



UNIVERSIDADE DA BEIRA INTERIOR
Ciências das Engenharias

Caraterização de argamassas auto-compactáveis com adição de lamas provenientes de uma ETA

Sónia Santos Garcia

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Civil
(2º ciclo de estudos)

Orientador: Prof. Doutor Miguel Costa Santos Nepomuceno
Coorientador: Prof. Doutor António João C. de Albuquerque

Covilhã, 24 de Outubro de 2011

À minha Avó Purificação

Agradecimentos

Tal como a verdadeira palavra de agradecimento não tem significado, também as palavras que aqui forem proferidas serão mínimas face ao sentimento que estas não conseguem explicar. Porém, a única que pode de algum modo expressar tudo isto, de uma forma simples, é um sincero e profundo Obrigada.

Agradeço, de uma forma muito especial, ao Professor Doutor Miguel C. S. Nepomuceno (Orientador científico deste trabalho) por todo o apoio científico prestado, disponibilidade, muita compreensão, mas sobretudo ao seu grande profissionalismo e personalidade, pois além de Professor foi sempre um grande amigo. É alguém a quem esta dissertação é devida, muitíssimo Obrigada.

Ao Professor Doutor António João C. de Albuquerque (Coorientador deste trabalho) pelo apoio científico e conhecimentos, mas sobretudo pela grande disponibilidade que sempre demonstrou em ajudar na concretização deste trabalho. Mais uma vez muito Obrigada.

A todos os Professores que de forma direta ou indireta deram o seu contributo, nomeadamente o Professor Doutor João Castro Gomes, pela permissão no manuseamento do Laboratório de Materiais de Construção do Departamento de Engenharia Civil e Arquitetura e o Professor Doutor Abílio P. Silva, pelo apoio dado no Laboratório de Materiais do Departamento de Eletromecânica para a análise das partículas das adições minerais utilizadas. A ambos, também, um profundo Obrigada, pelo apoio científico concebido.

Ao Centro de Ótica da UBI, inclusive à Engenheira Ana Paula Gomes, por todo o apoio prestado na caracterização dos materiais utilizados nesta dissertação e também pela sua prontidão em esclarecer qualquer dúvida inerente a estes ensaios. Obrigada a todos os envolvidos, desde os técnicos Senhor Albino e Senhor Varandas e colega Vinci que deu o seu contributo neste trabalho académico.

Ao Doutor Engenheiro Fernando Castro, pelo seu apoio logístico no Laboratório de Análises Químicas da Universidade do Minho, pois sem os resultados relativos à caracterização das lamas, a dissertação não seria completa.

A todos os intervenientes empresariais: à ETA do Caldeirão (Guarda), pelo fornecimento dos resíduos (lamas), à Empresa SIKA Portugal - Produtos Construção e Industria, SA, pelo fornecimento do superplastificante (SikaViscocrete 3005), à Empresa "BETÃO LIZ", localizada no Centro da Covilhã, o fornecimento das areias naturais (areias 0/2 e areias 0/4) e à Empresa Omya Comital Minerais Especialidades SA, na pessoa do Dr. Paulo Pinto, o fornecimento do filer calcário (Betocarb P1-0U). Sem estas empresas não seria possível fazer

a parte experimental, tendo, por isso, contribuído de uma forma relevante para a concretização desta dissertação. MUITÍSSIMO Obrigada.

Por fim, a todos aqueles que me rodeiam, que direta ou indiretamente, sempre me transmitiram palavras de incentivo para continuar em frente. A todos muito Obrigada.

Resumo

Nas últimas décadas a indústria da construção em geral tem procurado soluções sustentáveis para a reutilização de resíduos. Uma das áreas que oferece algum potencial de utilização de resíduos é a indústria do betão, em especial o betão auto-compactável (BAC) que exige a incorporação de uma grande quantidade de materiais finos para atingir a adequada viscosidade plástica. São já bem conhecidas algumas adições provenientes de resíduos, correntemente utilizadas na produção de betões, como sejam, as cinzas volantes, as escórias de alto-forno e a sílica de fumo. Outras adições têm sido produzidas em grande escala para serem utilizadas no BAC, como por exemplo o filer calcário, proveniente da britagem e moagem de pedra calcária. Mais recentemente, vários estudos apontam como viável a utilização de filer granítico proveniente de lamas produzidas no corte de pedras ornamentais.

O trabalho desenvolvido na presente dissertação teve como objetivo principal avaliar o potencial de utilização das “lamas” provenientes de processos de clarificação de água para consumo humano, promovendo-as como um subproduto na substituição parcial do cimento, contribuindo, assim, para uma maior sustentabilidade. Tais lamas têm como destino atual a incineração, já que não podem ser depositadas em aterros comuns.

Na fase preliminar do presente estudo procedeu-se à caracterização físico-química das lamas, que veio a revelar a presença de um elevado teor de carvão activado, susceptível de inviabilizar a sua utilização directa como adição. Nesse sentido, decidiu-se proceder à queima do material a diferentes temperaturas, de forma a obter amostras com diferentes teores de carvão activado. As lamas foram calcinadas numa mufla à temperatura de 500, 700 e 900 °C durante 2 horas e a 950 °C durante 5 horas.

A análise da viabilidade de utilização das lamas foi efectuada indirectamente pela caracterização de argamassas adequadas à produção de betões auto-compactáveis. Foram produzidas argamassas com o material original (sem calcinação), com o material obtido da calcinação a 500, 700 e 900 °C durante 2 horas e ainda com uma adição de filer calcário que serviu de referência, por ser a adição mais utilizada no BAC e existirem já indicações claras sobre o seu comportamento. O material calcinado a 950 °C durante 5 horas foi caracterizado, mas não foram produzidas argamassas com essa adição.

As propriedades reológicas de todas as argamassas produzidas neste estudo, nomeadamente a tensão inicial de corte (avaliada indirectamente pelo ensaio de espalhamento) e a viscosidade plástica (avaliada indirectamente pelo ensaio de fluidez) foram mantidas aproximadamente constantes, situando-se num intervalo estreito e adequado à produção de betões auto-compactáveis. Os parâmetros avaliados incluíram as alterações nas dosagens de água e de

superplastificante necessárias para obter tais propriedades reológicas e ainda a resistência à compressão das argamassas aos 28 dias de idade.

O estudo revelou que o elevado teor em carvão activado inviabiliza a utilização desta lama na sua forma original, provocando um excessivo retardamento da presa (de vários dias), um aumento excessivo da dosagem de superplastificante e uma perda superior a 90% da resistência à compressão aos 28 dias. As argamassas obtidas com a lama calcinada durante duas horas a 500 e 700 °C revelaram algumas pequenas melhorias face à amostra inicial, mas ainda assim, sem vantagens apreciáveis. Finalmente, a argamassa produzida com a lama calcinada a 900 °C durante 2 horas, que revelou um teor de carvão activado inferior, mostraram melhorias significativas face às restantes argamassas da mesma adição (lama), ainda assim, com desvantagem face à argamassa apenas com fíler calcário, que revelou sempre menores dosagem de superplastificante e resistência à compressão substancialmente superior.

Do presente estudo conclui-se que as lamas em análise só poderão ser usadas em betões auto-compactáveis após tratamento térmico, o que poderá conduzir a custos elevados de calcinação e conseqüente impacte ambiental negativo, que deverá ser avaliado.

Palavras-chave

Betão auto-compactável, Adição mineral, resíduos, lamas de ETA, Sustentabilidade.

Abstract

In the last decades the construction industry in general has sought solutions for the sustainable reuse of waste. One area that offers some potential to use waste is the concrete industry, especially the self-compacting concrete (SCC), which requires the incorporation of a large amount of powder materials to achieve adequate plastic viscosity. Are already well known a few additions derived from waste, commonly used in the production of concrete, such as, fly ash, blast furnace slag and silica fume. Other additions have been produced on a large scale to be used in the SCC, such as limestone, derived from the crushing and grinding of limestone rocks. More recently, several studies point out as feasible the use of fillers from granite sludge produced in the cutting of ornamental stones.

The main point of this dissertation is to evaluate the potential use of "sludge" from water clarification processes for human consumption, promoting them as a byproduct in the partial replacement of cement, thus contributing to greater sustainability. Currently, these sludges are destined for incineration, since they cannot be disposed in landfill sites.

In the preliminary phase of the present study, it was proceeded to the physic-chemical characterization of the sludge, which revealed the presence of a high content of activated carbon, which may render them unfit for direct use as addition. In this sense, it was decided to proceed with the burning of the material at different temperatures to obtain samples with different amounts of activated carbon. The sludge was burned in a muffle furnace at a temperature of 500, 700 and 900 °C for 2 hours and 950 °C for 5 hours.

The analysis of the feasibility of using sludge was carried out indirectly by the characterization of mortars suitable for the production of self-compacting concrete. It was produced mortars with the original material (without calcination), with the material obtained from calcination at 500, 700 and 900 °C for 2 hours and with an addition of limestone fillers used as a reference, since it is the most common mineral addition used in the BAC and there are already clear indications about their behavior. The material calcined at 950 °C for 5 hours was characterized, but were not produced mortars with this addition.

The rheological properties of all the mortars produced in this study, namely the initial shear stress (assessed indirectly by testing mortar flow) and plastic viscosity (assessed indirectly by testing the fluidity) were kept approximately constant, standing in a narrow range and suitable for the production of self-compacting concrete. The parameters evaluated included changes in the dosage of superplasticizer and water necessary for such rheological properties and also the compressive strength of mortar at 28 days old.

The study has revealed that the high content of activated carbon prevents the use of mud in its original form, causing an excessive delay in setting time (several days), an excessive increase in the dosage of superplasticizer and a loss of more than 90% of the compressive strength at 28 days. The mortars obtained with sludge calcined for two hours at 500 and 700 °C revealed some small improvements on the original sample, but still, no appreciable advantages. Finally, the mortar produced with the sludge calcined at 900 °C for 2 hours, which revealed a lower content of activated carbon, showed significant improvements compared to other mortars of the same addition (sludge), yet with a disadvantage against the mortar only with fillers limestone, which showed consistently lower dosage of superplasticizer and a substantially higher compressive strength.

From this study it was concluded that the sludge in question can only be used in self-compacting concrete after heat treatment, which may lead to high costs for calcination and consequent negative environmental impact, which should be evaluated.

Keywords

Self-Compacting Concrete, mineral addition, waste, sludges of WTP, Sustainability

Índice

	Pág.
Capítulo 1- Introdução	1
1.1 - Enquadramento do tema	1
1.2 - Objectivos e justificação do tema	3
1.3 - Organização do trabalho	4
Capítulo 2- Lamas de ETA	7
2.1 - Introdução	7
2.2 - Estação de Tratamento de Água	9
2.3 - Características das Lamas	13
2.4 - Potenciais Formas de Utilização	14
Capítulo 3- Caracterização das argamassas auto-compactáveis	17
3.1 - Introdução	17
3.2 - Selecção e caracterização dos materiais	18
3.2.1 - Ligantes	18
3.2.2 - Adições minerais	19
3.2.2.1 - Fíler calcário	20
3.2.2.2 - Cinzas de Lamas de uma ETA	20
3.2.3 - Agregados	21
3.2.3.1 - Agregados finos	21
3.2.4 - Adjuvantes	22
3.2.4.1 - Superplastificante	23
3.3 - Caracterização físico-química dos materiais	24
3.3.1 - Ensaio físicos e químicos	25
3.4 - Caracterização das argamassas	27
3.4.1 - ETAPA I: Estudo da composição das argamassas	27
3.4.2 - ETAPA II: Argamassas no estado fresco	28
3.4.2.1 - Ensaio de espalhamento	28
3.4.2.2 - Ensaio de fluidez	29
3.4.2.3 - Definição do comportamento reológico pretendido	30
3.4.3 - ETAPA III: Argamassas no estado endurecido	32
3.5 - Conclusões	33
Capítulo 4- Descrição do programa experimental	35
4.1 - Introdução	35
4.2 - Selecção e caracterização dos materiais	35
4.2.1 - Ligantes	36
4.2.2 - Adições Minerais	36
4.2.2.1 - Fíler calcário	36
4.2.2.2 - Lamas da ETA do Caldeirão (Guarda)	37
4.2.3 - Agregados finos	39
4.2.4 - Adjuvantes	40
4.2.4.1 - Superplastificante	41
4.2.5 - Água	41
4.3 - Caracterização física e química dos materiais	41
4.3.1 - Ensaio físicos	41

	Pág.
4.3.3 - Ensaio químicos	48
4.4 - Caracterização das argamassas auto-compactáveis	50
4.4.1 - ETAPA I: Estudo da composição das argamassas	50
4.4.1.1 - Metodologia Experimental	51
4.4.1.2 - Programa de Apoio ao Cálculo	54
4.4.1.3 - Definição do comportamento reológico pretendido	55
4.4.2 - ETAPA II: Caracterização das argamassas no estado fresco	56
4.4.2.1 - Amassadura	56
4.4.2.2 - Ensaio no estado fresco	58
4.4.2.2.1 - Ensaio de espalhamento	58
4.4.2.2.2 - Ensaio de fluidez	59
4.4.2.3 - Método de obtenção das propriedades reológicas pretendidas	60
4.4.3.4 - Moldagem de provetes	61
4.4.3 - ETAPA III: Caracterização das argamassas no estado endurecido	62
4.4.3.1 - Preparação dos provetes	62
4.4.3.2 - Ensaio de resistência à compressão	63
Capítulo 5- Apresentação e discussão dos resultados	65
5.1 - Introdução	65
5.2 - Caracterização dos materiais utilizados	65
5.3 - Caracterização físico-química	65
5.3.1 - Massa Volúmica	66
5.3.2 - Curva granulométrica das adições	66
5.3.3 - Principais constituintes químicos e atômicos das lamas	67
5.3.4 - Capacidade pozolânica das amostras de cinzas de lamas	70
5.4 - Caracterização das argamassas auto-compactáveis	71
5.4.1 - Proporções das misturas	71
5.4.2 - Razão água/cimento e água/finos	72
5.4.3 - Parâmetros reológicos	73
5.4.5 - Cura das argamassas	77
5.5 - Argamassas no estado endurecido	77
5.5.1 - Resistência à compressão das argamassas	77
5.6 - Conclusões	79
5.6.1 - Caracterização dos materiais	79
5.6.2 - Caracterização física e química	79
5.6.3 - Caracterização das argamassas auto-compactáveis	79
Capítulo 6- Conclusões e propostas para trabalhos futuros	81
6.1- Introdução	81
6.2 - Conclusões	81
6.3 - Propostas para trabalhos futuros	82
Referências bibliográficas	83
ANEXO A.1 - Caracterização dos materiais constituintes	91
ANEXO A.2 - Caracterização das argamassas no estado fresco	97
ANEXO A.3 - Caracterização das argamassas no estado endurecido	107

Lista de Figuras

	Pág.	
2.1	Cadeia de valores dos serviços de água e resíduos	8
2.2	Esquema representativo do funcionamento de uma ETA	10
2.3 a)	Adição do cloro	12
2.3 b)	Flotação e Filtração	12
2.3 c)	Ensaio “Jar-Test”	12
2.3 d)	Tanque de infiltração de ETA do Caldeirão	12
2.4 a)	Amostra das lamas no estado bruto	13
2.4 b)	Aspetto final quando as lamas são secas e moídas	13
3.1 a)	Adsorção do polímero (estrutura) pelo grão de cimento	24
3.1 b)	Pormenor da adsorção do polímero (estrutura) pelo grão de cimento	24
3.1 c)	Trabalhabilidade melhorada devido à repulsão esférica	24
3.1 d)	Aumento da trabalhabilidade devido à repulsão esférica	24
3.2	Principais medidas do “cone de espalhamento”	28
3.3	Principais medidas do “Funil-V”	29
3.4	Intervalo de variação dos parâmetros reológicos adotados	30
3.5	Variação dos parâmetros reológicos adotados V_w/V_p e $S_p/P\%$	31
3.6	Alteração na reologia com o aumento de V_w/V_p mantendo $S_p/P\%$ constante	31
3.7	Alterações na reologia com o aumento de $S_p/P\%$ mantendo constante V_w/V_p	32
4.1	Apresentação do cimento CEM I 42,5R	36
4.2	Apresentação do Fíler Calcário betocarb P1-OU	37
4.3 a)	Estado bruto das lamas	38
4.3 b)	Divisão em vários tabuleiros	38
4.3 c)	Secagem em estufa a 105°C	38
4.3 d)	Lamas secas depositadas numa cilha	38
4.3 e)	Moinho para moagem das lamas	38
4.4 a)	Monitor para a configuração da temperatura	39
4.4 b)	Finos de lamas prontas a calcinarem	39
4.4 c)	Introdução das lamas na mufla	39
4.5	Apresentação do Estado calcinado a 700°C de um espécime de lamas	39
4.6 a)	Areia do rio Tejo tipo 04	40
4.6 b)	Areia siliciosa da Figueira da Foz tipo 02	40
4.7	Apresentação de superplastificante SIKA ViscoCrete 3005	41
4.8	Ensaio da massa volúmica dos agregados finos	42
4.9	Ensaio da massa volúmica das adições minerais	43
4.10	Equipamento de análise da massa volúmica micrometrics AccuPyc 1330 Gas Pycnometers	43
4.11	Determinação da absorção de água dos agregados finos	44
4.12 a.1)	Amostra da areia 02 seca	45
4.12 a.2)	Amostra da areia 04 seca	45
4.12 b)	Peneiros colocados pela ordem de normalização	45
4.12 c)	Medição dos peneiros através de uma balança de alta precisão	45
4.12 d)	Inserção da areia nos peneiros	45
4.12 e)	Agitadora de peneiros	45

	Pág.	
4.13	Relação entre o módulo de finura e a razão limite Vs/Vm	46
4.14	Apresentação da curva granulométrica dos agregados finos	47
4.15 a)	Filtro de água	48
4.15 b)	Software de análise da difração a laser	48
4.15 c)	Analizador LS COULTER 200	48
4.15 d)	Local de introdução da amostra em água destilada para a análise	48
4.15 e)	Amostra para análise	48
4.16	Apresentação do Microscópio Eletrônico de Varrimento	48
4.17	Intervalo de variação dos parâmetros Gm e Rm	56
4.18	Sequência de amassadura adotada neste trabalho	57
4.19	Procedimentos de amassadura das argamassas	58
4.20	Apresentação dos processos para o ensaio de espalhamento	59
4.21	Apresentação dos processos durante o ensaio de fluidez	60
4.22	Exemplo do processo de acerto da mistura	61
4.23	Apresentação da introdução da argamassa fresca nos moldes de cofragem	62
4.24	Apresentação das argamassas aos 28 dias de idade	62
4.25	Ensaio de resistência à compressão aos 28 dias	63
4.26	Apresentação dos provetes no final do ensaio de resistência à compressão	63
5.1	Comparação das massas volúmicas de cada tipo de material	66
5.2	Volume acumulado da distribuição do tamanho das partículas das adições de finos	66
5.3	Volume diferencial da distribuição das partículas adições de finos	67
5.4	Percentagem (%) de matéria orgânica e carbono nas cinzas de lamas	68
5.5	Percentagem (%) dos compostos atômicos majoritários das cinzas de lamas	68
5.6	Percentagem (%) dos principais constituintes atômicos minoritários das cinzas de lamas	69
5.7	Percentagem (%) dos principais constituintes químicos dos vários tipos de cinzas de lamas	70
5.8	Materiais utilizados em cada família de argamassas para um volume de 1,6 litros, em gramas	71
5.9	Quantidades de água e cimento para cada amassadura de 1,6 litros, em gramas	72
5.10	Razões água/finos e água/cimento das argamassas produzidas	73
5.11	Otimização dos parâmetros reológicos de Rm e Gm para FC	74
5.12	Otimização dos parâmetros reológicos de Rm e Gm para SL0	75
5.13	Otimização dos parâmetros reológicos de Rm e Gm para SL500	75
5.14	Otimização dos parâmetros reológicos de Rm e Gm para SL700	76
5.15	Otimização dos parâmetros reológicos de Rm e Gm para SL900	76
5.16	Resistência à compressão das várias famílias de argamassas (fm,28), em MPa	78
5.17	Percentagem (%) de Carbono e matéria orgânica em relação à resistência (MPa) das argamassas em percentagem	78

