



Instituto Superior de Engenharia do Porto

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOTÉCNICA



Caracterização e aproveitamento das lamas geradas no corte primário de rocha ornamental

João Manuel Castro Dixo Silva



isep Instituto Superior de Engenharia do Porto

P.PORTO

2018

(página propositadamente em branco)



Instituto Superior de Engenharia do Porto

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOTÉCNICA

Caracterização e aproveitamento das lamas geradas no corte primário de rocha ornamental

João Manuel Castro Dixo Silva

1110225

*Dissertação apresentada ao Instituto Superior de Engenharia do Porto para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de **Mestre em Engenharia Geotécnica e Geoambiente**, realizada sob a orientação da Professora Doutora Sílvia Vieira Pinto Alves da Costa Spínola, Professora Adjunta do Departamento de Engenharia Geotécnica do ISEP.*

(página propositadamente em branco)

Júri

Presidente

Doutor Helder Gil Iglésias de Oliveira Chaminé

Professor Coordenador com Agregação, 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

Doutora Lúdia Maria Gil Catarino

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

*A tese de **mestrado em engenharia geotécnica e geoambiente** (MEGG) foi apresentada e defendida em prova pública, pelo Licenciado **João Manuel Castro Dixo Silva**, no Auditório de Geotecnia do Departamento de Engenharia Geotécnica (ISEP) em 5 de Novembro de 2018 mediante o júri nomeado, em que foi atribuída, por unanimidade, a classificação final de **18 (dezoito) valores**, cuja fundamentação se encontra em acta. Todas as correções pontuais determinadas pelo júri, e só essas, foram efectuadas.*

Dedico esta tese ao meu Avô Mário.

(página propositadamente em branco)

Agradecimentos

Serve o presente, para agradecer a todos aqueles que contribuíram para a concretização desta importante etapa da minha vida e que durante a elaboração desta dissertação, deram o seu contributo para a sua conclusão. Assim, gostaria de expressar em particular, o meu agradecimento:

À Professora Doutora Sílvia Spínola (DEG|ISEP), minha orientadora, pela disponibilidade em orientar a minha dissertação, assim como pelo incessante apoio e ajuda prestada durante esta fase da minha vida académica. O meu mais sincero obrigado pela presença em todas as etapas de trabalho, pela sua simpatia, compreensão, motivação e partilha de conhecimento. E ainda pela revisão cuidada das várias versões do manuscrito, partilha de informação bibliográfica, e várias discussões e trocas de ideias.

À empresa Incoveca Granitos S.A, na pessoa do Engenheiro Rodrigo Magueijo e do Engenheiro Vítor Costa, pelo apoio prestado nas minhas idas à empresa e principalmente pelas amostras recolhidas e dados fornecidos, que permitiram a elaboração deste trabalho.

Ao Centro de Formação Profissional da Indústria da Construção Civil e Obras Públicas do Norte (CICCOPN), na pessoa do Professor Doutor Adriano Teixeira (DEG|ISEP e CICCOPN), agradecendo o apoio prestado e ideias para desenvolvimento do trabalho. Ao Engenheiro Jorge Ribeiro (CICCOPN) e ao Técnico Fernando Barbosa (CICCOPN), pela sua ajuda na realização dos ensaios, agradecendo ainda, todas as condições de trabalho proporcionadas e a constante disponibilidade e acolhimento demonstrados.

À Professora Doutora Manuela Carvalho (DEG|ISEP), pelo interesse demonstrado e apoio nas diferentes fases da dissertação. Agradecendo a disponibilidade na realização do ensaio de análise granulométrica por sedimentação e o tempo despendido na análise e reflexão dos dados.

Ao Centro de Investigação Geoambiental e Recursos, da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (CIGAR|FEUP), na pessoa da Doutora Cristina Meira, pela disponibilização do equipamento para o ensaio de análise granulométrica por sedimentação e pela ajuda na realização do mesmo.

Ao Professor Doutor José Augusto Fernandes (DEG|ISEP), por toda a disponibilidade concedida para poder utilizar equipamentos e recursos do Laboratório de Geotecnia e Materiais de Construção (LGMC|ISEP), por ter conseguido a prensa para o ensaio de sinterização e ainda por todo o acompanhamento, esclarecimento de dúvidas e ideias para desenvolver a dissertação.

Ao Laboratório de Tecnologia (LT|ISEP), nomeadamente à sua diretora, Professora Doutora Rosa Pilão, pela disponibilidade para utilização da mufla no ensaio de sinterização e aos Técnicos Magda Marques e José Albergaria, pelo auxílio prestado durante a realização do mesmo.

À Professora Doutora Teresa Teles (GRAQ|ISEP), pela disponibilidade, simpatia e ensinamentos, durante a realização do ensaio de espectrofotometria de absorção atómica. Agradecendo também à Doutora Virgínia Fernandes (GRAQ|ISEP) e à Mestre Diana Rede (GRAQ|ISEP), o auxílio prestado na realização do mesmo.

À Engenheira Isilda Costa (LGMC|ISEP) e ao Senhor Carlos Ferreira (LGMC|ISEP), por toda a ajuda disponibilizada e prestada na realização dos ensaios laboratoriais.

Ao Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP), especialmente ao Departamento de Engenharia Geotécnica (DEG) e a todo o corpo docente que me acompanhou durante todo o meu percurso.

Ao Professor Doutor Helder I. Chaminé (DEG|ISEP), por desde dos meus primeiros tempos no ISEP, me ter incentivado ao estudo e à busca constante pelo conhecimento da área da Geotecnia.

Ao Rui, ao Bruno e ao Pedro, pela ajuda e companhia durante horas de trabalho e por todos os momentos de diversão e amizade, que fizeram com que o tempo passasse melhor e mais rápido.

À Bárbara e ao Filipe, pela amizade e ajuda nos cálculos do ensaio de espectrofotometria.

À Sílvia, à Mariana, ao Barbosa e à Marta, por toda a sua amizade e ânimo para conclusão desta etapa.

Ao Lok e ao Sapo, que há tantos anos me acompanham, por toda a sua amizade e momentos passados.

À Mafalda, por sermos todos os dias “um oposto perfeitamente combinado”, pelo carinho e pela força que sempre me transmitiu, para que pudesse concluir esta etapa tão importante.

Por último, aos meus Pais, à Rita e aos meus Avós Dulce e Mário, pela educação, valores e oportunidades que me proporcionaram e que fazem de mim aquilo sou hoje.

A todos, Muito Obrigado!

(página propositadamente em branco)

Palavras-chave

Lama, corte primário, rocha ornamental, caracterização, aproveitamento.

Resumo

Atualmente, um dos principais desafios do Homem é compatibilizar os benefícios das indústrias mineira, extrativa e transformadora com os impactes ambientais provocados pela sua atividade. A transformação de rochas ornamentais é responsável pela produção de um elevado volume de resíduos, essencialmente poeiras, massa mineral rejeitada e lamas. As lamas resultam dos vários processos de transformação das rochas, como corte, serragem e polimento e são posteriormente enviadas para um decantador onde é realizada a remoção das partículas sólidas por sedimentação com recurso a flocculantes, sendo que a água é reintroduzida no sistema e as lamas formadas são enviadas para um filtro prensa onde são desidratadas e o seu volume é reduzido, de modo a serem enviadas para aterro.

Assim, com este trabalho, pretendeu-se complementar investigações e estudos já existentes, de forma a encontrar soluções economicamente viáveis e ambientalmente sustentáveis para o problema destas lamas. Para tal realizou-se a caracterização física e química de quatro lamas, da empresa Incoveca Granitos S.A, geradas no processo de serragem e corte primário de rocha ornamental, designadas por LCA (Lama Cinza Antas), LARM (Lama Amarelo Rio Mel), FPEM (Filtro Prensa Engenho Multilâminas) e FPMC (Filtro Prensa Mármore e Calcários). Os ensaios de caracterização compreenderam a análise granulométrica por peneiração, a análise granulométrica por sedimentação (método de atenuação de raios x), a determinação da massa volúmica, a determinação da qualidade dos finos (ensaio de azul de metileno) e por fim as análises químicas quantitativas por espectrometria de fluorescência de raios x (equipamento portátil) e por espectrofotometria de absorção atômica do Sódio (Na).

Após esta caracterização realizaram-se dois ensaios para o estudo da viabilidade do aproveitamento das lamas como subproduto. O ensaio de incorporação das lamas em substituição do cimento, para teores de 20% e 40%, no fabrico de argamassas. Com o propósito de averiguar esta possibilidade foram realizados em seguida ensaios de resistência à compressão e flexão nas argamassas no estado endurecido. Para concluir sobre a viabilidade de incorporação das lamas em matrizes cerâmicas foi realizado o ensaio de avaliação da forma e aspeto visual da pastilha no final do processo de sinterização.

Através dos resultados obtidos, cumpriu-se o objetivo de caracterização das lamas provenientes do corte primário de rochas ornamental e concluiu-se que será possível o aproveitamento das mesmas em argamassas e em matrizes cerâmicas.

(página propositadamente em branco)

Keywords

Sludge, primary cut, natural stone, characterization, utilization

Abstract

Nowadays, one of mankind's main challenge is to reconcile the benefits of the mining, extractive and manufacturing industries with the environmental impacts caused by his activity. The sector of natural stones generates high amounts of waste, primarily dust, mineral mass waste and sludge. The sludge results from various cutting and beneficiation processes and are then sent to a decanter where the solid particles are removed by sedimentation with flocculants, with the water being reintroduced into the system and the sludge formed sent to a filter press where they are dehydrated and reduced in volume to be sent to a landfill.

This work was intended to complement existing research and studies, to find economically viable and environmentally sustainable solutions to the problem of these sludges. For that purpose, was made a physical and chemical characterization of four sludges from Incoveca Granitos S.A, generated in the sawing and primary cutting of natural stones, known as LCA, LARM, FPEM and FPMC. The characterization tests included granulometric analysis by sieving, granulometric analysis by sedimentation (x ray attenuation method), determination of density, determination of the quality of fine particles (methylene blue test) and finally quantitative chemical measurements by x ray fluorescence spectrometry (portable equipment) and Sodium (Na) atomic absorption spectrophotometry.

After this characterization two tests were carried out to study the feasibility of using sludge as a by-product. The test of incorporation of the sludge to replace the cement, for contents of 20% and 40%, in the manufacture of mortars. In order to investigate this possibility, tests of resistance to compression and bending were carried out in the mortars in their hardened state. To conclude the feasibility of incorporation of the sludge into ceramic matrices, the evaluation of the shape and visual appearance of the sample was carried out at the end of the sintering process. And to conclude on the feasibility of incorporation of sludge into ceramic matrices, the evaluation of the shape and visual appearance of the sample at the end of the sintering process was carried out.

Based on the results, the objective of characterizing the sludges from the primary cutting of natural stones was fulfilled and it was concluded that it will be possible to incorporate them in mortars and ceramic matrices.

(página propositadamente em branco)

Índice Geral

1. INTRODUÇÃO GERAL.....	1
1.1. Âmbito.....	3
1.2. Enquadramento.....	3
1.3. Objetivos	5
1.4. Estrutura.....	8
2. ESTADO DA ARTE	9
2.1. Introdução	11
2.2. Análise do subsector das rochas ornamentais.....	12
2.2.1. Distribuição geográfica da rocha ornamental em Portugal	13
2.2.2. Análise de Mercado	14
2.2.3. Lamas resultantes da atividade do subsector	18
2.2.4. Enquadramento legislativo	19
2.3. Aproveitamento das lamas como subproduto.....	22
2.3.1. Aplicações das lamas na indústria da construção.....	25
2.3.2. Aplicações de lamas noutras indústrias.....	36
2.4. Estudos de caracterização das lamas de serragem	39
2.4.1. Especificações genéricas para aplicação em materiais industriais	41
3. PROCESSOS GERADORES DAS LAMAS EM ESTUDO	43
3.1. Introdução	45
3.2. Enquadramento geográfico da empresa.....	45
3.3. Pedras naturais que originaram as lamas	46
3.4. O processo de transformação da rocha ornamental	47
3.4.1. Pré corte.....	48
3.4.2. Corte primário.....	49
3.4.2.1. Engenho multilâminas	50
3.4.2.2. Engenho multilâminas de movimento semi-retilíneo	58
3.4.2.3. Engenho multilâminas com segmentos diamantados.....	58
3.4.2.4. Corta blocos e engenho multidisco	60
3.4.2.5. Corte com fio diamantado	62
3.4.3. Acondicionamento das Lamas	63
4. METODOLOGIAS APLICADAS PARA A CARACTERIZAÇÃO DAS LAMAS.....	67
4.1. Introdução	69
4.2. Recolha das amostras.....	70

4.3.	Preparação das amostras	73
4.4.	Análise Granulométrica.....	76
4.4.1.	Método por peneiração	76
4.4.2.	Método por sedimentação – atenuação de raios x	78
4.5.	Determinação da massa volúmica	81
4.6.	Determinação da qualidade dos finos – Ensaio de Azul de metileno	84
4.7.	Análise Química.....	87
4.7.1.	Análise química quantitativa por espectrometria de fluorescência de raios x (equipamento portátil).....	87
4.7.2.	Análise química quantitativa do Sódio por espectrofotometria de absorção atômica .	91
5.	METODOLOGIAS APLICADAS PARA O APROVEITAMENTO DAS LAMAS.....	95
5.1.	Introdução.....	97
5.2.	Aproveitamento das lamas em argamassas.....	97
5.2.1.	Materiais constituintes das argamassas	98
5.2.2.	Composição das argamassas e preparação dos respectivos provetes.....	100
5.2.3.	Caracterização das argamassas no estado endurecido	105
5.3.	Aproveitamento das lamas numa matriz cerâmica.....	111
5.3.1.	Estudo da viabilidade de incorporação - ensaio de sinterização	111
6.	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS.....	115
6.1.	Introdução.....	117
6.1.1.	Análise granulométrica	117
6.1.1.1.	Método de peneiração	117
6.1.1.2.	Método de sedimentação por atenuação de raios x.....	119
6.1.2.	Determinação da massa volúmica	121
6.1.3.	Determinação da qualidade dos finos - Ensaio de Azul de metileno.....	122
6.1.4.	Análise Química.....	123
6.1.4.1.	Análise química quantitativa por espectrometria de fluorescência de raios x – Equipamento portátil.....	123
6.1.4.2.	Análise química quantitativa do Sódio por espectrofotometria de absorção atômica.....	126
6.1.5.	Estudo da viabilidade do aproveitamento das lamas em argamassas	128
6.1.5.1.	Resistência à Flexão	128
6.1.5.2.	Resistência à Compressão.....	131
6.1.5.3.	Absorção de água.....	133
6.1.6.	Estudo da viabilidade do aproveitamento das lamas em matrizes cerâmicas	135

7. CONCLUSÕES.....	138
7.1. Considerações finais.....	140
7.2. Perspetivas futuras.....	143
8. BIBLIOGRAFIA	145
8.1. Referências Bibliográficas	147
8.2. Decretos de Lei.....	154
8.3. Sítios Consultados	154
8.4. Normas e Especificações	154
9. ANEXOS (VER CD-ROM).....	155

(página propositadamente em branco)

Índice de Figuras

Figura 1 - Trabalho prático realizado.	7
Figura 2 - Centros produtores de rocha ornamental.	13
Figura 3 - Exportações para Portugal de substâncias minerais em 2016.	16
Figura 4 - Importações para Portugal de substâncias minerais em 2016.	16
Figura 5 - Valor total das exportações e importações em Portugal referente ao subsector das rochas ornamentais (adaptado a partir de www.dgeg.pt , 2018)	17
Figura 6 - Princípio da hierarquia dos resíduos.	20
Figura 7 - Fluxograma representativo do processo produtivo e da origem do subproduto	23
Figura 8 - Possíveis aplicações para lamas provenientes do corte de Mármore.	24
Figura 9 - Pressão máxima para a argamassa Italiana com incorporação de lama.	27
Figura 10 - Resistência à compressão da mistura com variação de tempos de hidratação, para diferentes percentagens de incorporação de lama.	28
Figura 11 - Utilização de aglomerado de mármore.	36
Figura 12 - Unidade industrial “Caparrosa-Tondela” da empresa Incoveca Granitos S.A.	45
Figura 13 - Localização Geográfica da empresa Incoveca Granitos S.A.	46
Figura 14 - Diagrama de processo do subsector das rochas ornamentais (adaptado de INETI, 2001).	47
Figura 15 - Máquina Monolâmina.	49
Figura 16 - Engenho multilâminas Gaspari Menotti JM 6000.	51
Figura 17 - Vista lateral do engenho (pormenor do volante e biela).	51
Figura 18 - Sistema de chuveiros do engenho multilâminas.	52
Figura 19 - Sistema de controlo do engenho (à esquerda) e poço principal de mistura (à direita).	54
Figura 20 - Fluxograma representativo do sistema de mistura e bombeamento da calda abrasiva.	54
Figura 21 - Abrasão a três corpos.	56
Figura 22 - Granalha de aço angular.	56
Figura 23 - Cal hidratada utilizada na calda abrasiva. (www.materiaisalmeida.com.br .jpg)	58
Figura 24 - Engenho de lâminas diamantadas - modelo SFERA 80/800.	59
Figura 25 - Vista lateral do Engenho - modelo SFERA 80/800.	59
Figura 26 - Pormenor do segmento diamantado (x) incrustado na lâmina. (www.diamant-boart.com).	60
Figura 27 - Corta blocos	61
Figura 28 - Engenho multidisco.	62

Figura 29 - Máquina de Fio diamantado Micheletti.	62
Figura 30 - Máquina Multifios Pedrini.	63
Figura 31 - Estação de tratamento de lamas na empresa Incoveca Granitos, S.A.	63
Figura 32 - Lamas prensadas (bolos).....	64
Figura 33 - Sistema de desidratação filtro-prensa. (adaptado de Fraccaroli & Balzan (s.d)).....	64
Figura 34 - Metodologia utilizada no estudo de caracterização e aproveitamento das lamas.	69
Figura 35 - Frasco de recolha de amostra.	70
Figura 36 - Local de recolha de amostras 1 – Grelha de escoamento que recebe o expurgo das lamas.	71
Figura 37 - Local de recolha de amostras 2 – poço de expurgo da calda abrasiva.....	71
Figura 38 - Local de amostragem 3 – Filtro Prensa com lamas da serragem de granitos.	72
Figura 39 - Local de amostragem 4 – Filtro prensa com lamas do corte de mármore e calcários.	72
Figura 40 – Preparação da amostra proveniente dos engenhos multilâminas.	73
Figura 41 – Material para secagem na estufa.....	73
Figura 42 – Material seco na estufa.....	73
Figura 43 - Pilão e almofariz para desagregação das amostras.	74
Figura 44 - Aspeto das lamas, antes e após a desagregação.	74
Figura 45 - Repartidor.	75
Figura 46 - Esquartelamento da amostra.	75
Figura 47 - Equipamento de peneiração mecânica.....	76
Figura 48 - Gráfico de análise granulométrica. (adaptado de apontamentos de GENGE, 2017)	77
Figura 49 - Análise granulométrica pelo processo de sedimentação por raios x.	78
Figura 50 - Aquecimento e agitação da amostra com hexametáfosfato de sódio.	79
Figura 51 - Granulómetro laser - Malvern Hydro 2000G.	80
Figura 52 - Painel do software do Granulómetro laser.....	80
Figura 53 - Densímetro de Le Châtelier.	81
Figura 54 - Pesagem do provete de ensaio.....	82
Figura 55 - Introdução da amostra no voluminímetro.....	82
Figura 56 - Voluminímetro no tanque de água.....	83
Figura 57 - Voluminímetro com as quatro amostras de lama.	83
Figura 58 – Ensaio de macha sem adição de caulinite.....	85
Figura 59 – Ensaio de mancha com adição de caulinite	85
Figura 60 - Pesagem da caulinite.	85
Figura 61 – Agitador de ventoinha.....	86
Figura 62 - Testes de mancha de azul de metileno para as amostras de lama.	86

Figura 63 - Analisador de fluorescência de raios x (FRX-P).....	87
Figura 64 - Analisador de fluorescência de raios x (FRX-P).....	88
Figura 65 – Peneiros de ensaio FRX-P.....	89
Figura 66 - Amostras identificadas para análise FRX-P.....	89
Figura 67 - Camara suporte.....	90
Figura 68 - Painel do software Analisador de fluorescência de raios x (FRX-P).....	90
Figura 69 – Esquema do HR-CS AAS. (Pinto, 2010).....	91
Figura 70 - Espectrofotômetro de absorção atômica ContraAA700 da Analytik Jena.	92
Figura 71 – Digestão das amostras.	93
Figura 72 - Resistência mecânica à compressão do Cimento Portland CEM I 52,5R. (adaptado de ficha técnica Cimpor)	99
Figura 73 – Folhas de registo de temperaturas do banho e da sala de ensaio.....	100
Figura 74 – Molde utilizado nas amassaduras.....	100
Figura 75 – Materiais utilizados na amassadura.....	102
Figura 76 – Introdução da areia na misturadora.	102
Figura 77 – Colocação da argamassa no molde.....	103
Figura 78 – Realização do movimento de serra.....	103
Figura 79 – Caixa húmida.....	104
Figura 80 – Desmoldagem e identificação dos provetes.....	105
Figura 81 – Provetes em hidratação no tanque com água.....	105
Figura 82 – Prensa de flexão e compressão.....	106
Figura 83 - Painel eletrónico do equipamento de flexão.....	106
Figura 84 – Distâncias corretas entre apoios discriminadas na norma.....	107
Figura 85 - Vista frontal do provete.....	107
Figura 86 - Vista lateral do provete.....	107
Figura 87 – Rotura do provete no ensaio de resistência à flexão.....	107
Figura 88 - Painel eletrónico do equipamento de compressão.....	108
Figura 89 - Colocação do provete na prensa para ensaio à compressão.....	109
Figura 90 - Rotura do provete no ensaio à compressão.....	109
Figura 91 - Ascensão da prensa no ensaio à compressão.....	109
Figura 92 - Pesagem do provete.....	110
Figura 93 - Limpeza superficial do provete.....	110
Figura 94 – Molde/Prensa Metálica.....	112
Figura 95 – Preparação da pastilha: 1º) Molde/Prensa Metálica; 2º e 3º) Execução da pastilha; 4º) Patilha para ensaio.....	112

Figura 96 – Análise química das pastilhas antes do processo de sinterização.	113
Figura 97 – Mufla utilizada no ensaio.	113
Figura 98 – Pastilhas na mufla após o ensaio de sinterização.	113
Figura 99 - Análise química das pastilhas após o processo de sinterização.	114
Figura 100 – Análise Granulométrica por peneiração das amostras de Lama.	118
Figura 101 - Análise Granulométrica pelo método de sedimentação por atenuação de raios x. .	120
Figura 102 – Gráfico dos resultados da massa volúmica das lamas.	121
Figura 103 – Curva de calibração (Na).	126
Figura 104 – Resultados obtidos no ensaio de análise química quantitativa do Sódio (Na).	127
Figura 105 - Resultados obtidos da resistência à flexão (20% de incorporação de lama).	129
Figura 106 – Resultados obtidos da resistência à flexão (40% de incorporação de lama).	129
Figura 107 - Resultados obtidos da resistência à compressão (40 % de incorporação de lama). .	131
Figura 108 - Resultados obtidos da resistência à compressão (40 % de incorporação de lama). .	132
Figura 109 - Resultados obtidos da absorção de água (20% de incorporação de lama).	134
Figura 110 - Resultados obtidos da absorção de água (40% de incorporação de lama).	134

Índice de Quadros

Quadro 1 - Tipos de Rochas Ornamentais.	12
Quadro 2 - Evolução do número de pedreiras de rocha ornamental.....	14
Quadro 3 - Produção de rochas ornamentais por substância de 2007 a 2016.	15
Quadro 4 - Resíduos sólidos e pastosos gerados no subsetor das rochas ornamentais (ano 1998).	18
Quadro 5 - Estimativa da produção de resíduos durante o processo de serragem de rochas.....	19
Quadro 6 - Códigos “LER” para resíduos provenientes da exploração de minas e pedreiras.	21
Quadro 7 - Diversas áreas de aplicação das lamas.	24
Quadro 8 - Composição química obtida por fluorescência de raios x da massa expansiva comercial.	26
Quadro 9 – Resultados obtidos para os tijolos de solo-cimento no ensaio de resistência à compressão.	30
Quadro 10 – Parâmetros obtidos em diversos ensaios de solo com e sem adição de cimento e resíduo.....	35
Quadro 11 - Caracterização química do resíduo.....	40
Quadro 12 - Composição química da lâ de rocha e de vidro.	41
Quadro 13 - Intervalos de composição recomendados para diferentes tipos de porcelana.	41
Quadro 14 - Composições químicas típicas de diferentes tipos de vidro.....	42
Quadro 15 - Intervalos de composição recomendados para cimento portland e composição de cimentos portugueses.	42
Quadro 16 – Composição química das lâminas de aço.....	52
Quadro 17 - Composições e características típicas da calda abrasiva.....	55
Quadro 18 - Composição química da granalha.....	57
Quadro 19 - Referenciação da granalha em função da dureza.	57
Quadro 20 - Distribuição dimensional da granalha – calibre.....	57
Quadro 21 - Ensaio de caracterização das lamas.	69
Quadro 22 – Percentagem das frações em estudo.....	75
Quadro 23 – Ensaio realizados para aproveitamento das lamas.	97
Quadro 24 - Características da areia fluvial.	98
Quadro 25 – Constituição das amassaduras e respetivas quantidades de materiais utilizados. ...	101
Quadro 26 – Designações atribuídas a cada provete por amassadura e tempo de hidratação....	104
Quadro 27 – Dimensões das amostras (> 0,075 mm).....	118
Quadro 28 – Dimensões das partículas por amostras (< 0,075 mm).....	120

Quadro 29 – Resultados obtidos de massa volúmica.	121
Quadro 30 - Resultados obtidos Azul de metileno.	122
Quadro 31 - Categorias para os valores máximos de azul de metileno (adaptado de NP EN 13043:2004)	123
Quadro 32 - Resultados obtidos da análise química da fração > 0,075 mm.	124
Quadro 33 - Resultados obtidos da análise química da fração < 0,075 mm.	124
Quadro 34 – Resultados obtidos no ensaio de análise química quantitativa do Sódio (Na).	127
Quadro 35 - Resultados obtidos no ensaio de resistência à flexão.	128
Quadro 36 - Resultados obtidos no ensaio de resistência à compressão.	131
Quadro 37 – Resultados obtidos no ensaio de absorção de água.	133
Quadro 38 - Resultados obtidos no ensaio de FRX-P antes e após o processo de sinterização.	136

Índice de Equações

Equação 1 - Percentagem de material retido em cada peneiro. (LNEC E239 - 1970)	77
Equação 2 - Percentagem acumulada do material que passa em cada peneiro. (LNEC E239 - 1970)	77
Equação 3 – Massa Volúmica. (LNEC E64-1979).....	83
Equação 4 – Azul de metileno. (NP EN 933-9: 2011)	86
Equação 5 – Concentração do Sódio (Na).....	93
Equação 6 - Resistência à Flexão. (NP EN 196-1: 2017).....	108
Equação 7 – Resistência à Compressão. (NP EN 196-1: 2017).....	109
Equação 8 – Absorção de água.	110

(página propositadamente em branco)

Simbologia e Abreviaturas

% - percentagem

[Na] – concentração do sódio na amostra [mg/g]

€ - Euro

°C - grau celsius

μm – micrómetro

a.C. – Antes de Cristo

a/c – água e cimento

A_b - absorção de água [%]

Ag – prata

Al – alumínio

Al₂O₃ – óxido de alumínio

As – arsénio

Au – ouro

Ba – bário

CaO – óxido de cálcio

Cd – cádmio

Cr – cromo

Cu – cobre

Fe₂O₃ – óxido de ferro

Ge – germânio

Hg – mercúrio

K₂O – óxido de Potássio

MgO – óxido de magnésio

ASTM – American Society for Testing and Materials

mm – milímetro

b³ – lado da secção quadrada do prisma [mm]

Ca (OH)² – Cal hidratada

CCD – dispositivo de carga acoplada (*charge-coupled device*)

CE – Comunidade Europeia

CEM - designação para o cimento portland segundo os padrões europeus

CEN – Comissão Europeia de Normalização

CEVALOR – Centro Tecnológico da Pedra Natural de Portugal

ISO – International Standard Organisation

CICOOPN – Centro de Formação Profissional da Indústria da Construção Civil e Obras Públicas do Norte.

CIGAR- Centro de Investigação em Geoambiente e Recursos

cm/h – centímetro por hora

g/L – grama por litro

cm³ – centímetro cúbico

CoAsS - Cobalite

D₁₀ – diâmetro efetivo das partículas correspondente a 10% de material passado

D₅₀ – diâmetro efetivo das partículas correspondente a 50% de material passado

D₉₀ – diâmetro efetivo das partículas correspondente a 90% de material passado

DEG – Departamento Engenharia Geotécnica

DEMON – monocromador duplo de alta resolução (*Double-Echelle Monochromator*)

DEQ – Departamento de Engenharia Química

DGEG – Direção Geral de Geologia e Energia

DRX – difração de raios x

EN – Norma Europeia

PNGR – Plano Nacional de Gestão de resíduos

NDT – Transferência de dados *NITON*

f.d. – fator de diluição.

F_c - carga máxima na rotura [N]

FEUP- Faculdade Engenharia da Universidade do Porto

F_f - carga aplicada ao centro do prisma na rotura [N]

FPEM – Filtro Prensa Engenho Multilâminas

FPMC – Filtro Prensa Mármore e Calcários

FRX – Fluorescência de Raios X

FRX-P – Fluorescência de Raios X – ensaio portátil

g – grama

g/cm³ – grama por centímetro cúbico

GPa – gigapascal

h – hora

HR-CS-ASS –Espectrofotómetro de absorção atómica de alta resolução com fonte continua (*High Resolution Continuous Source Atomic Absorption Spectrophotometry*)

l – distância entre os apoios [mm]

INETI – Instituto Nacional de Engenharia e Tecnologia Industrial

ISEP – Instituto Superior de Engenharia do Porto

Kgf/cm² – quilograma força por centímetro quadrado

KN/s – quilonewton por segundo

KPa – quilopascal

LARM – Lama Amarelo Rio Mel

LCA – Lama Cinza Antas

LER – Lista Europeia de Resíduos

LGMC – Laboratório de Geotecnia e Materiais de Construção

LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil

LT – Laboratório de Tecnologia

m – Massa do provete seco [g]

m/s – metro por segundo

M₁ – massa do provete de ensaio [g]

m₁ - massa do provete saturado [g]

m₂ - massa do provete seco [g]

m_a – massa total da amostra [g]

MB_F – valor de azul de metileno [g/Kg]

mg/L miligrama por litro

min - minuto

ml – mililitro

mm² – milímetro quadrado

MnO – óxido de manganésio

MPa - megapascal

MSME - *Micro Small and Medium Enterprises Development Institute, Government of India*

mv – valor de massa volúmica [g/cm³]

m_x – massa retida em cada peneiro [g]

N – newton

N''_x - Percentagem acumulada do material que passa em cada peneiro [%]

N'_x - Percentagem retida acumulada obtida no peneiro anterior [%]

Na - sódio

Na₂O – óxido de sódio

P₂O₅ – óxido de fósforo

Si – silício

SiO₂ – óxido de silício

TiO₂ – óxido de titânio

Pb - chumbo

nm – nanómetro

Nº - número

NP EN – Norma Europeia em Português

N_x – Percentagem material retido em cada peneiro [%]

PESGRI – Plano Estratégico dos Resíduos Industriais

pH – potencial de hidrogénio

pm – picómetro

PNPRI – Plano Nacional de Prevenção de Resíduos Industriais

R_c - resistência à compressão [MPa]

rpm – rotações por minuto

R_r - resistência à flexão [MPa]

s – segundo

Se - Selénio

t- tonelada

RGGR – Regime Geral de Gestão de Resíduos

V₁ – valor lido no voluminómetro contendo somente o líquido auxiliar [cm³];

V₁ – volume total de solução de corante adicionada [mm].

V₂ – valor lido no voluminómetro contendo o líquido auxiliar e o provete [cm³].

W – watt

CAPÍTULO 1

Introdução Geral

(página propositadamente em branco)

1.1. Âmbito

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 (IPP). A elaboração e defesa pública deste documento são imperativos para a conclusão do 2º ciclo de estudos e consequente obtenção do grau de mestre em Engenharia Geotécnica e Geoambiente.

O formato desta tese de mestrado é do tipo “dissertação” e resulta de uma parceria técnico-científica entre o DEG/ISEP e a empresa Incoveca Granitos S.A, numa das suas unidades industriais, a de Caparrosa-Tondela, localizada em Caparrosa, 3465-101, Campo de Besteiros. Esta empresa iniciou a sua atividade em 1979 no setor de extração, transformação e comercialização de rochas ornamentais, representando o que de melhor tem sido feito em termos de desenvolvimento tecnológico e implementação de novas metodologias organizativas e produtivas, razão pela qual apresenta excelentes condições para o desenvolvimento de um estudo deste tipo.

1.2. Enquadramento

As pedras naturais sempre estiveram presentes, ao longo dos tempos, na história da humanidade. No período Neolítico o uso de pedras naturais já era bastante recorrente para conceção de utensílios de corte e já no final do Paleolítico o seu uso progrediu, sendo a caça o foco principal, passando também para a elaboração de utensílios domésticos, pequenas estruturas e esculturas.

A exploração de rochas ornamentais foi iniciada no Egipto, onde existem registos da utilização do mármore e granito, a partir do ano de 2.560 a.C., nas construções de monumentos e túmulos faraônicos (Revista Rochas de Qualidade, 2013). Mais tarde, foi na Grécia que se realizaram obras de grande magnitude com a utilização de rochas ornamentais, principalmente em mármore. Já os Romanos trouxeram a exploração deste tipo de rochas para a Península Ibérica, tendo sido depois da I Guerra Mundial e até aos dias de hoje, o sector da construção, o principal consumidor e impulsionador da sua exploração a nível mundial. Atualmente a transformação de rocha ornamental é uma atividade que está presente em variadas partes do mundo, acabando por influenciar economicamente e ambientalmente o planeta, principalmente com impactes sociais bastante positivos e importantes sobre as populações e atividades económicas nacionais e locais.

Portugal é um dos principais produtores de rochas ornamentais, pois apresenta uma extensa variedade de pedra natural, o que oferece uma posição de destaque no cenário mundial e um forte contributo para a criação de riqueza e sustentabilidade do setor, principalmente devido à sua componente exportadora, dando as empresas particular atenção à componente estética e características técnicas dos materiais de acordo com o que o consumidor final pretende.

No entanto, assim como em Portugal, em todo o mundo existe o problema decorrente dos diversos processos da extração e transformação de rochas ornamentais, nomeadamente a produção de elevadas quantidades de resíduos, principalmente lamas, que promovem a ocorrência de impactes ambientais negativos bem como o facto de constituírem um grande constrangimento com elevados custos para as empresas.

Foi com base neste problema que surgiu o tema de estudo desta dissertação. Para tal abordou-se o assunto num debate de ideias sobre a indústria extrativa e transformadora de rocha ornamental e posteriormente analisou-se a tese de mestrado realizada por Costa (2011), intitulada “*Fatores de rentabilização do processo de serragem de granitos com engenhos multilâminas*”, que se baseou na análise estatística dos custos de produção e na definição de fórmulas de cálculo, de forma a permitir uma previsão do custo médio de serragem.

Costa (2011), aborda ainda no seu estudo, de forma “leve”, soluções para o problema das lamas. Refere ainda que, tendo em conta os elevados volumes de lamas produzidas anualmente por um engenho de serragem em funcionamento contínuo, esse é um problema sério ao qual não tem sido dada a devida atenção. O autor menciona, que se nada for feito, a grande maioria das empresas, que possui este tipo de equipamentos continuará a armazenar de forma inadequada estas lamas ou a depositá-las em aterros ilegais, pela impossibilidade económica de as entregar a empresas licenciadas para a gestão e valorização das mesmas.

A elevada produção de lamas associada ao crescimento do subsector das rochas ornamentais, devem assim conduzir à crescente sensibilização das empresas, das entidades setoriais, municipais, regionais e do governo, para que, numa perspetiva de desenvolvimento sustentável e de uma economia circular, possam ser encontradas estratégias para o aproveitamento das mesmas, estratégias essas que possam ser assumidas por parte de todos, adequando-as às realidades individuais de cada empresa.

Sendo o setor dos resíduos estratégico para o denominado crescimento verde, deve ter-se sempre presente o seu elevado potencial para atingir o objetivo global de estabelecimento de uma economia circular, com os seguintes objetivos:

- minimização da utilização de matérias-primas virgens;
- redução da produção de resíduos;
- reprocessamento, no mesmo ou noutra processo produtivo, para minimizar os desperdícios;
- valorização de qualquer resíduo cuja produção não seja evitável, promovendo-se desta forma o fecho do ciclo de vida dos materiais e o aumento da produtividade dos recursos.

Assim é necessário estudar e complementar investigações e estudos já existentes, de forma a encontrar soluções economicamente viáveis e ambientalmente sustentáveis para o problema das lamas provenientes da indústria transformadora de rocha ornamental, tendo como base a caracterização do material e o seu eventual aproveitamento.

Estas lamas são geradas durante o processo de transformação de rocha ornamental, maioritariamente provenientes da serragem e corte primário de rochas, recorrendo quer a engenhos multilâminas, quer a ferramentas de corte diamantado. Após o expurgo desses equipamentos, as lamas são enviadas para um decantador onde é realizada a remoção das partículas sólidas por sedimentação com recurso a floculantes, sendo que a água é reintroduzida no sistema e as lamas formadas são enviadas para um filtro prensa onde são desidratadas (diminuindo o teor em água), sendo o seu volume é reduzido, de modo a serem enviadas para aterro onde são depositadas, ocupando grandes áreas. Apesar de não serem classificadas como resíduos perigosos, não deixam de ter impactes ambientais, tais como a poluição atmosférica, a contaminação dos solos e de níveis freáticos, não sendo de esquecer também o impacte paisagístico que provocam.

Desta forma, o aproveitamento das lamas surge como resposta à necessidade de redução deste resíduo, sendo possível a sua reutilização como subproduto para substituição de matérias-primas, existindo um variado leque de soluções técnicas para tal, desde a área da construção civil até outras áreas que permitem aplicações numa ampla gama de atividades e indústrias.

1.3. Objetivos

Os objetivos práticos desta dissertação foram definidos de modo a enquadrar e utilizar o conhecimento obtido no estudo e análise do estado da arte sobre o tema, adicionando os conhecimentos científicos adquiridos durante o curso, acrescentando novos dados que possam vir a ser úteis ao sector da indústria extrativa e transformadora.

Neste sentido, no âmbito do presente trabalho, os principais objetivos são a caracterização das lamas geradas no processo de serragem e corte primário de rocha ornamental e averiguação da

possível viabilidade de aproveitamento das mesmas numa amassadura de argamassa e/ou numa matriz cerâmica, permitindo o escoamento e reutilização destas, de modo a beneficiar a empresa Incoveca Granitos S.A ou outras, quer do ponto de vista ambiental, quer do ponto de vista dos custos económicos acrescidos, associados à sua gestão e deposição em aterro.

As lamas recolhidas são provenientes da serragem de dois tipos de granitos, em engenhos multilâminas: Granito Cinza Antas (LCA) e Amarelo Rio Mel (LARM). Para além destas, foram também recolhidas amostras do material resultante do filtro prensa proveniente do expurgo dos engenhos multimâmias responsáveis pela serragem de granitos variados (FPFM) e por último foi recolhida uma amostra no filtro prensa de lamas provenientes do expurgo do corte primário de mármore e calcários variados (FPMC).

Assim, numa primeira fase do trabalho após recolha das amostras, realizou-se em laboratório a pesagem do material e uma desagregação do mesmo através do peneiro ASTM com malha quadrada, nº 200, de abertura 0,075 mm, tendo sido obtida uma fração acima (material retido) dos 0,075 mm e uma fração abaixo dos 0,075 mm (material passado). Em seguida, as duas frações de lama foram colocadas em estufas à temperatura de $100 \pm 5^\circ\text{C}$, de modo a secarem.

No desenvolvimento do trabalho laboratorial, a divisão em duas frações ($<0,075$ mm e $>0,075$ mm) foi mantida para as metodologias de caracterização e aproveitamento das lamas. Esta opção foi validada por ser aconselhável utilizar material com características aproximadas ou iguais a um material filler (granulometria inferior a 0,063 mm) durante os ensaios de aproveitamento e também por maior parte do material recolhido apresentar dimensão inferior a 0,075 mm. Assim na caracterização das lamas, através de ensaios físicos e químicos, na fração acima dos 0,075 mm foram realizados dois ensaios, enquanto que para a fração maioritária de dimensão abaixo dos 0,075 mm que foi aplicada nos ensaios de aproveitamento, foram realizados cinco ensaios (**Figura 1**). Deste modo foi possível perceber em que medida os parâmetros analisados influenciam o tipo de aproveitamento estudado. No estudo efetuado foram realizadas argamassas com incorporação de 20% e 40% de lama, em substituição do cimento com posterior caracterização mecânica no seu estado endurecido, segundo a norma NP EN 196-1:2017, referindo os procedimentos utilizados no ensaio de determinação da resistência à flexão e resistência à compressão, fazendo-se ainda uma análise da absorção de água em cada amassadura obtida. Por último realizou-se o ensaio de sinterização, de modo a estudar a viabilidade da incorporação das lamas numa matriz cerâmica, tendo sido efetuada uma análise química quantitativa (FRX-P) antes e após o ensaio, para complementar a análise do estudo (**Figura 1**).

