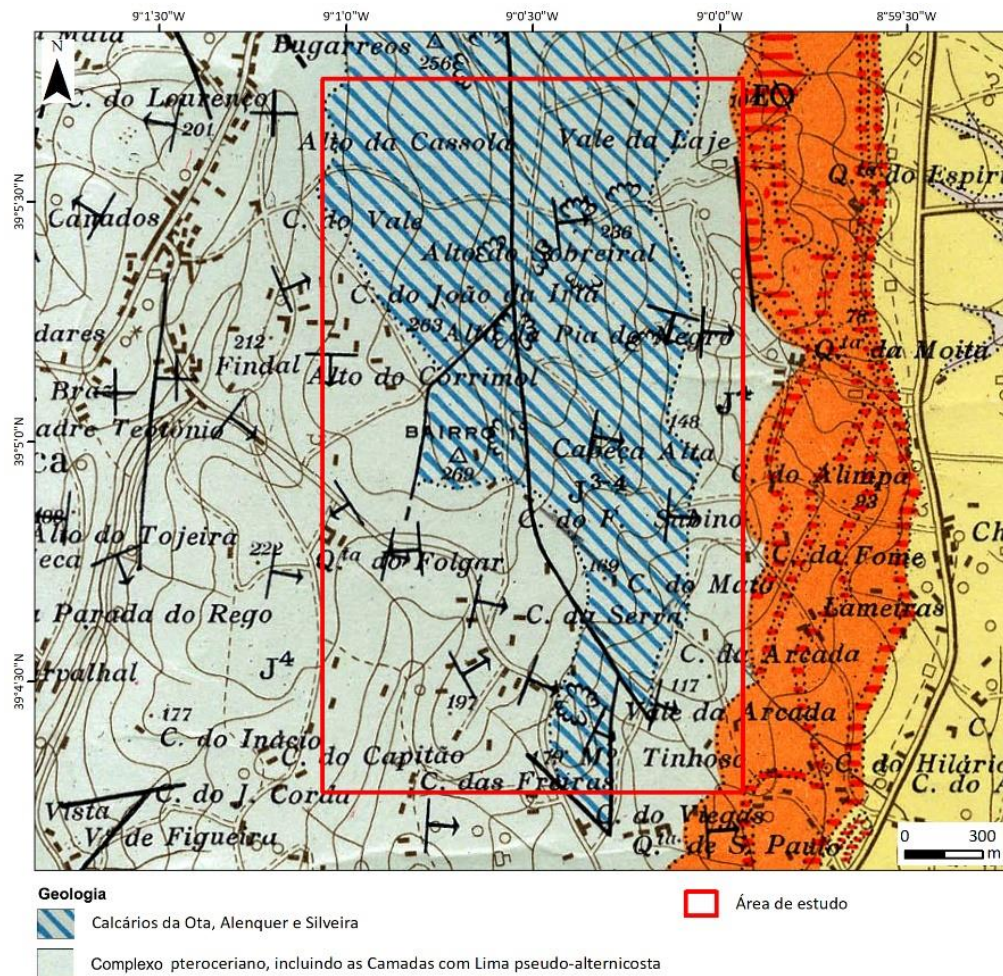
Figura 35 – Extrato da carta militar, folha 376 (Alenquer), escala 1/25 000 (IGeoE, 1992).

Quanto ao acesso à pedreira, é realizado no entroncamento ao quilómetro 37 da EN 1 em direção a oeste para a EM 518, que após percorridos cerca de 2 km na estrada municipal, deve-se dirigir para norte no entroncamento que dá acesso ao núcleo de explorações de Alenquer e percorrer

mais 1 km nessa estrada para encontrar o acesso à pedreira Vale Grande nº2 (Visa Consultores, 2008).

#### 4.4.2. Geologia

A pedreira Vale Grande nº2 localiza-se a norte da carta geológica 30 – D (Alenquer), situa-se na formação geológica Kimeridgiano, caracterizada por calcários de Ota, Alenquer e Silveira (J<sup>3-4</sup>), como se pode visualizar na Figura 36. Essa formação é constituída por “*calcários cristalinos, homogêneos, bastante compactos, esbranquiçados, acinzentados e amarelados*” (APA et al., 2008).



**Figura 36** – Extrato da carta geológica, folha 30 – D (Alenquer), escala 1/50 000 (adaptado de França et al., 1962).

Segundo a notícia explicativa da carta geológica 30 – D (Alenquer), entre a Serra de Atougua e a Serra de Ota há presença de três afloramentos calcários, sendo que a pedreira em estudo se localiza num grande afloramento calcário que apresenta uma extensão aproximada de 7 km e uma largura

máxima de 2,5 km, que tende a diminuir à medida que se aproxima da sua extremidade sul (Zbyszewski & Torres de Assunção, 1965).

## ***5. Ensaaios laboratoriais***



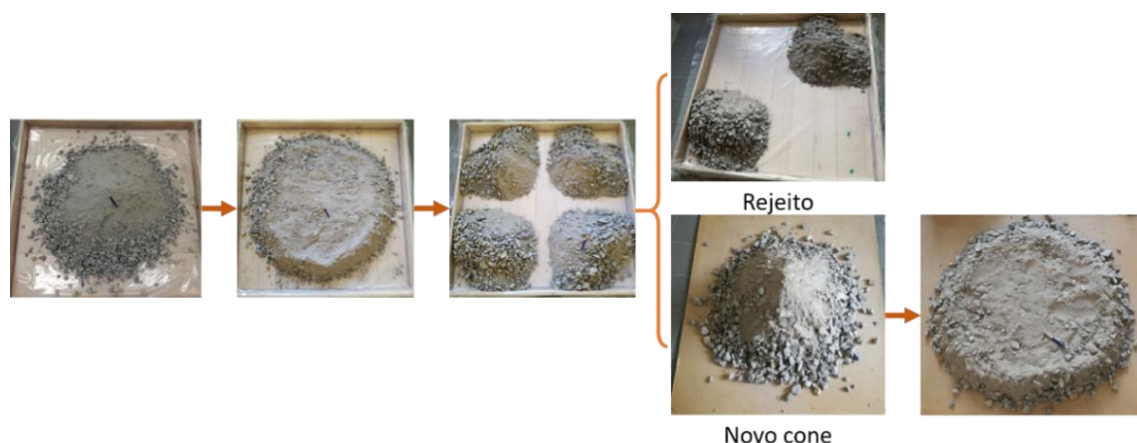
## 5. Ensaaios laboratoriais

---

Para uma subsequente análise e correlação dos resultados, as amostras provenientes das pedreiras patenteavam a mesma fração granulométrica, ou seja, agregados com granulometria 0/32 mm.

Antes da execução dos provetes de ensaio, foi necessário preparar a amostra integral para ficar uniformemente distribuída quanto às dimensões dos agregados e proceder, segundo as normas dos respetivos ensaios, à sua redução para os provetes.

Desta forma, adaptando o processo de esquarteamento indicado na norma EN 932 – 2: 2002, executou-se a redução da amostra como se pode visualizar no exemplo da Figura 37, que apresenta a redução inicial da amostra de Serdedelo. O esquarteamento iniciou-se com a formação de um cone, que foi achatado até obter uma espessura e diâmetro uniforme. Seguidamente, o cone é dividido em quatro partes aproximadamente iguais, em que se despreza dois lados opostos e com os outros dois quartos, forma-se um novo cone e volta-se a repetir o processo até obter o provete de ensaio pretendido.



**Figura 37** – Esquarteamento na amostra integral da pedreira de Serdedelo.

O material rochoso identificado na Figura 37 como “rejeito” é, por princípio, guardado no laboratório. Porém, nos ensaios laboratoriais apresentados nesta dissertação, esse material voltou a ser utilizado na preparação dos provetes de ensaio, uma vez que não havia material suficiente para cumprir com as quantidades mencionadas nas normas face às frações granulométricas.

Na preparação dos provetes de ensaio, de forma a permitir a posterior correlação dos dados, foram tidas as seguintes considerações:

- Em termos do mesmo ensaio, houve o cuidado das massas iniciais nas quatro amostras não se diferenciarem muito;
- No ensaio de análise granulométrica, o procedimento de ensaio adotado foi a lavagem dos agregados, seguido de peneiração após secagem da amostra;
- Na análise química, para cada amostra, foram preparados três provetes para serem analisados, de forma a permitir uma concentração média adequada de cada composto químico;
- No ensaio do índice de forma:
  - O procedimento seguido foi “Provetes em que  $D > 2d$ ”;
  - As frações granulométricas obtidas após separação do provete inicial por peneiração (condição respeitada: “ $D_i \leq 2d_i$ ”): 4/8, 8/16, 16/31,5 e 31,5/63;
  - Após a peneiração, as frações granulométricas com percentagem em massa superior a 10% da massa inicial, sofreram uma redução de dois terços (2/3) ou um quarto (1/4) da amostra inicial (valor indicado nos relatórios dos ensaios no Anexo I), originando um provete significativo para o estudo do índice de forma. Contudo, algumas frações apresentavam menos de 100 partículas quando foram reduzidas.

Os ensaios laboratoriais foram realizados segundo as normas e procedimentos indicados nas metodologias, exceto a análise mineralógica cujos valores foram consultados no catálogo da INETI/LNEG (2017) e em Ramos (2008).

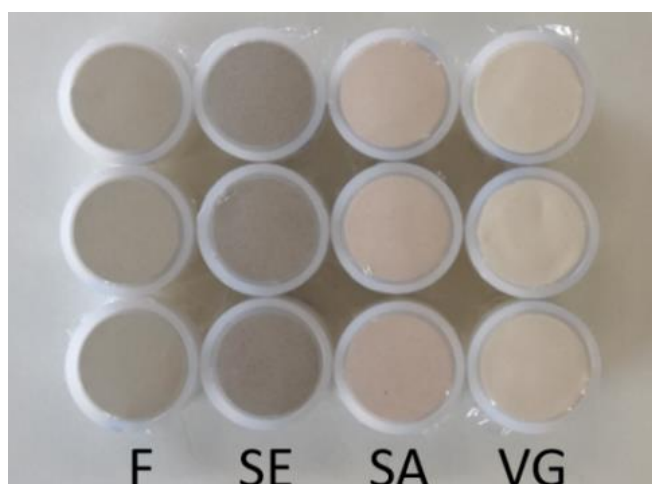
As amostras enviadas para o laboratório foram recolhidas após o segundo estágio de fragmentação. Porém, a amostra de Vale Grande n°2 (calcário) utilizada nos ensaios de micro-Deval, *Los Angeles* e *Brittleness test*, foi sujeita a uma nova fração no Laboratório de Geotecnia e Materiais de Construção do ISEP, por um fragmentador de maxilas. Para esta nova fragmentação, não foram realizados os ensaios de índice de achatamento e de forma.

No que diz respeito aos ensaios de análise granulométrica, *Brittleness test*, índice de achatamento e de forma, resistência ao desgaste (micro-Deval) e à fragmentação (*Los Angeles*), no Anexo I e II estão indicados os relatórios de ensaio e a base de dados, correspondentes de cada amostra.

## 5.1. Análise química

O ensaio de análise química (Figura 38) revelou a presença de diversos elementos químicos com diferentes percentagens nas amostras ensaiadas. Nas amostras de granito, o silício (Si) foi o

elemento químico com maior percentagem (cerca de 25 %). Contudo, no calcário, o cálcio (Ca) é o elemento preponderante, com cerca de 40 %.



**Figura 38** – Copos das amostras ensaiadas na análise química (F – Fornelo; SE – Serdedelo; SA – Sangardão; VG – Vale Grande nº2).

Para esta análise converteu-se os elementos químicos em concentrações de óxidos (Anexo III). A Tabela 6 contém as concentrações médias dos óxidos ( $\bar{x}$ ) com maior relevo nas amostras em estudo, assim como os respetivos desvios padrão ( $\sigma$ ). Na coluna designada por “Outros”, estão inseridas todas as concentrações, dos outros elementos presentes, com valores pouco significativos das amostras.

**Tabela 6** – Dados obtidos na análise química por fluorescência de Raios X.

Amostras		Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	FeO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	MnO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SiO <sub>2</sub>	SO <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	Outros	Total	
Granitos	Fornelo	$\bar{x}$ (%)	11,342	1,257	2,583	2,871	3,768	0,144	0,357	53,514	-	0,305	23,860	100
		$\sigma$	0,336	0,015	0,031	0,035	0,054	0,004	0,056	0,813	-	0,015		
	Serdedelo	$\bar{x}$ (%)	11,751	1,893	4,037	4,487	3,731	0,092	0,280	53,114	-	0,548	20,066	100
		$\sigma$	0,288	0,013	0,059	0,066	0,030	0,003	0,245	0,667	-	0,017		
Calcários	Sangardão	$\bar{x}$ (%)	2,740	54,795	0,560	0,622	0,201	0,022	-	4,742	0,440	0,076	35,803	100
		$\sigma$	0,492	0,216	0,025	0,027	0,007	0,003	-	0,125	0,071	0,004		
	Vale Grande nº2	$\bar{x}$ (%)	1,318	58,429	0,340	0,378	0,088	0,014	-	3,100	0,083	0,051	36,198	100
		$\sigma$	0,033	0,396	0,028	0,031	0,009	0,001	-	0,074	0,010	0,001		

Segundo a Tabela 6, o composto com maior presença nos granitos é o dióxido de silício (SiO<sub>2</sub>) com valores superiores a 50 %, seguido do óxido de alumínio (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) com valores entre os 11 e 12 %. Nos calcários, o óxido de cálcio (CaO) apresenta-se com valores superiores a 50 %, nas duas amostras.

## 5.2. Análise mineralógica

Como foi mencionado, o estudo da análise mineralógica presente na dissertação foi realizado com recurso a referências bibliográficas (Anexo IV). Os dados da pedreira de Serdedelo tiveram como referência bibliográfica Ramos (2008), enquanto as outras amostras foram consultadas no catálogo *online* das rochas ornamentais do INETI/LNEG (2017). Face aos dados consultados no catálogo, realça-se que as percentagens dos minerais, indicadas na Tabela 7, são valores médios.