Lista de Quadros

	Pág.	
2.1	Resultado em percentagem (%) dos maiores elementos	14
2.2	Resultado em percentagem (%) dos menores elementos químicos	14
3.1	Propriedades dos agregados finos	22
4.1	Massas volúmicas dos materiais	44
4.2	Absorção de água dos agregados finos	45
4.3	Curvas granulométricas dos agregados, curva real e de referência	46
4.4	Apresentação das percentagens (%) da análise elementar atômica	49
4.5	Apresentação das percentagens (%) da análise elementar de óxidos	49
4.5	Apresentação das percentagens de Carbono e Matéria Orgânica	49
4.6	Misturas Binárias para a composição das argamassas	51
4.7	Exemplo de uma folha Excel para o cálculo da Argamassa SL900 número 1	55

Lista de Anexos

	Pág.	
A1.1	Massa volúmica do ligante CEM I 42,5R	91
A1.2	Ensaio mecânico do ligante CEM I 42,5R	91
A1.3	Ensaio físico do ligante CEM I 42,5R	91
A1.4	Análise química do ligante CEM I 42,5R	92
A1.5	Caraterísticas químicas do filler calcário betocarb P1-OU	92
A1.6	Caraterísticas físicas do filler calcário betocarb P1-OU	92
A1.7	Curvas granulométricas dos agregados finos	93
A1.8	Caraterísticas químicas e físicas do Superplastificante ViscoCrete 3005 da SIKA	93
A1.9	Caraterização das partículas para FC, SL0, SL500, SL700, SL900 e SL950	94
A1.10	Caraterização da distribuição das partículas para FG, CV e SF	95
A2.1	Estudo da composição da argamassa auto-compactável FC número 1	97
A2.2	Estudo da composição da argamassa auto-compactável FC número 2	97
A2.3	Estudo da composição da argamassa auto-compactável FC número 3	98
A2.4	Estudo da composição da argamassa auto-compactável FC número 4	98
A2.5	Estudo da composição da argamassa auto-compactável FC número 5	99
A2.6	Estudo da composição da argamassa auto-compactável SL0 número 1	99
A2.7	Estudo da composição da argamassa auto-compactável SL0 número 2	100
A2.8	Estudo da composição da argamassa auto-compactável SL0 número 3	100
A2.9	Estudo da composição da argamassa auto-compactável SL0 número 4	101
A2.10	Estudo da composição da argamassa auto-compactável SL0 número 5	101
A2.11	Estudo da composição da argamassa auto-compactável SL500 número 1	102
A2.12	Estudo da composição da argamassa auto-compactável SL500 número 2	102
A2.13	Estudo da composição da argamassa auto-compactável SL500 número 3	103
A2.14	Estudo da composição da argamassa auto-compactável SL500 número 4	103
A2.15	Estudo da composição da argamassa auto-compactável SL700 número 1	104
A2.16	Estudo da composição da argamassa auto-compactável SL700 número 2	104
A2.17	Estudo da composição da argamassa auto-compactável SL900 número 1	105
A2.18	Estudo da composição da argamassa auto-compactável SL900 número 2	105
A2.19	Resumo das propriedades reológicas para cada acerto da argamassa FC	106
A2.20	Resumo das propriedades reológicas para cada acerto da argamassa SL0	106
A2.21	Resumo das propriedades reológicas para cada acerto da argamassa SL500	106
A2.22	Resumo das propriedades reológicas para cada acerto da argamassa SL700	106
A2.23	Resumo das propriedades reológicas para cada acerto da argamassa SL900	106
A3.1	Massa volúmica das argamassas no estado endurecido de FC n° 5	107
A3.2	Valores de resistência à compressão da argamassa FC n° 5	107
A3.3	Massa volúmica das argamassas no estado endurecido de SL0 n° 5	107
A3.4	Valores de resistência à compressão da argamassa SL0 n° 5	108
A3.5	Massa volúmica das argamassas no estado endurecido de n° 2	108
A3.6	Valores de resistência à compressão da argamassa SL500 n° 2	108
A3.7	Massa volúmica das argamassas no estado endurecido de SL500 n° 4	109
A3.8	Valores de resistência à compressão da argamassa SL500 n° 4	109

	Pág.
A3.9 Massa volúmica das argamassas no estado endurecido de SL700 n° 2	109
A3.10 Valores de resistência à compressão da argamassa SL700 n° 2	110
A3.11 Massa volúmica das argamassas no estado endurecido de n° 2	110
A3.12 Valores de resistência à compressão da argamassa SL900 n° 2	110

Lista de Acrónimos

AdDP	Águas do Douro e Paiva
EFNARC	European Federation of National Associations Representing producers and applicators of specialist building products of Concrete
EPAL	Empresa Portuguesa de Águas Livres
ERMCO	European Ready Mixed Concrete Organization
LNEC	Laboratório Nacional de Engenharia Civil
NP	Norma Portuguesa
PEAASAR	Planeamento Estratégicos de Abastecimento de Água e de Saneamento de Águas Residuais
UBI	Universidade da Beira Interior
UNESCO	The United Nations Educational, Scientific, Cultural Organization

SIMBOLOGIA

Ai%	Absorção de água do agregado i, expressa em percentagem referida à massa do agregado seco
C ₃ A	Aluminato tricálcico
C ₄ AF	Aluminoferrato tetracálcico
Gm	Área de espalhamento relativo no ensaio de espalhamento da argamassa
NH ₃	Azoto amoniacal
Cd	Cádmio
Na ₂ CO ₃	Carbonato de Sódio
Pb	Chumbo
Cl	Cloro
Cr	Crómio
D ₀	Diâmetro inicial na base do cone de ensaio de espalhamento das argamassas, expresso em mm
Dm	Diâmetro médio de espalhamento no ensaio de espalhamento das argamassas, expresso em mm
CO ₂	Dióxido de Carbono
SiO ₂	Dióxido de Silício ou Sílica
Fe	Ferro
H ₂ S	Gás sulfídrico
CaSO ₄ ·2H ₂ O	Gipsita ou pedra de gesso (Grupo de sulfatos)
pH	Grandeza físico-química, indica a acidez, neutralidade e alcalinidade de uma solução aquosa
Mn	Manganês ou magnésio
SL0	Massa das lamas de ETA a 0°C na mistura, em kg/m ³
SL500	Massa das lamas de ETA a 500°C mistura, em kg/m ³
SL700	Massa das lamas de ETA a 700°C, em kg/m ³
SL900	Massa das lamas de ETA a 900°C, em kg/m ³
SL950	Massa das lamas de ETA a 950°C, em kg/m ³
FC	Massa do filer calcário na mistura, em kg/m ³
δi	Massa volúmica do material I, expressa em kg/m ³
µm	Micrómetro (10 ⁻⁶ m)
Ni	Níquel
Sp/P	O mesmo que Sp/P%
Al ₂ O ₃	Óxido de Alumínio
CaO	Óxido de Cálcio
Ca(OH) ₂	Óxido de Cálcio ou cal
Fe ₂ O ₃	Óxido de Ferro
MgO	Óxido de Magnésio
K ₂ O	Óxido de Potássio
Na ₂ O	Óxido de Sódio
O ₂	Oxigénio
O ₃	Ozono
ffc	Percentagem unitária de filer calcário no volume absoluto do total de finos (Vp)
fsl0	Percentagem unitária de lamas a 0°C no volume absoluto do total de finos (Vp)
Fsl500	Percentagem unitária de lamas a 500°C no volume absoluto do total de finos (Vp)

fsl700	Percentagem unitária de lamas a 700°C no volume absoluto do total de finos (Vp)
fsl900	Percentagem unitária de lamas a 900°C no volume absoluto do total de finos (Vp)
ai	Percentagem unitária do agregado fino I no volume absoluto do total dos agregados finos (Vs)
fc1	Percentagem unitária do cimento 1 no volume absoluto do total de finos (Vp)
fi	Percentagem unitária do material fino I no volume absoluto do total de finos (Vp)
W/C	Razão em massa entre as quantidades de água e de cimento da mistura
Vsp/Vp	Razão em volume absoluto entre as quantidades de superplastificante e de materiais finos na mistura
Vw/Vp	Razão em volume absoluto entre as quantidades totais de água e de materiais finos na mistura
Vp/Vs	Razão em volume absoluto entre as quantidades totais de materiais finos e de agregados finos na mistura
Sp/P%	Razão percentual em massa entre as quantidades totais de superplastificante e de materiais finos na mistura
C ₂ S	Silicato Bicálcico ou belite
C ₃ S	Silicato tricálcico
CS	Sulfato de Cálcio
SO ₄ ⁻²	Sulfatos
t	Tempo de escoamento no ensaio de fluidez de argamassas, expresso em segundos
fm,28	Valor médio da resistência à compressão da argamassa aos 28 dias de idade, expressa em MPa
Rm	Velocidade relativa de escoamento no ensaio de fluidez da argamassa, em s ⁻¹
V _{SL0}	Volume absoluto das lamas de ETA a 0°C na mistura, em m ³ /m ³
V _{SL500}	Volume absoluto das lamas de ETA a 500°C na mistura, em m ³ /m ³
V _{SL700}	Volume absoluto das lamas de ETA a 700°C na mistura, em m ³ /m ³
V _{SL900}	Volume absoluto das lamas de ETA a 900°C na mistura, em m ³ /m ³
Vi	Volume absoluto de material I na mistura, em m ³ /m ³
Vs1	Volume absoluto do agregado fino 1 da mistura, em m ³ /m ³
Vs2	Volume absoluto do agregado fino 2 da mistura, em m ³ /m ³
V _{C1}	Volume absoluto do cimento 1 na mistura, em m ³ /m ³
V _{FC}	Volume absoluto do fíler calcário na mistura, em m ³ /m ³
Vs	Volume absoluto do total de agregados finos, em m ³ /m ³
Vs	Volume absoluto do total de agregados finos, em m ³ /m ³
Vp	Volume absoluto do total de material fino, em m ³ /m ³
Vw	Volume de água da mistura, em m ³ /m ³
W	Volume de água na mistura
Vsp	Volume de superplastificante da mistura, em m ³ /m ³
Vsp	Volume de superplastificante da mistura, em m ³ /m ³
Sp	Volume de superplastificante na mistura, em m ³ /m ³
Vv	Volume de vazios da mistura, em m ³ /m ³
Zn	Zinco, em mg/Kg

Capítulo 1- Introdução

1.1 - Enquadramento do tema

O aparecimento da era tecnológica, com o seu início com a revolução industrial, desencadeou um aumento populacional mundial, devido às melhorias das condições de vida. Por sua vez, foram detetados problemas intimamente ligados a um incontrolável crescimento da população, nomeadamente, poluição, aterros sanitários, o uso furtivo de recursos naturais, etc. Estes problemas estão a forçar os limites da “capacidade de suporte” da Terra, pois este fornecimento é vital para sustentar a vida, mantendo a capacidade de regeneração e fornecimento ilimitado [4].

Um dos setores responsáveis por esses impactos é o setor da construção, mais precisamente a indústria cimentícia, que provoca um grande impacto na extração de recursos naturais, contribuindo, por sua vez, para os gases de efeito estufa (CO₂) [4, 28, 57, 73].

Outro fator prejudicial com a disparidade no incremento da população é o aumento do consumo de água. Desde 1980, o consumo deste líquido triplicou. Face a este problema, também cresceu a necessidade de expansão das estações de tratamento de água (ETA). Para que possa ser fornecida água em boas condições ao consumidor, usam-se vários reagentes químicos nos processos de pré-oxidação coagulação, floculação, filtração e desinfecção, gerando-se, assim, resíduos (lamas) provenientes dos decantadores e da lavagem dos filtros. Estas lamas estão catalogados pela Diretiva 86/278/CEE de 12 Junho de 1986 [1, 4, 26, 97].

A Diretiva 2000/532/CE estipula que as lamas provenientes do “tratamento de água para consumo humano ou de água para consumo industrial” são consideradas resíduos industriais, tendo como designação: “M1 19 09”, tendo o seu destino final sido deposição em aterro sanitário ou a incineração [17, 22]. As recentes restrições da deposição em aterro e os custos associados à incineração, fizeram as entidades gestoras olhar para outras opções como a sua reutilização ou reciclagem na Construção.

Face as estes dois paradigmas, quer ao uso intensivo do cimento quer ao aumento dos resíduos de lamas, os investigadores têm procedido a pesquisas que conduzam à diminuição do consumo deste material e a novas alternativas na deposição em aterros [6, 40, 72]. Análises químicas têm mostrado que a combustão industrial destes resíduos poderá ser utilizada na indústria cimentícia, devido às boas propriedades químicas que apresentam. Ensaio ao estado fresco e endurecido das argamassas e betões têm mostrado boas características hidráulicas ou pozolânicas, quando é racionalmente misturada com o cimento,

diminuindo desta forma a percentagem deste material numa mistura [14, 41]. Com o reaproveitamento destes resíduos no cimento, ganhar-se-á na redução dos custos ambientais, na produção de cimento, em termos de consumo de energia, esgotamento de recursos naturais e poluição do ar. Além disso, os custos associados à sua deposição em aterros de resíduos podem ser desviados para alternativas mais sustentáveis [49, 57,72, 91].

Neste contexto, a indústria do betão pode também desempenhar um papel relevante, em especial o seu mais recente advento que é o betão auto-compactável (BAC), uma vez que este necessita de uma elevada incorporação de adições para alcançar a necessária viscosidade. Enquanto algumas adições, como o fíler calcário, são produzidas a uma escala industrial para serem usadas no BAC, a grande maioria resultam de subprodutos industriais, como as cinzas volantes, a sílica de fumo ou as escórias de alto-forno. As investigações intensivas sobre estes subprodutos, anteriormente tidos como resíduos, fizeram com que eles fossem reaproveitados e muito valorizados para a indústria cimentícia ou para os produtos de base cimentícia como o betão[5, 18, 30, 41, 45, 46, 60, 96].

Outros resíduos industriais, nomeadamente os provenientes das lamas produzidas na indústria do corte de pedras ornamentais (granito e mármore) têm sido testados com sucesso como adição para o BAC em vários trabalhos de investigação [37, 43, 98, 99]. Mais recentemente, as cinzas de ETARs têm sido também testadas e têm mostrado bons resultados na indústria cimentícia, mas relativamente às cinzas de ETA ainda muito pouco se conhece, apesar de alguns estudos apontarem para a sua potencialidade na indústria do cimento [35, 36, 50, 74, 76, 79].

Alguns investigadores têm levado a cabo projetos para avaliar a reutilização das lamas de ETARs sob a forma de agregados leves e também o seu impacto sobre o meio ambiente, mostrando os valores positivos deste produto [72, 81]. Espera-se que esta solução possa servir também para a reutilização das lamas de ETA, transformando-as, num futuro próximo, num subproduto industrial com aplicação na indústria do cimento ou na indústria dos produtos de base cimentícia.

A introdução destes resíduos está a fomentar, de certa forma, a rentabilização destes materiais para o campo industrial, sempre aliado a fatores económicos, sociais e ambientais que contribuem para a sustentabilidade na construção [49, 57]. Neste contexto, quiçá os BAC possam também ser designadas por “green concrete”.

As adições minerais ou adições de finos, antes de serem adicionadas ao betão, são criteriosamente selecionadas e calculadas para estipular a quantidade plausível na mistura. A nível proporcional tem sido apontada como percentagem de substituição parcial “ideal” 30 por cento em relação à quantidade de cimento [18, 35, 50].

Em termos práticos, a melhor informação que se consegue obter sobre o comportamento de uma adição é presumivelmente aquela que resulta do ensaio das argamassas e dos betões com elas produzidos. Nesse sentido, por se tratar de adições, o estudo poderá ser efectuado com várias vantagens apenas em argamassas. O método básico para o estudo da composição de argamassas adequadas à produção do BAC tem sido regido através da metodologia de Okamura *et al* [71]. Muitos entendidos na área dos BAC desenvolveram métodos melhorados, como, por exemplo, o método proposto por Nepomuceno que irá ser utilizado nas experiências com argamassas neste estudo. No método de Nepomuceno a otimização simultânea das propriedades reológicas das argamassas e da resistência à compressão faz-se através do estudo dos parâmetros: “*família de finos*”, V_p/V_s , V_w/V_p e $Sp/p\%$ [60, 61, 66, 71]. Esta metodologia pressupõe ainda que o acerto dos parâmetros V_w/V_p e $Sp/p\%$ seja confirmado experimentalmente, uma vez que as propriedades da argamassa no estado fresco são fortemente influenciadas pelas propriedades físicas e químicas dos materiais, desde os adjuvantes introduzidos, agregados e, também, pelos finos (ligantes e adições minerais) [30, 70, 89].

1.2 - Objetivos e justificação do tema

Consideração que a natureza é fomedora das matérias-primas para o conforto humano e, conseqüentemente, o “lixo” é a retribuição por parte deste, é conveniente refletir sobre este aspeto, pois é neste sentido que a dissertação se insere. Promover o respeito pela natureza e o rejuvenescer por algo que foi considerado sempre morto, o “lixo” é uma boa e grande aposta para este trabalho. Estes conceitos inserem-se no tema da sustentabilidade de recursos, tratada avidamente por vários organismos preocupados com a preservação da Terra. O “estado da arte” inserido neste tema tem dado passos largos, nomeadamente no que se refere à gestão dos materiais utilizados na elaboração de betões e argamassas, assim como a introdução de adições minerais provindas de subprodutos industriais.

O trabalho desenvolvido na presente dissertação teve como objetivo principal avaliar o potencial de utilização das “lamas” provenientes da ETA do Caldeirão (Concelho da Guarda) como adição mineral em betões auto-compactáveis, em substituição parcial do cimento, contribuindo desta forma para uma maior sustentabilidade.

Face aos objectivos iniciais, preconizou-se que o potencial de utilização das lamas fosse avaliado indirectamente pela caracterização das propriedades no estado fresco e endurecido de argamassas adequadas à produção de betões auto-compactáveis, por estas serem de maior facilidade de execução que os betões e utilizarem menor volume de materiais, permitindo desta forma uma maior amostragem. As argamassas a produzir deveriam incluir o material original (sem calcinação), o material obtido da calcinação a diferentes temperaturas e ainda

uma adição de fíler calcário que serviu de referência, por ser a adição mais utilizada no BAC e existirem já indicações claras sobre o seu comportamento.