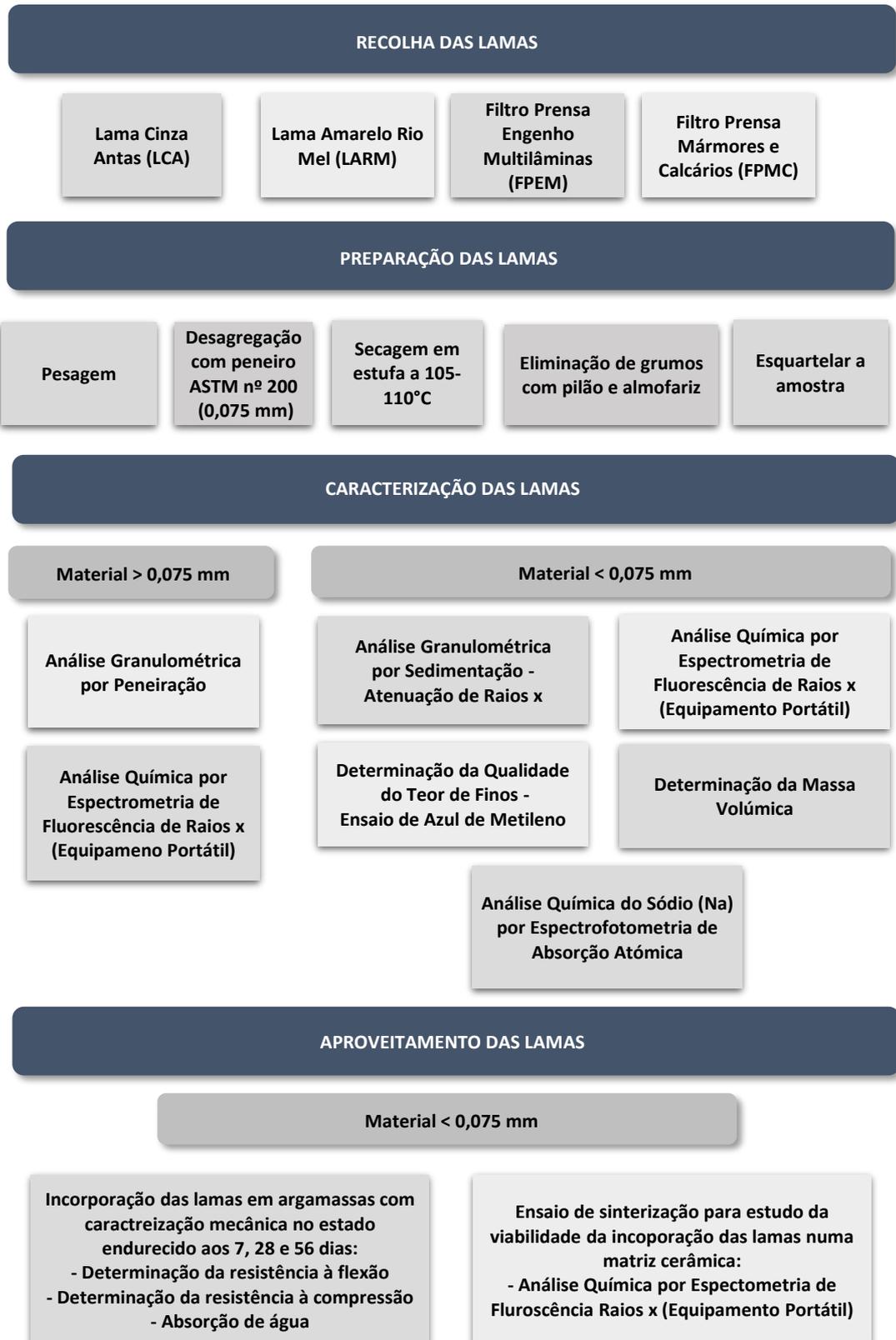


Figura 1 - Trabalho prático realizado.

1.4. Estrutura

Em termos de estrutura, a dissertação está organizada em três fases de trabalho. A primeira fase (capítulos 1 ao 3), de contextualização teórica onde são introduzidos e apresentados os conceitos e assuntos abordados ao longo da tese. A segunda etapa (capítulos 4 e 6) é composta pelas metodologias utilizadas nos trabalhos práticos realizados, a qual finaliza com apresentação e análise dos resultados obtidos. A última etapa (capítulo 7) é composta pelas conclusões obtidas através de todo o estudo realizado. A síntese dos capítulos é a seguinte:

- **Capítulo 1 – Introdução Geral:** caracteriza-se por ser o capítulo introdutório da dissertação, onde é exposto o tema central, o enquadramento do estudo e os principais objetivos a alcançar.
- **Capítulo 2 – Estado da arte:** é apresentada toda a pesquisa bibliográfica sobre o tema da dissertação, sendo que primeiramente é realizada uma análise do subsetor das rochas ornamentais, abordando as suas especificidades e componente económica em Portugal e faz-se o enquadramento ao tema das lamas na atividade do subsetor, referindo a legislação a que estas se encontram sujeitas. Por fim referem-se trabalhos e investigações de diversos autores realizadas para a caracterização e aproveitamento das lamas.
- **Capítulo 3 – Processos geradores das lamas em estudo:** são abordados os processos geradores das lamas provenientes da serragem e corte de rocha ornamental, especificando os métodos e equipamentos utilizados na empresa onde foi realizado o estudo, sendo que também se abordam outras técnicas normalmente utilizadas no subsetor das rochas ornamentais.
- **Capítulo 4 – Metodologias aplicadas para a caracterização das lamas:** são apresentados os ensaios laboratoriais executados para a caracterização das amostras em estudo.
- **Capítulo 5 – Metodologias aplicadas para o aproveitamento das lamas:** são apresentados os ensaios laboratoriais executados para o aproveitamento das amostras em estudo.
- **Capítulo 5 – Apresentação e análise dos resultados obtidos:** este capítulo é composto pelos resultados dos ensaios laboratoriais de caracterização e aproveitamento das lamas e análise dos resultados obtidos.
- **Capítulo 7 – Conclusões:** são apresentadas as conclusões retiradas no desenvolvimento do trabalho prático e referidas as “Perspetivas Futuras”, onde são expostas as sugestões a serem adotadas em futuros trabalhos com tema idêntico ao da dissertação.
- **Capítulo 8 – Referências bibliográficas:** é apresentada a bibliografia consultada na elaboração da dissertação.
- **Capítulo 9 – Anexos:** são apresentados os anexos utilizados no decorrer da dissertação.

CAPÍTULO 2

Estado da Arte

(página propositadamente em branco)

2.1. Introdução

O Estado da Arte tem como objetivo compreender o enquadramento das lamas no subsetor das rochas ornamentais, as suas diversas e possíveis reutilizações na indústria como subproduto, bem como a legislação a que estão sujeitas enquanto resíduo, tendo sido pesquisados estudos sobre a sua composição e características físicas e químicas típicas. A análise foi desenvolvida tendo como fonte bibliográfica outros trabalhos, estudos académicos e científicos para predefinir a metodologia a seguir no desenvolvimento prático desta dissertação.

O estudo e aproveitamento das habitualmente designadas lamas, na indústria de transformação de rocha ornamental, insere-se nas áreas da geotecnia, geoambiente e geomateriais e é de extrema importância, pois desde o início da história do Homem que a sua atividade tem vindo a modificar as paisagens naturais, com o propósito indispensável de produção de matérias primas necessárias para a sua sobrevivência, encontrando-se sempre aliada a esta modificação a produção de resíduos.

O aproveitamento das lamas como subproduto é maioritariamente aplicado na indústria da construção, sendo possível aplicar o material em produtos como argamassas, cimento, pastas cerâmicas, misturas betuminosas, em terraplanagens, na contenção de taludes, em aterros e selagem de lixeiras e como aglomerado de mármore. Além disso, a natureza deste material (dependendo principalmente da sua constituição química e mineralógica) permite outras aplicações em diferentes áreas e indústrias, tais como tratamento de solos agrícolas (corretivos agrícolas), indústria do papel, na cerâmica (faiança), indústria do vidro, indústria das colas e tintas, tratamento de água, cosmética, entre outras.

Assim sendo, através destas indústrias é garantida a perspetiva de reutilização do material com o objetivo de mitigar os impactes ambientais provocados pela sua deposição em aterro, surgindo assim uma oportunidade indispensável de redução de custos ou fonte de proveito financeiro. Associado ao aproveitamento deste resíduo surgem também novas oportunidades de negócio, além de existir uma redução do volume de extração de matérias-primas, preservando os recursos naturais limitados.

No entanto, em Portugal, os estudos realizados para o aproveitamento destes resíduos não têm tido grande aplicação prática, principalmente devido à dificuldade das empresas em investir em tecnologias que tornem economicamente viável a sua aplicação. Assim sendo este é um tema a desenvolver de modo sistemático pelas empresas do subsetor das rochas ornamentais.

2.2. Análise do subsector das rochas ornamentais

A designação de rocha ornamental foi adotada em Portugal a partir de meados da década de 70, do século passado, englobando o que na linguagem tradicional e comercial se designa, unicamente por mármore (todas as rochas calcárias, metamórficas e sedimentares) e por granitos (todas as rochas ígneas cristalinas, bem como as rochas básicas e ultrabásicas), ficando as ardósias (rochas xistosas) colocadas à parte, uma vez que não se reconhecia a sua nobreza decorativa. Esta visão viria a ser alterada profundamente. Ao nível dos organismos de normalização europeus e internacionais (CEN - Comissão Europeia de Normalização e ISO – *International Standard Organisation*) adotou-se o termo Pedras Naturais para os mármore, granitos e ardósias (Spínola, 1998, 2015).

Define-se rocha ornamental, enquanto produto industrial, como sendo o material rochoso que, após um processo de transformação, mais ou menos extenso, se encontra apto a ser utilizado para fins de construção, elemento de decoração, arte funerária, escultura ou outros, conservando integralmente a sua composição. A sua transformação permite a respetiva valorização em termos de textura e durabilidade. O seu maior interesse comercial encontra-se normalmente associado ao valor estético, facto pelo qual se denominam de rochas ornamentais (Spínola, 1998, 2015).

O sector da Pedra Natural compreende a extração e transformação da pedra para fins ornamentais ou industriais, dividindo-se por dois subsectores, o subsector das rochas ornamentais e o subsector das rochas industriais. O subsector das rochas ornamentais inclui empresas que se dedicam à extração e/ou transformação dos três grandes grupos de pedra natural, os mármore e rochas afins, os granitos e rochas afins e as ardósias, para fins de aplicação em obra e com intuito ornamental (**Quadro 1**).

Quadro 1 - Tipos de Rochas Ornamentais.
(adaptado de INETI, 2001)

Mármore e Rochas afins	Calcário Cristalino (mármore) Calcário Microcristalino Calcário sedimentar Brecha Calcária
Granitos e Rochas afins	Granito Sienito Nefelínico Pórfiro ácido Serpentinó
Ardósias	Ardósia Xisto

2.2.1. Distribuição geográfica da rocha ornamental em Portugal

Em Portugal existe uma grande diversidade, não só em termos litológicos, mas também em termos cromáticos de rochas ornamentais, o que lhes confere grande qualidade e beleza, sendo reconhecidas a nível mundial. A designação comercial encontra-se associada ao local de extração e à cor predominante, sendo a sua exploração realizada um pouco por todo o País. Como se pode constatar na **Figura 2**, os centros de produção encontram-se distribuídos ao longo do País, estando diretamente relacionados com a própria geologia de Portugal (adaptado de Spínola, 2015).



Figura 2 - Centros produtores de rocha ornamental.
(adaptado a partir de www.dgeg.pt, 2018)

De acordo com o Guia Técnico publicado pelo INETI em 2001 e com Carvalho *et al.* (2012), a exploração dos três grandes grupos de rochas é realizada nas seguintes regiões de Portugal:

- **Granitos e rochas afins (Norte e Centro):** Pedras Salgadas (Vila Real), Monção (Viana do Castelo), Braga, e Santa Eulália - Monforte - Alpalhão (Portalegre) e Arraiolos (Évora). Sienito nefelínico é extraído na zona de Monchique (Faro);
- **Mármore e rochas afins (Norte, Centro e Sul):** Calcário cristalino na faixa Estremoz, Borba e Vila Viçosa (Estremoz, Borba, Vigária, Lagoa e Pardais). Extraem-se em menor quantidade em Viana do Alentejo, Trigaches, Serpa e Ficalho. Calcários sedimentares nos distritos de Leiria (zona de Alcobaça), Codaçal, Cabeça Veada e Salgueiras (Porto de Mós), em alguns concelhos de Santarém como por exemplo em Fátima e em Lisboa e Sintra, nas zonas de Loures e de Pêro Pinheiro. As brechas encontram-se nos distritos de Faro e Setúbal;
- **Ardósias (Norte e Sul):** Valongo (Porto), Arouca e Vila Nova de Foz Côa. Nos distritos de Évora e de Beja extraem-se as rochas xistentas.

2.2.2. Análise de Mercado

O subsector das rochas ornamentais, de forte importância na economia nacional, é alvo de recolha e análise estatística, da responsabilidade da Direção Geral de Energia e Geologia (DGEG), que disponibiliza análises efetuadas em períodos curtos (1 a 2 anos) da evolução do comércio externo e interno, e em períodos mais alargados (3 a 6 anos) dos elementos relativos à produção nacional (Spínola, 2015).

A abordagem do estado de mercado, é realizada de maneira a compreender a importância da valorização das rochas ornamentais em Portugal, que originam os resíduos em estudo (lamas), provenientes da sua transformação. A última publicação refere dados do ano de 2016. Nesse ano, o número de pedreiras ativas de rocha ornamental era de 304, tendo decrescido relativamente aos anos anteriores (período de 2010 a 2015), o que reflete a conjuntura das crises económicas Mundial e Europeia iniciadas em 2008 que afetaram Portugal nos anos seguintes (**Quadro 2**).

Quadro 2 - Evolução do número de pedreiras de rocha ornamental.
(adaptado a partir de www.dgeg.pt, 2018)

Subsetor das rochas ornamentais	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Mármore e calcários	158	167	161	144	133	123	132	137	124
Granitos e rochas similares	100	113	124	108	107	104	105	108	99
Pedra para calçada e rústica	216	195	188	125	121	106	96	81	68
Ardósia e xisto	6	7	10	11	11	12	14	14	13
Total de Pedreiras	480	482	483	388	372	345	347	340	304

No **Quadro 3** pode ser observada uma síntese da produção de rochas ornamentais por substâncias, no período de 2007 a 2016.

Quadro 3 - Produção de rochas ornamentais por substância de 2007 a 2016.
(adaptado a partir de www.dgeg.pt, 2018)

Ano	Subsetor - Rochas ornamentais									Total	
	Mármore e calcários		Granito ornamental e rochas similares		Pedra para calcetamento e rústica		Ardósia				
	(Tonelada)	(10 ³ €)	(Tonelada)	(10 ³ €)	(Tonelada)	(10 ³ €)	(Tonelada)	(10 ³ €)	(Tonelada)	(10 ³ €)	
2007	741 233	76 398	1 019 783	43 502	1 402 907	50 302	37 612	5 995	3 201 535	176 197	
2008	739 652	62 761	971 779	36 557	963 520	31 239	21 434	6 871	2 696 385	137 427	
2009	663 663	61 575	913 294	35 654	798 551	26 858	19 700	8 546	2 395 209	132 632	
2010	893 632	102 272	1 030 391	42 860	873 943	25 236	18 765	5 861	2 816 731	176 228	
2011	773 336	84 814	975 660	36 833	844 356	24 914	24 981	6 111	2 618 332	152 672	
2012	885 101	88 612	1 021 571	33 138	806 557	21 103	30 278	7 740	2 743 507	150 593	
2013	999 177	101 733	990 264	33 138	899 409	23 110	29 349	7 850	2 918 199	165 831	
2014	820 586	92 098	1 152 301	39 525	817 801	24 067	40 130	9 907	2 830 818	165 597	
2015	833 615	91 291	1 174 661	37 823	807 550	28 643	48 393	8 263	2 864 220	166 019	
2016	951 225	86 931	1 105 327	34 894	773 169	25 419	51 540	9 502	2 881 261	156 746	

A produção total de rochas ornamentais foi mais ou menos constante de 2009 até 2016, mantendo-se em 2016 nas 2.881.261 toneladas, representando cerca de 157 milhões de euros. Em 2008 e 2009 há uma diminuição da produção que resulta da crise económica e da fraca estrutura comercial das empresas portuguesas junto do mercado externo. Nos últimos anos a conjuntura do sector da construção civil e obras públicas não tem sido a mais favorável apesar da produção de rochas ornamentais continuar a apresentar algum crescimento, em grande parte devido à componente do comércio internacional (adaptado de DGEG, 2016).

Segundo os últimos dados disponibilizados pela DGEG, relativamente ao ano de 2016, o valor total das saídas de substâncias minerais (excluindo as águas) atingiu 785 milhões de euros dos quais 354 são referentes a minérios metálicos (essencialmente concentrados de cobre, zinco e de tungsténio) e 370 milhões de euros a rochas ornamentais. Assim no ano de 2016 do total exportado, 47% correspondem às rochas ornamentais, 45% correspondem aos minerais metálicos, e 7% aos minerais industriais (argila, caulino, sal e outros minerais industriais) (**Figura 3**).

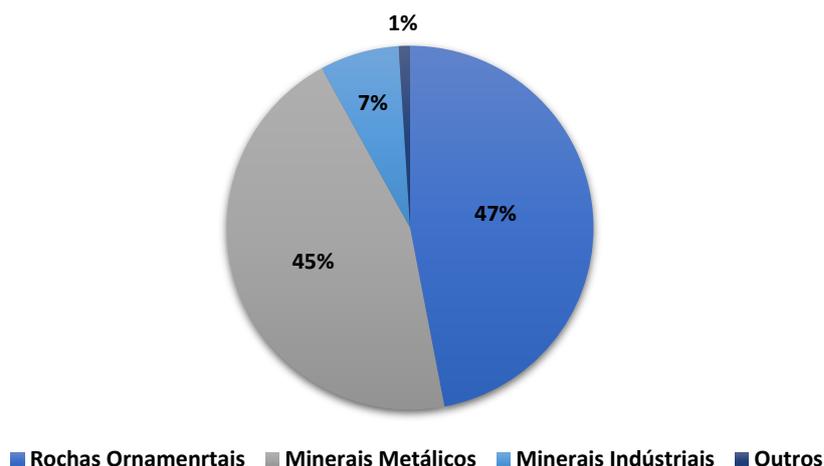


Figura 3 - Exportações para Portugal de substâncias minerais em 2016.
(adaptado a partir de www.dgeg.pt, 2018)

Segundo a mesma fonte, em relação ao valor total das substâncias minerais que entraram em Portugal (excluindo o petróleo) neste mesmo período (2016), o valor atinge cerca de 434 milhões de euros, dos quais 5% às rochas ornamentais, 60,5% dizem respeito aos minerais energéticos, 22% aos minerais industriais, 1,5% aos minérios metálicos e 11% a outras substâncias (**Figura 4**).

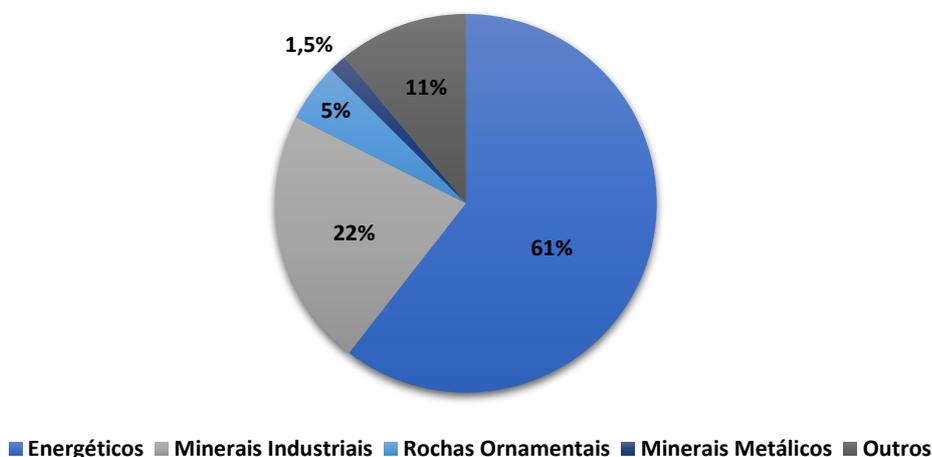


Figura 4 - Importações para Portugal de substâncias minerais em 2016.
(adaptado a partir de www.dgeg.pt, 2018)

Abordando o subsector das rochas ornamentais, segundo a DGEG, no ano de 2016, foram exportados um total de 1.553.996 toneladas de rochas para fins ornamentais, num valor de 370 milhões de euros, dos quais 462.838 toneladas (93 milhões de euros) dizem respeito a granitos e rochas similares, 710.810 toneladas (193 milhões de euros) aos mármore e calcários, 333.761 toneladas (38 milhões de euros) às pedras naturais talhadas para calcetamento e 44.586 toneladas (46 milhões de euros) a ardósias.

Ainda relativo a este subsetor, neste mesmo período, foram importadas 66.218 toneladas de rochas para fins ornamentais, num valor de 48 milhões de euros, dos quais 99.213 toneladas (24 milhões de euros) dizem respeito a granitos e rochas similares, 44.897 toneladas (19 milhões de euros) a mármore e calcários, 150 toneladas (59.000 euros) às pedras naturais talhadas para calcetamento, e 5.620 toneladas (4 milhões de euros) a ardósias (**Figura 5**).

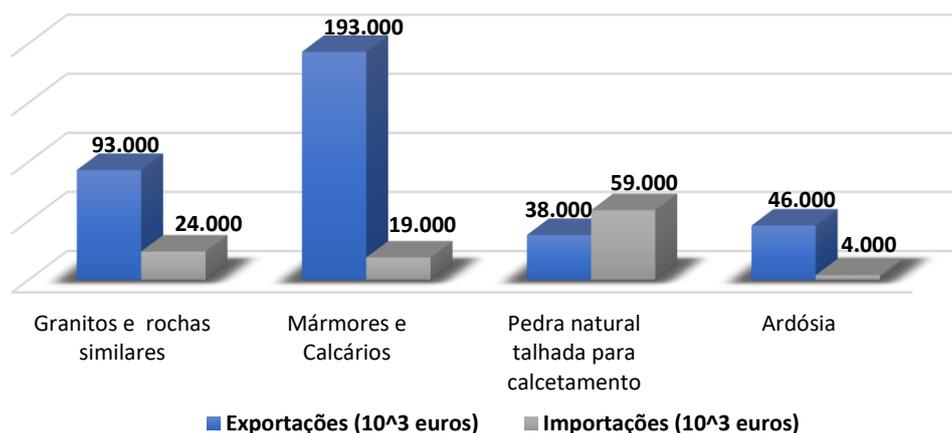


Figura 5 - Valor total das exportações e importações em Portugal referente ao subsetor das rochas ornamentais (adaptado a partir de www.dgeg.pt, 2018)

Na análise do gráfico da **Figura 4**, verifica-se que no subsetor das rochas ornamentais, os mármore e calcários lideram as exportações. Consta-se ainda que as exportações são muito superiores às importações, facto que se evidencia tanto nos mármore e calcários, como nos granitos e rochas similares, ardósias e na pedra natural talhada para calcetamento, representando, portanto, uma grande fonte de rendimento nacional.

Segundo a DGEG (2017), a exportação de rochas ornamentais continua a registar uma tendência crescente, mostrando uma taxa de crescimento médio anual de 4%, sendo os principais países de destino destas rochas, por ordem crescente de importância: Espanha, Reino Unido, Estados Unidos da América, França e Arábia Saudita.

Quanto aos principais países importadores de rochas ornamentais para Portugal, os principais são: Espanha, Itália, Turquia, Angola, Brasil, França, Bélgica, Irlanda, Grécia, Holanda, Noruega, Marrocos, China e Zimbábue.

2.2.3. Lamas resultantes da atividade do subsetor

O sector da pedra natural origina elevadas quantidades de resíduos, principalmente massa mineral rejeitada (sem valor comercial) e lamas, produzidos nos processos de extração e transformação, o que leva a que estes sejam armazenados em aterros ou escombreyras (quando os resíduos são constituídos por partículas de espectro granulométrico largo e depositadas a seco) em barragens e bacias de lamas (quando os resíduos são partículas finas num meio aquoso, geralmente depositadas por sedimentação) (INETI, 2001).

As lamas, segundo a definição sugerida pelo Comité Europeu de Normalização, podem definir-se como sendo uma mistura de água e de sólidos separada de diversos tipos de água como resultado de processos naturais ou artificiais.

A composição das lamas resultantes dos processos de transformação de rocha ornamental depende da composição da rocha e do processo utilizado, se engenhos diamantados com arrefecimento por água ou engenhos multilâminas com utilização da calda abrasiva. Neste último caso o resíduo tem na sua composição química maiores teores de ferro, devido à presença do abrasivo (adaptado de INETI, 2001).

Estes resíduos, habitualmente, são considerados como não perigosos e inertes, no entanto podem provocar acidentes ou impactes ambientais graves caso a sua deposição não seja controlada ou se for erradamente planificada (INETI, 2001).

O material rejeitado no subsetor das rochas ornamentais são os resíduos de maior relevância do setor, apresentando-se sob a forma de lamas (**Quadro 4**). O subsetor das rochas ornamentais gera 58% da totalidade das lamas do setor, sendo que desses, 33% correspondem ao processo de transformação e 25% ao processo de extração.

Quadro 4 - Resíduos sólidos e pastosos gerados no subsetor das rochas ornamentais (ano 1998).
(adaptado de INETI, 2001)

Subsetor Rochas ornamentais	Matéria prima processada (t/ano)	Resíduos sólidos (t/ano)	Lamas (t/ano)
Extração	1.324.685	5.226.458	259.696
Transformação	1.626.158	478.048	347.383

O processo de transformação gera por bloco, segundo diversos autores (**Quadro 5**), cerca de 20% a 50% de resíduos e estima-se que os processos de serragem e corte produzam cerca de 0,1m³ de lama por cada tonelada de rocha transformada (INETI, 2001).

Quadro 5 - Estimativa da produção de resíduos durante o processo de serragem de rochas.
(adaptado de Destefani, 2009)

Autores	Estimativa da produção de resíduos (% em volume em relação ao bloco)
Freire & Mota (1995); Souza (2001)	20% a 25%
Gonçalves (2001); Cavalcanti (2006)	25% a 30%
Silva (1998); Vieira (2004)	30%
Gobbo <i>et. al.</i> (2004); Mello <i>et. al.</i> (2006)	30% a 40%
Almeida <i>et. al.</i> (2007); Acchar & Dantas (2007)	40%
Almeida & Pontes (2001)	40% a 50%
Vilaschi & Sabadini (2000)	25% a 30%

2.2.4. Enquadramento legislativo

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 nº 178/2006, de 5 de setembro, o resíduo é uma “*substância ou objeto que o detentor se desfaz ou tem a intenção ou obrigação de se desfazer, nomeadamente os identificados na Lista Europeia de Resíduos (LER)*”.

A deposição de resíduos em aterro, como as lamas de serragem e corte primário de rocha ornamental, está sujeita ao Diploma de Aterros, aprovado pelo Decreto-Lei n.º 183/2009, de 10 de agosto. Este diploma tem como objetivo evitar ou reduzir os efeitos negativos sobre o ambiente da deposição de resíduos em aterro, quer à escala local em especial a poluição das águas superficiais e subterrâneas, do solo e da atmosfera, quer à escala global em particular o efeito de estufa, bem como quaisquer riscos para a saúde humana. Neste diploma, no seu artigo 7º, é referido que a deposição de resíduos que tenham potencial de reciclagem deve ser minimizada (www.apa.pt, 2018).

A nível nacional, o Plano Nacional de Gestão de Resíduos (PNGR) é uma estratégia recente integrada e abrangente, legislada, de modo a garantir a eficácia de uma política nacional de resíduos, numa ótica de diminuição dos impactes associados à utilização dos recursos naturais, de forma a melhorar a eficiência da sua utilização e a proteção do ambiente e da saúde humana, estabelecendo regras orientadoras para os planos específicos de gestão de resíduos, os quais concretizam esse plano em cada área específica de atividade geradora de resíduos (www.apa.pt, 2018).

A gestão dos resíduos, tais como as lamas de serragem e corte, deve ser realizada de acordo com o Regime Geral de Gestão de Resíduos (RGGR), aprovado pelo decreto-lei n.º 178/2006, de 5 de setembro, alterado pelo DL n.º 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 apresentado na **Figura 6**, no que se refere às opções de prevenção e gestão de resíduos. Contudo essa hierarquização pode ser alterada, sendo para tal necessário aplicar o conceito de ciclo de vida aos impactes globais da produção e gestão dos resíduos em causa.



Figura 6 - Princípio da hierarquia dos resíduos.
(adaptado de PNGR, 2014)

As lamas provenientes do corte primário de rocha ornamental, enquadram-se, segundo a classificação de resíduos, nos resíduos industriais, logo segundo o PNGR, 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).

O PESGRI 2001, foi elaborado para inventariar e caracterizar os resíduos industriais do País e definir a sua redução, reutilização e reciclagem. O PNPRI, foi materializado para reduzir a perigosidade e a quantidade de resíduos industriais, através da aplicação de medidas e tecnologias de prevenção da poluição aos processos produtivos inseridos na atividade industrial (www.apa.pt, 2018).

As lamas de serragem e corte de rocha ornamental estão também sujeitas à classificação da Lista Europeia de Resíduos (LER), uma lista harmonizada de resíduos que tem em consideração a origem e composição dos mesmos. Esta classificação surgiu para uma mais correta classificação dos resíduos, publicada pela Decisão 2014/955/EU, da Comissão, de 18 de dezembro, que altera a Decisão 2000/532/CE, da Comissão de 3 de maio, referida no artigo 7º da Diretiva 2008/98/CE, do Parlamento Europeu e do Conselho, de 19 de novembro. (www.apa.pt, 2018).

A LER está organizada em 20 capítulos, que agrupam os resíduos de acordo com a área específica da atividade geradora: industrial, urbana, agrícola, hospitalar e a de processos produtivos. Os resíduos são identificados por códigos de 6 dígitos, sendo que os primeiros 2 dígitos dizem respeito ao capítulo, onde se encontram integrados os dígitos intermédios ao subcapítulo e os últimos dizem respeito a um resíduo específico (adaptado de Barbosa, 2016).

No **Quadro 6** está representado o código “LER” para os resíduos da exploração de minas e pedreiras, onde se inserem as lamas objeto deste estudo.

Quadro 6 - Códigos “LER” para resíduos provenientes da exploração de minas e pedreiras.
(adaptado de Roque, 2010)

Resíduos (Código LER)
- Resíduos da exploração de minas e pedreiras (01)
- Escombros de pedreiras (01 04 08)
- Lamas de pedra geradas na produção de agregados (01 04 12)
- Lamas do corte e polimento de rochas ornamentais (01 04 13)

Além da legislação já referida, em termos específicos da sua gestão como resíduo, as lamas provenientes da serragem e corte de rocha ornamental, estão sujeitas ao Decreto-Lei n.º 10/2010, de 4 de fevereiro, alterado pelo Decreto-Lei n.º 31/2013, de 22 de fevereiro, que estabelece o regime jurídico a que está sujeita a gestão de resíduos das explorações de depósitos minerais e de massas minerais/resíduos de extração, transpondo para a ordem jurídica interna a Diretiva n.º 2006/21/CE, do Parlamento Europeu e do Conselho, de 15 de Março.

No decreto é referido que a União Europeia reconheceu a necessidade de criar um enquadramento legal próprio para a gestão de resíduos provenientes de extração e transformação de recursos naturais, tendo em conta a especificidade da atividade da exploração de minas e pedreiras, por originarem geralmente volumes consideráveis de resíduos em caso de gestão inadequada, podem conduzir a situações de risco elevado para o ambiente, saúde pública e segurança das populações.

O mesmo decreto define que o operador é a pessoa singular ou coletiva responsável, nos termos do disposto no artigo 5.º do Decreto - Lei n.º 178/2006, de 5 de Setembro, pela gestão de resíduos de extração, durante a armazenagem temporária de resíduo, e nas fases de funcionamento e de pós - encerramento tem de elaborar um plano de gestão de resíduos, tendo em conta o princípio do desenvolvimento sustentável.

O plano de gestão de resíduos deve ainda evidenciar o cumprimento das obrigações que decorrem do presente decreto-lei, tendo como objetivos principais os seguintes:

- a) Evitar ou reduzir a produção de resíduos e a sua perigosidade;
- b) Promover a valorização dos resíduos de extração através da reciclagem, reutilização ou recuperação dos mesmos, com respeito pelo ambiente;
- c) Garantir a eliminação segura dos resíduos de extração no curto e no longo prazo, tendo particularmente em conta, durante a fase de projeto, o modelo de gestão a observar durante o funcionamento e no pós -encerramento da instalação de resíduos.

2.3. Aproveitamento das lamas como subproduto

Juntamente com a legislação existente, associada à deposição das lamas em aterro, existem dois fatores que implicam encargos financeiros significativos, tais como o custo de transporte e da deposição de grandes volumes de lamas. Estes custos fazem com que as empresas transformadoras de rochas ornamentais procurem encontrar soluções para um destino mais apropriado e sustentável das lamas formadas durante o processo de fabrico.

Segundo Santos (2007) quando se conhecem as características de um resíduo, é possível avaliar o seu potencial de aproveitamento como subproduto, e as respetivas consequências derivadas do seu desaproveitamento. Também é possível avaliar de modo quantitativo e qualitativo as consequências (positivas ou negativas) para o meio ambiente.

O conceito de subproduto é aplicável a substâncias ou objetos que resultam de um processo produtivo cujo principal objetivo não seja a sua produção (resíduo de produção), sendo utilizados diretamente na indústria. Através do Fluxograma da **Figura 7** é possível entender o processo produtivo e da origem do subproduto.

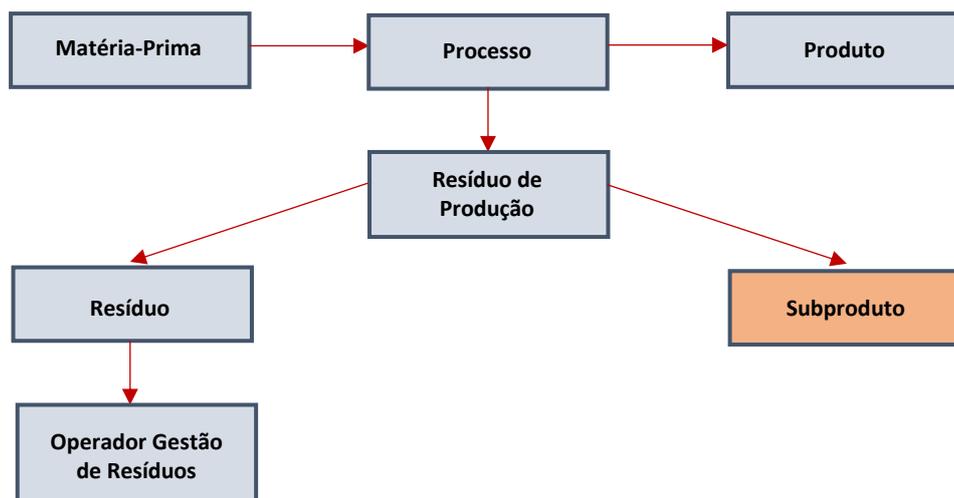


Figura 7 - Fluxograma representativo do processo produtivo e da origem do subproduto (adaptado de www.apa.pt, 2018).

A nível nacional, o conceito de subproduto encontra-se regulado no artigo 44º - A do RGGR que transpõe para a ordem jurídica interna a Diretiva Quadro Resíduos (DQR), encontrando-se listadas no seu n.º 1 as quatro condições a verificar cumulativamente, que permitem que um resíduo de produção possa ser considerado um subproduto, não se encontrando assim sujeito às regras relativas à gestão de resíduos (www.apa.pt, 2018):

- a. *“Existir a certeza de posterior utilização da substância ou objeto;*
- b. *A substância ou objeto poder ser utilizado diretamente, sem qualquer outro processamento que não seja o da prática industrial normal;*
- c. *A produção da substância ou objeto ser parte integrante de um processo produtivo; e*
- d. *A substância ou objeto cumprir os requisitos relevantes como produto em matéria ambiental e de proteção da saúde e não acarretar impactes globalmente adversos do ponto de vista ambiental ou da saúde humana, face à posterior utilização específica”.*

Assim, a maior parte dos estudos realizados para aproveitamento das lamas provenientes da serragem e corte primário de rocha ornamental são direcionados para a sua incorporação como subproduto, na composição de variados produtos finais, tendo como perspetiva que esses produtos não percam as suas características físico-químicas base e que durante o fabrico dos mesmos não se produza um maior gasto de energia, com o foco no objetivo de diminuir parte ou totalidade do consumo de matéria-prima natural e não renovável.

Os estudos são direcionados segundo as características específicas das lamas, como por exemplo granulometria fina e composição química específica, vislumbrando assim potencialidades para aplicação em diversas áreas e sectores de atividade que habitualmente consomem grandes volumes de recursos naturais (**Quadro 7**).

Quadro 7 - Diversas áreas de aplicação das lamas.

INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO	Argamassas; Cimentos; Solo-cimento; Cerâmicos; Misturas betuminosas; Terraplanagens; Contenção de taludes; Aterros e selagem de lixeiras; Aglomerados de mármore.
OUTRAS INDÚSTRIAS	Solos agrícolas (adubos e pesticidas); Indústria Cerâmica (Faiança); Indústria do papel; Indústria do vidro; Indústria das colas e tintas; Outras aplicações.

Além das aplicações anteriormente expostas, na **Figura 8** apresenta-se uma lista, segundo um relatório de 2016, do *MSME (Micro Small and Medium Enterprises Development Institute, Government of India)*, para as lamas provenientes do corte de mármore, pois, segundo os autores, estas são as que possuem o maior número de aplicações, devido à composição química ser constituída por carbonato de cálcio (CaCO_3), uma matéria-prima utilizada em larga escala, em variadas indústrias e aplicações.



- Produção de aglomerados de mármore.
- Fabrico de vidro.
- Fabrico de Cal.
- Fabrico de plásticos.
- Fabrico de diluentes e pesticidas.
- Fabrico de produtos químicos como substituo do carbonato de cálcio.
- Indústria metalúrgica (ferro e aço) como substituo do carbonato de cálcio.
- Indústria metalúrgica de metais não-ferrosos.
- Agente neutralizante e fíler para tintas, borrachas, etc.
- Indústria do cimento como substituto dos agregados.
- Fabrico de balastro para caminhos-de-ferro (juntamente com estéreis sólidos).
- Na construção de canais de descarga de barragens, docas, cais e quebra-mares.
- Utilização como fíler de asfalto.
- Adição a material de isolamento constituído por painéis de lã de rocha.
- Como suplemento de alimentação mineral para animais domésticos.
- No tratamento de águas residuais.
- Para drenagem de gases de dessulfuração e indústrias com caldeiras a combustão de carvão.
- No tratamento de lamas de esgoto.
- Em camadas filtrantes como agregado selecionado.

Figura 8 - Possíveis aplicações para lamas provenientes do corte de Mármore.
(adaptado de *MSME, Government of India, 2016*)

2.3.1. Aplicações das lamas na indústria da construção

O sector da construção civil representa um dos potenciais consumidores das lamas geradas no processo de serragem e corte primário de rocha ornamental. Assim sendo, tem sido evidente a tentativa de incorporação destes resíduos em diferentes aplicações e produtos deste sector, que são referidos de seguida:

➤ Argamassas

Segundo Pinto *et al.* (2006) argamassa é uma mistura de um ou mais ligantes orgânicos ou inorgânicos, agregados, adições e/ou adjuvantes, em que:

- agregados - material granular que não intervém na reação endurecimento da argamassa;
- adições - material inorgânico finamente moído, que pode ser adicionado à argamassa com o objetivo de obter ou melhorar propriedades específicas;
- adjuvante - material orgânico ou inorgânico adicionado em pequenas quantidades com o objetivo de modificar propriedades da argamassa fresca ou endurecida.

As areias funcionam como o esqueleto da argamassa e, ao mesmo tempo que trabalham para a sua compacidade e resistência, contribuem ainda para reduzir a retração da mistura. A água, elemento fundamental no fabrico das argamassas, ao reagir com o ligante, promove a sua hidratação colocando em evidência as suas propriedades aglutinantes (Pinto *et al.*, 2006).

Atualmente são produzidos diversos tipos de argamassas com propriedades químicas e mecânicas especialmente adaptadas à grande variedade de construções e obras, em que as tradicionais são aquelas em que os ligantes são, o gesso, a cal aérea, a cal hidráulica e o cimento, simples ou associados ou que, adicionalmente, contêm pozolanas (materiais siliciosos ou silicaluminosos finamente divididos e que na presença de humidade reagirão quimicamente com o hidróxido de cálcio a temperaturas vulgares formando compostos com propriedades cimentícias).

Referem-se de seguida alguns dos estudos efetuados por diversos autores em Portugal e no estrangeiro, para incorporação das lamas na matriz de origem e produção de argamassas:

- Carvalho, *et al.* (2004), desenvolveram um projeto para o aproveitamento de lamas através da sua incorporação em argamassas numa central industrial, substituindo o calcário na mistura, tendo os autores concluído, que o material obtido com esta argamassa possui melhores características do que o mesmo material fabricado convencionalmente.

- Moura *et al.* (2006), estudaram a viabilidade técnica da utilização de lamas originárias do corte de mármore e granito, como matéria-prima no fabrico de argamassas de revestimento, substituindo parcialmente a areia em 5% e 10% em peso e ainda na produção de lajes em betão para pavimento, utilizando para tal uma proporção de 1:0,5:0,5 (cimento: resíduo do corte de mármore e granito: areia). Os autores concluíram que a utilização deste tipo de resíduo aumentava a resistência à compressão das argamassas, sendo o aumento maior para o teor de 10 % de resíduo.
- Calmon *et al.* (1997), utilizaram lamas provenientes do corte de mármore para produzir argamassas com porções de 1:2:8 e 1:1:6 (cimento: cal: areia) substituindo a cal por 25%, 50%, 75% e 100% de resíduo em massa e com base nos resultados obtidos em ensaios realizados no estado fresco (trabalhabilidade) e no estado endurecido (resistência à compressão), concluíram existir potencial para a utilização do resíduo em argamassas de assentamento.
- Lima *et al.* (2016), caracterizaram uma lama proveniente da serragem de granitos com o objetivo de estudar o comportamento da “argamassa expansiva de demolição”, através da adição das lamas na sua produção. Esta argamassa é cada vez mais utilizada na indústria de rochas ornamentais, principalmente na fase de extração de blocos. No estudo foram realizados ensaios de caracterização e de pressão/expansão numa argamassa expansiva padrão (*Fracta*) e na argamassa em que se incorporou lama. No **Quadro 8** observa-se a composição química obtida no estudo, através da análise por fluorescência de raios x (FRX), para a argamassa expansiva Italiana.