Como não havia dados referentes as áreas em estudo, fez-se uma média das percentagens dos minerais presentes nas rochas envolventes as pedreiras e que apresentavam características semelhantes as indicadas no capítulo “Casos de estudo”.

**Tabela 7** – Análise mineralógica das amostras em estudo (adaptado de INETI/LNEG, 2017; Ramos, 2008).

Minerais	Percentagens dos minerais (%)			
	Fornelo	Serdedelo	Sangardão	Vale Grande n°2
Feldspato potássico	27	34	-	-
Plagioclase	28	28	-	-
Biotite	5	8	-	-
Moscovite	12	4	-	-
Quartzo	27	23	<1	-
Zircão	<1	<1	-	-
Apatite	<1	<1	-	-
Silimanite	-	<1	-	-
Calcite	-	-	99	100
Minerais opacos (*)	<1	-	-	-
Materiais argilosos e outros	-	-	Vest.	-

Vest. = Vestígios

(\*): os dados no catálogo da INETI/LNEG não indicam quais os minerais opacos que se referem. Contudo, os minerais acessórios que costumam estar presentes nos granitos e que tem brilho metálico ou sub-metálico (minerais opacos) são a magnetite, ilmenite e hematite (Costa, 1985).

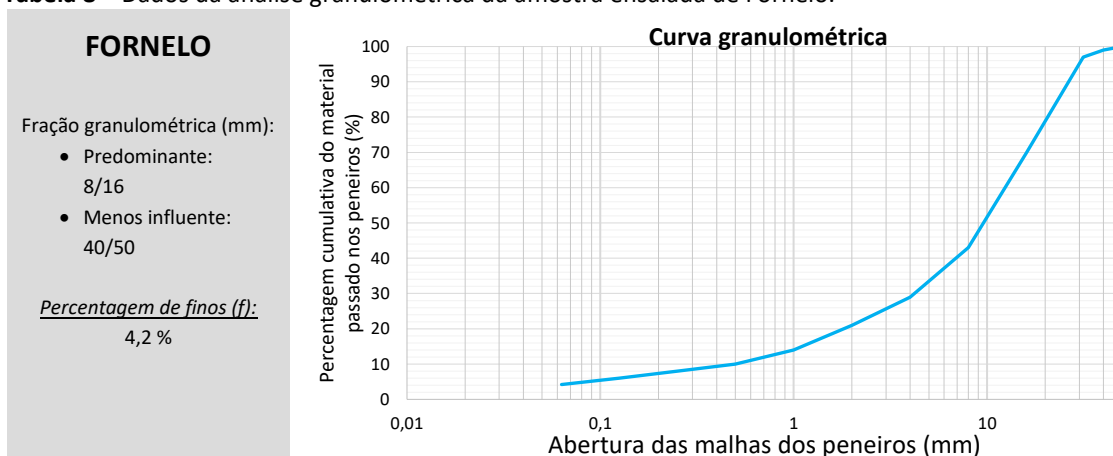
No caso dos granitos, os minerais essenciais que conferem a identidade da rocha, são os feldspatos, que marcam presença como feldspato potássico e plagioclase, e o mineral de quartzo. Destaca-se que esses minerais apresentam proporções diferentes nas duas amostras em estudo, em que o quartzo patenteia maior percentagem na amostra de Fornelo, enquanto os feldspatos têm maior presença na de Serdedelo.

Nos calcários, o mineral essencial é a calcite, que constitui cerca de 99 a 100 % das amostras em estudo.

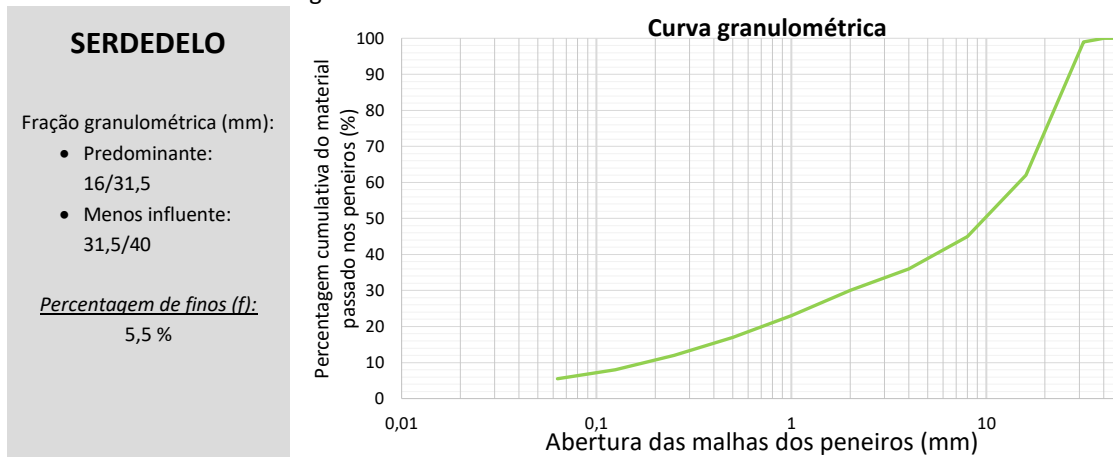
### 5.3. Análise granulométrica

O ensaio de análise granulométrica foi realizado com o intuito de conhecer a distribuição granulométrica do produto em estudo e perceber como as características litológicas e os fragmentadores utilizados manipulam o tamanho dos agregados. Através da análise das percentagens cumulativas do material passado nos peneiros (Anexo I e II), executaram-se as Tabelas 8, 9, 10 e 11, sobre os dados de cada amostra.

**Tabela 8** – Dados da análise granulométrica da amostra ensaiada de Fornelelo.

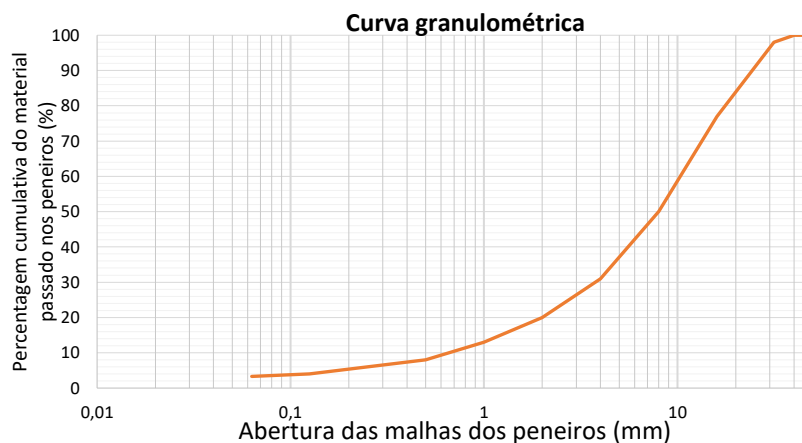


**Tabela 9** – Dados da análise granulométrica da amostra ensaiada de Serdedelo.



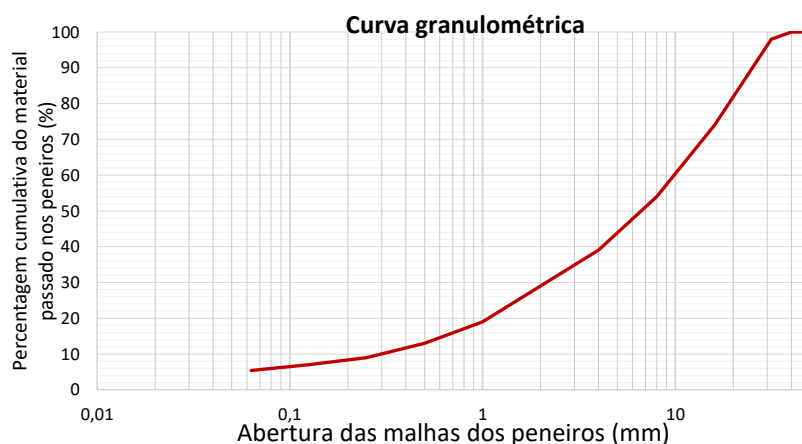
**Tabela 10** – Dados da análise granulométrica da amostra ensaiada de Sangardão.

<b>SANGARDÃO</b>	
Fração granulométrica (mm):	
• Predominante:	8/16
• Menos influente:	0,063/0,125
<u>Porcentagem de finos (f):</u>	
	3,3 %



**Tabela 11** – Dados da análise granulométrica da amostra ensaiada de Vale Grande n°2.

<b>VALE GRANDE N°2</b>	
Fração granulométrica (mm):	
• Predominante:	16/31,5
• Menos influente:	0,063/0,125
<u>Porcentagem de finos (f):</u>	
	5,4 %



Para analisar as quatro distribuições granulométricas foram analisados três pontos em cada curva referente à porcentagem de 5 % (P<sub>5</sub>), 10 % (P<sub>10</sub>) e 80 % (P<sub>80</sub>) do material passado (Tabela 12).

**Tabela 12** – Pontos analisados nas curvas granulométricas em estudo.

Amostras		P <sub>5</sub> (mm)	P <sub>10</sub> (mm)	P <sub>80</sub> (mm)
Granitos	Fornelo	0,091	0,500	21,741
	Serdedelo	< 0,063	0,188	23,541
Calcários	Sangardão	0,188	0,700	18,214
	Vale Grande n°2	< 0,063	0,312	19,875

Perante esta análise, conclui-se que as distribuições granulométricas apresentam algumas diferenças face às porcentagens das frações. Isso pode derivar do tipo de fragmentador utilizado e das características das amostras em estudo.

## 5.4. Ensaio de determinação da forma (índice de achatamento e de forma)

Ao comparar estes dois ensaios na mesma amostra, observa-se que os valores obtidos nos índices são relativamente idênticos (Tabela 13).

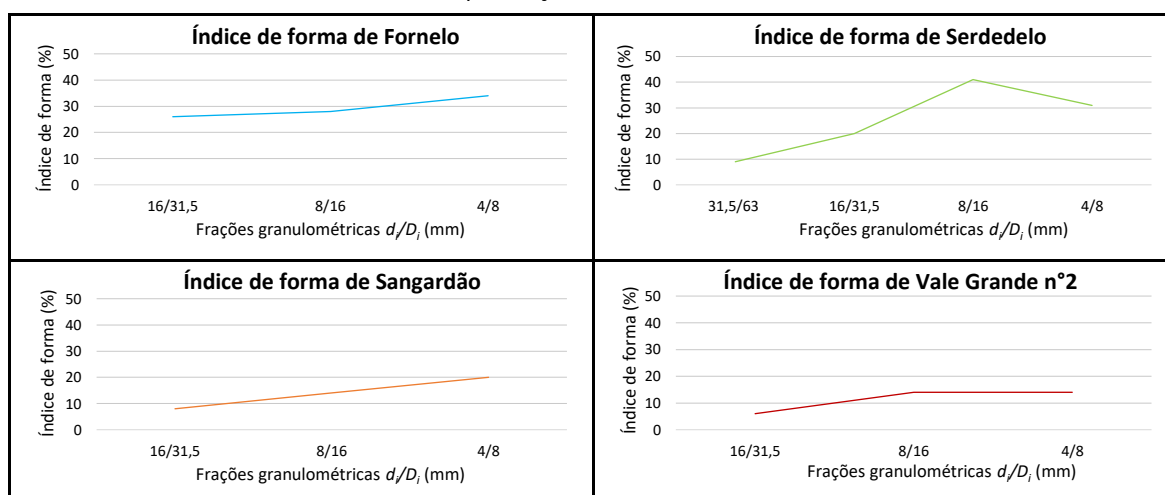
Em termos de litologias, as amostras de calcário expressam índices menores que os de granito, o que indica que em termos de forma, os calcários analisados são mais cúbicos. O formato das partículas está ligado as sucessivas fragmentações que os agregados são sujeitos, assim, como o tipo de fragmentador utilizado.

**Tabela 13** – Dados dos índices de achatamento e de forma das amostras ensaiadas.

	Amostras	Índice de achatamento – FI (%)	Índice de forma – SI (%)
Granitos	Fornelo	20	29
	Serdedelo	18	23
Calcários	Sangardão	13	14
	Vale Grande n°2	14	11

Perante os gráficos das frações no índice de forma (Tabela 14), em média, quanto menor é a fração, maior é a relação entre o comprimento e espessura dos agregados, ou seja, maior é o índice de forma.

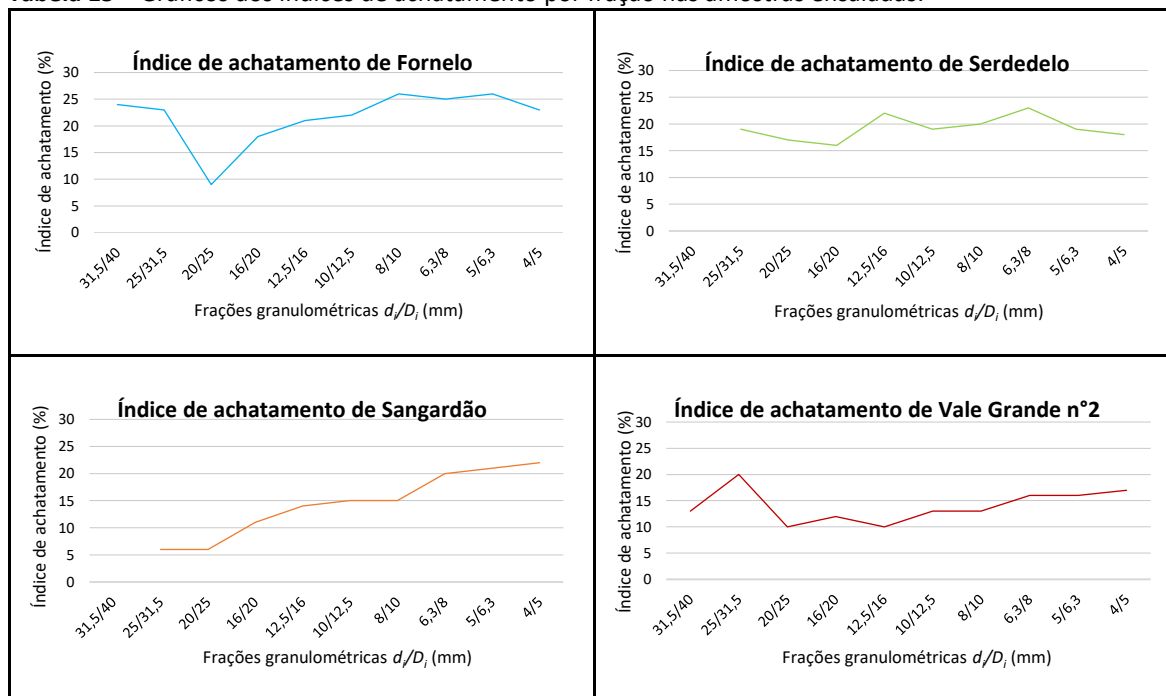
**Tabela 14** – Gráficos dos índices de forma por fração nas amostras ensaiadas.