Estabeleceu-se ainda como premissa que todas as argamassas deveriam ter o mesmo comportamento reológico no estado fresco, que deveria ser o adequado à produção de betões auto-compactáveis. Os parâmetros a avaliar seriam as alterações nas dosagens de água e de superplastificante necessárias para obter tais propriedades reológicas e ainda a resistência à compressão das argamassas aos 28 dias de idade.

1.3 - Organização do trabalho

O presente trabalho subdivide-se em três partes: pré-textual, textual e referencial. A primeira inclui a dedicatória, agradecimentos, resumo analítico, índice geral, índice de figuras e de quadros, listagem de siglas e da simbologia utilizada. A parte textual encontra-se estruturada em seis capítulos cujo conteúdo inclui a introdução (Capítulo 1), a revisão bibliográfica (Capítulos 2 e 3) e a contribuição para o estudo das argamassas auto-compactáveis com adição de cinzas de lamas de uma ETA (Capítulos 4 a 6). Da parte referencial constam as referências bibliográficas citadas neste trabalho académico e os anexos (A.1, A.2 e A.3).

No Capítulo 1, é feita a introdução ao tema abordado, são apresentados os objetivos, é justificada a relevância do tema proposto e é descrita a organização geral do trabalho.

No Capítulo 2, são apresentados, sucintamente, os processos de clarificação de águas, que geram as lamas, salientando, sempre que possível, os desperdícios em cada processo. É feita a caracterização química destas lamas com o intuito de apresentar as suas potenciais soluções alternativas à deposição em aterro. As alternativas passam por rever o que já foi feito por outros autores com o intuito de o tentar extrapolar para este tipo de lamas.

O Capítulo 3 resume sucintamente o que é a auto-compactabilidade, faz uma apreciação geral para a caracterização de cada material, caracterização química e metodologia escolhida para as argamassas, tendo sempre por base as fontes bibliográficas.

O Capítulo 4 é dividido em três partes importantes: Caracterização dos materiais, Caracterização Físico-química e Caracterização das argamassas, respetivamente. Cada uma das partes apresenta, genericamente, a constituição dos materiais utilizados e as práticas escolhidas para a produção das argamassas. O terceiro subcapítulo é dividido em três etapas importantes: Etapa I, Etapa II e Etapa III. As etapas foram concebidas para melhor delinear os aspetos importantes a tomar em cada uma das fases, desde o estado fresco ao estado

endurecido, respetivamente, a metodologia de cálculo, a metodologia de amassadura e seus ensaios reológicos, e, por último, a moldagem para os posteriores ensaios à compressão.

No Capítulo 5, são expostos os resultados obtidos no decorrer da fase experimental, com a devida discussão para cada análise efetuada, sempre que possível comprovada por outras investigações. A estruturação do capítulo no decorrer da amostragem, segue a mesma ordem do anterior Capítulo.

O Capítulo 6 inclui as principais conclusões, apresentando, também, diretrizes para novas investigações.

Capítulo 2- Lamas de ETA

2.1 - Introdução

As lamas provenientes de ETA estão a desencadear discussões em torno da sua deposição final. Trata-se de resíduos que são formados devido à utilização de químicos para a remoção de impurezas da água. Estes resíduos têm levado vários investigadores a procurar soluções alternativas ao aterro e incineração [72, 91]. Vários estudos apontam diferentes soluções para a sua utilização, quer na indústria cimentícia, quer na agricultura. No campo da indústria cimentícia, têm sido apresentados resultados favoráveis devido aos constituintes químicos e elevada finura [6, 72, 91].

O desenvolvimento económico e o crescimento da população têm conduzido a um consumo excessivo de recursos hídricos. Cada vez mais, o Homem tem sérias dificuldades na prospeção da quantidade e qualidade deste recurso, devido ao aumento da poluição, provocado pelas actividades humanas [27, 32, 84, 88]. Um estudo feito pela UNESCO cita que as dificuldades na captação de água se deve ao forte crescimento das zonas urbanizadas, como aumento do consumo doméstico e industrial [92].

A gestão dos sistemas de água em Portugal (Fig. 2.1) inclui os serviços de abastecimento de água para consumo humano e de saneamento de águas residuais urbanas. O serviço de abastecimento de água é constituído por dois sistemas: o sistema em “alta” e o sistema em “baixa”. O primeiro é responsável pela captação, tratamento e armazenamento de águas, ligado aos sistemas multimunicipais; o segundo é responsável pela sua distribuição, encontrando-se ligado aos sistemas municipais [72, 77].

Os sistemas em “alta” são responsáveis pelo tratamento de água para abastecimento público, transformando a água “bruta”, na maior parte das vezes inapta (contaminação por agentes biológicos ou poluição) para consumo humano, em água potável, seguindo os padrões estipulados pela legislação e utilizando operações e processos de tratamento como a coagulação, floculação, decantação e filtração). Para a obtenção de água apropriada para consumo, é essencial o uso de processos e operações que requerem a introdução de reagentes químicos. Estes químicos, porém, não são mais que dispersantes e neutralizantes das partículas orgânicas e inorgânicas que estão contidos na água. Os coagulantes mais utilizados são o sulfato de alumínio e/ou cloreto férrico, enquanto que o agente adsorvente normalmente utilizado é o carvão ativado em pó (CAP) ou granular (CAG) [23, 24,25, 31, 32, 82, 97].

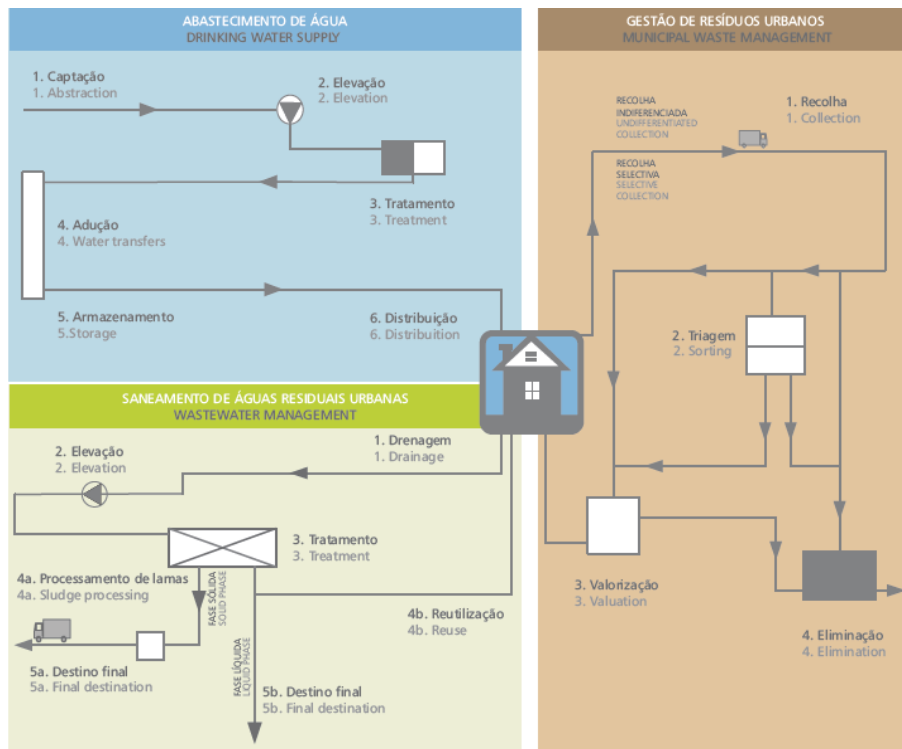


Fig. 2.1. Cadeia de valores dos serviços de água e resíduos [77].

Nestes tratamentos, usam-se, cada vez mais, grandes quantidades destes reagentes químicos, em especial nos processos de pré-oxidação, coagulação, floculação e filtração, resultando um aglomerado de impurezas e reagentes que são purgados dos decantadores e da lavagem dos filtros. Estes resíduos (lamas de ETA) que restam do processo de tratamento de água potável estão classificados na Directiva 86/278/CEE de 12 Junho de 1986 [26, 97].

Este tipo de lama é constituída basicamente por hidróxido de cálcio, sulfato de alumínio, sulfato de potássio, variando da necessidade da quantidade química na purificação da água. Apresenta um teor de humidade entre 75 a 82% e cerca de 35% de perda ao fogo, parte devida à eliminação de matéria orgânica que se compreende entre 6 a 25%. Após a secagem, o tamanho de partícula máximo é de aproximadamente 100 µm e o valor médio de 17,84 µm. A exposição desta lama ao ar reduz, significativamente, o teor de humidade para menos de 30%, devendo este resíduo estar abrigado da chuva, facilitando desta maneira o seu manuseamento [36, 74, 76, 79, 81].

A Directiva 2000/532/CE classifica esta lama como resíduo industrial 19 09 [15]. Não obstante, a transposição da Directiva sobre resíduos para o ordenamento jurídico interno foi feita através do Decreto-Lei nº 152/2002 de 23 de Maio, que estabelece as normas aplicáveis em matéria de instalação, exploração, encerramento e manutenção e pós-encerramento destinados a resíduos, tendo em vista reduzir tanto quanto seja possível os efeitos adversos sobre o meio ambiente, nomeadamente a poluição das águas de superfície e subterrâneas, da atmosfera de modo a minimizarem riscos para a saúde pública [16].

De acordo com PEAASAR II, desde 2003, a par com a solução de deposição em aterro sanitário, uma das principais soluções para o destino final das lamas, que representam 97,5% do total de resíduos da EPAL, produzidos em ETA, tem sido a sua utilização como matéria-prima secundária na produção de cimento. Outra forma de contornar o problema deste resíduo é o uso de matrizes de inertização ou estabilização, modificando, assim, as características como resíduo, transformando-o em material seco, sem odor, com baixa concentração de lixivantes de modo a poder obter um produto que possa otimizar o seu transporte, armazenamento, deposição e/ou reutilização. Já foram criadas diretrizes para a reutilização da água gasta nas operações de tratamento das ETA, nomeadamente a recolha das águas de lavagem de filtros e dos tanques de floculação, permitindo o reaproveitamento de milhões de metros cúbicos de água por ano [72, 74, 77].

Uma das formas de tratamento das lamas das ETA encontrada pela empresa AdP, consiste na recolha destes resíduos à superfície dos tanques, onde são dirigidas para uma unidade de tratamento de lamas, onde sofrem espessamento e centrifugação [78, 82].

A gestão das lamas é complexa porque envolve aspetos de índole técnica, económica, ambiental, energética e legal, que ultrapassam, muitas vezes, os limites do próprio sistema municipal ou multimunicipal. Vários sistemas multimunicipais têm contribuído com estudos de gestão das lamas, que analisam as opções de tratamento e destino final que se afiguram mais vantajosas técnica e economicamente às especificidades da região onde se inserem. Têm sido adotadas soluções baseadas em tratamento integrado numa unidade central. Contudo, Weber et al. salientam que não existe uma solução única para a disposição final destes resíduos, sendo necessária uma análise individual para cada sistema [72, 78, 97].

A valorização das lamas tem que obedecer a critérios que promovam a sua eficácia como produto. Pereira (2006) entende que este resíduo tem potencial de reutilização contribuindo para a ecoeficiência dos sistemas, sendo possível acrescentar valor a este resíduo, utilizando-o para fins inovadores, valorizando os materiais em fim de vida, reintegrando-os no ciclo económico [74].

2.2 - Estação de Tratamento de Água

Uma ETA (Fig. 2.2) destina-se à produção de água com características para utilização humana, industrial e agrícola, a partir de origens de água bruta (superficial e subterrânea). Trata-se, portanto, de uma indústria de água e é desta forma que deve ser gerida [23, 24, 25, 82].

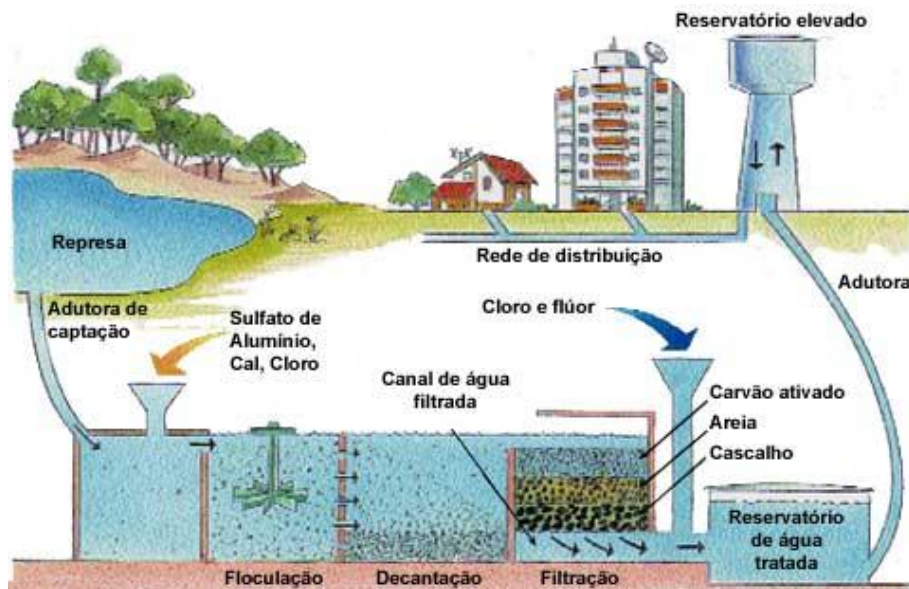


Fig. 2.2. Esquema representativo do funcionamento de uma ETA [2].

As águas superficiais, comparativamente com as águas subterrâneas, merecem uma atenção mais cuidada, pois estão mais expostas a fontes de poluição naturais ou antropogénicas. Este tipo de águas é dividido em três classes, A1, A2 e A3, tendo em vista a selecção de diferentes tipos de tratamento [82]. Independentemente da sua origem natural, os processos utilizados para o seu tratamento são os mesmos, sendo as operações unitárias mais utilizadas as seguintes: Flotação, Pré-Oxidação, Arejamento, Coagulação-Floculação, Decantação, Filtração e Desinfecção.

A Flotação consiste na eliminação das microalgas presentes na água. Estas vão-se acumulando na superfície do flutador sendo removidas por uma ponte raspadora e enviadas para a câmara de mistura das lamas. É uma tecnologia cada vez menos usada, tendo sido ultrapassada pela pré-oxidação com ozono [93]. A Pré-Oxidação ou “Pré-Oxidação com Ozono” da água bruta aplica-se, normalmente, para a remoção de ferro e manganês ou quando esta apresenta valores elevados de matéria orgânica. A utilização de ozono (O_3) permite, também, retirar cor e turvação à água assim como compostos organoclorados (compostos cancerígenos), hidrocarbonetos e detergentes [82].

O cloro, com a designação química de Cl (Fig. 2.3 a), é o oxidante que tem sido mais utilizado, apresentando como principais vantagens a remoção orgânica, impedindo, assim, a decomposição das lamas decantadas e o desenvolvimento de algas e outros micro-organismos, além de ser um forte desinfectante [82, 93]. O Arejamento tem como objetivo remover gases dissolvidos em excesso (nomeadamente CO_2 e H_2S) e substâncias voláteis ou introduzir oxigénio (O_2) para a oxidação de compostos ferrosos ou manganésios [82, 93].

A Estabilização Química (Equilíbrio Calco-Carbónico) controla a alcalinidade da água. Sem este tratamento, os reagentes não efetuam os processos adequados da estabilização dos valores de pH, que devem estar nos 7 pontos. Geralmente, a água de origem subterrânea apresenta algum teor em anidrido carbónico (CO_2), o que lhe confere alguma acidez. Para esta correção, o agente regulador de pH utilizado é a água de cal (também chamado de óxido de cálcio " Ca(OH)_2) ou carbonato de sódio (Na_2CO_3). O controlo da alcalinidade da água deve ser feito antes da mistura rápida, uma vez que este é afetado pelo pH, o que, por conseguinte, afeta a dose de coagulante. Para determinar a dose de coagulante associada ao pH desejável para a água, deverão ser efetuadas análises de "jar-test" (Fig. 2.3 c). Este teste é obrigatório para encontrar a solução ótima no processo de floculação em diferentes níveis de pH, dependendo, também, de outros parâmetros, como, o tipo de filtro e dimensões inerentes [82, 83, 93].

A Coagulação-Floculação define-se tem por objectivo destabiliza e aglomerar micro partículas de natureza coloidal em flocos de maneira a serem separados por um processo de decantação. Este processo inclui, primeiro a dispersão das partículas através do agente coagulante (coagulação), e posteriormente a formação de flocos (floculação) [82]. A Coagulação é precedida por uma "mistura rápida", adicionando-se, neste processo, o coagulante sulfato de alumínio ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$), devendo este ser introduzido à entrada da mistura rápida, de modo a promover a formação de coágulos através da destabilização das partículas, seguida da sua agregação [93]. A Floculação, por sua vez, é chamada de "mistura lenta", injetando-se na caixa de saída da câmara de mistura rápida, polielectrólito, o qual permite promover a consistência do coágulo e diminuir a dose de coagulante adicionado de modo a aumentar a eficiência da captura deste sólido. A floculação permite formar flocos sobre os quais a maior parte das partículas em suspensão se vão aglomerar. Estes flocos são posteriormente separados da água, por decantação [23, 93]. A Decantação permite fazer a separação da fase líquida (água) da fase sólida (flocos). Este processo é conseguido devido à ação da gravidade que permite depositar no fundo de tanque as lamas sedimentáveis. Muitas vezes, este processo dirige-se especificamente ao tratamento da água bruta com problemas na turvação, cor, teor em ferro ou dureza [2, 82, 93].

A Filtração [Fig. 2.3 b) e d)] pode ser "rápida" ou "lenta", em função da velocidade utilizada. A primeira destina-se a elevados volumes de água, a segunda a pequenos volumes. Ambas têm como objetivo a remoção da turvação e da cor residual. O meio de enchimento dos filtros inclui, normalmente, areia e antracite, podendo, ainda, conter carvão activado, para eliminar o ferro (Fe) e o manganês (ou manganésio, Mn) e, eventualmente, azoto amoniacal e nitrato ainda presentes [82, 93].

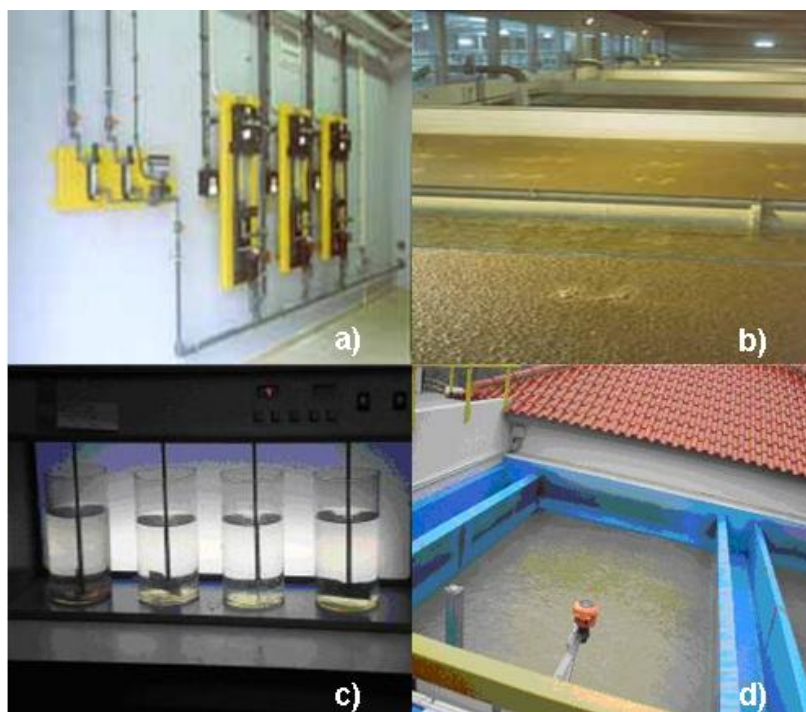


Fig. 2.3. a) Adição de cloro [78]; b) Flotação e Filtração [78]; c) Ensaio “JAR-Test” [24]; d) Tanque de filtração da ETA do Caldeirão [24].