Quadro 8 - Composição química obtida por fluorescência de raios x da massa expansiva comercial. (adaptado de Lima *et al.*, 2016)

Elemento Químico	Percentagem
CaO	90,2%
SiO ₂	2,8%
MgO	0,6%
Al ₂ O ₃	0,6%
FeO ₃	4,6%

A argamassa padrão apresenta um alto teor de cálcio, CaO (aproximadamente 90,2%), seguido de sílica, SiO₂, com valor de 2,8%, além de outros elementos. O alto teor de cálcio (CaO) é uma característica das argamassas expansivas, sendo o responsável pela pressão de expansão, uma vez que ao reagir com a água origina uma expansibilidade do material.

Na **Figura 9** podem observar-se os testes realizados para o comportamento da pressão máxima de expansão, da massa expansiva com adição da lama nas proporções de 10%, 20%, 30%, 40% e 50% em peso, em relação à argamassa expansiva padrão, que apresenta uma pressão de expansão de 168,15 kgf/cm².

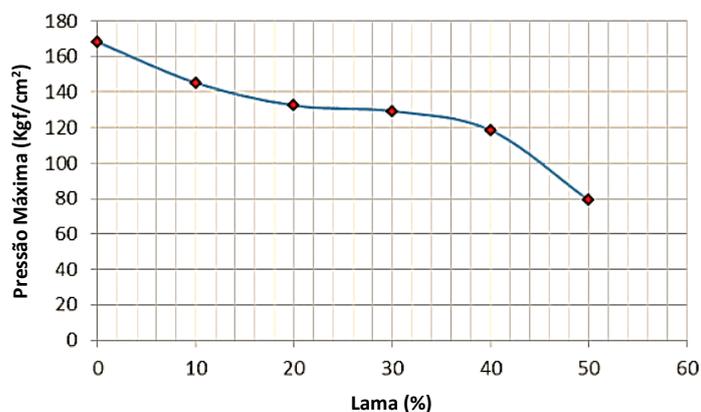


Figura 9 - Pressão máxima para a argamassa Italiana com incorporação de lama.
(adaptado de Lima *et al.*, 2016)

Concluiu-se no estudo, após resultado das análises de caracterização e das medidas de pressão/expansão, que é possível a utilização da lama como constituinte na argamassa expansiva sem prejuízo para a sua finalidade (destaque de blocos e principalmente a redução dos custos de extração e impacto ambiental).

- Moura *et al.* (2002), utilizaram as lamas originárias do corte e serragem de blocos de mármore e granito, para fabrico de argamassas de revestimento. Foram produzidas argamassas com substituições de 5% e 10% da massa de areia, por resíduo. A verificação da influência do resíduo foi medida através da resistência à compressão aos 3, 7 e 28 dias e os autores concluíram que a resistência das argamassas com resíduo foi maior do que a resistência da argamassa de referência, com melhores resultados quando a incorporação de lama foi de 10%.
- Cruz *et al.* (2003), estudaram a resistência à compressão e o módulo de elasticidade de argamassas com diferentes percentagens de incorporação de lama, originária da serragem de granito, em substituição de areia (5%, 10%, 15% e 20%). Na preparação das argamassas, fixou-se a relação água/cimento em 0,48 para averiguar a influência da adição de diferentes percentagens do resíduo na consistência da argamassa e o traço utilizado como referência foi 1:3 (cimento: areia). Os autores concluíram que apenas para as percentagens de incorporação de 5% e 10%, obtiveram resultados satisfatórios.

- Tenório *et al.* (2005), estudaram a incorporação de lama da serragem de granito nas argamassas, substituindo o cimento e areia, nos teores de 5% e 10% em volume. Foram adotadas dosagens de 1:3 (cimento: areia), em massa e os autores referem que a resistência à compressão e o módulo de elasticidade nas argamassas com resíduo, substituindo a areia, aumentaram com o aumento do teor de resíduo, tendo sido obtido um melhor resultado para a substituição de 10% da areia. Já nas argamassas com substituição de cimento por resíduo, notaram uma queda da resistência e o módulo de elasticidade com um ligeiro aumento, para 10% de incorporação de lama.
- Chouhan *et al.* (2017) estudaram a incorporação de uma lama originária da serragem de granito numa argamassa, em substituição da areia. Os autores, através do ensaio de resistência à compressão, obtiveram resultados que demonstram que a lama na mistura reduz a sua trabalhabilidade. No estudo fez-se variar a percentagem de lama de granito na mistura entre os 25% e 100% e em seguida foi testado o efeito destes valores na resistência à compressão para diferentes tempos de hidratação entre 1 dia até 90 dias. A variação da resistência à compressão da mistura com a variação de tempos de hidratação, para diferentes dosagens de lama, é demonstrada no gráfico da **Figura 10**.

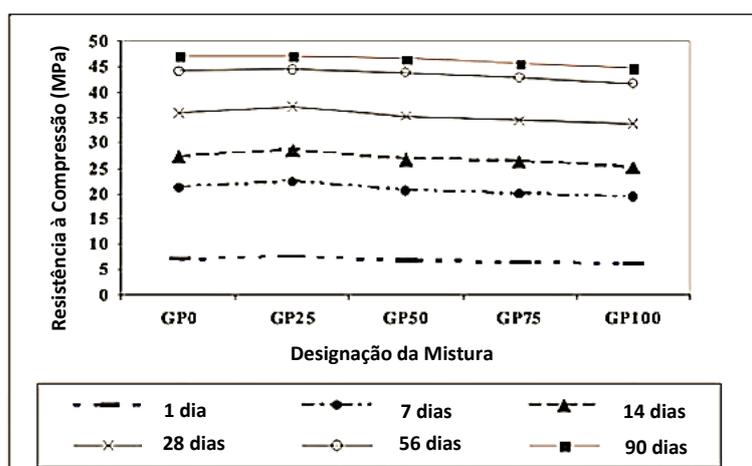


Figura 10 - Resistência à compressão da mistura com variação de tempos de hidratação, para diferentes percentagens de incorporação de lama. (Chouhan *et al.*, 2017)

No gráfico, é possível observar que a resistência à compressão da argamassa com adição de lama, para todas as dosagens, é aproximada à da argamassa sem adição de lama. É demonstrativo também que o valor máximo de resistência foi obtido na amostra que continha 25% de lama na sua composição, em todos os tempos de hidratação experimentados, de 1 a 90 dias. A resistência à compressão máxima (37MPa) foi obtida aos 28 dias para uma percentagem de substituição de areia por lama de granito de 25%.

➤ **Cimentos**

O cimento é definido como um material inorgânico moído finamente, designado de ligante hidráulico, isto é, uma substância que, quando misturada com água reage quimicamente, convertendo o sistema água-ligante, com consistência plástica, numa matriz sólida. Uma pasta que faz presa e endurece, podendo aglomerar outros materiais sólidos e que depois de endurecida conserva a sua resistência mecânica e estabilidade mesmo debaixo de água (Pardal, 2015).

O cimento Portland (cimento comum feito com clínquer Portland e pequenas quantidades de gesso), quando apropriadamente doseado e misturado com agregados e água, deve permitir a produção de betão e argamassa. O cimento CEM (designação para o cimento portland segundo os padrões europeus) é essencialmente constituído por sílica ($S=SiO_2$), alumina ($A=Al_2O_3$), cal ($C=CaO$) e ferro ($F=Fe_2O_3$), as principais matérias-primas são o calcário e argila, sendo ainda utilizada areia, xistos argilosos e como matéria-prima de correção a bauxite, cinzas de pirite e escórias de alto-forno (adaptado de Pardal, 2015).

Referem-se de seguida, alguns dos estudos efetuados por autores em Portugal e no estrangeiro, para incorporação das lamas de serragem na matriz de origem e produção de cimentos:

- ➔ Lameiras *et al.* (2005), referem no seu estudo que na utilização do resíduo como substituto dos agregados, em teores até 50%, os resultados de resistência à compressão foram melhores, com ganhos significativos em relação ao de referência, mantida a granulometria original do resíduo. Já no caso da substituição de cimento por lamas com teores de 10% e 20% houve uma redução significativa da resistência à compressão, comprovando a ausência de comportamento pozolânico do material.
- ➔ Gonçalves *et al.* (2002), avaliaram o comportamento da incorporação de lama, proveniente da serragem de granito, no cimento através da realização de ensaios de resistência à compressão, resistência à tração e resistência à flexão. Os autores concluíram que as misturas de cimento com resíduo apresentaram maior coesão, melhor consistência e maior resistência à compressão.
- ➔ Mello (2006), estudou em Portugal a incorporação de lamas provenientes do corte de mármore, na indústria cimenteira. Relativamente ao resíduo 95% das partículas de dimensões eram menores que 0,02 mm. Os resultados da análise química revelaram que o cimento obtido estava dentro da gama de composições químicas usuais de cimentos. O autor concluiu que o clínquer obtido apresentou densificação elevada, idêntico ao material produzido pela indústria portuguesa.

➤ Solo-Cimento

Segundo a empresa Cimpor S.A, o solo-cimento é definido como uma mistura de solo natural com cimento e água, com benefícios ambientais e económicos. Esta mistura atribui ao solo uma maior capacidade resistente, sem eliminar a sua flexibilidade natural. É um material com boa resistência à compressão, bom índice de impermeabilidade, baixa retração e boa durabilidade. A mistura tem habitualmente um teor de cimento entre 5% e 10%. Este material é utilizado em qualquer situação em que se pretenda melhorar o desempenho mecânico dos solos e pode ser utilizado em diversas aplicações (adaptado de Silveira, 2005):

- Solução final para substituição de misturas betuminosas em pavimentos rodoviários;
- Camadas estruturais de pavimentos em estacionamentos e pistas de aeroportos;
- Blocos e painéis para construção civil;
- Revestimento de barragens, canais, diques e reservatórios;
- Revestimento e impermeabilização de túneis;
- Estabilização de taludes e encostas.

Miranda (2007), estudou a viabilidade de aplicar a lama do corte de mármore e granito em tijolos de solo-cimento. O solo utilizado no estudo possui cerca de 50% de finos. A lama e o cimento foram adicionados em função da massa do solo, nas percentagens de adição de 0%, 10%, 15% e 30% de lama e de 5%, 10% e 15% de cimento. Os tijolos foram ensaiados à resistência à compressão, aos 7 dias e aos 28 dias, sendo que os fabricados com adição de lama e teores de 10% e 15% de adição de cimento apresentaram uma resistência acima do valor mínimo de referência para viabilidade na aplicação (2,1 MPa) (**Quadro 9**). Assim, a autora concluiu que a incorporação da lama é viável e permite uma poupança de cimento no processo de fabrico de solo-cimento.

Quadro 9 – Resultados obtidos para os tijolos de solo-cimento no ensaio de resistência à compressão. (adaptado de Miranda, 2007)

% Resíduo	% Cimento	% Solo	Tensão de rutura (MPa) média	
			7 dias de hidratação	28 dias de hidratação
0	5	95	0,53	1,10
	10	90	3,10	3,29
	15	85	4,14	3,86
10	5	85	0,87	0,91
	10	80	2,12	2,74
	15	75	3,20	4,52
15	5	80	0,55	1,21
	10	75	2,89	3,71
	15	70	4,58	5,60
30	5	65	1,19	1,32
	10	60	3,08	2,86
	15	55	4,03	4,10

➤ **Cerâmicas**

Segundo Bosch & Nièpche (2007) as cerâmicas são materiais sintéticos, essencialmente compostos por fases inorgânicas iónico-covalente, não totalmente amorfas e geralmente consolidadas pela sinterização a elevadas temperaturas de uma mistura granular compacta, conformada com a forma desejada. Os corpos cerâmicos são concebidos primeiramente através da mistura, numa pasta, das matérias-primas e posteriormente é-lhes conferida a forma final antes de os elevar a temperaturas superiores a 1000°C (Glover *et al.*, 2012).

Os materiais cerâmicos tradicionais incluem os materiais típicos de olaria e os materiais utilizados na construção. Alguns destes materiais são o tijolo, a telha, o grés e o azulejo. Estes estão associados a materiais silicatados, fazendo parte da sua constituição (adaptado de Bogas, 2013):

- argila - responsável pelas propriedades plásticas necessárias à moldagem do material antes de este ser endurecido por cozedura;
- sílica – é o esqueleto não deformável dos cerâmicos;
- feldspato – contribui para a formação da face vitrificada aos aluminossilicatos expostos às elevadíssimas temperaturas, reduzindo a temperatura de fusão da mistura.

Segundo Palmonari & Nasseti (1993), quanto à aplicabilidade, os materiais cerâmicos podem ser classificados em cerâmicos estruturais (tijolos e telhas), cerâmicos de revestimento e pavimento (mosaicos e azulejos), cerâmicos sanitários e cerâmicos de mesa e decoração (faiança e porcelana). Esta classificação está diretamente relacionada com o campo de aplicação dos materiais cerâmicos que varia em função de uma série de parâmetros, nomeadamente o grau de porosidade, revestimento (presença de vidrado ou não), cor (corada ou branca) e tipologia das matérias-primas.

Referem-se em seguida alguns dos estudos efetuados por autores em Portugal e no estrangeiro, para incorporação das lamas de serragem na matriz de produção de diversas cerâmicas:

- O Cevalor em Portugal coordenou um projeto europeu em que concluíram a possibilidade de incorporação de lamas com origem calcária como matéria-prima de substituição do carbonato de cálcio na produção do tijolo cerâmico, sem que isto alterasse o desempenho final pretendido para este material (Pereira & Bonito, 2001 *cit in*. Machado, 2012). Foi concluído neste estudo que a incorporação de lamas na quantidade de 2% a 3% é benéfica, visto que resolve o problema de expansão associado aos produtos de origem cerâmica. Um dos problemas apontados no estudo foi que a utilização deste resíduo na produção de tijolos cerâmicos carece da necessidade de uma secagem prévia do material devido à sua humidade natural.

- Moreira *et al.* (2003) utilizaram lamas de granito como aditivo no fabrico de materiais cerâmicos para a construção (telhas, tijolos e blocos), tendo preparado misturas contendo até 10% em peso de resíduo e testaram provetes por compressão uniaxial obtendo uma média de 26 MPa de resistência. Os autores concluíram que a adição do resíduo tendia a reduzir ligeiramente os valores de absorção de água e retração linear, indiciando assim uma maior estabilidade dimensional dos corpos cerâmicos, o que diminuía os valores de resistência.
- Monteiro *et al.* (2004) também investigaram a viabilidade de obtenção de telhas cerâmicas com melhores propriedades tecnológicas incorporando lamas de granito na sua composição. Os autores prepararam várias formulações de pastas contendo até 40% em peso deste resíduo. Os resultados do estudo demonstram que a adição da lama de granito reduziu a plasticidade e a retração linear de secagem, reduziu os valores de absorção de água e aumentou a retração linear e a resistência mecânica dos provetes após cozedura. Os autores concluíram ainda que as formulações que incorporavam lamas de granito exibiram valores de absorção de água e resistência mecânica melhores do que a pasta comercial usada como referência.
- Acchar *et al.* (2006) investigaram a variação de uma argila utilizada numa indústria de barro vermelho resultante de adições de uma lama de mármore e granito. Os autores prepararam misturas de argila e resíduo (10 - 50% em peso) e testaram os provetes à compressão uniaxial, obtendo como média o valor de 50 MPa, os quais foram posteriormente cozidos a temperaturas entre 950°C e 1150°C. Os resultados demonstraram que, com o aumento do teor de resíduo, os valores de absorção de água dos corpos cozidos aumentavam e os valores da densidade em cozido diminuía e que para maiores quantidades de resíduo (>30%) e temperaturas mais baixas (<1100 °C) os valores de resistência mecânica diminuía, mostrando assim ser possível a incorporação deste resíduo na produção desses materiais, mesmo a baixas temperaturas.
- Calmon *et al.* (1998) observaram no seu estudo uma tendência de diminuição da resistência à compressão com o aumento da proporção de lamas numa matriz cerâmica, sendo essa diminuição significativa quando os teores de adição do resíduo estão acima dos 50%. Este resultado, segundo os autores, pode ser atribuído a uma porosidade mais alta do material quando se utilizam maiores quantidades de lamas em temperaturas mais baixas.
- Alguns trabalhos de pesquisa apresentam a possibilidade de produzir faiança com adição de lamas da serragem de rocha ornamental (e.g. Gonçalves, 2000; Soares 1997 (*cit in.* Almeida *et al.*, 2007)).

→ Em Martins (1996) é descrito que é possível substituir a percentagem de carbonato de cálcio pelas natas de mármore, visto que apresentam composições químicas bastante semelhantes, podendo assim funcionar como fundente numa pasta de faiança e como desengordurante, reduzindo a plasticidade e a contração e auxiliando a secagem no molde e fora do mesmo, numa proporção de 12% do total da mistura, sem repercussões negativas nas diferentes fases de produção do produto final, assim como na sua qualidade. A principal vantagem com esta reutilização é a redução do consumo da matéria prima, visto que é um dos materiais com preço mais elevado presentes na mistura de fabrico da faiança.

➤ **Misturas betuminosas**

As misturas betuminosas são materiais constituídos por agregados, betume e ar que preenche os espaços vazios. Para além dos principais componentes – agregados e betume – outros materiais entram normalmente na composição das misturas betuminosas: aditivos especiais e fíler comercial. Embora estes componentes estejam em pequenas quantidades na mistura, a sua presença é importante no desempenho da mistura betuminosa. O material fíler é adicionado com a finalidade de aumentar a fração fina da mistura que não é proporcionada pelo agregado. O pó de calcário, cimentos, cal hidráulica apagada e cinzas volantes são exemplos de fíler correntemente utilizados. Estes produtos deverão obedecer a requisitos de limpeza, humidade, granulometria e homogeneidade, definidos nos cadernos de encargos (adaptado de Neves, 2005).

Alguns estudos demonstram que as lamas provenientes da transformação de rocha ornamental podem ser aplicadas como alternativa ao fíler comercial usado nas misturas betuminosas:

- Souza *et al.* (2005), utilizaram lamas provenientes da serragem de rochas graníticas como fíler na composição de uma mistura asfáltica, com a finalidade de aumentar a viscosidade do asfalto e melhorar o seu desempenho reológico, mecânico, térmico e de sensibilidade à água. No estudo os autores obtiveram um resultado satisfatório para a utilização dos resíduos, em substituição dos produtos convencionais, na proporção de 6% de material. O resíduo, segundo os autores, atua como um fíler que irá preencher os vazios entre os agregados, contribuindo para um maior equilíbrio da mistura e aumentando a estabilidade da mesma, sem o aumento no teor de asfalto.
- Lucena (2009), teve como objetivo na sua investigação estudar a viabilidade técnica da utilização do resíduo de serragem de granito como fíler em misturas asfálticas. Através do seu estudo concluiu que, desde que as deformações previstas para o pavimento estejam de acordo com o mostrado pelo material, este pode ser utilizado como fíler em pavimentos betuminosos.

→ Conceição *et al.* (2010) referem nas conclusões do seu trabalho que os benefícios das adições destes materiais, também se estendem aos aspetos acústicos da camada betuminosa, pois a incorporação de diferentes lamas de serragem e corte de rocha ornamental contribui para a redução dos índices de ruído.

➤ **Terraplanagens**

A utilização de lamas em obras de terraplanagens não é unânime, pois na Índia, um estudo do *Central Road Research Institute*, coloca a hipótese da aplicação de lamas de mármore na realização de pavimentações em camadas com 25% a 35% de espessura (Singh & Vijayalakshim, 2004 (*cit in.* Almeida *et al.*, 2007)), enquanto que a empresa Gestilamas, Lda. (2001) (*cit in.* Machado, 2012) refere que as características das lamas excluem a sua aplicação nestas obras.

Joaquim *et al.* (2014) realizaram uma investigação utilizando lama proveniente da serragem de granitos, adicionando este resíduo a três materiais, cimento portland, cal e escória, para produção de provetes. Para tal adicionaram-se diferentes percentagens de material. Os provetes foram moldados segundo a energia de compactação leve (proctor normal) em três camadas com 25 pancadas cada num cilindro de 1000 cm³. No estudo é referido que as misturas de “solo + resíduo” não suportaram a imersão em água, após o período de hidratação e que em termos de resistência à compressão nenhuma das misturas ultrapassou os 2,1 MPa (valor mínimo de referência).

➤ **Contenção de Taludes**

Relativamente à aplicação de lamas provenientes da serragem de rocha ornamental para contenção de taludes, Dias *et al.* (2014) testaram a viabilidade técnica da utilização do resíduo de serragem de granito em misturas de solo-cimento. O solo utilizado na investigação foi um solo residual, de cor amarelada e maioritariamente constituído por silte. Realizaram-se ensaios com o solo e com uma mistura de 70% solo, 20% resíduo e 10% cimento, variando as tensões normais em 50 KPa, 100 KPa e 200 kPa (**Quadro 10**).

Os autores verificaram um aumento significativo no ângulo de atrito e da coesão do solo, após incorporar o resíduo juntamente com cimento no solo. No entanto, referiram nas considerações finais do estudo, que não garantem que esses aumentos estejam diretamente relacionados com o acréscimo do resíduo.

Quadro 10 – Parâmetros obtidos em diversos ensaios de solo com e sem adição de cimento e resíduo.
(adaptado de Dias *et al.*, 2014)

Material (Amostra)	Tensão normal (KPa)	Deformação (mm)	Tensão de cisalhamento (MPa)	Ângulo de atrito (°)	Coesão (KPa)
Solo	1	50	0,79	15,24	0,28
	2	100	0,9		
	3	200	1		
Solo + Resíduo + Cimento	4	50	-	32,60	5,84
	5	100	8		
	6	200	10		

➤ **Aterros e selagem de lixeiras**

Assim como nas operações de terraplanagem, as opiniões divergem sobre a aplicabilidade em aterros e selagem de lixeiras, uma vez que, como já referido, este resíduo tem impactos ambientais quando em contacto com o solo. Contudo, segundo Pareek (2003) (*cit in.* Almeida *et al.*, 2007), pode-se retirar proveito da capacidade de impermeabilização das lamas para o enchimento de tardoze de muros de suporte em aterros.

Franco e Cupeto (1996) (*cit in.* Almeida *et al.*, 2007) realizaram um projeto sobre a aplicação de lamas da serragem de rochas ornamentais para a selagem das lixeiras no concelho de Estremoz. Utilizaram as lamas para o recobrimento periódico de células de resíduos sólidos urbanos depositados em aterros sanitários. Os autores concluíram que para a melhor compactação, o teor de humidade ideal da lama seria de cerca de 19%. Também provaram que as lamas cumpriram as exigências funcionais com elevado desempenho, melhorando a impermeabilização e a própria estabilização do aterro. Também conseguiram minimizar o aparecimento de insetos.

Em Martins (1996), foram utilizadas as mesmas amostras de natas do estudo anterior, provenientes de diferentes mármore e concluiu-se que possuíam uma baixa permeabilidade, equivalente a um solo siltoso. O autor concluiu que as permeabilidades em associação com as características de não plasticidade, fazem das lamas uma potencial matéria-prima para aterros e selagem de lixeiras.

➤ **Aglomerados de mármore**

Os aglomerados de mármore (**Figura 11**) são produtos fabricados a partir da pedra natural ligados por uma resina especial. Este tipo de material permite a reconstrução de blocos de grandes dimensões idênticos aos extraídos na pedreira, tanto em aspeto visual como nas suas qualidades e características bastante semelhantes aos blocos naturais. Assim estes blocos são submetidos às mesmas etapas de transformação em oficina.



Figura 11 - Utilização de aglomerado de mármore.
(www.netsearch.pt/marmoresrebelo/)

A pesquisa de Martins (1996) refere que a reutilização das lamas como substituto do carbonato de cálcio (CaCO_3) foi desenvolvida pela indústria de aglomerados de mármore. Nesse estudo para um total de 6% de natas de mármore em relação à mistura, com todos os compostos, foi tecnicamente possível adotar o procedimento para a produção deste produto.

2.3.2. Aplicações de lamas noutras indústrias

Referem-se em seguida alguns dos estudos efetuados, por diversos autores, em Portugal e internacionalmente, para incorporação das lamas de serragem na matriz de origem e produção de alguns materiais tais como: em solos agrícolas (adubos e pesticidas), na indústria do papel, indústria Cerâmica (Faiança), indústria do Vidro e outras aplicações (tratamento de águas para consumo humano e cosmética).

➤ **Solos agrícolas (corretivos agrícolas)**

→ Foi realizado um estudo de modo a viabilizar a incorporação de lamas provenientes do corte de mármore, em solos para a sua correção, em que o objetivo seria aumentar o pH do solo, de modo a que este pudesse ser utilizado para fins agrícolas (Costa, 1995 *cit in.* Almeida *et al.*, 2007). No entanto, Soares (1997) (*cit in.* Almeida *et al.*, 2007), refere que o processo de secagem transforma as lamas em pedaços duros, o que é prejudicial para a produção de solos com fins agrícolas. O autor refere que é necessário a lama passar por tratamentos anteriores

que são economicamente incomportáveis, quando comparados com soluções tradicionais. O estudo indicia que os tratamentos mais indicados (a cozedura prévia e em seguida pulverização) podem acarretar uma futura contaminação atmosférica com poeiras destas lamas devido ao remexer do solo para fins de produção agrícolas.

- Coroneos *et al.* (1996), investigaram a utilização de lamas provenientes do corte de granito na remineralização de solos. Estudos semelhantes foram abordados por Leonardos *et al.* (2000) e Silva *et al.* (2005). Estes últimos autores referem que as lamas de granito possuem um efeito fertilizante nos solos que apresentam problemas de acidez.
- Machado *et al.* (2008) estudaram também a aplicação de lamas e resíduos oriundos do corte de rochas ornamentais para correção e cultivo de solos tropicais. Para tal finalidade foram amostrados dois tipos de solos (latossolo vermelho e latossolo vermelho-amarelo) e três tipos de corretivos da acidez do solo (calcário, resíduo de mármore e resíduos de rocha), em cinco doses de calagem (0%, 20%, 60%, 90% e 120%). Os resíduos incorporados mostraram potencialidade para serem utilizados como corretor de acidez do solo e como fonte de nutrientes, não apresentando diferenças significativas em relação à utilização de calcário.

➤ **Papel**

Existem estudos que demonstram a possibilidade de reciclar a lama de transformação da rocha ornamental na produção de polpa de papel, substituindo a parte vegetal de matérias-primas, utilizadas no seu fabrico (e.g. Soares, 1997(*cit in.* Almeida *et al.*, 2007)).

Martins (1996), evidencia a oportunidade de incorporar lamas de calcários e mármore de modo a substituir 10%, 20% e 30% das matérias-primas minerais caulino/carbonato de cálcio, geralmente usadas como carga na indústria do papel. O estudo demonstra a viabilidade para a reciclagem da lama com melhores resultados tendo em conta as propriedades físicas apesar da qualidade visual do papel ser inferior.

➤ **Vidro**

Babisk (2009) desenvolveu um estudo que consistiu na produção de vidros sodo-cálcicos a partir de resíduos de serragem de rochas ornamentais. Para isso foram utilizadas duas amostras de lama: uma proveniente do corte de granitos num engenho multilâmina e outra de mármore com fio diamantado. O autor constatou que os vidros produzidos apresentaram propriedades típicas de vidros sodo-cálcicos e similares aos vidros comerciais. Além disso, os vidros apresentaram uma coloração verde devido ao ferro presente no resíduo de granito, espectro ideal para vidros que possuem função de redução do calor, pois assim transmitem pouca radiação infravermelha e luz visível.

Rodrigues (2009) desenvolveu no seu trabalho a reutilização de resíduos visando a produção de lâ mineral. O objetivo do seu trabalho foi investigar o uso dos resíduos de corte de mármore e da mistura de resíduos de mármore e granitos como matéria-prima para a produção de lâ de vidro e lâ de rocha. Os resultados mostraram que a mistura do corte de mármore e granito é promissora visto que o resíduo de mármore é rico em CaO e o resíduo de granito é rico em SiO₂, tendo sido utilizado no estudo uma mistura de 78,3% e 91,6% em massa de resíduo como matéria-prima para o fabrico de lâ de vidro.

➤ **Colas e tintas**

Relativamente à aplicação de lamas na indústria das colas e tintas, segundo o estudo desenvolvido por Miletic *et al.* (2003), é demonstrado que a lama proveniente do corte de rocha ornamental pode ser utilizada para a sua produção, atingindo as propriedades de produto exigidas para produtos finais a comercializar.

➤ **Outras aplicações**

Apesar das aplicações já apresentadas nos pontos anteriores existe um conjunto muito variado de possíveis aplicações das lamas provenientes do processo de transformação de rocha ornamental, tendo em vista a sua reutilização em diversas áreas. Por exemplo, segundo Soares (1997) (*cit in*. Almeida *et al.*, 2007), é possível utilizar as lamas para tratamento de águas ácidas, fazendo aumentar o pH.

Outra aplicação foi testada no estudo de Oliveira *et al.* (2009) relativamente à viabilidade de aplicação dos resíduos de corte das rochas ornamentais em sabonetes, tendo os autores chegado a conclusões satisfatórias em relação à reação da pele humana ao produto final.

2.4. Estudos de caracterização das lamas de serragem

Como descrito anteriormente, as lamas provenientes da serragem de rocha ornamental são aplicadas como subproduto em misturas e composições de produtos finais. Em diversas áreas de aplicação este material é designado como fíler, pois enquadra-se nas suas características. O material fíler segundo a norma portuguesa (NP EN 13043:2004) é designado como “todo o material granular, de origem natural, artificial ou reciclada, cuja maior parte passa no peneiro 0,063 mm, que pode ser adicionado aos materiais de construção para lhes conferir certas propriedades.”

Miranda (2007) refere que as lamas provenientes da serragem de rocha ornamental apresentam algumas características físicas tais como granulometria fina e composição pré-definida, contudo a sua caracterização através de ensaios laboratoriais é essencial nos estudos para a sua reutilização.

Lima *et al.* (2010) caracterizaram uma lama obtida na serragem de granito e obtiveram os seguintes resultados para a composição granulométrica: 16,93% correspondente à fração argila ($< 2\mu\text{m}$); 81,61% equivalente à fração silte ($2\mu\text{m} < X < 60\mu\text{m}$) e 18,39% equivalente à fração areia ($60\mu\text{m} < X < 2000\mu\text{m}$) e dimensão média das partículas de $13,87\mu\text{m}$, comprovando assim a baixa granulometria deste resíduo.

Oliveira *et al.* (2009), após amostragem das lamas provenientes do corte de mármore, caracterizaram o resíduo através de ensaios para determinação da sua composição química e mineralógica, por meio de fluorescência de raios x (FRX) e difração de raios x (DRX). O resíduo foi também submetido a ensaios de análise granulométrica para se determinar a sua distribuição granulométrica e em cada fração determinaram-se os teores de ferro. Nos resultados de análise química podem observar-se altos teores de cálcio e de ferro, possivelmente, devido à presença de granalha e cal utilizadas no processo de corte. No resultado da difração de raio-X (DRX) do resíduo podem observar-se picos característicos de dolomite e calcite.

Nos resultados da distribuição granulométrica das lamas, associada à distribuição de ferro, em cada fração verifica-se que os teores de ferro diminuem à medida que a abertura dos peneiros diminui. Dessa forma, pode-se observar que a fração abaixo de 0,075 mm apresenta o maior valor percentual da amostra, cerca de 47%, em massa, e que nessa fração o teor de ferro não chega a 0,1%.

Freitas *et al.* (2012) determinaram para cada amostra recolhida de lama de granito e de mármore, em laboratório, os valores de pH, teor de humidade, teor de sólidos secos e teores de metais. Na determinação dos teores metálicos, foram utilizadas técnicas instrumentais como a absorção atómica, as quais indicaram boas correlações entre teores de ferro e cálcio total e entre crómio

total e o pH original. Além disso, foram detetados nos resíduos analisados, elevados valores de pH, resultantes do excesso de cal aplicada na serragem. Os autores determinaram ainda o teor de humidade médio, obtendo um valor de 44,3%, com 13% de desvio padrão.

Reis & Tristão (2007), compilaram estudos realizados por diferentes autores, que produziram e analisaram argamassas, após a incorporação de lamas provenientes do corte de rocha ornamental, tendo obtido as seguintes conclusões, relativamente à caracterização das lamas usadas nos estudos:

- a granulometria é bastante fina, com a maior parte das partículas menores que 0,075 mm;
- a massa volúmica, em geral, é menor que a do cimento e é maior que a da areia;
- a massa volúmica do resíduo é maior quando há maior quantidade de ferro, devido à granalha de aço presente no processo de serragem;
- o resíduo apresenta baixa possibilidade de reação pozolânica com cimento e cal;
- as lamas são maioritariamente compostas por elementos químicos como o óxido de alumínio (Al_2O_3), a sílica (SiO_2), o ferro (Fe_2O_3) e o cálcio (CaO). Estes dois últimos elementos são originários da granalha de aço e da cal presentes nas lamas. O resíduo possui ainda outros elementos químicos minoritários, tais como: MgO , SO_2 , K_2O , Na_2O , N_2O . O **Quadro 11** apresenta resultados da composição química de resíduos provenientes do corte de rocha ornamental obtidos pelos diversos autores citados no estudo.

Quadro 11 - Caracterização química do resíduo.
(adaptado de Reis & Tristão, 2007)

Elemento Químico	Freire e Mota (1995)	Calmon <i>et al.</i> (1998)	Moura <i>et al.</i> (2002)	Tenório <i>et al.</i> (2005)
SiO_2	29,02%	59,95%	41,70%	58,03%
Al_2O_3	6,94%	10,28%	8,5%	18,65%
Fe_2O_3	24,52%	6,05%	4,3%	4,79%
CaO	18,82%	6,51%	21%	2,8%
MgO	4,09%	3,25%	2%	-
K_2O	2,25%	4,48%	2,3%	1,51%
Na_2O	1,75%	3,39%	2,7%	1,02%

2.4.1. Especificações genéricas para aplicação em materiais industriais

Em termos de especificação da granulometria dos materiais para fins industriais, regra geral, esta é bastante fina, sempre inferior a 1 mm (Bhavan,2007). A especificação exigida de composição química para aplicação nas diferentes indústrias consumidoras difere conforme o tipo de produto final. Por exemplo, segundo o estudo de Luoto *et al.* (1998) e Buck (1997), a lã de vidro é constituída principalmente por SiO₂ (sílica) e outros elementos. A lã de rocha, é composta principalmente por SiO₂ (sílica), seguida por CaO e apresentando ainda outros constituintes (**Quadro 12**).

Quadro 12 - Composição química da lã de rocha e de vidro.
(Luoto *et al.*,1998 e Buck, 1997)

Elemento Químico	Luoto <i>et al.</i> (1998)		Buck (1997)	
	Lã de Rocha	Lã de Vidro	Lã de Rocha	Lã de Vidro
SiO ₂	45,9%	64,4%	45% - 52%	34% - 73%
TiO ₂	0,9%	0,06%	10% - 12%	0% - 22%
Al ₂ O ₃	11,9%	2,91%	8% - 15%	0% - 5,5%
FeO	8,2%	0,31%	8% - 13,5%	3% - 14,5%
MgO	11,6%	3,18%	5,5% - 6,5%	0% - 2%
CaO	18,5%	7,41%	0,8% - 3,3%	0,5% - 16%
Na ₂ O	1,8%	15,5%	0,8% - 2,0%	0% - 3,5%
K ₂ O	0,6%	1,42%	1,5% - 2,7%	0% - 0,8%
B ₂ O ₃	0%	4,9%	-	0% - 8,5%
MnO	-	-	0,1% - 0,3%	-

Segundo os autores, Lopes Velho *et. al* (1998), são descritas composições químicas de vários materiais, tais como diferentes tipos de vidros (**Quadro 14**), porcelanas (**Quadro 13**) e cimento (**Quadro 15**). Estes valores tabelados poderão servir de guia para definir a área de aplicação dos diferentes das em estudo lamas de modo a cumprir-se o objetivo de aproveitar estes materiais.

Quadro 13 - Intervalos de composição recomendados para diferentes tipos de porcelana.
(Lopes Velho *et. al*, 1998).

Tipos de porcelana	Caulino	Feldspato	Quartzo
Porcelana Mole	30% - 40%	25% - 40%	30% - 40%
Porcelana fina (louça de mesa)	40% - 60%	18% - 30%	12% - 35%
Porcelana artística	40% - 50%	22% - 40%	20% - 32%
Porcelana sanitária	25% - 40%	30% - 36%	24% - 45%
Porcelana química técnica	60% - 68%	17% - 30%	10% - 15%
Porcelana elétrica	40% - 50%	20% - 28%	22% - 40%

Quadro 14 - Composições químicas típicas de diferentes tipos de vidro.
(Harben, 1995, *cit. in* Lopes Velho et. al 1998)

Elemento Químico	Vidro de embalagem	Vidro plano	Fibra de vidro "E"	Vidro laboratório	Cristal chumbo	Vidro cerâmico	Fibra ótica
SiO ₂	73%	73%	54,5%	80,2%	55,7%	67,4%	61%
CaO	10%	8,2%	21,5%	0,1%	0,2%	2,7%	
Na ₂ O	14%	14%		4,2%			14%
K ₂ O			0,8%		12,1%		
Al ₂ O ₃	2%		14%	2,4%	0,3%	20,9%	3%
MgO		4%	1%				
B ₂ O ₃			7%	12,9%			22%
F ₂			0,4%				
Fe ₂ O ₃			0,3%				
TiO ₂			0,5%			1,8%	
ZrO ₂						2,0%	
Li ₂ O						3,9%	
Fe		0,1% – 0,6%					
SO ₃	1%						
PbO					31,4%		
ZnO						1,3%	

Quadro 15 - Intervalos de composição recomendados para cimento portland e composição de cimentos portugueses.
(Lopes Velho *et al.*, 1998)

Elemento Químico	Normal	Liz	Tejo	Secil
SiO ₂	19% - 25%	22,62%	19,98%	21,11%
Al ₂ O ₃	5% - 9%	5,07%	7,22%	5,64%
CaO	60% - 64%	66%	64,76%	65,88%
MgO	1% - 4%	2,20%	1,61%	1,34%
Fe ₂ O ₃	2% - 4%	2,03%	3,20%	3,46%
SO ₃	1% - 2%	1,73%	1,06%	1,43%
Perda rubro	-	0,26%	2,04%	0,93%

CAPÍTULO 3

Processos geradores das lamas em estudo

(página propositadamente em branco)

3.1. Introdução

Como já referido no capítulo anterior, no subsetor das rochas ornamentais, existe uma produção de elevadas quantidades de resíduos, sobretudo massa mineral rejeitada e lamas, durante as operações de transformação. Neste capítulo são abordados os processos geradores das lamas provenientes da serragem e corte de rocha ornamental, especificando os métodos e equipamentos utilizados na empresa onde foi realizado o estudo, sendo que também se abordam outras técnicas normalmente utilizadas no subsetor das rochas ornamentais.

3.2. Enquadramento geográfico da empresa

A unidade industrial, pertencente à empresa Incoveca Granitos S.A (**Figura 12**), de onde são originárias as lamas utilizadas neste estudo, é designada por “Caparrosa-Tondela”, sendo constituída por diversos pavilhões e equipamentos, ocupando uma área considerável. Nessa unidade especializada em transformação de rocha ornamental realizam-se operações de serragem, corte, polimento e acabamento de blocos de variados tipos de granito, mármore e calcário, extraídos de pedreiras em Portugal e/ou importados diretamente de diversos países.



Figura 12 - Unidade industrial “Caparrosa-Tondela” da empresa Incoveca Granitos S.A.
(adaptado de www.incoveca.pt)

A unidade está localizada no centro do país, na localidade Caparrosa, no concelho de Tondela, distrito de Viseu. As coordenadas geográficas do local são: 40°37'45.10"N e 8°4'57.21"W, conforme se pode observar na **Figura 13**.

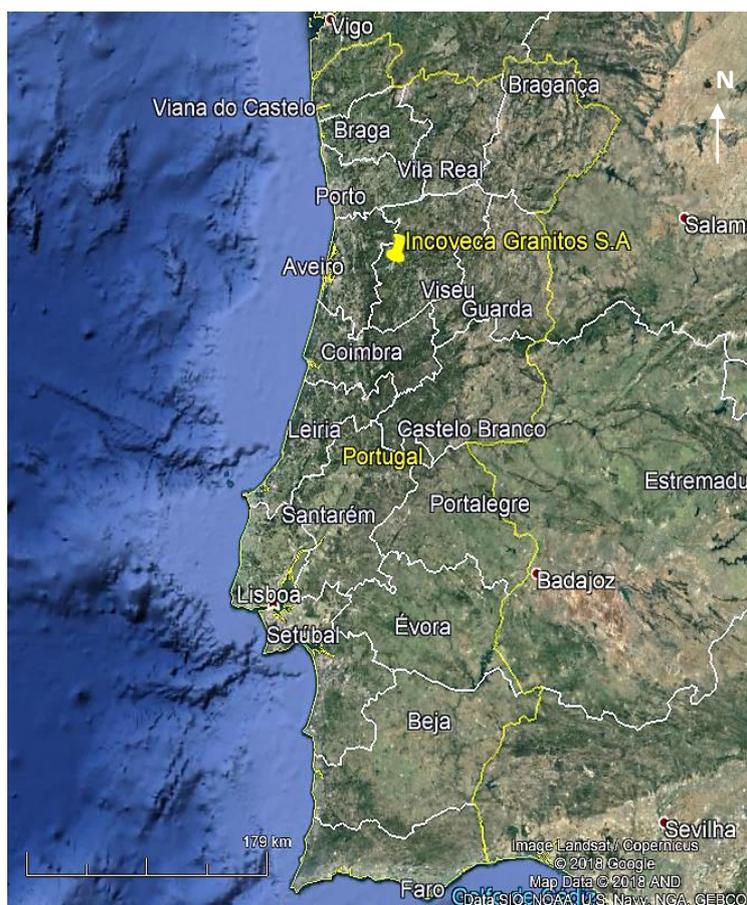


Figura 13 - Localização Geográfica da empresa Incoveca Granitos S.A (adaptado de Google Earth, 2018)

3.3. Pedras naturais que originaram as lamas

Neste estudo foram analisadas duas amostras de lamas originárias da serragem de duas pedras que têm como nomes comerciais, “Cinza Antas” e “Amarelo Rio Mel” e para além dessas foram ainda analisadas outras duas amostras, provenientes da desidratação no filtro-prensa, sendo que um filtro prensa se encontra na parte da fábrica de transformação dos granitos, recebendo lamas de variada composição e o outro está localizado junto à transformação de mármore e calcários, recebendo também lamas variadas dessa matriz correspondente.