No caso dos gráficos de índice de achatamento por fração (Tabela 15), constata-se que a amostra de Sangardão apresenta índices de achatamento maiores, à medida que a fração tende a diminuir. O mesmo se conclui relativamente à amostra de Vale Grande n°2, apesar de ter um valor um pouco

diferente na fração 25/31,5. Quanto às amostras de Fornelo e Serdedelo, em média, os seus valores tendem a oscilar entre um determinado intervalo, à exceção da fração 20/25, em Fornelo.

**Tabela 15** – Gráficos dos índices de achatamento por fração nas amostras ensaiadas.



## 5.5. Ensaio de friabilidade – *Brittleness test*

O valor médio do ensaio de friabilidade, S20, permite analisar a resistência da amostra perante uma força de impacto. A fração granulométrica indicada na metodologia deste ensaio, foi adaptada para a fração 12,5/16 mm, uma vez que não há uma norma específica a seguir.

Comparando os valores obtidos no ensaio (Tabela 16), os calcários apresentam percentagens superiores aos granitos, o que indica que as composições destas amostras se apresentam mais suscetíveis à fragmentação. A superfície do granito é composta por minerais de maior dureza em comparação com o calcário, logo, tem tendência a ter maior resistência à rotura e a dificultar a sua fragmentação.

**Tabela 16** – Dados do ensaio de friabilidade (*Brittleness test*).

	Amostras	Ensaio de friabilidade (%)
Granitos	Fornelo	50,2
	Serdedelo	52,4
Calcários	Sangardão	56,7
	Vale Grande nº2	58,6

Como este ensaio permite detetar a facilidade que os materiais rochosos tendem em fragmentar, serviu de base para relacionar as características das amostras analisadas em outros ensaios e compreender se interferem ou não na quebra dos materiais. Deste modo, no capítulo da análise dos resultados, o ensaio de friabilidade (*Brittleness test*) passou a ser designado por “índice de fragmentabilidade” ( $I_f$ ).

## 5.6. Ensaio de micro-Deval

O ensaio de micro-Deval, mede o desgaste por abrasão e choque entre as partículas e é menor quanto maior é a resistência mecânica das amostras ao desgaste por fricção.

Dos resultados em estudo (Tabela 17), a amostra de Fornelo apresenta maior resistência ao desgaste (menor coeficiente de  $M_{DE}$ ) em termos de comparação com as amostras de calcário. Os calcários por serem compostos por uma textura lisa sofrem maior desgaste por fricção face aos granitos, que são compostos por uma textura rugosa.

**Tabela 17** – Dados dos coeficientes de micro-Deval das amostras ensaiadas.

	Amostras	Coefficiente de $M_{DE}$ (%)
Granitos	Fornelo	10
	Serdedelo	16
Calcários	Sangardão	13
	Vale Grande n°2	16

Contudo, as amostras de Serdedelo e Vale Grande n°2, apesar de terem litologias, composições mineralógicas e texturas diferentes, apresentam o mesmo valor de coeficiente de  $M_{DE}$  (16 %). Esta ocorrência pode estar relacionada com a resistência da amostra ou com a presença de minerais na sua superfície que causem maior desgaste ao material.

## 5.7. Ensaio de Los Angeles

Quanto ao ensaio de *Los Angeles*, é necessário frisar que durante a realização dos ensaios, o equipamento perdeu algum material, podendo ter interferido nos resultados obtidos.

Através dos coeficientes de *Los Angeles* (Tabela 18), visualiza-se que não há uma diferença significativa quanto à resistência à fragmentação da amostra de Fornelo e Sangardão, visto que só diferem em cerca de 1 %.

**Tabela 18** – Dados dos coeficientes de *Los Angeles* nas amostras ensaiadas.

	Amostras	Coeficiente LA (%)
Granitos	Fornelo	26
	Serdedelo	33
Calcários	Sangardão	25
	Vale Grande n°2	28

Em termos médios, as amostras de calcário apresentam maior resistência à fragmentação que os granitos. Este facto, pode derivar dos pontos de fraqueza existentes entre os minerais que constituem as amostras de granito, que são mais suscetíveis à fragmentação quando entram em contato com a carga abrasiva do *Los Angeles*. Já as amostras de calcário, por serem homogêneas (constituídas maioritariamente por um mineral e terem grãos finos) permitem maior coesão das amostras devido as suas ligações estruturais, tornando-as mais resistente à fragmentação.

O ensaio de *Los Angeles* tem como objetivo analisar o comportamento da fragmentação das amostras perante um ensaio agressivo, de curta duração e em meio seco.

## 5.8. Síntese dos resultados obtidos

A Tabela 19 contém os dados dos ensaios mais relevantes para o caso em estudo. Realça-se a importância dos valores  $I_f$ , valores que correspondem ao ensaio de friabilidade (*Brittleness test*) e nos capítulos que se seguem foram designados como índice de fragmentabilidade ( $I_f$ ).

**Tabela 19** – Tabela síntese dos ensaios laboratoriais.

Parâmetros	Fornelo (F)	Serdedelo (SE)	Sangardão (SA)	Vale Grande n°2 (VG)
$FI$ (%)	20	18	13	14
$SI$ (%)	29	23	14	11
$I_f$ (%) <sup>(*)</sup>	50,2	52,4	56,7	58,6
$M_{DE}$ (%)	10	16	13	16
LA (%)	26	33	25	28

(\*) são os dados do ensaio de friabilidade (*Brittleness test*).

## ***6. Análise dos resultados e cálculo do consumo energético***



## 6. Análise dos resultados e cálculo do consumo energético

---

Este capítulo está dividido em dois subtópicos. Numa primeira parte, foi analisado através da análise de correlações, os parâmetros que interferiram na fragmentação dos materiais rochosos em estudo. Numa segunda análise e por meio da utilização da fórmula de Bond, foi calculado o consumo de energia na última etapa de fragmentação das amostras ensaiadas (a de Vale Grande nº2 corresponde ao segundo estágio na instalação de britagem). Os gráficos utilizados neste capítulo, podem ser consultados no Anexo V.

### 6.1. Interpretação estatística

Para analisar os parâmetros que interferiram na fragmentação dos materiais rochosos, realizou-se uma análise de correlações entre as variáveis analisadas no capítulo 5, com recurso ao *software Excel*.

De forma a compreender como o processo de fragmentação numa instalação de britagem e as propriedades dos materiais rochosos manipulam o índice de fragmentabilidade ( $I_f$ ), optou-se por efetuar o estudo em duas etapas. Primeiro, com os dados das análises, dos índices e das resistências obtidas nos ensaios laboratoriais, avaliou-se a influência que tem na fragmentação das amostras. Numa segunda análise, para avaliar a geometria do produto, relacionou-se os parâmetros ligados à instalação de britagem (tipo de fragmentador, tamanho da alimentação e abertura de saída dos fragmentadores) com os dados dos ensaios de análise granulométrica e dos índices de achatamento e de forma.

Para uma posterior análise das correlações é necessário ter conhecimento da constituição da amostra em estudo. Na Tabela 20 encontra-se uma descrição das amostras, face aos dados mencionados nos capítulos 4 (Casos de estudo) e 5 (Ensaio laboratoriais).

**Tabela 20** – Descrição das amostras em estudo.

	<b>Fornelo</b>	<b>Serdedelo</b>	<b>Sangardão</b>	<b>Vale Grande n°2</b>
<b>Descrição da amostra</b>	Granito alcalino; <u>Minerais essenciais:</u> feldspato potássico, plagioclase e quartzo; <u>Minerais acessórios:</u> micas, zircão, apatite, entre outros.	Granito calco-alcalino; <u>Minerais essenciais:</u> feldspato potássico, plagioclase e quartzo; <u>Minerais acessórios:</u> micas, zircão, apatite, silimanite.	Calcário bem estratificados, de cor cinzenta escura a bege <u>Mineral essencial:</u> Calcite  <u>Textura:</u> Compacto (grão fino)	Esbranquiçado, acinzentado e amarelado <u>Mineral essencial:</u> Calcite  <u>Textura:</u> Bastante compacto (grão fino), homogêneo e cristalino
	Textura: Compacta, holocristalina, fanerítica, com tendência porfiróide; grão médio a grosseiro			

### 6.1.1. Propriedades dos materiais rochosos na determinação do índice de fragmentabilidade

A partir dos resultados dos ensaios (percentagens de óxidos, minerais, índices e resistências) foi realizada uma análise de correlação para entender a relação entre as variáveis em estudo. O objetivo desta análise é avaliar o fator de relação entre os parâmetros e ver quais os que têm maior influência sobre o índice de fragmentabilidade.

Quanto à escolha dos elementos, nas concentrações dos óxidos foram selecionados os que se manifestaram nas quatro amostras em estudo com percentagens de alguma relevância, que é o caso,  $Al_2O_3$ ,  $CaO$ ,  $FeO$ ,  $Fe_2O_3$ ,  $K_2O$  e  $SiO_2$ . A seleção dos minerais seguiu o mesmo critério dos óxidos, exceto a amostra de Sangardão (calcário), onde foram selecionados todos os componentes presentes na amostra, devido à importância que têm para o estudo da fragmentação do material. A Tabela 21 apresenta a matriz de correlação para o caso em estudo. Sabe-se que quanto mais perto o valor se situar de 1 ou -1, maior é o fator de correlação entre as variáveis em análise. Um fator de correlação superior a 0,5 já indica que há uma relação considerável entre as variáveis, porém, devido a existência de muitas variáveis em análise na dissertação, o valor fronteira foi adaptado para 0,75 e todos os valores que se encontram superiores a este, foram sombreados a cinzento na Tabela 21.

**Tabela 21** – Matriz de correlação das variáveis em análise.

Variáveis (%)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	FeO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	SiO <sub>2</sub>	Quartzo	Feldspato potássico	Plagioclase	Biotite	Moscovite	Calcite	Minerais argilosos e outros	<i>FI</i>	<i>SI</i>	<i>M<sub>DE</sub></i>	<i>LA</i>	<i>I<sub>f</sub></i>
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1	-0,998	0,949	0,950	0,996	0,996	0,987	0,986	0,994	0,954	0,794	-0,995	-0,488	0,935	0,944	-0,319	0,472	-0,960
CaO	-0,998	1	-0,938	-0,938	-1,000	-1,000	-0,994	-0,985	-0,999	-0,947	-0,820	0,999	0,539	-0,956	-0,952	0,328	-0,464	0,962
FeO	0,949	-0,938	1	1,000	0,938	0,938	0,895	0,982	0,939	0,998	0,571	-0,940	-0,501	0,813	0,793	-0,016	0,712	-0,825
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,950	-0,938	1,000	1	0,938	0,939	0,896	0,982	0,940	0,998	0,572	-0,940	-0,502	0,813	0,794	-0,016	0,712	-0,825
K <sub>2</sub> O	0,996	-1,000	0,938	0,938	1	1,000	0,994	0,986	1,000	0,948	0,821	-1,000	-0,560	0,960	0,949	-0,317	0,473	-0,957
SiO <sub>2</sub>	0,996	-1,000	0,938	0,939	1,000	1	0,994	0,986	1,000	0,949	0,820	-1,000	-0,558	0,959	0,948	-0,316	0,474	-0,957
Quartzo	0,987	-0,994	0,895	0,896	0,994	0,994	1	0,962	0,993	0,908	0,877	-0,993	-0,550	0,979	0,975	-0,409	0,381	-0,977
Feldspato potássico	0,986	-0,985	0,982	0,982	0,986	0,986	0,962	1	0,987	0,988	0,713	-0,987	-0,570	0,909	0,884	-0,161	0,609	-0,902
Plagioclase	0,994	-0,999	0,939	0,940	1,000	1,000	0,993	0,987	1	0,951	0,816	-1,000	-0,577	0,961	0,943	-0,302	0,487	-0,951
Biotite	0,954	-0,947	0,998	0,998	0,948	0,949	0,908	0,988	0,951	1	0,597	-0,951	-0,549	0,837	0,805	-0,022	0,712	-0,832
Moscovite	0,794	-0,820	0,571	0,572	0,821	0,820	0,877	0,713	0,816	0,597	1	-0,816	-0,471	0,927	0,942	-0,739	-0,066	-0,911
Calcite	-0,995	0,999	-0,940	-0,940	-1,000	-1,000	-0,993	-0,987	-1,000	-0,951	-0,816	1	0,572	-0,960	-0,944	0,305	-0,484	0,953
Minerais argilosos e outros	-0,488	0,539	-0,501	-0,502	-0,560	-0,558	-0,550	-0,570	-0,577	-0,549	-0,471	0,572	1	-0,656	-0,424	-0,174	-0,562	0,385
<i>FI</i>	0,935	-0,956	0,813	0,813	0,960	0,959	0,979	0,909	0,961	0,837	0,927	-0,960	-0,656	1	0,962	-0,448	0,312	-0,947
<i>SI</i>	0,944	-0,952	0,793	0,794	0,949	0,948	0,975	0,884	0,943	0,805	0,942	-0,944	-0,424	0,962	1	-0,601	0,170	-0,997
<i>M<sub>DE</sub></i>	-0,319	0,328	-0,016	-0,016	-0,317	-0,316	-0,409	-0,161	-0,302	-0,022	-0,739	0,305	-0,174	-0,448	-0,601	1	0,685	0,571
<i>LA</i>	0,472	-0,464	0,712	0,712	0,473	0,474	0,381	0,609	0,487	0,712	-0,066	-0,484	-0,562	0,312	0,170	0,685	1	-0,207
<i>I<sub>f</sub></i>	-0,960	0,962	-0,825	-0,825	-0,957	-0,957	-0,977	-0,902	-0,951	-0,832	-0,911	0,953	0,385	-0,947	-0,997	0,571	-0,207	1

A análise da tabela permite constatar que há presença de elevadas correlações entre os óxidos e os minerais em estudo. Existe também uma forte correlação entre os índices de achatamento (FI) e forma (SI) com as percentagens de óxidos e minerais. Esta relação pode indicar que as composições das amostras, a nível da sua dureza e resistência, influenciam a orientação da fratura das partículas afetando a geometria do produto.

