



Instituto Superior de Engenharia do Porto

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOTÉCNICA

Caraterização física e química de lamas resultantes do beneficiamento de pedra natural para o fabrico de misturas betuminosas

Iris Jaime Sobral

1151306

2020



isep Instituto Superior de Engenharia do Porto

P.PORTO

(página propositadamente em branco)



Instituto Superior de Engenharia do Porto

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOTÉCNICA

Caraterização física e química de lamas resultantes do beneficiamento de pedra natural para o fabrico de misturas betuminosas

Physical and chemical characterization of sludge resulting from the processing of natural stone for the manufacture of bituminous mixtures

Iris Jaime Sobral

1151306

*Estágio apresentado ao Instituto Superior de Engenharia do Porto para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de **Mestre em Engenharia Geotécnica e Geoambiente**, realizada sob a orientação da Doutora Sílvia Spínola, Professora Adjunta do Departamento de Engenharia Geotécnica do ISEP e coorientação do Doutor Adriano Teixeira, Professor Adjunto Convidado do Departamento de Engenharia Geotécnica do ISEP*

(página propositadamente em branco)

Júri

Presidente

Doutor João Paulo Meixedo dos Santos Silva

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

Doutora Sílvia Vieira Pinto Alves da Costa Spínola

Professora Adjunta, Departamento de Engenharia Geotécnica, Instituto Superior de Engenharia do Porto

Doutor Adriano Manuel da Silva Teixeira

*Professor Adjunto Convidado, Departamento de Engenharia Geotécnica, Instituto Superior de Engenharia do Porto
CICCOPN – Centro de Formação Profissional da Indústria da Construção Civil e Obras Públicas do Norte, Maia*

Doutora Lídia Maria Gil Catarino

Professora Auxiliar, Departamento de Ciências da Terra, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra

*A dissertação de **mestrado em engenharia geotécnica e geoambiente (MEGG)** foi apresentada e defendida em prova pública, por **Iris Sobral**, em 12 de Novembro de 2020 mediante o júri nomeado, em que foi atribuída, por unanimidade, a classificação final de **15 (quinze) valores**, cuja fundamentação se encontra em acta. Todas as correções pontuais determinadas pelo júri, e só essas, foram efectuadas.*

Dedico esta dissertação à minha Mãe e Avó...

(página propositadamente em branco)

Agradecimentos

A realização desta dissertação de mestrado, estabelece o fim de mais uma etapa nos estudos académicos. A sua elaboração só foi possível com a colaboração de professores e entidades, para os quais presto aqui os devidos agradecimentos:

À Professora Doutora Sílvia Spínola (DEG|ISEP), pela orientação e disponibilidade em retirar todas as dúvidas em relação à dissertação. Agradeço a partilha dos conhecimentos, a sua simpatia, a compreensão e a paciência em lidar com todos os entraves que esta pandemia impôs durante o ano 2020. Não esquecendo ainda toda a supervisão dada na correção das versões da dissertação, que permitiram um desenvolvimento positivo desta experiência.

Ao Professor Doutor Adriano Teixeira (CICCOPN & DEG|ISEP), coorientador da dissertação, dando importantes informações para que esta fosse possível realizar, tais como a bibliografia, os esclarecimentos de dúvidas e as condições para realizar os ensaios fundamentais ao estudo a desenvolver que infelizmente exigiram condições especiais devido à covid-19. Agradeço também as revisões das várias versões do manuscrito redigido até à versão final.

Ao Laboratório de Geotecnia e Materiais de Construção do ISEP (LGMC), na pessoa do seu diretor, Professor Doutor José Augusto Fernandes, por todas as facilidades concedidas na disponibilização das instalações e equipamentos, onde foi realizada grande parte desta investigação. À Técnica do LGMC, Engenheira Isilda Costa, pela disponibilidade, durante a realização do ensaio de análise química por FRX.

Ao Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP), especialmente ao Departamento de Engenharia Geotécnica (DEG), por disponibilizar as instalações do LGMC, para a realização dos ensaios com todas as condições de higiene sanitária e segurança assegurados durante a pandemia que permitiram dar continuação ao presente estudo.

Ao CICCOPN, Centro de Formação Profissional para a Indústria da Construção Civil e Obras Públicas do Norte, ainda a oportunidade de estágio realizada nas suas instalações do CICCOPN, que permitiram a interação com novos conhecimentos e pessoas que foram cruciais para o desenvolvimento deste trabalho. Um agradecimento especial aos colaboradores do laboratório de geotecnia do CICCOPN, pela ajuda da realização dos ensaios, e pela constante disponibilidade e condições de trabalho e acolhimento proporcionadas.

À minha Mãe, Paula Sobral, por permitir que prosseguisse os estudos apoiando-me financeira e emocionalmente com muito amor e carinho, mesmo a milhares de quilómetros de distância.

Ao meu Irmão, Avós, Tias e Tios, que em parte tiveram contribuição no desenvolvimento pessoal e académico com a educação, valores, oportunidades, força e encorajamento nesta fase de vida.

Ao José, à Vanessa, à Sílvia e ao Luís pelo amor, pela amizade demonstrada nesta fase da minha vida sendo muitas vezes o meu muro das lamentações durante esta etapa, reforçando que sempre conseguiremos superar os obstáculos por maiores que sejam ou pareçam.

A todos, *muito obrigado!*

(página propositadamente em branco)

Palavras-chave

Rocha ornamental, lamas, misturas betuminosas, filler

Resumo

A indústria da extração e transformação de rocha ornamental gera grandes quantidades de resíduos provenientes dos diversos processos de desmonte e beneficiamento da pedra natural, tais como o pó de pedra, a massa mineral rejeitada e as lamas. As lamas são tratadas por meio de processos de decantação, com recurso a floculantes, e filtro-prensa para extrair a água, reduzindo o seu volume, de modo a serem posteriormente enviadas para aterros ou escombreyras. Assim, o objetivo principal deste trabalho foi avaliar a possibilidade da reutilização destas lamas, com base em investigações prévias, de forma a encontrar soluções viáveis e ambientalmente sustentáveis destas lamas. Para isso realizou-se a caracterização física e química de duas lamas, provenientes da empresa Incoveca Granitos S.A., geradas no processo de serragem e corte primário de rocha ornamental. Estas lamas foram designadas de LGV (lamas de granitos variados) e LMC (lamas de mármore e calcários). A caracterização das lamas em estudo compreendeu os ensaios que são usuais no estudo das características dos filleres para misturas betuminosas, dos quais fizeram parte a peneiração por jato de ar (análise granulométrica), a baridade, o azul metileno, a massa volúmica (método do picnómetro), o método da temperatura anel e bola, a superfície específica (método de Blaine), a viscosidade aparente (número de betume), o pH e por último a análise química por fluorescência de raios x com equipamento portátil. Após a caracterização, foi efetuado o estudo teórico da viabilidade de aproveitamento das lamas como subproduto com o objetivo de averiguar a possibilidade da sua incorporação das lamas em misturas betuminosas como substituição dos filleres tradicionais. Foi possível concluir que as lamas em estudo apresentam características físicas e químicas muito similares aos filleres normalizados.

(página propositadamente em branco)

Keywords

Ornamental stone, sludge, bituminous mixtures, filler

Abstract

The industry of extraction and transformation of ornamental stone has a high production, which generates large quantities of waste from various extraction and beneficiation processes, such as stone dust, rejected mineral mass and sludge. The sludge is treated with decantation processes, using flocculants, and filter-press to extract the water, reducing its volume, in order to be sent to landfills or waste dumps. The goal of this work was to evaluate the reuse of these materials based on previous investigations, in order to find viable and environmentally sustainable solutions for this sludge. For this purpose, was made, the physical and chemical characterization of two sludges, from Incoveca Granitos S.A., generated from the sawing and primary cutting process of ornamental rock, designated as LGV (various granite sludges) and LMC (marble and limestone sludges). The sludge's characterization included the tests that are usual in the study of the characteristics of the fillers for bituminous mixtures, such as the sifting by air jet (granulometric analysis), the barity, methylene blue, the density (pycnometer method), the ring and ball temperature method, the specific surface (Blaine method), the apparent viscosity (bitumen number), the pH and last chemical analysis in the x-ray fluorescence spectrometry with portable equipment. After the sludge characterization, a theoretical study of the sludge use feasibility as a byproduct was carried out to investigate the possibility of sludge incorporation in bituminous mixtures to replace traditional fillers. It was concluded that sludge has physical and chemical characteristics very similar to standardized fillers.

(página propositadamente em branco)

Índice

1. INTRODUÇÃO GERAL.....	3
1.1. Enquadramento geral	3
1.2. Objetivos	4
1.3. Estrutura do trabalho.....	4
2. ROCHA ORNAMENTAL.....	9
2.1. Introdução	9
2.2. Extração de Rocha Ornamental	13
2.2.1. Corte com perfuração em linha e desmonte com explosivos.....	14
2.2.2. Corte com fio diamantado	14
2.2.3. Corte com discos diamantados.....	15
2.2.4. Corte com roçadoras	15
2.3. Transformação.....	16
2.3.1. Pré-corte	17
2.3.2. Corte primário	17
2.3.3. Tratamento superficial	18
2.3.4. Corte secundário	19
2.3.5. Produção de Resíduos	20
2.4. Tratamento de lamas	22
2.4.1. Decantação	23
2.4.2. Filtragem.....	23
2.4.3. Secagem.....	24
2.4.4. Impacto ambiental e economia circular	24
3. FÍLER	31
3.1. Definição	31
3.2. Produção e Tipos de Fíleres em Portugal	32
3.3. Estatística de produção de cimento em Portugal	33
3.4. Fíler comercial: Cimento	35
3.5. Fíler comercial: Cal Hidráulica	36
3.6. Fíler comercial: Cinzas volantes.....	38
3.7. Características dos fíleres	38
3.7.1. Campo de aplicação.....	39
3.7.2. Campo de aplicação: Betão	39
3.7.3. Campo de aplicação: Argamassas e Misturas betuminosas	40
3.8. Substituição de fíleres por lamas.....	40

4.	MISTURAS BETUMINOSAS	47
4.1.	Definição e composição de mistura betuminosa	47
4.2.	Materiais/composição da mistura betuminosa	47
4.2.1.	Tipos de misturas betuminosas	50
4.2.2.	Campos de aplicação	52
4.3.	Fíleres nas misturas betuminosas	53
5.	METODOLOGIAS DE CARATERIZAÇÃO FÍSICA E QUÍMICA DAS LAMAS.....	57
5.1.	Introdução	57
5.2.	Recolha e preparação das amostras	57
5.3.	Descrição dos Ensaio de caracterização das lamas	59
5.3.1.	Granulometria para fíler: Peneiração com jato de ar	59
5.3.2.	Método para a determinação da baridade do fíler em querosene	60
5.3.3.	Determinação de vazios de vazios de fíler compactado	62
5.3.1.	Avaliação de finos: Ensaio do azul de metileno	64
5.3.2.	Determinação da densidade da partícula: método do picnómetro	65
5.3.3.	Determinação da temperatura de amolecimento: Método do anel e bola	67
5.3.4.	Determinação da viscosidade aparente (Número de betume)	69
5.3.5.	Determinação da finura: Método de Blaine	70
5.3.6.	Determinação do pH da suspensão em água	71
5.3.7.	Análise química quantitativa por FRX.....	72
6.	ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS.....	77
6.1.	Introdução	77
6.2.	Granulometria para fíler: método de peneiração com jato de ar	77
6.3.	Determinação de vazios de fíler compactado	79
6.4.	Método para a determinação da baridade do fíler em querosene	80
6.5.	Determinação da qualidade de finos: Ensaio do azul de metileno.....	81
6.6.	Determinação da densidade da partícula: método do picnómetro.....	81
6.7.	Determinação da finura: Método de Blaine	82
6.8.	Viscosidade aparente ou número de betume	83
6.9.	Determinação da temperatura de amolecimento: Método do anel e bola	84
6.10.	Determinação do pH da suspensão em água	85
6.11.	Análise química quantitativa por FRX	86
6.12.	Quadro resumo das propriedades	89
6.13.	Análise de propriedades de fíleres comerciais usuais em misturas betuminosas.....	90
6.13.1.	Azul metileno.....	90

6.13.2.	Massa volúmica (Método do picnómetro).....	91
6.13.3.	Granulometria por jato de ar: material passado no peneiro 0,063mm.....	91
6.13.4.	Massa volúmica aparente ou Baridade em querosene.....	92
6.13.5.	Percentagem de volume de vazios (Ridgen)	92
6.13.6.	Superfície específica (Método de Blaine)	93
6.13.7.	Variação da temperatura anel e bola	94
6.13.8.	Número de betume.....	94
6.13.9.	pH.....	95
7.	CONCLUSÕES.....	99
7.1.	Perspetivas futuras	101
8.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	105
9.	ANEXOS.....	111

(página propositadamente em branco)

Índice de figuras

Figura 1 - Centros de produção de rocha ornamental. (adaptado de www.dgeg.pt , 2018).....	11
Figura 2 - Esquema do processo produtivo de rocha ornamental e tratamento de lamas	12
Figura 3 - a) Desmonte com cunhas hidráulicas; b) Carregamento do bloco; c) Desmonte com argamassa expansiva. (adaptado de Azevedo et al., 2014; Gomes et al., 2008)	13
Figura 4 - Desmonte de granito com utilização de explosivo.(http://www.granitosmariofigueiredo.com/extracao.php)	14
Figura 5 - Corte de rocha com fio diamantado. (http://pt.keenwiresaw.com/Fio-superior-da-pedreira-do-granito-do-fio-do-diamante-da-qualidade.-11.5MM-37beads-pd6621228.html).	15
Figura 6 - a) Roçadora; b) Disco diamantado sobre carrinho de rodas.(Azevedo et al., 2014).....	15
Figura 7 - Várias espessuras de rocha ornamental: a) Lancil rampeado; b) Sumidouro; c) Guia de passeio; d) Lajeta retangular; e) Lajeta quadrada. (adaptado de http://pt.granital.com/products ; https://www.or-granitos.com ; http://www.lusostone.pt/lancil-guia).....	16
Figura 8 - a) Azulejos de calcário; b) Telhas de ardósia; c) Cubos na calçada portuguesa. (Almeida & Amado, 2018 b; Henriques et al., 2009).....	16
Figura 9 - Banco e varanda. (www.granitos.pt ; www.bidaempresa.pt)	17
Figura 10 - Resíduos da exploração de rocha ornamental.....	20
Figura 11 - Estação de tratamento de lamas na empresa. (Silva, 2018).....	24
Figura 12-Esquema dos tipos de classificação de fileres.(adaptado de Wypych, 2016).....	31
Figura 13- a) cal hidratada no estado natural; b) cal hidratada depois da moagem. (https://nobreconstrutora.com.br/cal-hidraulica ; https://produto.mercadolivre.com.br/cal-hidratada).	37
Figura 14- a) Papel de pedra b) Cadernos de papel de pedra. (https://karststonepaper.com/pages/our-materials e https://www.emanagreen.com/pt-pt/).....	43
Figura 15- Materiais da mistura betuminosa. (adaptado de https://www.quora.com/What-is-asphalt-concrete).....	47
Figura 16-Exemplos de agregados.	48
Figura 17- Betume. (https://favoritkrep.ru/p181880764-bitum-neftyanoj.html .).....	49
Figura 18- Esquema: Classificação de misturas betuminosas.....	50
Figura 19-Tipos de misturas betuminosas e variação de materiais. (adaptado de Mohajerani, Abbas et al,2017)	51
Figura 20- Esquema das camadas de um pavimento flexível. (adaptado de Santos, 2013)	52
Figura 21- (1) Amostra da lama de mármore e calcários; (2) Amostra de granitos e rochas afins.	58
Figura 22-Desagregação das amostras após secagem.....	58
Figura 23-Aparelho de peneiração da jato de ar.	59
Figura 24- Material de ensaio: (1) peneiro 0,0063 mm com tampa transparente; (2) tampa de peneiros, fundo de peneiro, martelo e pincel; (3) série de peneiro.....	60
Figura 25- Agitação da proveta, com o provete e a querosene.....	60
Figura 26- Provete: (1) Sedimentação da amostra LMC; (2) Sedimentação da amostra LGV.....	61

Figura 27- Material de ensaios: (1) Bureta de 50 ml; (2) Balança [erro de 0,01g]; (3) JET- Querosene fornecida pela Galp.	61
Figura 28- Aparelho de compactação.....	62
Figura 29- Preparação das amostras: peneiração da amostra.	62
Figura 30- Preparação dos provetes: material após a peneiração.	62
Figura 31- Ensaio de Ridgen: queda do bloco.	63
Figura 32- Material: (1) pistão, bloco, papel filtro, amostra, colher; (2) paquímetro digital; (3) Balança [erro 0,01 g].....	64
Figura 33- Ensaio da mancha a LGV (1) e LMC (2)	64
Figura 34- Preparação da solução azul metileno (1); Preparação da suspensão da amostra (2); Adição de azul metileno (3); Deposição suspensão no papel filtro (4).....	65
Figura 35- Picnómetros com água e filer depois do banho.....	66
Figura 36- Extração do ar dos picnómetros com o dessecador.....	66
Figura 37- 1) Pesagem dos provetes; 2) Proвете no dessecador; 3) Preenchimento de água no picnómetro; 4) Provetes no banho de água a 25°C.	67
Figura 38- Preparação do mástique betuminoso: Pesagem do betume (1); Adição da amostra (2); Incorporação do betume e da amostra (3); Homogeneização da mástique na estufa (4).	68
Figura 39- Preparação dos anéis de betume: Preenchimento dos anéis (1); Anéis com betume (2); Rasar os anéis (3); Provetes concluídos (4).	68
Figura 40- 1) Ensaio da anel e bola; 2) Provetes no fim do ensaio (à esquerda temos a mástique, à direita o anel de só com betume).	69
Figura 41- Ensaio Número de Betume: Preparação e adição da água (1) e (2); Formação da pasta (3); Penetrómetro com provete (4).	70
Figura 42 - Provetes da LMC e LGV.	70
Figura 43 - 1) Pesagem do provete; 2) Célula; 3) Aparelho de Blaine.	71
Figura 44- Medidor de pH.	72
Figura 45- Medição do pH: Pesagem da amostra (1); Adição de água desmineralizada (2); Agitação da solução (3); Medição do pH com eléctrodo (4).	72
Figura 46- Equipamento de FRX da marca Thermo Scientific.	73
Figura 47- Material de ensaio: Amostrador-compactador, Peneiros, Cápsula com os provetes.	73
Figura 48- 1) Compactação de provete; 2) Cápsulas com provete; 3) Câmara com cápsula do provete; 4) Computador de auxílio.	74
Figura 49- Distribuição granulométrica da amostra LMC; Material retido no $P_{0,125mm}$ (LMC).	78
Figura 50- Distribuição granulométrica da amostra LGV; Material retido no $P_{0,125mm}$ (LGV).	78
Figura 51- Compactação de Ridgen.....	79
Figura 52- 1) Aproximação do íman à amostra LGV; 2) Amostra LGV e íman após passagem; 3) limpeza subtil com pincel para retirar excesso de partículas.	88
Figura 53- (1) e (2) Reação das partículas metálicas ao campo magnético.....	88

Índice de Quadros

Quadro 1 - Tipos de rochas ornamentais (adaptado de Figueiredo et al., 2001).	10
Quadro 2- Principais tipos de acabamentos de pedra natural.	19
Quadro 3 - Síntese da exploração e transformação de rocha ornamental.....	21
Quadro 4-Produção comercial de extração de minerais 2014/2018. (adaptado de DGEG, 2018)	25
Quadro 5-Produção comercial de rocha ornamental (2014/2018. (adaptado de DGEG,2018a).....	25
Quadro 6- Estimativa de lamas geradas da produção de 2018. (adaptado de DGEG,2018a)	27
Quadro 7- Tipos de cimento Portland (adaptado de NP EN 197-1).....	36
Quadro 8- Resumo dos requisitos mínimos para os fíleres.	39
Quadro 9- Pilares da descarbonatação da indústria cimenteira.....	41
Quadro 11- Designação das misturas betuminosas. (Estradas de portugal, 2014)	51
Quadro 12-Requisitos de granulometria para fíler (Adaptado de EN 13043:2002)	77
Quadro 13-Resultados obtidos do ensaio de peneiração a jato de ar.....	77
Quadro 14-Categorias dos vazios de Ridgen. (Adaptado de EN 13043)	79
Quadro 15-Valores dos vazios de Ridgen das amostras em estudo (LMC e LGV).....	79
Quadro 16 - Resultados obtidos no Ensaio de Azul Metileno.....	81
Quadro 17-Categorias para os valores máximos de azul de metileno. (NP EN 13043:2004)	81
Quadro 18-Valores determinados de massa volúmica.	82
Quadro 19-Valores da superfície específica (Blaine) das amostras em estudo.	82
Quadro 20- Categorias para os valores de número de betume (BN).(CEN, 2002).....	83
Quadro 21- Valores resultantes do ensaio de número de betume (BN).	84
Quadro 22- Categorias para a variação de amolecimento temperatura anel e bola. (CEN, 2013).....	84
Quadro 23- Valores determinados no ensaio de temperatura de amolecimento.	85
Quadro 24-Valores obtidos do pH da suspensão das amostras em água.....	86
Quadro 25- Resumo das propriedades determinadas das amostras em estudo.....	89
Quadro 26- Percentagem de material passado em fíleres comerciais.	91

(página propositadamente em branco)

Índice de Gráficos

Gráfico 1- Produção de Rocha Ornamental 2018. (adaptado de DGEG,2018a)	26
Gráfico 2-Exportação versus Produção de rocha ornamental em Portugal (2014 a 2018). (adaptado de DGEG, 2018b).....	26
Gráfico 3-Produção de total de cimento e cal (2013/2018). (adaptado de DGEG,2018a).....	33
Gráfico 4-Produção de cimento 2013/2018. (adaptado de DGEG,2018a).....	34
Gráfico 5-Produção de cal de 2013/2018. (adaptado de DGEG,2018a)	34
Gráfico 6-Valores obtidos no ensaio de Baridade em querosene.	80
Gráfico 7-Análise química por FRX da amostra LMC.	86
Gráfico 8-Análise química por FRX da amostra LGV.	87
Gráfico 9-Azul metileno.	90
Gráfico 10-Massa volúmica.....	91
Gráfico 11- Massa volúmica aparente ou Baridade querosene.....	92
Gráfico 12- Percentagem de volume de vazios (Ridgen).	93
Gráfico 13- Comparação da Superfície específica das amostras com os fíleres comerciais.	93
Gráfico 14-Variação de temperatura anel e bola.	94
Gráfico 15-Número de betume: comparação lamas e fíleres comerciais.....	95
Gráfico 16- Medições do pH: comparação lamas e fíleres comerciais	95

(página propositadamente em branco)

Índice de Equações

Equação (1) - Percentagem acumulada passados	59
Equação (2) - Baridade.....	61
Equação (3) - Massa de fíler compactado.....	63
Equação (4) - Percentagem de volume de vazios	63
Equação (5) - Valor de azul metileno	65
Equação (6) - Densidade do fíler.....	67
Equação (7) - Número de betume	70
Equação (8) - Superfície específica	71

(página propositadamente em branco)

Índice de acrónimos ou abreviaturas

- AB (argamassa betuminosa)
- AC (asphalt concrete / mistura betuminosa contínua)
- Al_2O_3 (óxido de alumínio)
- ANIET (Associação Nacional da Indústria Extrativa e Transformadora)
- ATIC (Associação Técnica da Indústria de Cimento)
- BB (betão betuminoso)
- BBr (Betão betuminoso rugoso)
- BN (número de betume)
- C (carbono)
- CaO (óxido de cálcio)
- Carbonato de cálcio (CaCO_3)
- CEM (Cimento Portland)
- CEN (Comité Europeu de Normalização)
- CICCOPN (Centro de Formação Profissional da Indústria da Construção Civil e Obras Públicas do Norte)
- Cl (cloro)
- cm (centímetro)
- cm^2 (centímetro quadrado)
- cm^3 (centímetro cúbico)
- Co (cobalto)
- CO_2 (dióxido de carbono)
- CoAsS (cobaltite)
- DGEG (Direção Geral de Energia e Geologia)
- FC1 (Fíler Comercial de Calcário)
- Fe (ferro)
- Fe_2O_3 (óxido e ferro (III))
- FeO (óxido de ferro (II))
- FRC1 (Fíler Recuperado de Calcário)
- FRG2 (Fíler Recuperado de Granito)
- FRX (Fluorescência de Raios X)
- g (grama)
- INE (Instituto Nacional de Estatística)
- INETI (Instituto Nacional de Engenharia e Tecnologia Industrial),
- ISEP (Instituto Superior de Engenharia do Porto)
- K_2O (óxido de potássio)
- kg (quilograma)
- LER (Lista Europeia de Resíduos)
- LGMC (Laboratório de Geotecnia e Materiais de Construção)

LGV (lamas de granitos variados)
LMC (lamas de mármore e calcários)
m (metro)
m² (metro quadrado)
m³ (metro cúbico)
MB (macadame betuminoso)
MB (Valor de azul metileno)
MBAM (mistura betuminosa de alto módulo)
mBBR (microbetão betuminoso rugoso)
MBD (Mistura betuminosa densa)
Mg (Megagrama)
min (minutos)
ml (mililitro)
mm (milímetro)
Mn (manganês)
MnO (dióxido de manganês)
°C (graus Celsius)
P (fósforo)
P_{0,125mm} (material retido no peneiro 0,125 mm)
PA (porous asphalt / mistura betuminosa drenante)
pH (potencial de hidrogénio)
PNAPRI (Plano Nacional de Prevenção de Resíduos Industriais)
RGR (Regime Geral de Gestão de Resíduos)
Rpm (rotações por minuto)
S (enxofre)
Si (sílica)
SiO₂ (dióxido de silício)
SMA (Stone Mastic Asphalt / mistura betuminosa descontínua)
TiO₂ (dióxido de titânio)
ton (toneladas)
VAB (valor acrescentado bruto)

(página propositadamente em branco)

(página propositadamente em branco)

Capítulo 1

Introdução geral

(página propositadamente em branco)

1. Introdução geral

1.1. Enquadramento geral

O presente documento insere-se na unidade curricular dissertação/estágio/projeto, do 2º ano do curso de Mestrado em Engenharia Geotécnica e Geoambiente do Departamento de Engenharia Geotécnica (DEG) do Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP), do Politécnico do Porto.

Portugal enquadra-se nos maiores produtores de rocha ornamental do mundo, apresentando um espetro diversificado de pedra natural contribuindo assim com riqueza e sustentabilidade no setor das pedras naturais/rochas ornamentais, de grande importância na economia Nacional destacando-se a exportação e elevada produção do país.

O setor da rocha ornamental apresenta elevada produção, e conseqüentemente, uma grande produção de resíduos que são gerados nos diversos processos de extração e beneficiamento. Assim, são geradas grandes quantidades de resíduos sólidos e lamas. Estas lamas são tratadas, extraindo-se a água com recurso a processos de decantação e filtro-prensagem, sendo posteriormente depositadas em aterros ou escombrelras.

A exploração responsável dos recursos geológicos constitui um meio importante de desenvolvimento, sendo uma alavanca para a melhoria do desempenho da economia nacional. Como tal é crucial consolidar as políticas e medidas de sustentabilidade, nomeadamente no campo da economia circular (Almeida & Amado, 2018b).

A economia circular é um conceito estratégico que se enquadrasse no propósito desta dissertação, pois promove a redução, reutilização, recuperação e reciclagem de materiais e energia, fomentando um modelo económico reorganizado, através da coordenação dos sistemas de produção e consumo em circuitos fechados. Materializa-se na minimização da extração de recursos, maximização da reutilização, aumento da eficiência e desenvolvimento de novos modelos de negócios.

Este trabalho pretende testar a funcionalidade das lamas obtidas a partir do corte de granitos mármores e calcários, como possíveis fontes de matéria-prima, através do estudo das suas características geométricas, físicas e químicas e a possibilidade de as incorporar em substituição dos fíleres tradicionais usados nas misturas betuminosas.

A rede rodoviária nacional é constituída por estradas nacionais, regionais e autoestradas. As vias rodoviárias são as infraestruturas mais utilizadas em todo mundo, e estando sujeitas a condições severas de tráfego e climáticas severas, é importante ter em consideração a composição da camada betuminosa, que deve ser constituída de materiais que cumpram os requisitos necessários.

Neste trabalho foram realizados ensaios de caracterização das lamas de resíduos resultantes da serragem dos blocos de granito, mármore e calcários, com o intuito de perceber se estas cumprem os requisitos necessários para a sua inclusão no processo de produção das misturas betuminosas.

Alguns ensaios foram realizados nas instalações do Centro de Formação Profissional da Indústria da Construção Civil e Obras Públicas do Norte (CICCOPN) em ambiente especial devido às contingências do Covid-19, com limitações no espaço e nos dias disponíveis para a realização dos mesmos, o que influenciou o número de ensaios realizados, limitando o trabalho desenvolvido à caracterização das amostras em estudo, não tendo sido possível realizar os estudos de aproveitamento em misturas betuminosas com provetes e posterior ensaio dos mesmos. O resto dos ensaios foram realizados no Laboratório de Geotecnia e Materiais de Construção do ISEP (LGMC), com recurso a equipamentos de ambos os laboratórios.

1.2. Objetivos

A tese enquadra-se na base da economia circular, contribuindo com estudos em resíduos que podem e devem ser incorporados no ciclo de produção novamente.

O principal objetivo consiste na análise e caracterização de dois tipos de lamas de rocha ornamental, com base em conhecimentos existentes e estudos realizados anteriormente.

Visa também avaliar as características segundo os requisitos mínimos das misturas betuminosas e também através da comparação direta das propriedades dos fíleres comerciais e recuperados com as lamas em estudo.

Este trabalho serviu para também para alertar para a grande produção de resíduos do setor de rocha ornamental, que representam toneladas de material depositado e que permanecem sem utilização sendo enviados para aterro.

Abordará estudos de empresas que já foram implementados, tais como as medidas impostas por políticas ambientais da União Europeia e pela Associação Técnica da Indústria do Cimento (ATIC) para a reutilização de resíduos.