Assim, os resíduos mais comuns nos filtros prensa provêm na sua maioria da transformação das seguintes rochas:

- **Granitos:** granito Pedras Salgadas, Amarelo Macieira, Rosa Monção, Rosa Porrinho e Negro Angola.
- **Mármore e Calcários:** Calcário Moleanos, o Calcário Moca Creme, o *White Cristal* e o Mármore Estremoz.

As rochas têm composições químicas variadas e são de vasta aplicação em Portugal, sendo que o Granito Negro Angola, é originário de Angola e o *White Cristal* é importado da Turquia.

3.4. O processo de transformação da rocha ornamental

O subsetor da rocha ornamental inclui as empresas de extração de mármore, calcários, granitos e outras rochas siliciosas e de pedras xistosas, bem como as empresas de transformação das mesmas. Assim, em Portugal, este subsetor inclui empresas que podem ser inseridas em três grupos, de acordo com a sua atividade industrial:

- as que apenas se dedicam à extração de blocos;
- as que possuindo extração também fazem a transformação ou valorização deste recurso;
- e as que apenas se dedicam à transformação.

Na **Figura 14** está representado o diagrama síntese do processo produtivo para o subsetor de rocha ornamental e utilizado na empresa onde se realizou o estudo, focando as matérias-primas utilizadas, bem como os resíduos gerados em todas as fases das atividades de extração e transformação (adaptado de INETI, 2001). Apesar da distinção entre os termos, vulgarmente utilizados na indústria das rochas ornamentais, “lamas” (resíduo proveniente da serragem de granitos) e “natas” (resíduo gerado no corte primário de mármore), decidiu-se ao longo deste trabalho adotar apenas a denominação de lamas, englobando assim os dois tipos.

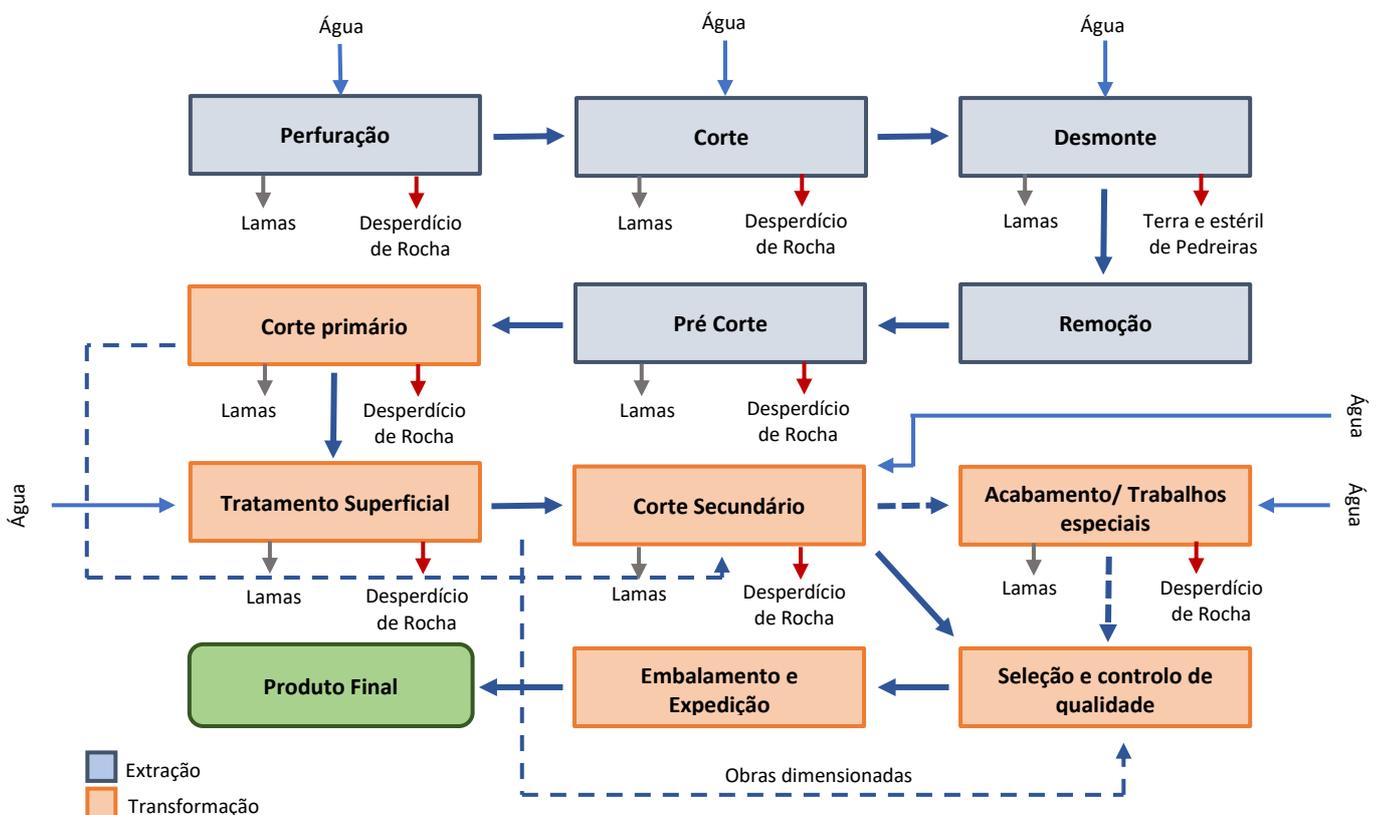


Figura 14 - Diagrama de processo do subsector das rochas ornamentais (adaptado de INETI, 2001).

Quando se consideram as etapas e processos de transformação de rochas ornamentais, deve-se referir que os blocos são trabalhados de acordo com o produto final pretendido. Na maior parte das unidades transformadoras não existem todas as fases do processo produtivo, observando-se normalmente uma especialização em determinadas fases. Em suma, existem dois grandes tipos de unidades transformadoras de rocha ornamental, sendo que em Portugal a maioria são empresas do tipo familiar onde apenas se realiza o corte de blocos em chapas para venda direta. No entanto, existem empresas especializadas que apresentam todas as fases necessárias para a obtenção em série dos produtos finais normalizados (adaptado de Spínola, 2015).

As principais fases de transformação das rochas ornamentais, podem compreender os seguintes processos:

- pré-corte;
- corte primário;
- tratamento superficial;
- corte secundário;
- acabamento/trabalhos especiais;
- seleção/controlo de qualidade;
- embalagem/expedição

3.4.1. Pré corte

Os blocos tipo para uma oficina de transformação de granitos devem normalmente possuir entre 4 m³ a 6 m³ e para qualquer tipo de rocha podem ter as seguintes dimensões finais (Jimeno, 1995):

- comprimento: entre 1,90 m e 3,00 m;
- largura: entre 1,20 m e 1,5 m;
- altura: entre 0,90 m e 1,20 m.

Claro está que a dimensão final do bloco a obter na pedreira depende da fracturação encontrada na mesma, pois vai condicionar a massa a retirar. Também o bloco final, após a subdivisão da massa retirada, deve ser obtido de acordo com o que é mais vendável, ou seja, deve ser adaptado ao mercado regional e internacional de acordo com cada caso.

Os blocos quando chegam à oficina de transformação, por vezes necessitam de uma operação de pré-corte que corresponde ao seu esquadriamento ou regularização da sua forma, de modo a tornar as suas faces planas, retirando-lhes alguns defeitos estruturais.

O objetivo desta operação é também melhorar o rendimento da etapa seguinte, denominada como corte primário, e pode ser realizada com a utilização de equipamentos como máquinas monolâmina (**Figura 15**) e máquinas monofio do tipo diamantado ou helicoidal.



Figura 15 - Máquina Monolâmina.

3.4.2. Corte primário

O corte primário corresponde ao processo de transformação do bloco em chapas com espessuras próximas daquelas que terão enquanto produtos finais, sendo que quando se pretende obter chapas de fina espessura (2 cm a 3 cm), os equipamentos mais utilizados são:

- engenhos multilâminas;
- corta blocos;
- engenhos multifio diamantado.

Sendo que os corta blocos e os engenhos multifios são também utilizados para a obtenção de grossas espessuras.

Segundo Ribeiro *et al.* (2005), o corte primário, também denominado como serragem é um processo de desgaste de superfícies. No caso dos mármore a tecnologia usada sofreu uma grande transformação nos anos 50/60 com a substituição da areia siliciosa por segmentos diamantados, através de engenhos de corte constituídos por lâminas, o que permite cortar o bloco em várias chapas de diferentes espessuras predefinidas e ao mesmo tempo.

Na serragem de blocos de granito a evolução deu-se com a introdução da granalha de aço e das lâminas estriadas em substituição da areia siliciosa e das lâminas lisas, o que conduziu a uma redução do tempo de serragem, melhorando a qualidade do processo.

A serragem de blocos realizada com engenhos multilâminas é a mais tradicional e mais utilizada atualmente, independentemente do material a ser processado, principalmente por conjugar elevada produtividade e maior flexibilidade. Este equipamento é menos dispendioso nos seus consumíveis e possui igualmente uma maior facilidade na componente operacional da assistência técnica.

Segundo Zuazo Torres (1995), Kaschner (1996) e Citran (2000), os engenhos multilâminas dividem-se em dois tipos principais, dependendo do tipo de material a ser serrado:

- para granito, de lâminas de aço e calda abrasiva, com movimento pendular ou semi-retilíneo;
- para mármore, de lâminas com segmentos diamantados e água, com movimento retilíneo.

Em seguida referem-se os equipamentos utilizados na serragem/corte de granitos e mármore, que deram origem às lamas em estudo nesta dissertação, sendo também descritos os equipamentos normalmente utilizados no processo de corte primário de rocha ornamental.

3.4.2.1. Engenho multilâminas

Atualmente os engenhos multilâminas de movimento pendular são os mais utilizados na serragem de blocos de granito. Apesar de constituírem uma evolução de engenhos para corte de mármore, os modelos atuais sofreram alterações para serem utilizados na serragem de granitos e atingirem velocidades de serragem em torno dos 4 cm/h. Para tal, todos os elementos mecânicos e estruturais foram redimensionados para suportarem os maiores esforços envolvidos na transformação de granitos (e.g. Thompson, 1990; Citran, 1994; Stellin Júnior, 1998; Pedrosa, 2003).

➤ **Constituição do engenho e princípios do processo de serragem**

O engenho multilâminas (**Figura 16**), é uma estrutura em forma de pórtico, em cujas extremidades se encontra suspenso um quadro metálico porta-lâminas bastante rígido (grade) onde as lâminas de aço são colocadas espaçadas e alinhadas paralelamente. No seu funcionamento, as lâminas, juntamente com uma calda abrasiva, provocam o atrito e desgaste da superfície do bloco de rocha, possibilitando o seu corte obtendo-se as chapas



Figura 16 - Engenho multilâminas Gaspari Menotti JM 6000.
(adaptado de Costa, 2011)

O movimento pendular é conseguido por um sistema de biela-manivela com o auxílio de um volante (**Figura 17**) que tem como funções:

- ajudar a vencer o momento de inércia do quadro porta lâminas;
- ajudar ao funcionamento do motor.



Figura 17 - Vista lateral do engenho (pormenor do volante e biela).
(adaptado de Costa, 2011)

Antes do processo de serragem se iniciar, os blocos são preparados sendo colocados, através de argamassa de cimento, no carro porta-blocos de forma a evitar que ocorram vibrações durante a serragem e conseqüentemente defeitos estruturais na obtenção das chapas. No quadro as lâminas são devidamente tensionadas e com os separadores vão ditar a espessura das chapas a obter.

O carro porta-blocos é dotado de motorização deslocando-se sobre carris até ao interior do engenho onde será imobilizado com cunhas de aço contra batentes fixos, para que se inicie a serragem.

O processo de serragem realiza-se quando o movimento pendular imprimido às lâminas de aço, com a ajuda da calda abrasiva, promove a ação de corte da granalha, por choque no momento da batida, e por abrasão na fase de arrastamento do quadro porta-lâminas, a cada ciclo da biela, originando-se assim pequenas desagregações dos minerais constituintes da rocha (Ribeiro, 2005).

A calda abrasiva é lançada sobre os blocos por um sistema de chuveiros, com movimento oscilatório transversal permanente, durante todo o processo de serragem, o que permite o espalhamento homogêneo sobre os blocos a serrar (**Figura 18**). Isto fará com que a granalha contida na mistura acabe por se interpor entre a lâmina e a rocha a cortar funcionando como o elemento de corte ativo.



Figura 18 - Sistema de chuveiros do engenho multilâminas.

No final do processo de serragem, antes da retirada das chapas serradas, de modo a garantir a verticalidade das mesmas evitando a sua flexão, são colocadas entre elas cunhas de madeira.

➤ **Lâminas de aço**

As lâminas de aço, além de ferro (Fe), são constituídas por carbono de elevado teor e outros elementos químicos minoritários, de acordo com o **Quadro 16**. Possuem uma elevada resistência à tração, de modo a resistir aos esforços a que são submetidas, sendo a variação da resistência média para o corte de granitos, de 7000 a 9000 MPa (adaptado de Perfetti et. al, 1993).

Quadro 16 – Composição química das lâminas de aço.
(adaptado de Costa, 2011)

Carbono (C)	Manganês (Mn)	Sílica (Si)	Fósforo (P)	Enxofre (S)
0,64 – 0,82 %	0,75 % - 1,5 %	0,15 – 0,90 %	≤ 0,04 %	≤ 0,04%

A espessura das lâminas (4 mm – 5 mm) pode ser motivo de desacordo entre os técnicos do sector, sendo que tem pouca influência sobre a qualidade da serragem, mas influencia bastante a espessura do corte (sulco) e por consequência a quantidade de matéria-prima desperdiçada na serragem (Ribeiro, 2005).

Relativamente às características da superfície das lâminas para a serragem de granitos, podem ser utilizadas as do tipo lisas, caneladas ou com relevo. O tipo utilizado neste estudo é o canelado, na medida em que permite que a calda abrasiva penetre no corte de uma forma mais eficaz, através dos rasgos transversais da lâmina, permitindo o acesso da granalha à zona onde efetivamente faz falta, ou seja, à zona de corte (adaptado de Costa, 2011).

➤ **Calda abrasiva**

A calda abrasiva é constituída por granalha de aço de elevada dureza, água, cal hidratada, por fragmentos metálicos provenientes do desgaste das lâminas por fragmentos de rocha. Os constituintes têm diferentes funções no processo de serragem:

- Granalha - é o elemento de corte e deve possuir arestas vivas e granulometria definida;
- Água – permite o arrefecimento das lâminas e serve de veículo para o abrasivo (mantendo em suspensão a granalha e conduzindo-a da bomba do poço até à região de corte);
- Cal - evita a oxidação da granalha e dos minerais de ferro presentes na rocha a cortar e também confere viscosidade à calda.

A preparação da calda abrasiva inicia-se com a granalha de aço em conjunto com a cal hidratada e a água a serem lançadas no poço principal de mistura por um doseador, em quantidades pré-definidas, no sistema de controlo do engenho (**Figura 19**), sendo que as quantidades relativas são função das características da rocha em processo de transformação, da quantidade de lâminas utilizadas e da velocidade de serragem previsível (adaptado de Costa, 2011).

A calda é depois bombeada para o sistema de chuveiros, anteriormente referido, que assegura um fluxo constante e homogéneo às lâminas, realizando um movimento transversal sistemático, de modo a espalhar a calda sobre os blocos. De seguida a calda cai por baixo do bloco e é reenviada novamente para o poço principal de mistura, após ter sido lavada e expurgada dos detritos.

Esta lavagem faz-se ao passar a calda abrasiva por um separador ciclone (**Figura 19**), a espaços de tempo pré-definidos, com o objetivo de recuperar a granalha ativa (aquela que fica retida no peneiro de malha 40), sendo esta a parte menos densa da mistura, voltando assim a entrar automaticamente no circuito (adaptado de Stellin Júnior, 1998).



Figura 19 - Sistema de controlo do engenho (à esquerda) e poço principal de mistura (à direita).

No fluxograma da **Figura 20** está representado esquematicamente o sistema de mistura e bombeamento da calda abrasiva, onde se observa o sistema de chuveiro, lavagem, expurgo dos detritos, a recuperação da granalha ativa.

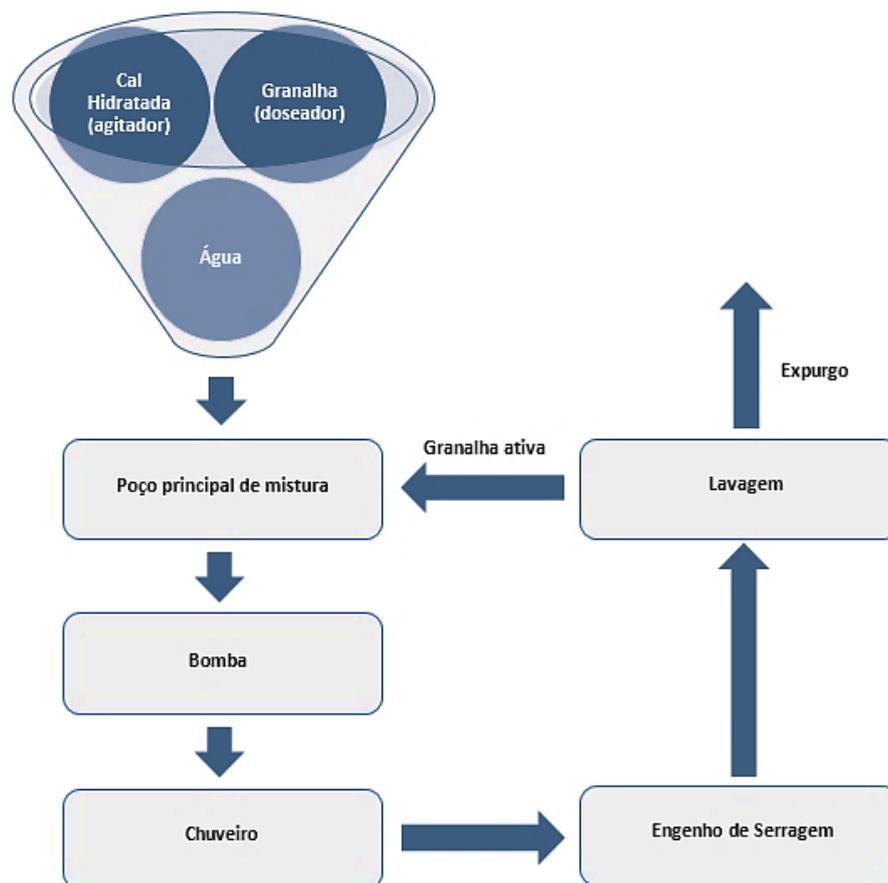


Figura 20 - Fluxograma representativo do sistema de mistura e bombeamento da calda abrasiva. (adaptado de Costa, 2011)

O controlo da calda abrasiva durante o processo de serragem é um fator de extrema importância para a capacidade de serragem dos engenhos, permitindo um aumento da velocidade de corte e melhoria da qualidade do produto serrado.

A quantidade de partículas finas provenientes do bloco a ser serrado, é igualmente um parâmetro essencial no controlo da calda abrasiva, devido à eficiência da serragem. Quando a percentagem desses detritos se situa em valores inferiores ao intervalo padrão (33% - 45%), a serragem está a realizar-se de forma defeituosa, sendo que valores superiores ao intervalo apenas influenciam a serrabilidade sempre que os materiais tenham uma reduzida tendência para originarem caldas mais viscosas (Jimeno, 1995).

Quanto à composição da calda abrasiva, o ideal é que para cada tipo de rocha se obtivesse uma calda abrasiva com as características e composição adequadas, no entanto, o que por vezes se verifica é que as caldas abrasivas servem para serrar uma carga com três blocos de rochas, de características geológicas distintas. Apesar da composição da calda abrasiva poder variar, diversos autores sugerem composições e características típicas, tal como se observa no **Quadro 17**.

Quadro 17 - Composições e características típicas da calda abrasiva.
(adaptado de Giorgio, 1982; Perfetti *et al.*, 1993; Jimeno, 1995; Coimbra Filho, 2006)

Parâmetro	Giorgio (1982)	Perfetti <i>et al.</i> (1993)	Jimeno (1995)	Coimbra Filho (2006)
Densidade	1,6 - 1,9 g/L	1,45 - 1,7 g/L	1,45 - 1,7 g/L	Não quantificado
Água	500 - 700 g/L (35 a 40%)	500 - 700 g/L	Não quantificado	66,30 %
Detritos de rocha	600 - 900 g/L (45 a 50%)	400 - 700 g/L	Não quantificado	29,40 %
Granalha	200 - 250 g/L (8 a 12%)	Não quantificado	100 - 250 g/L	3,10 %
Detritos das lâminas	50 - 90 g/L (3 a 5%)	Não quantificado	Não quantificado	Não quantificado
Cal	10 - 30 g/L (1,5 a 2 %)	10 - 50 g/L	7 - 50 g/L	1,20 %

Os diferentes autores (e.g. Giorgio, 1982; Perfetti *et al.*, 1993; Jimeno, 1995; Coimbra Filho, 2006) destacam que só o melhor conhecimento, aceitação e o testar das diferentes conclusões quanto à composição da calda abrasiva, permitem à indústria alcançar de forma mais objetiva um eficaz desempenho geral do processo de corte, proporcionando assim, o desenvolvimento de equipamentos e mecanismos já existentes, bem como o contributo para o desenvolvimento de novos modelos, que tornem o processo mais eficaz e rentável.

➤ **Granalha de aço**

A granalha de aço é a verdadeira ferramenta de corte, atuando como desagregador das partículas, enquanto que as lâminas têm como principal função conduzi-la na direção de corte durante o processo, sendo assim, quando usada de forma eficiente, capaz de reduzir custos e tempos de serragem. Segundo Finnie (1960) e Rossi *et al.* (1997), a serragem pode ser considerada um processo de desgaste entre três corpos baseado na teoria da tribologia de Zum-Gahr (1987), onde a granalha, como abrasivo, desliza entre duas superfícies (lâmina e rocha), como se observa na **Figura 21**.



Figura 21 - Abrasão a três corpos.
(adaptado de Zum-Gahr, 1987)

Existem dois tipos de granalha de aço, o tipo esférico e o tipo angular (**Figura 22**), no entanto o mais utilizado é o formato angular com alguma mistura, em menor quantidade, de granalha esférica.



Figura 22 - Granalha de aço angular.
(adaptado de Costa, 2011)

Quanto à composição química a granalha deverá estar de acordo com os intervalos apresentados no **Quadro 18**, de modo a apresentar a qualidade necessária ao seu uso no processo de serragem.

Quadro 18 - Composição química da granalha.
(adaptado de Costa, 2011)

Ferro (Fe)	Carbono (C)	Sílica (Si)	Manganês (Mn)	Fosforo (P)	Enxofre (S)
96,00 - 98,30 %	0,85 - 1,20 %	0,40 - 1,50 %	0,35 - 1,20 %	≤ 0,05 %	≤ 0,05 %

A granalha utilizada na empresa é de densidade superior a 7,4 g/cm³, sendo do tipo GH em termos de dureza (**Quadro 19**) e do tipo G25 em termos de granulometria (**Quadro 20**), visto ser a mais adequada ao conjunto de granitos serrados.

Quadro 19 - Referenciação da granalha em função da dureza.
(adaptado de Costa, 2011)

Referência	GH	GL	GP
Dureza (HRc)	63 - 65	56 - 60	40 - 50

Quadro 20 - Distribuição dimensional da granalha – calibre.
(adaptado de www.sinoabrasives.com/documents/DOC_SAE_J444.pdf)

Malha nº	Crivo (mm)	Referência da Granalha									
		G-10	G-12	G-14	G-16	G-18	G-25	G-40	G-50	G-80	G-120
7	2,800	Passa tudo									
8	2,360		Passa tudo								
10	2,000	80%		Passa tudo							
12	1,700	90%	80%		Passa tudo						
14	1,400		90%	80%		Passa tudo					
16	1,180			90%	75%		Passa tudo				
18	1,000				85%	75%		Passa tudo			
20	0,850										
25	0,710					85%	70%		Passa tudo		
30	0,600										
35	0,500										
40	0,425						85%	70%		Passa tudo	
45	0,355										
50	0,300							80%	65%		Passa tudo
80	0,180								75%	65%	
120	0,125									75%	60%
200	0,075										70%

➤ **Cal hidratada**

A cal hidratada ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) é um pó extremamente fino e de elevado grau de brancura (**Figura 23**). Este material, em conjunto com as finas partículas minerais resultantes da serragem, tem a função de manter a granalha em suspensão na calda, impedindo que se deposite por ação do seu peso próprio. Só desta forma a granalha poderá manter-se em movimento no circuito (poço principal de mistura; bombagem; chuveiro) e assim chegar na quantidade adequada à zona de corte. A cal hidratada tem também como função impedir a oxidação da granalha de aço e a consequente contaminação das chapas de granito durante a serragem (adaptado de Coimbra Filho, 2006).



Figura 23 - Cal hidratada utilizada na calda abrasiva.
(www.materiaisalmeida.com.br/jpg)

3.4.2.2. Engenho multilâminas de movimento semi-retilíneo

Este tipo de engenho é usado exclusivamente no corte de granito e foi desenvolvido com o objetivo de aumentar a velocidade de serragem (velocidade de descida em cm/h). A ligação entre o quadro porta-lâminas e o sistema de rotação do motor é feita por meio de articulações excêntricas duplas, que transformam parte do movimento pendular em horizontal, conferindo um contacto maior e mais longo entre as lâminas e o bloco, no entanto a renovação da calda abrasiva é pouco eficaz ao longo da serragem (AIM, 2002 *cit. in* Ribeiro, 2005).

3.4.2.3. Engenho multilâminas com segmentos diamantados

Este tipo de engenho (**Figura 24**) possui movimento retilíneo e é utilizado para o corte de blocos de mármore e calcários em chapas, cuja espessura é determinada pelo espaçamento entre as lâminas de aço, compostas por segmentos diamantados. O corte é realizado por via húmida através de um sistema indispensável de dispersão de água pelas lâminas, que tem um efeito refrigerador dos segmentos diamantados (permitindo manter as condições ótimas de corte) e que serve ainda para a remoção dos detritos da zona de corte.

Este engenho é constituído por uma estrutura em forma de pórtico, metálica ou em betão armado, em cujas extremidades se encontra o quadro metálico rígido (grade) onde se fixa um conjunto de lâminas diamantadas (**Figura 25**).



Figura 24 - Engenho de lâminas diamantadas - modelo SFERA 80/800.



Figura 25 - Vista lateral do Engenho - modelo SFERA 80/800.
(catálogo SIMEC – *Telai per marmo, Sfera*)

O movimento é gerado pela rotação do volante de um motor, que controla os movimentos alternativos do quadro, através de duas manivelas ligadas ao eixo do volante pelas extremidades e que transmitem o movimento à grade, através de duas bielas (adaptado de Frazão, 2015).

O corte é realizado num movimento horizontal de vaivém do quadro porta lâminas, de velocidade constante e de um movimento ascensional do bloco, assente numa plataforma horizontal, à qual é impressa uma velocidade variável (definida pelo operador).

As lâminas neste tipo de engenhos são formadas por uma chapa em aço, com espessuras de 2 mm a 5 mm normalmente. Segundo Wang & Clausen (2003) o aço constituinte é geralmente do tipo laminado, com alto teor em carbono, cuja resistência média à tração ronda entre os 5 e os 6 GPa.

Ao longo do seu comprimento estão soldados os segmentos diamantados (**Figura 26**), compostos maioritariamente por uma liga metálica (matriz), que se vai desgastando e expondo os grãos de diamante que realizam o corte. Existem vários processos de manufatura dos segmentos, contudo a sua constituição básica é, geralmente: cobalto, cobaltite, diamante e bronze, combinados em diferentes proporções para atingir a melhor abrasão da rocha consoante as suas características.



Figura 26 - Pormenor do segmento diamantado (x) incrustado na lâmina.
(www.diamant-board.com)

3.4.2.4. Corta blocos e engenho multidisco

Segundo Alencar *et al.* (1996), a máquina corta blocos e o engenho multidisco são equipamentos que apresentam uma estrutura composta por colunas metálicas e base em betão que suportam uma trave ou viga ponte, onde estão dispostos o mandril e o conjunto para acionar o disco.

O sistema de corte nestes equipamentos é resultado da rotação, numa direção constante, associada a uma elevada velocidade periférica que promove a rápida remoção dos detritos de rocha possibilitando a retenção dos diamantes devido à acumulação de matriz na parte posterior ao diamante, e que tem um efeito de apoio durante o corte (Konstanty, 2002).

No corte através de disco, em comparação com a lâmina do engenho, o movimento rotacional numa direção constante, melhora a remoção dos detritos e produz uma melhor ação dos grãos de diamante. As forças aplicadas aos diamantes são muito diferentes no corte com disco e com lâminas. Para as lâminas, que geralmente atuam a baixas velocidades (cerca de 2m/s), o impacto sobre os diamantes é baixo, já que nos discos, que atuam a grandes velocidades rotacionais (geralmente nunca inferiores a 25m/s), apresenta um maior impacto (Konstanty, 2002).

➤ Corta blocos

Este tipo de equipamento (**Figura 27**) utiliza um único disco diamantado composto por segmentos abrasivos aglomerados numa liga metálica. Os mais comuns são os de diâmetro acima de 200cm de diâmetro, para o corte de blocos de granito.



Figura 27 - Corta blocos
(www.minorca.industria.ws)

Este equipamento é utilizado como alternativa ao engenho multilâminas, no corte de chapas de grossas espessuras (70 cm), permitindo, apesar do seu custo de aquisição elevado, um ciclo produtivo mais rápido e um melhor acabamento superficial das mesmas. Os discos executam cortes verticais e paralelos, sendo a profundidade máxima de corte possível de, aproximadamente, 1/3 do diâmetro do disco.

O movimento do disco pode ser móvel, funcionando através do avanço e recuo do mandril, ao longo da ponte, e a sua descida progressiva em cada passagem sobre o bloco de rocha a serrar. Também pode permanecer fixo e sob ele movimenta-se o carro porta-blocos numa ponte sobre uma base de cimento, num movimento lento que permite ao disco cortar o bloco, a cada passagem do carro.

➤ **Engenho multidisco**

O Engenho multidisco é um equipamento utilizado especificamente para produção de chapas de pequena espessura (2 a 3 cm) com determinadas larguras, definidas pelas dimensões finais que deve ter o produto e pelo diâmetro do disco de corte (Cetemag, 2000).

Existem dois tipos de engenhos multidisco mais utilizados: o engenho de duas (**Figura 28**) e de quatro colunas. Ambos apresentam praticamente o mesmo processo de corte, que se baseia nos movimentos de rotação dos discos e de translação do mandril. Os discos executam cortes verticais e paralelos numa ou várias passagens do mandril, até à mesma profundidade máxima de corte do corta blocos do tipo monodisco.



Figura 28 - Engenho multidisco.
(www.gasparimenotti.it)

3.4.2.5. Corte com fio diamantado

O corte primário, efetuado com recurso ao fio diamantado, é das tecnologias mais recentemente utilizadas no corte de rocha ornamental, encontrando-se numa fase de desenvolvimento técnico e de aplicação em oficinas de transformação de granito em Portugal.

O fio cuja configuração é definida tendo em atenção principalmente o tipo de rocha a cortar, funciona como uma espécie de “serra-fita” que gira a determinada velocidade, é tensionada sobre o bloco e conduzido por um sistema de polias e acionado por um motor elétrico (adaptado de Alencar *et al.*, 1996).

Nas empresas transformadoras de rocha ornamental são utilizados os equipamentos monofio (**Figura 29**) para obter peças de grossa espessura com forma geométrica muito precisa e os equipamentos multifio (**Figura 30**) para obter chapas de pequena espessura (2 cm a 3 cm).



Figura 29 - Máquina de Fio diamantado Micheletti.



Figura 30 - Máquina Multifios Pedrini.

Na empresa onde realizou este estudo, como já referido, o valor atual dos volumes de lamas produzidas, através do processo de corte dos equipamentos descritos neste subcapítulo (3.4.2), ronda as 2540 toneladas/ano, das quais 440 toneladas são depositadas em aterro licenciado para o efeito, e 2100 toneladas são aproveitadas para produção de *tout-venant*, após serem submetidas ao processo de acondicionamento, por desidratação no filtro prensa.

3.4.3. Acondicionamento das Lamas

Logo após o expurgo das lamas, estas serão conduzidas para tanques de deposição, que podem apresentar as mais variadas formas e dimensões, sendo que a separação das lamas da água e consequente espessamento pode ser efetuada de diversos modos, entre eles:

- tanques ou bacias de decantação;
- desidratação por filtro-prensa (**Figura 31**).



Figura 31 - Estação de tratamento de lamas na empresa Incoveca Granitos, S.A.

Esta última técnica é a utilizada na empresa onde foi realizado o estudo e consiste na captação da lama dos tanques (1), onde é adicionado floculante por meio do doseador (2) e conduzida para o decantador (3) suspenso na forma de funil. Por gravidade e por ação do floculante, a lama é depositada no fundo do decantador e conduzida até aos equipamentos filtro-prensa (7), que compactam a lama, dando origem a placas de lama prensadas (**Figura 32**), onde se otimiza a fase final de desidratação. A água resultante dessa fase, ainda com uma pequena quantidade de lama, retorna ao tanque de captação e inicia-se novamente o ciclo. A água vinda do decantador (3) é dirigida para um tanque de água tratada (8) e de lá retorna às máquinas da oficina para reutilização (Fraccaroli & Balzan, s.d) (**Figura 33**).



Figura 32 - Lamas prensadas (bolos).

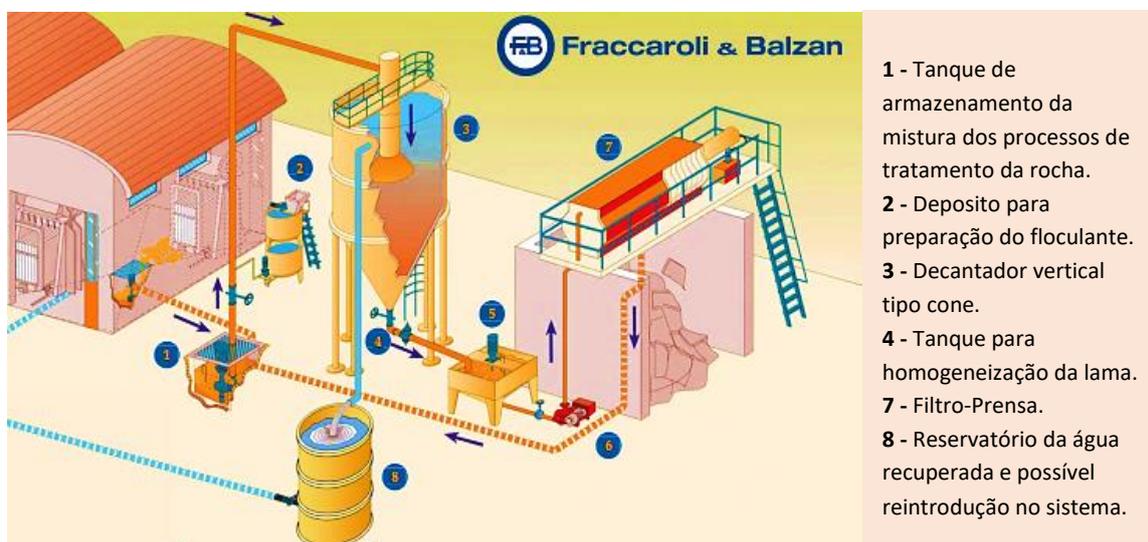


Figura 33 - Sistema de desidratação filtro-prensa.
 (adaptado de Fraccaroli & Balzan (s.d))

A nível industrial, nomeadamente na indústria de transformação de rocha ornamental é comum a utilização de equipamentos filtros prensa de placas (volume fixo) e de membranas (volume variável) na desidratação de lamas. Os filtros prensa convencionais consistem em blocos de placas verticais revestidos por telas filtrantes entre as quais a lama é injetada sob pressão e onde o filtrado é recolhido antes de se separar as placas (adaptado de Comissão Europeia, 2001).

A calda abrasiva expurgada do processo de serragem com engenhos multilâminas apresenta valores elevados de pH, principalmente devido ao uso de cal, mesmo assim, ainda que com pH alcalino, não apresenta prejuízos à qualidade do processo industrial de serragem de blocos, podendo assim a água regressar sem problema ao processo de transformação, após a desidratação por filtro prensa (adaptado de Calmon & Silva, 2006).

Através da utilização dos filtros é possível alcançar um nível elevado de desidratação (menos humidade nas lamas), entre 30% a 45% em geral, enquanto que pelo processo de sedimentação através de tanques, pode apenas chegar aos 25%. Os custos de investimento, porém, são bastante elevados, sobretudo para altas capacidades. Este tratamento acarreta também vantagens para a redução do volume de lamas e, como consequência, redução do mesmo volume a transportar e depositar em aterro.

Em suma, a desidratação por filtro-prensa é uma tecnologia que favorece vários aspetos operacionais, económicos e ecológicos no tratamento de lamas de corte primário, com as seguintes vantagens:

- redução do volume de lamas, com conseqüente diminuição da área ocupada na empresa;
- maior facilidade de manuseamento e de transporte;
- menor área ocupada em aterro;
- minimização dos custos de transporte e deposição;
- menores gastos com mão-de-obra e equipamento para esvaziamento de tanques;
- maior reaproveitamento de água para o processo de corte.

(página propositadamente em branco)

CAPÍTULO 4

Metodologias aplicadas para a caracterização das lamas

(página propositadamente em branco)

4.1. Introdução

Neste capítulo abordam-se as metodologias que foram aplicadas na caracterização das amostras utilizadas nos casos de estudo. Essa caracterização teve como objetivo a avaliação quantitativa e qualitativa das principais características físicas e químicas das amostras.

De acordo com o esquema apresentado na **Figura 34**, em primeiro lugar descreve-se o processo de recolha das amostras, fazendo-se referência aos locais de amostragem na empresa, assim como à designação atribuída a cada amostra de lama. De seguida, expõe-se o modo e os métodos utilizados na preparação das amostras e por último referem-se os procedimentos seguidos nos ensaios laboratoriais realizados nas lamas em estudo.



Figura 34 - Metodologia utilizada no estudo de caracterização e aproveitamento das lamas.

No **Quadro 21** indicam-se os parâmetros a analisar, a designação do ensaio laboratorial e a norma ou especificação aplicada.

Quadro 21 - Ensaio de caracterização das lamas.

Parâmetros a analisar	Ensaio	Norma
Granulometria	Análise granulométrica por peneiração	LNEC E239 - 1970
	Análise granulométrica por sedimentação (método de atenuação por raios x)	-----
Massa volúmica	Determinação da massa volúmica	LNEC E64 – 1979
Qualidade do teor de Finos	Azul de metileno	NP EN 933-9:2011
Composição química a nível quantitativo e qualitativo	Análise química quantitativa por espectrometria de fluorescência de raios x (equipamento portátil)	Procedimento LGMC
Composição química do Sódio (Na) a nível quantitativo e qualitativo	Análise química quantitativa do Sódio (Na) por espectrofotometria de absorção atómica	Procedimento LT

4.2. Recolha das amostras

Foram definidos quatro locais de amostragem, de acordo com os diferentes locais de expurgo das lamas existentes na empresa, sendo que o método de recolha foi realizado de forma a obter amostras representativas de cada um dos resíduos em estudo.

A lama foi recolhida e acondicionada em frascos adequados (**Figura 35**) e sacos plásticos (“bolos” do filtro prensa) cuidadosamente fechados, de forma a evitar o contacto com o ar impedindo assim a alteração do teor em água da amostra.

Após a recolha, as lamas foram identificadas e transportadas para o laboratório onde se procedeu ao seu armazenamento para posterior análise e estudo.



Figura 35 - Frasco de recolha de amostra.

Foram recolhidas, nos engenhos multilâminas, as lamas provenientes da serragem de duas cargas distintas de Granito. A primeira, obtida da serragem do Granito Cinza Antas, foi designada por LCA (Lama Cinza Antas) e a segunda, resultante da serragem do Granito Amarelo Rio Mel, foi designada por LARM (Lama Amarelo Rio Mel).

A sua recolha foi realizada na grelha de escoamento do engenho que recebe o expurgo das lamas e acondicionada em frascos. O local de amostragem está localizado no piso inferior, por baixo do engenho, conforme se observa na **Figura 36**.

Nesse mesmo piso inferior, foi ainda recolhida do mesmo modo uma amostra dos mesmos materiais no poço de mistura, onde existe um separador ciclone, que recebe e controla o expurgo de calda abrasiva oriunda dos engenhos multilâminas (**Figura 37**).



Figura 36 - Local de recolha de amostras 1 – Grelha de escoamento que recebe o expurgo das lamas.



Figura 37 - Local de recolha de amostras 2 – poço de expurgo da calda abrasiva.

Em seguida, foram recolhidas amostras no filtro prensa, que recebe o expurgo de todas as lamas oriundas da serragem de granitos variados, nos engenhos multilâminas (**Figura 38**).

A designação adotada para esta amostra foi FPEM (Filtro Prensa Engenho Multilâminas). Estas lamas, após o processo de desidratação descrito em 3.4.3., possuem valores de desidratação de 30 a 45 %, pelo que a sua recolha foi realizada em sacos plásticos.



Figura 38 - Local de amostragem 3 – Filtro Prensa com lamas da serragem de granitos.

As últimas amostras foram recolhidas junto à oficina de transformação dos mármore e calcários, no filtro prensa, que recebe o expurgo das lamas provenientes do corte de mármore/calcários variados (**Figura 39**). Estas lamas, à semelhança das anteriores, foram recolhidas em sacos plástico devido ao seu baixo teor de humidade. A designação adotada para a amostra foi FPMC (Filtro Prensa Mármore e Calcários).