Para uma correta filtração é ainda adicionado CAG, produzido para processos de controlo de oxidação, desenvolvido através de uma estrutura de poros, o qual, devido à sua grande superfície específica, tem um poder de adsorção muito grande para componentes químicos e biológicos e retém alguns poluentes orgânicos, como pesticidas (cuja eficiência de remoção é de 100%). Além de permitir eliminar fenóis e toxinas, elimina, também, substâncias que podem conferir odores e sabores desagradáveis à água [31, 82, 85, 93].

A Desinfecção tem como principal intenção garantir a qualidade bacteriológica desde a adução à distribuição. Esta é responsável pela eliminação de microrganismos patogénicos e outros organismos indesejáveis para o Ser Humano. A eficiência do desinfetante depende de fatores como a espécie e a concentração do organismo a ser destruído, assim como o desinfetante a utilizar, o tempo de contacto, características químicas (em especial o pH) e físicas da água a tratar. São conhecidos vários processos de desinfecção, desde tratamentos físicos por aplicações de radiações (UV), até químicos que usam agentes alcalinos, tensoativos ou oxidantes, destacando-se o cloro com uma solução de hipoclorito de sódio (NaOCl) [82, 93].

A Flotação, a Pré-oxidação e o Arejamento produzem resíduos de matéria orgânica, ferro e manganês, gases e substâncias voláteis, respetivamente. A Decantação gera as lamas que contêm as impurezas e reagentes utilizados no tratamento, nomeadamente matéria orgânica e inorgânica, metais pesados, pesticidas, oxidantes, coagulantes que não reagiram, sulfato de cálcio, cal e carbonato de cálcio [72, 78, 91].

O destino final preferencial das lamas tem sido os aterro sanitários. Contudo, as novas diretrizes europeias exigem alternativas para a disposição das lamas, para evitar a libertação de gases com efeito de estufa. A queima dos resíduos em fornos de cimenteiras também é muito restritiva e onerosa para as entidades gestoras. A opção da reutilização na agricultura, obras de aterro e construção. Uma das formas alternativa para o tratamento das lamas é a coincineração, i.e. são queimadas conjuntamente com outros resíduos. A valorização de qualquer tipo de resíduo passa pela valorização do produto existente ou pela criação de novo produtos ou subproduto (reciclagem) para o setor industrial [6, 35]. A redução das lamas em cinza de lamas levou alguns investigadores a analisarem as suas características físicas e químicas, concluindo que estas apresentam uma forte estrutura atômica de forma a ser trabalhada em conjunto com o cimento [36, 72, 76, 79]. É imprescindível a interatividade e a colaboração dos vários setores comerciais e centros de investigação para a valorização destes detritos [74].

2.3 - Características das lamas

A lama em estado bruto apresenta uma tonalidade antracite quando esta é desidratada e moída [Fig. 2.4 a e b)], tomando-se um material muito fino. As dimensões, média e máxima, das partículas têm, respetivamente, entre 17,84 e 100 μm , e o pH está acima dos 9 pontos [36, 74, 76, 81].



Fig. 2.4. a) Amostra das lamas no estado bruto; b) aspeto final das lamas secas e moídas.

O uso de coagulantes e oxidantes aumenta as percentagens destes compostos químicos nos resíduos (ver Quadro 2.1), como nos apresenta Pereira *et al.* (2007) , Rodríguez *et al.*(2009) e Gonçalves *et al.* [36, 76, 79]. Os compostos em regime maioritário são o sulfato de alumínio, ferro, hidróxido de cálcio, magnésio, sódio, sulfato de potássio, e o conteúdo mínimo (ver quadro 2.2) de substâncias químicas são o zinco, cádmio, cobre, chumbo, níquel e crómio [36, 72, 76]. Estudos comprovam, também, que existem cerca de 4% de produtos refratários [36]. Apresentam valores de humidade entre 75% a 82% e cerca de 35 por cento de perda ao fogo, parte devida à perda de matéria orgânica entre 6 a 25 por cento [36, 74, 75, 76].

Quadro 2.1. Distribuição em percentagem (%) dos maiores elementos químicos [36,76, 79].

Determinações		Gonçalves et al. [%]	Rodriguez et al. [%]	Labricha et al. [%]
Oxido Silício	SiO ₂	22,3	29,63	48,43
Óxido de Alumínio	Al ₂ O ₃	26	17,57	10,9
Óxido de Ferro	Fe ₂ O ₃	4,7	5,18	1,5
Óxido de Cálcio	CaO	38,3	11,85	1,22
Óxido de Magnésio	MgO	2,7	2,15	1,03
Óxido de Sódio	Na ₂ O	0,5	6,09	13,22
Óxido de Potássio	K ₂ O	1	-	0,59
Sulfatos	SO ₄ ²⁻	0,7	-	-

Quadro 2.2. Distribuição em percentagem (%) dos menores elementos químicos [36].

Determinações		Resultados	DL n° 152/2002
Zinco (mg/kg)	Zn	225	8000
Chumbo (mg/kg)	Pb	<45	2000
Cobre (mg/kg)	Cu	195	6000
Cádmio (mg/kg)	Cd	<5	50
Niquel (mg/kg)	Ni	53	2000
Crómio (mg/kg)	Cr	67	3000

As elevadas temperaturas provoca a criação de novos compostos minerais na lama. Uma lama sujeita a uma temperatura de 105°C apresenta como principais constituintes a gibsita (pedra de gesso, com designação química CaSO₄2H₂O). Quando a temperatura alcança valores em ordem dos 700°C (calcinação), surgem novos compostos como o Aluminato de Cálcio (C₃A) e do óxido de Cálcio (CaO), encontrados em recentes estudos [36, 76, 79]. Com o aumento da temperatura entre 700°C a 1000°C, a massa da lama vai diminuindo gradualmente devido à perda de matéria orgânica, carbono, água e hidróxidos, consequência da forte reação endotérmica na decomposição do sulfato de alumínio e do carbonato de cálcio [74, 76].

2.4 - Potenciais formas de utilização

As potenciais formas de utilização das lamas têm sido estudados através de parcerias entre o setor empresarial e os centros de investigação de forma a desenvolverem soluções mais sustentáveis e viáveis, no futuro, para este tipo de produtos.

As aplicações que já foram experimentadas na indústria da construção e saneamento ambiental são as seguintes:

1. Fabricação de tijolos normais e tijolos leves com aplicação de cinzas calcinadas a determinadas temperaturas. Muitos estudos foram feitos com lamas residuais calcinadas e cinzas de casca de arroz. Estas adições mostraram bons resultados para o fabrico deste tipo de material com cozeduras entre 1000°C a 1040°C, com uma adição entre 10% a 30% em relação ao produto base na confeção dos tijolos. Estas misturas foram feitas de forma binária ou ternária [11, 42, 50, 94];
2. Produção de produtos cimentícios tanto as lamas residuais como as lamas de ETA. Devido à grande superfície específica adsorvente das cinzas e a composição de compostos químicos integrantes, como é o caso da sílica e óxido de cálcio, comprovam que é possível substituir de 25 a 50 por cento a massa de cimento por estas adições em argamassas e betões [14, 33, 72, 76, 79];
3. Produção de produtos cerâmicos, na generalidade argamassas, constituindo uma real aposta para a valorização destes resíduos. O estudo feito por Pereira (2006) mostra que é uma alternativa em substituição de produtos não renováveis [74];
4. Produção de agregados leves ou agregados de material reciclado, através de lamas industriais e lamas de ETA, para a redução do peso do edifícios e baixar a condutibilidade térmica [74, 81, 90];
5. Reaproveitamento de alguns agentes químicos utilizados no processo de purificação de águas [47].

Capítulo 3- Caracterização das argamassas auto-compactáveis

3.1 - Introdução

Neste capítulo, abordam-se os principais aspetos da bibliografia inerente à caracterização das argamassas auto-compactáveis.

O conceito de auto-compactabilidade surgiu com a investigação realizada no Japão em 1986 da autoria do Prof. Hajime Okamura [66, 67]. Este estudo resultou em consequência da redução da mão-de-obra especializada no Japão para efetuar os trabalhos de compactação do betão vibrado e da necessidade de assegurar a durabilidade das estruturas de betão devido às grandes solicitações sísmicas que são uma constante nessa região [66]. Nesse sentido, Okamura preconizou um novo tipo de betão, designado actualmente de betão auto-compactável, capaz de assegurar uma boa compactação do betão sem necessidade de trabalhos de vibração.

Segundo a metodologia proposta por Okamura, o betão auto-compactável (BAC) pode ser encarado como um material constituído por uma matriz formada pela argamassa e os agregados grossos imersos nessa matriz. As propriedades da matriz cimentícia controlam a deformabilidade e a coesão da pasta ligante [8, 17].

O método mais importante para alcançar a auto-compactabilidade é através da deformabilidade da pasta ligante, analisada pela razão entre a água e adições de finos e a dosagem de superplastificante. Normalmente, os parâmetros são estudados pelas argamassas, pois oferecem a vantagem de conciliarem um menor volume de material assim como um menor número de variáveis que irão refletir-se no número de parâmetros na medição, tomando, assim, o ensaio mais simplificado e preciso [58, 61, 66, 71].

Uma argamassa auto-compactável deve ser entendida no âmbito do presente trabalho como uma argamassa com as propriedades reológicas adequadas à obtenção de betões auto-compactáveis. Genericamente, pode-se definir como um material capaz de preencher os espaços vazios e se auto-adensar sobre o efeito da gravidade e da sua própria capacidade de escoamento, possuindo, portanto, uma alta fluidez com grande mobilidade e moderada viscosidade e coesão [39, 68, 95].

Para que as características reológicas das argamassas sejam aceitáveis, os materiais constituintes devem obedecer a uma rigorosa análise, desde física, química e proporcional na mistura escolhida. Os agregados finos apresentam uma dimensão máxima inferior a 4 mm e devem possuir uma adequada distribuição granulométrica. O volume da pasta cimentícia é

normalmente elevado para reduzir o atrito interno entre as partículas da areia [17, 45, 71, 87].

São também usados vários tipos de aditivos químicos de modo a promoverem uma adequada trabalhabilidade. Esses aditivos podem ser líquidos ou em adições de finos, no entanto, os mais utilizados são os superplastificantes com capacidade de retenção de água e adições de finos para promoverem maior coesão e viscosidade à mistura [39, 45, 68].

As adições de finos são normalmente inferiores a 0,125 mm e devem ser incluídas na pasta de cimento para serem tidas em conta no cálculo da razão água/finos. Salienta-se o caso das adições de fíler calcário pela boa retenção do calor de hidratação que este material possui, melhorando a retração das estruturas, e das cinzas volantes por serem um resíduo industrial, mostrando que a incorporação deste material promove uma maior resistência devido ao seu alto teor de sílica e aluminato de cálcio [51, 80, 98, 99]. Os constituintes químicos das cinzas volantes são também importantes para a formação da pozolana artificial quando misturados com o cimento onde reagem com os compostos químicos formando estruturas mais fortes [14, 58, 89].

As lamas de ETA em estudo são tidas como uma boa candidata para adição de finos neste tipo de argamassas. Constata-se, também, na bibliografia consultada, que aciona uma melhor trabalhabilidade, sendo os seus elementos químicos maioritários a sílica e o aluminato de cálcio, responsáveis pelas propriedades pozolânicas numa mistura, em vez de serem inertizantes [36, 76, 79].

3.2 - Seleção e caracterização dos materiais

Neste subcapítulo abordar-se-ão as principais características que os materiais constituintes devem possuir para a produção das argamassas conducentes à obtenção de betões auto-compactáveis. Ainda que estas argamassas não sejam de todo exigentes com uso de materiais especiais ou incomuns, elas exigem algumas propriedades específicas, que, em certos aspetos, se não forem aplicadas com rigor, podem ocasionar problemas no produto final (estado endurecido) [66].

3.2.1 - Ligantes

O Cimento Portland define-se como sendo um ligante hidráulico constituído por pós muito finos que amassados com a água formam uma pasta cujo endurecimento se dá apenas pela reação química entre o pó e água. Estes ligantes têm o poder de aglomeração de uma determinada proporção de materiais inertes, como areias, godos, entre outros, conferindo coesão e resistência, tornando-se, assim, um material com elevada importância na construção

como argamassas e betões [13]. Em conformidade com a Norma NP EN 197-1, a escolha do cimento Portland é indicada para a efetuação de argamassas [13, 62, 65].

Nos BAC e argamassas auto-compactáveis, recomenda-se que o cimento seja de baixo calor de hidratação. O cimento Portland rico em belite (designado também por silicato bicálcico, C_2S) é o mais indicado, contudo, podem existir pequenas oscilações na quantidade deste elemento devido à sua fabricação e ao tempo de acomodação do material. Portanto, o princípio da auto-compactabilidade é determinado pelo grau de exigência das avaliações antecedentes feitas aos materiais [58].

3.2.2 - Adições minerais

A adição mineral é um material muito fino e inorgânico que é introduzido na mistura a fim de melhorar ou atingir determinadas propriedades especiais. Através da norma EN 206-1 as adições dividem-se em dois tipos: adições inertes (Tipo I) e adições pozolânicas ou hidráulicas latentes (Tipo II) [29, 65].

As adições do Tipo I são materiais quimicamente inertes quando na sua forma de pó são atacadas pela cal e pelos alcalis libertados durante a hidratação do cimento Portland, que, com o passar do tempo, favorece a resistência mecânica, a permeabilidade e a resistência química, devido a elementos presentes neste material, como, por exemplo, material silicioso [60]. Para além disso, acionam o elevado volume da pasta cimentícia, paralelamente, ajuda a reduzir o atrito interno entre as partículas de areia. A distribuição de tamanho do grão é ainda muito importante, porque dela depende do grau de finura, distribuição e tamanho das partículas. Contudo, causa uma diminuição da resistência mecânica, quando parte do cimento é substituída [17, 54, 80]. Todavia, experiências com fíler calcário, com tamanho das partículas até 10 μm , levaram a valores de resistência à compressão mais altos [6, 43, 75, 96].

As adições do Tipo II, são consideradas materiais pozolânicos ou hidráulicos latentes, manifestando-se deste modo com uma maior superfície específica do que o componente que está a substituir (normalmente, referem-se ao cimento, o produto a ser substituído). Deste modo, também são responsáveis pela coesão da mistura devido ao tamanho das partículas comparado com o do cimento [30, 95].

A influência das adições minerais nas propriedades da mistura no estado fresco é significativamente maior que nos agregados. As frações de tamanho de partículas inferior a 0,125 milímetros devem ser incluídas na pasta de cimento e devem ser tidas em conta no cálculo da razão água/finos. As partículas de materiais com dimensões menores do que 0,125 mm, além de incluírem todas as adições minerais, também incluem agregados finos e cimento [86]. Experiências efetuadas recentemente têm tomado por princípio básico a exclusão de

eventuais finos de partículas de dimensões inferiores a 0,125 mm que estão presentes nos agregados. Estes estudos revelaram não serem o principal fator nas mudanças dos parâmetros reológicos [60].

Os parâmetros reológicos são afetados quanto à sua trabalhabilidade, quando a mesma quantidade de água é usada sem adições minerais. Autores reportaram em estudos das cinzas de lamas de ETAR que o incremento aumenta ou diminui a razão de água/finos com a trabalhabilidade, da qual depende a quantidade dessa adição utilizada. Outros autores também comprovaram que quanto maior for a superfície específica, maior é a tendência para melhores resultados à compressão [14, 75].

3.2.2.1 - Fíler calcário

A Norma Portuguesa NP-ENV206 classifica o fíler Calcário como uma adição de finos do tipo I. Esta adição é composta por adições minerais como pó de pedra ou caulinita [65].

Um dos maiores exemplos do bom desempenho do fíler de calcário foi presenciado na ancoragem da ponte de Akashi Kaikyo. Trata-se de uma obra em que as oscilações térmicas são bastante frequentes o que implicava a problemática da retração, bastante melhorada com a adição de fíler calcário. Este tipo de adição inibe o calor de hidratação na mistura responsável por este problema quando as quantidades de betão são grandes [58]. Além destas vantagens, melhora as condições de trabalhabilidade, induzindo menor segregação, necessárias para a auto-compactabilidade, devendo-se ao facto de o fíler calcário não participar nas reações químicas, aumentando o volume de finos na pasta. Contudo, tem um papel crucial na aceleração da cura durante o início da hidratação do cimento [58, 60, 80]. Outro estudo realizado comprovou que o betão vibrado com a mesma razão água/cimento mostrou deter menores valores de resistência relativas às do BAC com este tipo de adição [99].

3.2.2.2 - Cinzas de Lamas de uma ETA

As atividades de filtração/clarificação de água para o consumo humano geram um elevado volume de resíduos sólidos. Este material consiste basicamente em hidróxido de cálcio, sulfato de alumínio, alguma calcite e areia e apresenta, normalmente, um teor de humidade acima de 80 por cento. Este tipo de material também apresenta um índice de matéria orgânica em média de 25 por cento e o tamanho máximo da partícula é de cerca de 100 µm [36, 76, 79].

Através dos casos de estudo para os resíduos de ETARs, uma das formas de rentabilização destes materiais para o seu destino final é a incineração. Quando queimados, estes compostos tomam-se fonte de minerais que através de uma análise química detalhada reportam boas bases para a indústria da construção [7, 79].

Através dos estudos realizados às lamas de ETAR e à comparação com as lamas de ETA, foram relatados problemas com alguns compostos que fazem parte destes resíduos, como é o caso da matéria orgânica e do carbono. Estes constituintes podem interferir na resistência das argamassas, mas, porém, o alto teor de cálcio satisfaz a alcalinidade do sistema, sendo este parâmetro importante para a trabalhabilidade da mistura. Outras características foram salientadas, como, por exemplo, os compostos químicos com capacidades pozolânicas [36, 76, 79]. Estas características promovem desta maneira as lamas de operações de filtração de água potável numa aliada candidata à alternativa mineral para a fabricação deste tipo de argamassas auto-compactáveis ou BAC.

3.2.3 - Agregados

Agregado designa-se como sendo um material mineral granular adequado para a utilização em misturas de argamassas e betões. Os agregados podem ser naturais, artificiais ou reciclados de materiais previamente usados na construção [65]. Normalmente, os agregados de massa volumica normal detêm valores que, após secagem em estufa, são maiores que 2000kg/m^3 e menores que 3000kg/m^3 [65].