1.3. Estrutura do trabalho

O trabalho é composto por 7 capítulos, sendo este o primeiro capítulo, que resume o enquadramento geral dos assuntos que serão abordados, indica os principais objetivos do trabalho e a sua organização, tendo em vista a concretização dos objetivos propostos.

O estado de arte engloba o capítulo 2, 3 e 4, introduzindo os três temas de base para o estudo e análise das amostras.

O segundo capítulo, aborda os processos de extração e transformação de rocha ornamental (pré-corte, corte primário, tratamento superficial, corte secundário), a consequente produção de resíduos e o tratamento das lamas provenientes do beneficiamento dos blocos tais como o processo de filtragem e secagem. Neste capítulo faz-se ainda o enquadramento do impacto ambiental deste tipo de resíduos e da economia circular.

No terceiro capítulo faz-se a contextualização dos fíleres, desde a sua definição, produção e tipos comercializados em Portugal. Abordam-se ainda as estatísticas de produção do cimento e, por último apresentam-se vários estudos sobre a substituição de fíleres por lamas de serragem de blocos de pedra natural.

O quarto capítulo desenvolve o tema das misturas betuminosas desde a sua composição aos campos de aplicação. Apresentam-se ainda estudos de introdução de resíduos de lamas em substituição de fíleres em misturas betuminosas.

No quinto capítulo são apresentadas as metodologias empregues nos ensaios realizados caracterização física e química das amostras em estudo.

No sexto capítulo, é feita uma análise comparativa das propriedades de fíleres comerciais e recuperados com os resultados obtidos das amostras em estudo.

Por último no capítulo 7 são redigidas as conclusões do estudo realizado às lamas de rocha ornamental comparando e retirando observações sobre o comportamento destes materiais.

No capítulo 8 encontram-se as referências bibliográficas e no capítulo 9 os anexos.

(página propositadamente em branco)

Estado de Arte

Capítulo 2: Rocha Ornamental

(página propositadamente em branco)

2. Rocha Ornamental

2.1. Introdução

Os recursos geológicos são essenciais para a vida moderna, na medida em que, constituem a matéria-prima de um grande número de atividades económicas e para um número razoável de indústrias transformadoras, aumentando a sua importância com o desenvolvimento sustentável (Almeida & Amado, 2018b).

A indústria extrativa engloba dois setores diferenciados, as rochas industriais e as rochas ornamentais. A rocha industrial abrange a extração e fragmentação da rocha, para produzir agregados para materiais de construção e minérios, com recurso ao desmonte com explosivos. As rochas industriais são normalmente fragmentadas e separadas por calibração.

A produção de minerais industriais passa pelas seguintes fases: fragmentação, moagem, separação, secagem, separação por calibre e por fim armazenamento (uso de silos) e embalagem, enquanto que nos inertes para agregados as condições de armazenamento são menos exigentes, recorrendo-se ao armazenamento em pilhas.

A indústria de rocha ornamental subdivide-se em duas atividades distintas: a extração e a transformação. O tipo de rocha deste setor é característico pelas suas propriedades estéticas com uma dureza e resistência elevadas, conferindo-lhe propriedades muito apelativas no mercado.

Define-se rocha ornamental ou pedra natural, como o material rochoso que passa por um processo de valorização mais ou menos extenso. Este processo destaca através de vários tipos de acabamentos/procedimentos, como a durabilidade, resistência mecânica, trabalhabilidade e sobretudo as propriedades estéticas tais como a cor e textura, conferindo-lhe propriedades muito apelativas no mercado.

A atividade extrativa de rochas ornamentais engloba o desmonte do maciço rochoso em forma de blocos paralelepípedicos, podendo ser realizado com recurso a vários métodos de desmonte, sendo os mais utilizados o fio diamantado (utilizado em rochas brandas e de dureza média) e o desmonte em furos paralelos complanares com recurso a explosivos (geralmente em rochas mais duras como por exemplo granitos).

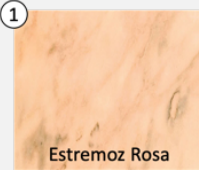


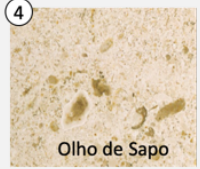

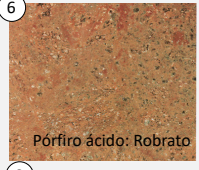


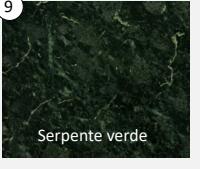

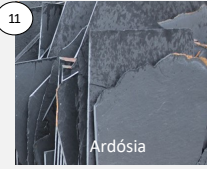
A atividade transformadora de rochas ornamentais garante a serragem dos blocos extraídos, com seguimento de uma linha de cortes e acabamentos até atingir o produto desejado. A sua transformação converte rocha bruta em produtos com vários usos como para pavimentos, revestimentos, aplicações domésticas, esculturas, guias de passeios e cubos (Almeida & Amado; 2018a).

O consumo em massa destes recursos naturais revolucionou o setor da pedra natural, com a criação de novas parcerias com diversas áreas. Desde as peças de cozinha, à decoração interior e exterior, assim como na área da moda este setor da pedra tem tido uma enorme capacidade de adaptação, como por exemplo o projeto conhecido como “*Marble Fashion Design*”, que pretende desenvolver ações de promoção internacional do mármore e das empresas da região dos mármore aliando esta indústria com design.

A pedra natural tem inúmeras aplicações desde as mais grosseiras e robustas tais como as cantarias, as guias de passeio, os degraus, entre outras, até às mais delicadas e pormenorizadas como as armações de óculos, relógios, joias, calçado e até vestuário.

Segundo o PNAPRI (Plano Nacional de Prevenção de Resíduos Industriais), o setor das rochas ornamentais engloba a transformação de três grupos de pedra natural, “Mármore e outras Rochas Carbonatadas”, “Granito e Rochas Similares” e “Ardósias e Xistos Ardosíferos” (Quadro 1).

Quadro 1 - Tipos de rochas ornamentais (adaptado de Figueiredo et al., 2001).

Mármore e outras Rochas Carbonatadas	Granito e Rochas Similares	Ardósias e Xistos Ardosíferos
→Mármore (1)(2) →Calcário (3)(4) →Brecha calcária (5)	→Pórfiro ácido (6) →Sienito Nefelínico (7) →Granito (8) →Serpentinito (9)	→Xisto (10) →Ardósia (11)
    	   	 

A diversidade geológica de Portugal, contribui para a exploração dos três grandes grupos de rochas ornamentais. As jazidas de mármore localizam-se no Alentejo, nos distritos de Évora e Beja, como as pedreiras de Estremoz, Borba e Vila Viçosa. A exploração de calcários concentra-se nos distritos de Lisboa e Santarém.

Os centros de produção de granito, encontram-se dispersos pelo resto do país com ênfase no Norte e Centro, como Pedras Salgadas em Vila Real, Monção, Braga, Portalegre, Évora. As ardósias são exploradas em Valongo no distrito do Porto. Os xistos são explorados no distrito de Beja, Évora, Castelo Branco, Guarda e Viseu.

Na Figura 1, encontra-se a distribuição dos centros de produção ao longo do país, verificando-se uma grande diversidade geológica.

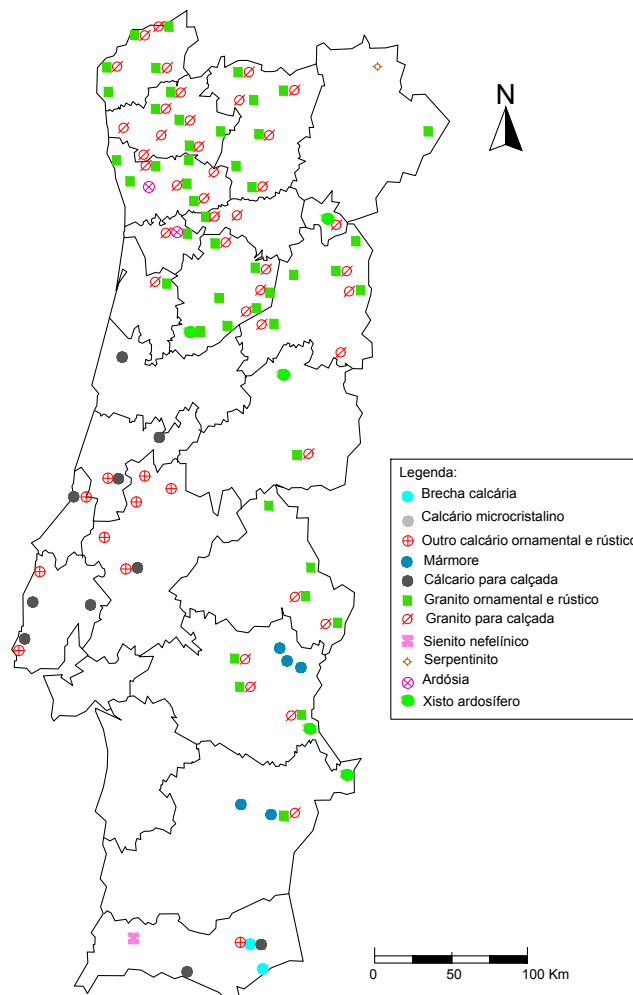


Figura 1 - Centros de produção de rocha ornamental. (adaptado de www.dgeg.pt, 2018)

No esquema da Figura 2 apresenta-se uma síntese do processo produtivo da rocha ornamental, desde a sua extração até à obtenção do produto final. Também se apresentam os subprodutos obtidos em cada etapa de transformação, os tipos de resíduos gerados e o tratamento das lamas (resíduos provenientes da serragem de blocos).

2.2. Extração de Rocha Ornamental

A extração de blocos de rochas ornamentais pode ser realizada por meio de desmonte a céu aberto (pedreira) ou em ambiente subterrâneo (minas/poços). A lavra das rochas ornamentais tem como objetivo a remoção de material rochoso em blocos de grandes dimensões. O produto final desta fase é um bloco com faces retangulares, de dimensões variadas, aproveitando o melhor possível, o recurso mineral para obter uma maior otimização da produção nas várias etapas de beneficiamento.

Numa primeira fase, realiza-se uma furação primária para libertar uma grande massa com centenas de metros cúbicos, combinando a furação horizontal e vertical. Depois de libertado, o bloco primário é subdividido em blocos de menores dimensões. Estes blocos de menores dimensões são tombados e divididos novamente até dimensões adequadas a um fácil manuseamento de modo a poderem ser transportados (adaptado Gomes et al., 2008).

Os métodos de exploração de pedra natural podem ser designados como métodos puros ou mistos. Considera-se que o método é puro quando se utiliza o mesmo método em todas as fases de desmonte. Já um método misto é aquele que combina várias tecnologias de desmonte até à obtenção do bloco comercializável. A individualização secundária pode ser realizada por exemplo com por cunhas hidráulicas ou argamassas de cimento expansivo (Figura 3).

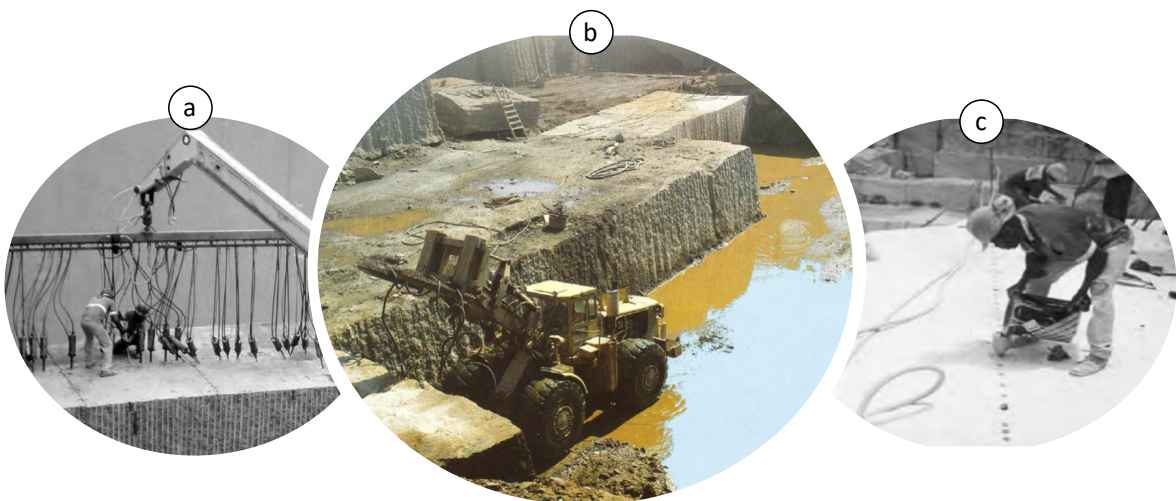


Figura 3 - a) Desmonte com cunhas hidráulicas; b) Carregamento do bloco; c) Desmonte com argamassa expansiva. (adaptado de Azevedo et al., 2014; Gomes et al., 2008)

Depois do destacamento dos blocos, é necessário fazer o volteio dos mesmos, recorrendo a equipamentos mecânicos como os bulldozers e as pás carregadoras (Figura 3).

A seguir a esta etapa, procede-se ao esquarteamento até à obtenção de blocos de menor dimensão, valorizando a homogeneidade e a aplicabilidade do bloco comercializável. Estes blocos são em seguida armazenados e encaminhados para a indústria transformadora.

Existem vários métodos de desmonte para a obtenção de blocos de pedra natural, pelo que em seguida se apresenta uma breve descrição dos mesmos.

2.2.1. Corte com perfuração em linha e desmonte com explosivos

O desmonte com recurso a explosivos é utilizado frequentemente em maciços graníticos (Figura 4). O método consiste na realização de furos paralelos complanares no maciço onde são preenchidos com uma substância explosiva (pólvora ou emulsões), que provoca o destacamento do bloco.



Figura 4 - Desmonte de granito com utilização de explosivo. (<http://www.granitosmariofigueiredo.com/extracao.php>)

2.2.2. Corte com fio diamantado

O princípio básico do corte com o fio diamantado consiste na realização de dois furos complanares e perpendiculares no maciço rochoso, de modo a que se intersectem, sendo em seguida o fio diamantado inserido ao longo dos mesmos, e as suas pontas emendadas criando um circuito fechado (Figura 5).

O corte processa-se com o movimento de translação do fio, devidamente tensionado, em contacto direto com a rocha. O desmonte é acompanhado com água introduzida no sulco do corte, para refrigeração do fio e limpeza das partículas do corte (adaptado de Azevedo et al., 2014).

Com a utilização deste método que apresenta um corte mais preciso e fino, deixa de ser necessária a etapa de pré corte dos blocos na unidade de transformação.



Figura 5 - Corte de rocha com fio diamantado. (<http://pt.keenwiresaw.com/Fio-superior-da-pedreira-do-granito-do-fio-do-diamante-da-qualidade.-11.5MM-37beads-pd6621228.html>).

2.2.3. Corte com discos diamantados

Este método é usado em bancadas baixas e em rochas brandas, sendo a profundidade do corte limitada a um terço do diâmetro do disco.

O equipamento consiste num disco dentado diamantado sobre carris ou apoiado num carrinho. A utilização desta tecnologia é usada em casos muito específicos extraíndo blocos pequenos e na obtenção de por exemplo degraus ou guias de passeio. O desempenho do disco diamantado (Figura 6) é idêntico ao da roçadora.

2.2.4. Corte com roçadoras

Este tipo de desmonte é recorrente nas operações de desmonte em ardósias e calcários. As roçadoras (Figura 6) são constituídas por um braço de 2 a 4 metros de comprimento no qual uma corrente dentada diamantada desliza na face e no sentido de corte da rocha. O método é utilizado em calcários, ardósias e travertinos. Tal como o disco diamantado a roçadora desloca-se sobre carris ao longo do corte da rocha.

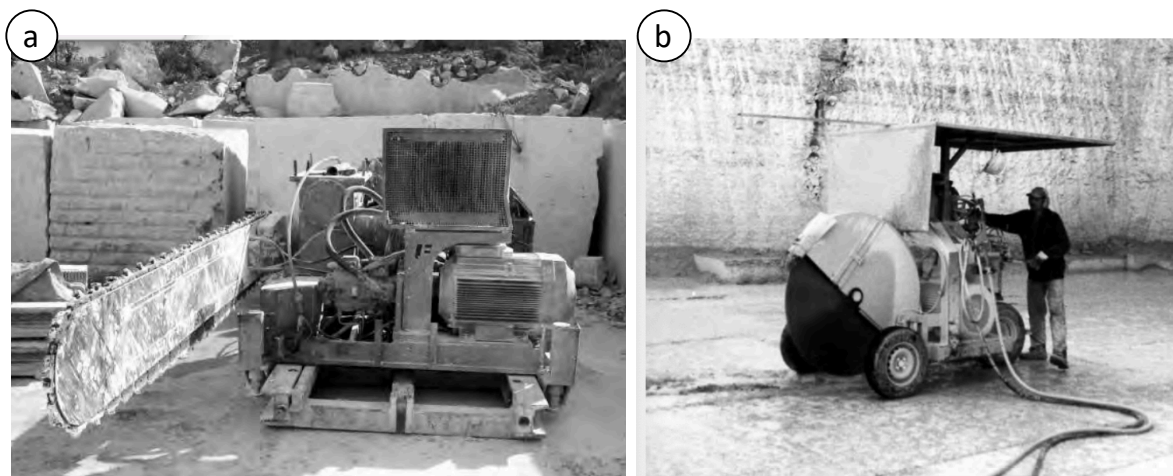


Figura 6 - a) Roçadora; b) Disco diamantado sobre carrinho de rodas. (Azevedo et al., 2014)

Todos os métodos de desmonte têm em consideração a litologia da jazida, os volumes a explorar e os custos associados à tecnologia de extração de rocha.

O objetivo final destes métodos é como já foi referido anteriormente, a obtenção de blocos que serão posteriormente enviados para as unidades de transformação.

2.3. Transformação

Nas oficinas de transformação os blocos são serrados e cortados, através de processos mecânicos transformando o bloco em chapas. As chapas vão permitir uma panóplia de produtos de diferentes espessuras tais como de grossas espessuras, com mais de 8 cm (guias de passeio, degraus, rodapés, lancis, cubos entre outros), e de finas espessuras até 8 cm, (ladrilhos, revestimentos, lajetas quadradas e retangulares, telhas, entre outros) (Figura 7 e Figura 8).

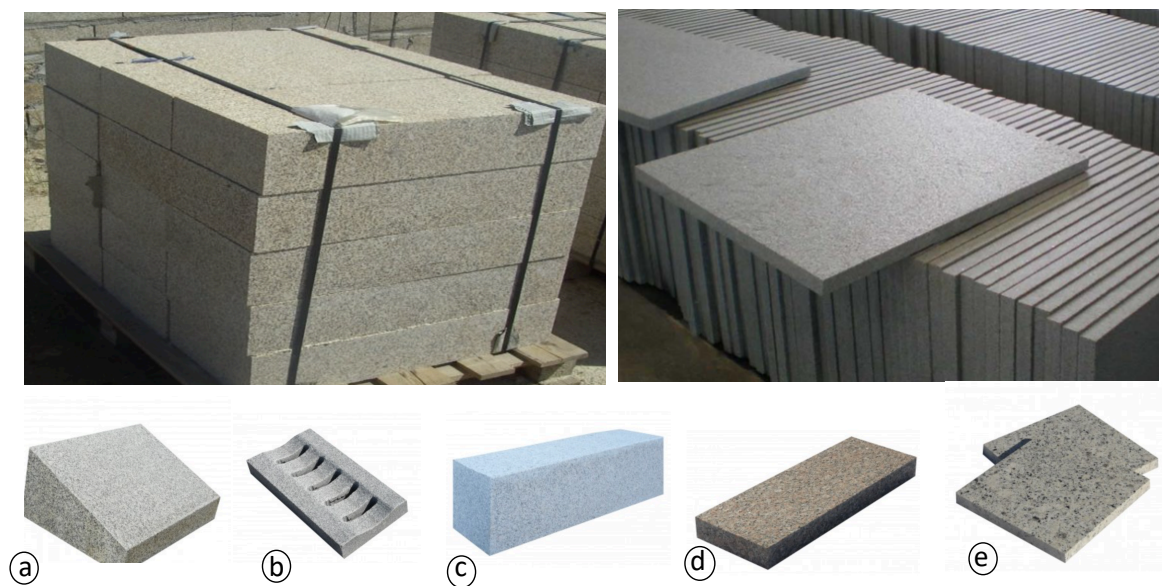


Figura 7 - Várias espessuras de rocha ornamental: a) Lancil rampeado; b) Sumidouro; c) Guia de passeio; d) Lajeta retangular; e) Lajeta quadrada. (adaptado de <http://pt.granital.com/products>; <https://www.orgranitos.com>; <http://www.lusostone.pt>)



Figura 8 - a) Azulejos de calcário; b) Telhas de ardósia; c) Cubos na calçada portuguesa. (Almeida & Amado, 2018 b; Henriques et al., 2009)



Figura 9 - Banco e varanda. (www.granitos.pt; www.bidaempresa.pt)

A transformação da rocha inclui várias fases de corte que vão desde o pré-corte, corte primário (corte do bloco em chapas), acabamento superficial, corte secundário (corte das chapas em produtos finais), até aos acabamentos finais.

O beneficiamento da rocha incluiu os acabamentos superficiais, (o polido, o amaciado, o areado, o flamejado e o bujardado), valorizando os produtos finais em termos estéticos.

As indústrias de transformação da rocha ornamental elaboram diferentes tipos de peças conforme a sua função (Figura 9), utilizando equipamentos especializados de modo a conferir características e acabamentos únicos ao produto final (Almeida & Amado, 2018b).

2.3.1. Pré-corte

O **pré-corte** é a fase zero da transformação, podendo realizar-se na própria pedreira ou à entrada da unidade de transformação, podendo não ser necessária. O objetivo é tornar as faces do bloco planas e mais perpendiculares entre si.

Este procedimento tem como função melhorar o rendimento da etapa seguinte (corte primário), sendo comum a utilização de equipamentos como engenhos monolâmina e máquinas monofio do tipo diamantado, sempre com abundância de água para a limpeza do corte e auxiliando no arrefecimento da ferramenta de corte (Figueiredo et al., 2001).

2.3.2. Corte primário

O **corte primário**, transforma o bloco em chapas de diversas espessuras de acordo com os produtos finais. Os equipamentos mais utilizados para obtenção de chapas são os engenhos de multilâminas, os engenhos multifio diamantado, ou ainda os corta blocos dependendo do tipo de rocha e dos produtos finais pretendidos.

Na empresa onde foram recolhidas as amostras em estudo, o corte primário é realizado com recurso a um engenho multilâminas de aço e mistura abrasiva. O engenho é constituído por um quadro porta lâminas e as lâminas são de aço, sendo feita a adição de uma calda abrasiva através de um sistema de chuveiros sobre o bloco.

O controlo da mistura abrasiva deve ter em conta o rácio de granalha de aço, cal, água e partículas minerais que se vão soltando durante a serragem, fundamentais no rendimento do corte de blocos permitindo o aumento da qualidade da serragem. O corte é realizado pela mistura abrasiva guiada pelas lâminas. A lama abrasiva é constituída à base de granalha de aço ou ferro fundido, cal e água. (adaptado de Figueiredo et al., 2001).

A **lama abrasiva** é permanentemente bombeada sobre o bloco. A incorporação de cal confere características básicas à calda abrasiva que permite controlar a sua viscosidade e manter a granalha e o pó de pedra em suspensão, contribuindo também para a refrigeração, diminuindo o desgaste das lâminas, evitando a oxidação da granalha e da rocha.

Por baixo do engenho, existe um reservatório que contém a mistura abrasiva que é bombeada até ao sistema de chuveiros por sua vez a descarrega sobre os blocos durante a serragem, após o que regressa ao reservatório (circuito fechado). Frequentemente, é feito o controlo da mistura para averiguar o excesso de minerais tal como o desgaste na granalha. Parte da mistura é retirada e enviada para outro reservatório, adicionando-se novos componentes (granalha, cal e água) para repor as suas características iniciais. O resto da mistura é rejeitada e direcionada para um tanque ou bacia de decantação para posterior filtro prensagem (adaptado de Torres, 2007).

2.3.3. Tratamento superficial

Depois da divisão do bloco em chapas é feito o seu **tratamento superficial**, recorrendo a polidoras contínuas ou descontínuas, bujardadoras e flamejadoras. O tratamento superficial faz a regularização das faces da chapa ao mesmo tempo que são aplicados diversos tipos de acabamentos como: o polido, o bujardado, o flamejado, o areado, o amaciado, clivado (acabamento natural) e o escovado (Quadro 2).

Os acabamentos visam por realçar as características naturais da pedra tais como a cor e a textura, valorizando a rocha a nível comercial. O tipo de acabamento superficial tem grande influência tanto no aspeto visual como na resistência ao tempo (adaptado de Spínola, 2009).

Quadro 2- Principais tipos de acabamentos de pedra natural.

Acabamentos de pedra natural		
Tipos	Descrição	Aplicação
Polido	Confere uma superfície brilhante, perfeitamente plana e que reflete a luz.	
Amaciado	Acabamento muito semelhante ao polido com uma superfície lisa, mas de aspeto mate.	
Areado	Superfície final com uma rugosidade fina e homogénea.	
Flamejado	Aspeto rugoso e vítreo incitando alteração cromática dos cristais para tons mais quentes que os originais	
Bujardado	De acordo com o tipo de bujarda utilizada temos uma grande variedade de acabamentos (riscado, escassilhado, picado, bujardado)	
Clivado	Acabamento natural que aproveita a foliação dos xistos e ardósias.	
Escovado	Superfície semi-rugosa e mais suave que o areado, conferindo um acabamento rústico e antiderrapante	

2.3.4. Corte secundário

O **corte secundário** é realizado através de discos diamantados, cortadoras de ponte monodisco e multidisco e ainda equipamentos de corte por laser ou jato de água.

No corte secundário são realizados vários cortes nas placas (que já se encontram na espessura pretendida) de modo a obter produtos finais tais como ladrilhos, guias de passeio, degraus de escada, entre outros.

Nas unidades de transformação existem outros trabalhos especiais que se realizam por meio de máquinas de corte CNC e que originam peças com formas especiais tais como letras, símbolos e outros.

A seguir a este corte secundário faz-se um controlo da qualidade para realizar a embalagem e expedição dos produtos.

Em cada uma das fases é possível verificar a produção de grandes quantidades de resíduos, que originam um problema ambiental. Pretende-se com este estudo encontrar soluções viáveis para os dois tipos de lamas em estudo.

2.3.5. *Produção de Resíduos*

Todos os processos do ciclo de produção de rocha ornamental (Figura 2) implicam perda de material rochoso, nas diversas operações desde a extração até à transformação, resultando em grandes quantidades de resíduos acumulados. Distinguem-se três tipos de resíduos principais de rocha, tais como pó de pedra, as lamas e por fim os resíduos de rochas ou aparas de rocha (Figura 10).

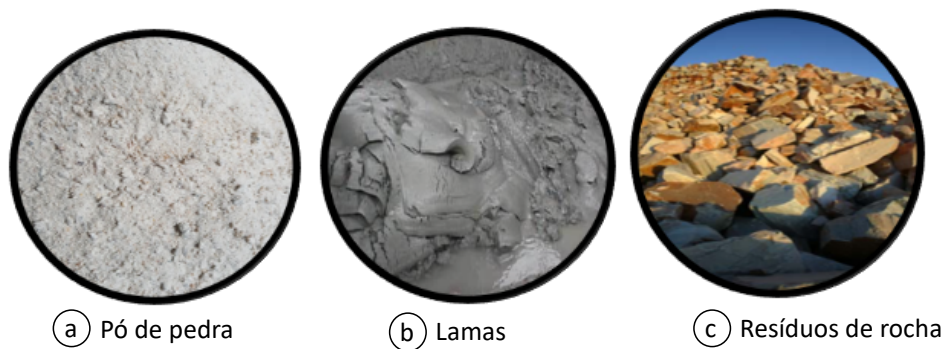


Figura 10 - Resíduos da exploração de rocha ornamental.

Os resíduos surgem na extração de pedra ornamental nas operações de desmonte com o fio diamantado e na beneficiação do bloco devido à utilização de serras de corte, empregando água, que auxilia na limpeza, arrefecimento e lubrificação dos processos. Quando estas águas são sujeitas a decantação, as partículas finas de rocha vão sedimentar formando uma lama.(Figueiredo et al., 2001).

Na transformação as lamas são geradas em grandes quantidades, num circuito fechado de circulação de água pelos vários processos de serragem e de corte, onde esta se mistura com as

partículas de rocha, sendo depois enviadas para um decantador, onde é feita a sedimentação das partículas sólidas através de floculantes, formando assim as lamas. (Almeida & Amado, 2018a)

No Quadro 3 estão representados os processos e os resíduos produzidos ao cargo do processo de extração e transformação de rocha ornamental referindo as várias fases e os equipamentos utilizados em cada uma delas.

Quadro 3 - Síntese da exploração e transformação de rocha ornamental.

Fase	Processos	Equipamento	Produto final	Tipo de Resíduos
Extração	- Decapagem	- Fio diamantado	- Blocos e dimensões nas máximas entre (1,20 X 1,50 X 3,30) m - Fragmentos de blocos	- Terras e estéril
	- Abertura de canais	- Explosivo		- Pó de pedra
	- Perfuração	- Perfuradora		- Lamas
	- Corte	- Equipamentos mecânicos		- Resíduos de rocha
	- Derrube			
	- Esquartejamento			
Serragem de Blocos	- Pré-corte	- Mono fio - Monolâmina	- Bloco de faces regulares - Chapas	- Lamas - Resíduos de rocha
	- Corte Primário	- Engenho multilâminas - Corta blocos - Engenhos multifio diamantado	- Chapas (inferior a 8 cm de espessura) - Chapas de grandes espessuras (mais de 8 cm)	- Lamas - Resíduos de rocha
Corte e Polimento	- Polimento	- Polidoras de tapete - Polidora manual	- Tratamento de Chapas - Chapas polidas	- Lamas - Resíduos de rocha
	- Corte secundário - Acabamentos	- Cortadoras de discos	- Ladrilhos - Revestimentos - Cantarias	- Lamas - Resíduos de rocha
	- Inspeção do produto final	- Controlo de qualidade feita por operadores especializados	- Ladrilhos - Revestimentos - Cantarias	- Resíduos de rocha - Outros resíduos

2.4. Tratamento de lamas

Como já foi referido anteriormente, na transformação, as lamas são geradas em grandes quantidades, pelos vários processos de serragem, sendo depois enviadas para um decantador, onde é feita a sedimentação das partículas sólidas através de flocculantes, formando assim as lamas. Após a sedimentação, a água é enviada de novo para o circuito e as lamas remanescentes são enviadas para um decantador, seguida de um filtro prensa de forma a aumentar a sua concentração e diminuir o seu volume (Figura 2) (adaptado de Almeida & Amado, 2018a).