De todas as correlações efetuadas, as que interessam destacar são as variáveis que se relacionam com o índice de fragmentabilidade,  $I_f$  (selecionadas a castanho na Tabela 21). Há exceção dos minerais argilosos, do ensaio de micro-Deval ( $M_{DE}$ ) e *Los Angeles* (LA), todas as restantes variáveis exibem fortes correlações com o índice (quase todas superiores a 0,9).

No passo seguinte da análise, os parâmetros foram analisados individualmente, através de gráficos de dispersão, de forma a compreender como a variação dos seus valores interfere com a fracturação dos materiais. Apesar dos ensaios de micro-Deval e *Los Angeles* não terem uma relação considerável com o índice de fragmentabilidade, foram também analisados, para estudar como a constituição das amostras influencia a resistência e, posteriormente, como isso afeta a fragmentação das amostras.

#### **6.1.1.1. Características petrográficas e mineralógicas dos materiais rochosos**

Com base nas percentagens das análises químicas e mineralógicas efetuadas às amostras, realizaram-se os gráficos de dispersão apresentados nas Figuras 39 e 40.

Nas percentagens dos óxidos  $SiO_2$  e  $CaO$ , houve necessidade de separar as concentrações dos óxidos por litologias, devido à discrepância entre os valores.

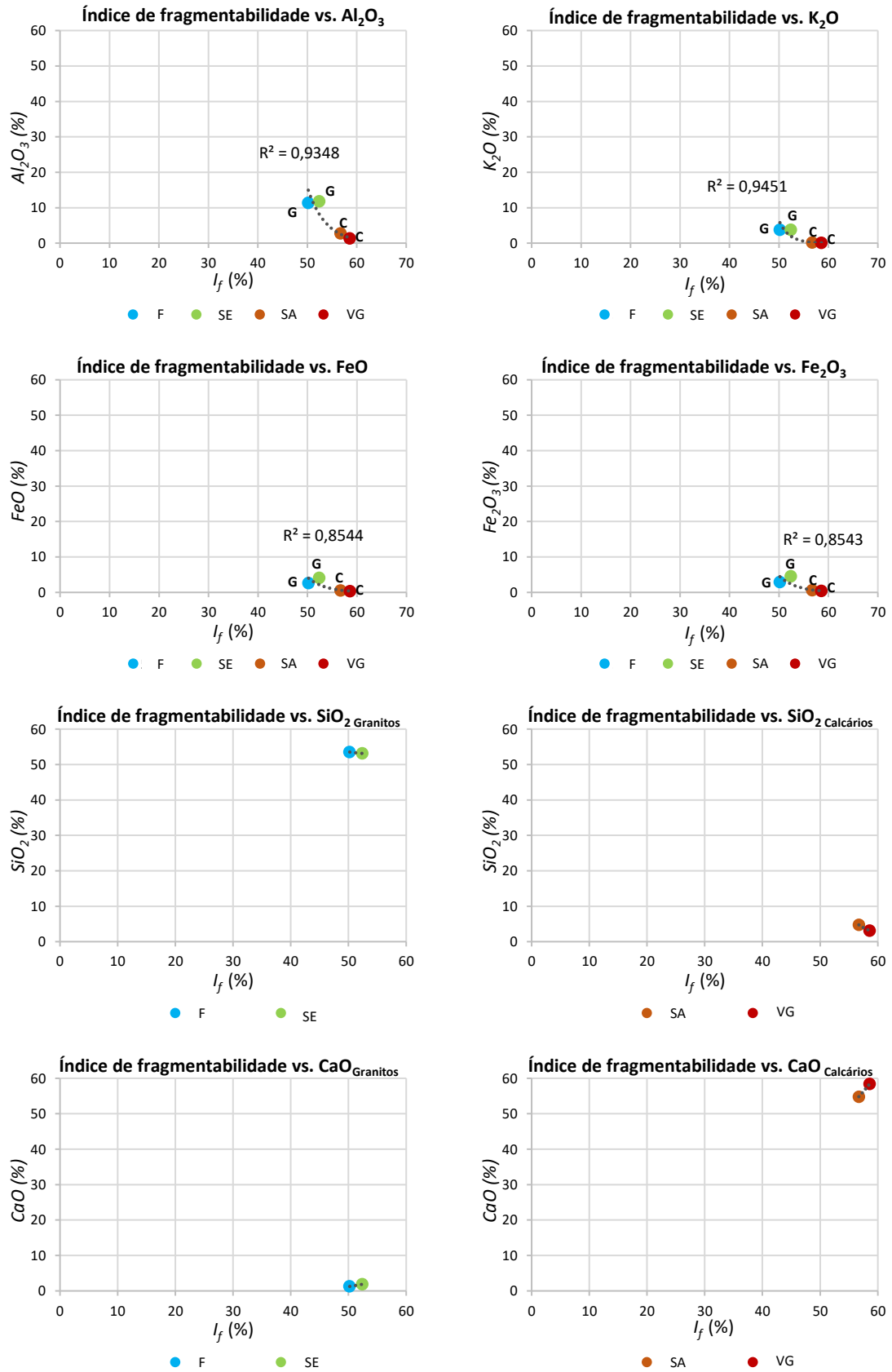
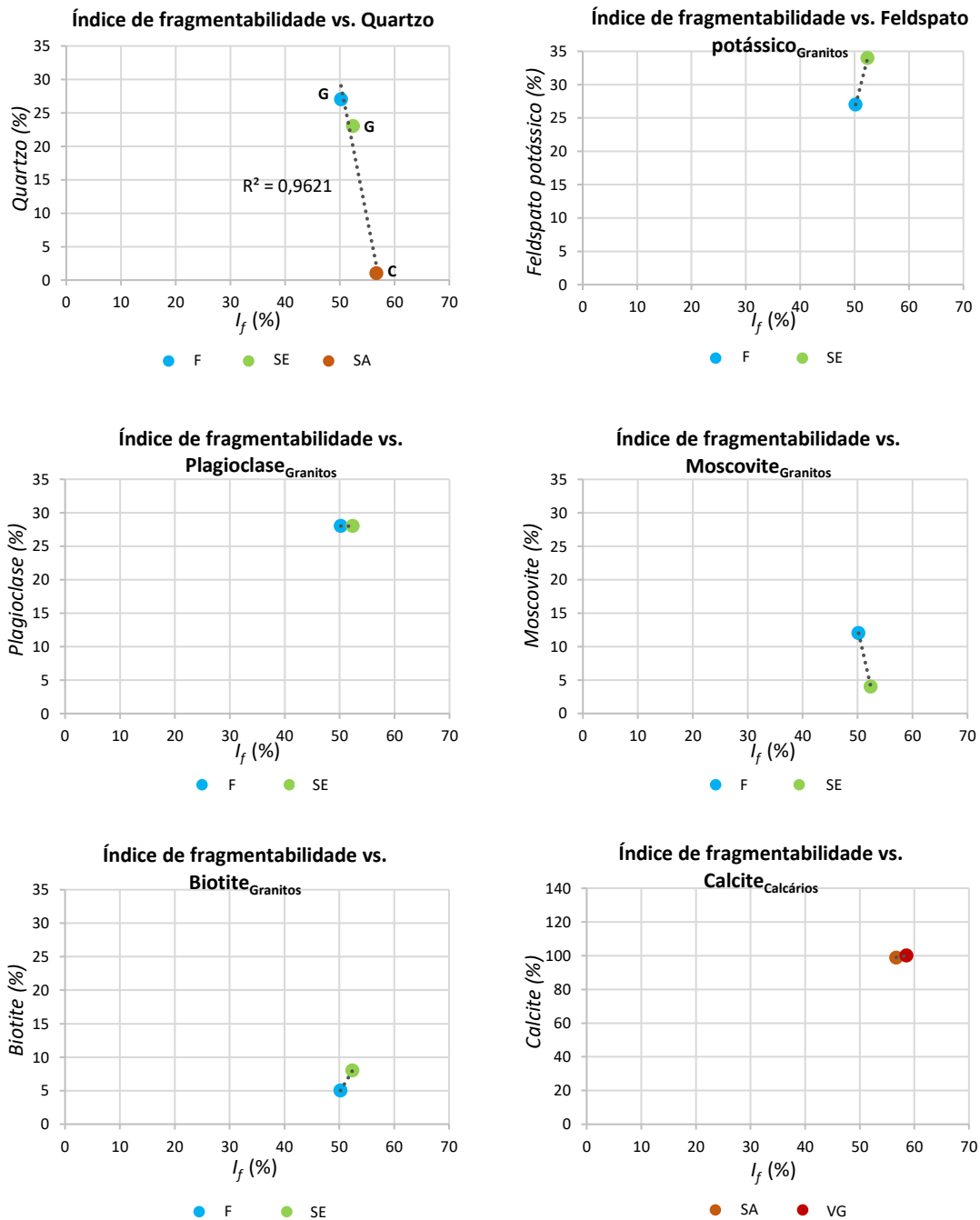


Figura 39 – Gráficos de dispersão relativo ao índice de fragmentabilidade e as percentagens dos óxidos nas amostras analisadas (F – Fornelo, SE – Serdedelo, SA – Sangardão e VG – Vale Grande n°2).



**Figura 40** – Gráficos de dispersão relativo ao índice de fragmentabilidade e minerais presentes nas amostras analisadas (F – Fornelo, SE – Serdedelo, SA – Sangardão e VG – Vale Grande n°2).

Perante os gráficos da Figura 39, a diferença de concentrações que mais sobressai na análise das quatro amostras são as de  $\text{SiO}_2$  e as de  $\text{CaO}$ .

O  $\text{SiO}_2$  é o principal constituinte nos granitos e está relacionado com os menores índices de fragmentabilidade, havendo uma tendência linear muito reduzida entre as duas amostras de granito (diferença aproximadas de 0,4 %). Porém, este composto está em pequenas percentagens nos calcários (entre 3 a 5 %), podendo indicar a presença de areias ou fragmentos de quartzo nas amostras.

O óxido de cálcio (CaO) manifesta-se maioritariamente nos calcários e segundo Costa (1985), um calcário puro tem como composição química de 56 % de CaO e 44 % de CO<sub>2</sub>. Na análise química em estudo, a amostra de Vale Grande nº2 (VG) apresenta-se mais pura que a amostra de Sangardão (SA), ao ser constituída por cerca de 58 % da sua massa rochosa por óxido de cálcio (CaO) e conter menores percentagens de outros óxidos na amostra. Em comparação de litologias, as maiores percentagens deste óxido estão relacionadas com os maiores índices de fragmentabilidade, ou seja, com os calcários.

Face as concentrações de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, FeO, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e K<sub>2</sub>O, observa-se que há uma tendência exponencial considerável entre as quatro amostras. As maiores concentrações destes óxidos estão relacionadas com os menores índices de fragmentabilidade (indicado nos gráficos por “G” que representam os granitos) e não existe uma grande disparidade entre os valores de litologias diferentes (diferença entre 3 %, exceto Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> que varia entre 9 %).

Para entender a variação das amostras em estudo, foram comparadas em valores de referência face à composição química de um granito médio (Tabela 22) e de um calcário médio ou com bastante argila, fossilífero (Tabela 23).

**Tabela 22** – Composição química de um granito de referência e das amostras de granito em estudo.

Amostras		Composição química (%)													
		Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	FeO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	MnO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	MgO	Na <sub>2</sub> O	H <sub>2</sub> O <sup>+</sup>	Outros	Total
Dados da dissertação	Fornelo	11,34	1,26	2,58	2,87	3,77	0,14	0,36	53,51	0,30	---	---	---	23,86	100
	Serdedelo	11,75	1,89	4,04	4,49	3,73	0,09	0,28	53,11	0,55	---	---	---	20,07	100

**Tabela 23** – Composição química de calcários de referência e das amostras de calcário em estudo.

Amostras		Composição química (%)													
		Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	FeO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	MnO	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	MgO	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O <sup>+</sup>	SO <sub>3</sub>	Outros	Total
Costa (1985)	Composição de um calcário médio	0,8	42,6	---	0,5	---	---	5,2	---	7,9	41,6	0,6	---	0,9	100
	Composição de um calcário com bastante argila, fossilífero	7,35	35,16	---	2,41	---	---	19,81	---	2,18	31,74	---	---	---	99
Dados da dissertação	Sangardão	2,74	54,80	0,56	0,62	0,20	0,02	4,74	0,08	---	---	---	0,44	35,80	100
	Vale Grande nº2	1,32	58,43	0,34	0,38	0,09	0,01	3,10	0,05	---	---	---	0,08	36,20	100

Os dados da referência bibliográfica do granito consultados em Costa (1985), referem-se à média de 90 amostras de granitos biotíticos. Na comparação das amostras em estudo com os valores médios do granito de referência, depara-se que há uma diferença relativa ao teor de sílica e do óxido de alumínio, apresentando valores mais baixos nas amostras em estudo, e dos óxidos de ferro, em que as amostras de Fornelo e Serdedelo são compostas por maiores teores.