Os agregados têm uma influência significativa nas propriedades reológicas e mecânicas das argamassas e betões. A superfície específica, a distribuição das partículas, a forma e a textura, influenciam as propriedades das misturas no estado fresco e endurecido [30].

A componente principal associada aos agregados é vista através da resistência à compressão e como o esqueleto principal da matriz cimentícia [48, 75]. Todavia, é referido que a resistência de compressão é devida à natureza da pasta e não está ligada propriamente ao volume e natureza do agregado, vindo este último para segundo plano [48].

3.2.3.1 - Agregados finos

Os agregados finos incluem geralmente areias naturais de diferentes naturezas e de diversas formas de obtenção, cuja máxima dimensão não ultrapassa os 4 mm. Em muitas situações, as partículas mais finas das areias abaixo de determinada dimensão são consideradas como materiais finos. Nesses casos, os agregados finos passam a ser definidos como partículas sólidas no betão com dimensão compreendida entre o valor de referência para as partículas finas e a máxima dimensão das partículas de areia. No Japão, as partículas mais pequenas que 0,09 mm não são consideradas agregados. Tem havido um desentendimento por parte da transição de agregado fino para adição de finos, porém, o valor atribuído a essa divisão é de 0,125 mm na Europa [58, 86, 89].

Todas as recomendações usualmente estabelecidas para areias de betões correntes vibrados devem ser aplicadas às areias utilizadas em betões e argamassas auto-compactáveis. Tal como sucede nas argamassas, é recomendada uma granulometria contínua com uma boa

distribuição entre as partículas finas e mais grossas. Os agregados finos devem ter a menor granulometria possível, sendo interessante utilizar curvas granulométricas contínuas, que ajudariam na compacidade e resistência final das misturas [60, 61, 95].

Nas argamassas é necessária a otimização da quantidade de agregados inseridos na pasta, não ultrapassando em média os 40 por cento do total do volume. A classificação (ver quadro 3.1) é feita através do módulo de finura e do tipo de agregado fino. A fluidez no BAC varia consoante a forma, a absorção e a classificação do agregado fino. Porém, este tipo de mistura tem sido desenvolvido a fim de melhorar a variedade da fluidez da base de finos nas misturas [58].

Quadro 3.1. Propriedades dos agregados finos [58].

Tipo	Massa Volúmica [Kg/m ³]	Módulo de Finura	Absorção [%]
Areia do Rio	2590	2,9	1,2
Areia do Solo	2710	2,18	1,01
Mistura de Areia do Rio e do Solo	2660	2,54	1,28
Areia do Mar	2580	2,84	1,4

3.2.4 - Adjuvantes

A Norma Portuguesa NP ENV206 define adjuvante como um material, que, adicionado durante o processo de mistura do betão ou das argamassas, em quantidades reduzidas em relação à massa do cimento, modifica as propriedades do betão fresco ou endurecido. Porém, quando a quantidade é superior a 5 por cento, já não se engloba no grupo de adjuvantes mas sim no grupo de adições minerais. Os adjuvantes são consideradas pequenas porções minerais que modificam de maneira eficaz as misturas das argamassas e betões [13, 65].

Comercialmente, são fornecidos em pó ou em líquido. Os pós podem ser adicionados ao cimento ou, de preferência, ao inerte; se forem solúveis devem ser dissolvidos na água da amassadura quando o inerte já estiver saturado de água. Os adjuvantes líquidos não devem contactar com o cimento diretamente [13].

O principal tipo de adjuvante que usualmente é utilizado na preparação das argamassas auto-compactáveis é o superplastificante ou redutor de água de alta gama. A principal característica que este detém é a capacidade para reduzir substancialmente o teor de água da mistura. A obtenção da razão água/cimento mais baixa resulta num aumento significativo da durabilidade, induzido por uma permeabilidade significativamente baixa da mistura. A

utilização de composições mais económicas constitui uma outra opção, verificando-se que a otimização gera composições mais ecológicas, mantendo a qualidade do betão constante [9].

Os adjuvantes redutores de água podem ser agrupados em três grupos de Linhossulfonatos de sódio ou de cálcio ou Policarboxilatos. Estas novas substâncias permitem reduzir cerca de 20 a 30 por cento da razão água/cimento para trabalhabilidades iguais sem influências no processo de hidratação. Outros estudos comprovam que os superplastificantes de base de longos polímeros poliboxilatos, de cadeias laterais permitem reduzir a quantidade de água até 40 por cento. Este tem levado para o desenvolvimento muito baixo da razão de W/C nos betões [38, 58].

3.2.4.1 - Superplastificante

O superplastificante mais usado para misturas auto-compactáveis tem sido o de base policarboxilatos. Este tipo de adjuvante oferece uma maior dispersão das partículas, comparado com os aditivos com agentes sulfonato de naftaleno, embora a sua absorção seja consideravelmente baixa [58]. Outras vantagens de que o superplastificante é responsável é a redução no volume total de poros que leva, assim, a um refinamento das estruturas dos diâmetros dos poros, isto é, só é conseguido quando existe uma adequada dosagem na mistura [44].

As desvantagens deste aditivo são praticamente nulas relativamente às vantagens que apresenta numa mistura. Segundo a SIKA Viscocrete, a principal característica da tecnologia dos superplastificantes à base dos éteres policarboxilatos está ligada com a forma com estes polímeros foram desenhados para a obtenção de propriedades na mistura. Estas características podem ser influenciadas nos seguintes aspetos [9]:

1. Velocidade de adsorção
2. Redução da água com plastificação/trabalhabilidade inicial alta.
3. Manutenção da consistência sem retardamento e subsequente desenvolvimento rápido de resistências
4. Desenvolvimento de resistências iniciais com a obtenção da trabalhabilidade ideal
5. Aspeto
6. Estabilidade/Viscosidade

Os polímeros são constituídos por uma cadeia principal com grupos carboxilo e cadeias laterais. O primeiro componente da cadeia principal no grupo carboxilo é responsável pela redução de água inicial e tempo de mistura alcançável no escoamento (Fig. 3.1). O segundo componente - cadeias laterais - determina a capacidade de manutenção da consistência do superplastificante através do aumento do número de cadeias laterais. O fator crucial é o espaço limitado para grupos carboxilo e cadeias laterais ao longo da estrutura. Esta limitação

tecnológica detém três tipos diferentes de polímeros com capacidade para reduzir água, controlar e manter a consistência da mistura [9].

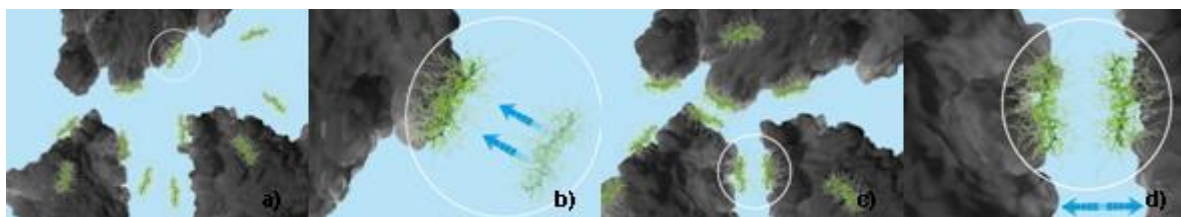


Fig. 3.1. a) Adsorção do polímero (estrutura) pelo grão de cimento; b) Pormenor da adsorção do polímero (estrutura) pelo grão de cimento; c) Trabalhabilidade melhorada devido à repulsão estérica; d) aumento da trabalhabilidade devido à repulsão estérica [9].

A taxa de absorção do superplastificante no cimento varia de acordo com a temperatura na mistura. Particularmente, a baixas temperaturas, a taxa de adsorção é retardada consideravelmente, pois há uma tendência para a fluidez aumentar com o tempo. Mesmo quando a quantidade de finos é grande, a velocidade da mistura diminui, portanto os aumentos da fluidez com o tempo são semelhantes em presença de baixas temperaturas [58].

3.3 - Caracterização físico-química dos materiais

A caracterização Físico-química é fundamental para uma correta avaliação das propriedades das argamassas. Estas só serão otimizadas quando as reações físicas e químicas dos materiais se efetuarem de maneira eficaz. Para isso, é importante analisar todos os parâmetros na família das argamassas, desde o tamanho da partícula para uma correta hidratação, à curva granulométrica dos agregados e adições de finos para promoverem uma determinada compacidade até aos elementos químicos que são significativos nas reações que ocorrem na análise da trabalhabilidade à fase de cura das argamassas.

Fisicamente, as propriedades de fabricação do cimento em pó mudam drasticamente na presença de outros componentes quando são misturados. A maior superfície específica do material aumenta as reações que este apresenta com a água na fase de hidratação e a velocidade implícita no processo de cura [12, 13].

Existem efetivamente partículas que hidratam mais depressa, uma vez que contribuem mais que outras na presença de certos componentes químicos. Uma má hidratação deve-se, principalmente, ao facto da composição química das partículas não ser uniforme [13]. A hidratação dos compostos cimentícios produz vários tipos de estruturas quando estas partículas estão presentes na água. Estas formam hidratos que se organizam numa estrutura resistente. Os vários compostos químicos formados são o silicato tricálcico (C3S), o silicato bicálcico (C2S), o aluminato tricálcico (C3A), o aluminoferrato tetracálcico (C4AF) e o sulfato de cálcio (CS) [12, 13, 58, 95].

Tal como os elementos químicos são significativos para o cimento, a eficiência do superplastificante só é determinante com a presença do teor de aluminato tricálcico. Este composto é o principal componente do cimento que adsorve o superplastificante, mas também desenvolve a etringite, responsável pelo calor de hidratação. Quando existem quantidades de sais de ácidos linhosulfônico ou de hidroxicarboxílicos presentes em alguns superplastificantes, estes impedem as reações de hidratação, comprometendo o estado de endurecimento nas argamassas [13, 34, 58].

As combinações químicas são responsáveis pela correta dispersão do superplastificante e das adições minerais. As que mais se destacam são o aluminato tricálcico e o linhosulfonato de cálcio as quais neutralizam as cargas iônicas e impedem a dispersão das partículas coloidais. A adsorção é diferente no caso dos aluminatos e dos silicatos, isto é, a uma oscilação considerável da carga superficial corresponde uma fraca dosagem do adjuvante para o caso dos silicatos tricálcico e bicálcico, podendo levar a um escoamento que vai sendo reduzido com o tempo, devido a uma reação química que é fruto da hidratação do cimento. Para uniformizar este decréscimo na fluidez, a mistura deve ser completada faseadamente com o total do superplastificante quando está a ser preparada [34, 58, 60].

De um modo geral, estas reações promovem a fluidez das argamassas auto-compactáveis, conseguidas, basicamente, pela dispersão das partículas de cimento através da adição de aditivos (superplastificantes) e adições minerais. O fator químico que afeta a fluidez inclui a influência da interação dos compostos atômicos dos elementos materiais [58].

Sintetizando, estas análises são importantes para a comparação das argamassas de cinzas de lamas de ETAs, no entanto, são poucos os casos de estudo relativos a estes resíduos.

3.3.1 - Ensaio físicos e químicos

Os ensaios com maior relevância para estes materiais anteriormente expostos são: o Ensaio da Massa Volúmica (adições e agregados), a granulometria das partículas (agregados finos e adições), a Absorção de água (agregados finos), a análise dos principais constituintes atômicos e químicos (adições de cinzas de lamas nos vários estados de calcinação).

A massa volúmica é uma propriedade necessária na adequação do método de Nepomuceno nas argamassas. A massa volúmica é determinada através do “densímetro” de Le Châtelier. O líquido utilizado é a gasolina ou o petróleo, para o caso das adições finas, e a água para os casos dos agregados finos [13, 59]. O conhecimento da massa volúmica como grandeza permite, assim, detetar a possível existência de material inerte no cimento sendo a massa volúmica do cimento superior a $3,0 \text{ g/cm}^3$, a do inerte entre $2,6$ a $2,7 \text{ g/cm}^3$ e as adições de lamas têm em média $2,2 \text{ g/cm}^3$ [13, 79].

A granulometria designa-se como sendo a forma de distribuição percentual das partículas de diferentes dimensões que compõem o agregado [59]. A caracterização granulométrica de agregados e de adições de finos é diferente. Os agregados são analisados através de peneiros com diferentes diâmetros de malhas e as adições minerais são feitas através de um aparelho de tecnologia com difração a raios laser [19, 55]. Para os agregados, a dimensão de uma partícula é delimitada pela abertura de uma malha com forma determinada, através da qual ela passa, ficando retida numa malha idêntica de menor abertura. Os dois parâmetros que assim definem a curva granulométrica são a forma de abertura da malha e a diferença entre as aberturas de duas malhas consecutivas [19].

Para que se possa proceder à análise de partículas de pequenas dimensões, são cruciais três elementos: reflexão, refração e difração [13, 55]. Para a análise das partículas é utilizado um feixe, que depois de ter atravessado a suspensão dos grãos colocados aleatoriamente, e em grande número, encontra uma objetiva destinada a formar a Fig. de difração, no seu plano focal, onde está colocada uma tela ou quadro opaco, munido de pequenas aberturas para análise. Estas aberturas são setores de coroas circulares, muito pequenas na vizinhança do centro e maiores à medida que se afastam dele [13]. Colocando atrás de cada abertura um fotómetro, obtém-se a intensidade luminosa incidente nesse ponto, intensidade que é diretamente proporcional ao número de grãos vistos pela luz. Variando a dimensão da janela, a intensidade é também inversamente proporcional ao diâmetro dos grãos vistos pela luz. A medição da intensidade luminosa pode fazer medições de 0,4 μm a 2000 μm . A leitura desta análise é feita através de um programa instalado no computador [13, 55].

Os ensaios químicos e atômicos não seriam possíveis sem uma ferramenta imprescindível: o Microscópio Eletrónico de Varrimento (MEV). As vantagens da técnica de difração de raio-X para a caracterização de fases destacam-se pela simplicidade e rapidez do método [3, 12].

A microscopia eletrónica de varrimento permite caracterizar a complexa microestrutura de um elemento, a várias escalas, devido à sua elevada resolução espacial ($\sim 1 \mu\text{m}$) e à extensa gama de ampliações ($\sim 20\times$ até $100000\times$) disponíveis. Adicionalmente, uma vez que a maioria dos instrumentos estão equipados com espectroscopia de dispersão de energia de raios X (EDX), é também possível em áreas da imagem com menos de $1 \mu\text{m}$ de diâmetro [12].

As reproduções de imagens são formadas por um feixe de eletrões. Este feixe, gerado na parte superior do microscópio, descreve uma trajetória helicoidal através de campos de lentes eletromagnéticas, onde é focado, até incidir na superfície da amostra, “varrendo-a”. A interação deste feixe com volume de interação, que nos materiais cimentícios apresenta diâmetros típicos na casa dos 1-2 μm , conduz à ejeção de eletrões e à emissão de radiação detetáveis. Os sinais utilizados na análise da microestrutura das amostras são os eletrões secundários, os eletrões retrodifundidos e os raios-X característicos. Em função do modo operacional selecionado no microscópio, são usados detetores específicos para cada tipo de

sinal, que é subseqüentemente amplificado e enviado para um ecrã CCD onde é formada a imagem rasterizada. A detecção dos raios-X emitidos permite obter informação sobre a composição química local. Adicionalmente, é possível obter mapas de distribuição dos elementos químicos respetivos [3, 12].

3.4 - Caraterização das argamassas

A argamassa é uma mistura balanceada de vários componentes diferentes (agregados finos, ligantes, adições, adjuvantes e água). Neste caso, como se trata de um tipo de argamassa com vista ao estudo de parâmetros, que se espera serem usados posteriormente, na obtenção de betões auto-compactáveis, esta é caraterizada, segundo a EMODICO, como aquela que compreende agregados com dimensões inferiores a 4 mm [17, 56, 87].

Numa composição de argamassa, diversos materiais têm as suas funções. O componente agregado assegura a função de carga para a deformação do corpo do produto. Os ligantes têm a função de atribuir coesão e resistência à mistura. As adições e os adjuvantes são materiais orgânicos ou inorgânicos adicionados para controlar ou modificar as caraterísticas da argamassa no estado fresco e/ou endurecido, atuando, principalmente, sobre a fração cimentícia [5, 48, 54, 76].

3.4.1 - ETAPA I: Estudo da composição das argamassas

A primeira proposta para as propriedades reológicas das argamassas conducentes à obtenção de betões auto-compactáveis foi apresentada por Okamura *et al.* [71]. Os valores considerados “ótimos” na proposta de Okamura correspondiam a uma área de espalhamento relativa (Gm) de 5 e uma velocidade relativa de escoamento (Rm) de 1 s^{-1} . Outros autores propuseram um intervalo de variação admissível para estes parâmetros em vez de um único par de valores. Por exemplo, Nepomuceno refinou a área “alvo”, permitindo maior facilidade no alcance dos parâmetros corretos da reologia nas argamassas [60, 61, 66, 69, 71, 89].

Em termos práticos, o parâmetro Gm representa a capacidade de deformação da argamassa e o parâmetro Rm representa a sua velocidade de deformação. Mediante determinadas condições do escoamento (ausência de segregação e bloqueio da mistura no Funil-V), os parâmetros Gm e Rm apresentam uma boa correlação com os parâmetros reológicos, respetivamente, tensão de corte e viscosidade plástica [67, 71].

Os valores responsáveis pelo controle das propriedades ótimas nas misturas são: Vp/Vs, Vw/Vp e Sp/P%. O parâmetro Vp/Vs é a relação em volume entre a dosagem de materiais de finos e a dosagem de agregados finos. Este parâmetro tem como principal função controlar a razão de materiais independentemente da dosagem de água e do superplastificante inserido na mistura. O parâmetro Vw/Vp é a relação em volume absoluto entre a dosagem de água e a dosagem de materiais finos. Por último, Sp/P% é a relação em percentagem entre a dosagem

em massa do superplastificante e a dosagem em massa de materiais finos. A quantidade de materiais finos contidos pelos agregados finos foi desprezada neste método. A denominação utilizada para definir uma determinada associação de materiais finos foi a “família de finos” [60, 61, 66, 69, 71].

3.4.2 - ETAPA II: Argamassas no estado fresco

Terminado o balanceamento que requer cada material, passa-se à produção da argamassa. A amassadura é influenciada pelo modo como ela é controlada. O tempo de amassadura em consonância com a fase de introdução do superplastificante nas misturas é um dos fatores a considerar e que pode influenciar as propriedades no estado fresco.

As propriedades reológicas das argamassas, tensão inicial de corte e viscosidade plástica, podem ser avaliadas indirectamente e de forma expedita através, respectivamente, dos ensaios de espalhamento (cone de espalhamento) e de fluidez (funil-V). No ensaio de espalhamento mede-se o diâmetro médio de espalhamento (D_m), enquanto no ensaio de fluidez se mede o tempo de escoamento da argamassa num funil de faces planas e paralelas (t). As dimensões destes equipamentos podem ser consultadas nas Figuras 3.2 e 3.3. [61, 67].

3.4.2.1 - Ensaio de espalhamento

O ensaio de espalhamento em argamassas foi redesenhado e recalculado a partir do modelo do “Slump” dos betões. Este aparelho de ensaio é um cone de menores dimensões em relação aos modelos usados no betão. As medidas padrão são apresentadas na Figura 3.2.