O setor da pedra natural inclui empresas que se dedicam apenas à extração e /ou transformação de rochas de várias litologias. A imposição da economia circular, bem como a diminuição do impacto ambiental, incute medidas nos processos de transformação da rocha ornamental e na produção de resíduos. Atualmente, várias empresas separam as lamas da serragem de rochas carbonatadas e mármore, de rochas siliciosas e granitos, e de xistos. A triagem de resíduos permite a separação das partículas de acordo com as propriedades químicas e físicas dos diferentes tipos de rocha serrados, com o intuito do reaproveitamento destas lamas como subprodutos nouro tipo de materiais.

A composição das lamas depende da origem litológica e do procedimento a que foram submetidas, ou seja, é possível distinguir vários tipos de lamas tais como:

- Lamas provenientes da extração: que provêm dos processos de extração do bloco e que essencialmente são constituídos por pó de pedra e água.
- Lamas provenientes da serragem de blocos de granitos e rochas afins: a sua constituição apresentará minerais resultantes da sua desagregação aquando da serragem, granalha abrasiva e água. A sua cor deverá ser mais acinzentada devido à composição química deste tipo de rochas.
- Lamas provenientes da serragem de blocos de mármore e rochas carbonatadas: a sua constituição apresentará minerais resultantes da desagregação da serragem do bloco, mistura abrasiva e água. A sua cor deverá ser mais esbranquiçada devido à composição química destas rochas.
- Lamas provenientes da transformação das chapas: resíduos provenientes do corte secundário de transformação de pedra natural.

Nesta fase as lamas da transformação são reencaminhadas para um sistema de tratamento que envolve várias etapas representadas. Todos estas etapas estão representadas no esquema da Figura 2. Em seguida descrevem-se as várias fases deste tratamento, sendo a primeira fase a decantação, passando pela filtragem e posterior secagem.

2.4.1. Decantação

No sistema de decantação e prensagem, as lamas provenientes das operações de serragem, corte e tratamento superficial são recolhidas num reservatório a partir do qual são bombeadas para um tanque de decantação onde, com adição de um floculante, se efetua a separação sólido/líquido por sedimentação. A água clarificada é conduzida para um depósito de reserva a partir do qual é reintroduzida no processo. As lamas acumulam-se na zona inferior do tanque, de onde são periodicamente removidas e enviadas para um filtro-prensa onde são concentradas sob pressão, retidas nas telas formando as lastras. Após este processo final de concentração, o teor de humidade reduz-se para cerca de 25%. Daqui o filtrado é enviado para escombreciras ou aterros (Torres, 2007).

2.4.2. Filtragem

O filtro prensa permite um manuseamento dos resíduos mais prático, diminuindo o gasto a nível de mão de obra e no transporte dos resíduos para o local de deposição. Este sistema proporciona indubitavelmente menores custos e o reaproveitamento das águas (adaptado de Torres, 2007).

O equipamento consiste de um conjunto alternado de quadros ociosos, em que o material sólido (designado torta/lastra) é retido e adensado durante a operação de filtragem, e placas maciças que possuem superfícies com sulcos ou furos, que permitem a drenagem do filtrado. O conjunto de placas e quadros apoia-se, verticalmente, sobre um par de suportes paralelos, fixos na estrutura do filtro (Azevedo et al., 2014).

O princípio de funcionamento consiste na desidratação por ar comprimido, com pressões entre os 6 a 10 bar, segundo o qual a água é deslocada pelo ar, à medida que passa pela torta (designação da lama no processo de filtragem) no filtro. Inicialmente a lama é bombeada para as câmaras que se encontram rodeadas por lonas filtrantes. Ao bombear, a pressão aumenta e a polpa é forçada a atravessar as lonas, provocando uma acumulação de sólidos formando-se a torta. Na descarga, a pressão diminui separando cada uma das placas permitindo que a torta caia por gravidade, para caixas de transportadores de camiões.

Na Figura 11, encontra-se a estação de tratamento de lamas, instalada na empresa onde foram recolhidas as lamas em estudo, constituída por tanques verticais de decantação, realizando-se o espessamento das lamas com a adição de floculante, sendo que posteriormente essa separação é conduzida até ao filtro prensa.



Figura 11 - Estação de tratamento de lamas na empresa. (Silva, 2018)

2.4.3. Secagem

A secagem pode ser considerada como o último estágio da desidratação das lamas, sendo definida como a operação de remoção da água por vaporização, retirando água ainda existente nos sólidos, normalmente após as etapas de decantação e filtragem. Dependendo do teor de humidade esta tarefa pode ser realizada de várias formas, no exterior da oficina, em estufas, ou em fornos cilíndricos rotativos. A secagem é uma operação de custo elevado, sendo dos maiores entraves para a reutilização destes produtos. O processo mais comum rege a secagem destes materiais ao ar livre, em pilhas. Atualmente existem tecnologias usadas na secagem de lodos de esgoto e grãos de cereais, que podem ser alternativas válidas para beneficiar estas lamas.

2.4.4. Impacto ambiental e economia circular

A utilização dos georrecursos ao longo dos tempos foi crucial e fundamental para o crescimento da sociedade, no entanto nem sempre os olhamos como sendo finitos, e as consequências da sua exploração abusiva e desordenada são atualmente sentidas em todo o mundo, afetando a vida humana e toda a biodiversidade do planeta, comprometendo o futuro. Tomar medidas e encontrar soluções, apresenta-se nos dias de hoje como uma obrigação para o desenvolvimento sustentável da sociedade, que tem em conta a limitação dos georrecursos como matérias-primas, e com isso disponibilizar meios para investigações, com vista a encontrar soluções, mais sustentáveis, verdes e ecológicas.

Nos últimos anos, foram tomadas várias ações promovendo processos de ecoeficiência e cooperação entre empresas com entidades tecnológicas (ANIET,2018), para incentivar a investigação e publicação de estudos com sucessos nos mais variados setores comerciais. A União Europeia definiu metas a cumprir para obrigar os países a minimizar o problema dos resíduos, citando: **“Aumentar a incorporação de resíduos na economia de 56% em 2012, para 68% em 2020 e 86% em 2030”**(Ministério do Ambiente, 2015).

Através da análise das estatísticas de produção do setor conseguimos perceber a quantidade de resíduos gerados pelo mesmo.

A produção na indústria extrativa abrange três grandes setores: os minerais industriais, os minerais para construção e os minerais metálicos. A indústria extrativa produz anualmente aproximadamente cerca de 49 milhões de toneladas (ton) de material rochoso, avaliado em cerca de 930 milhões de euros. Representando mais de 90% da matéria-prima destinada à indústria de construção.

Nos quadros seguintes segue-se um resumo da produção de rochas ornamentais e alguns indicadores da indústria extrativa no comércio, tomando como base os últimos dados disponibilizados pelo Instituto Nacional de Estatística (INE), relativamente ao período de 2014 a 2018. O Quadro 4 apresenta a produção comercial de setor na extração de minerais, com os dados relativos período de 2014 até 2018.

Quadro 4-Produção comercial de extração de minerais 2014/2018. (adaptado de DGEG, 2018)

<i>Indústria Extrativa- Produção 2014/18</i>								
Minerais	Industriais		Metálicos		Para construção		Total geral	
Ano	(ton.)	(10 ³ €)	(ton.)	(10 ³ €)	(ton.)	(10 ³ €)	(ton.)	(10 ³ €)
2014	5 067 862	46 309	473 926	300 971	43 393 836	349 294	48 935 624	696 575
2015	4 557 525	44 272	501 596	403 767	42 260 473	450 054	47 319 594	898 093
2016	4 438 696	46 859	496 209	353 522	41 535 269	402 397	46 470 174	802 778
2017	4 939 644	59 520	442 796	446 142	46 626 810	507 679	52 009 250	1 013 340
2018	4 737 366	59 260	619 156	561 726	47 878 302	623 003	53 234 824	1 243 989

O setor de **minerais para construção** engloba a produção de agregados, a produção de minerais para fabrico de cimento e cal e a produção de rocha ornamental. O Quadro 5, indica os valores da produção comercial de rocha ornamental no período de 2014 a 2018.

Quadro 5-Produção comercial de rocha ornamental (2014/2018). (adaptado de DGEG,2018a)

<i>Produção 2014/2018</i>		
Rocha ornamental		
Ano	(ton.)	(10 ³ €)
2014	2 830 818	165 597
2015	2 887 076	165 957
2016	2 808 148	367 654
2017	3 275 144	179 588
2018	3 430 729	185 692

A **produção de rocha ornamental**, teve um aumento da procura no mercado o que corresponde a um incremento na extração desde de 2014 até 2018, com cerca de 3 430 729 ton (três milhões

quatrocentos e trinta mil e setecentos e vinte e nove toneladas) em 2018, reproduzindo cerca de 185 milhões de euros.

A rocha ornamental é classificada em categorias de acordo com as suas propriedades físicas, geológicas e estéticas, o Instituto Nacional de Estatística (INE) apresenta valores estatísticos de produção e valores de lucro associado. O Gráfico 1, apresenta em percentagem de cada categoria de rocha ornamental no mercado português, tendo em conta os dados estatísticos de produção de 2018.

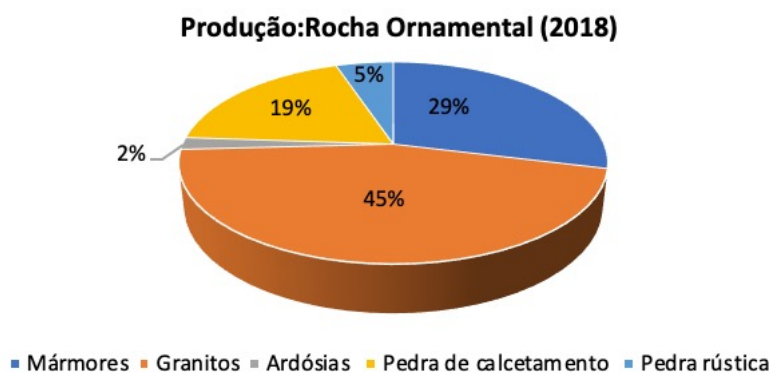


Gráfico 1- Produção de Rocha Ornamental 2018. (adaptado de DGEG,2018a)

Este setor engloba uma forte componente de exportação comercial de produtos finalizados. O Gráfico 2, compara a produção anual com a exportação de pedra natural.

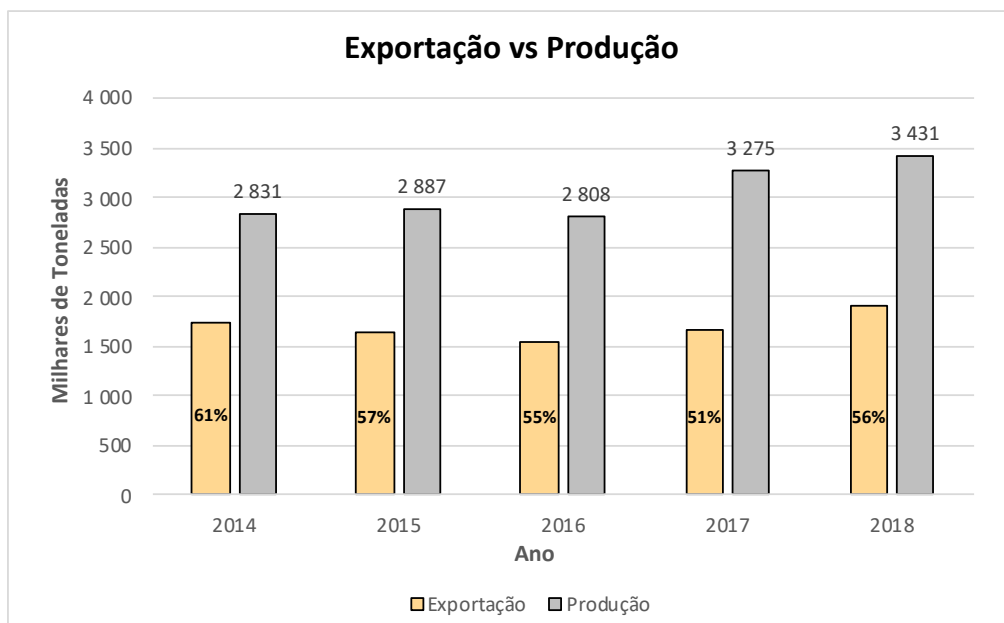


Gráfico 2-Exportação versus Produção de rocha ornamental em Portugal (2014 a 2018). (adaptado de DGEG, 2018b)

De acordo com o Gráfico 2, mais de 50% da produção nacional de rocha ornamental teve como destino o mercado internacional em 2018, tendo sido exportadas 1 916 972 ton (um milhão novecentos e dezasseis novecentos e setenta e duas toneladas) de rocha ornamental, representando cerca de 425 milhões de euros. Foram importadas 197 014 ton (cento e noventa e sete e catorze toneladas) de rochas para fins ornamentais, num valor de 61 milhões de euros nesse mesmo ano, o que revela que as entradas e saídas tem muita relevância internacionalmente no património geológico nacional, dado que os valores exportação são muito maiores do que os de importação. Os dados anteriormente referidos servem como uma introdução às quantidades de rocha ornamental produzidas neste setor, que por sua vez constituem toneladas de resíduos de lamas do seu processo de transformação.

Segundo estudo do INETI (Instituto Nacional de Engenharia e Tecnologia Industrial), o processo de serragem, corte e polimento originam aproximadamente 0,1 m³ de lamas por tonelada de rocha transformada. Assim, e segundo o estudo concluiu -se que para o ano de 1998 foram geradas cerca de 347 382 ton (trezentos e quarenta e sete e trezentos e oitenta e duas toneladas) destes resíduos de acordo com a produção de serrados e produtos colocados em obra desse ano.

Com recurso aos dados disponibilizados pelo INE relativamente à produção de rocha ornamental do ano de 2018, é possível **estimar a quantidade de lamas produzidas da extração e transformação de rocha ornamental** (Quadro 6).

Quadro 6- Estimativa de lamas geradas da produção de 2018. (adaptado de DGEG,2018a)

Ano	Tipo de Rocha	Produção (ton.)	Estimativas de lamas geradas (m ³)	Estimativas de lamas geradas (ton.)
2018	Ardósia	66 245	6 624	19 310
	Mármore e calcários	989 955	98 996	287 483
	Granitos e R.similares	1 530 572	153 057	454 580
	Pedra calcetamento e rústica	677 305	67 731	201 160
	Total	3 264 077	326 408	962 533

Nos últimos 20 anos, o mercado de rocha ornamental aumentou significativamente, tal como a produção de rocha ornamental, provocando um aumento nos resíduos gerados na transformação de rocha ornamental. Em 2018 de acordo com a estimativa foram estimadas cerca de 962 533 ton (novecentos e sessenta e dois mil quinhentos e trinta e três toneladas) de resíduos no subsector de rocha ornamental (Quadro 6), o que comparativamente com ano de 1998 considera-se um aumento significativo.

As lamas provenientes da serragem de rocha ornamental têm normalmente como destino final a deposição em aterros localizados em área licenciada pelas empresas que os produzem, sendo classificadas e geridas como um resíduo, pois segundo o Decreto-lei nº178/2006, de 5 de setembro,

o resíduo é uma “substância ou objeto de que o detentor se desfaz ou tem a intenção ou obrigação de se desfazer, nomeadamente os identificados na lista europeia de resíduos (LER).”(Silva, 2018)

As lamas provenientes do corte primário de rocha ornamental, enquadram-se, segundo a classificação de resíduos, nos resíduos industriais, logo o PNGR (Plano Nacional Gestão de Resíduos), estão sujeitas a dois planos sectoriais para a sua gestão o PESGRI 2001 (Plano Estratégico dos Resíduos Industriais) e o PNPRI (Plano Nacional de Prevenção de Resíduos Industriais). As lamas estão ainda sujeitas à classificação da lista Europeia de Resíduos (LER), uma lista harmonizada de resíduos que tem em consideração a origem e composição dos mesmos (Silva, 2018).

A gestão de resíduos, tais como as lamas de serragem e corte, deve ser realizada de acordo com o Regime Geral de Gestão de Resíduos (RGR), aprovado pelo decreto-lei nº178/2006, de 5 de setembro, alterado pelo DL nº 73/2011, de 17 de junho. No seu artigo 7º estabelece-se que a política e a legislação em matéria de resíduos devem respeitar o princípio de hierarquia: prevenção e redução, preparação para a reutilização, reciclagem, outros tipos de valorização e por fim a eliminação (Silva, 2018).

Capítulo 3

Fíler

(página propositadamente em branco)

3. Fíler

3.1. Definição

A origem da utilização de fíleres a adição de materiais (betão, misturas betuminosas, tintas, entre outros) é desconhecida. A utilização deste produto teria como primeira finalidade diminuir os custos da produção do material. O estudo e o desenvolvimento tecnológico mudaram a forma e o objetivo de usar fíleres, contando com as potencialidades que se podem extrair da sua composição química e física (adaptado de Wypych, 2016).

“O fíler é um material sólido capaz de alterar as propriedades físicas e químicas dos materiais que os incorporam por interação superficial ou não, e as suas próprias características físicas”(Wypych, 2016).

Wypych aborda algumas classificações de fíleres, definindo a classificação em função da origem do fíler. Uma das abordagens mais simplistas por parte de outros autores classifica os diferentes fíleres em função das alterações que a sua utilização provoca no material ao qual são adicionados. Mas a classificação mais conceituada a nível da comunidade mundial é a classificação pelo tamanho de partícula do fíler com todas as propriedades intrínsecas a este. (Figura 12)

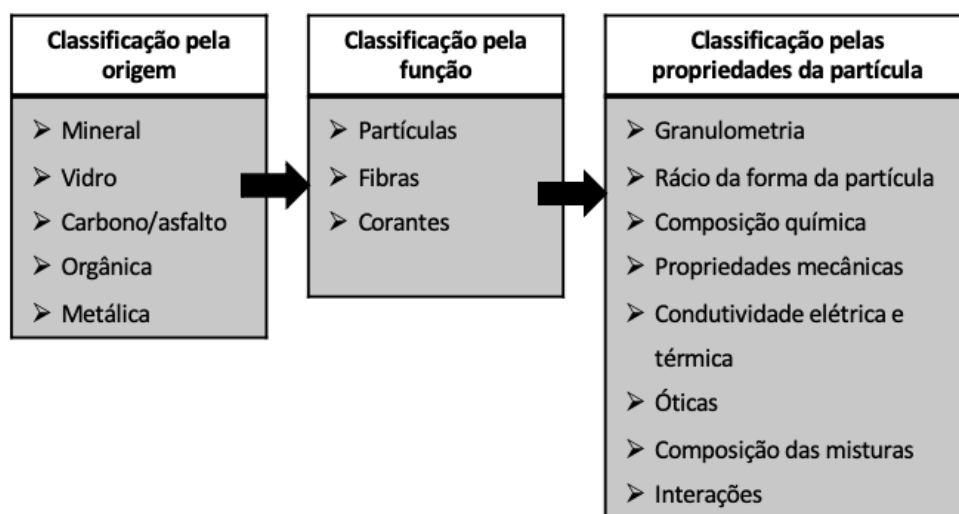


Figura 12-Esquema dos tipos de classificação de fíleres.(adaptado de Wypych, 2016)

O caderno de encargos tipo de obra das estradas de Portugal, descreve que *“a designação de fíler é atribuída a todo o agregado cuja maior parte passa no peneiro de 0,063 mm e que pode ser adicionado aos materiais de construção para lhes conferir certas propriedades.”*

Em suma, pode definir-se como fíler todo o agregado/material sólido cuja maior parte do material passa pelo peneiro 0,063 mm sendo capaz de alterar e modificar as características físicas ou químicas dos materiais a que este é adicionado.

3.2. Produção e Tipos de Fíleres em Portugal

As aplicações dos fíleres, abrangem um mercado muito vasto, e que consiste na utilização em produtos que não são sofisticados do ponto de vista técnico. Os fíleres tem variadas aplicações desde a produção de plásticos, papel, tintas e vernizes, cosmética, farmácia, fibras, matérias abrasivas e por fim na indústria da construção, sendo este último, um dos setores com o maior consumo de fíleres.

A indústria da construção como mencionado no capítulo 2, engloba diversos subsectores nos quais se destaca, com uma percentagem de 15 %, a produção dos minerais para cimentos e cal, onde se incluem os fíleres. Segundo o caderno de encargos há duas classes distintas de fíleres, o fíler recuperado e o fíler comercial, e a sua distinção deve-se ao processo de produção.

O processo de obtenção do fíler recuperado, resulta da recuperação de finos nas centrais de produção de misturas betuminosas, no qual os agregados são secos e aquecidos no tambor secador, com a alimentação constante de uma fonte de calor (chama), sendo por isso é mantida a renovação do ar dentro do tambor. Esta renovação de ar vai produzir correntes de ar, e para evitar a dispersão das partículas de menor dimensão para a atmosfera, o ar é extraído do tambor e passa obrigatoriamente por uma série de filtros de mangas, que retêm a maior parte dessas partículas. Esse material retido no filtro constituiu um fíler natural ou recuperado, fruto do processo de produção de misturas betuminosas, que terá as características geológicas do agregado que foi seco. Este fíler é armazenado em silos (Teixeira, 2015).

Assim sendo o **fíler recuperado** pode ser de qualquer natureza petrográfica, pois dependerá da natureza petrográfica do agregado utilizado para a mistura betuminosa (Estradas de Portugal, 2014).

O **fíler comercial** a ser utilizado em obras rodoviárias deverá ser de natureza calcária, cimento Portland, cal hidráulica ou cinzas volantes (Estradas de Portugal, 2014).

Os fíleres comerciais naturais são produzidos numa central de britagem, e resultam da britagem e moagem de rocha. O processo inicia-se com a extração da rocha, seguida de britagem até aos 8 e 12 mm, depois é feita a moagem do material britado com recurso ao moinho de bolas. A redução da dimensão das partículas aumenta a produção de finos e a sua permanência irá prejudicar a eficácia do sistema de moagem, pelo que é realizada a aspiração desses finos para fora do moinho, mantendo a produtividade do processo. No final, o produto é homogeneizado e armazenado para ensacagem ou para a expedição a granel em camião cisterna (Teixeira, 2015).

3.3. Estatística de produção de cimento em Portugal

A ATIC (Associação Técnica da Indústria de Cimento) defende que o aumento global da população, e a fixação provável de 75 % desta população em grandes centros urbanos, juntamente com o crescimento económico, colocarão uma pressão acrescida sobre os limitados recursos naturais do planeta e implicarão um esforço adicional de redução dos efeitos das alterações climáticas (ATIC, 2019).

A indústria de cimento e cal é um setor que apresenta elevadas emissões de dióxido de carbono (CO₂) para atmosfera, uma vez que utiliza combustíveis fósseis e biomassa como principal fonte de calor no processo de secagem/cozedura do material.

Uma breve análise às estatísticas da Direção Geral de Energia e Geologia (DGEG) revela a dimensão da indústria do cimento em Portugal e o seu desenvolvimento ao longo dos anos. Esta análise permitiu estudar, a produção dos materiais que são utilizados como fileres, tais como o cimento Portland e a suas variantes. A avaliação da produção total de minerais para cimento e cal de 2013 a 2018, representa-se no Gráfico 3.

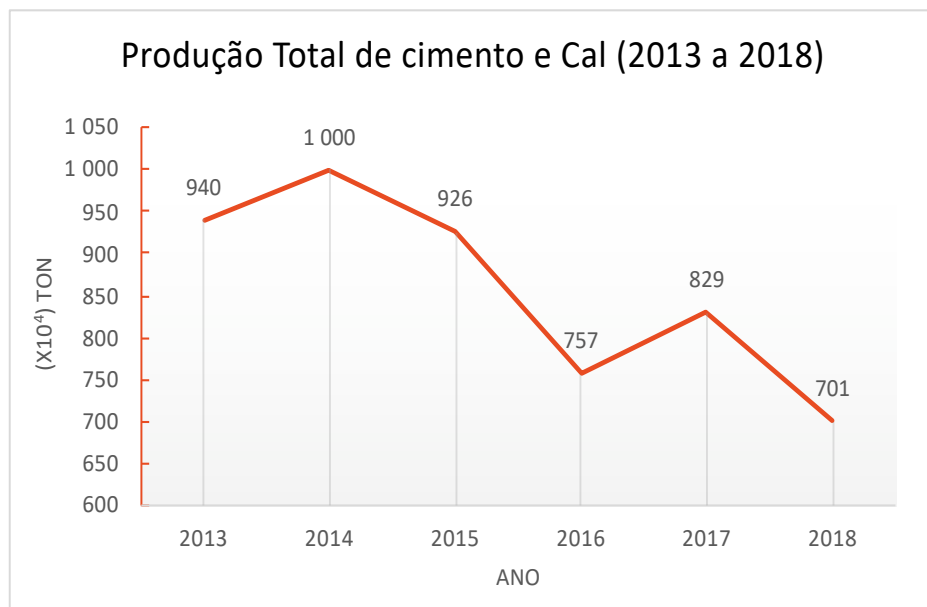


Gráfico 3-Produção de total de cimento e cal (2013/2018). (adaptado de DGEG,2018a)

Em 2014 foram produzidas cerca de 10 milhões de toneladas de cimento e cal, equivalente a um retorno de 21 044 000€ (vinte e um milhões e quarenta e quatro mil euros). Em 2018, a produção caiu para cerca de 7 006 431 ton (sete milhões seis mil quatrocentos e trinta e uma toneladas), com uma perda de 4 310 000€ (4 milhões trezentos e dez mil euros). A produção sempre foi bastante elevada, no entanto de 2016 a 2018 houve uma diminuição da produção de minerais para cimento e cal, que coincidiu com a crise que se instalou no sector em Portugal.

No Gráfico 4 apresenta-se a evolução da produção de cimento no período de 2013 a 2018. O seu consumo tem um comportamento muito similar ao apresentado no Gráfico 3 apresentado acima, representando a maior percentagem. No Gráfico 5, podemos constatar o desenvolvimento da produção de cal em Portugal do ano de 2013 a 2018, segundo as estatísticas da DGEG (Direção Geral de Energia e Geologia) e do INE (Instituto Nacional de Estatística). No entanto, a produção de cal tem um comportamento bastante linear à exceção do ano de 2016, em que apresenta uma queda de produção para 412 577 ton (quatrocentos e doze mil e quinhentos e setenta e sete toneladas).

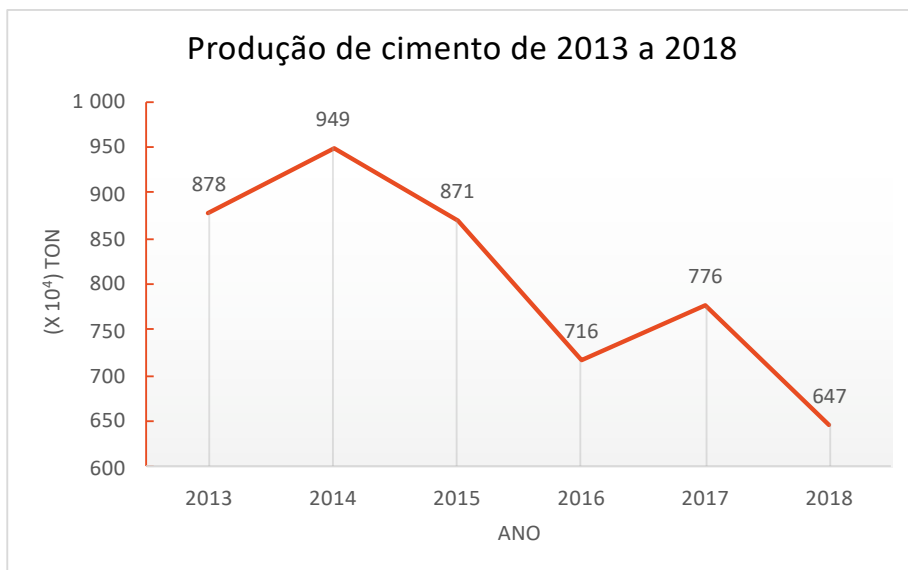


Gráfico 4-Produção de cimento 2013/2018. (adaptado de DGEG,2018a)

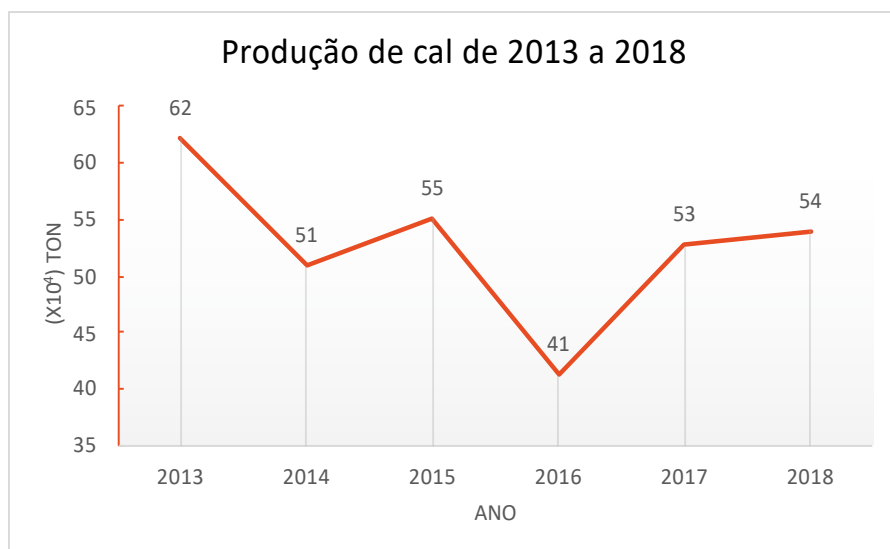


Gráfico 5-Produção de cal de 2013/2018. (adaptado de DGEG,2018a)

A queda da produção apresenta algumas vantagens tais como, a diminuição da produção de dióxido de carbono na produção destes materiais, a diminuição do uso de recursos geológicos, e o aumento

da reutilização de recursos geológicos como as lamas em estudo. O grande inconveniente revê-se na crise que este setor teve de ultrapassar e todos os impactos que este teve nas empresas de produção de cimento e cal.