O ensaio de análise química por espectrometria de fluorescência de Raios X foi realizado sem utilizar o hélio, o que originou a detecção de baixos teores de sílica nas amostras de Fornelo e Serdedelo. Face aos dados dos óxidos de ferro, pode estar em causa a alteração dos materiais rochosos das amostras de Fornelo e Serdedelo.

Na observação visual das amostras em laboratório, alguns fragmentos apresentavam uma tonalidade acastanhada, indicando que alguns dos constituintes da amostra se encontram alterados. Essa cor *“obtem-se por impregnação dos feldspatos (ligeiramente caulinizados) e de outros minerais, por óxidos de ferro muitas vezes provenientes do ferro libertado pelas biotites”* (Ramos, 1982). Tal facto pode estar relacionado com a infiltração da água nas fraturas dos granitos *in situ*, que em contato com o oxigénio atmosférico e minerais que tem na sua composição presença de ferro (como, a biotite), originam a decomposição e desintegração de alguns minerais, principalmente do feldspato.

No caso em estudo, observa-se um elevado teor dos óxidos de FeO e Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> no granito calco-alcálico de Serdedelo, face ao granito alcalino de Fornelo.

Quanto à Tabela 23, as amostras de calcário em estudo apresentam maiores teores de óxido de alumínio (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) e de cálcio (CaO) em comparação com o calcário médio de referência. O óxido de alumínio pode reagir com a sílica (SiO<sub>2</sub>) presente nos calcários, dando origem a minerais argilosos, uma impureza das amostras e que afeta a resistência das mesmas ao ser constituído por uma dureza 1-1,5. Ao analisar as reações Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e SiO<sub>2</sub> nas amostras de calcário, Sangardão (SA) apresenta maior reação que Vale Grande n°2 (VG). Como está indicado na Tabela 7, a amostra de Sangardão apresenta vestígios de minerais argilosos.

Quanto à Figura 40, observa-se que o único mineral presente nas duas litologias em análise é o quartzo, embora tenha pouca presença na amostra de calcário (Sangardão – SA). Nas amostras de granito, as maiores percentagens de feldspato potássico e biotite estão associadas ao índice de maior fragmentabilidade (Seredelo – SE). No caso dos minerais de quartzo e moscovite, estão presentes em maioria na amostra com maior resistência, ou seja, menor índice de fragmentabilidade (Fornelo – F). Enquanto a plagioclase, aparece com a mesma quantidade nas duas amostras.

Nas amostras de calcário, o mineral abundante é a calcite e pela análise do gráfico, a maior percentagem está associada a uma menor resistência (Vale Grande nº2 – VG).

Com base na informação obtida nos gráficos das Figuras 39 e 40, realizou-se a Tabela 24 para sintetizar a influência que as maiores percentagens desses óxidos e minerais (assinalado por “✓”) tem perante a facilidade ou não das amostras se fragmentarem (índice de fragmentabilidade,  $I_f$ ). O estudo foi realizado em três análises:

- Sobre as quatro amostras: Granito (menor  $I_f$ ) e o calcário (maior  $I_f$ );
- Sobre as amostras de granito: Fornelo (menor  $I_f$ ) e Serdedelo (maior  $I_f$ );
- Sobre as amostras de calcário: Sangardão (menor  $I_f$ ) e Vale Grande nº2 (maior  $I_f$ ).

**Tabela 24** – Síntese da influência dos óxidos e dos minerais nos índices de fragmentabilidade.

		Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	FeO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	SiO <sub>2</sub>	Quartzo	Feldspato potássico <sup>(1)</sup>	Plagioclase <sup>(1)</sup>	Biotite <sup>(1)</sup>	Moscovite <sup>(1)</sup>	Calcite <sup>(1)</sup>
Quatro amostras	Menor $I_f$	✓		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
	Maior $I_f$		✓										✓
Amostras de granito	Maior $I_f$	✓	✓	✓	✓				✓	✓	✓		---
	Menor $I_f$					✓	✓	✓		✓		✓	---
Amostras de calcário	Maior $I_f$		✓						---	---	---	---	✓
	Menor $I_f$	✓		✓	✓	✓	✓	✓	---	---	---	---	

(1) - dado só visível numa das litologias.

Pela análise dos dados das quatro amostras na Tabela 24, depara-se que o menor índice de fragmentabilidade (maior resistência da amostra) está ligado a minerais de elevada dureza, como é o caso do quartzo, do feldspato potássico e plagioclase. Em contrapartida, a calcite está relacionada com maior tendência da amostra se fragmentar.

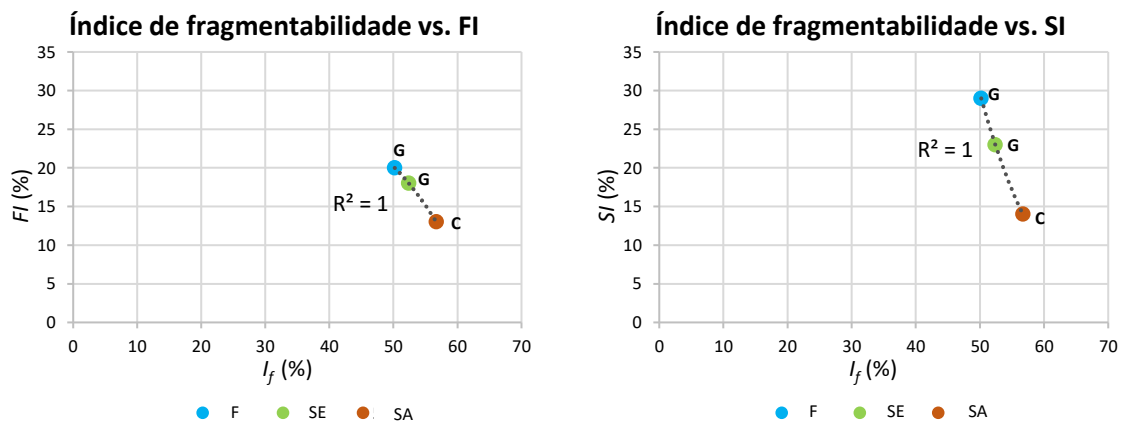
Quanto às amostras de granito, a amostra que tem maior propensão para se fragmentar (maior índice) apresenta uma massa rochosa composta por maior quantidade de feldspato e biotite, porém, também apresenta uma elevada percentagem de FeO e Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Realça-se que a amostra de granito com maior  $I_f$  é a de Serdedelo, um granito calco-alcálico, caracterizado pela presença de megacristais de feldspato, que tem cerca de 62 % da sua constituição ocupada por esse mineral.

Quanto às amostras de calcário, o maior índice de fragmentabilidade está relacionado com o maior teor de CaO e a maior percentagem de calcite. Neste caso, é necessário frisar que a amostra que contém maior  $I_f$  sofreu mais uma etapa de fragmentação, o que pode ter levado ao aparecimento de microfissuras na massa rochosa, tornando-a mais suscetível à fragmentação. Por outro lado, a amostra de calcário com menor índice de fragmentabilidade apresenta mais impurezas.

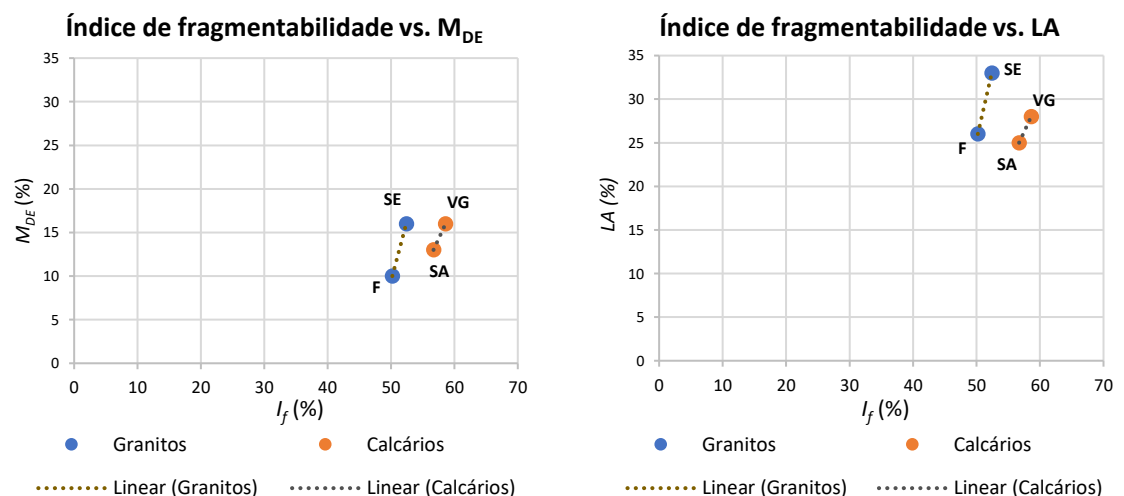
### 6.1.1.2. Geometria e resistência dos materiais rochosos

Para entender se a fragmentação dos materiais rochosos é dependente da geometria e resistência relacionou-se os valores obtidos nos índices de forma (Figura 41) e nos coeficientes de resistência (Figura 42) com o índice de fragmentabilidade.

Os valores do FI e SI correspondem aos índices gerais de achatamento e de forma, respetivamente, e não aos índices da fração de 12,5/16, fração que foi utilizada para determinar o índice de fragmentabilidade (ensaio de friabilidade – *Brittleness test*). Por outro lado, nos gráficos da Figura 41 não foram analisados os dados da amostra de Vale Grande nº2, visto que os valores de FI e SI desta amostra correspondem à geometria das partículas antes de terem sido fragmentadas no laboratório do ISEP. Os fragmentos utilizados no ensaio para determinar o índice de fragmentabilidade tiveram uma terceira fragmentação.



**Figura 41** – Gráficos de correlação do índice de fragmentabilidade com os índices de forma obtidos nos ensaios laboratoriais.



**Figura 42** – Gráficos de correlação do índice de fragmentabilidade com os coeficientes obtidos nos ensaios laboratoriais.

Nos gráficos da Figura 41, observa-se uma relação polinomial entre os índices e a fragmentação das amostras, em que as partículas achatadas estão associadas aos granitos (G) e apresentam um menor índice de fragmentabilidade, enquanto, as partículas cúbicas estão relacionadas com o calcário (C), maior índice de fragmentabilidade.

A geometria das partículas deriva do processo de fragmentação e do tipo de fragmentador. Por exemplo, a amostra de Vale Grande n°2 (calcário), que não foi apresentada nos gráficos da Figura 41, foi sujeita a uma terceira fragmentação por um fragmentador de maxilas, o que deu origem a partículas achatadas. Em comparação com as amostras achatadas nos gráficos da Figura 41 apresenta um índice de fragmentabilidade maior (58,6 %). Logo, a geometria parece não se relacionar diretamente com a fragmentação do material.

Quanto aos ensaios de resistência (Figura 42), não há uma correlação com o índice de fragmentabilidade. Porém, há uma tendência linear entre os coeficientes e o índice em termos de litologias iguais. Nos casos em estudo, observa-se que quanto maior é o índice de fragmentabilidade na mesma litologia, maior é o coeficiente de micro-Deval e *Los Angeles*. Também se verifica que os granitos apresentam, em média, maior resistência ao choque e ao desgaste (ensaio de micro-Deval).

Nestas correlações, é preciso ter em atenção a composição e textura das amostras, fatores que podem influenciar a fragmentação das mesmas. Pela análise da Tabela 20, os granitos são constituídos por uma textura idêntica (compacta, holocristalina, fanerítica com tendência porfíroide, e de grão médio a grosseiro). Porém, Fornelo caracteriza-se por ser um granito alcalino, o que demonstra uma homogeneidade dos grãos médios de quartzo e feldspato face aos minerais presentes na amostra. Enquanto Serdedelo, ao ser um granito calco-alcalino, destaca-se por ser porfíroide com megacristais de feldspato dispersos na superfície da amostra, o que provoca um maior desgaste da amostra devido à diferença de tamanhos dos grãos em comparação com a amostra de Fornelo.

As amostras de calcário apresentam texturas um pouco diferentes. A de Sangardão é compacta e estratificada, e a de Vale Grande n°2 é caracterizada por ser compacta, homogênea e cristalina. Na observação visual da amostra de Vale Grande n°2, os poucos fragmentos visíveis de textura cristalina apresentavam desgaste devido ao processo de fragmentação. Contudo, a maior parte dos fragmentos eram bem compactados e homogêneos, não apresentando vestígios de ter textura cristalina.

Deste modo, os granitos são compostos por texturas heterogêneas, ao apresentarem diferentes minerais e em tamanhos desiguais na amostra, apresentando pontos de fraqueza entre as ligações estrutural dos diferentes minerais, logo, tornam-se mais suscetíveis à rotura nesses pontos. Por

outro lado, ao apresentarem discrepância na dureza dos minerais, quando entram em contato com uma carga abrasiva, os minerais de maior dureza provocam um maior desgaste na amostra, ao submeterem os minerais na sua envoltória e com menor dureza, à fragmentação.

Os calcários têm uma textura homogênea ao serem constituídos majoritariamente por calcite com granularidade fina. Desta forma, a massa rochosa é mais coesa face ao granito por permitir uma forte ligação estrutural dos minerais, o que dificulta a fragmentação da amostra com um simples impacto.