Figura 39 - Local de amostragem 4 – Filtro prensa com lamas do corte de mármore e calcários.

4.3. Preparação das amostras

Após a recolha das amostras, é fundamental realizar uma correta preparação das mesmas para a posterior execução dos ensaios de caracterização e aproveitamento das lamas. As amostras, após o seu transporte, apresentavam alguns grumos coesos por diminuição do teor em água, tendo sido necessário realizar a desagregação do material. Após serem pesadas quando chegadas ao laboratório (**Quadro 22**), foi utilizado o peneiro 200 ASTM, de abertura 0,075 mm, próprio para lavagem de solos, de modo a obter a desagregação das lamas. (**Figura 40**).



Figura 40 – Preparação da amostra proveniente dos engenhos multilâminas.

Em seguida colocaram-se as amostras, já desagregadas, nas estufas da marca *MMM Group e Memmert* (**figura 41 e 42**), a 105-110°C, de modo a perderem a quantidade de água que ainda pudessem conter.



Figura 41 – Material para secagem na estufa.



Figura 42 – Material seco na estufa.

Após atingirem massa constante em duas pesagens consecutivas, foram arrefecidas à temperatura ambiente. Devido aos grumos que apresentavam, foram sujeitas a um processo de desagregação manual, através de um pilão e um almofariz (**Figura 43**).



Figura 43 - Pilão e almofariz para desagregação das amostras.

Este processo foi realizado de modo a não alterar de forma substancial a dimensão original das partículas. Na **Figura 45**, pode observar-se o aspeto inicial e final das lamas, após este processo. É possível ainda observar que as três amostras LCA, LARM E FPEM apresentam uma tonalidade cinza, enquanto que a amostra FPMC apresenta uma tonalidade mais esbranquiçada, como seria de esperar devido à presença de carbonato de cálcio.

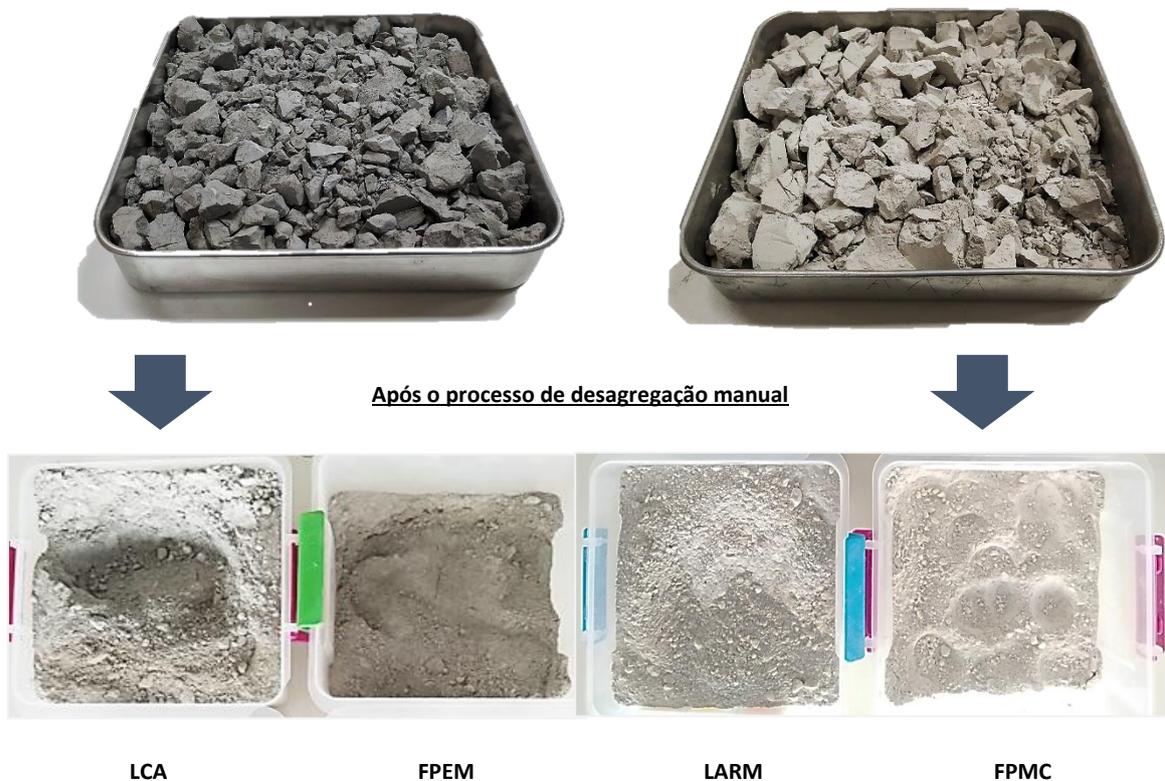


Figura 44 - Aspeto das lamas, antes e após a desagregação.

Durante o processo de desagregação, o material foi separado, tendo-se obtido uma fração acima dos 0,075 mm (material retido) e uma outra abaixo dos 0,075 mm (material passado). Estas frações foram pesadas e fez-se uma análise da proporção relativamente à massa da amostra inicial, de modo a perceber se o material menor que 0,075 mm representava a “maior fatia” de cada uma das amostras de lama em estudo. Esta análise teve como objetivo perceber se o material apresentava características aproximadas ou iguais a um fíler (granulometria maioritariamente inferior a 0,063 mm), por ser a granulometria aconselhável para utilizar no seu aproveitamento.

O pressuposto verificou-se através dessa análise (**Quadro 22**), onde se observa que a fração de material menor que 0,075 mm constitui cerca de 90% das quatro amostras de lama recolhidas (LCA, LARM, FPEM e FPMC). Assim, utilizou-se este material nos ensaios de aproveitamento o que resultou na realização de ensaios de caracterização nesta fração, para perceber em que medida os parâmetros analisados influenciam o tipo de aproveitamento que foi estudado.

Quadro 22 – Percentagem das frações em estudo.

Amostra	Massa Inicial (g)	Fração > 0,075 mm		Fração < 0,075 mm	
		Massa (g)	Fração (%)	Massa (g)	Fração (%)
LCA	3850,27	372,45	9,67	3477,82	90,33
LARM	3753,65	320,68	8,54	3432,97	91,46
FPEM	3680,9	299,53	8,14	3381,37	91,86
FPMC	3599,21	304,72	8,47	3294,49	91,53

Antes da realização dos ensaios espartelou-se uma determinada quantidade de amostra, dividindo-a em quartos homogéneos, despejando lenta e cuidadosamente o material para uma folha plana, formando um cone simétrico, dividindo o cone em 2 partes iguais e de novo cada uma em 2 partes iguais, obtendo assim 4 partes, cada uma, com um quarto do tamanho e mais homogénea que a amostra original (**Figura 46**). Para seleccionar os provetes de cada amostra, com as quantidades necessárias à realização dos ensaios laboratoriais, utilizou-se ainda o repartidor (**Figura 45**).



Figura 46 - Espartelamento da amostra.



Figura 45 - Repartidor.

4.4. Análise Granulométrica

4.4.1. Método por peneiração

A análise granulométrica serve para definir a composição granulométrica, ou seja, determinar a distribuição, em percentagem, do peso total das partículas de uma amostra, de acordo com as suas dimensões (adaptado de Santana & Rodrigues, 2005).

Para partículas superiores a 0,075 mm, a análise granulométrica é normalmente obtida a partir da peneiração, enquanto que para amostras com partículas de menor diâmetro, como siltes e argilas, realizam-se ensaios pelo método de sedimentação. A análise granulométrica por peneiração foi realizada de acordo a especificação LNEC E239 - 1970 no LGMC (Laboratório de Geotecnia e Materiais de Construção) do ISEP, tendo como objetivo a determinação da distribuição das frações granulométricas das quatro amostras de lamas em estudo.

➤ Procedimento

A preparação dos provetes de ensaio, foi realizada de acordo com os processos descritos no ponto anterior. Os provetes de ensaio foram preparados com a quantidade total de material por amostra, de dimensão superior a 0,075 mm. O material, foi despejado em seguida numa série de peneiros ASTM (76,10 mm, 50,80 mm, 38,10 mm, 25,40 mm, 19,00 mm, 9,51 mm, 4,76 mm (nº 4), 2,00 mm (nº10), 0,841 mm (nº 20), 0,420 mm (nº 40), 0,250 mm (nº 60), 0,105 mm (nº 140) e 0,074 mm (nº 200)), colocados sob a forma de coluna num equipamento de peneiração mecânica (**Figura 47**). Os peneiros foram colocados de forma decrescente quanto à abertura das malhas, ou seja, o peneiro superior apresentava a maior abertura e o inferior a malha mais apertada.



Figura 47 - Equipamento de peneiração mecânica.

A peneiração mecânica foi realizada durante 10 minutos, tempo imposto de modo a que não passe mais de 1% do material retido nos peneiros. Após a peneiração mecânica, pesaram-se as quantidades retidas em cada um dos peneiros e foram calculadas as respectivas distribuições em percentagem ponderal das partículas, através das **Equações 1 e 2**.

$$N_x = \frac{m_x}{m_a} \times 100$$

Equação 1 - Percentagem de material retido em cada peneiro (LNEC E239 - 1970).

$$N''_x = 100 - N'_x$$

Equação 2 - Percentagem acumulada do material que passa em cada peneiro (LNEC E239 - 1970).

onde:

- m_x – massa retida em cada peneiro [g];
- m_a – massa total da amostra [g];
- N_x – Percentagem material retido em cada peneiro [%];
- N'_x - Percentagem retida acumulada obtida no peneiro anterior [%];
- N''_x - Percentagem acumulada do material que passa em cada peneiro [%].

Os resultados obtidos foram representados em gráficos de escala semi-logarítmica (**Figura 48**), obtendo-se as curvas granulométricas de cada um dos provetes.

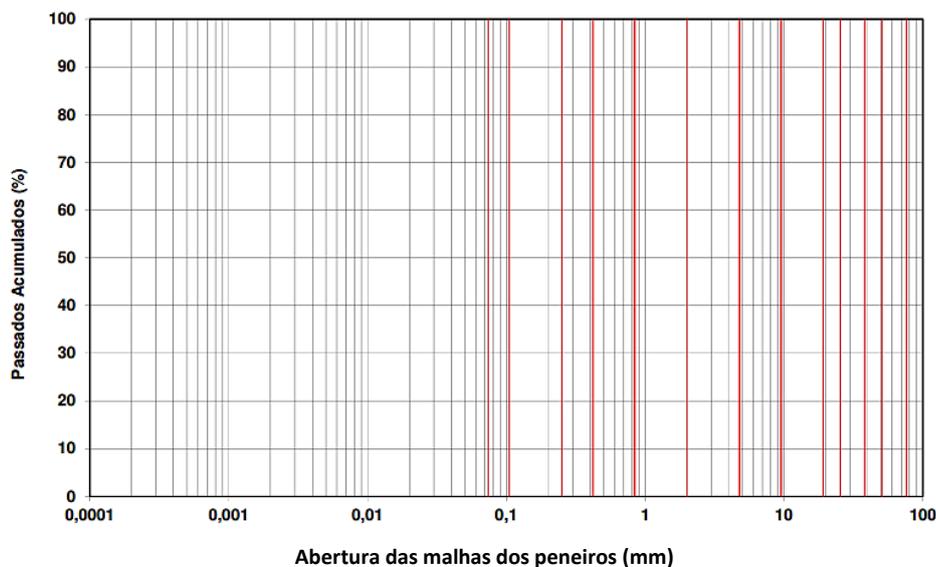


Figura 48 - Gráfico de análise granulométrica. (adaptado de apontamentos de GENGE, 2017)

4.4.2. Método por sedimentação – atenuação de raios x

A sedimentação é um método natural de separação de partículas, comprovado pela deposição de materiais por dispersão num meio líquido ou no ar. Determinar a dimensão das partículas por sedimentação não é difícil e o processo é descrito pela Lei de Stokes. Contudo a complexidade do processo aumenta quando se pretende determinar a quantidade de partículas de um determinado tamanho. A solução para este problema foi recorrer à utilização de raios x na deteção da massa das partículas, baseada na Lei de Lambert, o que é viabilizado pelo conhecimento da distância entre a zona atravessada pelos raios x e a superfície da mistura que contém a suspensão (Sedigraph, 1998).

Neste método é determinada a granulometria dos sedimentos a partir da mitigação de um feixe de raios x que atravessa a amostra em suspensão, tal como apresentado no esquema da **Figura 49**.

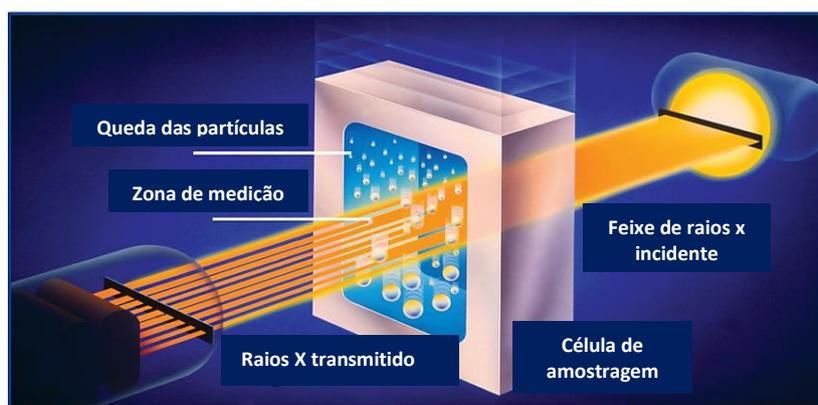


Figura 49 - Análise granulométrica pelo processo de sedimentação por raios x.
(adaptado de Sedigraph.com)

A análise é não destrutiva e a amostra a ser analisada, apresenta-se em pequenas quantidades, sendo dispersa em 50ml de qualquer líquido, desde que este não absorva intensivamente os raios x (água destilada, glicóis, óleos minerais, álcoois, etc.) (Dias, 2004).

Durante o ensaio é determinada a intensidade de um feixe de raios x estreito, (menos de 0,2% da distância de cruzamento), apontado horizontalmente e que atravessa o meio de dispersão. Inicialmente como teste de verificação, o feixe é apontado para o líquido sem partículas em suspensão e posteriormente, a amostra é introduzida em estado de suspensão homogénea no mesmo tipo de líquido em que foi efetuada a análise teste. Assim, as partículas sólidas da amostra absorvem parte da energia dos raios x, sendo a intensidade do feixe determinado para estabelecer a escala de atenuação.

Quando termina a agitação da suspensão, as partículas começam a sedimentar, pelo que as existentes na zona atravessada pelos raios x, são progressivamente em menor quantidade e de menores dimensões. Consequentemente, a energia do feixe é cada vez menos absorvida, diminuindo progressivamente a atenuação. Na fase final, já não existem partículas na zona atravessada pelos raios x, pelo que a intensidade do feixe é análoga à inicial.

O ensaio de análise granulométrica por sedimentação (método de atenuação por raios x), foi realizado no Laboratório do Centro de Investigação Geoambiental e Recursos (CIGAR), da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP), tendo como objetivo a determinação da granulometria das partículas, na fração inferior a 0,075 mm, a partir das suas velocidades de sedimentação.

➤ **Procedimento**

Os provetes de ensaio foram preparados até à obtenção de 50g, por amostra de granulometria inferior a 0,075 mm, de acordo com o anteriormente referido em 4.2. Em seguida foi preparada uma solução de hexametáfosfato de sódio dissolvendo-se 33g de hexametáfosfato e 7g de carbonato de sódio em água destilada, até perfazer o volume de 500 cm³. Na fase seguinte colocaram-se as amostras juntamente com 100 cm³ de solução num frasco de Erlenmeyer, que foi aquecido durante 15 minutos, agitando-se a mistura com a ajuda de uma vareta de vidro (**Figura 50**).



Figura 50 - Aquecimento e agitação da amostra com hexametáfosfato de sódio.

Após o aquecimento das misturas preparadas anteriormente, transferiram-se cuidadosamente as amostras para cadinhos, sendo de seguida secas em estufa, a 105-110 °C, durante 2h±30min, de modo a atingirem a consistência necessária para a realização do ensaio no Granulómetro laser - *Malvern Hydro 2000G* (**Figura 51**).



Figura 51 - Granulômetro laser - Malvern Hydro 2000G.

Em seguida, com recurso a uma colher de pequenas dimensões, colocou-se a amostra de lama no reservatório com água destilada (fluido correspondente ao meio dispersante do material), até o leitor de ensaio determinar que a quantidade colocada é suficiente para fazer a análise (Figura 52).



Figura 52 - Painel do software do Granulômetro laser.

O software deste equipamento permite a escolha da natureza da amostra a analisar, fazendo a distinção entre Granitos e Mármore e tem uma opção de lavagem do reservatório e circuito do equipamento de forma automática com o propósito de não contaminar as leituras seguintes.

Para cada provete de lama em estudo foram efetuadas cinco leituras e calculada a sua média, de forma automática pelo software do granulômetro, que representará o resultado final do ensaio para cada provete.

Para cada lama em estudo realizaram-se três ensaios no granulômetro, de forma a no final efetuar os cálculos necessários para a elaboração da curva granulométrica (ver Anexo I).

4.5. Determinação da massa volúmica

Fisicamente, a massa volúmica é a relação entre a massa de um corpo e o volume total por ele ocupado. A determinação da massa volúmica no presente estudo é importante, pois através da sua determinação obtém-se a densidade das lamas que serão incorporadas em misturas, como as argamassas e materiais cerâmicos.

Este ensaio consiste na medição do volume do provete em ensaio a partir do seu deslocamento, num voluminímetro, designado por densímetro de *Le Châtelier*, de dimensões em milímetros, aproximadas às indicadas na **Figura 53**.

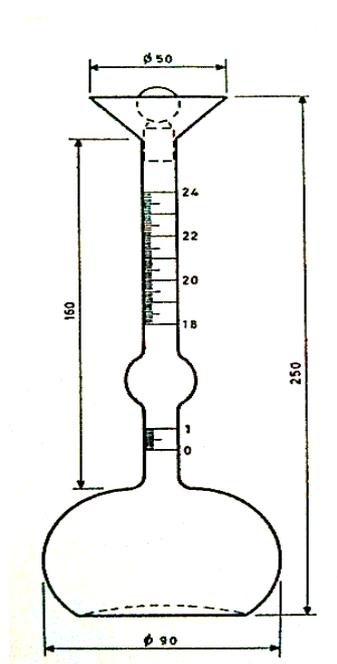


Figura 53 - Densímetro de Le Châtelier.
(adaptado de especificação do LNEC E64 -1979)

O ensaio foi adaptado a partir da especificação do LNEC E64-1979, uma vez que esta tem como propósito a determinação da massa volúmica de cimentos. O ensaio foi realizado no laboratório do Centro de Formação Profissional da Indústria da Construção Civil e Obras Públicas do Norte (CICCOPN), com o objetivo de obter a massa volúmica das quatro lamas em estudo, para a fração material de dimensão menor que 0,075 mm.

➤ **Procedimento**

Os provetes de ensaio foram preparados até à obtenção de 65 g (**Figura 54**), por amostra, de granulometria inferior a 0,075 mm, de acordo com o procedimento anteriormente referido em 4.2. Para o ensaio foram utilizadas 58 g, de cada uma das lamas em estudo.



Figura 54 - Pesagem do provete de ensaio.

O ensaio teve início com a introdução de água destilada no densímetro de *Le Châtelier*, até ao nível compreendido entre o zero e um da sua escala de graduação. Em seguida o densímetro foi rolhado e imerso em água a $20 \pm 0,2^\circ\text{C}$, aguardando-se alguns minutos até que a temperatura da água estabilizasse, após o que se leu o valor correspondente ao nível da água destilada com aproximação à meia divisão (V_1).

O provete foi então introduzido, pouco a pouco, com a ajuda de um funil de tubo curto, de modo a que o material não aderisse às paredes do densímetro, na zona acima do nível da água destilada (**Figura 55**).



Figura 55 - Introdução da amostra no voluminímetro.

No passo seguinte, rolhou-se o voluminímetro e colocou-se de novo no tanque com água a $20 \pm 0,2^\circ\text{C}$, até que a temperatura da água estabilizasse (**Figura 56**) tendo-se, por último, efetuado uma nova leitura do nível de líquido (**Figura 57**), com aproximação à meia divisão (V_2).



Figura 56 - Voluminímetro no tanque de água.



Figura 57 - Voluminímetro com as quatro amostras de lama.

O valor da massa volúmica, para cada amostra de lama foi determinado a partir da **Equação 3**, sendo expresso em gramas por centímetro cúbico.

$$mv = \frac{m}{V_2 - V_1}$$

Equação 3 – Massa Volúmica (LNEC E64-1979).

onde:

mv – valor de massa volúmica [g/cm³];

m – Massa do provete seco [g];

V₁ – valor lido no voluminímetro contendo somente o líquido auxiliar [cm³];

V₂ – valor lido no voluminímetro contendo o líquido auxiliar e o provete [cm³].

4.6. Determinação da qualidade dos finos – Ensaio de Azul de metileno

O ensaio de adsorção de azul de metileno constitui uma alternativa eficiente, rápida e económica, devido à simplicidade do ensaio, de avaliar o estado de limpeza de um agregado, permitindo estimar a quantidade e tipo de argilas presentes na sua fração fina. Este corante orgânico é adsorvido pela amostra, formando uma camada mono molecular quase completa sobre a superfície dos minerais de argila, permitindo assim, uma vez conhecidas as dimensões da sua molécula, conhecer a sua área total recoberta. A quantidade de azul de metileno que é adsorvida pela partícula mede a sua área de superfície específica, assim, as amostras com elevado teor de finos têm uma elevada área específica, pois quanto maior for a quantidade de azul de metileno utilizada, maior será o teor de finos da amostra. (adaptado de Hang & Brindley, 1970).

O valor de "Azul de metileno" é também importante para a caracterização da força de ligação a seco das partículas, plasticidade (quanto maior o valor, maior será o índice de plasticidade da amostra), adsorção de alguns compostos, bem como o comportamento de expansão - retração (adaptado de Yukselen & Kaya, 2008).

O ensaio de azul de metileno é importante para poder prever o comportamento das lamas incorporadas na composição de outros produtos. Este, foi realizado de acordo com a norma NP EN 933-9:2011 (Anexo A e D), na fração de material de dimensão inferior a 0,125 mm, no laboratório do CICCOPN.

➤ **Procedimento**

O ensaio consiste na introdução da solução de azul de metileno, em doses sucessivas, até que a superfície das partículas com capacidade de adsorção fique coberta. A partir desse momento passa a existir um excesso de azul de metileno, correspondendo ao ponto de viragem que marca o fim do ensaio, detetado pelo teste da mancha que consiste em retirar uma gota de suspensão com a vareta e depositá-la sobre o papel de filtro. A mancha que se forma é composta por uma zona central de material depositado, geralmente de cor azul escura, rodeada por uma zona húmida sem cor (auréola).

Numa primeira fase, realizou-se no Laboratório de Geotecnia e Materiais de Construção (LGMC), do ISEP, um ensaio de teste segundo a norma NP EN 933-9: 2011, sem adição de caulinite, tendo-se obtido como resultado o ensaio de mancha representado na **Figura 58**, que indicou a necessidade de realizar o ensaio com adição de caulinite, de modo a permitir uma melhor definição da mancha e da auréola, conforme representado na **Figura 59**.

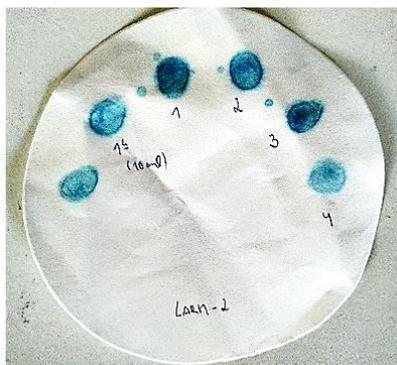


Figura 58 – Ensaio de mancha sem adição de caulinite.

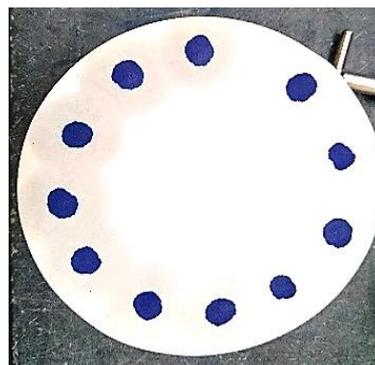


Figura 59 – Ensaio de mancha com adição de caulinite

Os provetes de ensaio foram preparados até à obtenção de 30g, por lama em estudo, de acordo com o anteriormente referido em 4.2. A adição de caulinite foi realizada na mesma proporção, tendo-se pesado 30 g para adicionar a cada provete (**Figura 60**).

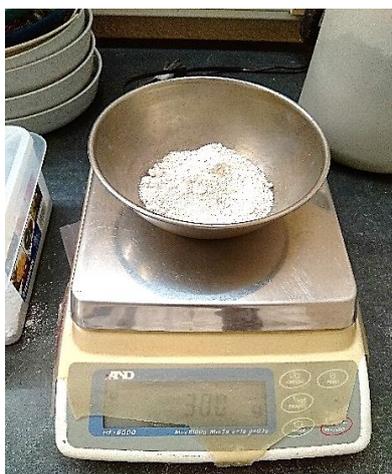


Figura 60 - Pesagem da caulinite.

Assim, no gobelé com 500 ± 5 ml de água destilada foram adicionados o provete e a caulinite, sendo necessários 62 ml de solução de azul de metileno para obter a neutralização do caulino na solução. Até perfazer este volume de azul de metileno foram realizados vários ensaios de mancha correspondentes às sucessivas adições necessárias à neutralização.

Após a neutralização, o ensaio prosseguiu com adições de 2 ml de corante mantendo a agitação de 400 ± 40 rpm, utilizando o agitador de ventoinha (**Figura 61**), até à obtenção de um resultado positivo. O ensaio foi considerado positivo assim que, na zona húmida, se formou uma auréola persistente azul clara de cerca de 1 mm de espessura à volta do depósito central, o que indica a existência de corante livre na suspensão, dando-se por concluído o ensaio (**Figura 62**).



Figura 61 – Agitador de ventoinha

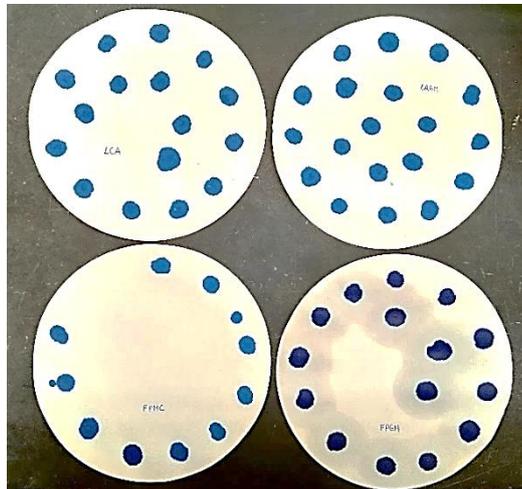


Figura 62 - Testes de mancha de azul de metileno para as amostras de lama.

Após conclusão dos ensaios de azul metileno, realizados para as quatro amostras de lama em estudo, efetuaram-se os cálculos do valor de azul de metileno “ MB_F ”, de acordo com a **Equação 4**, sendo este expresso em gramas de corante por quilograma da fração 0/0,125 mm.

$$MB_F = \frac{V_1}{M_1} \times 10$$

Equação 4 – Azul de metileno (NP EN 933-9: 2011).

onde:

- MB_F – valor de azul de metileno [g/Kg];
- M_1 – massa do provete de ensaio [g];
- V_1 – volume total de solução de corante adicionada [mm].

4.7. Análise Química

4.7.1. Análise química quantitativa por espectrometria de fluorescência de raios x (equipamento portátil)

De modo a obter a composição química das lamas em estudo, foi utilizada uma técnica expedita, que permite realizar análises por métodos não destrutivos “*in situ*” ou em laboratório, com recurso a um analisador de fluorescência de raios x (FRX) da marca *Thermo Scientific*, modelo *NITON XL3t* (900), representado na **Figura 63**.



Figura 63 - Analisador de fluorescência de raios x (FRX-P)
(Adaptado de Thermo Scientific)

A técnica utilizada, espectrometria por fluorescência de raios x, é uma ferramenta dinâmica para a determinação quantitativa da presença de elementos químicos em diversos tipos de amostras, de interesse biológico, industrial, geológico e ambiental. Este processo quantitativo de análise por fluorescência de raios x é fundamentado na medida das intensidades dos raios x característicos, emitidos pelos elementos que constituem a amostra, quando excitada por partículas ou ondas eletromagnéticas como se pode observar na **Figura 64** (adaptado de Queirós, 2011).

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. Em síntese, a análise por fluorescência de raios x consiste em três fases (**Figura 64**):

- 1ª fase: Excitação dos elementos que constituem a amostra;
- 2ª fase: Dispersão dos espectros de linha emitidos pela amostra;
- 3ª fase: Detecção dos espectros de linha emitidos.

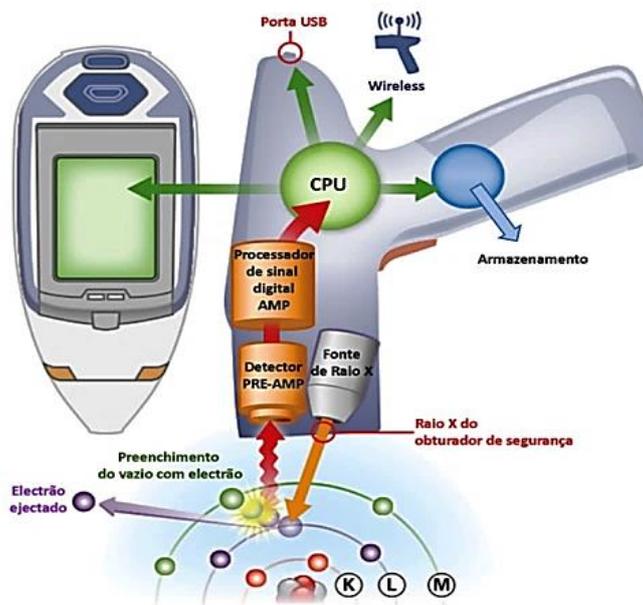


Figura 64 - Analisador de fluorescência de raios x (FRX-P).
(Adaptado de Thermo Scientific)

Este ensaio, permite a análise qualitativa e quantitativa, na amostra, de mais de 35 elementos químicos, incluindo oito metais pesados: o arsénico (As), o cádmio (Cd), o bário (Ba), o crómio (Cr), o chumbo (Pb), o mercúrio (Hg), o selénio (Se) e a prata (Ag). Os limites de deteção dos elementos analisados dependem da energia dos raios x fluorescentes recebida pelo analisador (consequência do número atómico do elemento), do tipo e energia da fonte de excitação, do tipo de matriz, de interferências interespectrais, da resolução do equipamento e da duração dos ensaios.

Existem igualmente fatores que podem condicionar a qualidade dos resultados das análises realizadas, como o teor em água da amostra, a temperatura ambiente, o incorreto posicionamento do analisador, uma imensa variedade nas propriedades físicas (dimensão, uniformidade, etc.) das partículas ou a presença simultânea de elementos químicos com concentrações muito distintas (Queirós, 2011).

O procedimento adotado foi o utilizado internamente no LGMC, do ISEP. O ensaio de análise química da amostra foi realizado nas frações de dimensão menor e maior que 0,075 mm, utilizando uma pequena quantidade de amostra, com o objetivo de verificar os elementos químicos presentes nas lamas em estudo.

➤ **Procedimento**

Os provetes de ensaio foram preparados, de acordo com o anteriormente referido em 4.2. Em seguida peneiraram-se pequenas quantidades de material nos peneiros #60 (250 μ m) e #120 (125 μ m) representados na **Figura 65**, até à obtenção de um provete de cerca de 10 gramas.



Figura 65 – Peneiros de ensaio FRX-P.

A amostra é colocada no interior do copo ou cápsula, que se fecha com filtro transparente, sendo devidamente compactada, de modo a evitar espaços vazios e irregulares. Os espaços vazios no copo devem ser ocupados por fibras de recheio de poliéster para evitar o movimento da amostra. Depois do copo ser fechado e devidamente identificado com o nome da amostra, encontra-se pronto para a análise química (**Figura 66**).



Figura 66 - Amostras identificadas para análise FRX-P

As amostras, em seguida, são inseridas na câmara de ensaio (**Figura 66**), fazendo-se a ligação do analisador a um computador com o software adequado (NDT - transferência de dados *NITON*) o qual possibilita a elaboração de relatórios de registo dos vários elementos detetados na amostra, em percentagem.



Figura 67 - Camara suporte

Foram realizadas nove leituras por cada provete das lamas em estudo (Figura 68) de modo a obter um maior rigor nos resultados obtidos. Uma vez adquiridos os respetivos relatórios, os dados foram tratados e determinaram-se os valores médios de cada elemento encontrado, sendo depois convertidos nos respetivos compostos, através de uma folha de cálculo Excel.

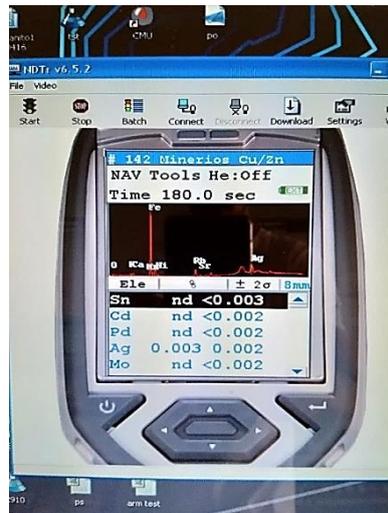


Figura 68 - Painel do software Analisador de fluorescência de raios x (FRX-P)

4.7.2. Análise química quantitativa do Sódio por espectrofotometria de absorção atômica

No ensaio de fluorescência de raios x não é possível a determinação de sódio, limitação técnica do equipamento portátil, pelo que se recorreu à espectrofotometria de absorção atômica. Esta determinação é importante, pois este elemento é essencial na indústria da cerâmica, por ser um dos principais fundentes no processo de fabrico.

A espectrofotometria de absorção atômica é a técnica mais usada na determinação de metais nas mais diversas amostras. Esta técnica é baseada no princípio em que os átomos livres gerados num atomizador, são capazes de absorver radiação eletromagnética de frequência específica, sendo a intensidade de radiação absorvida diretamente relacionada com a quantidade do elemento em estudo, através da lei de Bouger-Lambert-Beer (Borges *et. al*, 2005 *cit in*. Pinto, 2010).

O equipamento de espectrometria de absorção atômica de alta resolução com fonte contínua (HR-CS-AAS), cuja configuração é a mais próxima da utilizada durante o ensaio, foi descrito em Heitmann *et al*. (2004). Durante o seu funcionamento, a lâmpada de arco curto de xénon de elevada pressão é operada a uma potência de 300 W e é constituída por dois elétrodos de tungsténio. O seu esquema pode ser observado na **Figura 69**. (adaptado de Borges *et. al*, 2005 *cit in*. Pinto, 2010).

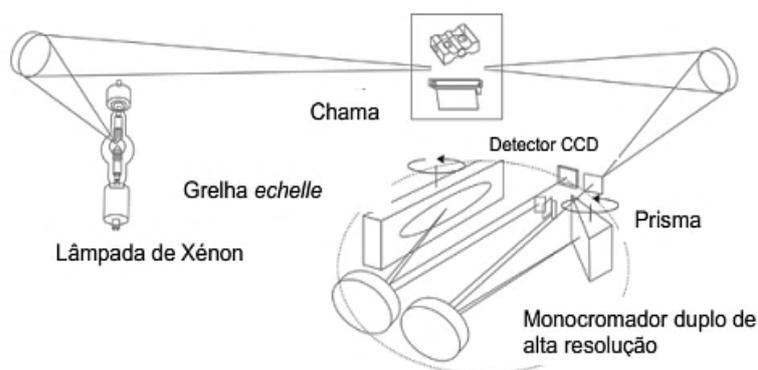


Figura 69 – Esquema do HR-CS AAS. (Pinto, 2010)

A radiação incidente, após passar pela amostra atomizada, é dirigida para o monocromador duplo de alta resolução (*DEMON*), incidindo primeiro num prisma e numa rede de difração. O prisma desempenha um papel pré dispersor, escolhendo a secção do espectro de interesse, enquanto o monocromador fornece a alta resolução inferior a 2 pm por pixel (unidade fotossensível do detetor) num intervalo espectral de 0,4 nm. (adaptado de Borges *et. al*, 2005 *cit in*. Pinto, 2010).

Por fim, a radiação emitida é transmitida, atingindo o detetor, constituído por um arranjo linear de dispositivos de carga acoplada (CCD), sendo que o equipamento opera com 512 pixéis independentes entre si, em que 200 são efetivamente usados para a deteção analítica (adaptado de Borges et. al, 2005 *cit in*. Pinto, 2010).

O ensaio foi realizado no Laboratório de Tecnologia (LT), do Departamento de Engenharia Química (DEQ), do ISEP, com vista à quantificação do sódio (Na) presente em cada uma das lamas em estudo, tendo sido utilizado um espectrofotómetro de absorção atómica de alta resolução, *ContrAA700* da *Analytik Jena* (**Figura 70**), de fonte contínua (HR-CS-AAS).



Figura 70 - Espectrofotómetro de absorção atómica *ContrAA700* da *Analytik Jena*.

➤ **Procedimento**

Os provetes de ensaio foram preparados, de acordo com a metodologia referida em 4.2. Em seguida, realizou-se a pesagem do material para obter dois provetes de 0,5 g cada, por amostra.

Posteriormente, num gobelé de 50 ml, adicionou-se ao provete, com uma pipeta automática, 5 ml de água régia, com três volumes de ácido clorídrico (39%) e um volume de ácido nítrico (69%).

Colocaram-se os gobelés nas placas de aquecimento, de modo a iniciar a digestão ácida do provete (**Figura 71**), com o cuidado de colocar a cobertura de vidro de relógio, que permite que os vapores escapem, protegendo a solução de uma contaminação acidental. Após uma hora, deu-se a digestão por concluída, no ponto em que as amostras atingiram a *secura*, sendo deixadas a repousar e a arrefecer durante 10 minutos no interior da *hotte*.



Figura 71 – Digestão das amostras.

Após a digestão ácida, os provetes foram introduzidos em tubos falcon de 50 ml, onde previamente foram adicionados 500 microlitros de água régia. Para perfazer o volume total de 50 ml, foi adicionada água desionizada. Na última fase de preparação da solução a analisar, colocaram-se os frascos na centrífuga durante 3 minutos.

Por último, utilizando o espectrofotómetro de absorção atómica, introduziram-se os tubos falcon no suporte e iniciou-se a chama, através do software conectado com o equipamento (para a atomização usou-se cloreto de cézio). No software, confirmou-se, se os valores de concentração (mg/L) se encontravam de acordo com a curva de calibração utilizada para o elemento sódio (Na), pois esta é indispensável em todos os métodos de análise instrumental quantitativa, de modo a analisar a relação entre o sinal medido em soluções padrão e as suas concentrações. Como, numa primeira análise se verificou que os valores não se encontravam de acordo com a curva de calibração, procedeu-se a uma diluição utilizado um fator de diluição de 10 vezes.

Assim, procedeu-se à leitura final das amostras, tendo os valores validados para realização dos cálculos, de modo a obter posteriormente a concentração do sódio através da **Equação 5**.

$$[\text{Na}] = \frac{\text{concentração obtida (mg/L)} \times \text{volume pipetado de água régia (L)}}{\text{massa amostra pesada (g)}} \times \text{f. d}$$

Equação 5 – Concentração do Sódio (Na).

onde:

- [Na] – concentração do sódio na amostra [mg/g];
- f.d. – fator de diluição.

(página propositadamente em branco)

CAPÍTULO 5

Metodologias aplicadas para o aproveitamento das lamas

(página propositadamente em branco)

5.1. Introdução

Neste capítulo desenvolvem-se os ensaios realizados tendo em vista o aproveitamento das lamas em estudo (**Quadro 23**). Numa primeira fase descreve-se o ensaio de incorporação das lamas em argamassas e a sua posterior caracterização mecânica no estado endurecido, detalhando a metodologia utilizada para a determinação da resistência à flexão e da resistência à compressão. Faz-se ainda uma análise da absorção de água em cada amassadura.

Numa segunda e última fase refere-se a metodologia utilizada no ensaio de sinterização de modo a estudar a viabilidade da incorporação das lamas numa matriz cerâmica, tendo sido realizada uma análise química quantitativa (FRX-P) antes e após o mesmo, de modo a complementar a análise do estudo, sendo esta importante para perceber a variação dos fundentes presentes nas amostras de lama, antes e após o processo de sinterização.

Quadro 23 – Ensaios realizados para aproveitamento das lamas.

Aproveitamento	Ensaio	Norma
Argamassas	Métodos de ensaio de cimentos Parte 1: Determinação das resistências mecânicas (Resistência à Compressão e Resistência à Flexão)	NP EN 196-1: 2017
	Absorção de água	-----
Matriz Cerâmica	Ensaio de sinterização	-----

5.2. Aproveitamento das lamas em argamassas

Após a caracterização das lamas realizou-se o aproveitamento das mesmas. Neste item é descrito o procedimento adotado para o fabrico da argamassa padrão (sem incorporação de lama) e das diferentes argamassas, com incorporação das amostras de lama, através da substituição do cimento.

O objetivo desta incorporação foi comparar as várias amassaduras (com diferentes percentagens de lama) com a “Argamassa Padrão”, que serviu como referência para analisar a influência de cada tipo de lama nas propriedades da argamassa no seu estado endurecido. Para isso foram ensaiadas a resistência à flexão e compressão, de acordo com a norma NP EN 196-1: 2017, no laboratório do CICCOPN.

Em suma, neste item faz-se a descrição de todo o processo de fabrico das argamassas, fazendo a avaliação das principais características dos seus materiais constituintes, bem como se refere o

estudo da composição para as diferentes amassaduras. Refere-se ainda todo o método de preparação das diversas argamassas e respetivos provetes e o modo como foram realizados os ensaios de resistência à flexão e compressão.