3.4. Fíler comercial: Cimento

Segundo o caderno de encargos tipo de obra - Estradas de Portugal, o cimento é um ligante hidráulico, ou seja, é caracterizado como um “material inorgânico finamente moído que, quando misturado com água, forma uma pasta que faz presa e endurece em virtude das reações e processos de hidratação e que, depois de endurecer, mantêm a sua resistência e estabilidade mesmo debaixo de água”. (Estradas de Portugal, 2014)

O processo de fabrico do cimento é feito através da exploração das seguintes matérias-primas: Cálcio, Sílica, Alumina e Ferro. (Teixeira, 2015)

A composição do cimento resulta da mistura química entre clínquer e gesso. O clínquer é um material granular que resulta da calcinação de uma mistura de calcário, argila e de componentes químicos como o silício, o alumínio e o ferro. (SECIL, s. d.)

A linha de produção do cimento consiste numa série de etapas e procedimentos, primeiramente a extração dos blocos, depois a britagem, moagem a cru e cozedura (produção de clínquer), ensilagem e pré-homogeneização, moagem do cimento (adição de gesso ao clínquer) e por fim embalamento e a expedição do material. Nesta indústria, o fabrico de produto não conforme não é permitido nem utilizado, pelo que o controlo da qualidade está construído de forma a minimizar ao máximo a ocorrência de falhas (adaptado de SECIL, s.d.; Teixeira, 2015).

A norma NP EN 197-1 agrupa os cimentos em cinco tipos principais:

1. CEM I – Cimento Portland
2. CEM II – Cimento Portland composto
3. CEM III – Cimento de alto-forno
4. CEM IV – Cimento pozolânico
5. CEM V – Cimento composto

A norma NP EN 197-1 define ainda três classes de resistência à compressão ao fim de 28 dias de idade: 32,5MPa; 42,5MPa e 52,5 MPa. Para cada classe de resistência de referência consideram-se dois tipos de resistência aos dois dias, uma classe com resistência normal, e uma com classe resistência elevada.

O cimento Portland tipo I (CEM I) é constituído por 95 % de clínquer e outros materiais. O cimento Portland é um ligante hidráulico, constituído por um pó muito fino, que passa quase todo no

peneiro de 0,125 mm de abertura sendo usado fundamentalmente no fabrico de argamassas e betões (adaptado de Teixeira, 2015).

O CEM II representa uma variante do cimento Portland incorporando mais constituintes adicionados ao clínquer e ao gesso. Assim, e de acordo com a norma NP 197-1, tendo em conta os seus constituintes principais, foi estabelecido a designação deste tipo de cimentos consoante as percentagens dos diferentes componentes para cada tipo.

O Quadro 7, faz referência a algumas variantes do cimento Portland, descritas na NP EN 197-1 - Cimentos.

Quadro 7- Tipos de cimento Portland (adaptado de NP EN 197-1).

Tipos de cimento CEM II	Composição
cimento Portland escória	65-94% clínquer, 6-35 % escória e 0-5% gesso
cimento Portland de sílica de fumo	90-94% clínquer, 6-10 % sílica de fumo e 0-5% gesso
cimento Portland de pozolana	72-94% clínquer, 5-28% pozolana natural e 0-5% gesso
cimento Portland de cinza volante	72-94% clínquer, 6-28% cinzas volantes, 0-5% gesso
cimento Portland composto	65-94% clínquer, 0-27% escória, 0-23% pozolana natural, 0-23% cinzas volantes, 0-16% filer

3.5. Fíler comercial: Cal Hidráulica

A Cal é constituída por óxidos ou hidróxidos de cálcio e óxido ou hidróxidos de cálcio e de magnésio produzidos por decomposição térmica (calcinação) de jazidas de carbonato de cálcio (por exemplo, calcário, giz, conchas) ou jazidas de carbonato de cálcio e de magnésio (por exemplo, calcário dolomítico, dolomite). Fundamentado na norma **NP EN 459-1: Cal de construção**, segue-se uma série de definições que se aplicam aos diversos tipos de cal comercializáveis. Existem vários tipos de cal, tais como:

- **Cal aérea:** cal que se combina e endurece com o dióxido de carbono presente no ar.
 - Cal cálcica: a cal aérea é constituída principalmente por óxido de cálcio ou hidróxido de cálcio, sem qualquer adição hidráulica ou pozolânica.
 - Cal dolomítica: é uma cal aérea constituída principalmente por óxidos de cálcio e magnésio ou hidróxido de cálcio e magnésio, sem qualquer adição hidráulica ou pozolânica.

-
- Cal Viva: é uma cal aérea constituída principalmente por óxidos, que reage exotermicamente com água.
 - Cal hidratada: é uma cal aérea constituída principalmente por hidróxidos, produzida pela extinção controlada da cal aérea.
 - **Cal com propriedades hidráulicas:** principalmente constituída por hidróxido de cálcio, silicatos de cálcio e aluminatos de cálcio.
 - Cal hidráulica natural: é uma cal com propriedades hidráulicas produzida pela queima de calcários mais ou menos argilosos ou siliciosos e redução a pó por extinção com ou sem moagem. Tem a propriedade de fazer presa e endurecer quando misturada com a água e reação com o dióxido de carbono do ar.
 - Cal formulada: é constituída essencialmente por cal aérea ou cal hidráulica natural a que se juntou material hidráulico ou pozolânico. Tem a propriedade de fazer presa e endurecer quando misturada com água e por reação com o dióxido de carbono (carbonatação).
 - Cal hidráulica: é um ligante constituído por cal e outros materiais como o cimento, escória granulada de alto forno, cinzas volantes, fíler calcário e outros materiais adequados. Tem a propriedade de presa quando misturada com água. O dióxido de carbono do ar contribui para o processo de endurecimento.

Na Figura 13, observa-se a cor branca característica da cal hidráulica comercializada.

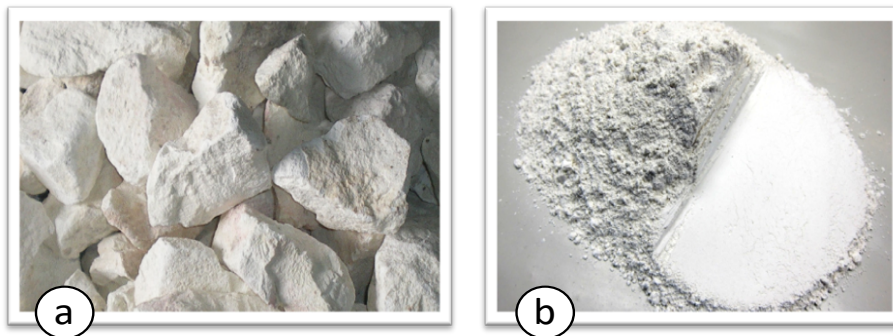


Figura 13- a) cal hidratada no estado natural; b) cal hidratada depois da moagem.
(<https://nobreconstrutora.com.br/cal-hidraulica>; <https://produto.mercadolivre.com.br/cal-hidratada>).

3.6. Fíler comercial: Cinzas volantes

De acordo com as NP 197-1 as cinzas volantes são obtidas por precipitação eletrostática ou separação mecânica das poeiras dos gases de combustão das fornalhas alimentadas com carvão pulverizado. Geralmente são de origem siliciosa ou calcária. Tanto a cinza volante siliciosa como a cinza volante calcária são um pó fino, com propriedades hidráulicas e ou pozolânicas.

A pozolana presente nas cinzas volantes é um dos componentes do cimento utilizado na preparação de misturas pozolânicas (Cimento Portland Pozolânico), misturada com água e cal hidratada, melhorando as características dos betões e permitindo a sua utilização dentro de água. As principais vantagens das cinzas volantes são constituírem uma maior resistência à corrosão (alta alcalinidade), redução da porosidade com um aumento da impermeabilidade sendo ideal para utilizações de estruturas submersas.

3.7. Características dos fíleres

As características do fíler permitem fazer a escolha baseada nas suas propriedades e na interação destas com a matriz a que este vai ser adicionado. Consoante a função do produto, a escolha dos fíleres incidirá, naturalmente, nas propriedades que imprimam vantagens no processo ou no produto final.

Os fíleres devem ser classificados e caracterizados de acordo com as propriedades físicas (densidade, condutividade térmica, resistência à compressão), químicas (composição química, resistência química), elétricas (resistividade), óticas (cor) e morfologia (granulometria, forma da partícula, superfície específica).

As características dos fíleres são especificadas na norma NP EN 13043:2004 e também mencionadas no caderno de encargos das estradas de Portugal, considerando-se relevantes por fazer em parte da constituição de vários materiais de construção, como do betão do hidráulico, das argamassas e das misturas betuminosas para camadas da base, camadas de regularização, camadas de ligação e de desgaste.

Estes requisitos, foram resumidos no Quadro 8, de acordo com a norma NP EN 13043, cuja aplicação é orientada para os fíleres utilizados em misturas betuminosas e betão hidráulico.

Quadro 8- Resumo dos requisitos mínimos para os fíleres para misturas betuminosas.

Propriedades	Norma de ensaio	Designação	Resultados	Unidades
Geométricas	EN 933-1	Análise Granulométrica – Método de Peneiração	% de passados em massa % de finos	(kg)
	EN 933-9	Avaliação de finos - Teste Azul Metileno	MB (valor de azul metileno)	grama de corante / kg da fração 0/2 mm
	EN 933-10	Granulometria para fíler com jato de ar	% retidos em massa	(g)
Mecânicas e físicas	EN 1097-3	Determinação da baridade e do volume de vazios	Baridade (pb) Volume de vazios (v)	(Mg/m ³) (%)
	EN 1097-3 Anexo A	Método para a determinação da baridade do fíler em querosene	Baridade	(Mg/m ³)
	EN 1097-4	Determinação de vazios de fíler compactado	Volume de vazios	(%)
	EN 1097-5	Determinação do teor de água por secagem em estufa ventilada	Teor de água	(%)
	EN 1097-7	Determinação da densidade da partícula do fíler- método do picnómetro	Densidade	Mg/m ³
Em fíleres nas misturas betuminosas	EN 13179-1	Variação da temperatura anel e bola	Temperatura	° celsius
	EN 13179-2	Viscosidade Aparente ou número de Betume	NB (número de betume	–
Análise química	EN 1744-1:1998	Teste para as propriedades químicas dos agregados: análise química	-Sais de cloreto solúveis em água pelo método de Volhard -Teor total de enxofre -Sulfatos solúveis em ácido -Matéria orgânica na fixação do betão e endurecimento -Solubilidade do fíler em água	–
	pr EN 1744-4:2001	Suscetibilidade à água	–	–

3.7.1. Campo de aplicação

Os fíleres são atualmente utilizados em diversos tipos de indústrias com variadas funções. Na sua maioria são usados em grandes quantidades para materiais de construção tais como betão, misturas betuminosas e argamassas, principalmente como material de enchimento. A constituição destes materiais de construção é importante para o estudo, para perceber as funções que os fíleres desempenham nestas misturas.

3.7.2. Campo de aplicação: Betão

O betão é um material formado através da mistura devidamente proporcionada de cimento, agregados grossos, finos e água, com a possibilidade de adicionar outros componentes como adjuvantes ou outro tipo de aditivos como fíleres (Barbosa, 2013).

O desenvolvimento da sociedade moderna e o aumento populacional tornaram o betão como um dos materiais mais utilizados no mundo no setor da construção civil, sendo utilizado em diferentes

estágios da construção de infraestruturas. Assim são utilizados em obras como nos túneis, nas pontes, nas barragens, em estradas, em edifícios comerciais e habitacionais, entre outras.

A importância deste consumo humano é sentida no setor das matérias-primas, e dos tipos de componentes necessários para que o betão possa ser produzido com a qualidade e quantidade pretendida. Assim, é de salientar que a produção de materiais como fíleres é igualmente proporcional à produção dos betões causando diversos impactos ambientais e levando à escassez de recursos naturais.

3.7.3. Campo de aplicação: Argamassas e Misturas betuminosas

As argamassas são uma mistura de um ou mais ligantes, areia e água, podendo ainda ser adicionados outros componentes de forma a melhorar ou conferir outras propriedades à mistura. As argamassas têm diversas aplicações tais como: assentamento de pedras, blocos ou tijolos, em revestimentos para a regularização de superfícies como paredes, pavimentos, tetos, podendo também ser usada em peças de pré-fabricação leve.

As principais características a ter em conta numa argamassa, são a resistência mecânica, compacidade, na impermeabilidade, na aderência, na resistência química, na durabilidade e as variações de volumes. Estas propriedades variam conforme a quantidade, qualidade e tipo de ligante, areia e quantidade de água, ou seja, variará conforme a composição da argamassa (adaptado de Francisco, s.d.).

As misturas betuminosas são muito utilizadas em estradas tendo na sua constituição fíleres, para a formação do mástique betuminoso.

3.8. Substituição de fíleres por lamas

Na Europa, e em Portugal, a indústria cimenteira tem um elevado impacto na economia, gerando Emprego, valor acrescentado bruto (VAB) e contribuindo positivamente para o saldo da balança de transações correntes (ATIC, 2019).

Nos últimos anos a indústria cimenteira portuguesa tem vindo a investir fortemente para reduzir as suas emissões de carbono, aumentando a eficiência térmica e elétrica, privilegiando o coprocessamento de combustíveis alternativos, utilizando matérias-primas secundárias e ensaiando tecnologias inovadoras de captação de carbono e de produção de clínquer/cimento de baixa intensidade (ATIC, 2019).

A indústria cimenteira nacional tem levado a cabo projetos e investimentos para a redução de emissões de dióxido de carbono (CO₂), nas diversas linhas de ação incluídas nos 5 pilares da descarbonatação (Quadro 9).

Quadro 9- Pilares da descarbonatação da indústria cimenteira.(ATIC, 2019)

Eficiência de Recursos	Eficiência Energética	Captação, Armazenagem e Uso de Carbono	Eficiência do Produto	Cadeia de Valor a Jusante
Combustíveis alternativos; Substituição de matérias-primas; Substituição de clínquer; Novos cimentos; Eficiência no transporte;	Eficiência Energética Elétrica; Eficiência Energética Térmica;	Captação de carbono e o seu uso; Captação biológica do carbono;	Betão de mais baixa intensidade carbónica;	Edifícios inteligentes; Reciclagem do betão; Recarbonatação; Construção sustentável;

Vários autores realizaram estudos de incorporação de lamas provenientes da transformação de rocha ornamental. Estas investigações vão no sentido de avaliar a viabilidade da incorporação de lamas e restos/aparas de pedra em diversos tipos de materiais de construção civil, nomeadamente, na produção de betão, argamassas, em produtos cerâmicos e de vidro, e na agricultura as lamas podem servir para regularizar a acidez dos solos (adaptado de Almeida & Amado, 2018a).

A aplicação em produtos cerâmicos é uma forte aposta, com diversos estudos nessa área, como os realizados por (Almeida & Amado,2018), que apresentam resultados e metodologias muito favoráveis na incorporação das lamas, em percentagens de 2,5% a 5%, e 10 % com melhorias no processo de cozedura e secagem.

As aplicações de resíduos em argamassas de betão mostram resultados muito interessantes e viáveis.

(Francisco, s.d.) concretizou um estudo sobre a incorporação das lamas de resíduos graníticos e lamas carbonatadas, em tijolos, argamassas de revestimento, e na indústria dos cimentos. O estudo englobou a caracterização física e química de lamas graníticas, que por sua vez foram incorporadas na substituição de alguns dos componentes usados nos materiais de construção descritos acima, como a areia. Os resultados mostraram-se positivos com aumentos significativos e melhoramento das características das argamassas. Nas pastas de cerâmica de tijolos as lamas carbonatadas e silicatadas podem substituir as matérias-primas dos tijolos. Avaliou ainda tratamento das lamas resultantes do corte de blocos de granitos na eliminação de partículas de ferro (Fe) através da separação magnética de alta intensidade. O material resultante dessa separação foi incorporado em pastas cerâmicas, substituindo a areia e argila grosseira, tendo os resultados revelado a diminuição da plasticidade do material.

(M. A. Silva & Holanda, 2010), analisaram a adição de resíduo de rocha ornamental nas propriedades e microestrutura de porcelana elétrica aluminosa (materiais de isoladores elétricos de alta tensão, com requisitos de alta qualidade e excelente nas propriedades físicas, mecânicas e elétricas). Neste estudo foram incorporadas quantidades de lamas de rocha ornamental até 35 % em substituição de feldspato sódico (matéria-prima alternativa natural). As peças foram avaliadas em função das seguintes propriedades tecnológicas: retração linear, absorção de água, massa específica aparente, porosidade aparente, resistência à compressão e resistividade elétrica. Os resultados revelaram ser possível a inclusão destas lamas até valores de incorporação de 10 %. A microestrutura foi fortemente influenciada pela adição do resíduo de rocha ornamental. O resíduo apresenta assim, potencial na substituição de feldspato sódico numa massa cerâmica para o fabrico de porcelana elétrica.

(Allam et al., 2014) realizaram um estudo para resolver o impacto da produção de resíduos de corte de blocos na indústria transformadora no Egito. O objetivo da investigação consistiu na produção de betão verde, substituindo 10% da areia e 5 % do cimento por resíduos graníticos de rocha ornamental. Os resultados obtidos demonstraram um aumento da resistência à compressão na mistura com 10 % de lamas em vez de areia, já na substituição do cimento a adição causou uma diminuição drástica na resistência à compressão comparado com o comportamento de uma mistura normalizada, sendo que, não deixa de ser utilizável para a produção de betão ecológico.

(Lima et al., 2017) estudaram o comportamento das massas expansivas de demolição (argamassa de cimento expansivo) com adição de lama do beneficiamento de rocha ornamental. A argamassa de cimento expansivo é constituída por uma mistura de cal (60%) e por outros minerais (óxido de alumínio, óxido de ferro, sílica...).

A avaliação da influência dos resíduos na mistura foi realizada com diferentes percentagens de lamas adicionadas a um preparado de massa expansiva. Os parâmetros de avaliação incluíram ensaios de fluidez e ensaios de expansão e pressão. Os resultados concluíram que, até incorporações de 30 %, as argamassas de cimento expansivo indicavam performances favoráveis, para um bom desempenho.

A incorporação destes resíduos, pode ser feita em produtos mais sofisticados como o caso do papel pedra, uma combinação de carbonato de cálcio (CaCO_3) com a junção de resinas não tóxicas de polietileno que age como ligante. Este produto reaproveita os minerais presentes nos resíduos de setor da pedra para produzir um tipo de papel duradouro (Figura 14), resistente a fungos e impermeável. Esta solução já se encontra presente no mercado (como por exemplo nas empresas: EmanaGreen, Torraspapel Portugal, Kars Stone Pape, entre outras...), com múltiplas aplicações e

vantagens ao papel convencional, com a eliminação de produtos químicos e ácidos, água e cloro (Adaptado de Almeida & Amado, 2018b).



Figura 14- a) Papel de pedra b) Cadernos de papel de pedra. (<https://karststonepaper.com/pages/our-materials> e <https://www.emanagreen.com/pt-pt/>)

Desta forma, a utilização de lamas possui uma dupla vantagem, porque para além de permitir a resolução de problemas ambientais devidos à deposição dos resíduos, também contribui para a diminuição da utilização de recursos minerais indispensáveis ao fabrico de outros produtos, sendo então as lamas vistas como uma matéria-prima (Francisco, s.d.).

(página propositadamente em branco)

Capítulo 4

Misturas Betuminosas

(página propositadamente em branco)

4. Misturas betuminosas

Neste capítulo são descritas as misturas betuminosas, suas propriedades e campos de aplicação. O seu estudo é importante uma vez que serão avaliadas neste trabalho as características típicas de fíleres utilizados em misturas betuminosas.

4.1. Definição e composição de mistura betuminosa

As misturas betuminosas são constituídas por um conjunto de materiais granulares, doseados de uma forma ponderal ou volumétrica, misturados numa central com uma quantidade de ligante previamente determinada. Logicamente, como o comportamento das misturas betuminosas depende de cada um dos seus componentes elementares, antes de se proceder ao estudo da sua formulação é imperativo que os agregados e o ligante betuminoso sejam corretamente estudados e caracterizados, de modo a que o desempenho das misturas não seja comprometido pelo comportamento inadequado dos seus constituintes, ou pela sua má dosagem (Oliveira, 2017).

Os componentes sólidos de uma mistura betuminosa do tipo betão betuminoso são os agregados e o betume, aos quais poderão ser adicionados aditivos para melhoramento das suas características, tais como fibras, borracha, polímeros ou outros constituintes. Devem ser utilizados apenas materiais constituintes de conformidade comprovada (Santos, 2016).

4.2. Materiais/composição da mistura betuminosa

As misturas betuminosas são compostas por quatro frações de materiais: agregados, fíler, betume e ar (Figura15), que se encontram em três estados físicos diferentes, estado sólido composto pelas duas primeiras frações, estado líquido composto pelo betume e estado gasoso composto pela fração do ar (adaptado de Antunes, 2013).

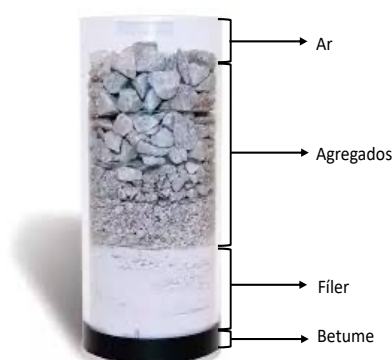


Figura 15- Materiais da mistura betuminosa. (adaptado de <https://www.quora.com/What-is-asphalt-concrete>)

Uma mistura betuminosa é constituída por uma mistura de materiais, em que cerca de 10% a 15% do volume total da mistura é ocupado pelo ligante betuminoso, 75% a 85% é ocupado pelos

agregados sendo que as quantidades alteram ligeiramente conforme o tipo de mistura betuminosa (Antunes, 2013).

Agregados:

- O agregado é definido como o material granular de partículas ligadas ou destinadas a ser ligadas por aglutinante, em materiais como betões, argamassas ou macadames (Antunes, 2013).
- Para a sua aplicação estes materiais deverão cumprir com a classificação petrográfica. A norma NP EN 13043 define os requisitos aplicáveis aos agregados para misturas betuminosas e tratamentos superficiais para estradas, aeroportos e outras áreas de circulação (Estradas de Portugal, 2014).
- De acordo com as normas europeias, um agregado é o material granular utilizado na construção e pode ser natural, artificial ou reciclado (Estradas de Portugal, 2014).
- Constituindo cerca de 75% a 85% da mistura betuminosa os agregados formam um esqueleto pétreo estável de resistência elevada à compressão (Antunes, 2013).
- Os agregados (Figura 16) desempenham diferentes funções conforme as suas dimensões. Os agregados grossos garantem estabilidade à mistura, com o aumento da resistência mecânica e ainda asseguram a rugosidade superficial (aderência de pavimento). Os agregados finos (dimensões inferiores a 2,00 mm) garantem a estabilidade e compacidade da mistura betuminosa, favorecendo o arranjo estrutural dos agregados controlando o volume de vazios no esqueleto mineral.



Figura 16-Exemplos de agregados.

Ligante betuminoso:

- O ligante betuminoso é um componente essencial da mistura betuminosa, uma vez que este componente liga os agregados e fornece coesão e estabilidade à mistura, criando ligações tenazes e flexíveis às misturas (adaptado de Antunes, 2013).
- Ligante betuminoso é um material adesivo contendo betume que pode estar sob a forma de não modificado, modificado ou emulsionado (Estradas de portugal, 2014).
- O ligante betuminoso constitui 10 % a 15 % do volume total mistura.
- Betume é um dos constituintes das misturas betuminosas que desempenha, principalmente as funções de ligante das partículas de agregado, tendo também um papel de impermeabilizante, podendo comprometer a estabilidade da mistura betuminosa (Antunes, 2013).
- Betume é um material praticamente não volátil, adesivo e impermeável à água, derivado do petróleo bruto que é completamente ou quase todo solúvel em tolueno, muito viscoso (Figura 17) e quase sólido à temperatura ambiente (Estradas de portugal, 2014).
- Os ligantes betuminosos abrangem os seguintes tipos:
 - Betumes de pavimentação;
 - Betumes modificados;
 - Betumes duros;
 - Betumes borracha;
 - Emulsões betuminosas.



Figura 17- Betume. (<https://favoritkrep.ru/p181880764-bitum-neftyanoj.html>.)

Fíler:

- O fíler confere à mistura betuminosa características de compacidade e de impermeabilização. As características físicas e químicas deste material influenciam o comportamento da mistura betuminosa.
- O fíler ao ser utilizado numa mistura betuminosa desempenha duas funções distintas. Uma das suas funções é a de material inerte para preenchimento dos vazios entre os agregados mais grossos usados na mistura betuminosa (Antunes, 2013).
- A outra função deste material resulta das suas características superficiais de material muito fino e do seu nível de atividade o que fornece a criação de ligações com o betume (Antunes, 2013).

- As propriedades deste material contribuem expressivamente para a melhoria do comportamento do mástique betuminoso (mistura do betume com o fíler) e conseqüentemente para as seguintes propriedades das misturas betuminosas:
 - Comportamento mecânico;
 - Percentagem ótima em betume;
 - Durabilidade;
 - Trabalhabilidade.

Mástique betuminoso:

- O mástique betuminoso, é a designação atribuída pela união do fíler com o betume. Este permite a ligação entre os agregados, que confere coesão e estabilidade à mistura betuminosa.

Vazios:

- Os vazios de ar presentes na mistura betuminosa desempenham um papel importante. Quando as misturas betuminosas apresentam um elevado número de vazios, são mais permeáveis, apresentam uma durabilidade mais baixa e com menor resistência a deformações permanentes. Quando o volume de vazios é demasiado baixo, a mistura betuminosa terá maior percentagem de finos e betume, o que a torna mais instável e mais suscetível a deformações permanentes e exsudação do ligante.

4.2.1. Tipos de misturas betuminosas

A classificação das misturas betuminosas é feita de acordo com a sua granulometria e/ou a sua temperatura de fabrico (Figura 18).



Figura 18- Esquema: Classificação de misturas betuminosas.

A granulometria do agregado influencia o processo de formulação das misturas betuminosas e é uma das principais características responsáveis pelo seu comportamento. A Figura 19 mostra os diferentes tipos de misturas betuminosas de acordo com a granulometria dos agregados que a compõem.

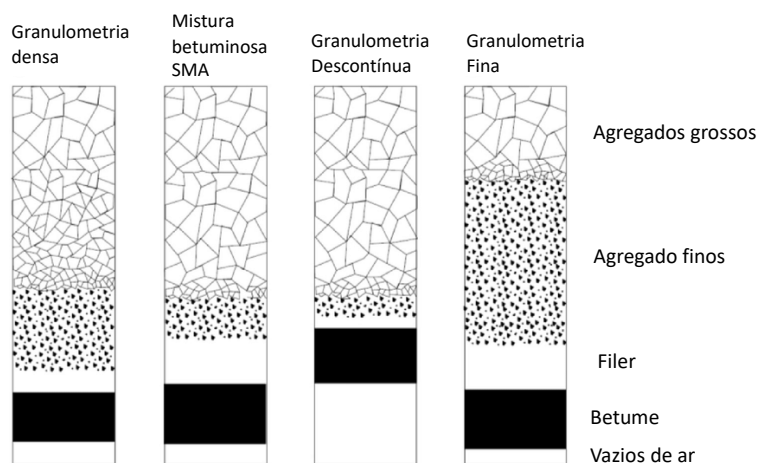


Figura 19-Tipos de misturas betuminosas e variação de materiais. (adaptado de Mohajerani, Abbas et al,2017)

Para a aplicação das misturas betuminosas de acordo com a granulometria dos agregados em pavimentos rodoviários, as normas europeias definem a composição, e os requisitos para os materiais constituintes e ainda ensaios de desempenho a realizar. No Quadro 10 apresentam-se as designações das misturas betuminosas segundo o caderno de encargos do tipo de obra.

Quadro 10- Designação das misturas betuminosas. (Estradas de Portugal, 2014)

Designação das misturas betuminosas		
Camada	Designação anterior	Designação atual
Base	Macadame betuminoso fuso B	AC 32 base ligante (MB)
	Macadame betuminoso fuso A	AC 20 base ligante (MB)
	Mistura betuminosa de alto módulo	AC 20 base ligante (MBAM)
Ligação	Macadame betuminoso fuso A	AC 20 bin ligante (MB)
	Mistura betuminosa densa	AC 20 bin ligante (MBD)
	Mistura de Alto módulo	AC 16 bin ligante (MBAM)
	Betão betuminoso	AC 14 bin ligante (BB)
	Argamassa betuminosa com betume modificado	AC 4 ligante (AB)
Regularização	Macadame betuminoso fuso A	AC20 reg ligante (MB)
	Mistura betuminosa densa	AC 20 reg ligante (MBD)
	Betão betuminoso	AC 14 reg ligante (BB)
	Argamassa betuminoso com betume modificado	AC 4 reg ligante (AB)
Desgaste	Betão Betuminoso	AC 14 surf ligante (BB)
	Betão Betuminoso Rugoso	AC 14 surf ligante (BBr)
	(micro) Betão Betuminoso Rugoso	AC 10 surf ligante (mBBr)

4.2.2. Campos de aplicação

As misturas betuminosas são geralmente aplicadas em camadas de pavimentos rodoviários e aeroportuários durante a sua construção e reabilitação. A construção dos pavimentos rodoviários e o tipo a adotar depende de vários parâmetros da envolvente do projeto, entre os quais, o tipo de categoria da estrada, o tráfego previsto, as condições climáticas do local e as condições do terreno de fundação.