Como os granitos apresentam uma textura rugosa devido às dimensões dos grãos, tem menor desgaste em comparação com a textura lisa dos calcários (ensaio de micro-Deval). Em contrapartida, ao terem mais pontos de fraqueza que os calcários, podem apresentar uma resistência à fragmentação parecida.

Isto quer dizer que, embora os calcários sejam mais consistentes em termos de estrutura entre os minerais, a massa rochosa dos granitos é constituída por minerais de elevada dureza (quartzo = 7; feldspato = 6 – 6,5), o que dificulta a sua fragmentação em comparação com a calcite, que tem dureza 3.

### **6.1.2. Propriedades do processo de fragmentação na determinação da geometria do produto**

A geometria dos agregados deriva do processo de fragmentação numa instalação de britagem. Dos parâmetros possíveis de serem analisados, na dissertação, apenas foram relacionados os dados dos ensaios de análise granulométrica e dos índices de forma (achatamento e forma) com o tipo de fragmentador, a abertura de saída dos fragmentadores secundários e o tamanho da alimentação. Só foram correlacionados estes três ensaios com estes parâmetros por serem os únicos que caracterizam a distribuição granulométrica e a geometria dos agregados sem que modifiquem as suas características. Na Tabela 25 estão indicadas as informações disponibilizadas pelas pedreiras relativamente ao processo de extração e transformação do produto em análise e os dados consultados nos catálogos da Metso Minerals (Anexo VI) para completar a informação.

**Tabela 25** – Dados fornecidos pelas empresas Elevo Agregados e Agrepor Cimpor sobre o processo de fragmentação.

Parâmetros			Elevo Agregados		Agrepor Cimpor	
			Fornelo	Serdedelo	Sangardão	Vale Grande n°2
Malha da perfuração (desmonte) (m x m)			2,7 x 3,3	2,2 x 3,2	5 x 4	4,5 x 4
Maior dimensão à entrada do primário (mm)			800	900	500	600
Etapas de fragmentação	1ª Etapa (Primário)	Tipo de fragmentador	Maxilas		Impacto	
		Abertura de saída (mm)	80	150	150	200
		Tamanho do produto (mm) <sup>(1)</sup>	0 – 120	0 – 225	0 – 250	0 – 315
	2ª Etapa (Secundário)	Tipo de fragmentador	Cónico		Impacto	
		Abertura de saída (mm)	40	38	45	50
		Tamanho do produto (mm) <sup>(1)</sup>	0 – 75	0 – 70	0 – 70	0 – 80
Recolha da amostra em estudo			2ª Etapa			

1 – Dados consultados nos catálogos dos fragmentadores da Metso.

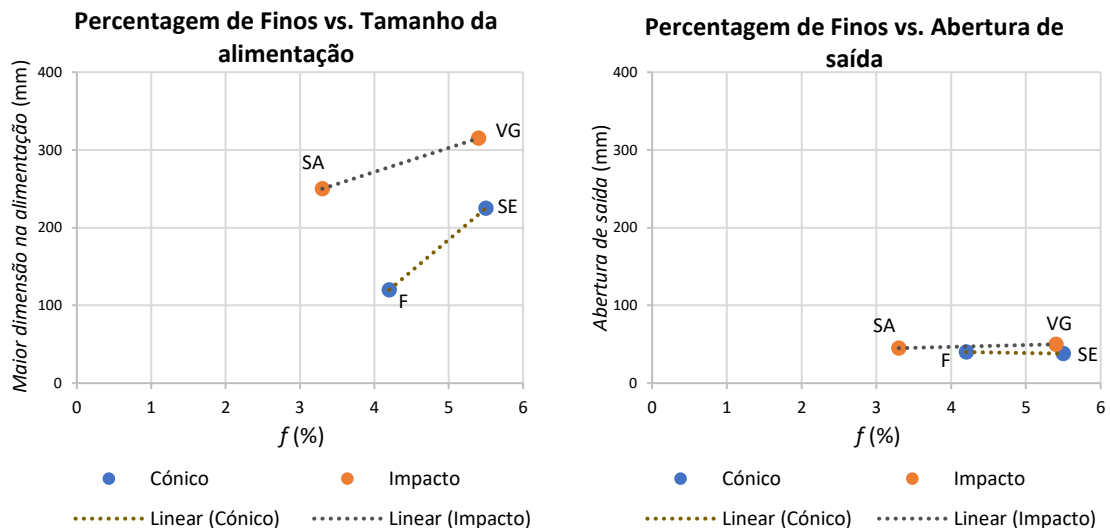
Neste subtópico, o estudo foi realizado em três vertentes: percentagem de finos, geometria do produto e influência da malha de perfuração na geometria do produto, onde foram comparados com a maior dimensão das partículas na alimentação, com a abertura de saída e o tipo de fragmentador secundário (Tabela 26).

**Tabela 26** – Dados para análise da relação do processo de fragmentação e geometria do produto.

Amostras	Dados dos fragmentadores secundários		
	Tipo de fragmentador	Maior dimensão na alimentação (mm)	Abertura de saída (mm)
Fornelo (F)	Cónico	120	40
Serdedelo (SE)		225	38
Sangardão (SA)	Impacto	250	45
Vale Grande n°2 (VG)		315	50

### 6.1.2.1. Percentagem de finos (f)

Quanto as percentagens de finos obtidas na análise granulométrica, pretende-se examinar como varia este parâmetro com o tamanho máximo das partículas na alimentação e com a abertura de saída do fragmentador secundário (Figura 43).



**Figura 43** – Relação das percentagens de finos com o tamanho da alimentação (gráfico da esquerda) e a abertura de saída dos fragmentadores secundários (gráfico da direita).

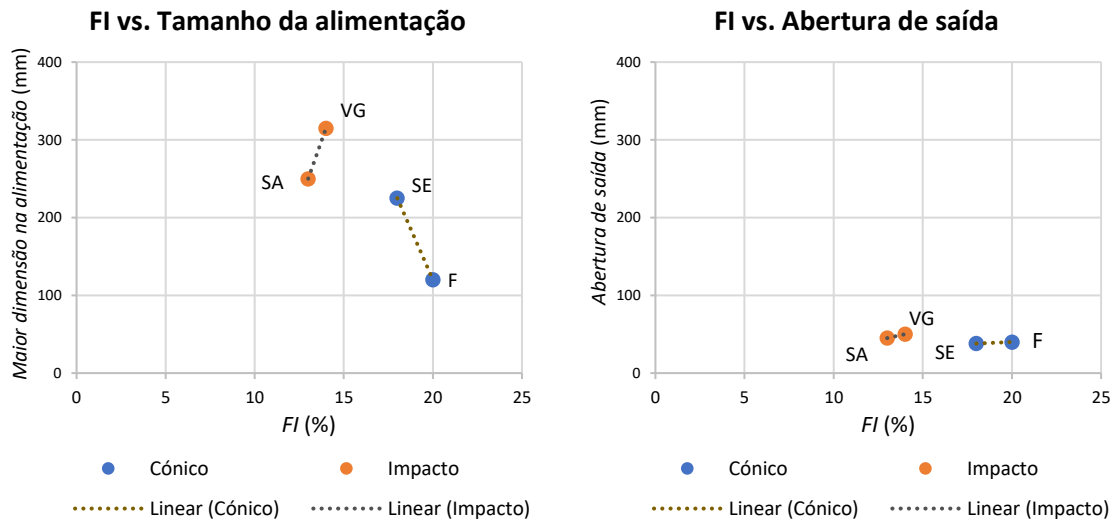
Face aos gráficos da Figura 43, observa-se que não há uma correlação direta entre a percentagem de finos com o tamanho da alimentação e a abertura de saída, quando se analisa as quatro amostras. Porém, como está ilustrado na Figura 43, há uma relação quando se analisa os parâmetros para o mesmo tipo de fragmentador. No fragmentador cónico, a amostra de Serdedelo (SE) tem maior percentagem de finos face a Fornelo (F), por ter uma alimentação maior e uma abertura de saída menor. Esta relação entre tamanho e abertura de saída, faz com que o fragmentador na amostra de Serdedelo necessite de fragmentar mais tempo ou com maior intensidade sobre o material para que este se fragmente, o que leva a uma maior produção de finos relativamente as condições de Fornelo (tamanho da alimentação menor, mas com uma abertura de saída maior).

Já no fragmentador de impacto, em regra geral, este fragmentador está ligado a elevadas produções de finos. Nas amostras de estudo neste fragmentador (Figura 43), a percentagem de finos está relacionada com o tamanho da alimentação, uma vez que a amostra de Vale Grande nº2 (VG) tem maior percentagem de finos, mas apresenta uma abertura de saída maior em comparação com Sangardão (SA).

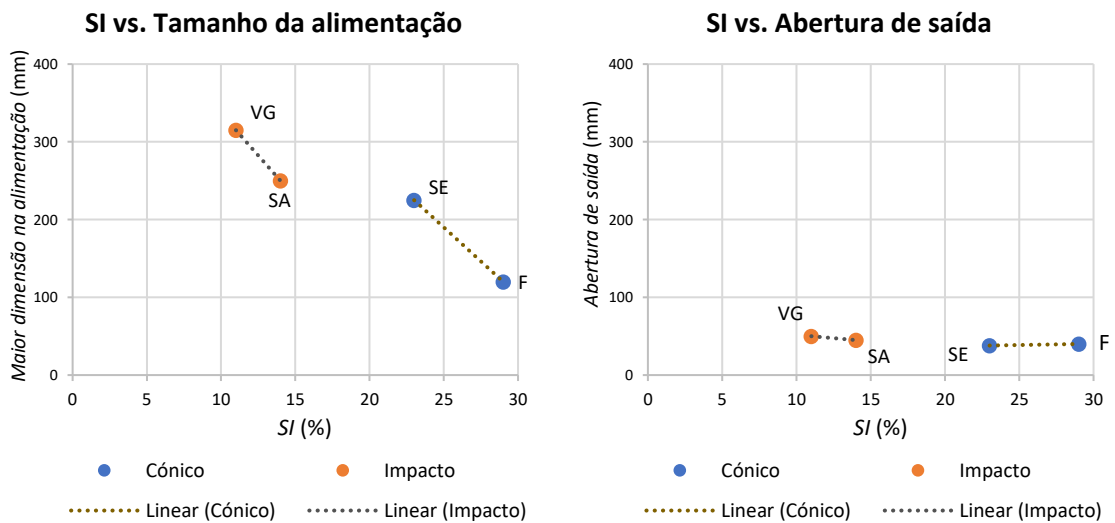
### 6.1.2.2. Geometria do produto

Quanto ao tipo de fragmentadores, normalmente, o fragmentador de impacto é o que garante melhor formato às partículas, seguido do cónico e por último, o de maxilas, em que este último produz partículas achatadas. Por esta ordem, o produto que deriva do fragmentador cónico é formado por partículas cúbicas e não cúbicas.

Para entender a influência do fragmentador na geometria, começou-se por relacionar os índices de achatamento (Figura 44) e de forma (Figura 45) com a maior dimensão das partículas na alimentação e a abertura de saída do fragmentador secundário.



**Figura 44** – Relação do índice de achatamento (FI) com o tamanho da alimentação (gráfico da esquerda) e a abertura de saída dos fragmentadores secundários (gráfico da direita).

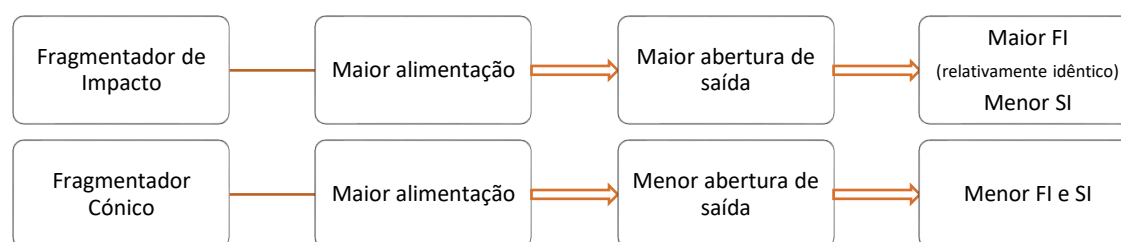


**Figura 45** – Relação do índice de forma (SI) com o tamanho da alimentação (gráfico da esquerda) e a abertura de saída dos fragmentadores secundários (gráfico da direita).

Face aos gráficos das Figuras 44 e 45, observa-se que há uma correlação entre as quatro amostras, porém optou-se por analisar os parâmetros em termos de fragmentadores.

Nas Figuras 44 e 45 constata-se que o mesmo tipo de fragmentador apresenta a mesma tendência nos dois índices, face ao mesmo parâmetro, como é explicado no esquema da Figura 46. No caso

do fragmentador de impacto, o índice de achatamento (FI) é relativamente idêntico nas duas amostras (diferença de 1 %).



**Figura 46** – Relação entre os índices de achatamento (FI) e de forma (SI) face ao tamanho da alimentação e abertura de saída dos fragmentadores secundários nas amostras ensaiadas.

A conclusão a tirar desta análise, é que as menores percentagens dos índices de achatamento e de forma estão nos provetes de calcário que foram fragmentadas pelo britador de impacto, enquanto os maiores valores destes índices estão relacionados com os granitos (maiores partículas não-cúbicas). Logo, a geometria do produto depende do tipo de fragmentador empregue, contudo, não depende da textura dos materiais rochosos, uma vez que a terceira fragmentação da amostra de Vale Grande nº2 no laboratório do ISEP deu origem a partículas achatadas (Figura 47).