5.2.1. Materiais constituintes das argamassas

➤ Areia

A areia utilizada é constituída principalmente por minerais como quartzo, micas, feldspatos, piroxenas, granadas e olivinas. Os grãos deste tipo de areia apresentam formas variadas (desde angulosos a bem rolados), isto devido ao transporte sofrido no meio fluvial. Ainda relativamente à sua natureza, apresenta uma cor clara e um brilho característico do grau de evolução sofrida durante o transporte, que lhes proporciona uma lavagem constante.

A areia foi disponibilizada pelo LGMC, do ISEP, onde se encontrava armazenada. Estas variedades de areias fluviais vulgares são muito utilizadas pela indústria, nomeadamente a de construção. São materiais quase sempre disponíveis em grandes quantidades, podendo ser utilizados na produção de argamassas e betões, tendo as características de acordo com o **Quadro 24**.

Quadro 24 - Características da areia fluvial.
(Machado, 2012)

Massa volúmica do material impermeável das partículas (g/cm ³)	2,65
Massa volúmica das partículas saturadas (g/cm ³)	2,56
Massa volúmica das partículas secas (g/cm ³)	2,51
Absorção de água da areia (%)	2,00

➤ Cimento Portland

O cimento Portland utilizado foi do tipo CEM I 52,5R da Cimpor. De acordo com a ficha técnica, apresentada no **Anexo II**, este tipo de cimento possui grande reatividade e um rápido desenvolvimento de resistência mecânica após ser aplicado em obra.

A sua massa volúmica é superior a 3,05g/cm³, sendo constituído quase na sua totalidade por clínquer finamente moído ($\geq 95\%$), o que permite produzir betões de elevada resistência, sendo assim indicado tanto para betão armado como betão pré-esforçado, adequado para trabalhos que exijam resistência muito elevada ou em situações de clima frio.

Em termos de características físicas este cimento inicia a presa aproximadamente aos 45 min após aplicação e a sua expansibilidade é inferior ou igual a 10 mm. Por sua vez, em relação à resistência mecânica à compressão, os seus valores mínimos expectáveis são, aos 2 dias de 30 MPa e aos 28 dias de 52,5 MPa, conforme se pode observar na **Figura 72**, onde se encontra representada a curva de crescimento mínimo em relação à resistência mecânica à compressão do Cimento Portland CEM I 52,5R.

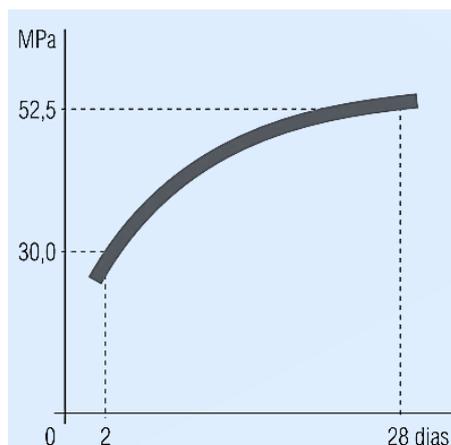


Figura 72 - Resistência mecânica à compressão do Cimento Portland CEM I 52,5R.
(adaptado de ficha técnica Cimpor)

➤ **Lama**

As amostras de lama foram caracterizadas ao longo deste trabalho, de acordo com as metodologias descritas no capítulo 4, sendo que os resultados obtidos e a sua análise são apresentados no capítulo 6.

➤ **Água**

A água é o elemento necessário a introduzir na amassadura da argamassa, pois permite, em resultado da sua reação química com o ligante, que se formem os sais minerais constituintes do cimento, que ao reagirem com a água dão origem a uma série de compostos químicos hidratados capazes de conferir resistência mecânica à argamassa. Ao longo de todo o ensaio foi utilizada água destilada, de modo a seguir a norma de ensaio.

5.2.2. Composição das argamassas e preparação dos respetivos provetes

Segunda a norma de ensaio, a sala de fabrico das amassaduras deve encontrar-se sob uma temperatura de (20 ± 2) °C e a câmara húmida para a conservação dos provetes no molde deve ser controlada a uma temperatura de $(20,0 \pm 1,0)$ °C.

A temperatura e humidade relativa na câmara húmida foram registadas pelo menos de quatro em quatro horas. Na **Figura 73** observar-se as folhas de registo e controlo efetuadas durante a realização do ensaio.



Figura 73 – Folhas de registo de temperaturas do banho e da sala de ensaio.

Quando à moldagem dos provetes é de referir que em cada molde são moldados 3 provetes em simultâneo sob a forma prismática com 40 mm × 40 mm × 160 mm de dimensões (**Figura 74**).

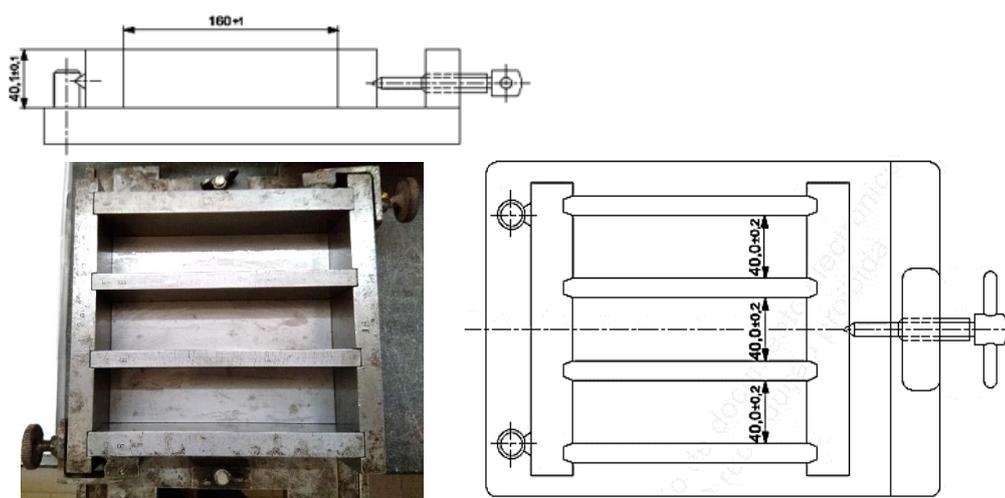


Figura 74 – Molde utilizado nas amassaduras. (adaptado de NP EN 196-1: 2016)

A argamassa a fabricar será constituída por uma parte de cimento, três partes de areia e meia parte de água (1: 3: 0,5), pelo que cada amassadura deve conter, em massa, (450 ± 2) g de cimento, (1350 ± 5) g de areia e (225 ± 1) g de água. Assim definiu-se a quantidade necessária de ligante (cimento + resíduo) e conseqüentemente, através do traço, determinaram-se as quantidades dos restantes agregados. A quantidade de água foi calculada tendo por base a quantidade do cimento, fixando a razão água/cimento em 0,50 ($a/c = 0,50$).

No total foram executadas nove amassaduras. Foi realizada uma argamassa padrão, sem incorporação de lama e para cada amostra de lama (LCA, LARM, FPEM e FPMC) realizaram-se duas amassaduras, mantendo em cada uma delas igual quantidade de água e areia. Para a realização destas amassaduras, a diferença, em relação à amassadura padrão, que servirá como referência, consiste na substituição de cimento, por 20% (90 g) e 40% (180 g) das lamas em estudo, de modo a perfazer a massa de 450 gramas de ligante. No **Quadro 25** pode-se observar a constituição das amassaduras e respetivas quantidades de materiais utilizados.

Quadro 25 – Constituição das amassaduras e respetivas quantidades de materiais utilizados.

Amassadura	Dosagem (%)	Ligante (Cimento + Resíduo) (g)	Resíduo por Dosagem (g)	Resíduo por Amostra (g)	Cimento (g)	Areia (g)	Água (g)
Padrão	---	450	---	---	450	1350	225
LCA	20	450	90	270	360	1350	225
	40	450	180		270	1350	225
LARM	20	450	90	270	360	1350	225
	40	450	180		270	1350	225
FPEM	20	450	90	270	360	1350	225
	40	450	180		270	1350	225
FPMC	20	450	90	270	360	1350	225
	40	450	180		270	1350	225
Quantidades totais		4050	1080	1080	2970	12150	2025

➤ **Procedimento**

Numa primeira fase, pesaram-se as quantidades de cada um dos materiais necessários para obtenção da argamassa (**Figura 75**).



Figura 75 – Materiais utilizados na amassadura.

Na misturadora foi introduzida a água e o cimento no recipiente. Esta adição deve estar completa em 10 s. Em seguida, a misturadora é colocada em funcionamento a velocidade lenta (tempo zero). Após 30 s, introduziu-se a areia de forma regular durante 30 s (**Figura 76**) e misturou-se a uma velocidade mais rápida, continuando a amassadura por mais 30 s.



Figura 76 – Introdução da areia na misturadora.

O processo foi suspenso 90 s e nos 30 s retirou-se com uma espátula de borracha a argamassa aderente às paredes e ao fundo do recipiente. Para finalizar, misturaram-se os materiais por mais 60 s a uma velocidade mais rápida, ficando concluída a amassadura.

Em seguida, foi realizada a moldagem dos provetes, em moldes previamente identificados e limpos. Os moldes foram untados com óleo descofrante, de modo a facilitar a desmoldagem da argamassa. Com o molde e a sua prolonga fixada à mesa do compactador, introduziu-se diretamente do recipiente de mistura por uma ou mais vezes, com uma espátula, a primeira de duas camadas de argamassa (**Figura 77**). A camada foi estendida uniformemente utilizando uma razeira.



Figura 77 – Colocação da argamassa no molde

Em seguida, a primeira camada de argamassa foi compactada com 60 pancadas do compactador, após o que se introduziu a segunda camada de argamassa no molde, que foi submetida ao mesmo procedimento.

Por último retirou-se o molde da mesa do compactador e o excesso de argamassa com a régua metálica plana, mantendo-a inclinada na direção do nivelamento, com movimentos de serra, lentos e transversais, em cada direção (**Figura 78**).



Figura 78 – Realização do movimento de serra.

Após a moldagem dos provetes, o molde foi acondicionado na câmara húmida, representada na **Figura 79**, tapando-a, durante 24h de hidratação a uma temperatura controlada de $(20,0 \pm 1,0) ^\circ\text{C}$ e humidade relativa não inferior a 90%.



Figura 79 – Caixa húmida.

No final das 24h, retiraram-se os moldes da câmara húmida e com uma caneta apropriada, identificaram-se os provetes, de modo a que seja possível saber qual o provete a ser ensaiado, consoante os tempos de hidratação (**Figura 79 e 80**). No **Quadro 26**, apresentam-se as numerações atribuídas a cada provete (1, 2 e 3) por tempo de hidratação, sendo também possível perceber que se obtiveram no total 27 provetes com o fabrico das 9 amassaduras.

Quadro 26 – Designações atribuídas a cada provete por amassadura e tempo de hidratação.

Amassadura	Incorporação (%)	Molde	Numeração dos Provetes		
			7 dias	28 dias	56 dias
Padrão	0	A	2	1	3
Lama Cinza Antas (LCA)	20	B	2	1	3
Lama Amarelo Rio Mel (LARM)		C	2	1	3
Filtro Prensa Engenho Multilâminas (FPEM)		D	2	1	3
Filtro Prensa Mármore e Calcários (FPMC)		L1104	2	1	3
Lama Cinza Antas (LCA)	40	L1105	2	1	3
Lama Amarelo Rio Mel (LARM)		L1106	2	1	3
Filtro Prensa Engenho Multilâminas (FPEM)		E	2	1	3
Filtro Prensa Mármore e Calcários (FPMC)		F	2	1	3

Em seguida, com o auxílio de uma ferramenta apropriada, procedeu-se à desmoldagem dos provetes dos moldes (**Figura 80**);



Figura 80 – Desmoldagem e identificação dos provetes.

Por último, pesaram-se os provetes e mergulharam-se de imediato um tanque apropriado com água a $20,0 \pm 1,0$ °C, tal como representado na **Figura 81**.



Figura 81 – Provetes em hidratação no tanque com água.

5.2.3. Caracterização das argamassas no estado endurecido

Para a caracterização das argamassas no seu estado endurecido, realizaram-se ensaios de resistência à flexão e compressão. Os provetes foram ensaiados aos 7 dias \pm 2 h, 28 dias \pm 8 h e 56 dias \pm 8 h. A resistência mecânica à flexão foi realizada através do método de carga, em três pontos. Posteriormente os semi-prismas obtidos no ensaio de flexão foram submetidos à compressão sobre as faces laterais de moldagem, segundo a norma NP EN 196-1: 2017.

Para tal, utilizou-se uma prensa da marca *Form Test*, devidamente normalizada e calibrada, do CICOOPN representada na **Figura 82**.

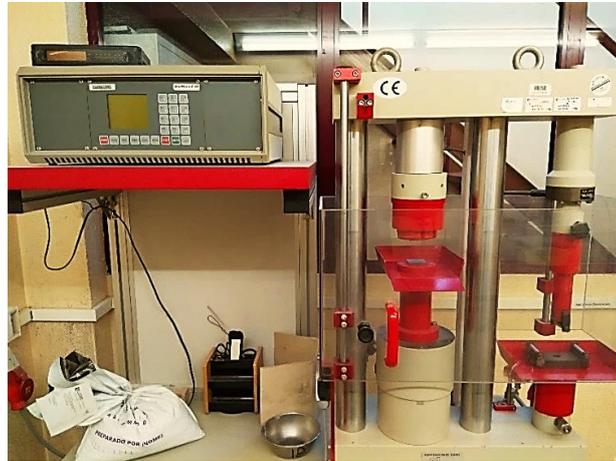


Figura 82 – Prensa de flexão e compressão.

➤ **Resistência à flexão**

Este ensaio tem como princípio a determinação da resistência à flexão através da aplicação de uma carga a meio vão do provete prismático, que aumenta gradualmente ao ritmo de 0,05 kN/s até à rotura, como se pode observar no painel eletrónico do equipamento, representado na **Figura 83**.



Figura 83 - Painel eletrónico do equipamento de flexão.

Para a realização do ensaio, colocaram-se os provetes, centrados e com o eixo longitudinal na perpendicular com os apoios, com as distâncias corretas entre apoios discriminadas na norma (**Figura 84**), tendo-se o cuidado de ao colocar o provete, verificar que a face livre de moldagem não ficava em contacto com os apoios (**Figura 85 e 86**).

De seguida, inicia-se o ensaio com a aplicação da força, de modo contínuo na face superior do provete, até à sua rotura (**Figura 87**).

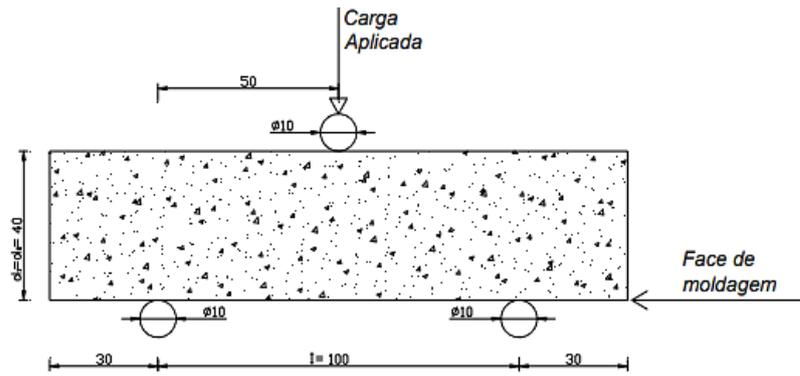


Figura 84 – Distâncias corretas entre apoios discriminadas na norma.
(adaptado de NP EN 196-1: 2016)



Figura 85 - Vista frontal do provete.



Figura 86 - Vista lateral do provete.



Figura 87 – Rotura do provete no ensaio de resistência à flexão.

O procedimento de ensaio foi o mesmo para todos os provetes conservando os prismas obtidos para o ensaio à compressão. Registou-se o valor da força de rotura e calculou-se a resistência à flexão, em Megapascal, pela **Equação 6**.

$$R_r = \frac{1,5 \times F_f \times l}{b^3}$$

Equação 6 - Resistência à Flexão (NP EN 196-1: 2017).

onde:

- R_r - resistência à flexão [MPa];
- F_f - carga aplicada ao centro do prisma na rotura [N];
- l – distância entre os apoios [mm];
- b^3 – lado da secção quadrada do prisma [mm].

➤ **Resistência à Compressão**

Este ensaio tem como objetivo a determinação da resistência à compressão e é realizado imediatamente a seguir ao ensaio de flexão. Aplica-se uma força gradualmente crescente, de modo contínuo, de cerca de 2,4 kN/s até à rotura, como se pode observar no painel eletrónico do equipamento, representado na **Figura 88**.



Figura 88 - Painel eletrónico do equipamento de compressão.

Para a realização deste ensaio, utilizaram-se os prismas obtidos no ensaio à flexão. Colocou-se um o provete no prato inferior da prensa, devidamente centrado em relação aos pratos da máquina a $\pm 0,5$ mm e longitudinalmente, de modo que a base do provete fique saliente em relação aos pratos ou às placas auxiliares em cerca de 10 mm (**Figura 89**).

Em seguida, acionou-se a prensa que aplicou a força, de modo contínuo na face inferior, no sentido ascendente (**Figura 91**), a meio do provete até à rotura do mesmo (**Figura 90**).



Figura 89 - Colocação do provete na prensa para ensaio à compressão.



Figura 91 - Ascensão da prensa no ensaio à compressão.



Figura 90 - Rotura do provete no ensaio à compressão.

O procedimento de ensaio foi o mesmo para todos os provetes. Registou-se a força de rotura e calculou-se a resistência à compressão, em Megapascal, pela **Equação 7**:

$$R_c = \frac{F_c}{1600}$$

Equação 7 – Resistência à Compressão (NP EN 196-1: 2017).

onde:

- R_c - resistência à compressão [MPa];
- F_c - carga máxima na rotura [N];
- 1600 - área dos pratos ou das placas auxiliares (40 mm × 40 mm) [mm²].

➤ **Absorção de água**

Este ensaio tem como objetivo determinar, de forma expedita, a percentagem de água absorvida por cada provete de argamassa endurecida, no final do seu tempo de hidratação correspondente.

Para tal realiza-se a pesagem de cada provete antes de se colocar no tanque com água (m_1) e após se retirar para realizar os ensaios anteriormente descritos (m_2), tendo apenas o cuidado de se limpar com um pano as superfícies, de modo a retirar o excesso de água nas faces do provete, conforme se pode observar nas **Figura 92 e 93**.



Figura 93 - Limpeza superficial do provete.

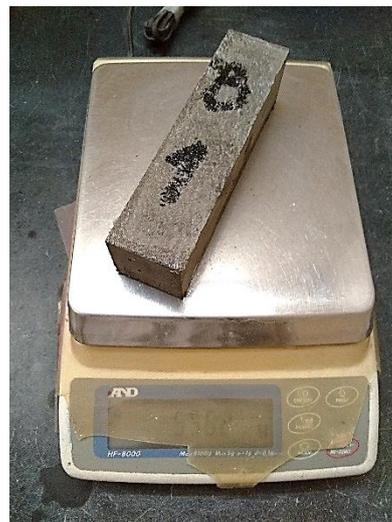


Figura 92 - Pesagem do provete.

A absorção de água é expressa, em percentagem, sendo determinada através da **Equação 8**:

$$A_b = \frac{m_1 - m_2}{m_2} \times 100$$

Equação 8 – Absorção de água.

onde:

A_b - absorção de água [%];

m_1 - massa do provete saturado [g];

m_2 - massa do provete seco [g].

5.3. Aproveitamento das lamas numa matriz cerâmica

A seleção de matérias-primas para a confeção duma pasta cerâmica tem por base o conhecimento das propriedades exigidas do produto final e as características inerentes ao processo de fabrico. Estas propriedades são fortemente dependentes da composição química e mineralógica das matérias-primas usadas as quais são raramente substâncias puras (adaptado de Rodriguez *et al.*, 2004).

De um modo geral, as matérias-primas classificam-se em plásticas e não plásticas. As plásticas são, fundamentalmente, misturas de minerais argilosos (argilas, caulinos e outros filossilicatos) enquanto que as não plásticas são constituídas por fundentes e inertes (Torres, 2007).

A pasta deve possuir uma composição química e mineralógica equilibrada, para que o produto cerâmico, obtido após cozedura, tenha as características tecnológicas exigidas. Dentro de certos limites, deve ser relativamente insensível a possíveis variações de temperatura de cozedura, ou seja, deve possuir uma larga gama de temperaturas de sinterização (Torres, 2007).

É também fundamental a avaliação e controle da cor que as peças cerâmicas exibem após serem cozidas, de maneira a garantir que a aparência final dos produtos cerâmicos, em particular a cor exibida pelos mesmos, seja a pretendida. A cor depende essencialmente da presença de minerais de ferro, no entanto, também é condicionada pela presença de outros elementos cromóforos (como o titânio), condições de cozedura, bem como as fases que se geram (vítreas ou cristalinas), (adaptado de Barba *et al.*, 2002)

Durante a cozedura de produtos cerâmicos, ocorre uma série de transformações físicas (dilatação, fusão de alguns componentes, etc.) e químicas (desidratações, decomposições de carbonatos, etc.) que levam à alteração das suas propriedades como a redução de porosidade, aumento da resistência mecânica e diminuição das suas dimensões (Torres, 2007).

5.3.1. Estudo da viabilidade de incorporação - ensaio de sinterização

Com o objetivo de estudar a viabilidade de incorporação das quatro amostras de lama no fabrico de cerâmicas, foi realizado o ensaio de sinterização. O ensaio foi realizado no Laboratório de Geotecnia e Materiais de Construção e no Laboratório de Tecnologias, do ISEP e consiste em realizar pastilhas cilíndricas (20 mm de diâmetro), através de um molde metálico, que serve também de prensa (**Figura 94**), de modo a permitir, através da avaliação da forma e aspeto visual da pastilha no final do processo de cozedura, a viabilidade de incorporação das lamas em matrizes cerâmicas.



Figura 94 – Molde/Prensa Metálica.

Os provetes de ensaio foram preparados de acordo com o procedimento descrito em 4.2, com o material menor que 0,075 mm. Para a realização dos provetes, 3 por cada lama em estudo, foi utilizado um molde metálico, conforme a **Figura 95**, tendo-se obtido as pastilhas (provetes de ensaio).



Figura 95 – Preparação da pastilha: 1º) Molde/Prensa Metálica; 2º e 3º) Execução da pastilha; 4º) Pastilha para ensaio

Antes do ensaio de sinterização foi realizada uma análise química por FRX-P, com o analisador de fluorescência de raios x, *NITON XL3t 900*, com o cuidado de não danificar a pastilha (**Figura 96**).



Figura 96 – Análise química das pastilhas antes do processo de sinterização.

Após a desmoldagem as pastilhas foram colocadas em cadinhos devidamente referenciados e em seguida, foram introduzidas na mufla *Nabertherm* (**Figura 97**) e sujeitas a um ciclo de aquecimento programado de acordo com o processo industrial.

Assim, os provetes foram sujeitos a um aquecimento gradual, durante 24h, até atingirem a temperatura de 1200°C, a uma velocidade de aquecimento da ordem dos 0,8333°C/minuto, permanecendo nesse patamar de temperatura durante 2h, após o que se iniciou o arrefecimento. Quando no arrefecimento a temperatura no interior da mufla atingiu os 200° as pastilhas foram retiradas para inspeção visual (**Figura 98**). Na inspeção visual, após a cozedura, foram avaliadas a forma e os bordos das pastilhas, a sua cor e se ocorreu a sua expansão ou retração.



Figura 97 – Mufla utilizada no ensaio.



Figura 98 – Pastilhas na mufla após o ensaio de sinterização.

A seguir ao arrefecimento até à temperatura ambiente foram novamente realizadas leituras para quantificação da composição química com o analisador de fluorescência de Raios X *NITON XL3t 900* (Figura 99).



Figura 99 - Análise química das pastilhas após o processo de sinterização.

No capítulo que se segue serão apresentados e analisados os resultados obtidos durante todo o processo experimental desenvolvido.

CAPÍTULO 6

Apresentação e análise dos resultados obtidos

(página propositadamente em branco)

6.1. Introdução

Neste capítulo são apresentados os resultados dos ensaios laboratoriais de caracterização e aproveitamento das lamas, efetuados ao longo de todo o trabalho experimental desenvolvido, sob a forma de tabelas e gráficos de modo a facilitar a sua análise e discussão.

6.1.1. Análise granulométrica

Os resultados da análise granulométrica foram obtidos segundo a metodologia anteriormente descrita e permitem caracterizar as lamas através das suas curvas granulométricas, pelos correspondentes valores calculados de D_{90} , D_{50} e D_{10} , que representam o calibre das partículas com 90%, 50% e 10% de material passado, respetivamente.

Os resultados encontram-se apresentados para cada amostra de lama (LCA, LARM, FPEM, FPMC), estando os cálculos e tabelas que originaram as curvas granulométricas apresentados no **Anexo III**. Por último, no **Anexo IV**, são expostos os gráficos com as unidades em micron (μm), obtidos diretamente no software do granulómetro laser, no ensaio por sedimentação – atenuação raios x.

6.1.1.1. Método de peneiração

Analisando os valores calculados de D_{10} , D_{50} e D_{90} , apresentados no **Quadro 27** e as curvas granulométricas, que permitem a comparação dos valores obtidos para as diferentes amostras em estudo, ilustradas na **Figura 100**, constata-se que:

- ✓ A lama obtida na serragem do granito Cinza Antas (LCA), é composta por partículas com o valor de diâmetro máximo (D_{90}) de 0,247 mm, um diâmetro médio (D_{50}) de cerca de 0,198 mm e um diâmetro mínimo (D_{10}) de 0,098 mm.
- ✓ A lama proveniente da serragem do granito Amarelo Rio Mel (LARM), é composta por partículas com o valor de diâmetro máximo (D_{90}) de 0,247 mm, um diâmetro médio (D_{50}) de cerca de 0,205 mm e um diâmetro mínimo (D_{10}) de 0,103 mm.
- ✓ A lama originária do filtro prensa que desidrata as lamas da serragem de granitos variados (FPEM), é composta por partículas com o valor de diâmetro máximo (D_{90}) de 0,280mm, um diâmetro médio (D_{50}) de cerca de 0,219 mm e um diâmetro mínimo (D_{10}) de 0,132 mm.
- ✓ A lama recolhida no filtro prensa que desidrata as lamas do corte de diferentes mármore e calcários (FPMC), é composta por partículas com o valor de diâmetro máximo (D_{90}) de 0,812 mm, um diâmetro médio (D_{50}) de cerca de 0,263 mm e um diâmetro mínimo (D_{10}) de 0,086 mm.

Quadro 27 – Dimensões das amostras (> 0,075 mm)

Amostra (> 0,075 mm)	D ₁₀ (mm)	D ₅₀ (mm)	D ₉₀ (mm)
Lama Cinza Antas (LCA)	0,098	0,198	0,247
Lama Amarelo Rio Mel (LARM)	0,103	0,205	0,247
Filtro Prensa Engenho Multilâminas (FPEM)	0,132	0,219	0,280
Filtro Prensa Mármore e Calcários (FPMC)	0,086	0,263	0,812

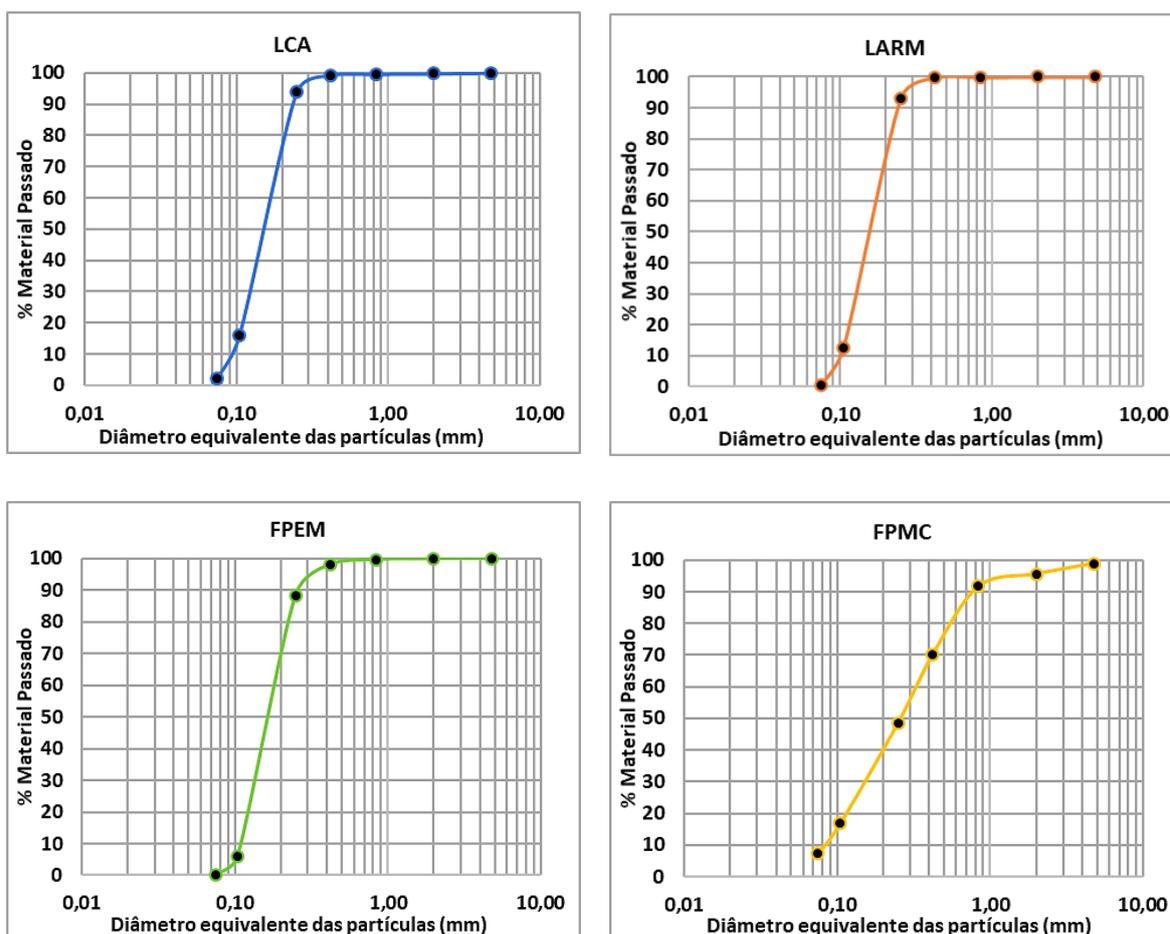


Figura 100 – Análise Granulométrica por peneiração das amostras de Lama.

Em suma, as quatro amostras de lama analisadas pelo método de peneiração apresentam uma granulometria bastante fina, maioritariamente inferior a 1 mm, sendo o diâmetro médio (D_{50}), aproximado nas quatro amostras, variando dos 0,198 mm (LCA) até aos 0,263 mm (FPMC).

As análises das amostras LCA, LARM e ainda na FPEM, encontram-se dentro dos valores da granulometria das partículas de granalha utilizada na serragem dos granitos na empresa, sendo maioritariamente de dimensão inferior a 0,425 mm e tendo uma dimensão máxima de 1,180mm.

Contudo, e apesar do desgaste da granalha no processo de serragem, possivelmente alguma percentagem de partículas se perdeu na preparação das amostras e sobretudo no trajeto que estas fazem até ao local onde foram recolhidas, sendo que as lamas LCA e LARM, por serem recolhidas diretamente das grelhas e poços de escoamento da calda abrasiva, possivelmente terão uma maior percentagem de granalha quando comparadas com a amostra FPEM, pois nesta, a granalha passa pelos processos de desidratação, percorrendo diversos equipamentos até ao destino final.

A amostra FPMC, devido à sua matriz calcária, apresenta o menor diâmetro mínimo (D_{10}) de 0,086 mm, quando comparada com as restantes de matriz granítica.

Os resultados permitem concluir que esta fração de resíduo não tem potencial para aproveitamento como subproduto, pois a sua dimensão é superior a 0,075 mm, não se enquadrando na faixa granulométrica exigida para um fíler ($< 0,063$ mm).

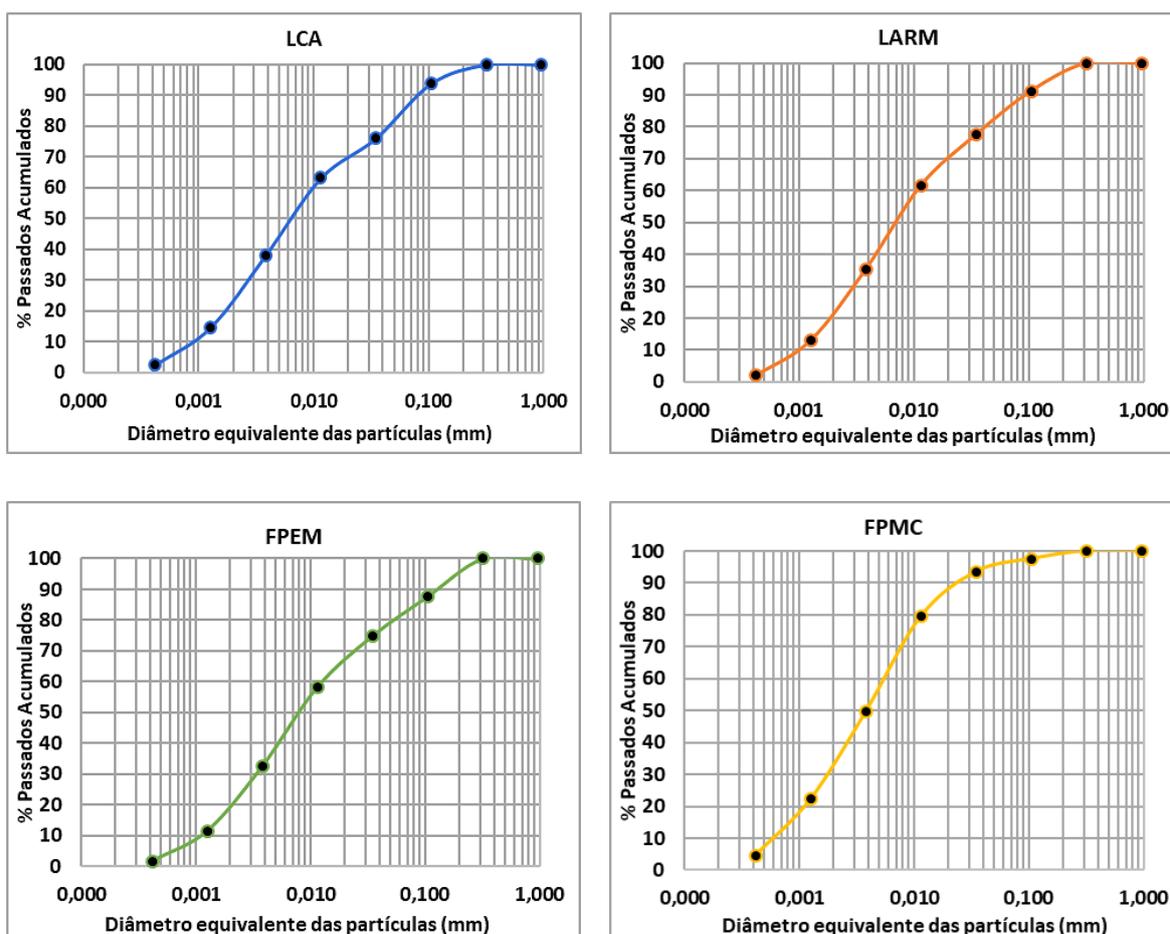
6.1.1.2. Método de sedimentação por atenuação de raios x

Analisando os valores calculados de D_{10} , D_{50} e D_{90} , apresentados no **Quadro 28** e as curvas granulométricas das amostras ensaiadas, que permitem a comparação dos valores obtidos para as diferentes amostras em estudo, ilustradas na **Figura 101**, constata-se que:

- ✓ A lama obtida na serragem do granito Cinza Antas (LCA), é composta por partículas com o valor de diâmetro máximo (D_{90}) de 0,0907 mm, um diâmetro médio (D_{50}) de cerca de 0,0079 mm e um diâmetro mínimo (D_{10}) de 0,0011 mm.
- ✓ A lama proveniente da serragem do granito Amarelo Rio Mel (LARM), é composta por partículas com o valor de diâmetro máximo (D_{90}) de 0,0987 mm, um diâmetro médio (D_{50}) de cerca de 0,0086 mm e um diâmetro mínimo (D_{10}) de 0,0011 mm.
- ✓ A lama originária do filtro prensa que desidrata as lamas da serragem de granitos variados (FPEM), é composta por partículas com o valor de diâmetro máximo (D_{90}) de 0,1470mm, um diâmetro médio (D_{50}) de cerca de 0,0095 mm e um diâmetro mínimo (D_{10}) de 0,0012 mm.
- ✓ A lama recolhida no filtro prensa que desidrata as lamas do corte de diferentes mármore e calcários (FPMC), é composta por partículas com o valor de diâmetro máximo (D_{90}) de 0,0292 mm, um diâmetro médio (D_{50}) de cerca de 0,0039 mm e um diâmetro mínimo (D_{10}) de 0,0008 mm.

Quadro 28 – Dimensões das partículas por amostras (< 0,075 mm).

Amostra (< 0,075 mm)	D ₁₀ (mm)	D ₅₀ (mm)	D ₉₀ (mm)
Lama Cinza Antas (LCA)	0,0011	0,0079	0,0907
Lama Amarelo Rio Mel (LARM)	0,0011	0,0086	0,0987
Filtro Prensa Engenho Multilâminas (FPEM)	0,0012	0,0095	0,1470
Filtro Prensa Mármore e Calcários (FPMC)	0,0008	0,0039	0,0292

**Figura 101** - Análise Granulométrica pelo método de sedimentação por atenuação de raios x.

Em síntese, as quatro amostras de lama analisadas pelo método de sedimentação por atenuação de raios x apresentam uma granulometria bastante fina, maioritariamente inferior a 0,01 mm, sendo o diâmetro médio (D₅₀), aproximado nas quatro amostras, variando dos 0,0039 mm (FPMC) até aos 0,0095 mm (FPEM). Os resultados obtidos demonstram que estas amostras estão dentro dos valores apresentados nos diversos estudos expostos no Estado da Arte, que referem que as lamas no geral possuem uma granulometria inferior a 0,075 mm.

Quanto à granalha, possivelmente esta deverá estar presente em menores quantidades, quando comparadas com as amostras utilizadas no ensaio de análise pelo método de peneiração, devido ao material das amostras ser maioritariamente inferior a 0,01 mm e ainda ao facto da preparação da própria amostra para ensaio no granulómetro laser.

Estas lamas têm potencial para ser aproveitadas como subproduto, pois cumprem a especificação da granulometria dos materiais para fins industriais, que regra geral, é inferior a 1 mm e por possuírem dimensão maioritariamente menor que 0,063 mm (LCA= 85%; LARM= 85%; FPEM= 80%; FPMC = 90%), podem ainda ser classificadas como fíler. Assim, também, por todos estes motivos, estas são as amostras utilizadas nos estudos de aproveitamento das lamas apresentados em 3.3.

6.1.2. Determinação da massa volúmica

Os valores de massa volúmica foram obtidos segundo a metodologia anteriormente descrita e permitem caracterizar as lamas quanto à densidade das partículas. Os resultados encontram-se apresentados para cada amostra de Lama (LCA, LARM, FPEM, FPMC) no **Quadro 29**. Na **Figura 102** apresenta-se um gráfico que permite a comparação dos valores obtidos para as diferentes amostras em estudo.

Quadro 29 – Resultados obtidos de massa volúmica.

Amostra	Lama Cinza Antas (LCA)	Lama Amarelo Rio Mel (LARM)	Filtro Prensa Engenho Multilâminas (FPEM)	Filtro Prensa Mármore e Calcários (FPMC)
Massa do provete seco – m (g)	58,894	58,453	57,961	58,014
Valor lido no voluminómetro – V_1 (cm ³)	0,7	0,8	0,8	0,4
Valor lido no voluminómetro – V_2 (cm ³)	21,9	22,4	22,4	22,4
Massa volúmica – mv (g/cm ³)	2,78	2,71	2,68	2,64

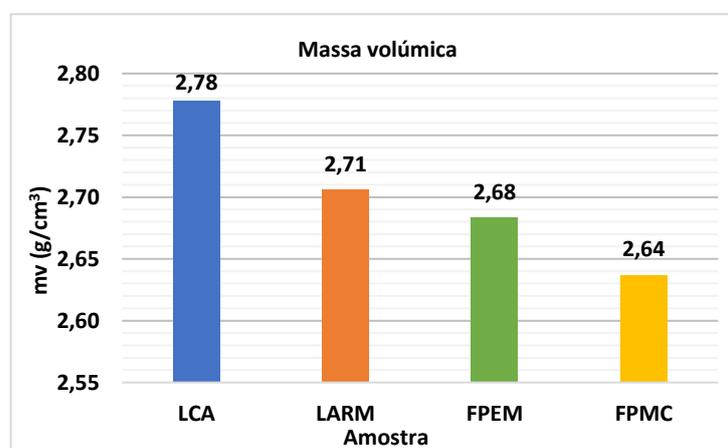


Figura 102 – Gráfico dos resultados da massa volúmica das lamas.

Os resultados obtidos estão de acordo com os valores expectáveis, entre os 2,64 g/cm³ e 2,78g/cm³. A lama cuja densidade supera a das outras, é a LCA, esta diferença pode estar relacionada com o maior teor de Fe₂O₃, proveniente do desgaste do abrasivo utilizado na serragem dos granitos ou ainda com a maior presença de outros elementos químicos (Al₂O₃ e TiO₂) nesta lama, confirmado pela análise química.

Relativamente às amostras oriundas dos filtros-prensa, a amostra FPEM, apresenta um valor de densidade superior ao da amostra FPMC, isto deve-se igualmente a um maior teor de Fe₂O₃, uma vez que a gralha não é utilizada no processo de corte de mármore e calcários. A diferença de valores entre estas duas amostras (Filtro Prensa Engenho Multilâminas e Filtro Prensa Mármore e Calcários) pode estar associada ao facto de os granitos (2,6 a 2,8 g/cm³) apresentarem densidades superiores às dos mármore e calcários (2,2, a 2,7 g/cm³), como expectável.

Relativamente a todas as amostras de lamas estudadas também foi possível apurar que apresentam massa volúmica menores que a do cimento (> 3,05 g/cm³) e maiores que a da areia (2,51 g/cm³), de acordo com descrito no capítulo 2 do Estado da Arte.