Dependendo dos diferentes materiais utilizados na sua constituição, resultam diferentes tipos de pavimentos com comportamentos distintos. Os pavimentos são então divididos em três grupos: os pavimentos rígidos, os pavimentos semirrígidos e os pavimentos flexíveis.

Um pavimento rígido é constituído por uma laje de betão, que pode ser colocada diretamente sobre a fundação, ou sobre uma ou mais camadas de suporte (base/sub-base) que podem ser ou não aglutinadas com ligante (Oliveira, 2017).

Os pavimentos flexíveis apresentam na sua constituição misturas betuminosas nas suas camadas superiores, e materiais granulares não ligados nas camadas subjacentes. Os pavimentos semirrígidos apresentam características comuns aos pavimentos rígidos, contudo as camadas inferiores são constituídas por materiais granulares estabilizados com ligantes hidráulicos (Santos, 2016).

As misturas betuminosas podem ser utilizadas em diferentes camadas de pavimento rodoviário, ou seja, em camadas de base, camadas de ligação, camadas de desgaste e camadas de regularização.

A Figura 20 esquematiza os tipos de materiais usados em cada tipo de camada na construção de um pavimento flexível.



Figura 20- Esquema das camadas de um pavimento flexível. (adaptado de Santos, 2013)

4.3. Fíleres nas misturas betuminosas

A produção de lamas resultantes do processamento de rocha, geram stocks de volumes elevados, contribuindo para um desperdício de matérias primas e uma série de problemas ambientais. A nível mundial são conduzidas investigações com o objetivo de procurar soluções ambientalmente sustentáveis, com o foco da reutilização dos resíduos como subprodutos em diversos setores, como os mencionados no capítulo 2.8.

Como apresentam, características muito similares aos fíleres produzidos comercialmente, estes resíduos poderão ser utilizados como subprodutos, por exemplo na incorporação de misturas betuminosas, que são aplicadas em todo mundo para produzir pavimentos rodoviários. Esta possível solução, já foi abordada por diversos autores.

(Ribeiro et al., s.d.) desenvolveram um estudo com o objetivo de verificar a possibilidade da utilização do rejeito de pedreiras de granito, como agregado mineral, para a pavimentação rodoviária. O procedimento experimental, incluiu a caracterização do resíduo mineral e a avaliação da interação do betume/agregado. Foram realizados ensaios de resistência mecânica às misturas betuminosas tendo-se concluído que é possível, a reutilização destes resíduos na substituição de agregados na mistura betuminosa.

Segundo (Akbulut et al., 2012), a investigação indica o uso de resíduo de granito em misturas betuminosas quentes como fíler. O estudo compreendeu diversas percentagens de incorporação nas misturas betuminosas, de 0%, 2%, 4%, 6% e 8%. Os ensaios revelaram que a lama de granitos pode ser utilizada em misturas betuminosas quentes com uma percentagem ótima de 7,3%. A inclusão das lamas apresenta um melhoramento significativo nas propriedades das misturas betuminosas.

Visando o problema ambiental da acumulação de resíduos das pedreiras no Paquistão, os autores (Ullah et al., 2017), efetuaram pesquisas para incluir as lamas produzidas na serragem de mármore em misturas betuminosas substituindo o fíler comercial. Tal como outros estudos, adotaram por incorporar diferentes percentagens de fíleres nas quantidades de 3.5%, 4.5 %, 5.5% tendo no geral obtido resultados positivos.

(Ghazawi et al., 2007), da universidade de Ciência e Tecnologia do Jordão, avaliaram a reutilização de lodos resultantes do tratamento de águas residuais, nas propriedades das misturas betuminosas. Na investigação, foram utilizados lodos secos e fíler calcário como parte do fíler usado na composição da mistura com uma massa percentual de cinco teores diferentes: 0%, 25%, 50%, 75% e 100%. Foram depois realizados ensaios de propriedades de Marshall para verificar o comportamento das propriedades na mistura betuminosa. Os resíduos de lodos afetaram as

propriedades das misturas de pavimentação asfáltica, mais especificamente na estabilidade na fluidez e nos vazios de ar, o aumento da percentagem de incorporação elevou à instabilidade das características da mistura betuminosa.

(Souza, 2001) analisou a substituição de fíleres convencionais por resíduos de origem granítica em misturas betuminosas. A investigação comparou o comportamento de três tipos de fíleres, uma mistura com fíler comercial cimento Portland, outra com cal e por fim uma com resíduo. Todos foram submetidos à incorporação de três teores diferentes de lamas 4%, 6% e 7% na mistura betuminosa. Os resultados obtidos indicaram que é possível utilizar a lama proveniente da serragem dos blocos de rochas graníticas, como fíler.

Capítulo 5

Metodologias de Caracterização Física e Química das Lamas

(página propositadamente em branco)

5. Metodologias de Caracterização Física e Química das Lamas

5.1. Introdução

Neste capítulo abordam-se as metodologias aplicadas na caracterização das amostras em estudo. Faz-se também, a descrição dos procedimentos de ensaio realizados para a avaliação das principais características dos materiais. Será abordada a recolha e preparação das lammas e os procedimentos de ensaio realizados com recurso à caracterização quantitativa e qualitativa das amostras em estudo.

5.2. Recolha e preparação das amostras

As amostras utilizadas foram recolhidas na empresa sediada em Tondela, Incoveca Granitos S.A, uma empresa de transformação de rocha ornamental. Esta unidade industrial é constituída por diversos pavilhões e equipamentos, sendo especializada nas operações de serragem, corte, polimento e acabamento de blocos de variadas litologias como granitos, mármore e calcários, explorados em Portugal ou importados. Os resíduos gerados e tratados através de filtros-prensa resultam na sua maioria da transformação das seguintes rochas:

- **Granitos:** Granito de Pedra Salgadas, Amarelo Macieira, Rosa Monção, Rosa Porrinho e Negro de Angola (origem de Angola).
- **Mármore e Calcários:** Calcário Moleanos, o Calcário Moca Creme, o White Cristal (origem Turquia) e o Mármore Estremoz.

Neste estudo foram analisadas duas amostras de lammas recolhidas na empresa nos filtro-prensa. Assim, o estudo incorporará, as seguintes amostras:

- **Amostra 1:** Lamas de granitos e outras rochas silicatadas, designada de LGV (Lamas de Granitos Variados), proveniente do filtro prensa do engenho de multilâminas.
- **Amostra 2:** Lamas de mármore e outras rochas carbonatadas, designada de LMC (Lamas de Mármore e Calcários), proveniente do filtro prensa de Mármore e Calcários.

Preparação das amostras:

Após a recolha das amostras é fundamental realizar a correta preparação das mesmas para a realização dos ensaios de caracterização e aproveitamento das lammas.

A amostra **LMC (Lamas de Mármore e Calcários)** foi recolhida junto à oficina de transformação de mármore e calcários, no filtro prensa que recebe o expurgo das lammas provenientes do corte de mármore e calcários.

Uma segunda amostra designada por **LGV, (Lamas de Granitos Variados)**, foi recolhida no filtro prensa, que recebe o expurgo de todas as lamas oriundas da serragem de rochas ígneas e afins, nos engenhos multilâminas (Figura 21). Após o processo de desidratação estas lamas apresentam valores de desidratação de 30% a 45 %, pelo que ambas as amostras, foram recolhidas em **sacos de plástico** devido ao seu baixo teor de humidade (Figura 21).

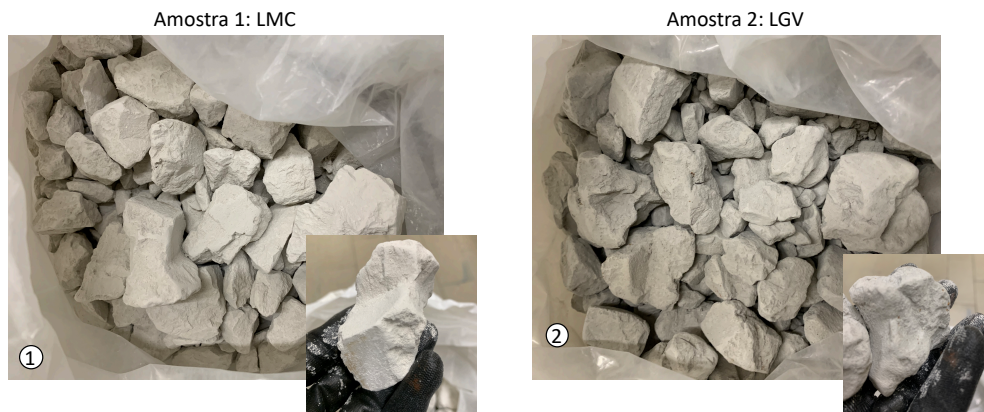


Figura 21- (1) Amostra da lama de mármore e calcários; (2) Amostra de granitos e rochas afins.

Antes da realização dos ensaios, procedeu-se à secagem das amostras que foram distribuídas em tabuleiros identificados, e colocadas na estufa da marca MMM Group, a 110°C, de modo a dissipar qualquer água que as partículas tivessem. Após atingirem massa constante entre duas pesagens consecutivas, as lamas foram arrefecidas até à temperatura ambiente. Em seguida procedeu-se à desagregação manual com a ajuda de um almofariz e um pilão, tendo o cuidado de não aplicar demasiada força para não se dar o esmagamento das partículas (Figura 22).

Previamente à realização dos ensaios foram preparadas as quantidades necessárias para cada um dos ensaios a realizar de maneira a ter representatividade das amostras nos ensaios foi efetuado o esquarteamento das mesmas.



Figura 22-Desagregação das amostras após secagem.

5.3. Descrição dos Ensaios de caracterização das lamas

5.3.1. Granulometria para fíler: Peneiração com jato de ar

A determinação da granulometria por jato de ar foi realizada de acordo com as especificações da norma EN 933-10 no Laboratório de Geotecnia e Materiais de Construção (LGMC) do Instituto Superior de Engenharia do Porto, com recurso a um aparelho de peneiração por jato de ar (Figura 23), com o objetivo de determinar a distribuição das frações granulométricas das duas amostras em estudo.



Figura 23-Aparelho de peneiração da jato de ar.

Após a preparação dos provetes, com uma massa de aproximadamente 50,0 g, segundo as especificações da norma EN 933-10, foi colocado o peneiro de malha 0,063mm no aparelho (Figura 23) juntamente com a amostra e a tampa transparente (Figura 24). O ensaio iniciou-se com a peneiração, mantendo sempre uma pressão de $(3,0 \pm 1,0)$ kPa. A operação foi repetida até que a massa retida no peneiro fosse constante. No fim da peneiração, registou-se a massa retida (R_i) no peneiro 0,063mm. Após a peneiração da fração 0,063mm, foi realizada uma peneiração manual com uma série de peneiros de malha crescente 0,125mm; 0,250mm; 0,500mm; 1mm, para obter uma distribuição mais particularizada do material em estudo. Após a peneiração, pesaram-se as quantidades retidas em cada um dos peneiros e foram calculadas as respetivas distribuições em percentagem das partículas, com recurso à equação (1).

O procedimento foi realizado 3 vezes para cada amostra, perfazendo na totalidade 6 ensaios.

$$\text{Acumulado passado (\%)} = 100 - \left(\frac{100R_i}{M_1} \right) \quad (1)$$

Onde:

R_i – Massa de material retido (g)

M_1 – Massa do provete elementar (g)

No decorrer do ensaio foi utilizada uma série de peneiros entre 0,063 mm e 1 mm, um fundo de peneiro, uma tampa transparente (topo), um martelo (para o caso de aglomerações do material à tampa durante a peneiração por meio de batidas leves) e um pincel para limpar a tampa no fim de cada peneiração. Na Figura 24 encontra-se o material utilizado na realização deste ensaio.



Figura 24- Material de ensaio: (1) peneiro 0,0063 mm com tampa transparente; (2) tampa de peneiros, fundo de peneiro, martelo e pincel; (3) série de peneiro.

5.3.2. Método para a determinação da baridade do filer em querosene

O ensaio foi realizado de acordo com a norma NP EN 1097-3 (2002) Anexo A. O objetivo deste ensaio consiste em determinar a baridade das amostras em estudo. A baridade corresponde à massa por unidade de volume ocupada pela massa de um agregado seco sem compactação contida num dado recipiente.

As amostras foram previamente secas e arrefecidas até à temperatura ambiente. Para cada amostra foram preparados três provetes, com uma massa aproximadamente de 10 g. Numa proveta de 50 ml, foi adicionada a amostra e mais 25 ml de querosene, sendo agitada, e depois preenchida a proveta com querosene até atingir 40 mm do topo da proveta, sendo depois agitada vigorosamente de modo a garantir a homogeneização da suspensão da amostra. O processo de agitação, deve ser efetuado no mínimo quatro vezes, invertendo-se a proveta e agitando-a várias vezes (Figura 25).

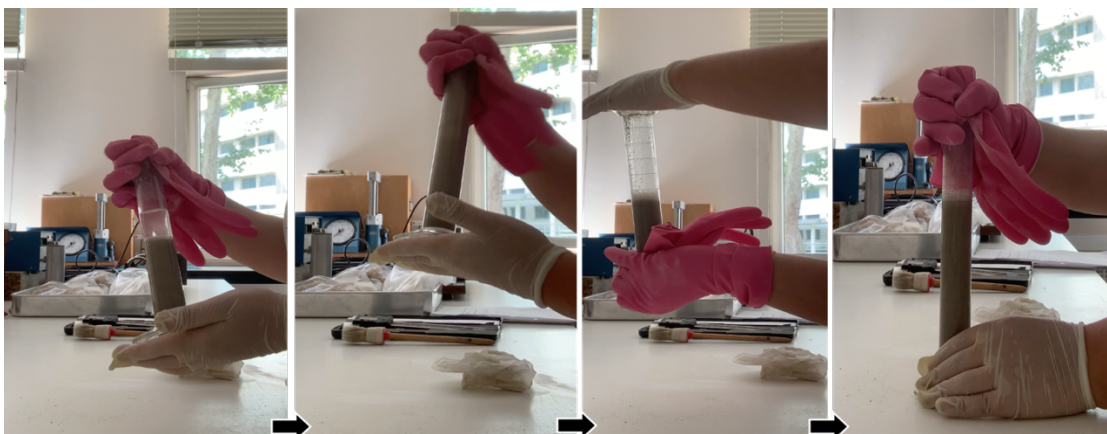


Figura 25- Agitação da proveta, com o provete e a querosene.

Por fim, a proveta foi colocada num local sem risco de vibrações, e deixada a repousar no mínimo durante 6 horas (Figura 26).

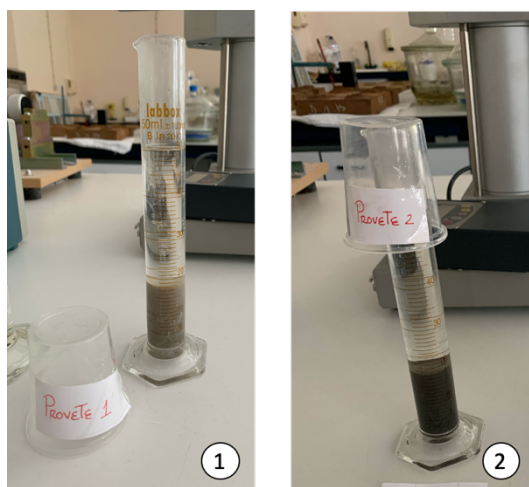


Figura 26- Provete: (1) Sedimentação da amostra LMC; (2) Sedimentação da amostra LGV.

No final do período de sedimentação foi feita a leitura do volume sedimentado da amostra na proveta graduada, em ml. Para cada provete, é calculada a baridade através da equação (2).

$$\text{Baridade} = \frac{m}{V} \text{ (Mg/m}^3\text{)} \quad (2)$$

Onde:

V – Volume após sedimentação (ml)

m – Massa do provete (g)

O resultado do ensaio é obtido pela média dos três valores da baridade realizados para cada amostra. Assim, no total foram ensaiados seis provetes, três por cada amostra de lama em estudo.

No ensaio foram utilizadas provetas de 50 ml, uma balança da marca Kern com desvio de 0,01g e a querosene foi fornecida pelo laboratório do CICCOPN (Figura 27).

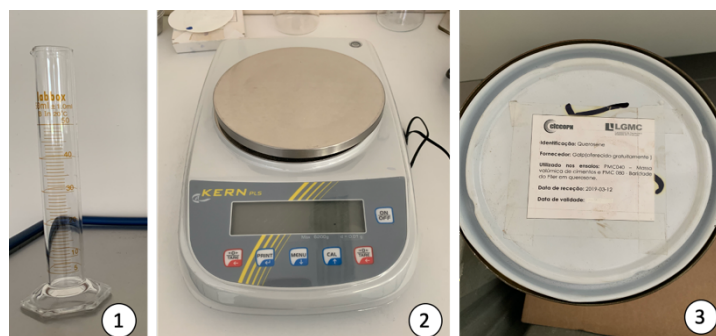


Figura 27- Material de ensaios: (1) Bureta de 50 ml; (2) Balança [erro de 0,01g]; (3) JET- Querosene fornecida pela Galp.

5.3.3. Determinação de vazios de fíler seco compactado

O ensaio foi realizado segundo o procedimento descrito na norma EN 1097-4. O objetivo do ensaio consiste na determinação da percentagem de vazios das lamas, definida através da sua compactação, através de 100 vezes a queda do provete no aparelho de compactação (Figura 28).



Figura 28- Aparelho de compactação.

Após a preparação prévia das amostras referida anteriormente, estas foram passadas pelo peneiro 0,125mm (Figura 29 e Figura 30). Para cada amostra foram preparados 3 provetes, com um peso de aproximadamente 10,0 g.

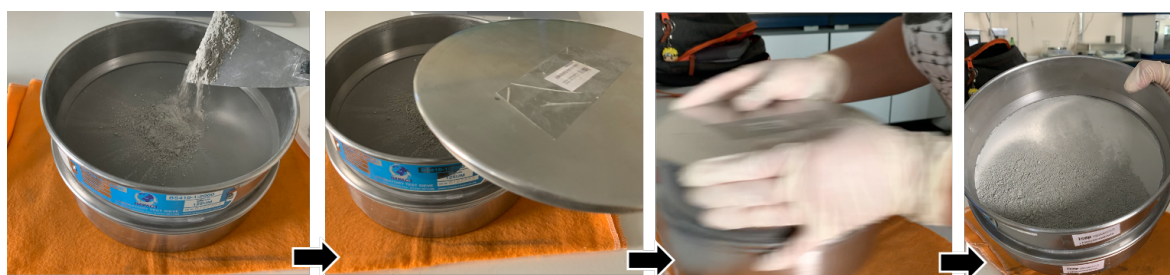


Figura 29- Preparação das amostras: peneiração da amostra.



Figura 30- Preparação dos provetes: material após a peneiração.

O ensaio teve início com o registo do peso do conjunto de compactação vazio (papel filtro, pistão e bloco) e com as leituras do diâmetro do interior do bloco (Figura 32).

De seguida foi colocado o provete dentro do bloco com uma colher, a colocação do papel filtro e por fim o pistão.

O conjunto foi posicionado nas varetas do aparelho de compactação, e pousado cuidadosamente na base do aparelho, a partir daí foram efetuadas 100 quedas deste conjunto (papel, filtro, pistão, bloco e provete) a uma altura definida pelas barras do aparelho (Figura 31).

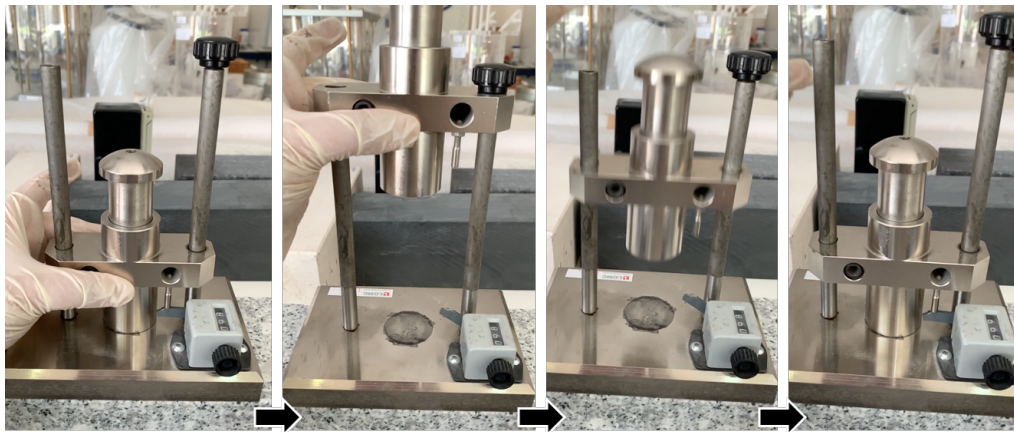


Figura 31- Ensaio de Ridgen: queda do bloco.

Depois dos cem impactos, foi realizada a leitura da altura do pistão com um paquímetro digital. Em seguida foi pesado o conjunto de compactação (bloco, pistão, papel filtro e provete) (Figura 32). Depois de cada teste, o equipamento foi limpo para ser utilizado um novo provete. Em suma, foram realizados 2 ensaios com 3 provetes para cada uma das lamas em estudo (**LGV** e **LMC**), perfazendo no total 6 testes.

A massa do fíler compactado é calculada, de acordo com equação (3).

$$m_2 = (m_1 - m_0) \quad (3)$$

Onde:

m_2 – Massa do fíler compactado (g)

m_1 – Peso do bloco com o fíler, c/ pistão e c/ 1 papel filtro (g)

m_0 - Peso do bloco com o pistão c/ 1 papel filtro (g)

O cálculo da percentagem de volume de vazios compactado é calculado de acordo com a equação (4).

$$v = \left(1 - \frac{4 \times 10^3 \times m_2}{\pi \times \alpha^2 \times \rho_f \times h} \right) \times 100 \quad (4)$$

Onde:

v – Quantidade de vazios, em %

m_2 – Massa do fíler compactado (g)

α – Diâmetro interior do bloco cilíndrico (mm)

ρ_f – Densidade do fíler (Mg/m^3)

h - Altura do pistão (mm)



Figura 32- Material: (1) pistão, bloco, papel filtro, amostra, colher; (2) paquímetro digital; (3) Balança [erro 0,01 g].

5.3.1. Avaliação de finos: Ensaio do azul de metileno

O ensaio foi realizado de acordo com o procedimento para a determinação do valor de azul metileno (MB_f) da fração granulométrica 0/0,125 mm descrito no anexo A da NP 933-9.

O objetivo deste ensaio consiste em determinar o valor de azul metileno, com a adição de incrementos da solução de azul metileno ao provete de ensaio. A adsorção da solução corante pelo provete após a adição de cada incremento da solução é verificada pela realização de um ensaio da mancha em papel de filtro de modo a detetar a presença de corante livre (CEN, 2011).

A quantidade de suspensão a retirar para a gota deve permitir obter um depósito com um diâmetro entre os 8 mm a 12 mm. O ensaio considera-se positivo se na zona húmida à volta do depósito central se formar uma auréola persistente azul clara de cerca de 1 mm de espessura (Figura 33)(CEN, 2011).

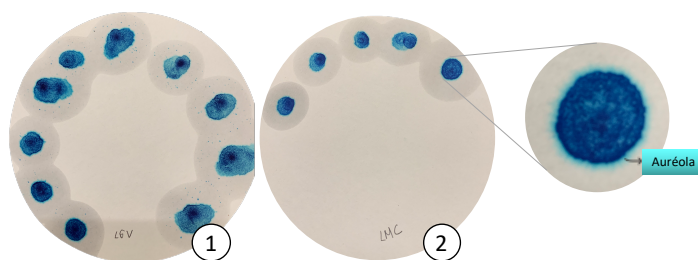


Figura 33- Ensaio da mancha a LGV (1) e LMC (2)

O ensaio exigiu a preparação prévia da solução de azul metileno (Figura 34) que foi colocada numa bureta, para posterior adição à mistura em suspensão (lama + água). O ensaio iniciou-se com a adição de 5 ml de azul metileno à suspensão, agitando-se a solução durante 1 min a uma velocidade de 400 rpm. Com uma vareta de vidro foi recolhida uma gota da suspensão e transferida para o papel de filtro. O processo foi repetido até à obtenção de 5 auréolas (pontos positivos) seguidas em no intervalo de 1 minuto.

Para que o ensaio da mancha seja considerado positivo a auréola não pode desaparecer durante 5 minutos e deverá ter 1 mm de espessura. Caso contrário é necessária a adição de mais 2 ml de azul metileno. Na Figura 34, encontram-se as várias fases do ensaio de azul metileno.

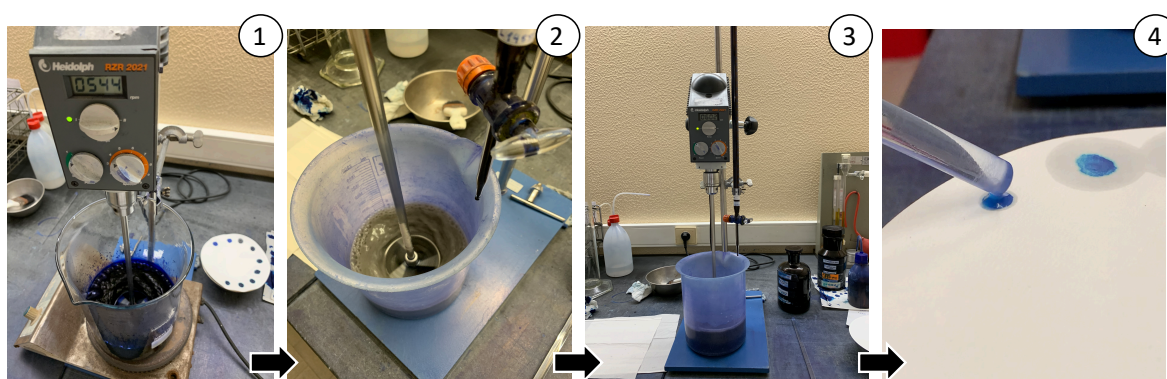


Figura 34- Preparação da solução azul metileno (1); Preparação da suspensão da amostra (2); Adição de azul metileno (3); Deposição suspensão no papel filtro (4).

No fim do ensaio, os resultados obtidos permitem o cálculo do valor de azul metileno, de acordo com a equação 5.

$$MB_f = \frac{V_1}{M_1} \times 10 \quad (5)$$

Onde:

MB – Valor de azul metileno, (kg /fração 0/0,125mm)

M_1 – Massa do provete (g)

V_1 – Volume total de solução adicionada (ml)

5.3.2. Determinação da densidade da partícula: método do picnómetro

O método do picnómetro permite determinar a densidade de amostras de volume irregular, sabendo apenas a massa do provete. Citando a norma EN 1097-7 (2008), o princípio deste ensaio baseia-se na substituição de um líquido de massa volúmica conhecida pelo provete da amostra, determinando-se o volume do provete, com o objetivo de determinar a densidade das amostras em estudo.

Previamente à realização deste ensaio, foram calibrados três picnómetros segundo o procedimento descrito no anexo A da norma EN 1097-7:2008, com um volume de 50 ml, representados na Figura 35.



Figura 35-Picnómetros com água e fíler depois do banho.

Para a realização do ensaio foram preparados três provetes com cerca de 10 g da amostra a ensaiar. O picnómetro foi pesado, colocado fíler e água desmineralizada suficiente para submergir completamente a amostra. O picnómetro foi então deixado, durante 30 min, dentro de dessecador a uma pressão de 3 kPa, para a extração das bolhas de ar (Figura 36).

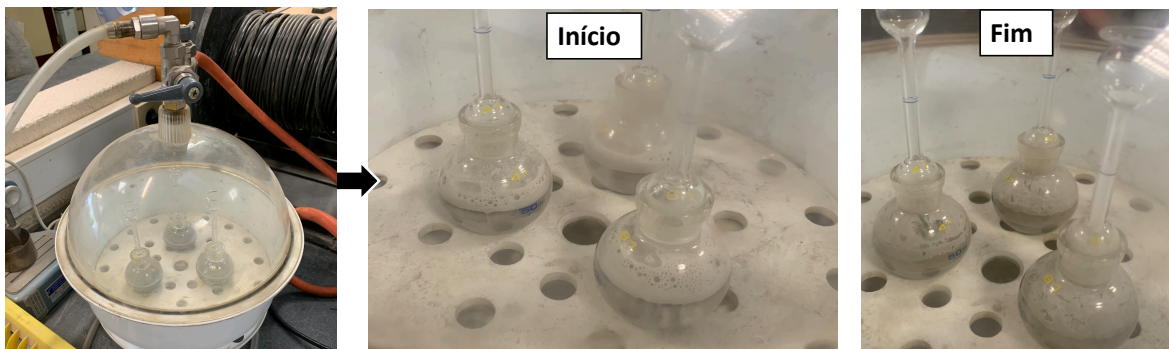


Figura 36- Extração do ar dos picnómetros com o dessecador.

Após os 30 minutos, os picnómetros foram retirados e preenchidos totalmente com água desmineralizada, sendo colocados sem rolha, no banho de água a 25°C, durante 60 min (Figura 37). Depois de retirados os picnómetros foram limpos e tampados e registada a massa final.

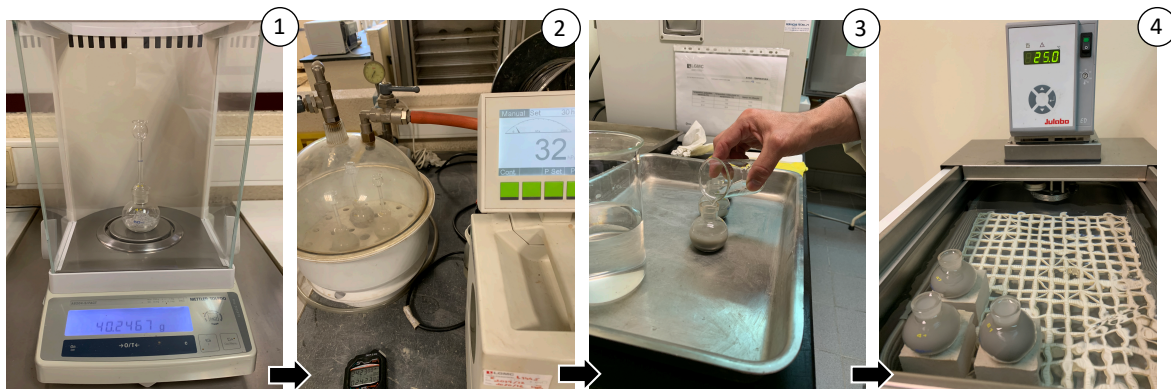


Figura 37- 1) Pesagem dos provetes; 2) Provete no dessecador; 3) Preenchimento de água no picnómetro; 4) Provetes no banho de água a 25°C.