Fração 8/16  
Duas etapas de fragmentação

Fração 10/14  
Três etapas de fragmentação

**Figura 47** – Frações granulométricas da amostra de Vale Grande nº2 em diferentes etapas de fragmentação.

### 6.1.2.3. Influência da malha de perfuração na geometria do produto

Neste estudo tentou-se ainda verificar a relação entre a malha de perfuração e a geometria do produto. Através do esquema da Figura 48, verifica-se que malhas com maiores dimensões geraram blocos com menores dimensões para o primário. Contudo, esta correspondência não está relacionada com a geometria do produto analisado. O material que entra na alimentação do primário até chegar ao produto final é submetido a diversas fragmentações, o que vai modificar ao longo das etapas, a sua forma e tamanho, como se pode ver no referido esquema. Logo, a variação

da geometria do produto final (índices de forma) não depende das malhas de perfuração, mas dos tipos de fragmentadores e das relações de redução impostas por etapa.

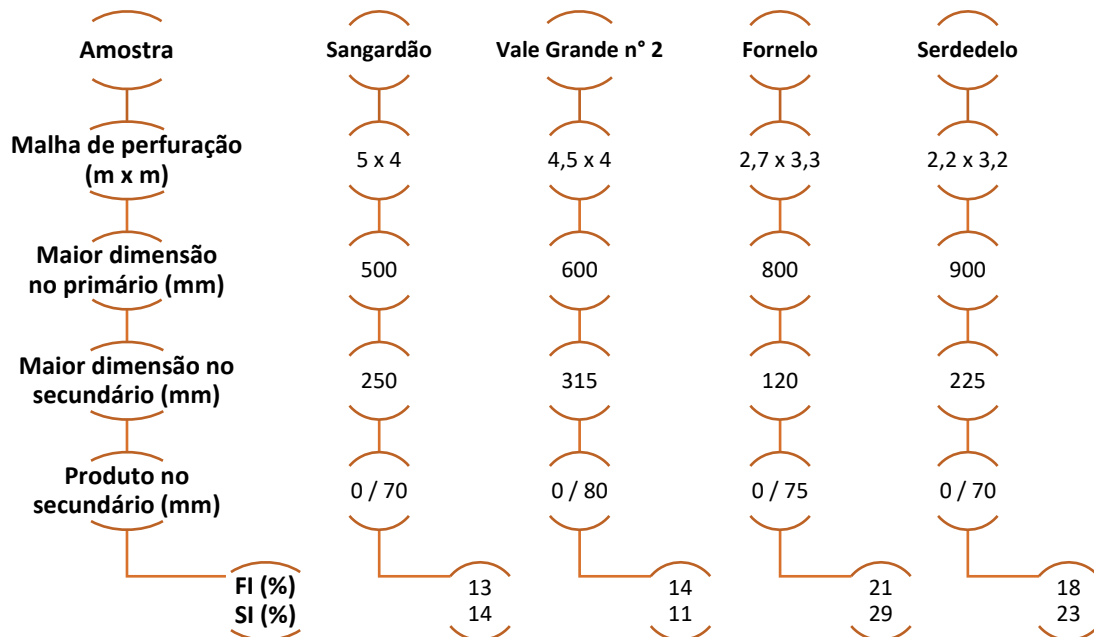


Figura 48 – Relação entre as malhas de perfuração do desmonte e os índices de achatamento e de forma.

## 6.2. Consumo energético

O consumo energético de uma etapa de fragmentação está associado ao consumo de energia por parte do fragmentador para reduzir as partículas às dimensões pretendidas. O consumo de energia deriva do tamanho das partículas na alimentação, do fragmentador utilizado, da abertura de saída do fragmentador e do tamanho do produto.

Para o cálculo do consumo energético recorreu-se à aplicação da fórmula de Bond (Equação 2), necessitando de conhecer o tamanho das partículas correspondente a 80 % de passados na alimentação ( $F_{80}$ ) e no produto ( $P_{80}$ ).

As frações granulométricas em estudo tinham o tamanho 0/32, porém só correspondem a uma parte do lote produzido no segundo estágio de cada amostra. Deste modo, para o cálculo do consumo de energia foram adaptados os tamanhos dos produtos na segunda etapa indicados na Tabela 25 e recorreu-se as curvas granulométricas dos catálogos da Metso Minerals (Anexo VII) para determinar as percentagens correspondentes aos 80 % dos passados na alimentação (tamanho do produto obtido no primário) e no produto (tamanho do produto obtido no secundário).

Quanto ao *Work Index* ( $W_i$ ), uma vez que não foi elaborado o ensaio para determinar os valores desse índice em relação as amostras em estudo, foram adaptados os dados da referência bibliográfica Fernandes (2013), onde o granito apresenta um  $W_i$  de  $(16 \pm 6)$  e o calcário, um  $W_i$  de  $(12 \pm 3)$ . Nesta dissertação, utilizaram-se os valores médios, ou seja, o granito com  $W_i$  de 16 e o calcário com  $W_i$  de 12.

A Tabela 27 apresenta os resultados da energia específica gasta na segunda etapa de fragmentação de cada amostra.

**Tabela 27** – Valores utilizados na fórmula de Bond face às amostras em estudo.

Parâmetros	$F_{80}$		$P_{80}$		$W_i$ (kWh/t)	W (kWh/t)
	mm	$\mu\text{m}$	mm	$\mu\text{m}$		
<i>Fornelo (F)</i>	92	92000	44	44000	16	2,353
<i>Serdedelo (SE)</i>	183	183000	43	43000		3,976
<i>Sangardão (SA)</i>	116	116000	34	34000	12	2,985
<i>Vale Grande n°2 (VG)</i>	158	158000	38	38000		3,137

Para interpretar os dados da Tabela 27, é preciso ter noção dos dados indicados na Tabela 25 quanto ao tamanho máximo das partículas na alimentação e a abertura de saída dos fragmentadores secundários.

Apesar dos fragmentadores de impacto serem caracterizados por um consumo elevado de energia, no caso em estudo, foi o fragmentador cônico de Serdedelo que apresentou um consumo superior. O elevado consumo desse fragmentador está ligado ao tamanho da alimentação (225 mm) face a uma abertura de saída reduzida (38 mm), o que obriga o fragmentador a aplicar maior energia mecânica sobre as partículas para que elas se fragmentem. O mesmo não acontece com o fragmentador cônico de Fornelo que, por apresentar partículas máximas de 120 mm e uma abertura de saída de 40 mm, não precisa de exercer tanta energia como o de Serdedelo.

Analisando as amostras de calcário, o maior gasto de energia está relacionado com maiores partículas na alimentação, que é o caso de Vale Grande n°2.

Pode-se concluir que o consumo de energia não está totalmente relacionado com o tipo de fragmentador, sendo que o tamanho da alimentação e a abertura de saída são fatores que condicionam o consumo de energia, como se pode verificar com o fragmentador cônico de Serdedelo.

## ***7. Conclusões***



## 7. Conclusões

---

A presente dissertação tem como objetivo fulcral determinar os parâmetros que interferem na fragmentação dos materiais rochosos, com vista analisar as propriedades dos agregados de quatro amostras diferentes. A determinação destas propriedades ocorreu com a realização dos ensaios laboratoriais, onde se destacam os dados do ensaio de friabilidade que serviram de base para as correlações efetuadas ao longo da dissertação (índice de fragmentabilidade,  $I_f$ ).

O estudo foi realizado sob duas vertentes: as propriedades dos materiais rochosos e o processo de fragmentação na instalação de britagem. Quanto às propriedades das amostras, antes de apresentar a conclusão final, são esquematizados os pontos-chave analisados segundo as litologias. Em termos das amostras de granito, a de Serdedelo caracteriza-se por apresentar menor resistência à fragmentação que Fornelo. Isso deriva de:

- ✓ Ter um grau de alteração superior: apresenta um teor elevado de FeO e Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> face a Fornelo.
- ✓ Ter uma textura composta por megacristais de feldspato: em comparação com Fornelo, Serdedelo tem uma textura heterogénea a nível dos grãos de feldspato e quartzo, o que origina um maior desgaste na amostra. Já Fornelo, apresenta uma homogeneidade quanto aos grãos médios de feldspato e quartzo face aos minerais presentes na amostra.

Quanto às amostras de calcário, a de Vale Grande nº2 caracteriza-se por apresentar menor resistência à fragmentação que Sangardão. Tal facto resulta de:

- ✓ Ter sido submetido a uma terceira fragmentação: perante os teores de óxidos e percentagens dos minerais, Sangardão deveria ser mais suscetível à fragmentação que Vale Grande nº2, visto que na sua constituição tem presença de minerais de argilas. Nesta análise não foi comparada a textura das duas amostras.

Segundo as litologias, o calcário apresenta uma menor resistência à fragmentação face ao granito, por:

- ✓ Ser constituído por minerais com menor dureza: a massa rochosa dos calcários (dureza do calcário varia entre 3,5 a 4) é composta essencialmente por calcite, enquanto os granitos são constituídos por mais de 60 % de minerais de elevada dureza (quartzo e feldspato), logo, tem maior resistência;

- ✓ Ter uma textura lisa e homogênea: embora o granito seja mais suscetível à rotura nos elos de ligação dos diferentes minerais, caracteriza-se por ter uma textura rugosa, o que garante um menor desgaste na amostra. Porém, em termos de resistência à fragmentação testada num curto espaço de tempo, as duas litologias apresentam resistências semelhantes.

Por fim, conclui-se que a textura (tamanho e distribuição dos grãos na superfície da amostra), dureza dos minerais, grau de alteração, resistência e a sua constituição são parâmetros que interferem na fragmentação dos materiais rochosos.

Quanto maior for a dureza dos minerais e a homogeneidade dos grãos, mais complicado é a fragmentação da amostra em comparação com uma amostra com minerais de igual dureza, mas com diferentes tamanhos dos grãos. Por outro lado, uma amostra com maior presença de minerais de feldspato e biotite é mais suscetível à fragmentação, quando o composto de ferro que constitui a biotite se decompõe. Uma amostra com minerais de baixa dureza e densidade, tem menor resistência ao desgaste por choque e abrasão, por contrapartida, apresenta maior resistência à fragmentação num curto espaço de tempo.

Quanto aos parâmetros estudados sobre o processo de fragmentação, conclui-se que a geometria do produto depende exclusivamente do fragmentador utilizado, não estando relacionada com o tamanho da alimentação, da abertura de saída do fragmentador secundário e das dimensões das malhas de perfuração. Por outro lado, a textura das amostras não influencia a sua forma.

Face ao consumo energético, o tipo de fragmentador parece que não está diretamente relacionado com o consumo de energia, visto que na análise realizada nesta dissertação, os fragmentadores de impacto, titulados como os que consomem mais energia, tiveram menor gasto em comparação com o fragmentador cónico. Porventura, o tamanho da alimentação e a abertura de saída são fatores que interferem no dispêndio de energia. O que foi visível no caso de Serdedelo, que por apresentar uma abertura de saída relativamente reduzida face ao tamanho da alimentação, teve maior consumo. Por consequência, há uma maior percentagem de finos no produto final.

Em síntese, o consumo de energia está parcialmente dependente do tipo de fragmentador, do tamanho da alimentação e da abertura de saída.

### **Perspetivas Futuras**

Face ao tema desta dissertação, para estudos futuros devem ser focados temas que complementem o trabalho executado. Recomenda-se que esses incidam sobre:

- ✓ Levantamento dos parâmetros geológico-geotécnicos dos maciços rochosos em estudo, de forma a perceber a influência na fragmentação dos materiais;
- ✓ Estudo pormenorizado das características mineralógicas das amostras de estudo;
- ✓ Realização de ensaios de resistência à compressão simples, para averiguar a resistência à rotura do material quando é sujeito a uma tensão;
- ✓ Avaliar outros tipos de maciços nos fragmentadores de maxilas, cónicos e de impacto, para analisar se a geometria do produto é influenciada apenas pelas características dos fragmentadores ou se há outras variáveis subjacentes;
- ✓ Relativamente ao consumo de energia na operação de fragmentação, importa fazer um levantamento de dados regulares sobre o consumo de energia nas diversas etapas de fragmentação das instalações de britagem e classificação das pedreiras em análise.



## ***8. Referências bibliográficas***



## 8. Referências bibliográficas

---

- APA, IGESPAR & CCDR-LVT, 2008. Projeto de Ampliação da pedreira "Santa". 7 p.
- Benediktsson S., 2015. Effects of Particle Shape on Mechanical Properties of Aggregates. Department of Geology and Mineral Resources Engineering, Norwegian University of Science and Technology. 6-9 p.
- Bengtsson M. & Evertsson C.M., 2006. An empirical model for predicting flakiness in cone crushing. *International Journal of Mineral Processing*, 79: 49-60.
- Bengtsson M., Hulthén E. & Evertsson C.M., 2015. Size and shape simulation in a tertiary crushing stage, a multi objective perspective. *Minerals Engineering*, 77: 72-77.
- Bengtsson M., Lee E. & Evertsson C.M., 2010. Influence of throw and compression ratio on particle shape - A full scale investigation and laboratory tests. *Minerals Engineering*, 23: 549-557.
- Briggs C. & Evertsson C.M., 1998. Shape Potential of Rock. *Minerals Engineering*, 2 (11): 125-132.
- Cândido de Medeiros A. & Teixeira C., 1970. Carta Geológica de Portugal, na escala 1/50 000. Folha 5 – A (Viana do Castelo). Serviços Geológicos de Portugal, Lisboa.
- Carvalhais J., Figueiredo F., Castelo Branco F., Catarino L. & Pita F., 2016. Análise do ruído e das poeiras na envolvente de uma pedreira de calcário. *Internacional Journal on Working Conditions*, 11: 89-107.
- Carvalho M., 2012. Equipamentos de Fragmentação: Uma Revisão Avaliando Circuitos Alternativos para a Moagem de Finos. Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais. 7, 9, 28-37 p. (Monografia).
- CCDRn, 2014. Procedimento de avaliação de Impacte Ambiental do Projeto Ampliação da Pedreira nº4138, "Vila Verde nº2", Concelho de Vila do Conde. CCDRn – Comissão de Coordenação e Desenvolvimento Regional do Norte. 6, 15, 68-69 p. (Relatório Técnico).
- Cevalor, 2015. Relatório Síntese: Ampliação da área da pedreira nº 4441 "Serdedelo". Cevalor / Elevation, Engenharia S.A.. 19-22, 36, 82-83 p. (Relatório Técnico).
- Costa, J.B., 1985. Estudo e classificação das rochas por exame macroscópico. Fundação de Calouste Gulbenkian, Lisboa. 6ª Edição. 38, 40, 131 p.
- Coutinho J.S., 1999. Agregados para argamassas e betões. FEUP. 14-16, 22, 36,40, 49 p.
- Coutinho S.T., 2015. Proposta de modelo para obtenção do Work Index das rochas. Departamento de Engenharia Geotécnica, ISEP. 28, 64 p. (Dissertação de Mestrado).
- Donovan J.G., 2003. Fracture toughness based models for the prediction of power consumption, product size and capacity of jaw crushers. Virginia Polytechnic Institute and State University; Blacksburg,VA. 5 p. (Dissertação).