6.1.3. Determinação da qualidade dos finos - Ensaio de Azul de metileno

Os valores do teor de azul de metileno foram obtidos seguindo a metodologia anteriormente descrita e permitem caracterizar a qualidade dos finos presentes nas lamas. Os resultados obtidos por amostra de lama (LCA, LARM, FPEM, FPMC) são apresentados no **Quadro 30**.

Quadro 30 - Resultados obtidos Azul de metileno.

Amostra	Lama Cinza Antas (LCA)	Lama Amarelo Rio Mel (LARM)	Filtro Prensa Engenho Multilâminas (FPEM)	Filtro Prensa Mármore e Calcários (FPMC)
Massa do provete – m (g)	30	30	30	30
Volume total de solução corante – V ₁ (ml)	5	5	5	5
Valor de Azul de Metileno – M _{BF} (g/Kg)	1,7	1,7	1,7	1,7

Como é possível constatar foi obtido o mesmo valor de 1,7 g/Kg de azul de metileno para as quatro amostras. Pode-se concluir que as lamas são pouco ativas e pertencem à categoria “MB_F10”, através da **Quadro 31**

Quadro 31 - Categorias para os valores máximos de azul de metileno (adaptado de NP EN 13043:2004)

Valor de azul de metileno da fração 0/125 mm - MB _F (g/Kg)	Categoria MB _F
---	MB _F NT
≤ 10	MB _F 10
≤ 25	MB _F 25
> 25	MB _F Declarado
Não requerido	MB _F NR

Assim, após a realização do ensaio, é possível aferir que o ensaio devido ao tipo de material em causa, apresenta-se como pouco eficaz, dando, no entanto, pistas sobre a qualidade dos materiais.

6.1.4. Análise Química

A análise química das amostras foi realizada segundo a metodologia anteriormente descrita e os resultados obtidos permitem obter a composição química de cada lama.

Uma vez que não foi detetado o sódio (Na), através da análise por FRX-P, foi realizada uma análise química quantitativa por espectrofotometria de absorção atômica, uma vez que esta determinação é importante, pois este elemento é fundamental na indústria da cerâmica, por ser um dos principais fundentes no processo de produção.

A análise química quantitativa do Sódio (Na), sendo um elemento fundamental no fabrico de cerâmica, foi realizada por espectrofotometria de absorção atômica, uma vez que este elemento não foi detetado no ensaio FRX-P.

6.1.4.1. Análise química quantitativa por espectrometria de fluorescência de raios x – Equipamento portátil

A análise química por FRX-P realizada sobre as amostras estudadas é apresentada no **Quadro 32** e no **Quadro 33**, com valores dos principais compostos químicos. Os gráficos da **Figura 103 e 104** foram realizados para uma melhor análise dos resultados.

Os resultados encontram-se apresentados para cada amostra, LCA (Lama Cinza Antas), LARM (Lama Amarelo Rio Mel), FPEM (Filtro Prensa Engenho Multilâminas) e FPMC (Filtro Prensa Mármore e Calcários), sendo que no **Anexo V**, podem ser observados os relatórios gerados para cada uma das lamas no software de transferência de dados *NITON*, tendo sido realizados três ensaios para cada amostra.

Quadro 32 - Resultados obtidos da análise química da fração > 0,075 mm.

	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	MnO (%)	CaO (%)	K ₂ O (%)	TiO ₂ (%)	Outros (%)	Total (%)
Lama Cinza Antas (LCA)	51,86	13,95	25,14	0,30	1,48	4,10	0,36	2,83	100
Lama Amarelo Rio Mel (LARM)	58,00	10,03	15,59	0,16	1,06	3,37	0,19	11,61	100
Filtro Prensa Engenho Multilâminas (FPEM)	46,40	14,68	28,16	0,28	1,16	4,24	0,26	4,90	100
Filtro Prensa Mármore e Calcários (FPMC)	35,20	9,87	5,62	0,10	13,43	3,21	0,40	32,17	100

Quadro 33 - Resultados obtidos da análise química da fração < 0,075 mm.

	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	MnO (%)	CaO (%)	K ₂ O (%)	TiO ₂ (%)	Outros (%)	Total (%)
Lama Cinza Antas (LCA)	58,21	11,39	19,57	0,21	2,12	4,17	0,23	4,09	100
Lama Amarelo Rio Mel (LARM)	60,68	8,99	6,03	0,08	3,39	3,93	0,16	16,74	100
Filtro Prensa Engenho Multilâminas (FPEM)	62,86	9,74	9,26	0,11	3,34	4,06	0,17	10,45	100
Filtro Prensa Mármore e Calcários (FPMC)	44,06	6,36	1,71	0,03	17,09	2,65	0,12	27,98	100

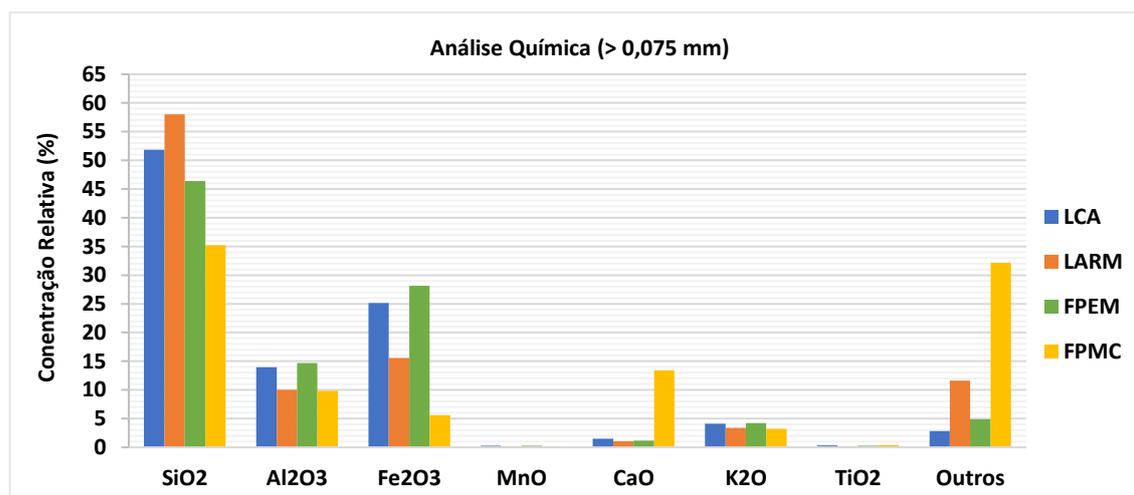


Figura 103 - Gráficos dos resultados da análise Química das lamas (FRX-P) (> 0,075 mm).

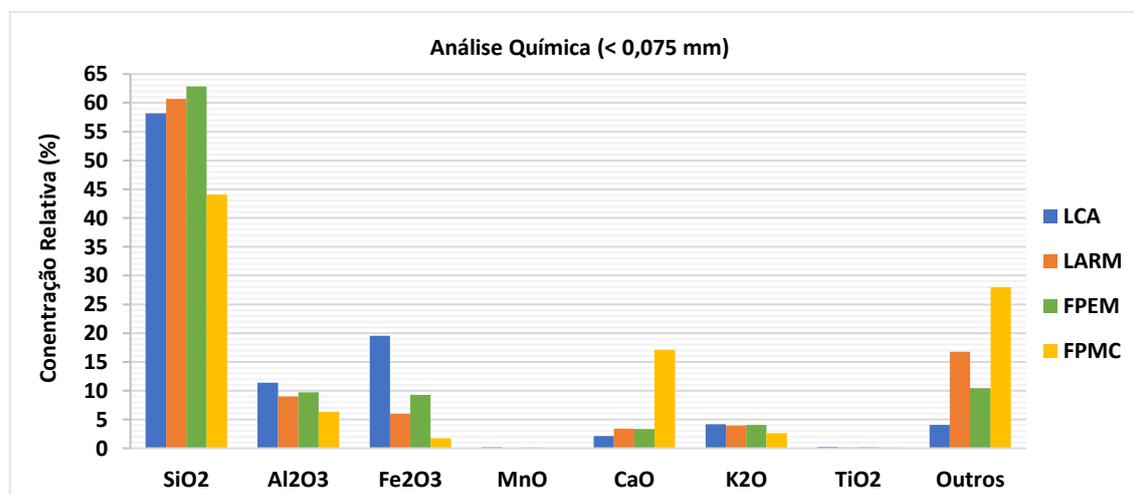


Figura 104 – Gráficos dos resultados da análise Química das lamas (FRX-P) (< 0,075 mm).

A sílica (SiO_2) é o composto predominante em todas as lamas provenientes da serragem de granitos (LCA, LARM e FPEM). Estes valores eram expectáveis, pois estas amostras são provenientes da serragem de granitos, cuja composição química é composta maioritariamente por esse elemento. Quando analisadas as duas frações nota-se um aumento no teor de sílica na fração de material < 0,075mm, o que se pode dever à dimensão das partículas minerais.

De seguida, o ferro (Fe_2O_3) é o elemento com maior representatividade nas três lamas de composição granítica: LCA, LARM e FPEM. Este elevado teor de ferro estará maioritariamente associado à composição química dos granitos, ao seu método de corte e à granalha presente na calda abrasiva. Quando comparadas as duas frações de lama analisadas, o ferro (Fe_2O_3), é igualmente o segundo composto com maior representatividade, contudo a redução de concentrações na fração < 0,075mm está relacionada com a granulometria da granalha no final da serragem.

Relativamente ao cálcio (CaO), encontra-se em maior quantidade na amostra FPMC devido à origem da mesma, obtida a partir do corte de mármore e calcários, cuja composição é essencialmente carbonato de cálcio. Nas restantes amostras de composição granítica, este elemento está presente devido à utilização de cal durante o processo de corte, sendo que a percentagem deste é maior nas amostras de menor granulometria, o que provavelmente se deve à granulometria da cal utilizada na serragem dos granitos.

Quanto aos feldspatos, surgem em todas as amostras representados pelo potássio (K_2O), com maior presença nas amostras de lama provenientes da serragem de granitos (LCA, LARM e FPEM), como é expectável devido à sua composição mineralógica.

Os resultados obtidos no ensaio FRX-P sugerem também um elevado teor de alumina (Al_2O_3) e baixos teores de manganês (MnO), e titânio (TiO_2). A concentração destes compostos diminuiu na fração <0,075, o que se pode dever à sua granulometria, sendo que se acredita poder estar associada aos materiais de desgaste resultantes das operações de corte, tais como:

- ✓ as lâminas de aço - carbono, dos engenhos multilâminas utilizados na serragem de granitos, que contêm na sua composição Carbono (C), Manganês (Mn), Sílica (Si), Fósforo (P) e Enxofre (S);
- ✓ os segmentos diamantados das lâminas dos engenhos utilizadas no corte de mármore e calcários, que possuem Cobalto (Co), Cobaltite (CoAsS), Diamante e Bronze;
- ✓ a própria granalha, que além de ferro, é composta por elementos como Carbono (C), Manganês (Mn), Fosforo (P) e Enxofre (S).

Os valores obtidos nesta análise química quantitativa por espectrometria de fluorescência de raios x (FRX-P) estão de acordo com o expectável, de acordo os resultados obtidos nos estudos apresentados no Estado da Arte (e.g.: Freire e Mota (1995), Calmon et al. (1998), Moura et al. (2002), Tenório et al. (2005)), sendo que é viável a aplicação destes compostos químicos nos aproveitamentos descritos nesse capítulo.

6.1.4.2. Análise química quantitativa do Sódio por espectrofotometria de absorção atômica

Os resultados obtidos para cada amostra, LCA, LARM, FPEM e FPMC são apresentados no **Quadro 34**, para duas réplicas por lama em estudo, exceto para a amostra LARM, pois uma das amostras ficou inutilizável na etapa de centrifugação.

Este tipo de análise instrumental quantitativa requer a determinação de uma curva de calibração, em que se estuda uma relação entre o sinal medido em soluções padrão e as suas concentrações, sendo a melhor curva de calibração aquela que permite determinar o valor mais próximo, entre o valor determinado e o valor teórico, dentro de uma gama de concentrações pré-definidas, sendo por isso calculada por métodos estatísticos de regressão. Na **Figura 105** encontra-se representada a curva de calibração utilizada durante o ensaio de análise química quantitativa do Sódio (Na) por espectrofotometria de absorção atômica, tendo esta sido projetada previamente à realização do mesmo.

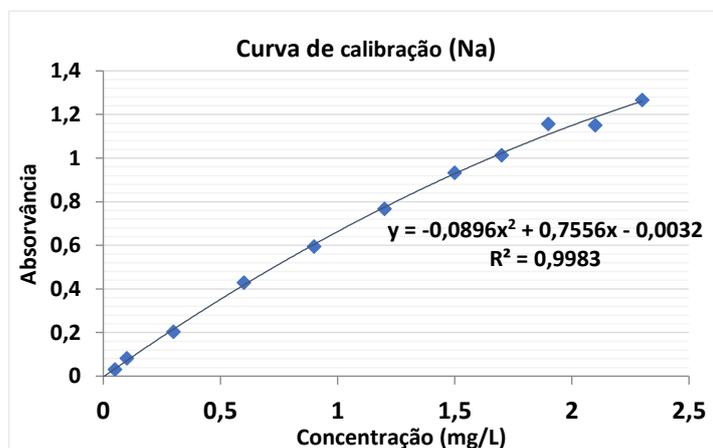


Figura 103 – Curva de calibração (Na).

Através da análise do gráfico da **Figura 106** é possível observar as concentrações médias obtidas por amostra de lama. A amostra que apresenta uma maior concentração de sódio (Na), um dos principais fundentes no processo de cozedura de cerâmicos, é a proveniente do filtro prensa dos mármore e calcários (FPMC), com 1,053 mg/g, seguida da lama da serragem do granito cinza antes (LCA), com concentração de 0,861 mg/g. Isto pode estar relacionado com um erro no ensaio, ou devido à própria dimensão das partículas utilizadas no ensaio (fração <0,075 mm), uma vez que

devido à composição química dos granitos, seria expectável que apresentassem maiores teores de sódio (Na).

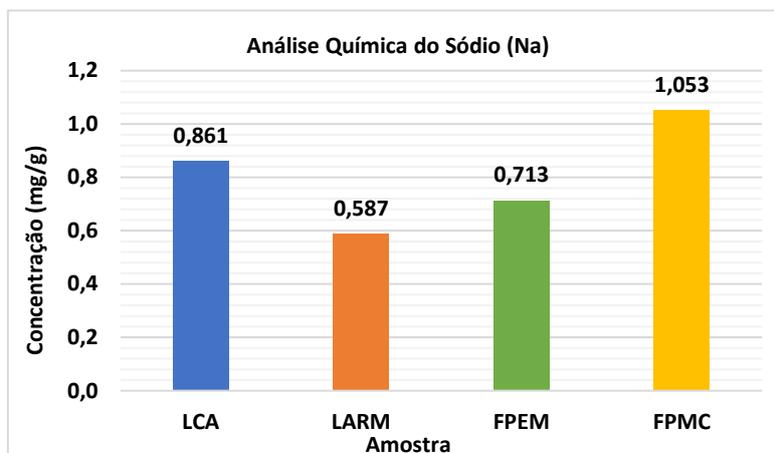


Figura 104 – Resultados obtidos no ensaio de análise química quantitativa do Sódio (Na).

Quadro 34 – Resultados obtidos no ensaio de análise química quantitativa do Sódio (Na).

Amostra	Massa (g)	Absorvância	Concentração (mg/L)	Média por provete (mg/g)	Média por amostra (mg/g)
Lama Cinza Antas 1 (LCA1)	0,502	0,64557	0,9702	0,9770	0,861
		0,66181	0,9983		
		0,64781	0,9741		
Lama Cinza Antas 2 (LCA2)	0,504	0,5135	0,7507	0,7452	
		0,5141	0,7516		
		-	-		
Lama Amarelo Rio Mel 2 (LARM2)	0,498	0,4087	0,5858	0,5871	0,587
		0,4094	0,5869		
		0,4045	0,5794		
Filtro Prensa Engenho Multilâminas (FPEM1)	0,501	0,5693	0,8417	0,8552	0,713
		0,5826	0,8637		
		0,5816	0,8620		
Filtro Prensa Engenho Multilâminas (FPEM2)	0,499	0,3932	0,5621	0,5704	
		0,4043	0,5791		
		0,3946	0,5642		
Filtro Prensa Mármore e Calcários (FPMC1)	0,500	0,8723	1,387	1,422	1,053
		0,9053	1,453		
		0,8920	1,426		
Filtro Prensa Mármore e Calcários (FPMC2)	0,500	0,4706	0,6822	0,6837	
		0,4739	0,6875		
		0,4700	0,6813		

6.1.5. Estudo da viabilidade do aproveitamento das lamas em argamassas

Neste subcapítulo são apresentados e analisados os resultados experimentais dos ensaios das argamassas (com e sem incorporação de lamas), a determinação dos valores das resistências mecânicas, à flexão e à compressão, para diferentes tempos de hidratação, de acordo com as metodologias anteriormente descritas

A argamassa padrão, de referência, sem incorporação de lama, e as restantes com incorporação do resíduo das quatro amostras, LCA, LARM, FPEM e FPMC foram ensaiadas aos 7, 28 e 56 dias de hidratação. Nas argamassas em estudo com incorporação de lama foi substituído parte do cimento nas percentagens de 20 e 40 por cento.

6.1.5.1. Resistência à Flexão

Foi realizado o ensaio da resistência à flexão para a análise no estado endurecido das argamassas. No **Quadro 35**, encontram-se os valores obtidos para cada argamassa, que permitiram gerar os gráficos da **Figura 107 e 108**, representativos da resistência à flexão de cada argamassa em estudo. Os valores tensão de rotura à flexão foram obtidos com base num provete de argamassa para cada um dos tempos de hidratação.

Quadro 35 - Resultados obtidos no ensaio de resistência à flexão.

Resistência à flexão (MPa)					
Amassadura	Incorporação (%)	Molde	7 dias	28 dias	56 dias
Padrão	0	A	7,73	7,03	8,95
Lama Cinza Antas (LCA)	20	B	7,26	7,33	6,26
Lama Amarelo Rio Mel (LARM)		C	6,16	6,98	6,33
Filtro Prensa Engenho Multilâminas (FPEM)		D	6,68	6,61	7,50
Filtro Prensa Mármore e Calcários (FPMC)		L1104	7,52	6,96	7,45
Lama Cinza Antas (LCA)	40	L1105	5,09	5,46	6,16
Lama Amarelo Rio Mel (LARM)		L1106	5,06	5,23	4,99
Filtro Prensa Engenho Multilâminas (FPEM)		E	5,20	5,60	5,60
Filtro Prensa Mármore e Calcários (FPMC)		F	5,72	6,35	6,75

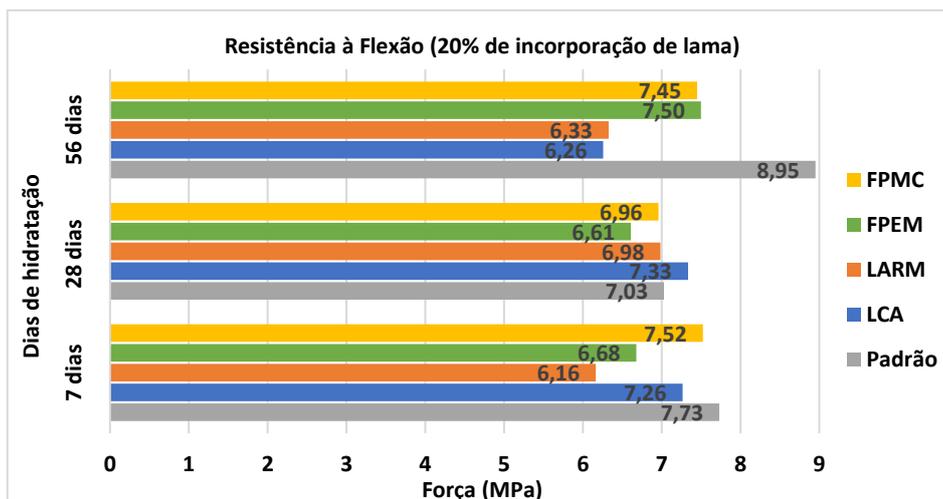


Figura 105 - Resultados obtidos da resistência à flexão (20% de incorporação de lama).

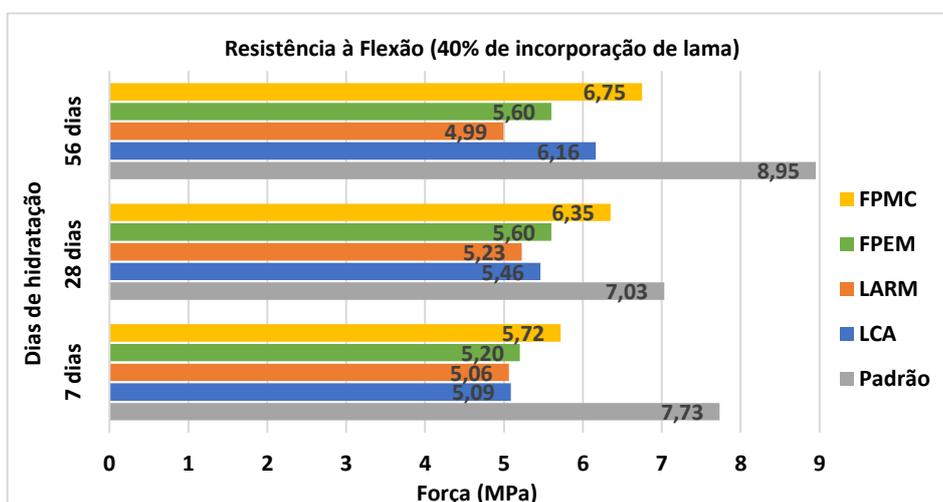


Figura 106 – Resultados obtidos da resistência à flexão (40% de incorporação de lama).

Da análise dos resultados obtidos da resistência à flexão das argamassas com incorporação das amostras de lama, observa-se que:

- ✓ Nos provetes com incorporação de resíduo, a argamassa apresenta uma menor resistência à flexão, em relação à argamassa padrão, independentemente do tempo de hidratação, com exceção da amostra LCA (20% de incorporação) aos 28 dias de hidratação, que atingiu o valor de 7,33 MPa, superior aos 7,03 MPa da amostra padrão;
- ✓ Na percentagem de 20 % de incorporação de lama as amostras LCA e LARM obtiveram um aumento da resistência à flexão até aos 28 dias, atingindo os 7,33 MPa e 6,98 MPa respetivamente, verificando-se em seguida uma diminuição até 6,26 MPa (LCA) e 6,33 MPa (LARM).
- ✓ Já na amostra FPMC a resistência diminui dos 7 dias (7,52 MPa) aos 28 dias (6,96 MPa) e aos 56 dias voltou a aumentar quase até ao valor obtido no ensaio aos 7 dias (7,45 MPa);

- ✓ Na percentagem de 40% de incorporação de lama há um aumento da resistência à flexão independentemente do tempo de hidratação para todas as amostras de lama, exceto para a amostra LARM;
- ✓ Na mesma percentagem, a amostra que atinge uma maior resistência aos 56 dias é a amostra FPMC (6,75 MPa), e nos 20% de incorporação, a argamassa com maior resistência é a da amostra FPEM (7,50 MPa), de valor quase igual à da amostra FPMC (7,45 MPa);
- ✓ Na percentagem de 40%, a amostra que atinge uma menor resistência aos 56 dias é a amostra LARM (4,99 MPa), e nos 20%, a argamassa com menor resistência é a da amostra LCA (6,26 MPa), de valor quase igual à da amostra LARM (6,33 MPa);
- ✓ Na percentagem de 20% de incorporação de lama, analisando as argamassas no total do tempo de hidratação (56 dias), as amostras revelaram uma diminuição da resistência em relação à argamassa padrão, de cerca de: 30% (LCA), 29% (LARM), 16% (FPEM) e 17% (FPMC);
- ✓ Na percentagem de 40% de incorporação de lama, analisando as argamassas no total do tempo de hidratação (56 dias), as amostras revelaram uma diminuição da resistência em relação à argamassa padrão, de cerca de: 31% (LCA), 44% (LARM), 37% (FPEM) e 44% (FPMC);
- ✓ Assim, quando comparadas as duas percentagens de incorporação, a de 20% é a que apresenta uma maior capacidade resistente à flexão, independentemente da amostra e do tempo de hidratação.

Relativamente aos resultados obtidos no ensaio de resistência à flexão, não foi possível verificar resultados semelhantes aos estudos apresentados no Estado da Arte. Os resultados obtidos traduziram-se na diminuição da resistência o que se pode dever a alguns fatores, tais como:

- Uma elevada percentagem de incorporação utilizada neste estudo;
- A substituição ter sido efetuada por parte da dosagem do cimento em vez da areia;
- Limitação dos 56 dias como tempo de hidratação máximo;
- A forma lamelar das partículas das lamas, que levam a que o rearranjo com os restantes componentes da argamassa, como o cimento e a areia (de forma granular), se faça de modo diferente da argamassa padrão.

6.1.5.2. Resistência à Compressão

O ensaio de determinação da resistência compressão foi realizado num total de dezoito provetes (dois por amostra) provenientes do ensaio à flexão. No **Quadro 36**, apresentam-se os valores obtidos que permitiram gerar os gráficos da **Figura 109 e 110**, representativos da resistência obtida para cada argamassa em estudo, com a devida percentagem de incorporação. Os valores da tensão de rotura à compressão apresentados correspondem à média dos valores obtidos nos dois provetes que resultaram dos provetes ensaiados à flexão.

Quadro 36 - Resultados obtidos no ensaio de resistência à compressão.

Resistência à Compressão (MPa)					
Amassadura	Incorporação (%)	Molde	7 dias	28 dias	56 dias
Padrão	0	A	45,47	53,19	59,80
Lama Cinza Antas (LCA)	20	B	39,60	45,06	46,96
Lama Amarelo Rio Mel (LARM)		C	37,86	44,77	45,69
Filtro Prensa Engenho Multilâminas (FPEM)		D	36,88	44,39	45,82
Filtro Prensa Mármore e Calcários (FPMC)		L1104	41,61	46,90	48,64
Lama Cinza Antas (LCA)	40	L1105	26,95	31,29	30,96
Lama Amarelo Rio Mel (LARM)		L1106	27,55	30,17	32,10
Filtro Prensa Engenho Multilâminas (FPEM)		E	25,23	29,95	28,58
Filtro Prensa Mármore e Calcários (FPMC)		F	27,10	33,02	34,30

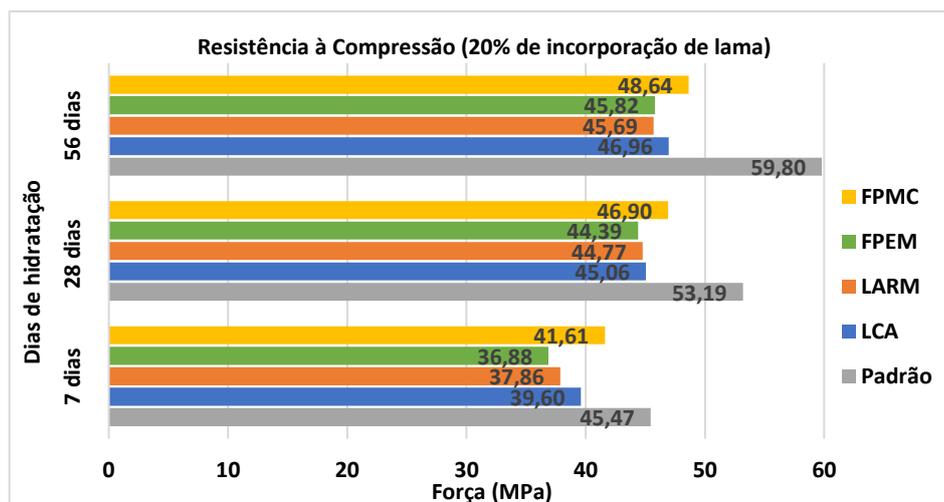


Figura 107 - Resultados obtidos da resistência à compressão (40 % de incorporação de lama).

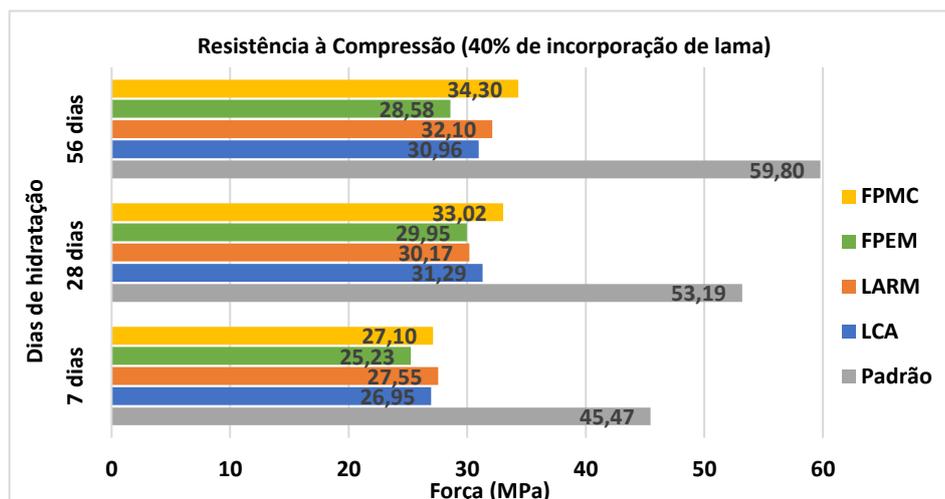


Figura 108 - Resultados obtidos da resistência à compressão (40 % de incorporação de lama).

Da análise dos resultados obtidos para a resistência à compressão das argamassas com incorporação das amostras de lama, observa-se que:

- ✓ Nos provetes com incorporação de resíduo, a argamassa apresenta uma menor capacidade resistente à compressão, em relação à argamassa padrão, independentemente do tempo de hidratação, nunca atingindo a resistência do cimento utilizado (52,5 MPa);
- ✓ Na generalidade, todas as amostras apresentam um acréscimo de resistência à compressão ao longo do aumento do tempo de hidratação, exceto as amostras LCA e FPEM (40% de incorporação de lama) que diminuem a resistência aos 56 dias;
- ✓ Constata-se que para ambas as percentagens de incorporação a amostra FPMC é a que atinge maior resistência à compressão (20% = 48,64 MPa; 40% = 34,30 MPa);
- ✓ Na percentagem de 20%, a amostra que atinge uma menor resistência aos 56 dias é a amostra LARM (45,69 MPa), e nos 40%, a argamassa com menor resistência é a amostra FPEM (28,58 MPa), o que poderá estar relacionado com a composição granítica de ambas as amostras, visto serem as amostras que apresentam maior concentração de sílica;
- ✓ Na percentagem de 20% de incorporação de lama, analisando as argamassas no final da hidratação (56 dias), as amostras revelaram uma diminuição da resistência em relação à argamassa padrão, de cerca de: 20% (LCA), 24% (LARM), 23% (FPEM) e 19% (FPMC);
- ✓ Na percentagem de 40% de incorporação de lama, analisando as argamassas no final da hidratação (56 dias), as amostras revelaram uma diminuição da resistência em relação à argamassa padrão, de cerca de: 48% (LCA), 46% (LARM), 52% (FPEM) e 49% (FPMC);
- ✓ Assim, quando comparadas as duas percentagens de incorporação, a de 20% é a que apresenta argamassas de maior resistência à compressão, independentemente da amostra e do tempo de hidratação.

Relativamente aos resultados obtidos no ensaio de resistência à compressão, também não foi possível verificar resultados semelhantes aos estudos apresentados no Estado da Arte. Os resultados obtidos traduziram-se na diminuição da resistência o que se pode dever aos mesmos fatores, já anteriormente referidos no ensaio de resistência à flexão:

- Uma elevada percentagem de incorporação utilizada neste estudo;
- A substituição ter sido efetuada por parte da dosagem do cimento em vez da areia;
- Limitação dos 56 dias como tempo de hidratação máximo;
- A forma lamelar das partículas das lamas, que levam a que o rearranjo com os restantes componentes da argamassa, como o cimento e a areia (de forma granular), se faça de modo diferente da argamassa padrão.

6.1.5.3. Absorção de água

Relativamente aos ensaios no estado endurecido apresenta-se ainda o estudo efetuado ao parâmetro de absorção de água por cada provete de argamassa, no final do seu tempo de hidratação correspondente. O ensaio foi realizado de acordo com a metodologia anteriormente descrita e os valores obtidos dos ensaios de absorção podem ser observados no **Quadro 37**. Os valores permitiram ainda gerar os gráficos das **Figuras 111 e 112**, representativos da percentagem de absorção de água por amostra por tempo de hidratação.

Quadro 37 – Resultados obtidos no ensaio de absorção de água.

Absorção de água (%)					
Amassadura	Incorporação (%)	Molde	7 dias	28 dias	56 dias
Padrão	0	A	0,85	1,18	1,87
Lama Cinza Antas (LCA)	20	B	0,83	1,08	1,33
Lama Amarelo Rio Mel (LARM)		C	0,79	1,09	1,30
Filtro Prensa Engenho Multilâminas (FPEM)		D	0,65	0,94	1,22
Filtro Prensa Mármore e Calcários (FPMC)		L1104	0,66	0,95	1,15
Lama Cinza Antas (LCA)	40	L1105	0,65	0,75	0,80
Lama Amarelo Rio Mel (LARM)		L1106	0,59	0,70	0,78
Filtro Prensa Engenho Multilâminas (FPEM)		E	0,54	0,64	0,75
Filtro Prensa Mármore e Calcários (FPMC)		F	0,58	0,65	0,74

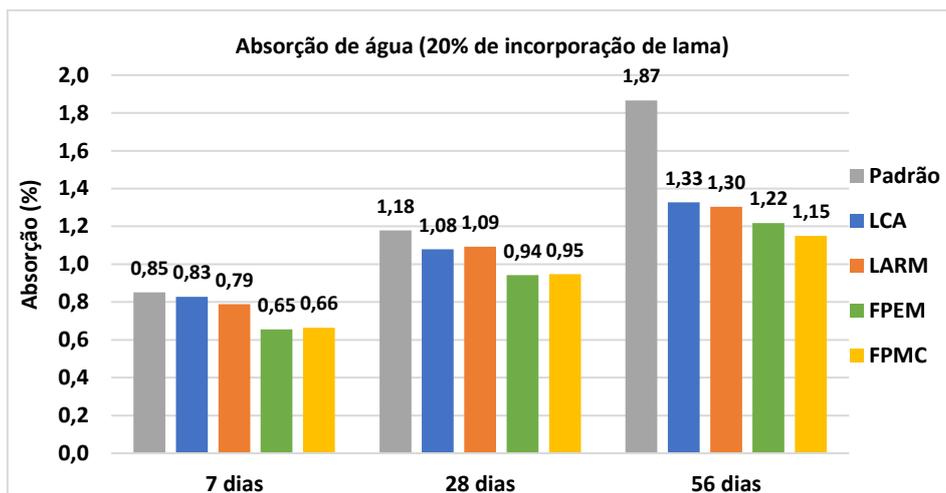


Figura 109 - Resultados obtidos da absorção de água (20% de incorporação de lama).

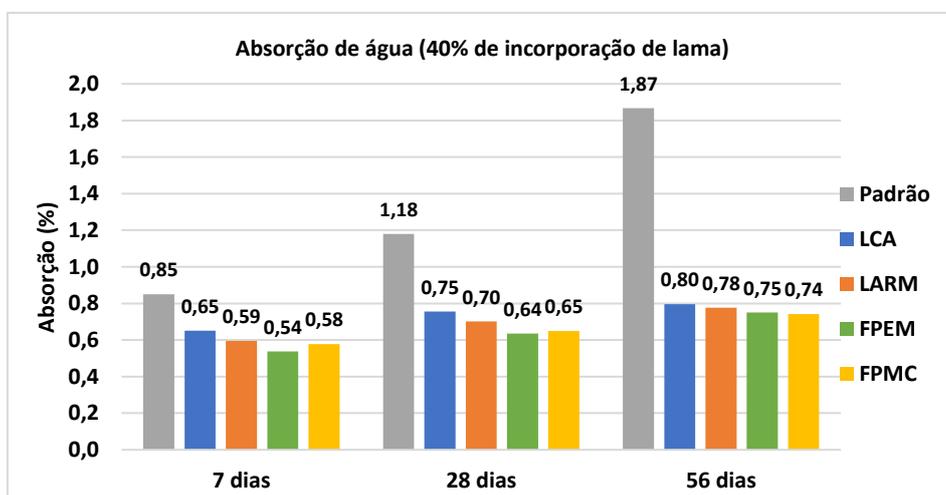


Figura 110 - Resultados obtidos da absorção de água (40% de incorporação de lama).

Da análise dos gráficos das **Figura 111 e 112**, relativos aos resultados obtidos no ensaio de absorção de água, realizado nos provetes de argamassa, obtidos com incorporação das lamas em estudo, observa-se que:

- ✓ As argamassas com incorporação de lama apresentam uma menor absorção de água, quando comparadas com a argamassa padrão. Isto pode dever-se à maior densidade das argamassas com incorporação de lama, o que provoca uma menor absorção de água e igualmente à provável atuação do resíduo como um fíler, proporcionando uma diminuição dos poros capilares e um conseqüente fluxo capilar da água menor, no interior da argamassa;
- ✓ Em todas as argamassas a absorção de água aumenta à medida que o tempo de hidratação aumenta, o que é expectável pela saturação das mesmas;

- ✓ De todas as argamassas, a que apresentou uma maior percentagem absorção de água aos 56 dias foi a amostra LCA para a incorporação de 20% e 40%;
- ✓ De todas as argamassas, a que atingiu uma menor percentagem de absorção de água aos 56 dias foi a amostra LCA (20 e 40%);
- ✓ Na percentagem de 20% de incorporação de lama, analisando as argamassas no final da hidratação (56 dias), as amostras revelaram uma diminuição da percentagem de absorção de água em relação à argamassa padrão, de cerca de: 29% (LCA), 30% (LARM), 35% (FPEM) e 39% (FPMC);
- ✓ Na percentagem de 40% de incorporação de lama, analisando as argamassas no final da hidratação (56 dias), as amostras revelaram uma diminuição da percentagem de absorção de água em relação à argamassa padrão, de cerca de: 57% (LCA), 58% (LARM), 59% (FPEM) e 60% (FPMC);
- ✓ Assim, quando comparadas as duas percentagens de incorporação de lama, observa-se que a percentagem de 40%, apresenta menores valores de absorção de água, o que pode ser justificado pelo facto de a quantidade de amostra incorporada ser superior, existindo assim uma diminuição da permeabilidade, visto que a compacidade aumenta, com uma consequente diminuição dos poros capilares e fluxo de água através dos mesmos.

6.1.6. Estudo da viabilidade do aproveitamento das lamas em matrizes cerâmicas

Para estudar a viabilidade de aplicação das lamas em matrizes cerâmicas, foram realizadas pastilhas de cada uma das lamas em estudo de forma a serem submetidas a um ensaio de sinterização, de acordo com a metodologia anteriormente descrita. Adicionalmente, antes e após o ensaio as mesmas foram analisadas quimicamente através da técnica de fluorescência de raios x (FRX-P). No **Anexo VI**, podem ser observados os relatórios gerados para cada uma das pastilhas, no software de transferência de dados *NITON*.

Nas **Figuras 113 e 114** pode-se observar o aspeto e forma final das pastilhas antes e após a realização do ensaio de sinterização. Através da observação e comparação entre as duas imagens constata-se que houve mudança de cor e que a sua estrutura alterou ligeiramente, no entanto os bordos, quanto à sua forma, não se alteraram durante o processo de cozedura da pastilha, o que indica que estes resíduos apresentam um índice de fusibilidade baixo, logo não servem como fundentes, podendo ser incorporados em cerâmicas dependendo da aplicação.

No **Quadro 38**, são apresentados os valores obtidos no ensaio de FRX-P, da análise química antes (“Designação da amostra_1”) e após o processo de sinterização (“Designação da amostra_2”). O sódio (Na) só foi possível analisar pelo método anteriormente referido em 6.1.4.2, sendo que os valores obtidos foram utilizados como valor da análise química antes do processo de sinterização.

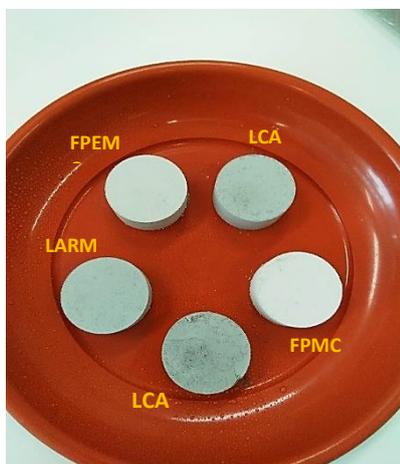


Figura 113 – Pastilhas antes do ensaio.

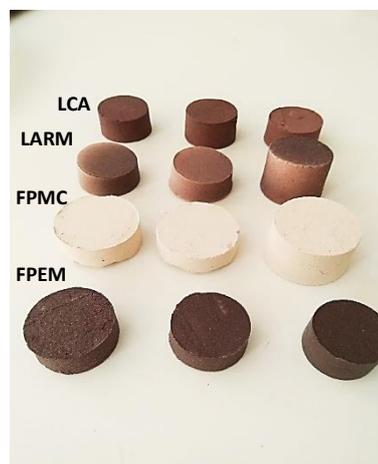


Figura 114 – Pastilhas após o ensaio.

Quadro 38 - Resultados obtidos no ensaio de FRX-P antes e após o processo de sinterização.