A densidade da amostra, foi determinada através da equação 6, segundo a norma EN 1097-7.

$$\rho_f = \frac{m_1 - m_0}{V - \frac{m_2 - m_1}{\rho_1}} \quad (6)$$

Onde:

m_0 – Massa do picnómetro vazio com rolha (g)

m_1 – Massa do picnómetro com a amostra (g)

m_2 – Massa do picnómetro cheio com o líquido e a amostra (g)

V – Volume do picnómetro (ml)

ρ_1 - Densidade do líquido a 25°C (Mg/m³)

ρ_f – Densidade do fíler a 25°C (Mg/m³)

5.3.3. Determinação da temperatura de amolecimento: Método do anel e bola

O método de ensaio encontra-se descrito na norma EN 13179-1 e na norma NP EN 1427. O ensaio de variação da temperatura, método do anel e bola, permite avaliar o poder rigidificante de um fíler, comparando, cada conjunto anel de bola, a diferença da temperatura de um mástique betuminoso (constituído por betume e lamas em estudo) com a temperatura do betume utilizado.

A preparação dos provetes, foi feita de acordo com a norma anteriormente referida, que exige a preparação do betume 70/100 e de um mástique betuminoso (betume+ amostra). A preparação da mástique (Figura 38), requereu a preparação do betume mais a adição da incorporação da amostra sempre com controlo da temperatura e garantindo a perfeita homogeneização. Em seguida foi colocada na estufa a 155°C, até estabilizar.

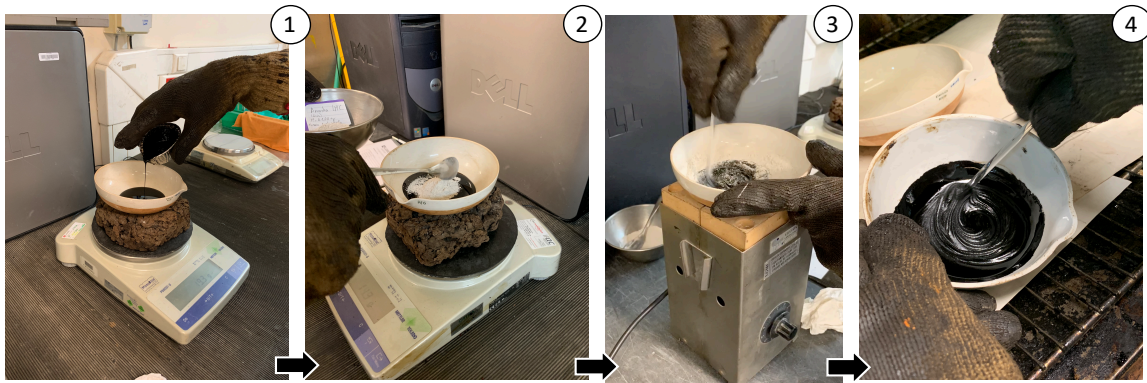


Figura 38- Preparação do mástique betuminoso: Pesagem do betume (1); Adição da amostra (2); Incorporação do betume e da amostra (3); Homogeneização da mástique na estufa (4).

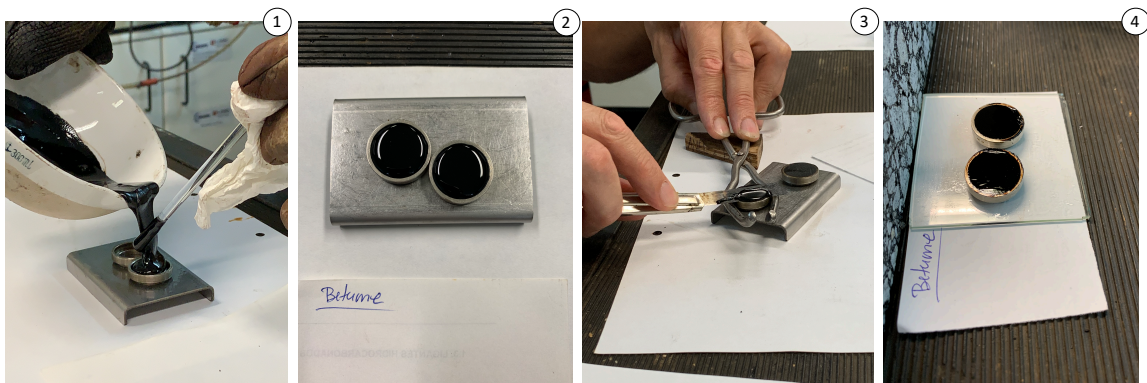


Figura 39- Preparação dos anéis de betume: Preenchimento dos anéis (1); Anéis com betume (2); Rasar os anéis (3); Provetes concluídos (4).

Seguiu-se a preparação dos anéis (Figura 39) vertendo o betume e a mástique para os moldes, deixando-se arrefecer por 30 min.

A uniformização da superfície dos anéis, consistiu no rasamento do excesso de betume/mástique com a ajuda de uma lâmina quente.

Antes do ensaio todo o material foi refrigerado durante 15 minutos até atingir uma temperatura de 5°C. Após cerca de 15 minutos, foi montado o suporte de anéis com água destilada no copo e refrigerados por mais 15 minutos. É de salientar a importância de manter a temperatura de todos os materiais de ensaio à mesma temperatura.

O ensaio inicia-se com a colocação do conjunto de ensaio (copo + suporte+ anéis + bolas + termómetro + banho) na fonte de calor (Figura 40).

Efetua-se durante o ensaio, o registo contínuo, do gradiente da temperatura manual, através da leitura no termómetro de mercúrio a cada minuto (com o controlo do cronómetro), vigiando ao mesmo tempo o desenvolvimento das bolas dentro nos anéis.

Registou-se a temperatura indicada pelo dispositivo de medição da temperatura no momento em que o ligante betuminoso, que envolvia a bola, tocou na placa inferior.

Este ensaio foi realizado para as duas amostras em estudo, LGV e LMC.

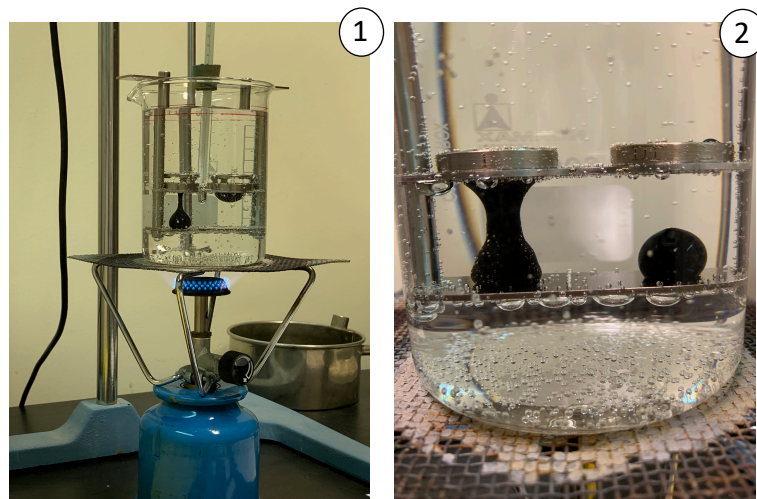


Figura 40- 1) Ensaio da anel e bola; 2) Provetes no fim do ensaio (à esquerda temos a mástique, à direita o anel de só com betume).

5.3.4. Determinação da viscosidade aparente (Número de betume)

O método de ensaio, definido na norma NP EN 13179-2, permite determinar a viscosidade aparente de uma mistura de água/fíler. O ensaio é aplicado a fíleres destinados à produção de misturas betuminosas. O número de betume é definido pela quantidade necessária de água a adicionar a 100 g de fíler, de modo a que essa mistura de fíler encapsulada, permita a penetração de um pistão de alumínio.

Cada provete deve possuir 50 g de amostra e água desmineralizada a cada tentativa, depois essa mistura (água + lama) é homogeneizada durante 5 min. A pasta criada foi vertida para uma cápsula cilíndrica e colocada em baixo do penetrómetro para a penetração da agulha (Figura 41). O ensaio foi realizado com base em várias tentativas e com variados incrementos diferentes de água. Os resultados obtidos através da medição da penetração, em milímetros, e da quantidade de água adicionada à mistura, em mililitros.

O ensaio considera-se bem-sucedido, assim que a penetração se encontrasse entre os 5,0 mm e os 7,0 mm.

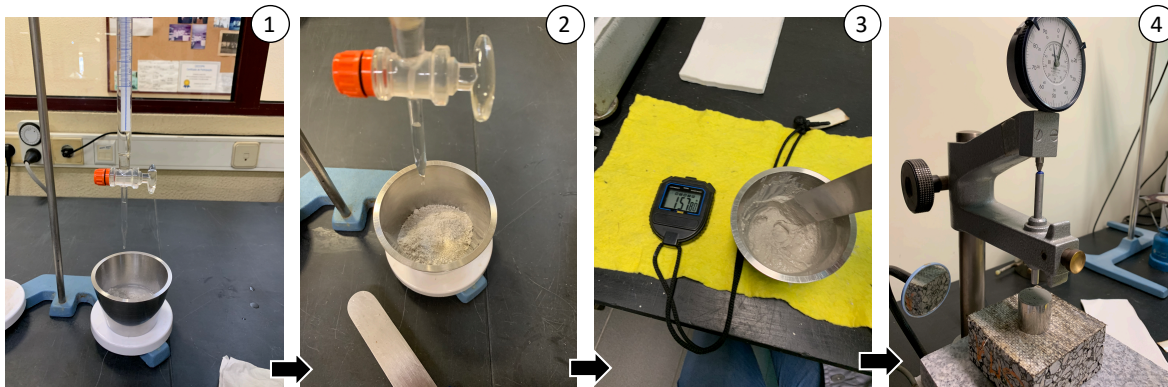


Figura 41- Ensaio Número de Betume: Preparação e adição da água (1) e (2); Formação da pasta (3); Penetrómetro com provete (4).

O cálculo do número de betume, é feito de acordo com equação 7, retirada da norma EN 13179-2.

$$BN = 2 x_n \quad (7)$$

Onde:

BN – Número de Betume

x_n - Valor numérico do volume de água, em ml

Na Figura 42, estão representados os provetes dentro cápsula cilíndrica de cada amostra.

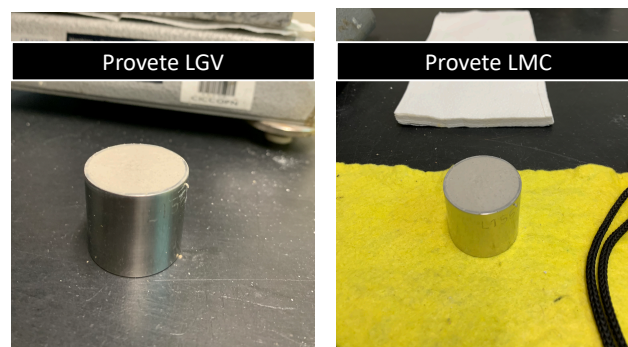


Figura 42 - Provetes da LMC e LGV.

5.3.5. Determinação da finura: Método de Blaine

O ensaio foi realizado segundo o procedimento descrito na norma NP EN 196-6. O objetivo do ensaio consiste em determinar a superfície específica (equação 8) das lamas em estudo. A finura/superfície específica do cimento é determinada, observando o tempo que leva uma dada quantidade de ar a atravessar uma camada compactada de cimento, com dimensões e porosidade especificadas.

Segundo a densidade determinada no ensaio do picnómetro, foi calculada a massa, determinada pela equação $mf = 0,500\rho V$, correspondendo aproximadamente a 2 g. Na célula de ensaio foi colocado o disco perfurado, o papel filtro e o provete compactado. A célula foi colocada na

superfície cônica do aparelho de Blaine, utilizando vaselina para a vedação total da célula (Figura 43). O ensaio iniciou-se com a remoção da tampa da célula, que permite a deslocação do líquido no manómetro. Foi cronometrado o tempo de chegada do líquido, desde a segunda marca até o menisco atingir a terceira marca. Registou-se o tempo medido, t , e a temperatura ambiente. Repetiu-se o ensaio na mesma camada e para uma camada nova, registrando os valores do tempo e da temperatura.

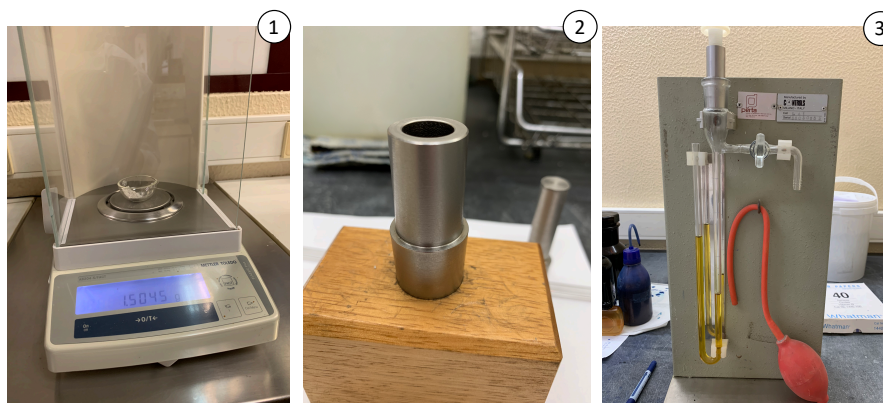


Figura 43 - 1) Pesagem do provete; 2) Célula; 3) Aparelho de Blaine.

Se a porosidade específica de $e=0,500$ e temperatura de ensaio for de 20°C , então:

$$S = \frac{52,43K \times \sqrt{t}}{\rho} \quad (8)$$

Onde:

S – Superfície específica, em cm^2/g

K – Constante do aparelho

e – Porosidade da camada

ρ – Massa volúmica do fíler, g/cm^3

t – Tempo medido, em segundos

V – Volume da camada, g/cm^3

5.3.6. Determinação do pH da suspensão em água

Este ensaio não apresenta norma europeia no caso dos fíleres, pelo que esta propriedade foi determinada para os dois tipos de lamas segundo o procedimento descrito na ISO 787-9 (1981). O objetivo do ensaio consiste em determinar o valor de pH, ensaiando uma dispersão de fíler em água. O valor de pH serve como indicador do grau de atividade do fíler (adaptado de Teixeira, 2015).

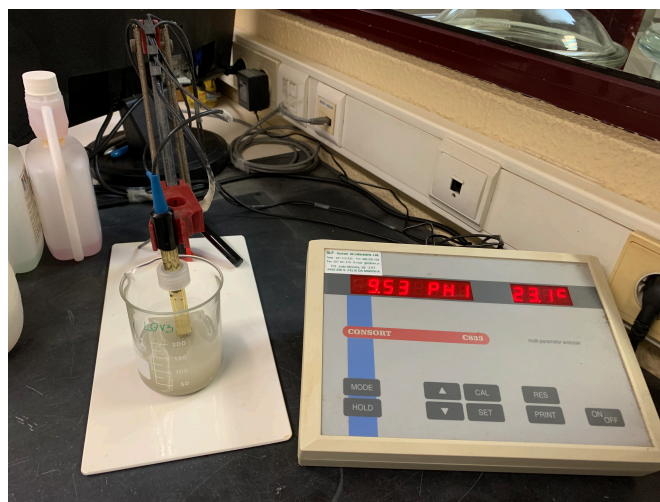


Figura 44-Medidor de pH.

A suspensão aquosa das amostras foi preparada com uma relação filer/água de 10 %, o que neste caso correspondeu a 10 g de amostra para 100 ml de água dentro de um goblé. A mistura foi agitada com um agitador magnético durante 1 min e colocada em repouso por mais 5 min (Figura 45).

Após a preparação da solução aquosa, o elétrico (previamente calibrado com soluções padrão) é mergulhado, registrando o pH (Figura 44). Foram efetuadas 3 leituras no mesmo copo e foram usados três copos para cada uma das lamias de estudo o que fez de um total de 18 leituras.

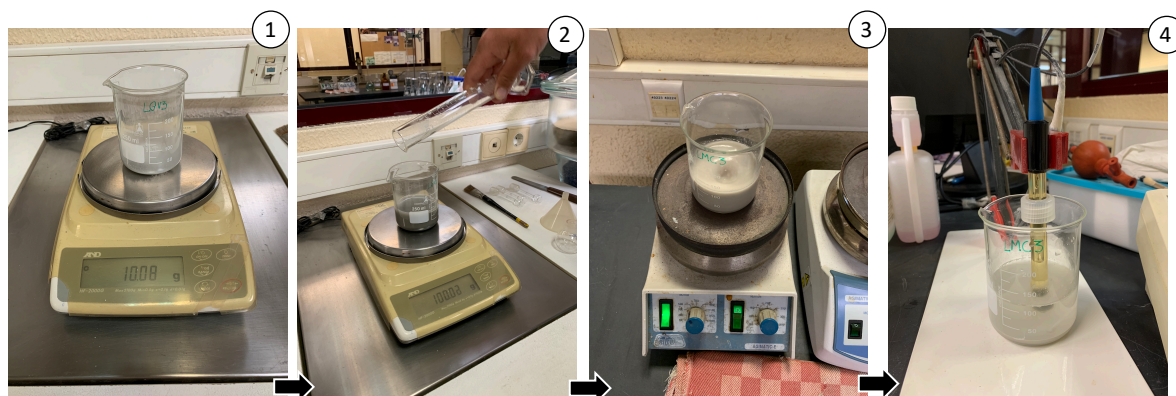


Figura 45-Medição do pH: Pesagem da amostra (1); Adição de água desmineralizada (2); Agitação da solução (3); Medição do pH com elétrico (4).

5.3.7. Análise química quantitativa por FRX

Para aferir a composição química das lamias em estudo, foi utilizada uma técnica expedita com recurso a um analisador de fluorescência de Raios X (FRX) da marca Thermo Scientific, modelo NITON XL3t (900), representado na Figura 46.

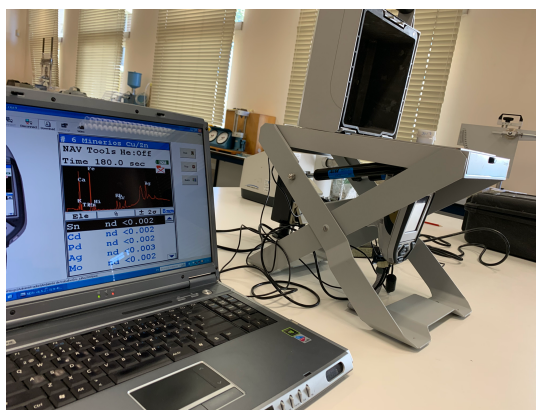


Figura 46-Equipamento de FRX da marca Thermo Scientific.

O princípio da análise por fluorescência de Raios X é um processo quantitativo fundamentado na medida das intensidades dos Raios X característicos, emitidos pelos elementos que constituem a amostra, quando excitada por partículas ou ondas eletromagnéticas. Os Raios X emitidos excitam os elementos que constituem a amostra, elementos esses que por sua vez irradiarão linhas espectrais de energias características do elemento e, cujas intensidades, estão relacionadas com a concentração do elemento na amostra (Spínola, 2015).

Após a preparação das amostras, é realizada a pré-peneiração de pequenas quantidades da amostra nos peneiros 0,250 mm e 0,125 mm, até a obtenção de provete suficiente para formação de uma camada de material a depositar na cápsula (Figura 47). A amostra é colocada no interior da cápsula de plástico, que se fecha com filtro transparente, compactada de modo a evitar vazios e irregularidades, o resto do espaço acaba por ser ocupado por algodão para tornar o provete mais estável (Figura 48).



Figura 47-Material de ensaio: Amostrador-compactador, Peneiros, Cápsula com os provetes.

A cápsula acondicionada com a amostra foi introduzida na câmara de suporte para a leitura da composição química através do analisador FRX e do software no computador. Foi extraída a

informação em forma de relatórios de registro dos vários elementos detetados na amostra, em percentagem.

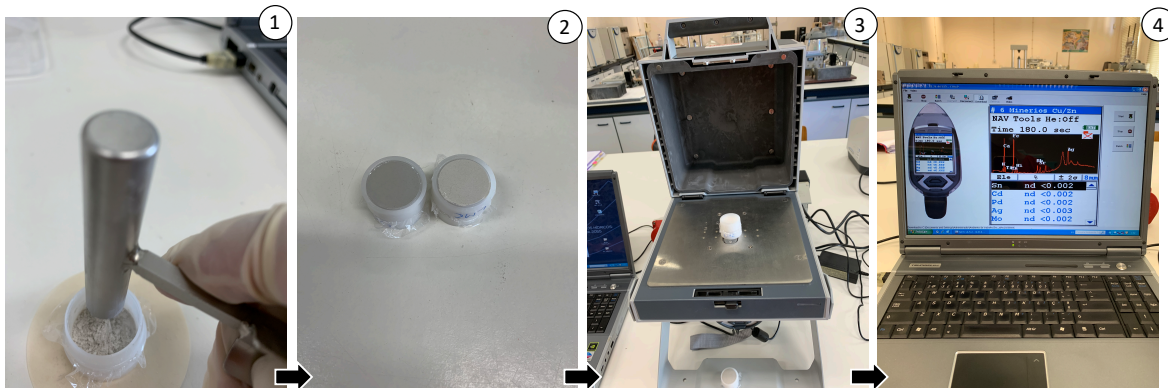


Figura 48- 1) Compactação de provete; 2) Cápsulas com provete; 3) Câmara com cápsula do provete; 4) Computador de auxílio.

Foram realizadas três leituras para cada amostra em estudo, de modo a obter um maior rigor nos resultados obtidos. Depois da receção dos relatórios, os dados foram tratados passando os elementos para óxidos e determinando os valores médios de cada elemento encontrado, através de uma folha de cálculo Excel.

Capítulo 6

Análise e discussão de resultados

(página propositadamente em branco)

6. Análise e discussão de resultados

6.1. Introdução

Neste capítulo são apresentados os resultados dos ensaios laboratoriais, da caracterização das lamas, realizados no desenvolvimento do trabalho experimental. Os resultados obtidos serão apresentados em quadros e gráficos, com posterior análise e discussão dos mesmos. Para prever o comportamento das lamas em estudo, como fíler este vai ser comparado com as propriedades dos fíleres utilizados em misturas betuminosas, dando a conhecer quais os requisitos que as lamas devem cumprir para servirem como fíler.

6.2. Granulometria para fíler: método de peneiração com jato de ar

Foram realizadas nas duas amostras de lama em estudo (LGV e LMC), análises granulométricas por peneiração a jato de ar, de acordo com o descrito na norma EN 933-10. Para que estas lamas sejam admitidas como fíleres deverão cumprir com os requisitos apresentados no Quadro 11. Neste quadro encontram-se as percentagens de passados para a faixa granulométrica exigida para um fíler no ensaio peneiração a jato de ar, presentes na norma EN 13043.

Designa-se por fíler o material em que a maior parte da sua faixa granulométrica é inferior a 0,063mm.

Quadro 11-Requisitos de granulometria para fíler (Adaptado de EN 13043:2002)

Abertura do peneiro (mm)	Percentagem de passado (%)
2	100
0,125	85 a 100
0,063	70 a 100

Os resultados obtidos para as análises granulométricas por peneiração a jato de ar, das lamas em estudo (LGV e LMC), encontram-se no Quadro 12.

Quadro 12-Resultados obtidos do ensaio de peneiração a jato de ar.

Abertura do peneiro (mm)	Percentagem de acumulado passado (%)	
	LMC	LGV
2	100%	100%
1	100%	100%
0,5	100%	100%
0,25	100%	100%
0,125	100%	97%
0,063	99%	91%

Análise dos resultados:

- Os resultados laboratoriais indicam que as duas amostras apresentam uma distribuição granulométrica dentro dos limites percentuais segundo os requisitos de fíler comercial (EN 13043) (Quadro 11).
- As Lamas de Mármore e Calcários (LMC), tem 99% da sua constituição granulométrica com dimensões inferiores a 0,063 mm, o que revela um material com uma matriz muito fina.
- As Lamas de Granito e Variados (LGV), contém 91% da sua faixa granulométrica com diâmetro inferior a 0,063mm.
- Comparando as duas amostras, a LMC tem maior percentagem de partículas abaixo de 0,063 mm, resultante da litologia de rochas mais brandas.

Na Figura 49 e Figura 50 pode-se visualizar a distribuição das partículas do material passado em cada um dos peneiros, para uma das lamas em estudo, (**LMC e LGV**), após o ensaio de peneiração a jato de ar. Podemos também visualizar de forma ampliada, as partículas retidas no peneiro 0,125mm, onde se notam as formas e cores das partículas mais grosseiras presentes nas lamas.

*nota: Foi realizada a peneiração no peneiro 0,125mm apenas não se encontra disposto na Figura 49.

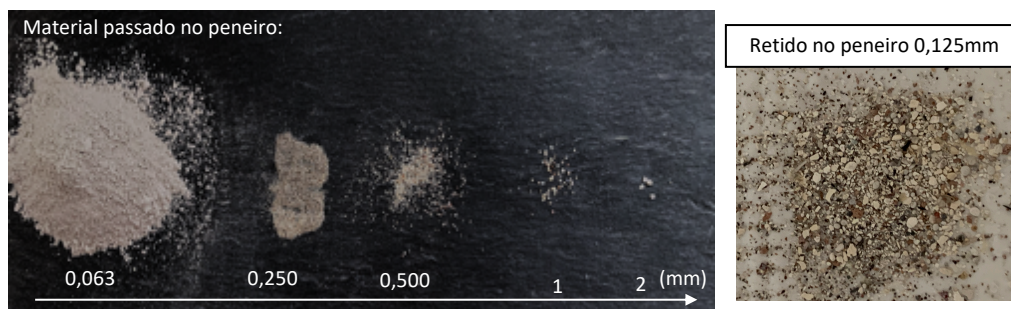


Figura 49- Distribuição granulométrica da amostra LMC; Material retido no P_{0,125mm} (LMC).

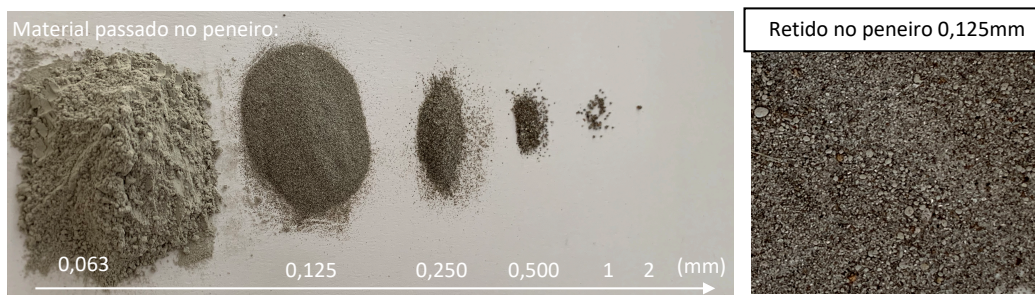


Figura 50-Distribuição granulométrica da amostra LGV; Material retido no P_{0,125mm} (LGV).

6.3. Determinação de vazios de filer compactado

Os resultados obtidos no ensaio de vazios de filer seco e compactado foi desenvolvido segundo a norma EN 1097-4, para as duas amostras em estudo, **LMC** e **LGV**. As categorias anunciadas na norma EN 13043 estão apresentadas no Quadro 13.

Quadro 13-Categorias dos vazios de Ridgen. (Adaptado de EN 13043)

Volume de vazios em percentagem (%)	Categoria para os vazios de Ridgen (v)
28 a 38	V _{28/38}
38 a 45	V _{38/45}
28 a 45	V _{28/45}
44 a 55	V _{44/55}

Na Figura 51 mostra-se o provete antes e depois do ensaio de compactação.

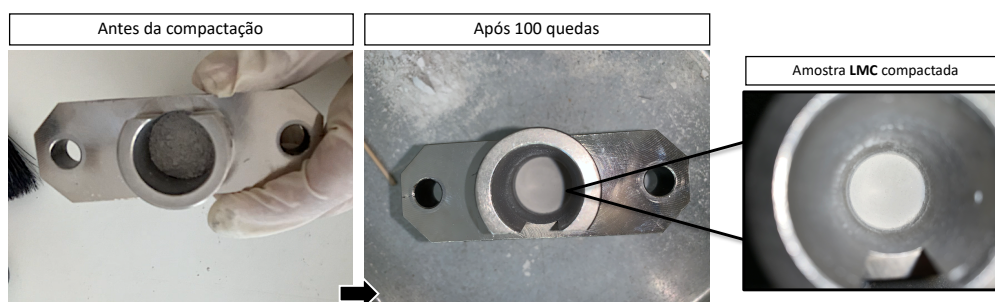


Figura 51- Compactação de Ridgen.

A norma EN 1097-4, obriga para cada ensaio, à realização da compactação em três provetes distintos da mesma amostra. No total foram realizados dois ensaios, com três provete para cada amostra (LMC e LGV). A percentagem de vazios de filer compactado encontrados, são os apresentados no Quadro 14.

Quadro 14-Valores dos vazios de Ridgen das amostras em estudo (LMC e LGV).