- Eironova M.Z., 2012. Proyecto de una planta de trituración para cantera de caliza. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas, Madrid. 24-26 p.
- Evertsson C.M. & Bearman R.A., 1997. Investigation of Interparticle Breakage as applied to cone crushing. *Minerals Engineering*, 2 (10): 199-214.
- Evertsson C.M., 1998. Output prediction of cone crusher. *Minerals Engineering*, 3 (11): 215-231.
- Fernandes J.A., 2013. Georrecursos. Porto: ISEP. Texto Policopiado (69 p).
- Fernandes M.I.G., 2005. Caracterização petrográfica, química e física de agregados graníticos em betões: Estudo de casos de obra. Departamento de Geologia, FCUP. 18-19 p. (Dissertação de Mestrado).
- França J.C., Zbyszewski G., Ferreira O.V., 1962. Carta Geológica de Portugal, na escala 1/50 000. Folha 30 – D (Alenquer). Serviços Geológicos de Portugal, Lisboa.
- Galiza A.C., Teixeira J., Chaminé H.I., Ramos L. & Fonseca, L., 2011. O Papel da geotecnia mineira na otimização do desmonte de maciços rochosos fraturados. *Boletim de Minas*, 46: 103-109.
- Gang D., Dongming H. & Xiumin F., 2009. Cone crusher chamber optimization using multiple constraints. *Internacional Journal of Mineral Processing*, 93: 204-208.
- Gökalp İ., Uz V.E. & Saltan M., 2016. Testing the abrasion resistance of aggregates including by-products by using Micro Deval apparatus with different standard test. *Cosntruction and Building Materials*, 123: 1-7.
- Guimarães M.S., Valdes J.R., Palomino A.M. & Santamarino J.C., 2007. Aggregate production: Fines generation during rock crushing. *Internacional Journal of Mineral Processing*, 81: 237-247.
- IGeoE, 1992. Carta Militar de Portugal à escala 1/25 000, Série M888: Folha 376 (Alenquer). 4ª Edição, Lisboa.
- IGeoE, 2001. Carta Militar de Portugal à escala 1/25 000, Série M888: Folha 251 (Condeixa-a-Nova). 3ª Edição, Lisboa.
- IGeoE, 2002. Carta Militar de Portugal à escala 1/25 000, Série M888: Folha 250 (Soure). 3ª Edição, Lisboa.
- IGeoE, 2011. Carta Militar de Portugal à escala 1/25 000, Série M888: Folha 97 (Trofa). 4ª Edição, Lisboa.
- IGeoE, 2015. Carta Militar de Portugal à escala 1/25 000, Série M888: Folha 28 (Ponte de Lima). 3ª Edição, Lisboa.
- Itävuori P., Vilkkonen M. & Jaatinen, A., 2013. Indirect Particle Size Distribution Control in Cone Crushers. 16th IFAC Symposium on Automation in Mining, Mineral and Metal Processing: 224-229.
- Johansson M., Bengtsson M., Evertsson M. & Hulthén E., 2017. A fundamental model of an industrial-scale jaw crusher. *Minerals Engineering*, 105: 69-78.
- Kecec B., Unal M. & Sensogut C., 2006. Effect of the texture properties of rocks on their crushing and grinding features. *Journal of University of Science and Technology Beijing*, 13(5): 385-392.
- Legendre D. & Zevenhoven R., 2014. Asserding the energy efficiency of a jaw crusher. *Energy*, 74: 119-130.
- Lindquist M., 2008. Energy considerations in compressive and impact crushing. *Minerals Engineering*, 21: 631-641.

Luz A., Sampaio J. & França, S. 2010. Tratamento de minérios. 5ª Edição. Rio de Janeiro : CETEM/MCT. 149, 161, 174 p.

Magalhães F.N., 2013. Método simplificado da avaliação da britabilidade. Rio de Janeiro : UFRJ/ Escola Politécnica. 7 p. (Projeto de Graduação).

Manuppella G, Bordalo da Rocha., Soares A.F., Mouterde R., Perrot Ch., 1976. Carta Geológica de Portugal, na escala 1/50 000. Folha 19 – C (Figueira da Foz). Serviços Geológicos de Portugal, Lisboa.

Metso Corporation, 2015. Basics in Minerals Processing. Edition 10. 1:5,3:2-3:8 p.

Metso Minerals, 2008. Crushing Process Planning. 3 p.

Monteiro D., 2014. Alternativas ao sistema de transporte tradicional em exploração a céu aberto. Caso de estudo: pedra de Fornelo. Departamento de Engenharia Geotécnica, ISEP. 93, 95 p. (Dissertação de Mestrado).

Olaley B.M., 2010. Influence of some rock strength properties on jaw crusher performance in granite quarry. Mining Science and Technology, 20: 204-208.

Omwenga B.B., Yaa M.G. & Robinson M.N., 2014. Kinematic and static force transmission analysis of a single toggle jaw crusher. University of Nairobi. 4-6 p.

Queirós I., 2014. Contribuição da fluorescência de Raios-X na avaliação e modelação de georrecursos. Departamento de Engenharia Geotécnica, ISEP. 126-127 p. (Dissertação de Mestrado).

Quist J. & Evertsson C.M., 2016. Cone crusher modelling and simulation using DEM. Minerals Engineering, 85: 92-105.

Ramos J.F., 1982. Algumas notas sobre rochas ígneas ornamentais de Portugal. Geonovas, 3: 53-76.

Ramos L., 2008. Avaliação geotécnica e geomecânica de maciços rochosos fraturados para o controlo da qualidade do desmonte. Departamento de Engenharia Geotécnica, ISEP. 75-76, 117-118 p. (Dissertação de Mestrado).

Ribeiro F., 2011. Britador de mandíbulas. Medindo a abertura do britador. metso news. 44.

Ribeiro J.L., 2009. Resíduos Cerâmicos. Gestão e Valorização como Agregados. Departamento de Engenharia Minas e Geoambiente, FEUP. 62 p. (Dissertação de Mestrado).

Sandvik Tamrock Corporation, 1999. Rock Excavation Handbook. 58-59, 85-86 p.

Santos L.C.R., 2016. Fragmentação e Classificação na Empresa BRIMO - Quartzitos de Mouquim. Universidade de Aveiro. 13 p. (Dissertação de Mestrado).

Saraiva M.I.E., 2009. Controlo de qualidade: agregados e obra rodoviária. Departamento de Geociências, Universidade de Aveiro. 64, 68 p. (Relatório de Estágio para obter o grau de Mestre em Georrecursos).

Silva A., 2014. Modelo para otimização de moinhos de bolas. Departamento de Engenharia de Minas e Geoambiente, FEUP. 7 p. (Dissertação de Mestrado).

Sousa J., 2014. Projecto de Instalação de processamento de material feldspático. Caso de estudo: Argemela. Departamento de Engenharia Geotécnica, ISEP. 46 p. (Dissertação de Mestrado).

Spínola S., 2015. Caracterização térmica de Pedras Naturais. Universidade de Aveiro. 117-120 p. (Tese de Doutoramento).

Tanyu B.F., Yavuz A.B. & Ullah S., 2017. A parametric study to improve suitability of micro-deval test to assess unbound base course aggregates. *Construction and Building Materials*, 147: 328-338.

Teixeira C. & Cândido de Medeiros A., 1965. Carta Geológica de Portugal, na escala 1/50 000. Folha 9 – A (Póvoa de Varzim). Serviços Geológicos de Portugal, Lisboa.

Teotónio R., 2010. Estudo da influência da fragmentação no custo da produção de agregados graníticos. Departamento de Engenharia Geotécnica, ISEP. 37-38 p. (Dissertação de Mestrado).

VISA Consultores, 2008. Estudo de Impacte Ambiental do Projeto de Ampliação da Pedreira “Santa”. Relatório não técnico. 1-2 p. (Relatório Técnico).

Weidmann D.F., 2008. Contribuição ao estudo da influência da forma e da composição granulométrica de agregados miúdos de britagem nas propriedades do concreto de cimento Portland. Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina. 31, 48-49 p. (Tese de pós- Graduação).

Zanella R., 2013. Análise da influência da forma do agregado nos parâmetros de dosagem da mistura asfáltica e na deformação permanente. Universidade Federal de Santa Catarina. 20-25 p. (Tese de Graduação).

Zbyszewski G. & Torres de Assunção C., 1965. Notícia explicativa da folha 30-D Alenquer. Direção-geral de minas e serviços geológicos, Lisboa. 45-49 p.

### **Normas:**

**NP EN 932 – 2 (2002):** Ensaios das propriedades gerais dos agregados. Parte 2: Métodos de redução de amostras laboratoriais. Instituto Português da Qualidade (IPQ).

**NP EN 933 – 1 (2000):** Ensaios das propriedades geométricas dos agregados. Parte 1: Análise granulométrica. Método de peneiração. Instituto Português da Qualidade (IPQ).

**NP EN 933 – 3 (2011):** Ensaios das propriedades geométricas dos agregados. Parte 3: Determinação da forma das partículas - Índice de achatamento. Instituto Português da Qualidade (IPQ).

**NP EN 933 – 4 (2002):** Ensaios das propriedades geométricas dos agregados. Parte 4: Determinação da forma das partículas - Índice de forma. Instituto Português da Qualidade (IPQ).

**NP EN 1097 – 1 (2012):** Ensaios das propriedades mecânicas e físicas dos agregados. Parte 1: Determinação da resistência ao desgaste (micro-Deval). Instituto Português da Qualidade (IPQ).

**NP EN 1097 – 2 (2011):** Ensaios das propriedades mecânicas e físicas dos agregados. Parte 2: Métodos para a determinação da resistência à fragmentação. Instituto Português da Qualidade (IPQ).

### **Sites consultados:**

**Elevo, 2017.** *Declaração de Desempenho. Agregados.* In: <http://www.elevogroup.com/pt/qas/declaracoes-de-desempenho/agregados/> (consultado no dia 8 de junho de 2017).

**Grupo Cimpor, 2017.** *Agregados.* In: [http://www.cimpor-portugal.pt/produtos\\_listagem.aspx?lang=pt&id\\_class=26&id\\_gama=12](http://www.cimpor-portugal.pt/produtos_listagem.aspx?lang=pt&id_class=26&id_gama=12) (consultado no dia 11 de junho de 2017).

**Grupta A. & Yan D., 2016.** *Mineral Processing Design and Operations: An Introduction.* 73-75 p. In: <https://books.google.pt/books?id=UZSZBgAAQBAJ&pg=PA71&lpg=PA71&dq=size+reduction+crushing+of+rock&source=bl&ots=s0U5s3T3nP&sig=soDzOfeuP4bBQaXSotvLXcZgaA&hl=ptPT&sa=X#v=onepage&q&f=false>. (consultado no dia 7 de abril de 2017).

**INETI/LNEG.** *Rochas Ornamentais Portuguesas.* In: <http://rop.lneg.pt/rop/index.php> (consultado no dia 29 de maio de 2017).

**Metallurgist, 2016.** *Crushing Resource Book.* 6-7, 16 p. In: [www.911metallurgist.com/blog/wp-content/uploads/2016/02/Crushing\\_Handbook.pdf](http://www.911metallurgist.com/blog/wp-content/uploads/2016/02/Crushing_Handbook.pdf). (consultado no dia 19 de março de 2017).

**Portal Metalica, 2010.** *Britadores e Moinhos.* In: <http://www.metalica.com.br/artigos-tecnicos/britadores-e-moinhos> (consultado no dia 24 de abril de 2017).

### **Catálogos:**

**Metso, 2010.** Britador cônico série HP. 9 – 10 p.

**Metso, 2013.** Britador de mandíbulas Série C. 8 p.

**Metso Minerals, 2005.** Britadores de Impacto Nordberg Série NP. 8,10 p.



## ***9. Anexos***



## Índice dos anexos (Ver CD – ROM)

---

**Anexo I** – Relatórios dos ensaios laboratoriais.

(Ver Pasta Anexos – Pasta Ensaio – PDF “Relatórios dos ensaios”)

**Anexo II** – Base de dados dos ensaios.

(Ver Pasta Anexos – Pasta Ensaio – Excel “Base de dados dos ensaios”)

**Anexo III** – Concentração dos óxidos.

(Ver Pasta Anexos – Pasta Ensaio – Excel “Base de dados dos ensaios” – Folha “Análise Química - Conversão”)

**Anexo IV** – Dados de apoio à análise mineralógica.

(Ver Pasta Anexos – Pasta Ensaio – PDF “Análise mineralógica”)

**Anexo V** – Base de dados das correlações e fórmula de Bond.

(Ver Pasta Anexos – Pasta Correlações\_ Fórmula de Bond – Excel “Correlações\_ Fórmula de Bond”)

**Anexo VI** – Catálogos dos fragmentadores.

(Ver Pasta Anexos – Pasta Fragmentadores – Pasta Catálogos)

**Anexo VII** – Curvas granulométricas dos fragmentadores.

(Ver Pasta Anexos – Pasta Fragmentadores – PDF “Curvas granulométricas”)