O procedimento de ensaio será exposto no capítulo seguinte. Os diâmetros são medidos em duas direcções perpendiculares entre si (d_1 e d_2) e calcula-se o seu valor médio (D_m), base importante neste ensaio [60, 66, 69, 71, 89].

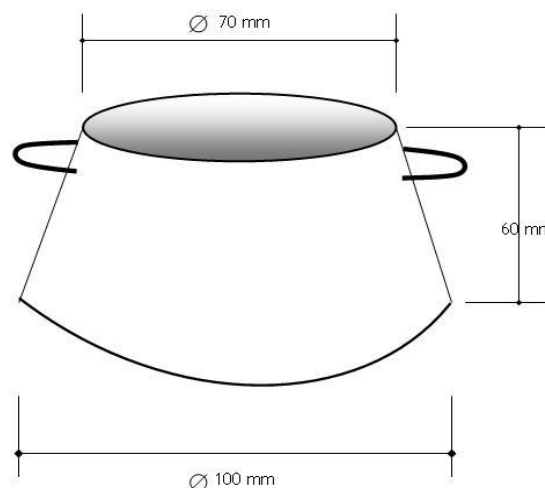


Fig. 3.2. Principais medidas do “cone de espalhamento”.

A equação proposta no método de Okamura et al. para determinar a área relativa de espalhamento das argamassas (G_m) é a que a seguir se apresenta (Equação 3.1) [66, 71]:

$$G_m = (D_m/D_0)^2 - 1 \quad (3.1)$$

Sendo:

D_m , valor médio do diâmetro de escoamento, em mm;

D_0 , diâmetro inicial da base do cone de espalhamento, em mm;

G_m , área relativa de espalhamento.

3.4.2.2 - Ensaio de fluidez

O ensaio de fluidez é realizado num funil de faces planas e paralelas. As dimensões interiores destes equipamentos são indicadas na Fig. 3.3 [66, 69, 71, 89].

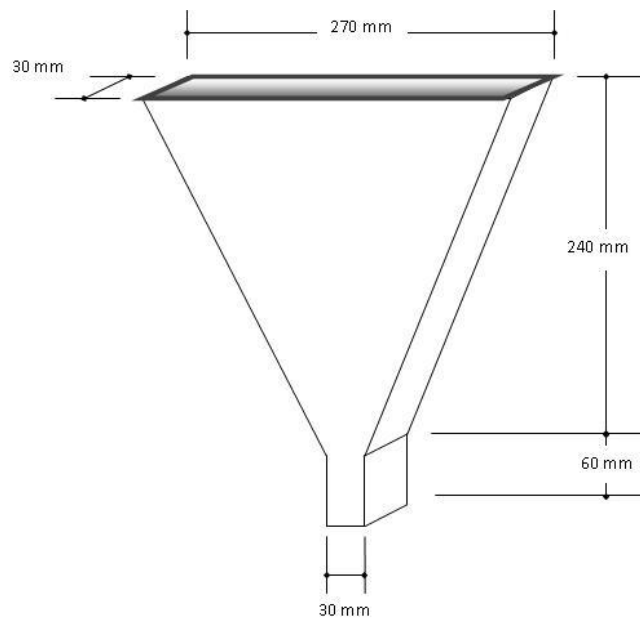


Fig. 3.3. Principais medidas do “Funil-V”.

O procedimento de ensaio será descrito no próximo capítulo. A velocidade relativa de escoamento da argamassa (R_m) proposta no método de Okamura *et al.* é calculada segundo a Equação 3.2, que a seguir se apresenta [66, 71]:

$$R_m = 10/t \quad (3.2)$$

Sendo:

t, tempo de escoamento no funil, em segundos,

Rm, velocidade relativa de escoamento, s-1.

3.4.2.3 - Definição do comportamento reológico pretendido

O par de valores de Gm e de Rm preconizados por Okamura *et al.* (Gm=5 e Rm=1) são identificados a vermelho na Fig. 3.4. Na mesma Fig. apresenta-se o intervalo de variação desses parâmetros proposto no método de Nepomuceno. No método de Nepomuceno Gm pode estar compreendido entre 5,3 e 5,9, enquanto Rm poderá variar entre 1,14 e 1,30 s-1, a que correspondem, respetivamente, valores de Dm entre 251 e 263 mm e de t entre 7,69 e 8,77 s [60, 61, 66, 71].

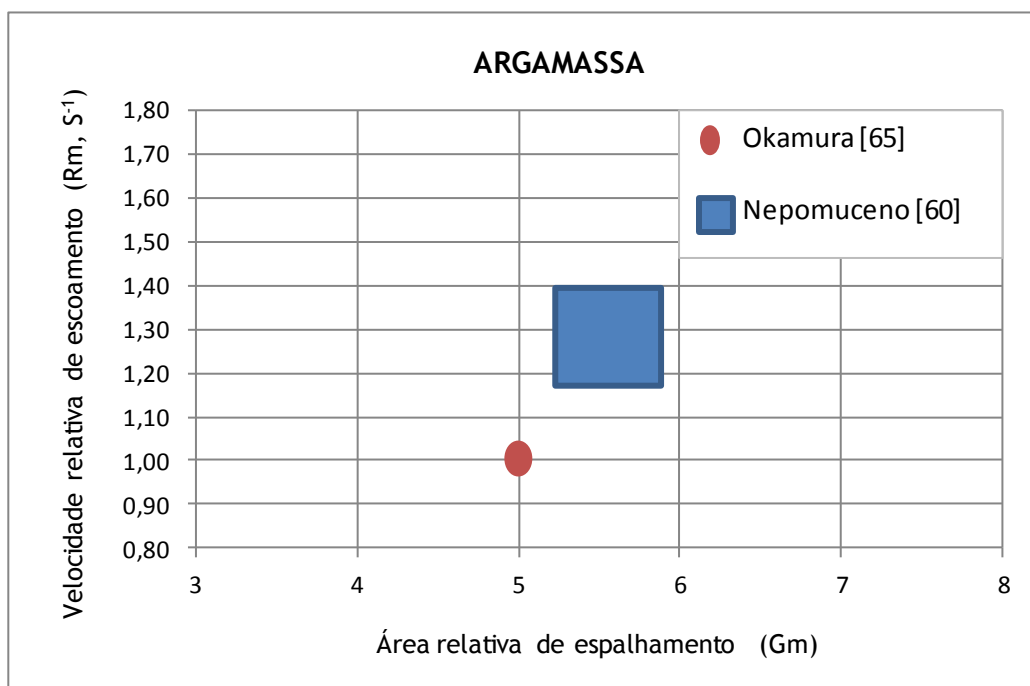


Fig. 3.4. Intervalo de variação dos parâmetros reológicos adotados [60, 66].

A Figura 3.5 apresenta esquematicamente as variações no comportamento reológico da argamassa, expressos indirectamente em termos de Gm e Rm, quando se alteram os parâmetros Vw/Vp e Sp/P%. A optimização das propriedades de escoamento das argamassas requer a coordenação entre os dois parâmetros Vw/Vp e Sp/P%. A Figura 3.6 ilustra esquematicamente o efeito que a alteração de Vw/Vp introduz no comportamento reológico da argamassa, quando Sp/P% permanece constante. A situação inversa é ilustrada na Fig. 3.7, neste caso com Vw/Vp constante [60, 61].

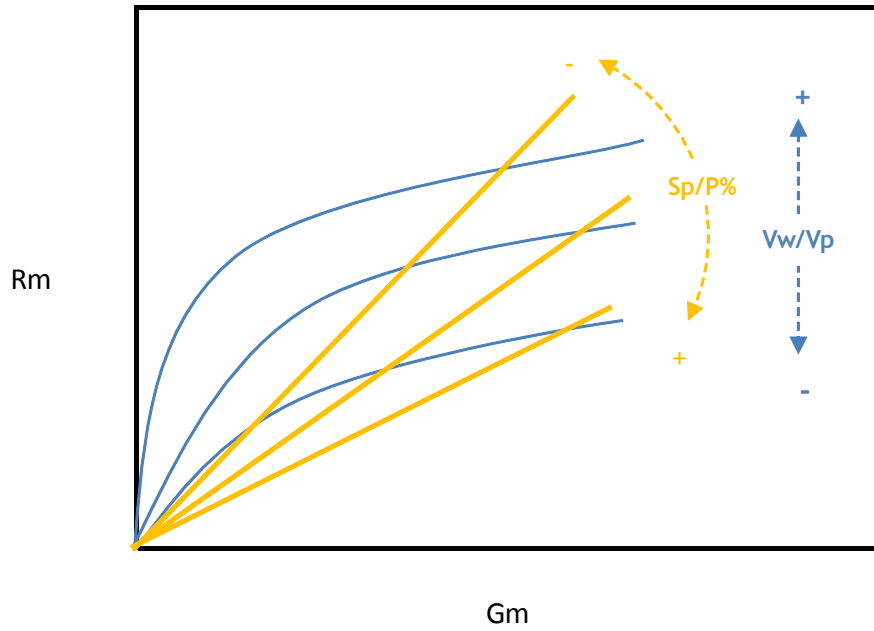


Fig. 3.5. Variação dos parâmetros reológicos adotados $Sp/P\%$ e Vw/Vp [60].

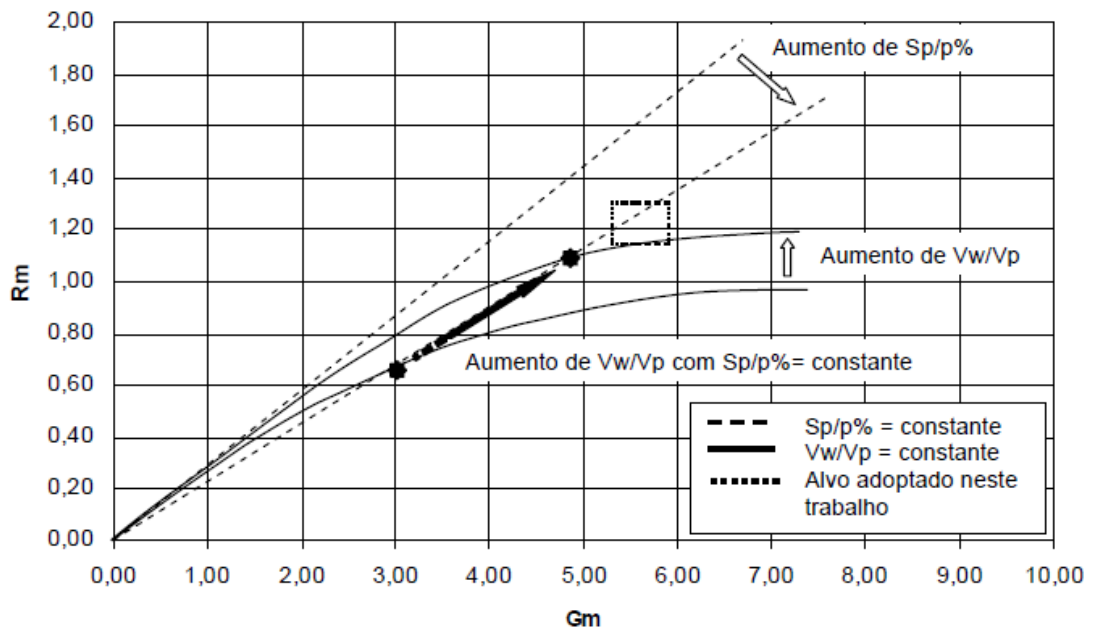


Fig. 3.6. Alteração na reologia com o aumento de Vw/Vp mantendo $Sp/P\%$ constante [60, 61].

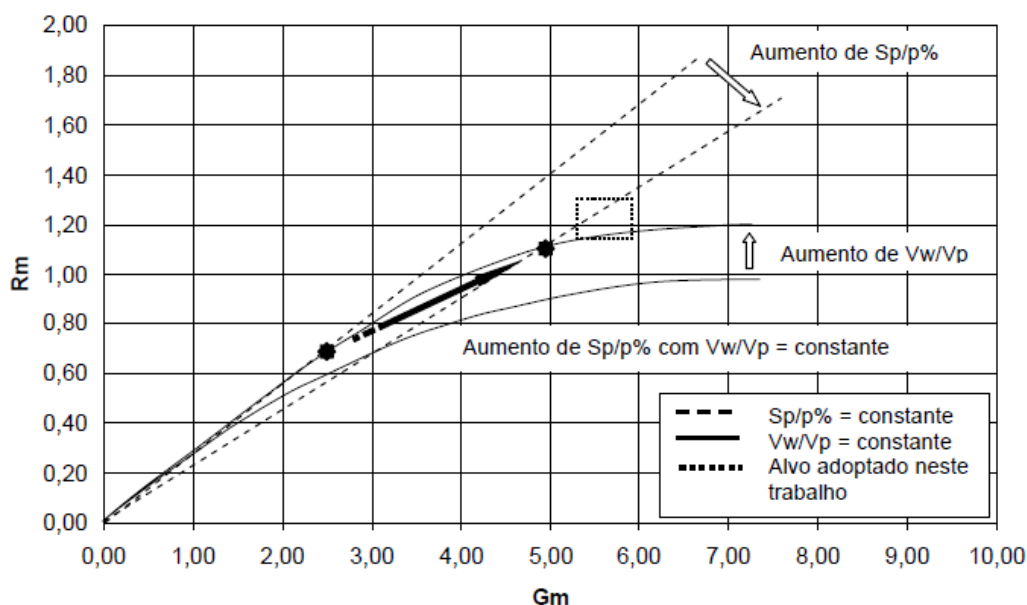


Fig. 3.7. Alteração na reologia com o aumento de Sp/P% mantendo constante Vw/Vp [60, 61].

A “família de finos” traduz as proporções em volume absoluto dos vários componentes presentes na mistura de finos. Em misturas binárias, constituídas por um cimento e uma adição, é normalmente indicada a forma de definir essa mesma “família de finos”. Este trabalho apresenta dois tipos de adições de finos distintos: o filer calcário e as lamas. Tem como objetivo estabelecer combinações entre o cimento e as adições iguais, de maneira a comparar a razão de água/cimento (A/C) obtidos. Estudos feitos por Nepomuceno comprovam que o parâmetro V_p/V_s influencia a resistência à compressão e, indiretamente, a razão água/cimento. Deste modo, o parâmetro V_p/V_s escolhido foi o de 0,8, pois apresentou, em anteriores estudos, um melhoramento em termos de resistência [60, 61].

3.4.3 - ETAPA III: Argamassas no estado endurecido

A pasta de cimento, depois de se tomar rígida, vai endurecer cada vez mais ao longo do tempo. O endurecimento refere-se ao desenvolvimento de todas as características que são necessárias para que o material desempenhe o seu papel na construção [13].

A resistência à compressão está diretamente ligada à razão V_p/V_s e à razão W/C. Para a mesma “família de finos”, quanto maior for o valor de V_p/V_s maior será resistência à compressão [60, 61]. Por outro lado, quanto menor for a razão W/C, maior será a resistência. Isto significa que numa associação binária de materiais finos, com um determinado tipo de cimento e determinada adição, a resistência à compressão deverá resultar da coordenação entre a percentagem de substituição do cimento pela adição, V_p/V_s e a razão W/C [60, 61].

3.5 - Conclusões

Regra geral, os materiais constituintes para produzir argamassas devem estar de acordo com todas as recomendações quanto à conformidade desses mesmos. Os mais diversos materiais desde o cimento, às adições de finos, superplastificante e agregados devem possuir uma estrutura física e química capaz de assegurar o bom comportamento reológico das misturas.

A metodologia adotada no presente trabalho fixa um intervalo de variação admissível para a capacidade e velocidade de deformação das argamassas. Nesta medida, as mais variadas misturas de finos, com diferentes parâmetros reológicos dentro do “alvo” pretendido, podem conduzir ao mesmo valor do parâmetro de auto-compactabilidade. Em consequência, poderá concluir-se que a relação entre os parâmetros da composição e os parâmetros de auto-compactabilidade não poderão ser analisados independentemente da capacidade de deformação e da velocidade de deformação. Da mesma forma, a análise da relação entre a reologia e a auto-compactabilidade também não poderá ser efetuada independentemente dos parâmetros da mistura [60].

Para cada “família de finos”, a razão V_p/V_s mostra uma boa correlação com a resistência à compressão. Num estudo feito por Nepomuceno a argamassas e betões auto-compactáveis, comprovou-se que, num intervalo de 0,6 a 0,8 do parâmetro V_p/V_s , chegou-se a resultados com uma diferença de 10 MPa. Deste modo conclui-se que, para uma mesma associação de materiais finos, a resistência à compressão aumenta com o aumento da razão (V_p/V_s), segundo uma relação de tipo linear [60].

Capítulo 4- Descrição do programa experimental

4.1 - Introdução

O programa experimental foi estruturado em três etapas. A primeira etapa inclui a “*Seleção e caracterização dos materiais*” utilizados na campanha experimental. A segunda etapa corresponde à “*Caraterização físico-química dos materiais*”. Por último, na terceira fase, será abordado o item correspondente à “*Caraterização das Argamassas Auto-compactáveis*”, onde serão descritos todos os procedimentos relativamente aos ensaios realizados.

O item “Seleção e Caraterização dos materiais utilizados” tem como principal objetivo a amostragem dos materiais que serão, posteriormente usados nas argamassas.

O item “Caraterização Físico-química dos materiais” é uma parte do trabalho mais específica sobre o ponto de vista técnico e tem como principal finalidade mostrar os principais constituintes químicos e atômicos das lamas, isto é, a análise química dos elementos. Serão ainda analisadas a massa volúmica, a absorção de água e a granulometria.

O item “Caraterização das Argamassas Auto-compactáveis”, para melhor compreensão, irá ser dividido em três subitens, pois estes traduzirão partes importantes a salientar em cada um dos processos. Estas subetapas, porém, foram evoluindo consoante a progressão na investigação sempre com base na análise dos resultados obtidos.

A Etapa I refere-se ao ponto de partida do cálculo usado nas argamassas. Este foi tido em consideração para traçar os teores “ótimos” para as adições, a dosagem de superplastificante, o teor de água e a quantidade de cimento.

A Etapa II tem como principal propósito descrever os ensaios reológicos que serão aqui sucintamente apresentados.

Por último, a Etapa III inclui as propriedades no estado endurecido, através do ensaio de resistência à compressão.

4.2 - Seleção e caracterização dos materiais

A concretização desta experiência depende de um dos critérios já mencionados, a sua economia. Este teve sempre como principal fundamento os fatores limitacionais que estiveram presentes na aquisição dos materiais e nos ensaios estudados. Contudo, a experiência partiu de uma forma simples, sempre com base nas abordagens de diferentes autores estudados. Porém, para mais fácil compreensão da metodologia utilizada, dividiram-se em diferentes grupos, tais como: Ligantes, adições minerais, agregados finos, adjuvantes e água.

4.2.1 - Ligantes

No mercado existem vários ligantes com as mais diversas particularidades e propriedades. Mediante esta abordagem, a escolha recaiu sobre o Cimento Portland CEM I 42,5R da empresa Secil (ver Fig. 4.1). A Norma NP EN 206-1 sugere este ligante como adequado para o desenvolvimento das diferentes argamassas que serão analisadas em estudo [63, 65].



Fig. 4.1. Apresentação do cimento CEM I 42,5R.

Todas as características físico-químicas do cimento usado foram cedidas pelo fornecedor. Algumas destas características serão apresentadas no item seguinte e em anexo.