Amostra	Provete	v (%)	Mediana v(%)
LMC	1	41,8	42,7
	2	42,9	
	3	42,7	
LGV	1	45,3	45,3
	2	44,2	
	3	45,4	

Análise de resultados:

- Os valores obtidos são semelhantes para as duas amostras, este resultado pode ser justificado por apresentarem uma granulometria muito similar, no caso com uma percentagem de finos muito elevada.
- Para as lamas de mármore e calcários, LMC, obtiveram-se valores entre 41,8% e 42,7%, com um valor de mediana de 42,7%. As lamas de granitos variados, LGV, apresentam valores entre 44,2% e 45,4%, com um valor de mediana de 45,3%. Segundo os requisitos apresentados na norma as lamas incluem-se na categoria $V_{38/45}$ (representa o intervalo de percentagem de volumes de vazios que as lamas em estudo se enquadram).

6.4. Método para a determinação da baridade do fíler em querosene

O valor da baridade ou massa volúmica aparente do fíler em querosene apresenta a massa por unidade de volume do fíler, não compactado, quando colocado em suspensão em querosene.

A massa volúmica aparente foi determinada para todas as amostras de lamas, e os resultados apresentam-se no Gráfico 6.

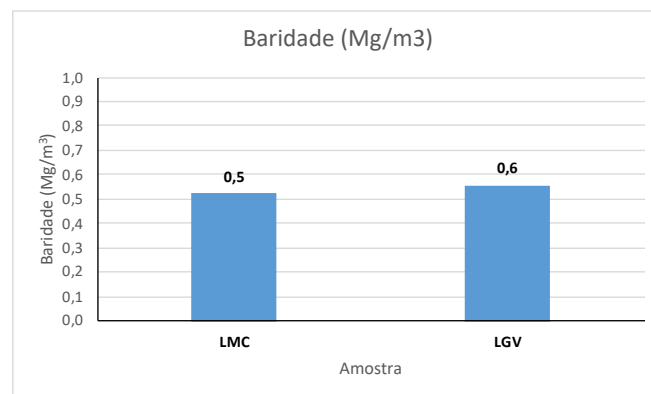


Gráfico 6-Valores obtidos no ensaio de Baridade em querosene.

Análise de resultados:

- Segundo os requisitos das Estradas de Portugal e os limites exigidos na norma EN 13043, a massa volúmica aparente deve estar compreendida entre os valores $0,5 \text{ Mg/m}^3$ a $0,9 \text{ Mg/m}^3$.
- As lamas encontram-se dentro dos limites estabelecidos pela norma, com a amostra LMC a apresentar um valor de baridade de $0,5 \text{ Mg/m}^3$ e a amostra LGV com um resultado ligeiramente maior com $0,6 \text{ Mg/m}^3$. Em geral apresentam valores muito similares e não muito distintos entre si.

6.5. Determinação da qualidade de finos: Ensaio do azul de metileno

Os valores de azul metileno foram determinados seguindo os procedimentos descritos anteriormente no capítulo 5.3.1. Este ensaio permite avaliar a qualidade dos finos presentes nas lamas em estudo. Os resultados obtidos das amostras LMC e LGV são apresentados no Quadro 15.

Quadro 15 - Resultados obtidos no Ensaio de Azul Metileno.

Amostra	Massa do provete (g)	Volume total de solução de corante (ml)	Valor de Azul Metileno MBF (g/Kg)
LMC	30,9	5,0	1,6
LGV	30,9	7,0	2,3

Para as Lamas Mármore e Calcários (LMC) constatou-se um valor de azul metileno de 1,6 g/Kg, e para a amostra LGV o valor foi ligeiramente maior na ordem dos 2,3 g/Kg. Segundo as categorias definidas pelo Quadro 16, ambas as amostras pertencem à categoria MB_F10, indicadoras de pouca presença de materiais argilosos.

Quadro 16-Categorias para os valores máximos de azul de metileno. (NP EN 13043:2004)

Valor de Azul metileno* MB _F (g/Kg)	Categoria MB _F
—	MB _F NT
≤ 10	MB _F 10
≤ 25	MB _F 25
> 25	MB _F Declared
Não requerido	MB _F NR
* da fração granulométrica 0/0,125mm	

Os valores obtidos classificam as duas amostras na classe MB_F, que corresponde à classe onde são incluídos os materiais que apresentam menores percentagens de partículas argilosas.

Para resultados mais interessantes seria de realizar mais ensaios de azul metileno para obter dados mais consistentes.

6.6. Determinação da densidade da partícula: método do picnómetro

Os valores da massa volúmica foram determinados segundo a metodologia descrita anteriormente no capítulo 5.3.5., permitindo caracterizar as lamas quanto à densidade das partículas. Os resultados foram determinados pelo método do picnómetro, com três determinações para cada amostra. Os valores obtidos constam no Quadro 17.

Quadro 17-Valores determinados de massa volúmica.

Amostras	LMC			LGV		
Referência do picnómetro	41	47	61	41	47	61
Massa do picnómetro vazio - m_0 (g)	30,2400	29,4990	30,1955	30,2400	29,4990	30,1955
Massa do picnómetro c/ filer- m_1 (g)	40,2455	39,501	40,1906	40,2467	39,4953	40,1976
Massa do picnómetro com o provete e cheio de líquido- m_2 (g)	87,6808	86,7792	86,2828	87,8429	86,8913	86,4344
Média da Massa Volúmica do filer - ρ_f (Mg/m^3)	2,67			2,77		

Análise de resultados:

- A amostra LMC apresenta uma massa volúmica de $2,67 \text{ g/cm}^3$ e a lama LGV uma massa volúmica de $2,77 \text{ g/cm}^3$.
- Os resultados estão de acordo com os valores expectáveis, compreendidos dentro das densidades das litologias associadas a cada amostra, no caso dos granitos entre os 2,6 a 2,8 g/cm^3 e no caso dos mármore e calcários entre os 2,2 a 2,7 g/cm^3 .

6.7. Determinação da finura: Método de Blaine

A superfície específica dos fileres foi determinada pelo método de Blaine, previsto na EN 13043. O procedimento do método de ensaio encontra-se descrito na EN 196-6. O Quadro 18, apresenta todos os resultados efetuados em laboratório para as duas amostras em estudo. Para cada amostra, foram ensaiados dois provetes e duas vezes, ou seja, é repetido o ensaio com o mesmo o provete (no quadro esses dados estão representados como ensaio 1.2, 2.2, 3.2, 4.2).

Quadro 18-Valores da superfície específica (Blaine) das amostras em estudo.

Amostra		LMC				LGV			
Massa volúmica (g/cm^3)	ρ	2,67				2,77			
Proвете		1		2		3		4	
Ensaio		1.1	1.2	2.1	2.2	3.1	3.2	4.1	4.2
Massa (g)	m_1	2,195	2,195	2,195	2,195	2,277	2,277	2,277	2,277
Temperatura de ensaio ($^{\circ}\text{C}$)	T	22,6	22,9	22,9	23,0	23,7	23,1	22,8	22,6
Tempo (s)	t	258	263	250	250	258	263	278	272
Superfície específica (cm^2/g)	S	8256	8335	8127	8127	7946	8022	8248	8158
Valor médio (cm^2/g)	S	8211				8094			

Análise de resultados:

- O valor médio da superfície específica de LMC é ligeiramente superior ao valor observado na lama LGV. Os valores médios de superfície específica obtidos para as amostras foram de 8211 cm²/g e 8094 cm²/g respetivamente.
- A superfície específica de LMC é mais alta, consequência da percentagem elevada de partículas finas e da sua natureza litológica, o que poderá corresponder teoricamente a um aumento da viscosidade na mistura betuminosa.
- A alta superfície específica das lamas em estudo está relacionada com a sua granulometria fina. Segundo os requisitos na norma EN 13043, a superfície específica pelo ensaio Blaine, é determinada de acordo com a norma EN 196-6 e declarada pelo produtor, não definindo valores limites para a utilização deste material.

6.8. Viscosidade aparente ou número de betume

O método de ensaio descrito na norma EN 13179-2, define número de betume como a quantidade necessária de água para 100 g de fíler de modo a obter uma mistura com uma determinada viscosidade aparente. A norma EN 13043 (2002) define 3 categorias para o número de betume (Quadro 19).

Quadro 19- Categorias para os valores de número de betume (BN).(CEN, 2002)

Intervalo de resultados individuais (%)	Número de betume - BN
28 a 39	BN _{28/39}
40 a 52	BN _{40/52}
53 a 62	BN _{53/62}

O Quadro 20 apresenta os valores obtidos na determinação do número de betume, de acordo com a norma anteriormente referida, nas lamas de rocha ornamental em estudo. Para o ensaio ser positivo a penetração deve se encontrar-se entre os 5 a 7 mm.

Quadro 20- Valores resultantes do ensaio de número de betume (BN).

<i>Amostra</i>	<i>Proвете</i>	<i>m (g)</i>	<i>x_n (ml)</i>	<i>Penetração (mm)</i>	<i>BN</i>
LMC	1	49,94	20,0	1,53	
	2	50,08	27,0	29,33	
	3	50,03	23,0	25,53	
	4	50,01	20,6	2,28	
	5	50,0	21,1	2,35	
	6	50,01	21,6	4,21	
	7	50,02	22,1	5,69	44
LGV	1	50,01	22	18,8	
	2	50,02	19,9	2,7	
	3	50,01	21	5,33	42

A leitura imediata do Quadro 20, traduz o trabalho de laboratório desenvolvido, ou seja, o número de vezes necessário para obter um resultado satisfatório para cada amostra com incrementos de água diferentes em cada provete, mostrando os resultados obtidos neste ensaio.

Assim, os resultados obtidos mostram que a amostra, LMC (BN=44) tem uma viscosidade aparente superior a amostra LGV (BN=42). De acordo com as categorias do número de betume (Quadro 19) ambas as amostras se enquadram na categoria intermédia, BN_{40/52}.

A adição de água nas lamas em estudo permitiu observar o seu comportamento, nomeadamente a variação da sua consistência como pasta (água e lama). Retirou-se dos resultados obtidos que para o ensaio ser positivo foi necessário incorporar 22,1ml (LMC) e 21ml (LGV). Nota ainda que a variação mínima destas quantidades confere à pasta viscosidades diferentes, e que a LMC absorveu mais água que a LGV.

6.9. Determinação da temperatura de amolecimento: Método do anel e bola

A determinação da variação da temperatura anel e bola de filer seguiu a metodologia descrita na norma EN 13179-1 (2003), devendo os resultados ser declarados através de uma das categorias descritas no Quadro 21.

Quadro 21- Categorias para a variação de amolecimento temperatura anel e bola. (CEN, 2013)

Variação da temperatura anel e bola (°C)	Categoria $\Delta_{R\&B}$
8 a 16	$\Delta_{R\&B}$ 8/16
17 a 25	$\Delta_{R\&B}$ 17/25
8 a 25	$\Delta_{R\&B}$ 8/25
> 25	$\Delta_{R\&B}$ 25
Não requerido	$\Delta_{R\&B}$ NR

Os resultados da determinação da variação da temperatura de amolecimento anel e bola encontram-se representados no Quadro 22. Este ensaio, permite observar o efeito rigidificante da mástique betuminosa formado com a incorporação das amostras a betume.

Quadro 22- Valores determinados no ensaio de temperatura de amolecimento.

Amostra	Anel e bola (provete)	Tempo final (min.)	Temperatura (°C)	Média temperatura (°C)	$\Delta_{R\&B}$ (°C)	Categoria de Δ_R & B
LMC	Betume (1)	9,2	51,2	51,4	21,5	$\Delta_{R\&B} 17/25$
	Betume (2)	9,2	51,6			
	Mástique (1)	13,8	74,0	72,9		
	Mástique (2)	13,6	71,8			
LGV	Betume (3)	9,1	50,6	50,7	23,5	$\Delta_{R\&B} 17/25$
	Betume (4)	9,2	50,8			
	Mástique (3)	14,0	75,0	74,2		
	Mástique (4)	13,8	73,4			

Análise de resultados:

- LMC apresenta uma variação de temperatura anel e bola de 21,5°C no caso inferior a LGV com uma temperatura de 23,5°C, apresentando uma variação de 2°C.
- O efeito rigidificante, está relacionado com a percentagem de volume de vazios, sendo que a existência de um elevado volume se traduz num poder rigidificante maior, pelo facto de haver menos betume livre para ser utilizado na mistura (Santos, 2013). Portanto as amostras terão menos betume livre apresentando um maior poder rigidificante segundo a percentagem de volume de vazios (43 %) e dos resultados obtidos neste ensaio.
- Este intervalo de temperatura pode estar relacionado com a percentagem de volume de vazios do material, diminuindo a trabalhabilidade do mástique betuminoso devido à porosidade das lamelas em estudo.

6.10. Determinação do pH da suspensão em água

O valor do pH quer do mástique betuminoso quer da superfície dos agregados afeta a adesão entre os dois componentes. Também o pH do meio em contacto pode contribuir para uma instabilização das forças adesivas. No caso de agregados calcários, valores do pH da água inferiores a seis favorecem a dissolução dos carbonatos e para agregados siliciosos, como por exemplo os granitos, para valores de pH superiores a oito, pode levar a dissolução da sílica (Teixeira, 2015).

O valor do pH foi determinado segundo a metodologia descrita no capítulo anterior. No Quadro 23 apresentam-se as diversas leituras obtidas a partir da suspensão das amostras em estudo.

Quadro 23-Valores obtidos do pH da suspensão das amostras em água.

Amostra	LMC			LGV		
Provede	1	2	3	1	2	3
Massa (g)	10,02	10,04	10,08	10,05	10,04	10,08
Medições pH	9,36	9,32	9,37	9,68	9,68	9,67
	9,38	9,32	9,32	9,69	9,69	9,64
	9,38	9,31	9,32	9,68	9,67	9,64
pH médio	9,3			9,8		
Escala de pH	Alcalina			Alcalina		

O pH da água utilizada na suspensão é cerca de 5,2. Os valores do pH das amostras de lamas encontram-se num espectro alcalino, com pH para LMC de 9,3 e para LGV de 9,8, com um aumento considerável do pH original.

6.11. Análise química quantitativa por FRX

A análise química por FRX realizada sobre as amostras estudadas está representada nos Gráfico 7 e Gráfico 8, apresentando-se também a tabela com a percentagem dos componentes químicos para uma melhor análise dos resultados

Os resultados apresentados para cada lama em estudo, foram obtidos a partir do valor médio de três leituras, realizadas com o aparelho portátil de espectrometria de fluorescência de raios X (FRX).

No anexo 1, podem ser observados os relatórios gerados pelo software do equipamento para cada leitura, tendo sido realizados três ensaios por cada amostra, perfazendo um total de seis análises químicas.

Gráfico 7-Análise química por FRX da amostra LMC.

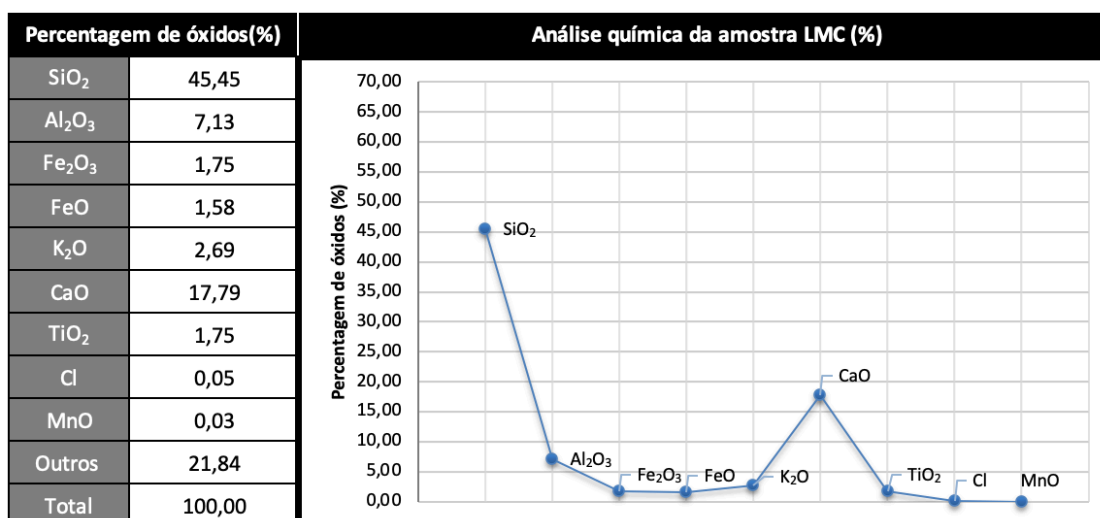
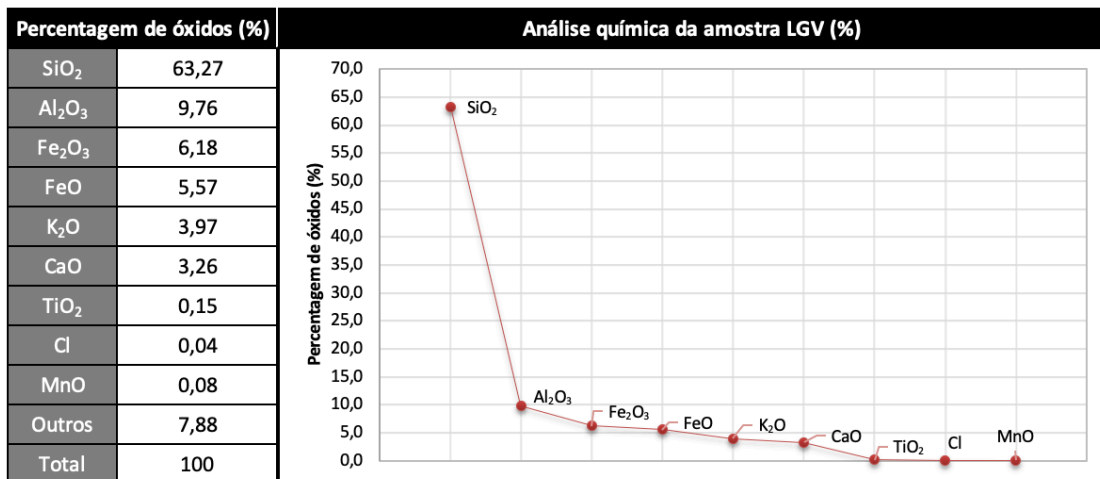


Gráfico 8-Análise química por FRX da amostra LGV.



Da análise dos resultados obtidos constata-se que a sílica (SiO₂) é o composto com maior percentagem nas duas lamas em estudo. O alto teor em sílica é exetável para a amostra LGV, provenientes da serragem de granitos, cuja sua composição química é constituída maioritariamente por esse elemento.

Tal como a sílica, o ferro é o outro elemento de grande representatividade nas lamas de origem granítica (LGV), sendo que estará maioritariamente associado à composição química dos granitos (presença dos minerais silicatados ferromagnesianos) e também devido à adição de calda abrasiva e ao próprio desgaste das ferramentas de corte.

Os resultados obtidos para as lamas LMC, apresentam um valor de sílica significativo o que não é de todo correlacionável com a litologia origem descrita, o que pode indicar fatores de contaminação no processo de serragem ou no tratamento de lamas, tais como:

- O grupo comercial de rochas, mármore e calcários, incluem rochas metamórficas que possuem sílica na sua composição química.
- A serragem de rochas silicatadas, no equipamento onde mármore ou calcários foram serrados ou vice-versa;

Este indicador poderá ter influência nos resultados obtidos de outros ensaios, justificando as semelhanças de características e resultados muito similares entre as duas amostras. Na amostra LMC, o óxido de cálcio (CaO) é um dos componentes mais expressivos da lama de mármore e calcário (LMC), com 17,79 % de teor. A sua presença confirma a origem litológica das lamas, cujo principal componente é o carbonato de cálcio.

Na lama LGV a presença deste elemento deve-se a adição de cal hidratada durante o processo de corte.

Os resultados da análise química, induz a presença de elevados teores de minerais metálicos como óxido de alumínio (Al_2O_3) e óxido de ferro (Fe_2O_3 e FeO) e baixos teores em manganês (Mn) e titânio (Ti). A presença destes elementos está associada aos materiais de desgaste utilizados no processo de serragem de blocos, como as lâminas de aço (contém na sua composição carbono(C), manganês (Mn), sílica (Si), fósforo (P) e enxofre (S)), dos engenhos de multilâminas da serragem de granitos, dos segmentos diamantados das lâminas dos engenhos no corte de mármore e calcários (contém cobalto (Co), cobaltite (CoAsS), diamante e bronze), e da granalha (composta por ferro(Fe), carbono(C), manganês (Mn), sílica (Si), fósforo (P) e enxofre (S) (Adaptado de Silva, 2018).

Durante o ensaio do pH, foram preparadas soluções aquosas com recurso a um agitador magnético na qual a amostra reagiu ao íman. Esta reação reforça a presença de partículas magnéticas como indicam as análises químicas.

Foi realizado, com a ajuda de um íman, uma passagem por uma amostra seca, com a finalidade de para confirmar a presença de partículas magnéticas. Os resultados obtidos confirmaram a presença elevada de partículas magnéticas na amostra de LGV. A lama LMC reagiu com menos intensidade que a LGV, ao íman.

A Figura 52 e Figura 53 apresentam a reação da amostra LGV à proximidade do íman.



Figura 52- 1) Aproximação do íman à amostra LGV; 2) Amostra LGV e íman após passagem; 3) limpeza subtil com pincel para retirar excesso de partículas.

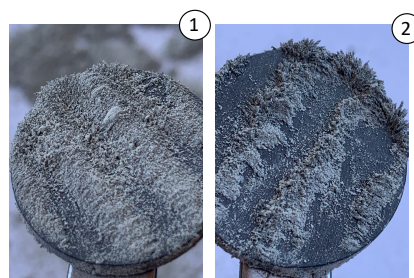


Figura 53- (1) e (2) Reação das partículas metálicas ao campo magnético.

6.12. Quadro resumo das propriedades

No Quadro 24, apresenta-se um resumo de todo o trabalho laboratorial realizado e as características estudadas nas duas lamas em estudo. Na última coluna apresentam-se os requisitos mínimos para fileres utilizados em misturas betuminosas, recomendados pelo caderno de encargos das estradas de Portugal, bem como a avaliação do cumprimento dos mesmos para as lamas em estudo.

Quadro 24- Resumo das propriedades determinadas das amostras em estudo.

Propriedade	Norma	Ensaio	Unidades	Propriedades da Amostra		Requisitos mínimos para filer segundo caderno de encargos das Estradas de Portugal	
				LMC	LGV		
Geométricas	NP EN 933-9	Azul metileno	g/kg	1,6 (MB _r 10)	2,3 (MB _r 10)	MBF 10	✓
	EN- 933-10	Passados no peneiro 0,063 mm	%	99%	91%	70% a 100%	✓
Físicas e mecânicas	NP EN 1097-3 anexo B	Massa volúmica aparente/Baridade em querosene	Mg/m ³	0,5	0,6	Amplitude valores declarados pelo produtor entre 0,5 e 0,9	✓
	EN 1097-4	Vazios do filer seco compactado	%	42,7 (V _{38/45})	45,3 (V _{38/45})	V _{28/38}	✗
	EN 1097-7	Massa volúmica das partículas do filer	Mg/m ³	2,67	2,77	Valor declarado	✓
	EN 196-6	Ensaio de Blaine	cm ² /kg	8211	8094	Amplitude declarada pelo produtor não deve ser superior a 1400 cm ² /Kg	✓
	EN 13179-1	Temperatura de amolecimento	°C	21,5 (Δ _{R&B} 17/25)	23,5 (Δ _{R&B} 17/25)	categorias (Quadro 21)	✓
	EN 13179-2	Viscosidade aparente ou número de betume	BN	44 (BN _{40/52})	42 (BN _{40/52})	categorias (Quadro 19)	✓
Químicas	ISO 787/9	pH de suspensão em água	pH a 23°C	9,3	9,8	-----	
	ASTM D5381	FRX- Espetrometria de fluorescência de raios X	SiO ₂ (%)	45,45	63,27	-----	
			Al ₂ O ₃ (%)	7,13	9,76	-----	
			Fe ₂ O ₃ (%)	1,75	6,18	-----	
			FeO(%)	1,58	5,57	-----	
			K ₂ O(%)	2,69	3,97	-----	
			CaO(%)	17,79	3,26	-----	
			TiO ₂ (%)	1,75	0,15	-----	
			MnO(%)	0,03	0,08	-----	
			Cl (%)	0,05	0,04	-----	
Outros (%)	21,84	7,88	-----				

6.13. Análise de propriedades de fíleres comerciais e fíleres recuperados usuais em misturas betuminosas

Devido à situação pandémica que o Mundo atravessa (Covid-19), e não tendo sido possível complementar este trabalho com o estudo do aproveitamento das lamas em misturas betuminosas através da realização de provetes em laboratório, desenvolvemos neste tópico, as propriedades que os fíleres devem possuir para serem utilizados em misturas betuminosas.

A análise apoia-se nos estudos de caracterização física e química de fíleres comerciais e fíleres recuperados de Santos (2013) e Teixeira (2015).

O objetivo consiste em perceber se os valores obtidos para as lamas em estudo se encontram dentro do padrão de fíleres comerciais e fíleres recuperados e se serão viáveis, como alternativas mais baratas e ecológicas, aos fíleres tradicionais usados em misturas betuminosas.

6.13.1. Azul metileno

O Gráfico 9, mostra a comparação dos valores do ensaio de azul metileno, obtido para as lamas em estudo e compara-os com os valores dos fíleres e habitualmente usados em misturas betuminosas. Os valores dos ensaios de azul metileno para os fíleres foram obtidos através de um estudo realizado por (Santos, 2013).

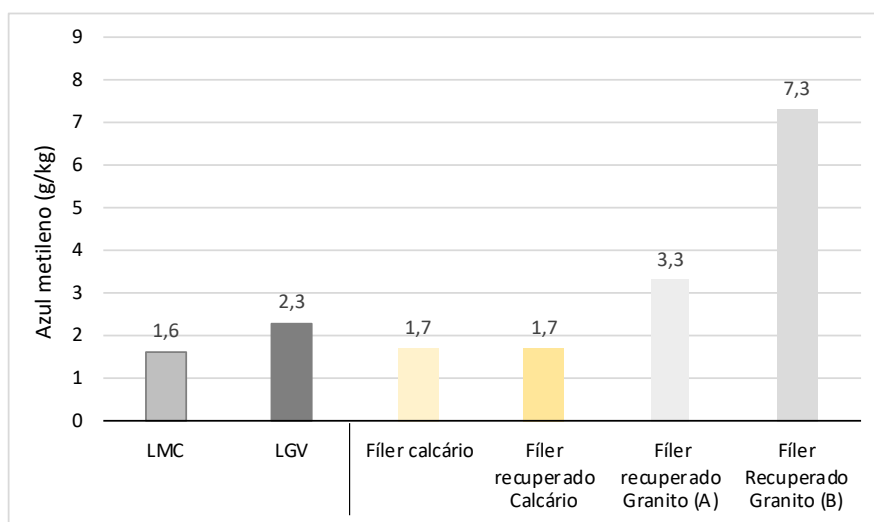


Gráfico 9-Azul metileno.

Os valores obtidos nas lamas em estudo encontram-se dentro dos valores dos fíleres. A amostra LMC apresenta valores similares aos de um fíler calcário e a LGV apresenta valores de azul metileno próximos dos de um fíler recuperado granítico A e B sendo, no entanto de valor inferior. Este facto, pode ser devido à presença de cal hidratada adicionado no corte de rocha ornamental.

6.13.2. Massa volúmica (Método do picnómetro)

Através do Gráfico 10, constata-se que as lamas em estudo, apresentam valores de massa volúmica, na mesma ordem de grandeza dos fíleres comerciais e recuperados. A massa volúmica de LGV é ligeiramente superior ao fíler recuperado granítico (FRG2) mas dentro da mesma ordem de grandeza tal como a lama LMC em relação ao fíler calcário (FC1) e fíler recuperado de calcário (FRC1). O cimento portland (CEM) apresenta uma massa volúmica ligeiramente maior que as lamas estudadas.

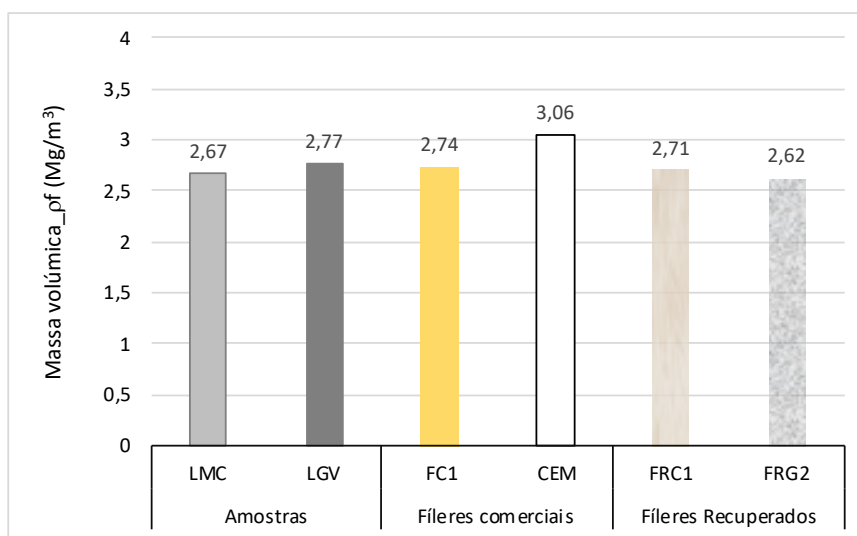


Gráfico 10-Massa volúmica.

6.13.3. Granulometria por jato de ar: material passado no peneiro 0,063mm

No Quadro 25, apresentam-se os resultados obtidos a partir das análises granulométricas de vários fíleres comerciais e recuperados por peneiração a jato de ar, presentes no estudo de Teixeira (2015).

Quadro 25- Percentagem de material passado em fíleres comerciais.

Abertura do peneiro (mm)	Percentagem de material passado acumulado no peneiro (%)					
	LMC	LGV	FC1	CEM	FRC1	FRG2
2	100	100	100	100	100	100
0,125	100	97	97	99	86	98
0,063	99	91	79	95	67	93

*FRG2- Fíler recuperado de Granito
 *FRC1- Fíler recuperado de Calcário
 *CEM- Cimento Portland
 *FC1- Fíler de Calcário

Ambas as lamas em estudo têm granulometrias muito finas. A LMC apresenta granulometria muito similar ao do cimento portland (CEM), sendo mais fina que FC1 e FRC1. A lama LGV enquadra-se nos contornos da granulometria do fíler recuperado de granito (FRG2).