	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	MnO (%)	CaO (%)	K ₂ O (%)	TiO ₂ (%)	Outros (%)	Na (mg/g)
LCA_1	71,47	12,93	6,36	0,07	2,21	4,05	0,15	2,76	0,861
LCA_2	72,17	12,18	6,77	0,08	3,12	3,72	0,15	1,18	
LARM_1	65,94	12,55	5,90	0,07	3,4	3,89	0,15	8,10	0,587
LARM_2	71,13	12,60	6,78	0,08	2,00	3,83	0,14	3,44	
FPEM_1	70,45	13,13	8,24	0,11	3,24	3,94	0,15	0,74	0,713
FPEM_2	68,37	13,03	10,68	0,13	2,83	3,60	0,15	1,21	
FPMC_1	44,94	7,13	1,62	0,03	16,85	2,56	0,12	26,75	1,053
FPMC_2	54,33	9,57	1,98	0,04	20,08	2,53	0,14	11,17	

A análise dos resultados do ensaio de análise química das pastilhas (FRX-P), antes e após o processo de sinterização, observa-se que:

- ✓ A sílica (SiO₂) é o elemento dominante em todas as pastilhas, seguido de alumina (Al₂O₃), exceto na amostra FPMC, na qual é o cálcio (CaO);
- ✓ Antes do ensaio, a amostra que apresenta a maior percentagem de potássio (K₂O), fundente principal, é a amostra LCA (4,05%), mas todas as amostras apresentam valores muito próximos ou da mesma ordem de grandeza;

- ✓ Antes do ensaio, a amostra que apresenta a maior concentração de sódio (Na), fundente principal (Na_2O) é a amostra FPMC;
- ✓ Quanto aos fundentes secundários ($\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{CaO}$), a amostra FPEM é a que apresenta a maior percentagem de ferro (8,24%) e a amostra FPMC é a que apresenta a maior percentagem de cálcio (16,85%);
- ✓ O elemento ferro (Fe_2O_3), com maior presença nas amostras de composição granítica (LCA, LARM e FPEM) é responsável, para além da acção fundente, de conferir cor alaranjada/acastanhada às pastilhas, após o processo de sinterização;
- ✓ A sílica (SiO_2), em combinação com outros componentes como a alumina (Al_2O_3) e os fundentes, formam a fase vítrea e novas fases cristalinas durante a queima, enquanto o quartzo não fundido, desempenha um papel importante na estabilidade estrutural da peça cerâmica. As amostras de composição granítica (LCA, LARM E FPEM) são as que apresentam um maior teor destes dois elementos.
- ✓ As amostras FPMC, apresentam um maior teor do elemento alcalino-terroso (CaO), que atua como fundente moderado ou muito energético, dependendo da quantidade e temperatura de queima da massa cerâmica.
- ✓ Após o processo de sinterização a sílica (SiO_2), aumentou nas amostras LCA E LARM, e diminuiu nas amostras FPEM e FPMC;
- ✓ O elemento alumina (Al_2O_3), após o ensaio, diminuiu nas amostras LCA e FPEM e aumentou na amostra LARM e FPMC;
- ✓ Após o ensaio, o ferro (Fe_2O_3) e o Manganês (MnO), aumentaram de teor em todas as amostras;
- ✓ O cálcio (CaO) aumentou nas amostras FPMC e LCA, após o ensaio o processo de sinterização;
- ✓ Em todas as amostras após o ensaio, o teor de potássio (K_2O) diminuiu;
- ✓ Quando comparados os mesmos elementos químicos antes e após a sinterização, nota-se variações diferentes de amostra para amostra. Isto pode-se dever ao facto de após a passagem da fase/temperatura de calcinação (700°C) poderem ocorrer migrações de determinados elementos devido à quebra das ligações estruturais de alguns elementos.
- ✓ O potássio (K_2O) e o cálcio (CaO) deveriam variar na razão inversa, o que não acontece, podendo isto dever-se ao método de leitura do equipamento de análise química (FRX-P) e o seu erro associado.

CAPÍTULO 7

Conclusões

(página propositadamente em branco)

7.1. Considerações finais

Os problemas ambientais relacionados com a produção e deposição em aterro das lamas derivadas do corte primário de rochas ornamentais, justificam o estudo realizado nesta dissertação, de forma a encontrar soluções economicamente viáveis e ambientalmente sustentáveis para o problema, tendo como base a caracterização do material e o seu aproveitamento.

Do estudo desenvolvido para caracterização das lamas recolhidas e tendo por base os objetivos a desenvolver, resultam as seguintes conclusões:

- A granulometria das quatro amostras de lama recolhidas (LCA, LARM, FPEM e FPMC) é extremamente fina, com cerca de 90% das partículas menores que 0,075 mm;
- As quatro amostras de lama analisadas pelo método de peneiração, apresentam uma granulometria fina, maioritariamente inferior a 1 mm, sendo o diâmetro médio (D_{50}) aproximado nas quatro, variando dos 0,198 mm (LCA) até aos 0,263 mm (FPMC);
- As quatro amostras de lama analisadas pelo método de sedimentação por atenuação de raios x apresentam uma granulometria mais fina, maioritariamente inferior a 0,01 mm, sendo o diâmetro médio (D_{50}), aproximado nas quatro, variando dos 0,0039 mm (FPMC) até aos 0,0095 mm (FPEM);
- As lamas podem ser aproveitadas como subproduto, pois cumprem a especificação da granulometria dos materiais para fins industriais, que regra geral, é inferior a 1 mm e por poderem ser classificadas como fíler, sendo que a amostra LCA apresenta 85% das partículas com dimensão menor < 0,063 mm, a amostra LARM, 85%, a amostra FPEM, 80% e a amostra FPMC, 90%;
- Da análise química quantitativa por espectrometria de fluorescência de raios (equipamento portátil), resulta que o resíduo é constituído predominantemente por sílica (SiO_2) e alumina (Al_2O_3), além de ferro (Fe_2O_3) e cálcio (CaO), provenientes da granalha de aço e da cal presentes na calda abrasiva utilizada na serragem dos granitos. O resíduo possui ainda outros elementos químicos minoritários, tais como: MgO , K_2O , MnO e TiO_2 ;
- Da análise química quantitativa do Sódio (Na) por espectrofotometria de absorção atómica resulta que, a amostra FPMC, obteve o valor de 1,053 mg/g, logo seguida da amostra LCA, de 0,861 mg/g. Isto pode-se dever ao método de ensaio, ou à própria dimensão das partículas utilizadas (fração <0,075 mm), visto que as amostras provenientes da serragem de granitos deveriam apresentar um maior valor de sódio, devido à sua composição química;

- Para o aproveitamento das lamas como subproduto deve ser utilizada a sua fração mais fina, abaixo dos 0,075 mm, pois além de apresentar granulometria como um filer tem um menor teor de ferro (Fe_2O_3);
- Quanto à massa volúmica do resíduo, os resultados obtidos estão de acordo com os valores expectáveis de densidade, entre os 2,64 g/cm³ e 2,78g/cm³, sendo menor que a massa volúmica do cimento e maior que a massa volúmica da areia;
- O ensaio de azul de metileno, devido aos teores obtidos de 1,7 g/Kg de MB para as quatro amostras, o que revelou que as lamas em estudo são pouco ativas, com baixo teor de argila, pertencendo à categoria “MBF₁₀”.

Do estudo realizado para aproveitamento das lamas no fabrico de argamassas, através da sua incorporação de 20% e 40%, em substituição do cimento, tendo por base os objetivos a desenvolver, resultam as seguintes conclusões:

- Todas as argamassas com incorporação de resíduo apresentam uma menor capacidade resistente à flexão, em relação à argamassa padrão, independentemente do tempo de hidratação;
- Quando comparadas as duas percentagens de incorporação, a de 20% é a que apresenta uma maior resistência à flexão, independentemente da amostra e do tempo de hidratação;
- Nos provetes com incorporação de resíduo, a argamassa apresenta uma menor capacidade resistente à compressão, em relação à argamassa padrão, independentemente do tempo de hidratação, nunca atingindo a resistência do cimento utilizado (52,5 MPa);
- Quando comparadas as duas percentagens de incorporação, a de 20% é a que apresenta maior resistência à compressão, independentemente da amostra e do tempo de hidratação;
- As argamassas com incorporação de lama apresentam uma menor capacidade de absorção de água, quando comparadas com a argamassa padrão;
- A percentagem de 40%, apresenta menores valores de absorção de água, o que pode ser justificado pelo facto de a quantidade de amostra de lama incorporada ser superior, existindo assim uma diminuição da permeabilidade, visto que a compacidade aumenta, com uma consequente diminuição dos poros capilares e fluxo de água através dos mesmos;
- Para os três parâmetros analisados (resistência à flexão, compressão e absorção de água), a amostra que apresenta um melhor comportamento é a FPMC, proveniente do filtro prensa que recebe o expurgo das lamas de corte primário de mármore e calcários, possivelmente devido à aproximação das características do cimento, principalmente em quanto à sua composição química.

- Será de estudar novas formas de adição e diferentes percentagens de incorporação das lamas em estudo.

Do estudo realizado para aproveitamento das lamas, por último realizou-se o ensaio de sinterização, que tendo por base os objetivos a desenvolver, resultam as seguintes conclusões:

- A incorporação das lamas em matrizes cerâmicas é viável, uma vez que as lamas aguentaram o ensaio de sinterização, sem qualquer adição de pasta cerâmica;
- Houve alteração de cor e a sua estrutura alterou ligeiramente, no entanto os bordos, quanto á sua forma, não se alteraram durante o processo de cozedura da pastilha;
- Nas lamas os elementos poderão servir como fundentes principais ($K_2O + Na_2O$), maioritariamente na amostra de granitos e como auxiliares ($Fe_2O_3 + CaO + MgO$), maioritariamente na amostra FPMC;
- Quando comparados os mesmos elementos químicos antes e após a sinterização, nota-se variações diferentes de amostra para amostra. Isto pode-se dever ao facto de após a passagem da fase/temperatura de calcinação ($700^\circ C$) poderem ocorrer migrações de determinados elementos devido à quebra das ligações estruturais de alguns elementos.
- O potássio (K_2O) e o cálcio (CaO) deveriam variar na razão inversa, o que não acontece, podendo isto dever-se ao método de leitura do equipamento de análise química (FRX-P) e o seu erro associado.
- É necessário que as lamas sejam combinadas de forma adequada com outras matérias-primas de forma a otimizar a composição do ponto de vista químico, físico e mineralógico, consoante o produto final desejado.

Relativamente à incorporação das lamas em argamassas não foi possível verificar resultados semelhantes aos estudos apresentados no Estado da Arte. Os resultados obtidos traduziram-se na diminuição da resistência à compressão e flexão, o que se pode dever a alguns fatores, tais como:

- Devido à elevada percentagem de incorporação utilizada neste estudo, visto que os estudos em que as resistências das argamassas superaram a de referência referem percentagens mais baixas de incorporação, na ordem dos 5 a 15%
- À substituição ter sido efetuada por parte da dosagem do cimento em vez da areia;
- À limitação dos 56 dias como tempo de hidratação máximo, sendo que um tempo superior poderia fazer com que fossem atingidos ou ultrapassados os valores de resistência da argamassa padrão;
- Devido à possível forma lamelar das partículas das lamas, que levam a que o rearranjo com os restantes componentes da argamassa, como o cimento e a areia (de forma granular), se

faça de modo diferente da argamassa padrão, sendo que este efeito poderia ser minimizado pelo efeito de fíler do resíduo, que apenas se verifica se o tamanho das partículas dos materiais substitutos for menor que o das partículas de cimento, ou devido à reação pozolânica com o hidróxido de cálcio (CH), originando mais “C-H-S” ao sistema cimentício. Assim, o resíduo extremamente fino, ao agir como um fíler, preenchendo os vazios na argamassa, deveria contribuir para o aumento da compacidade e diminuição da porosidade, aumentando a resistência das argamassas.

Em suma, através dos resultados obtidos no desenvolvimento do trabalho experimental cumpriu-se o objetivo de caracterização das lamas provenientes do corte primário de rochas ornamental da empresa Incoveca S.A e tudo aponta para que sejam uma opção válida de aproveitamento das mesmas em argamassas e em matrizes cerâmicas, sendo que deverão ser realizados estudos adicionais de modo a permitir classificá-las como subproduto para ambas as aplicações.

7.2. Perspetivas futuras

Após a realização desta dissertação pode-se levar a cabo um conjunto de outras ações relativas a este tipo de estudo, como por exemplo:

- Variar o estado da aplicação da lama na argamassa, pois este pode influenciar a homogeneidade da amassadura;
- Variar a razão água/cimento;
- Estudar vários cenários possíveis com substituição da areia em vez do cimento;
- Utilizar outro tipo de cimento e diferentes percentagens de incorporação das lamas;
- Aumentar o tempo de hidratação;
- Realizar outros ensaios de caracterização das argamassas no estado fresco e endurecido;
- Adicionar às lamas a uma pasta cerâmica e realizar o processo de cozedura, realizando posteriormente ensaios de caracterização;
- Fazer um levantamento atualizado acerca de dados estatísticos sobre a produção de lamas de granito e mármore a nível regional e nacional;
- Averiguar eventuais mudanças tecnológicas no processo de produção de lamas que possam alterar as suas características;
- Realizar outros ensaios de caracterização, nomeadamente de análise térmica, mineralógica, pH e teor em água.

(página propositadamente em branco)

CAPÍTULO 8

Bibliografia

(página propositadamente em branco)

8.1. Referências Bibliográficas

- Acchar, W.; Vieira, F. A; Hotza, D. (2006). Effect of marble and granite sludge in clay materials. *Materials Science and Engineering: A*, vol. 419, n. 1 - 2, pp. 306 - 309.
- Alencar, C. R. A; Caranassios, A.; Carvalho, D. (1996). *Tecnologia de Lavra e Beneficiamento de Rochas Ornamentais. Série Estudos Económicos sobre Rochas Ornamentais, Federação das Indústrias do Estado do Ceará, Instituto Euvaldo Lodi, Fortaleza, Brasil*, p. 225.
- Almeida, N.; Branco, F.; Roberto Santos, J. (2007). Recycling of stone slurry in industrial activities: Application to concrete mixtures. *Building and Environment*. Vol.42. pp. 810 - 819.
- Carvalho, M. (2017). *Apontamentos da unidade curricular Geologia de Engenharia. Licenciatura de Engenharia Geotécnica. ISEP, Porto, Portugal*
- Associazione Italiana Marmomacchine - AIM. (2002). *Tecnologias Italianas para Extração e Beneficiamento de Pedras Ornamentais. Apostila, Cachoeiro de Itapemirim, Brasil*, p. 103.
- Babisk, M. P. (2009). *Desenvolvimento de vidros sodo-cálcicos a partir de resíduos de rochas ornamentais. Dissertação de Mestrado em Ciência dos Materiais, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, Brasil*, p. 90.
- Barbosa, M. B. (2016). *Plano ambiental de recuperação paisagística da pedreira “Vila Verde nº 2”: uma proposta alternativa. Dissertação de Mestrado em Engenharia Geotécnica e Geoambiente, Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto, Portugal*, p. 189.
- Bhavan, M. (2007). *Potash Feldspar and Soda Feldspar for Glass and Ceramic Industry - Specification. Bureau of Indian Standards, Ceramicware Sectional Committee, CHD9-June, India*, pp. 1-18.
- Bogas, J. A. (2013). *Materiais de Construção - Materiais Cerâmicos. Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal*, p. 43.
- Barba, A., Beltrán, V., Felíu, C., García, J., Ginés, F., Sánchez, E., & Sanz, V. (2002). *Materias primas para la fabricacion de soportes de balsosas cerâmicas. Instituto de Tecnología Cerámica, 2ª ed., Cartellón*
- Borges, D. L. G.; Curtius, A. J. (2005). *Fundamentos de espectrometria de absorção atômica de alta resolução com fonte contínua. Revista Analytica*, pp. 58 - 67.
- Buck, R. L. (1997). *Man-made vitreous fibers. Technical Manual, Navy Environmental Health Centre, Norfolk, USA*, p. 103.
- Calmon, J. L. & Silva, S. A. C. (2006). *Mármore e Granito no Espírito Santo: Problemas Ambientais e Soluções. Gestão dos Recursos Hídricos e a Mineração, Agência Nacional de Águas, Brasília, Brasil*, pp. 199-231.
- Calmon, J. L.; Tristão, F. A.; Lordêllo, F. S. S.; da Silva, S. A. C.; Mattos, F. V. (1997). *Reciclagem do resíduo de corte de granito para a produção de argamassas. Encontro Nacional de Edificações e Comunidades Sustentáveis, n. 1, Canela, Brasil*, pp. 64 - 75.
- Calmon, J. L.; Tristão, F. A.; Lordêllo, F. S. S.; da Silva, S. A. C.; Mattos, F. V. (1998). *Aproveitamento do resíduo de corte de granito para a produção de tijolos de solo cimento. Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído: Qualidade no processo construtivo, n. 7, Florianópolis, Anais, Santa Catarina, Brasil*, pp. 899 - 907.

- Carvalho, A.; Carasek, H.; Cascudo, O.; Campos, C. O. (2004). Argamassa industrializada: influência do tipo de misturador, quantidade de água e tempo de mistura nas características e propriedades no estado fresco e endurecido. X Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, Anais, São Paulo, Brasil, vol. 1, pp. 1 - 14.
- Carvalho, J. M. F.; Lisboa, J. V.; Moura, A. C.; Carvalho, C.; Sousa, L. M. O.; Leite, M. M. (2012). Evaluation of the Portuguese Ornamental Stone Resources. Proc. Global Stone Congress, Borba, Portugal, pp. 1 - 8.
- CEN, The European Committee for Standardization. (2000). Working Document non-Sludge. 3rd Draft. ENV. E. 3/LM, p. 19.
- Cetemag - Centro tecnológico de Mármore e Granito. (2000). Curso de encarregado de serraria. Cachoeiro de Itapemirim, Brasil, p. 67.
- Chouhan, D. S.; Yash Agrawal, T. G.; Ravi, S. (2017). Utilization of Granite Slurry Waste in Concrete: A Review. Indian Journal of Science and Technology, vol. 10, February 2017, India, pp. 1 - 9,
- Citran, G. (1994). Esame di Parametri Critici più/meno Noti nella Segagione di Graniti con Telai Multilame a Torbida Abrasiva e Graniglia di Acciaio. III congresso Italo Brasiliano di Ingegneria Mineraria, Verona, Itália, pp. 331 - 334.
- Citran, G. (2000). La Segagione de Graniti. Giorgio Zusi Editore, Verona, Itália, p. 127.
- Coimbra Filho, C. G. (2006). Relação Entre Processo de Corte e Qualidade de Superfícies Serradas de Granitos Ornamentais. Dissertação de Mestrado em Geotecnia, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, Brasil, p. 168.
- Comissão Europeia (2001). Processos Extensivos de Tratamento de Águas Residuais. Serviço das Publicações Oficiais das Comunidades Europeias, Luxemburgo, p. 41.
- Conceição, M. N.; Caranassios, A.; Ribeiro, R.C.C. (2010). Avaliação mecânica e acústica do pavimento asfáltico formado com resíduos oriundos do beneficiamento de rochas ornamentas. Jornadas de Iniciação Científica, n. 18, Rio de Janeiro, Brasil, p. 7.
- Coroneos, P.; Hisinger, P.; Gilkes, R. J. (1996). Granite powder as a source of potassium for plants: a glasshouse bioassay comparing two pasture species. Fertilizer Research, n. 45, Kluwer Academic Publishers, printed in the Netherlands, pp. 143 -152.
- Costa, C. (1995). Aproveitamento de Resíduos de Serragem de Mármore em Aplicações Geotécnicas no Domínio do Ambiente. Luso - Brazilian Environmental Geotechnics Seminar, Lisboa, Portugal. In: Almeida, N.; Branco, F.; Roberto Santos, J. (2007). Recycling of stone slurry in industrial activities: Application to concrete mixtures. Building and Environment. vol.42. pp. 810 - 819.
- Costa, V. V. (2011). Fatores de Rentabilização do Processo de Serragem de Granitos com Engenheiros Multi-lâminas. Dissertação de Mestrado em Engenharia Geotécnica e Geoambiente, Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto, Portugal, p. 124.
- Cruz, D. F. M.; Lameiras, R. M.; Barboza, A. S. R; Lima, L. A. (2003). Estudo das propriedades mecânicas de argamassas produzidas utilizando-se resíduo do corte de mármore e granito. VI Seminário Desenvolvimento Sustentável e a Reciclagem na Construção Civil, São Paulo, Brasil, p. 14.
- Destefani, A.Z. (2009). Utilização do planejamento experimental na adição do resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais para produção de blocos prensados de encaixe. Dissertação de Mestrado, Pós-Graduação em Engenharia Civil – CCT, Universidade Estadual do Norte Fluminense, São Paulo, Brasil, p. 238.

- Dias, J. A. (2004). Análise Granulométrica. A análise sedimentar e o conhecimento dos sistemas marinhos, p. 18.
- Dias, N. A.; Yin, M. F.; Costa, C. C. B.; Joaquim, D. O.; Pires, P. J. M. (2014). Use of chemically stabilized soil dimension stone waste in slope stabilization. Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia, Teresina. Anais, Brasil, p. 4.
- Direção Geral de Energia e Geologia (DGEG). (2008). Informação estatística da Indústria Extrativa. Nº12, Portugal, p. 8.
- Direção Geral de Energia e Geologia (DGEG). (2011). Informação estatística da Indústria Extrativa. Nº13, Portugal, p. 10.
- Direção Geral de Energia e Geologia (DGEG). (2012). Informação Estatística da Indústria Extrativa. nº 14, Portugal, p. 12.
- Direção Geral de Energia e Geologia (DGEG). (2013). Informação Estatística da Indústria Extrativa. nº 15, Portugal, p. 12.
- Direção Geral de Energia e Geologia (DGEG). (2015). Boletim de Minas. Vol. 50, nº 2, Portugal, p.56.
- Direção Geral de Energia e Geologia (DGEG). (2016). Boletim de Minas. Vol. 51, nº 1, Portugal, p.40.
- Direção Geral de Energia e Geologia (DGEG). (2016). Elementos da Indústria extrativa Nacional de 2016. Estatísticas rápidas – Comércio Internacional da indústria Extrativa (janeiro a dezembro 2016), Portugal, p. 4.
- Direção Geral de Energia e Geologia (DGEG). (2016). Informação Estatística da Indústria Extrativa. Nº 18, Portugal, p. 16.
- Finnie, I. (1960). Erosion of Surfaces by Solid Particles. Wear, n. 2, vol. 3, p. 87-103.
- Fracaroli & Balzan S.p.A (2016). Stone Union, Taiwan chooses the reliability. Stone Union, Taiwan, p. 1.
- Franco, M.F. & Cupeto C. (1996). A Utilização de Subprodutos Resultantes da Serragem dos Mármore (“Nata”) para Cobertura de Resíduos Sólidos Urbanos. Estremoz, Portugal. In: Almeida, N.; Branco, F.; Roberto Santos, J. (2007). Recycling of stone slurry in industrial activities: Application to concrete mixtures. Building and Environment. vol. 42. pp. 810 - 819.
- Frazão, M. (2015). Análise do Processo de Serragem através de Engenheiros de Lâminas Diamantadas. Dissertação de Mestrado em Engenharia Geológica e de Minas, Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal. p. 98.
- Gestilamas, Lda. (2001). Ensaio de Caracterização Laboratorial - subprodutos de Pedra Natural. Pêro Pinheiro, Portugal. In: Machado, R. G. (2012). Incorporação de Lamas de Pedreira em Argamassas. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Escola de Engenharia, Universidade do Minho, Portugal, p. 83.
- Giorgio, C. (1982). Consideraciones teórico-práticas sobre el aserrado de los granitos I y II. Rocas y Minerales, n. 132.
- Glover, A.; Rogers, W.Z.; Barton, J.E. (2012). Granitic Pegmatites: Storehouse of Industrial Minerals Elements. Vol. 8, n. 4, p. 273.
- Gonçalves, J. P. (2000). Utilização do resíduo de corte de granito (RCG) como adição para a produção de concretos. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Núcleo Orientado para a Inovação da Edificação, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil, p. 135.

- Gonçalves, J. P.; Moura, W. A.; Dal Molin, D. C. C. (2002). Avaliação da Influência da utilização do resíduo de corte de granito (RCG), como adição em propriedades mecânicas do concreto. IX Encontro Nacional de Tecnologia do Meio Ambiente, Rio Grande do Sul, Brasil, vol. 2, n. 1, pp. 53 - 68.
- Hang, P. T., & Brindley, G. W. (1970). Methylene Blue Absorption by Clay Minerals. Determination of Surface Areas and Cation Exchange Capacities. *Clay and clay minerals*, Vol. 18 Iss. 4, pp. 203 - 217.
- Harben, P.W. (2002). *The Industrial Minerals Handy Book – A Guide to Markets, Specifications, & Prices*, 4th Edition, Surrey, Industrial Minerals Information, p. 412.
- INETI, (2001). *Guia Técnico - Sector da Pedra Natural*, Portugal, p. 66.
- Jimeno C. (1995). *Manual De Rocas Ornamentales: Prospeccion Explotacion Elaboracion Colocacion*. ITGE Minas de Madrid, Madrid, Espanha, p. 728.
- Joaquim, D. O.; Costa, C. C. B.; Yin, M. F.; Dias, N. A.; Pires, P. M. P. (2014). The mixture application of soil, dimension stone waste and blast furnace slag in earthworks. *Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia, Teresina, Anais*, Brasil, p. 4.
- Kaschner, D. (1996). *Tecnologias para Beneficiamento*. II Encontro do Centro Oeste sobre Granitos, Mármore e Pedras Ornamentais, Brasil, pp. 1 - 11.
- Konstanty, J. (2002). Theoretical analysis of stone sawing with diamonds. *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 123, n. 1, pp. 146 - 154.
- Lameiras, R.M.; Tenório, J.J.L.; Lima, L.A. (2005). Avaliação do potencial de utilização do resíduo do beneficiamento de chapas de granito (RBCG) em concretos. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, vol. 5, pp. 317 - 332.
- Leonardos, O.H.; Theodoro, S.H.; Assad, M.L. (2000). Remineralization for sustainable agriculture: A tropical perspective from a Brazilian viewpoint. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 56, pp. 3 - 9.
- Lima, R. C. O. (2010). *Estudo da durabilidade de paredes monolíticas e tijolos de solo-cimento incorporados com resíduo de granito*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental, Campina Grande, Universidade Federal de Campina Grande, Brasil, p. 107.
- Lima, W. B. C.; Lira, H. L.; Neves, G. A.; (2016). Incorporação de resíduo lama do processo de beneficiamento de granito na argamassa expansiva de demolição. *Revista Eletrônica de Materiais e Processos*, n. 2, vol. 11, Brasil, pp. 89 - 95.
- Lopes, M. E. (2015). *Resíduos - Geotecnia Ambiental*. Apontamentos da unidade curricular de Geotecnia Ambiental do 3º ano da Licenciatura em Engenharia Geotécnica e Geoambiente, Instituto Superior de Engenharia do Porto, Portugal. In: Barbosa, M. B. (2016). *Plano ambiental de recuperação paisagística da pedreira “Vila Verde nº 2”*: uma proposta alternativa. Dissertação de Mestrado em Engenharia Geotécnica e Geoambiente, Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto, Portugal, p. 189.
- Lucena, L. C. (2009). *Verificação da influência do uso de resíduos industriais como filler em misturas asfálticas sob o efeito da presença d’água*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, Brasil, p. 129.
- Luoto, K.; Holopainen, M.; Kangas, J.; Kalliokoski, P.; Savolainen, K. (1998). Dissolution of short and long rockwool and glasswool fibers by macrophages in flowthrough cell culture. *Environmental Research Section*, vol. 78, pp. 25 - 37.

- Machado, R. G. (2012). Incorporação de Lamas de Pedreira em Argamassas. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Escola de Engenharia, Universidade do Minho, Portugal, p. 83.
- Machado, R. V.; Ribeiro, R. C. C.; Andrade, F. V.; Passos, R. R.; Mesquita, L. F. (2008). Utilização de resíduos oriundos do corte de rochas ornamentais na correção da acidez e adubação de solos tropicais. CETEM/MCT, Série Tecnologia Ambiental, n. 55, Rio de Janeiro, Brasil, p. 51.
- Martins, R. (1996). Aplicações Industriais de Natas Resultantes da Indústria Transformadora de Rochas Ornamentais Carbonatadas. Dissertação de Mestrado em Geociências, Universidade de Aveiro, Aveiro, Portugal, p. 119.
- Mello, R.M. (2006). Utilização do resíduo proveniente do acabamento e manufatura de mármore e granitos como matéria-prima em cerâmica vermelha. Dissertação de Mestrado em Ciências na área de Tecnologia Nuclear-Aplicações Materiais, Instituto e pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, Brasil, p. 138.
- Miletic, S.; Ilic, M.; Milosevic, M.; Mihajlov, A. (2003). Building materials based on waste stone sludge. Wascon, San Sebastián, Espanha, pp. 323 - 328.
- Miranda, R. A. C. (2007). Viabilidade técnica da aplicação de resíduo de beneficiamento de mármore e granito em tijolos de solo-cimento. Dissertação de Mestrado em Engenharia do Meio Ambiente, Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, Brasil, p. 212.
- Monteiro, C. (2014). Corte de Pedra por fio Diamantado. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Escola de Engenharia, Universidade do Minho, Portugal, p. 74.
- Moreira, J.M.S.; Freire, M.N.; Holanda, J.N.F. (2003). Utilização de resíduo de granito proveniente do estado de Espírito Santo em cerâmica vermelha, Cerâmica, Brasil, n. 49, pp. 262 - 267.
- Moura, W.; Gonçalves, J. P.; Leite, R. S. (2002). Utilização do resíduo de corte de mármore e granito em argamassas de revestimento e confecção de lajotas para piso. Sitenbus, Feira de Santana, Brasil, n. 26, pp. 49-61.
- Moura, W; Lima, M.B.L.; Calmon, J.L.; Moratti, M.; Souza, F.L.S. (2006). Utilização de resíduo de serragem de rochas ornamentais (RSRO) como substituição parcial do cimento na produção de blocos pré-moldados de argamassa. Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, n. 11, Florianópolis, Anais, Porto Alegre, Brasil, pp. 4217 - 4226.
- MSME - Development Institute Govt. of India, Ministry of Micro, Small & Medium Enterprises (2016). Status Report on Commercial Utilization of Marble Slurry in Rajasthan. Rajasthan, India. pp. 1 - 36.
- Neves, J. (2005) Materiais de Construção – Guia de Utilização, Cap. 2, pp. 28 - 49.
- Oliveira, C. N.; Queiróz, J. P. C.; Ribeiro, R. C. C. (2009). Aplicação de resíduos oriundos do corte de rochas ornamentais na produção de cosméticos. XVI Jornada de Iniciação Científica do Cetem, Rio de Janeiro, Brasil, pp. 123 - 129.
- Palmonari, C., & Nasseti, G. (1993). Traditional Ceramics: evolution in the last decade and future trends. Third Euro-Ceramics, 2ª ed, Faenza Editrice, pp. 879 - 891.
- Pardal, M. (2015). Desenvolvimento de novos cimentos com política sustentável de baixo teor em Cálcio. Dissertação de Mestrado em Engenharia em Química. Técnico de Lisboa, Lisboa, Portugal, p. 91.

- Pareek, S. (2003). Gainful utilization of marble waste: an effort towards protection of ecology and environment. Workshop on Marketing & Technical Issues Related to Stone Industry, India. In: Almeida, N.; Branco, F.; Roberto Santos, J. (2007). Recycling of stone slurry in industrial activities: Application to concrete mixtures. Building and Environment. vol. 42. pp. 810 - 819.
- Pedrosa, S.C. (2003). Curso de Encarregado de Serraria. Cachoeiro de Itapemirim. Centro Tecnológico do Mármore e Granito – CETEMAG, Apostila, Brasil, p. 66.
- Pereira, S. & Bonito, N. (2001). Rewastetone. In: Machado, R. G. (2012). Incorporação de Lamas de Pedreira em Argamassas. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Escola de Engenharia, Universidade do Minho, Portugal, p. 83.
- Perfetti, F.P.; Mannella, P.; Giannini P. (1993). La Técnica del Aserrado de Granito con Granalla (I). Roc. Maquina. p. 57 - 69.
- Pinto, J. C. C. S. (2010) Análise de metais em infusões de chás e ervas aromáticas por espectrofotometria de absorção atômica de alta resolução com fonte contínua. Dissertação de Mestrado em Engenharia Química, ISEP, Porto, p. 89.
- Pinto, A. P. F.; Gomes, A.; Pinto, J. B. (2006). Argamassas. Apontamentos da disciplina de Materiais de Construção I, Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal, pp. 1 - 32.
- Queirós I. (2011). Contribuição da fluorescência de Raios-X na avaliação e modelação de georrecursos. Dissertação de Mestrado em Engenharia Geotécnica. ISEP, Porto, pp. 126-127
- Reis, A. S.; Tristão, F. A. (2007). Análise de argamassas com resíduo de corte de rochas ornamentais. II Congresso Nacional de Argamassas de Construção, Lisboa, Portugal, p. 11.
- Ribeiro R. P.; Paraguassú, A. B.; Rodrigues, J. E.; Silveira L. L. L. (2005). Aplicação de Bases Conceituais de Tribologia no Beneficiamento de Granitos Ornamentais. Revista Minerva, Brasil, Vol.1, pp. 45 - 50.
- Ribeiro R.P. (2005). Influência das Características Petrográficas de Granitos no Processo Industrial de Desdobramento de Blocos. Dissertação de Doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, Universidade de São Paulo, Brasil, p. 120.
- Rochas de Qualidade (2004). Tear a fio diamantado - A tecnologia da produtividade. Revista Rochas da Qualidade, Brasil, p. 177.
- Rochas de Qualidade (2013). Revista Rochas da Qualidade, Brasil.
- Rodrigues, G. F. (2009). Reciclagem de resíduos visando à produção de lâ mineral. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Brasil, p. 98.
- Rodriguez, A.M.; Pianaro, S.A.; Berg, E.A.T.; Santos, A.H. (2004) “Propriedades de matérias-primas selecionadas para a produção de grés porcelanato”, Cerâmica Industrial, 9, pp. 33-38.
- Roque, A.J. (2010). O contributo da CT-VROG/SPG para a valorização de resíduos em obras geotécnicas. In 12.º Congresso Nacional de Geotecnia – Geotecnia e Desenvolvimento Sustentável. Universidade do Minho, Guimarães, Portugal, pp. 2089 - 2098.
- Rossi, G.; Trois, P.; Andrissi, G.S. (1997). La Segabilità dei Graniti e L'ambiente Fisicochimico. Marmomacchine, n° 133, pp. 180 - 192.
- Santana T. & Rodrigues P. F. (2005). Ensaio de caracterização laboratorial de solos com vista à sua utilização em arquitetura de terra crua. Seminário Ibero-Americano de Construção em Terra. Monsaraz. p.6.

- Santos, J (2007). Caracterização físico-química e biológica em diferentes laboratórios de produtos obtidos a partir da compostagem de resíduos orgânicos biodegradáveis. Dissertação de Mestrado em Ecologia Aplicada, Faculdade de Ciências, Universidade do Porto, Porto, Portugal, p. 122.
- Sedigraph. (1998). Sedigraph Particle Size Analysis. UCL Department of Geography
- Silva, M.T.B.; Hermo, B.S.; Garcia-Rodeja, E.; Freire, N.V. (2005). Reutilization of granite powder as an amendment and fertilizer for acid soils, *Chemosphere*, nº 61, pp. 993 - 1002.
- Silveira, P. E. M. (2005). A aplicação do resíduo de construção e demolição reciclado no compósito solo-cimento. Dissertação de Mestrado em Geociências, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, São Paulo, Brasil, p. 122.
- SIMEC – Telai per marmo, Sfera. (2015). Telai per marmo, Sfera. Catálogo SIMEC, Itália, p. 23
- Singh, S. & Vijayalakshmi, V. (2004). Marble slurry - a new building material. Technology Information, Forecasting, and Assessment Council, Tifac News and Views, India. In: Almeida, N.; Branco, F.; Roberto Santos, J. (2007). Recycling of stone slurry in industrial activities: Application to concrete mixtures. *Building and Environment*. vol. 42. pp. 810 - 819.
- Soares, H. L. (1997). Caracterização e Aplicabilidade na Indústria dos Cimentos de Lamas de Rochas Ornamentais Transformadas na Região de Pêro Pinheiro. Tese de Mestrado em Geociências, Universidade de Aveiro, Aveiro, Portugal. In: Almeida, N.; Branco, F.; Roberto Santos, J. (2007). Recycling of stone slurry in industrial activities: Application to concrete mixtures. *Building and Environment*. vol. 42. pp. 810 - 819.
- Souza, J.N.; Rodrigues, J.K.G.; Neto, P.N.S. (2005). Utilização do resíduo proveniente da serragem de rochas graníticas como material de enchimento em concretos asfálticos usinados a quente. Associação Técnico Científica Ernesto Luiz de Oliveira Júnior, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, Brasil, p. 12.
- Spínola, S. (1998). Influência da Qualidade da Serragem de Granitos no Consumo Energético do Desbaste. Dissertação de Licenciatura, Lisboa, Instituto Superior Técnico, p. 138.
- Spínola, S. (2015). Caracterização Térmica de Pedras Naturais. Dissertação de Doutoramento, Universidade de Aveiro, p. 244.
- Stellin Júnior, A. (1998). Serragem de Granitos para Fins Ornamentais. Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP, Departamento de Engenharia e Minas, São Paulo, Brasil, p. 37.
- Tenório, J.J.L.; Lameiras, R.M.; Lima, L.A. (2005). Desempenho de argamassas produzidas com resíduos do beneficiamento de chapas de granito (RBCG). VI Seminário Brasileiro de Tecnologia das argamassas e I International Symposium on Mortars Technology, Florianópolis, Brasil, pp. 34 - 44.
- Thompson, K.R. (1990). Cala Eletrônica Aumenta Produção. *Rochas de Qualidade*, nº 103, Brasil, pp. 86 - 87.
- Torres, P. M. C. (2007). Reciclagem de Lamas de Granito Ornamental em Pastas Cerâmicas. Dissertação de Mestrado em Gestão Ambiental, Materials e Valorização de Resíduos, p. 173.
- Velho, J.; Gomes, C.; Romariz, C. (1998). Minerais Industriais. Geologia, Propriedades, Tratamentos, Aplicações, Especificações, Produções e Mercados. Gráfica de Coimbra Lda., Portugal, p. 591.
- Wang, C. Y. & Clausen, R. (2003). Computer simulation of stone frame sawing process using Diamond blades. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 43(6), pp. 559 - 572.
- Yukselen Y. & Kaya A. (2008). Suitability of the methylene blue test for surface area, cation exchange capacity and swell potential determination of clayey soils. *Engineerig Geology*, Vol 102, pp. 38-45.

Zuazo Torres, P. (1995). Elaboración de Marmoles y Granitos. In: Jimeno, C. (1995). Manual de rocas ornamentales: Prospección, Explotación, Elaboración e Colocación, Madrid, Espanha, Cap.16, pp. 353 - 397.

Zum-Gahr K. H. (1987). Microstructure and Wear of Materials. Institute of Materials Technology, University of Siegen, Siegen, Federal Republic of Germany, p. 560.

8.2. Decretos de Lei

Decreto-Lei nº 10/2010, de 4 de fevereiro - gestão dos resíduos resultantes da prospeção, extração, tratamento, transformação e armazenagem de recursos minerais, bem como da exploração das pedreiras

Decreto-Lei nº 178/2006, de 5 de setembro - operações de gestão de resíduos, operações de recolha, transporte, armazenagem, triagem, tratamento, valorização e eliminação de resíduos, descontaminações de solos e monitorização dos locais de deposição após o encerramento.

Decreto-Lei nº 183/2009, de 10 de agosto - regime jurídico da deposição de resíduos em aterro, requisitos gerais na conceção, construção, exploração, encerramento e pós – encerramento de aterros, incluindo as características técnicas específicas para cada classe de aterros

Decreto-Lei nº 31/2013, de 22 de fevereiro - procede à primeira alteração ao Decreto-Lei nº 10/2010, de 4 de fevereiro

Decreto-Lei nº 73/2011, de 17 de junho - procede à terceira alteração ao Decreto-Lei nº 178/2006, de 5 de setembro, e do Decreto-lei nº48/2006, de 12 de março.

8.3. Sítios Consultados

<http://www.apa.pt> (consultado em abril de 2018)

<http://www.dgeg.pt> (consultado em fevereiro de 2018)

http://www.sinoabrasives.com/documents/DOC_SAE_J444.pdf (consultado em junho de 2017)

<http://www.materiaisalmeida.com.br.jpg> (consultado em junho de 2017)

<http://www.diamant-boart.com> (consultado em junho de 2017)

<http://www.minorca.industria.ws> (consultado em junho de 2017)

<http://www.gasparimenotti.it> (consultado em junho de 2017)

<http://www.netsearch.pt/marmoresrebelo/> (consultado em junho de 2017)

8.4. Normas e Especificações

LNEC E239 - 1970: Análise granulométrica por peneiração húmida.

LNEC E64 - 1979: Cimentos : determinação da massa volúmica.

NP EN 196-1: 2017 - Métodos de ensaio de cimentos. Parte 1: Determinação das resistências mecânicas.

NP EN 933-9: 2011 - Determinação do teor de finos - Ensaio do azul de metileno.

CAPÍTULO 9

Anexos (Ver CD-ROM)

(página propositadamente em branco)

Índice de Anexos (Ver CD – ROM)

Anexo I – Base de dados da análise granulométrica por sedimentação – atenuação de raios x.

(Ver Pasta “Anexos” – Pasta “Análise Granulométrica das Lamas por sedimentação (atenuação de raios x)” – Excel “Curvas”)

Anexo II – Ficha técnica do Cimento.

(Ver Pasta “Anexos” — PDF “Cimento”)

Anexo III – Base de dados da análise granulométrica – método de peneiração

(Ver Pasta “Anexos” – Pasta “Análise Granulométrica - método de peneiração” – Excel “Análise Granulométrica”)

Anexo IV – Relatórios obtidos no ensaio de análise granulométrica por sedimentação – atenuação de raios x.

(Ver Pasta “Anexos” – Pasta “Análise Granulométrica das Lamas por sedimentação (atenuação de raios x)” – Todos os ficheiros PDF)

Anexo V – Relatórios das concentrações dos elementos químicos das Lamas.

(Ver Pasta “Anexos2 – Pasta “Análise Química das Lamas” – Pasta “Fração maior que 0,075mm” ou Pasta “Fração maior que 0,075mm” - Todos os ficheiros PDF)

Anexo VI – Relatórios das concentrações dos elementos químicos das pastilhas.

(Ver Pasta “Anexos” – Pasta “Análise Química - Ensaio de Sinterização” – Todos os ficheiros PDF)