4.2.2 - Adições minerais

As adições minerais são uma componente importante devido à prestação que estas impõem sobre a viscosidade e a fluidez nas argamassas auto-compactáveis.

Para além das cinzas das lamas de ETA do Caldeirão, que se pretendia analisar no âmbito deste trabalho experimental, seleccionou-se ainda uma adição de fíler calcário para usar como referência, uma vez que esta é a adição actualmente mais usada nos BAC e a sua prestação é já bem conhecida.

4.2.2.1 - Fíler calcário

O fíler calcário foi cedido pela empresa Omya Comital Minerais Especialidades, SA - Soure, com a designação comercial de Betocarb P1-OU (Fig. 4.2). Este material está em conformidade os critérios exigidos na Especificação do LNEC E 376-1993 [20].

A empresa de produção de fíler calcário produz matéria-prima para diferentes áreas, salientando-se o setor da construção civil e outros ramos das indústrias químicas. O fíler calcário tem sido maioritariamente utilizado para asfalto, mas tem vindo a destacar-se sobre outras formas na indústria do betão e nas argamassas. No caso do betão, mais propriamente

para os BAC, as propriedades são consideradas ótimas para controlar a retração no betão ou argamassas, diminuindo assim o calor na hidratação [58].



Fig. 4.2. Apresentação do Fíler Calcário betocarb P1-OU.

O Fíler calcário, como se pode observar na Fig. 4.2, apresenta-se em pó com um tom esbranquiçado, sendo o seu principal constituinte químico o cálcio oolítico. As principais características deste material foram analisadas em laboratório, sendo uma parte desses resultados divulgados através de uma ficha técnica do produto. Porém, foram feitos mais dois ensaios extra nas instalações dos Laboratórios de Engenharia Civil e de Engenharia Eletromecânica, sediados na Universidade da Beira Interior, que serão apresentados mais detalhadamente no item “Caraterísticas Físico-químicas dos materiais”.

4.2.2.2 - Lamas da ETA do Caldeirão (Guarda)

Nos Capítulos 2 e 3 foram descritos os aspetos relevantes no processo de obtenção das lamas e as suas principais características. Estas lamas foram cedidas pela ETA do Caldeirão (Guarda), como fora já mencionado. Em termos de tonalidade, apresentam um tom antracite devido aos elementos que foram introduzidos na purificação da água, nomeadamente o carvão ativado [31]. Como contêm elementos, que pela sua composição são prejudiciais às argamassas, realizaram-se três tratamentos para a boa utilização das mesmas. O primeiro foi a secagem, pois continham quantidades de água que falseariam o cálculo das quantidades nas misturas. O segundo foi a moagem, porque, originalmente, as lamas vêm aglomeradas em pedaços de tamanho considerável, garantindo desta forma uma finura adequada às misturas. O último foi a calcinação, uma boa alternativa para o melhoramento das características físico-química das lamas, como se verificou através da pesquisa bibliográfica [36, 76].

Como se ilustra na Fig. 4.3, a secagem processou-se do seguinte modo: 1) recolha das lamas em barricas (Fig. 4.3 a); 2) transporte para o Laboratório de Betão, do Departamento de Engenharia Civil da Universidade da Beira Interior, onde foram distribuídas por parcelas em tabuleiros (Fig. 4.3 b); 3) introdução da matéria na estufa, configurada para os 105°C, por um período de 24 horas (Fig. 4.3 c). Terminado este processo, as lamas foram depositadas numa

selha e, com ajuda de um varão de aço, foram desfeitas em material mais pequenos para uma melhor introdução no moinho elétrico para se passar à moagem (Fig. 4.3 d e 4.3 e).

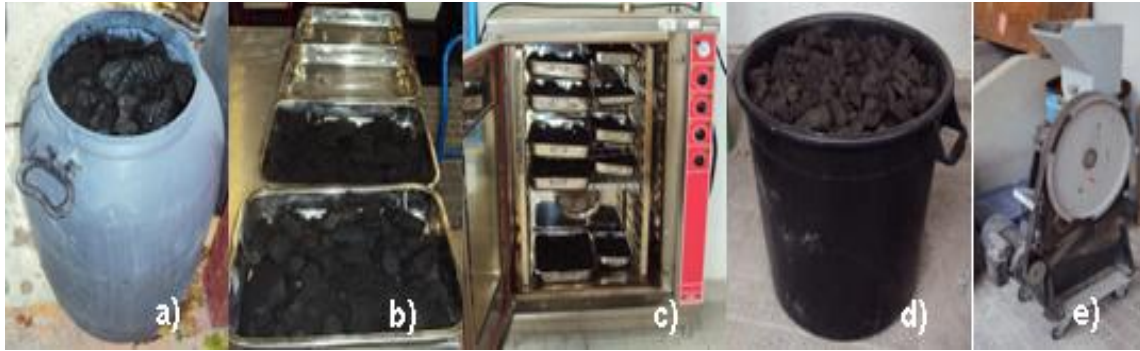


Fig. 4.3. a) Estado bruto das lamas; b) Divisão em vários tabuleiros; c) secagem em estufa a 105°C; d) Lamas secas depositadas numa cilha e e) moinho para a moagem das lamas.

Estas lamas secas apresentavam alguns sólidos com dimensões de 8 a 15 cm de comprimento. Após a moagem, procedeu-se à sua proteção. As adições de finos de lamas em estado bruto foram depositadas numa barrica limpa, seca e isolada de humidade e luz, de modo a garantir as propriedades desde o dia da moagem.

Por último, passou-se ao tratamento de calcinação. Para este processo foi necessário dividir as lamas em pequenos tabuleiros, que foram sujeitos a vários estados de queima. Deste modo, foi necessária a renomeação para não existirem equívocos no seu manuseamento. As designações foram atribuídas consoante a letra inicial da adição mineral e o seu estado de calcinação, por exemplo, de SL0: SL, de “*sludge*” em português de “lama” e 0 pois esta não foi calcinada logo 0°C, e as calcinadas para 500°C, 700°C e 900°C, respetivamente designadas de SL500, SL700 e SL900.

As lamas previamente moídas foram introduzidas em tabuleiros de aço e em pequenas quantidades [Fig. 4.4 b)] diretamente para a mufla [Fig. 4.4 c)], programada conforme a temperatura para o grau de calcinação pretendido [Fig. 4.4 a)]. O tempo de queima dentro da mufla para SL500, SL700 e SL900 foi de duas horas consecutivas, enquanto para SL950 o tempo foi de cinco horas consecutivas, tendo-se observado para esta última uma diminuição drástica da massa. Como as propriedades de SL950 modificaram muito e como continham partículas do tabuleiro, as lamas calcinadas foram peneiradas de maneira a separarem as cinzas de outras partículas que não fazem parte destas lamas.



Fig. 4.4- a) Monitor para a configuração da temperatura; b) Finos de Lamas prontas a calcinarem; c) introdução das lamas na mufla.

A figura 4.5 mostra o aspeto no final da calcinação das lamas, neste caso a 700°C. É evidente a modificação de tonalidade de preto para bege, por esse mesmo motivo, como é um produto inovador e poucos estudos foram feitos nesta área, ensaios anteriores às argamassas foram feitos para a caracterização físico-química, que será mostrada num item a seguir a este.

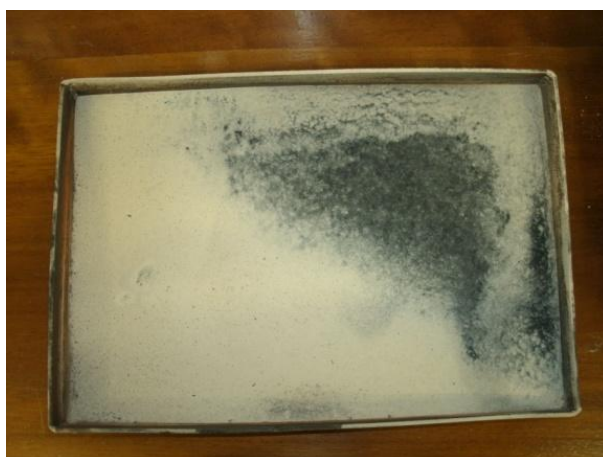


Fig. 4.5. Apresentação do Estado calcinado a 700°C de um espécime de lamas.

De acordo com a bibliografia consultada, a adição destes finos ajuda a uma maior viscosidade da argamassa auto-compactável. Os estudos para estas lamas indicam tratar-se de um resíduo com boas propriedades químicas para esta área [36, 76, 79].

4.2.3 - Agregados finos

Foram seleccionados dois agregados finos com distribuições granulométricas diferentes, correspondendo a módulos de finura abaixo e acima daquele proposto por Nepomuceno para a curva de referência dos agregados finos. Desta forma, foi possível dosear as proporções mais adequadas dos agregados finos para alcançar uma distribuição granulométrica próxima da curva de referência. Os agregados finos seleccionados foram, uma areia de grão intermédio rolada do rio com máxima dimensão de 4 mm designada comercialmente de Areia 0/4 (Fig.

4.6a) e uma areia natural muito fina com máxima dimensão de 2 mm e designação comercial de Areia 0/2 (Fig. 4.6b).

Do ponto de vista geológico a Areia 0/4 apresenta uma grande variedade de minerais e fragmentos líticos. Quartzo e feldspatos abundantes. Minerais ferromagnesianos opacos frequentes. Algumas micas, essencialmente moscovite. Raras ocorrências de turmalina. Restos de rochas xistosas de fácies verdes, micaxistos. Os minerais ferro-magnesianos apresentam algum rolamento e polimento. O quartzo, feldspato e mica apresentam-se angulosos a sub-angulosos com algumas superfícies de fractura recentes. Raras ocorrências de Quartzitos e Jaspes.

Do ponto de vista geológico a Areia 0/2 pode ser caracterizada como uma areia essencialmente monominerálica de quartzo incolor a leitoso com poucos elementos de feldspato e poucos elementos ferromagnesianos opacos. Apresenta alguma heterometria. A superfície dos grãos é na grande maioria bem polida mas baça indicador de choques em meio aéreo. Quanto ao grau de rolamento os grãos são sub-angulosos a sub-rolados.

Os ensaios realizados sobre as areias incluíram a análise granulométrica e a determinação da massa volúmica. Previamente a cada amassadura foram ainda determinados os teores em água superficial, para efeito de correcção da mistura.

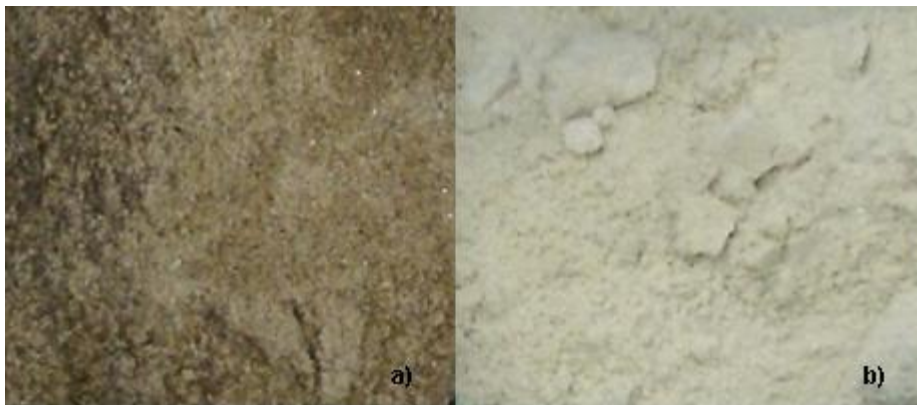


Fig. 4.6. a) Areia 0/4; b) Areia 0/2.

4.2.4 - Adjuvantes

No mercado existe uma vasta gama de adjuvantes implicitamente para um campo alargado de cada tipo de aplicações. Através da bibliografia apresentada no anterior capítulo, optou-se, por utilizar um superplastificante à base de carboxilatos modificados, sem introdução de ar.

4.2.4.1 - Superplastificante

Para esta experiência e dado já a sua anterior utilização em trabalhos de BAC, a escolha recaiu na utilização do superplastificante da marca SIKA, não só devido ao seu bom desempenho mas também pela sua regulamentação a nível de qualidade e normativas. O produto tem como principal designação SIKA ViscoCrete 3005 (Fig. 4.7) para este tipo de trabalhos com argamassas e betões.



Fig. 4.7. Apresentação do Superplastificante SIKA ViscoCrete 3005.

Em termos de tonalidades, descreve-se com uma cor castanha clara e um pouco turva. As suas principais características são divulgadas na ficha técnica em Anexo.

4.2.5 - Água

Foi usada água da rede pública, seguindo as recomendações em conformidade com a Especificação do LNEC E372 [53].

4.3 - Caracterização física e química dos materiais

Para que seja completo este estudo, foi necessário mostrar o que acontece sobre o ponto de vista físico-químico, isto é, aquilo que não está acessível ao “olho humano” em alguns materiais, que pela sua novidade pouco ou nada se sabe sobre o seu comportamento atómico ou físico. Houve, também, a necessidade de novos ensaios para outros materiais que não eram apresentados nas suas fichas técnicas. Complementar-se-á este subcapítulo com alguma informação disponível por parte das tabelas técnicas, colocadas em anexo, correspondente a cada tipo de material.

4.3.1- Ensaios Físicos

Para a realização de qualquer ensaio, é imprescindível seguir uma normativa que comprove a sua veracidade no decorrer dos ensaios assim como os valores daí retirados. As normas para a determinação da massa volúmica em agregados finos são a Norma Portuguesa NP-954 e a

Especificação do LNEC E248-1971. Para a determinação dos ensaios das adições de finos é usada a Especificação do LNEC E 64-1968 [21, 52, 64].

A determinação da massa volúmica é efetuada através da medição do deslocamento de um líquido inserido num recipiente apropriado para o estudo. Esta análise é um pouco diferente do caso das areias para os finos, pois o recipiente muda sensivelmente de tamanho e os líquidos utilizados são a água para as areias e a gasolina para os finos.

Assim, o princípio básico para o ensaio das areias começa pela medição de um espécime com cerca de 750g de amostra saturada por imersão de água (Fig. 4.8 a), durante um período de 24 horas. Após o término das 24 horas, as areias são secas, apenas à superfície [Fig. 4.8 b)]. De seguida, são retiradas 500g dessa mesma amostra e colocadas num balão cheio de água [Fig. 4.8 c)]. Com a introdução das areias no balão, formam-se bolhas de ar, que terão, obrigatoriamente, de se extinguir e só, nesse momento, se efetua a medição através do traço de referência [Fig. 4.8 d)].



Fig. 4.8. Ensaio da massa volúmica dos agregados finos.

Na determinação da massa volúmica para as adições de finos, houve a necessidade de comparação entre dois métodos, o manual através da normativa em vigor tipicamente analisada através da Especificação do LNEC E 64-1968, e o mais avançado, através de um aparelho a hidrogénio para comparação dos resultados [21].

Tomando em consideração o método normativo, passou-se a designar como método manual para o caso das adições minerais, este é muito semelhante ao das areias mas com várias nuances. Neste caso, como a superfície das partículas é muito pequena, é utilizada totalmente seca e a amostra pode variar sensivelmente à volta das 50g [Fig. 4.9 c)]. O balão utilizado é mais reduzido [Fig. 4.9 b)], o líquido utilizado é a gasolina e é medido no traço de referência [Fig. 4.9 d)]. Este método exige uma grande minúcia na introdução da amostra na gasolina [Fig. 4.9 e)], pois é muito fácil a dispersão das partículas devido à constante evaporação da mesma.



Fig. 4.9. Ensaio da massa volúmica das adições minerais.

Para a comparação de dados das massas volúmicas das adições de finos, utilizou-se um equipamento de análise de massa volúmica micromeritics AccuPyc 1330 Gas Pycnometers [Fig. 4.10 a)]. É um equipamento rápido, possui um analisador automático que promove uma leitura a grande velocidade, uma grande precisão dos volumes calculados. Este método passou a designar-se como “automático”. O seu manuseamento é muito simples, fazendo, em primeiro lugar, uma avaliação aos níveis de pressão do gás [Fig. 4.10 b e c)] e, em segundo lugar, numa calibragem. Num recipiente apropriado [Fig. 4.10 d.2)] são medidos sensivelmente 5g para cada amostra a ser analisada [Fig. 4.10 d)]. De seguida, é introduzido o espécime no analisador de massa volúmica e este faz três leituras com dez ciclos de análise. No final, a máquina, através da sua memória digital, apresenta os resultados no ecrã correspondentes à tipicidade da amostra.

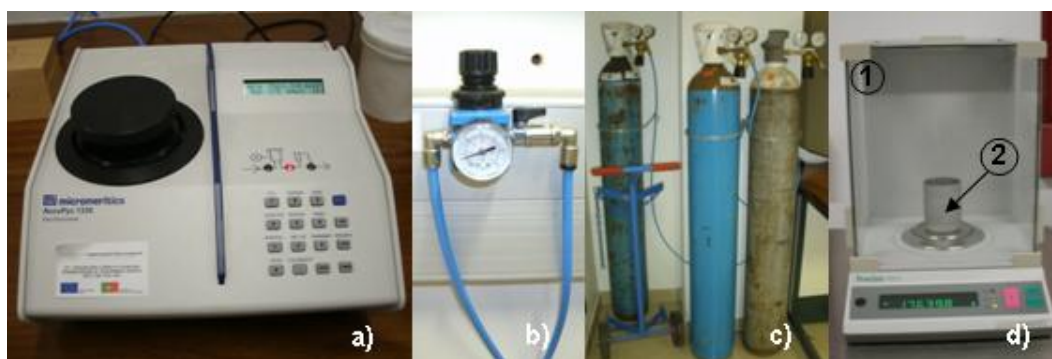


Fig. 4.10. Picnómetro a gás “micromeritics AccuPyc 1330”.

Em suma, para melhor compreensão, são apresentados num quadro síntese as diferenças entre as diferentes massas volúmicas de cada material. As designações “TT”, “MM” e “MA” correspondem, respetivamente, a “Tabela Técnica”, “Método Manual” e “Método Automático”. É notória a margem de erro do método automático em relação ao manual no ensaio das adições de finos, pois esta apresenta uma variação de duas décimas.

Quadro 4.1. Massas volúmicas dos materiais.

Massa Volúmica			
Material	Amostra	Valor	Unidade
CEM I 42,5R	TT	3100	kg/m ³
	MM	3100	kg/m ³
FC betocarb P1-OU	TT	2700	kg/m ³
	MM	2700	kg/m ³
	MA	900	kg/m ³
SL0	MM	1700	kg/m ³
	MA	1900	kg/m ³
SL500	MM	2100	kg/m ³
	MA	2300	kg/m ³
SL700	MM	2200	kg/m ³
	MA	2500	kg/m ³
SL900	MM	2500	kg/m ³
	MA	2700	kg/m ³
Agre. Finos	Areia 02	MM	2600
	Areia 04	MM	2600
Adjuvante Superplastificante ViscoCrete 3005		TT	1100

A Especificação E248-1971 do LNEC fixa o modo de determinar a absorção de água de areias para as argamassas [52]. Os processos destes ensaios são apresentados na Fig. 4.11. Os valores da absorção de água dos agregados finos são apresentados no Quadro 4.2.