6.13.4. Massa volúmica aparente ou Baridade em querosene

O Gráfico 11 apresenta os valores da baridade em querosene dos diferentes fíleres comerciais e fíleres recuperados, tal como os valores obtidos para as lamas em estudo.

Da análise do gráfico podemos constatar que as amostras (LMC e LGV) têm uma baridade que se encontra entre as baridades dos fíleres cumprindo os requisitos mínimos para as misturas betuminosas. A amostra LMC apresenta um valor superior a FC1 e inferior às restantes, observa-se ainda que a LMC se enquadra nos valores de fíleres com origem calcária. A amostra LGV apresenta valores na ordem de grandeza de FRG2, no entanto ligeiramente abaixo.

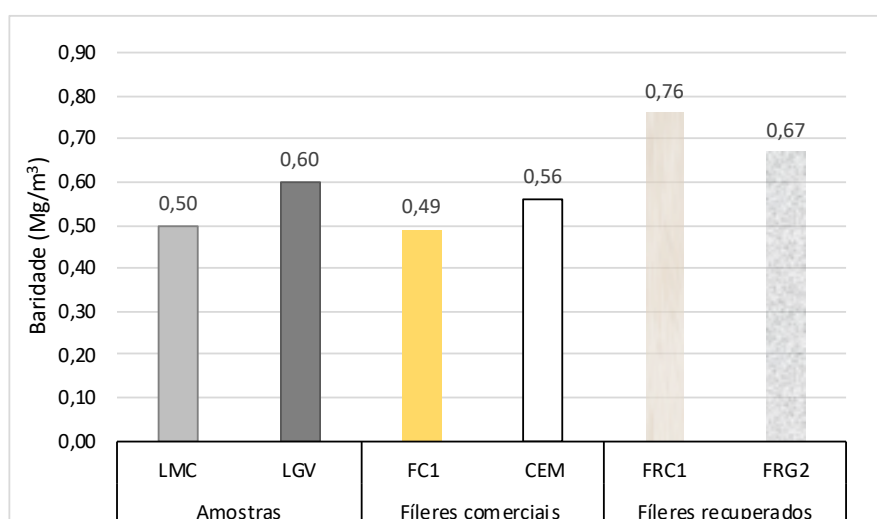


Gráfico 11- Massa volúmica aparente ou Baridade querosene.

6.13.5. Percentagem de volume de vazios (Ridgen)

Através da análise do Gráfico 12 concluiu-se que a percentagem de volume de vazios das lamas em estudo são superior a 40%, não cumprindo com os requisitos mínimos do caderno de encargos de estradas de Portugal, que limita o valor a 38%.

Contudo, o fíler recuperado de granito (FRG2) para além de utilizável apresenta um valor acima do recomendado para Portugal, demonstrando compatibilidade entre os valores dos fíleres comerciais e fíleres recuperados aos valores das lamas (LMC e LGV), tal como a possibilidade da introdução destas em misturas betuminosas.

A amostra LMC apresenta uma percentagem de volume de vazios inferior a FRG2, já a amostra LGV apresenta uma percentagem de volume de vazios superior a todos os fíleres do Gráfico 12, todavia na mesma ordem de grandeza de FRG2.

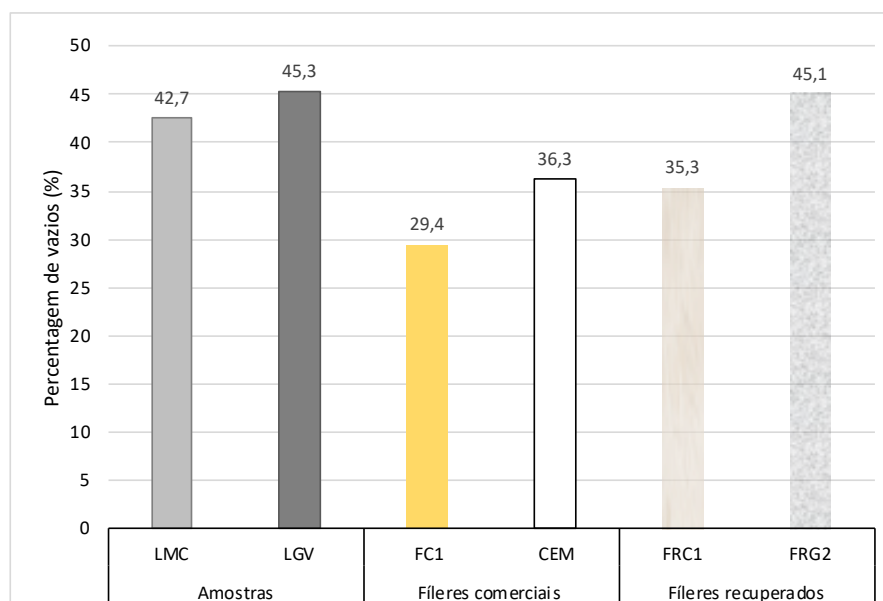


Gráfico 12- Percentagem de volume de vazios (Ridgen).

6.13.6. Superfície específica (Método de Blaine)

Os dados obtidos foram comparados aos do um estudo de (Teixeira, 2015), para diversos tipos de fileres comerciais e recuperados. No Gráfico 13, encontram-se representados os valores das superfícies específicas correspondentes aos diferentes tipos de filer e às lamas de estudadas.

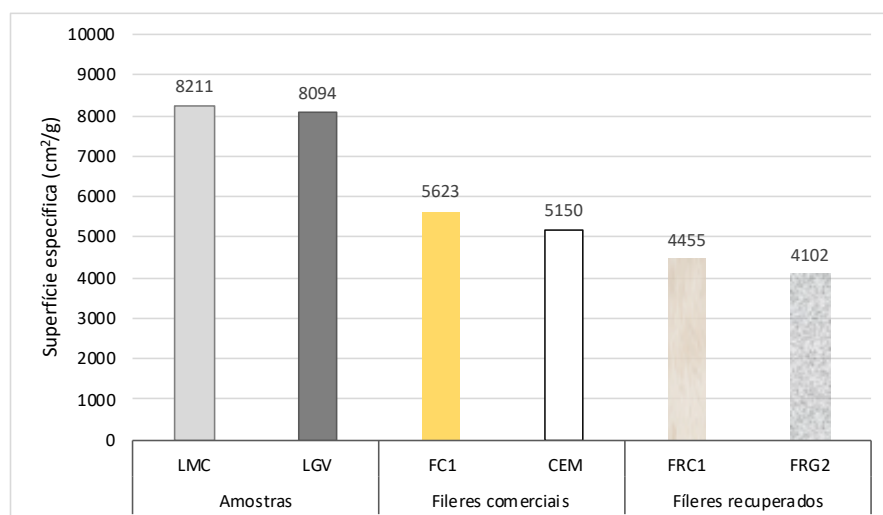


Gráfico 13- Comparação da Superfície específica das amostras com os fileres comerciais.

As diferentes superfícies específicas variam de acordo com a origem litológica dos fileres/lamas em estudo, verificando-se ainda que os fileres de matriz calcária (FC1, CEM, FRC1) tem em geral uma maior superfície específica em relação aos fileres recuperados de origem granítica (FRG2). Nas lamas em estudo o comportamento é similar, em que LMC é superior a LGV, no então muito superiores aos fileres comerciais e recuperados devido à sua granulometria fina.

6.13.7. Variação da temperatura anel e bola

Os resultados da variação da temperatura das lamas em estudo e dos fíleres comerciais e recuperados estão representados no Gráfico 14.

Analisando os valores obtidos, é possível perceber que os valores de variação da temperatura anel e bola são semelhantes nas duas lamas (LMC e LGV). Também se constata, que as mesmas apresentam valores que se enquadram nos valores dos fíleres normalizados, em que LMC e LGV tem a variação de temperatura de amolecimento superior a FC1, CEM e FRC1 e inferior a FRG2.

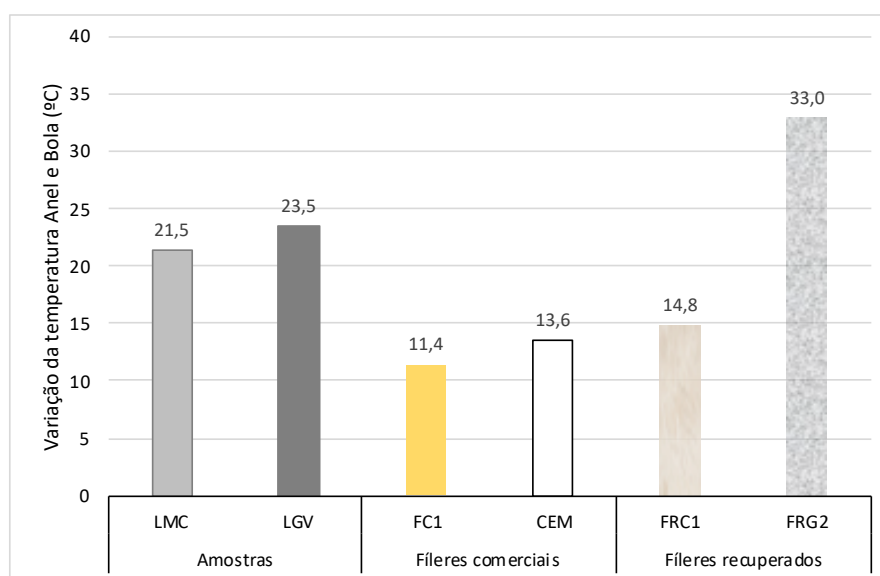


Gráfico 14-Variação de temperatura anel e bola.

O efeito rigidificante está interligado com a percentagem de volume de vazios do material, sendo que um elevado volume se traduz numa rigidificação mais elevada, com menos betume livre, tornando a mástique com menos trabalhabilidade (adaptado de Santos, 2013).

Assim, as lamas tal como FRG2 tornam o betume mais rígido necessitando de uma temperatura superior para atingir o amolecimento do betume, ou seja, o mástique incorporado das lamas apresentará menor trabalhabilidade em relação a FC1, CEM e FRC1.

6.13.8. Número de betume

Através do Gráfico 15 constata-se que os fíleres de origem calcária (FC1, CEM, FRC1) tem um valor de número de betume inferior às lamas em estudo (LMC e LGV). Contudo, as amostras LMC e LGV, apresentam valores dentro dos valores referentes aos fíleres. As lamas LMC e LGV apresentam um valor superior a FRC1, CEM e FC1 e inferior a FRG2.

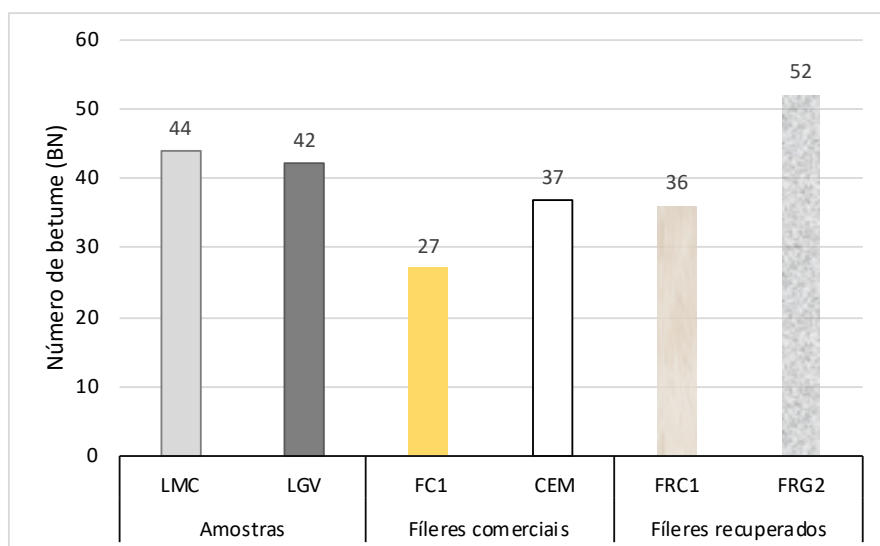


Gráfico 15-Número de betume: comparação lamas e fíleres comerciais.

6.13.9. pH

Através do Gráfico 16, observa-se que os fíleres de origem calcária (FC1,CEM,FRC1) apresentam o pH elevado devido à presença de carbonato de cálcio na sua composição, e o fíler recuperado granítico FRG2 apresenta um pH mais neutro em relação aos valores dos outros fíleres.

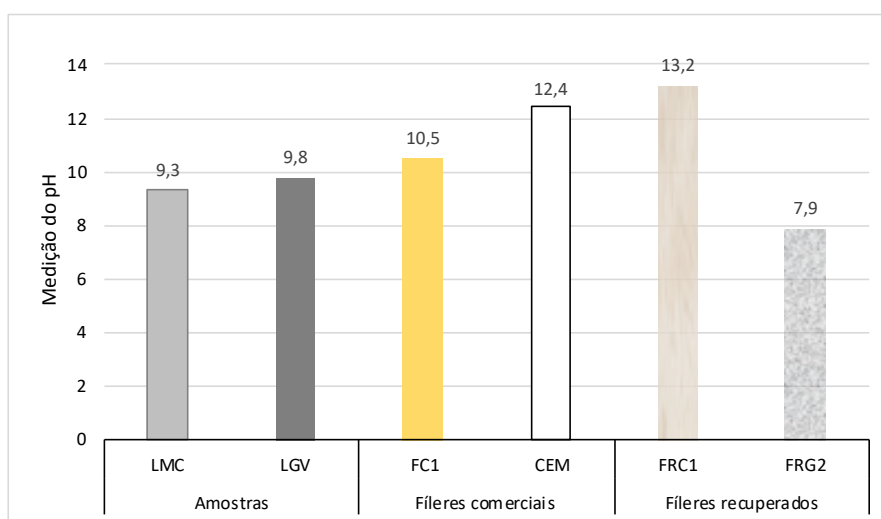


Gráfico 16- Medições do pH: comparação lamas e fíleres comerciais

As lamas em estudo apresentam elevados níveis de pH superiores a FRG2, mas inferior aos fíleres calcários, indicando a presença de carbonato de cálcio, derivado da origem litológica de LMC e do uso de cal hidratada na mistura abrasiva na serragem dos blocos.

(página propositadamente em branco)

Capítulo 7

Conclusões

(página propositadamente em branco)

7. Conclusões

Devido aos tempos difíceis da crise sanitária por que passamos o estudo não foi totalmente realizado. No entanto o essencial manteve-se e revelou resultados interessantes, dando espaço para continuar a estudá-los como subproduto.

As elevadas produções de lamas resultantes da indústria da rocha ornamental, tem como consequência o depósito de toneladas de resíduos em aterros e escombreiras. As iniciativas da aplicação de políticas ambientais sustentáveis, pressionam as empresas a repensar o destino final destes subprodutos, conduzindo a investigações científicas para o reaproveitamento e reintrodução destes materiais novamente no ciclo de produção como matérias-primas. O estudo desta dissertação enquadrou-se nestes objetivos compreendendo uma série de testes para a determinação das propriedades geométricas, físicas e químicas das lamas de rocha ornamental de origem granítica e carbonatada.

A indústria de rocha ornamental, comportará sempre a produção de resíduos, pelo que o problema subsistirá. Segundo a estimativa realizada em 2018, foram geradas 962 533 ton (novecentos e sessenta e dois mil quinhentos e trinta e três toneladas) de resíduos resultantes do beneficiamento de rocha ornamental, em Portugal. A incorporação destes resíduos de rocha de elevada qualidade geotécnica, podem levar a mudanças positivas nos materiais de construção conferindo o melhoramento das suas propriedades físicas e químicas, a preços mais baixos.

Do estudo realizado resultou uma caracterização física e química das lamas de rocha ornamental com o objetivo de determinar se é viável a sua utilização como fíler no fabrico das misturas betuminosas.

No trabalho laboratorial realizado efetuaram-se diversos ensaios, segundo os requisitos mínimos recomendados descritos no caderno de encargos das estradas de Portugal e da norma EN 13043 (agregados para misturas betuminosas). Os resultados dos ensaios realizados às lamas de rocha ornamental permitiram concluir que:

→ A granulometria de ambas as lamas é muito fina, com cerca de 99 % (LMC) e 91%(LGV) para percentagem de passados na fração 0,063mm.

→ No ensaio de azul metileno as lamas mostraram teores inferiores a 10g/Kg, com cerca de 1,6 g/Kg (LMC) e 2,3 g/Kg (LGV), o que demonstra pouca atividade e baixo teor de argila, inserindo -se na categoria MB_f10.

→ As massas volúmicas das lamas em estudo mostraram-se concordantes com os valores esperáveis, de $2,67 \text{ Mg/m}^3$ (LMC) e $2,77 \text{ Mg/m}^3$ (LGV), estando de acordo com as densidades típicas de litologia de origem.

→ Os resultados obtidos para a massa volúmica aparente em querosene demonstraram-se comportamentos idênticos para as duas amostras, com valores de $0,5 \text{ Mg/m}^3$ para LMC e de $0,6 \text{ Mg/m}^3$ para LGV. Os valores estão dentro dos valores dos fileres comerciais e dos fileres recuperados. Uma porosidade reduzida poderá indicar massa volúmica reduzida e maior índice de vazios de fíler.

→ De acordo com os requisitos mínimos as amostras não cumprem com o valor recomendado para o índice de vazios de fíler seco compactado ($V_{28/38}$). As duas amostras apresentam valores acima de 40 % volume de vazios de fíler seco compactado. No entanto estes valores não serão condicionantes para a utilização dos materiais pois alguns fileres utilizados no fabrico de misturas betuminosas apresentam valores semelhantes ou superiores, como o caso dos fileres recuperados de granito, cimento portland e cal hidratada.

→ Os valores da viscosidade aparente das duas lamas conduzem à classificação de ambos os materiais na classe BN 40/52, com um número de betume de 44 (LMC) e 42 (LGV).

→ A incorporação das lamas com betume permitiu avaliar a viscosidade do betume com o aumento da temperatura avaliando a rigidificação das duas lamas em estudo. Os valores apontam para variações de temperatura de anel e bola de $21,5^\circ\text{C}$ (LMC) e $23,5^\circ\text{C}$ (LGV). Este intervalo de temperatura pode estar relacionado com a percentagem de volume de vazios do material, diminuindo a trabalhabilidade do mástique betuminoso.

→ A superfície específica das lamas é bastante elevada, com valores entre $8094 \text{ cm}^2/\text{g}$ (LGV) e $8211 \text{ cm}^2/\text{g}$ (LMC). Estes valores enquadram-se com as características litológicas dos materiais sendo que LMC tem uma granulometria mais fina e apresentam maior superfície específica que LGV.

→ Na medição do pH os valores das soluções aquosas com as lamas em estudo mostraram o aumento do pH da água. Constatou-se valores na ordem dos 9,3 para LMC e 9,8 para LGV. Este ensaio permitiu confirmar a presença de carbonato de cálcio nas lamas, derivado da composição química das lamas e da introdução da cal hidratada na mistura abrasiva.

→ Da análise química por espectrometria de FRX, resultam que os resíduos de lamas (LMC e LGV), tem como principais elementos químicos a sílica, o carbonato de cálcio, a alumina e o potássio. Em percentagens minoritárias tem elementos como ferro (Fe) e TiO_2 , MnO , que resultam das partículas metálicas do desgaste da ferramenta de corte e da origem litológica das lamas graníticas. Os resultados foram os esperáveis com a litologia, com exceção do elemento sílica nas lamas LMC.

→ A presença de sílica nas lamas LMC derivam provavelmente do grupo comercial de rochas, mármore e calcários, que incluem rochas metamórficas que possuem sílica na sua composição química. A sua presença poderá ter tido influência nos valores obtidos nos ensaios.

→ A amostra LGV, tem elevada presença de partículas magnéticas, uma vez que reagiu ao campo magnético com muita atividade. A amostra LMC não reagiu com tanta intensidade, mas não deixa de ter componentes metálicos na sua composição. Este ponto permitiu avaliar a possibilidade da separação destas partículas por via magnética.

→ Em geral, as propriedades das lamas revelaram-se dentro das características dos fileres comerciais e fileres recuperados utilizados em misturas betuminosas, o que leva a concluir que as lamas poderão ser um substituto do fíler viável nestas misturas betuminosas.

Em suma, os resultados do estudo das lamas de rocha ornamental, revelaram-se favoráveis à sua incorporação em misturas betuminosas, como substituição do fíler tradicional.

Assim será importante aprofundar os seus estudos realizados com recurso a um maior número de ensaios, à incorporação das lamas em provetes de misturas betuminosas e ainda a avaliação das suas propriedades destas misturas betuminosas.

7.1. Perspetivas futuras

Face às condições que a dissertação foi desenvolvida, o estudo acabou por ficar incompleto com espaço para futuros estudos na continuação da análise destas lamas como por exemplo nos seguintes parâmetros:

→ Realizar um número maior de ensaios para obter resultados mais robustos;

→ Fazer incorporações destas lamas em provetes de misturas betuminosas;

→ Realizar ensaios para a caracterização das misturas betuminosas;

→ Averiguar novas soluções para incorporação destas lamas como por exemplo em sabonetes, tintas, produtos cerâmicos, entre outros.

(página propositadamente em branco)

Capítulo 8

Bibliografía

(página propositadamente em branco)

8. Referências Bibliográficas

- Akbulut, H., Güreer, C., Çetin, S., & Elmaci, A. (2012). Investigation of using granite sludge as filler in bituminous hot mixtures. *Construction and Building Materials*, 36(May), 430–436. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.04.069>
- Allam, M. E., Bakhoum, E. S., & Garas, G. L. (2014). Re-use of granite sludge in producing green concrete. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, 9(12), 2731–2737.
- Almeida, M., & Amado, A. (2018a). *Estudo de valorização de lamas processamento pedra.pdf* (pp. 1–20). Associação Nacional da Indústria Extrativa e Transformadora.
- Almeida, M., & Amado, A. (2018b). *Guia de potenciais destinos para as lamas de processamento da pedra incluindo simbioses industriais*. Associação Nacional da Indústria Extrativa e Transformadora.
- Antunes, V. F. S. (2013). *Influência do Filer no Comportamento de Mastiques Betuminosos* [Universidade Nova de Lisboa]. http://run.unl.pt/bitstream/10362/10873/1/Antunes_2013.pdf
- ATIC, A. T. da I. de C. (2019). Roteiro Nacional para a descarbonização da indústria cimenteira. *ATIC- Associação técnica da indústria de Cimento*, 054, 1–46.
- Azevedo, H., Vidal, F., & Castro, N. (2014). *Tecnologia de rochas ornamentais: pesquisa, lavra e beneficiamento* (H. Azevedo, F. Vidal, & N. Castro (eds.); Vol. 1, Número 4). CETEM (centro de tecnologia mineral. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Barbosa, M. V. C. (2013). *O betão : Definição , caracterização e propriedades*. ISEL - Instituto de engenharia de Lisboa.
- CEN. (2002). *EN 13043 Aggregates for bituminous mixtures and surface treatments for roads, airfields and other trafficked areas*.
- CEN. (2011). *NP EN 933-9 Ensaio das propriedades geométricas dos agregados Parte 9: Avaliação dos finos Ensaio do azul de metileno*.
- CEN. (2013). *EN 13179-1 Test for filler aggregate used in bituminous mixtures - Part 1: Delta ring and ball test* (pp. 1–7).
- DGEG, E. de R. G. da D.-R. (2018). *Produção comercial de pedreiras por subsector por anos (2007 a 2018)*.
- Estradas de Portugal, S. A. (2014). *Caderno de Encargos Tipo Obra 14.03-Pavimentação :caraterísticas dos materiais*.
- Figueiredo, J. M., Rodrigues, F., Correia, A., & Chambino, M. T. (2001). Guia técnico: Setor da pedra Natural. Em *INETI* (Número Setor da pedra natural, pp. 1–71).
- Francisco, S. da P. G. da C. (sem data). *Condições para produção de rocha artificial (Betão).pdf*. FEUP- Faculdade de Engenharia.
- Ghazawi, Z., Khedaywi, T., & Gouneem, A. (2007). *Pollution Reduction and Reuse of Sludge Waste in Asphalt Paving Mixtures*. 395–399.
- Gomes, L., Galiza, C., & Vieira, A. (2008). *Desmonte de maciços rochosos II* (pp. 1–114). ISEP.
- Henriques, A. M. E., Moura, A. A. C., & Santos, F. A. (2009). *Manual da calçada portuguesa*. <https://doi.org/000000/09>
- Lima, W. B. C., Lira, H. L., & Neves, G. A. (2017). *Incorporação de resíduo lama do processo de beneficiamento de granito na argamassa expansiva de demolição*. 2(2016), 89–95.
- Ministério do Ambiente, O. do T. e E. (2015). *Compromisso para o crescimento verde* (p. 196).
- Oliveira, A. A. F. De. (2017). *Misturas betuminosas tipo SMA - Formulação de misturas em laboratório*. ISEP.
- Ribeiro, R. C. da C., Correia, J. C. G., & Seidl, P. R. (sem data). *Aproveitamento de resíduos gerados no corte de rochas ornamentais em pavimentação asfáltica*.
- Santos, B. A. B. dos. (2013). *Caracterização física e química de fileres para fabrico de misturas betuminosas*. ISEP.

-
- Santos, J. R. de C. dos. (2016). *Misturas betuminosas a quente . Uma análise à abordagem empírica e fundamental da norma de produto*. universidade de coimbra.
- SECIL. (sem data). Processo de fabrico de cimento. Em *SECIL* (p. 18). <https://doi.org/10.1128/jvi.66.9.5399-5408.1992>
- Silva, J. M. C. D. (2018). *Caraterização de aproveitamento das lamas geradas no corte primário de rocha ornamental* [ISEP- Instituto Superior de Engenharia do Porto]. <https://doi.org/10.24927/rce2016.004>
- Silva, M. A., & Holanda, J. N. F. (2010). Electrical porcelain containing ornamental rock waste: Microstructural development. *Materials Science Forum*, 660–661, 692–696. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.660-661.692>
- Souza, J. N. de S. (2001). *Utilização do resíduo proveniente da serragem de rochas graníticas como filer no concreto asfáltico usinado a quente*. Universidade Federal da Paraíba (Brasil).
- Spínola, S. C. (2009). *Requisitos básicos de uma rocha ornamental*. Instituto Superior de Engenharia do Porto.
- Teixeira, A. M. D. S. (2015). *AVALIAÇÃO DO IMPACTO DE DIFERENTES FILERES NO DESEMPENHO DAS MISTURAS BETUMINOSAS*. Feup.
- Torres, P. M. da C. (2007). *PaulaTorres_Cerâmica.pdf*. Universidade de Aveiro.
- Ullah, S., Alam, M., & Khan, R. (2017). *Re-use of Marble Waste as Filler Substitute in Bituminous Roads*. 7(10), 58–62. <https://doi.org/10.9790/9622-0710035862>
- Wypych, G. (2016). The Handbook of Filler. Em *The Handbook of Filler*. Chem Tec Publishing.

Webgrafia

- [1] Instituto nacional de engenharia tecnologia e inovação, I.P, “Rochas Ornamentais Portuguesas,” [Online]. Available: <http://rop.Ineg.pt/rop/>. [Acedido em 12 Junho 2020].
- [2] F. Pinto, “Verdadeiroolhasr.pt,” 28 Março 2018. [Online]. Available: <https://verdadeiroolhar.pt/2018/03/28/empresa-valongo-vai-reaproveitar-residuos-lousa-produto-inovador/>. [Acedido em 12 junho 2020].
- [3] Agência Lusa , Noruega, “dnoticias.pt,” 06 Novembro 2017. [Online]. Available: <https://www.dnoticias.pt/pais/pedras-de-xisto-com-500-milhoes-de-anos-alavancam-economia-de-foz-coa-GD2306679> . [Acedido em 12 Junho 2020].
- [4] “Pedras Alexandre Catarino,” [Online]. Available: <https://pedrasalexandreacatarino.com/detalhe/esponteirado-manualmente/>. [Acedido em Agosto 2020].
- [5] “Cluster Mineral Resources,” [Online]. Available: <https://www.clustermineralresources.pt/marblefashiondesign>. [Acedido em Maio 2020].
- [6] “Granetos,” [Online]. Available: <http://www.granetos.pt/produtos/acabamentos.html>. [Acedido em Agosto 2020].
- [7] “Luso stone,” [Online]. Available: https://www.lusostone.com/epages/1967-090706.sf/pt_PT/?ObjectPath=/Shops/1967-090706/Products/Sl-Blackrivenslate. [Acedido em Agosto 2020].
- [8] Nobre Construtora, “Nobre Construtora,” [Online]. Available: <https://nobreconstrutora.com.br/cal-hidraulica-voce-sabe-o-que-e/>. [Acedido em 2020 junho 2020].
- [9] Produto.mercado livre, “Kits para plantar,” [Online]. Available: https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-782664302-cal-hidratada-cal-agricola-hidroxido-de-calcio-1-kg-_JM?quantity=1. [Acedido em 2020 Junho 2020].
- [10] “Stone sense,” [Online]. Available: <http://www.stonesense.pt/pt/catalog/finishings>. [Acedido em Agosto 2020].
- [11] “Rochas Ornamentais Portuguesas,” [Online]. Available: <http://rop.Ineg.pt/rop/>. [Acedido em Julho 2020].

-
- [12] “Direção-Geral de Energia e Geologia,” [Online]. Available: <https://www.dgeg.gov.pt>. [Acedido em 19 Maio 2020].
- [13] [Online]. Available: <http://www.lusostone.pt>. [Acedido em Setembro 2020].
- [14] [Online]. Available: <https://www.or-granitos.com/index.php?pid=402&cid=5>. [Acedido em Setembro 2020].
- [15] [Online]. Available: <http://pt.granital.com/products>. [Acedido em Setembro 2020].

(página propositadamente em branco)

Capítulo 9

Anexos (ver CD-ROM)

(página propositadamente em branco)

9. Anexos

Índice de Anexos (ver CD-ROM)

Anexo 1- Relatórios da análise química de FRX

(ver pasta “Anexos” - Pasta “Relatórios da análise química de FRX” - Todos os ficheiros em PDF)