Fig. 4.11- Determinação da absorção de água dos agregados finos

Quadro 4.2- Absorção de água dos agregados finos

Material		Absorção de água
Tipo	Designação Comercial	
Agregado Fino	Areia 02	A02%=0,79
	Areia 04	A04%=0,52

A análise granulométrica das partículas dos agregados finos seguiu a especificação do LNEC E245 [19]. A Figura 4.12 apresenta os diversos passos a serem tomados na análise granulométrica.



Fig. 4.12- a.1) Amostra da areia 02 seca; a.2) Amostra da areia 04 seca; b) Peneiros colocados pela ordem de normalização; c) Medição dos peneiros através de uma balança de alta precisão; d) Inserção da areia nos peneiros; e) Agitadora de peneiros

O Quadro 4.3 apresenta as curvas granulométricas das duas areias e ainda as frações unitárias de cada uma delas que conduzem à obtenção de uma “curva real” próxima da “curva de referência” proposta por Nepomuceno para os agregados finos. A fração unitária da Areia 0/2 será de 0,35, enquanto a fração unitária da Areia 0/4 será de 0,64. O erro médio percentual obtido foi de 3,4%. A aproximação da curva real à curva de referência é apresentada graficamente na Figura 4.13 e 4.14.

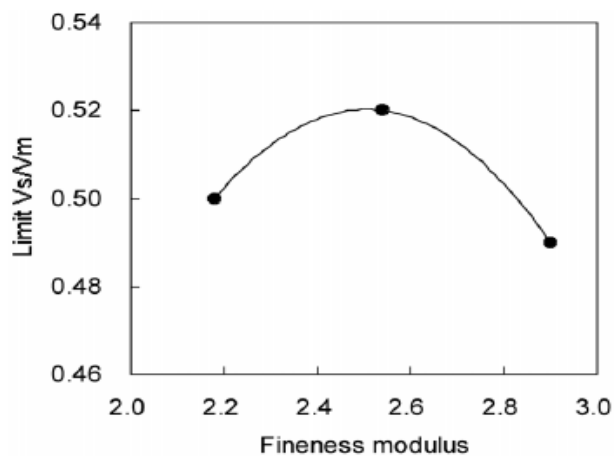


Fig. 13 - Relação entre o módulo de finura e a razão limite Vs/Vm [58].

Quadro 4.3- Curvas granulométricas dos agregados, curva real e de referência

Abertura da malha (mm)	Areia 0/2	Areia 0/4	Mistura (Curva Real)	Mistura (Curva Ref)	Erro médio percentual
	a1	a2			
	0,35	0,65			
Percentagem de passados					
9,520	100,00	100,00	100,00	100,00	0,00
4,760	100,00	98,48	99,01	99,96	0,95
2,380	99,94	94,23	96,23	99,12	2,90
1,190	99,51	78,40	85,79	90,81	5,02
0,590	82,79	40,43	55,26	62,30	7,04
0,297	20,53	5,91	11,03	21,05	10,02
0,149	1,24	0,44	0,72	4,72	4,00
0,074	0,16	0,15	0,15	0,85	0,70
Resíduo	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Módulos de finura					
	1,960	2,821	2,520	2,220	3,403

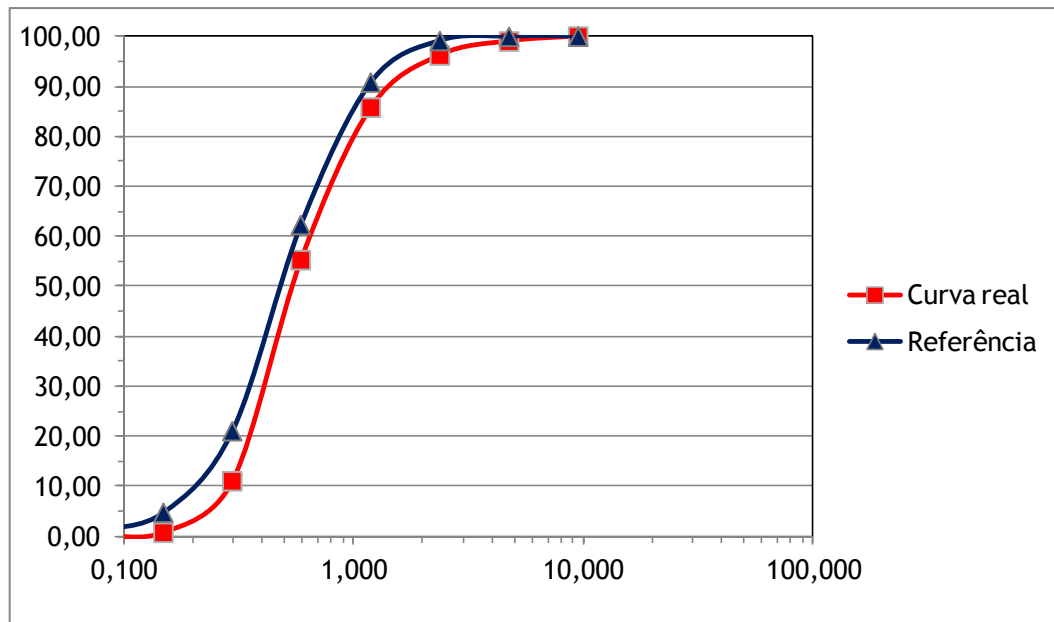


Fig. 4.14- Apresentação da curva granulométrica dos agregados finos

As partículas das adições foram analisadas com recurso a um analisador de partículas laser (COULTER LS 200), que permite determinar os volumes diferencial e cumulativo das partículas em função do seu tamanho. A figura 4.15 mostra a sequência de procedimentos que foram tomados, para que estas adições minerais fossem convenientemente avaliadas.

No início de cada ensaio, para cada tipo de finos, procedeu-se a uma calibração para que o software incorporado no aparelho pudesse fazer a leitura com o mínimo de erros [Fig. 4.15 b)] Terminada esta etapa, passou-se para a etapa principal desta análise, a introdução de pequenas percentagens da adição mineral no elemento de admissão [Fig. 4.15 d)] a ser analisado com a água destilada que o analisador contém. Após a homogeneização da mistura por micro-ondas, esta é automaticamente conduzida para a unidade principal, que na Fig. 4.15 b) se observa por detrás do monitor. Através de uma fonte de luz laser e utilizando o princípio da difração ótica, o aparelho permite obter informação acerca da dimensão das partículas e do seu volume. Com estes elementos, o software instalado produz, entre outra, a informação necessária para construir os diagramas cumulativos e diferenciais da fração volumétrica do tamanho das partículas. Os resultados serão apresentados sobre a forma de gráficos no capítulo seguinte, de forma a serem de mais fácil leitura.



Fig. 4.15. a) Filtro de água; b) Software de análise de difração a laser; c) Analisador LS COULTER 200; d) Local de introdução da amostra; e) Amostra para análise.

4.3.2 - Ensaios químicos

Os Ensaios químicos foram realizados com recurso a um microscópio eletrónico de varrimento (Fig. 4.16), marca Hitachi S-2700, já explicado na bibliografia exposta. As análises foram feitas unicamente às lamas nos vários estados de calcinação. Antes de ser testada, foi necessária uma preparação adequada dos diferentes espécimes. Para cada um deles foi retirada uma porção de finos e fixada num molde específico chamado pastilhador. Este pastilhador tem como principal função comprimir a matéria em teste, para depois ser levada para o detetor de partículas, denominado EDX de marca Routec. Como se tratava de uma análise química, fez-se só a análise elementar. Através da bibliografia explorada, as percentagens foram obtidas através de óxidos quer em ligações químicas, quer a nível atómico.

Os resultados obtidos são apresentados nos quadros 4.4 e 4.5. Mostram os elementos vigorantes e minorantes, tanto na sua forma elementar atómica como elementar sobre a forma de óxidos, respetivamente.



Fig. 4.16. Apresentação do Microscópio Eletrónico de Varrimento.

Quadro 4.4. Apresentação das percentagens (%) da análise elementar atômica.

Análise Elementar em %Atômica								
	C	O	Al	Si	S	K	Ca	Fe
SL0	49,15	42,38	5,12	2,28	0,49	0,11	0,17	0,3
SL500	43,1	46,95	6,5	2,47	0,24	0,06	0,2	0,49
SL700	45,23	41,87	8,51	3,13	0,34	0,12	0,27	0,53
SL900	42,14	45,51	8,16	2,98	0,34		0,26	0,59
SL950*		74,71	17,07	6,42		0,22	0,57	1,01

Quadro 4.5. apresentação das percentagens (%)da análise elementar de óxidos.

Análise Elementar em %Óxidos						
	Al ₂ O ₂	SiO ₂	SO ₄	K ₂ O	CaO	Fe ₂ O ₃
SL0	50,33	30,76	10,77	1,14	1,99	5
SL500	54,08	30,95	5,74	0,53	1,97	6,73
SL700	56,5	29,22	5,62	0,85	2,07	5,73
SL900	54,66	30,56	6,25		2,07	6,46
SL950*	60,63	30,61		0,77	2,26	5,74

Para a análise das percentagens de Carbono e de Matéria Orgânica recorreu-se a um laboratório externo à UBI, o Laboratório de Análises Clínicas da Universidade de Aveiro. Os resultados podem ser observados no Quadro 4.6.

Quadro 4.6. Apresentação das percentagens de Carbono e Matéria Orgânica.

	SL0	SL500	SL700	SL900	SL950
Carbono Total [%]	31,0	29,8	30,0	21,8	0,1
Matéria Orgânica [%]	58,0	38,7	35,2	23,6	0,3

As lamas foram consideradas como um resíduo industrial através da Diretiva Europeia 2000/532/CE, do tipo M1 19 09, como já tinha sido referido no capítulo sobre o processo de extração das lamas [15]. Os elementos maioritários que as constituem são fruto das reações químicas dos processos de tratamento da água com as adições de coagulantes e desinfestantes, como sulfato de alumínio, ferro, hidróxido de cálcio, magnésio, sódio, sulfato de potássio e lixivantes, como é o caso do zinco, cádmio, cobre, chumbo, níquel e crómio. Para além destes compostos, podem-se detetar, também, percentagens de carbono e de matéria orgânica [36, 76, 79].

4.4 - Caracterização das argamassas auto-compactáveis

Todos os materiais foram acondicionados no Laboratório de Betão da UBI, protegidos da humidade e a radiação solar. O fíler calcário e o cimento foram acomodados dentro de barricas; as diferentes lamas calcinadas (SL0, SL500, SL700 SL900) em caixas plásticas mais devidamente seladas e o superplastificante SIKA ViscoCrete-3005 numa vasilha fechada.

Todos os componentes utilizados na produção das argamassas foram medidos em massa, incluindo o superplastificante e a água. Os agregados finos utilizavam-se no momento da amassadura com um determinado teor de humidade, enquanto as adições (finos) se apresentavam secas. O volume total da argamassa foi sempre de 1,60 l.

O programa experimental foi estruturado nas três seguintes etapas:

Etapa I: Estudo da composição das argamassas,

Etapa II: Avaliação das propriedades das argamassas no estado fresco,

Etapa III: Avaliação das propriedades das argamassas no estado endurecido.

4.4.1 - ETAPA I: Estudo da composição das argamassas

A Etapa I apura os vários passos necessários, quer na formulação das diferentes argamassas e materiais na mistura, quer em questões reológicas das argamassas. O cálculo começa por verificar as proporções em volume absoluto entre a Areia 02 e a Areia 04, anteriormente determinadas pelo método da baridade de modo a obter a maior compactidade possível. A percentagem de substituição do cimento pela adição também foi tida em conta mediante alguns estudos. A percentagem escolhida foi de 30 por cento em relação à percentagem total do ligante sendo uma média das variações tomadas nas bibliografias analisadas [18, 76].

Cinco amostras foram preparadas correspondendo a cinco famílias de argamassas, conforme se indica no Quadro 4.7. As designações adotadas para esta experiência foram “C1”, “FC”, “SL0”, “SL500”, “SL700” e “SL900”, que são, respetivamente, o Cimento Portland Tipo I, Fíler calcário e as lamas em cada estágio de calcinação, por exemplo, SL500, adições finas de lamas calcinadas a 500°C.

Quadro 4.7. Misturas Binárias para a composição das argamassas.

		Ligante	Adições Minerais				
		Cimento	Tipo I	Lamas (Resíduos Industriais)			
		CEM I 42,5R (C1) sc1=3140 kg/m ³	Filer Calcário (Micro AB) (FC) SFC=2720 kg/m ³	Lama calcificada a 0°C (SL0) SSL0=1740 kg/m ³	Lama calcificada a 500°C (SL500) SSL500=2060 kg/m ³	Lama calcificada a 700°C (SL700) SSL700=2248 kg/m ³	Lama calcificada a 900°C (SL900) SSL900=2530 kg/m ³
Ref.	I 70C1+30FC	fc1=0,70	ffc=0,30				
Misturas Binárias	II 70C1+30SL0	fc1=0,70		fsl0=0,70			
	III 70C1+30SL500	fc1=0,70			fsl500=0,70		
	IV 70C1+30SL700	fc1=0,70				fsl700=0,70	
	V 70C1+30SL900	fc1=0,70					fsl900=0,70

4.4.1.1 - Metodologia experimental

Foram utilizados os seguintes parâmetros chave para o estudo da composição das argamassas: a “família de finos”, Vp/Vs (relação em absoluto entre a dosagem de materiais finos e a dosagem de agregados finos na argamassa), Vw/Vp (relação em volume absoluto entre a dosagem de água e a dosagem de materiais finos na argamassa) e finalmente Sp/p% (relação exposta em percentagem entre a dosagem em massa de superplastificante e a dosagem em massa de materiais finos). Foi desprezada a contribuição do volume de vazios e foi utilizada uma única curva de referência para os agregados finos.

As proporções dos agregados finos, designadamente a percentagem unitária em volume absoluto da Areia 02 (a1) e a percentagem unitária em volume absoluto da Areia 04 (a2), referem-se ao volume absoluto do total dos agregados finos (Vs). A expressão que se segue traduz a participação de cada tipo de areia no volume de agregados finos:

$$V_s = a_1 \times V_s + a_2 \times V_s \quad (4.1)$$

Os parâmetros que definem a classe de materiais finos são: as percentagens unitárias em volume absoluto do cimento tipo CEM I 42,5R (fc1), do filer calcário (ffc) e dos diferentes estados de calcinação das lamas (SL0, SL500, SL700, e SL900). Estas percentagens são referidas ao volume total do material fino (Vp). A expressão seguinte traduz a relação dos vários componentes:

$$V_p = fc_1 \times V_p + ffc \times V_p + sl_0 \times V_p + sl_{500} \times V_p + sl_{700} \times V_p + sl_{900} \times V_p \quad (4.2)$$

O parâmetro Vp/Vs caracteriza a relação em volume absoluto entre as quantidades de finos e de agregados finos. O parâmetro Vw/Vp, por sua vez, representa a relação também em

volume absoluto das quantidades de água e de materiais finos. O parâmetro $S_p/p\%$ expõe a relação percentual em massa entre as dosagens feitas de superplastificante e de materiais finos. O volume de vazios (V_v) foi desprezado para efeitos de cálculo das argamassas.

Assumindo como unidade de volume o m^3 , a fórmula fundamental do cálculo das argamassas assume a seguinte expressão:

$$V_p + V_w + V_s + V_{sp} + V_v = 1,0 \quad (4.3)$$

Sendo:

V_p , o volume absoluto de materiais finos em m^3/m^3 ,

V_w , o volume de água em m^3/m ,

V_s , o volume absoluto de agregados finos em m^3/m^3 ,

V_{sp} , o volume de superplastificante em m^3/m^3

V_v , o volume de vazios em m^3/m^3 ,

Como foi referido, ao desprezar-se o volume de vazios tem-se que:

$$V_p + V_w + V_s + V_{sp} = 1,0 \quad (4.4)$$

Ou seja:

$$V_p + (V_w/V_p) \cdot V_p + (1/(V_p/V_s)) \cdot V_p + (V_{sp}/V_p) \cdot V_p = 1,0 \quad (4.5)$$

Deste modo obtêm-se as seguintes expressões analíticas:

$$V_p = 1/[1 + (V_w/V_p) + (1/(V_p/V_s)) + (V_{sp}/V_p)] \quad (4.6)$$

$$V_w = (V_w/V_p) \cdot V_p \quad (4.7)$$

$$V_{sp} = (V_{sp}/V_p) \cdot V_p \quad (4.8)$$

$$V_s = V_p / (V_p/V_s) \quad (4.9)$$

Salienta-se também que:

$$(V_{sp}/V_p) = (S_p/P) \cdot (\delta_p/\delta_{sp}) \quad (4.10)$$

Sendo:

$$\delta p = f_c \cdot 1 \cdot \delta C1 + f_{fc} \cdot \delta FC + f_{SL0} \cdot \delta SL0 + f_{SL500} \cdot \delta SL500 + f_{SL700} \cdot \delta SL700 + f_{SL900} \cdot \delta SL900 \quad (4.11)$$

e

$$(Sp/P) = (Sp/P\%) / 100 \quad (4.12)$$

Já conhecido o valor de V_p , podem então ser agora determinadas as dosagens dos materiais finos das seguintes expressões:

$$VC1 = f_{C1} \cdot V_p \quad (4.13)$$

$$VFC = f_{FC} \cdot V_p \quad (4.14)$$

$$VSL0 = f_{SL0} \cdot V_p \quad (4.15)$$

$$VSL500 = f_{SL500} \cdot V_p \quad (4.16)$$

$$VSL700 = f_{SL700} \cdot V_p \quad (4.17)$$

$$VSL900 = f_{SL900} \cdot V_p \quad (4.18)$$

Sendo:

$VC1$, volume absoluto de cimento tipo I 42,5R, em m^3/m^3 ,

VFC , volume absoluto de fíler calcário, em m^3/m^3 ,

$VSL0$, volume absoluto de lamas calcinadas a 105°C, em m^3/m^3 ,

$VSL500$, volume absoluto de lamas calcinadas a 500°C, em m^3/m^3 ,

$VSL700$, volume absoluto de lamas calcinadas a 700°C, em m^3/m^3 ,

$VSL900$, volume absoluto de lamas calcinadas a 900°C, em m^3/m^3 ,

Da mesma forma, conhecido o valor de V_s , podem ser determinadas as dosagens dos diferentes agregados finos a partir das seguintes expressões:

$$Vs1 = a1 \times Vs \quad e \quad Vs2 = a2 \times Vs \quad (4.19, 4.20)$$

Sendo:

$Vs1$, volume absoluto do agregado fino 1 (Areia 02), em m^3/m^3 ,

V_{s2} , volume absoluto do agregado fino 2 (Areia 04), em m^3/m^3 ,

a_1 , percentagem unitária do agregado fino 1 (Areia 02),

a_2 , percentagem unitária do agregado fino 2 (Areia 04).

Uma vez conhecidas todas as dosagens em volume absoluto, a sua conversão para valores em massa é feita a partir das massas volúmicas respetivas. Os resultados assim obtidos referem-se a dosagens por metro cúbico de argamassa.

4.4.1.2 - Programa de apoio ao cálculo

Para facilitar o estudo da composição das argamassas em laboratório, usou-se uma folha de cálculo (EXCEL) que reproduz as expressões descritas no item anterior, produzida pelo Professor Doutor Miguel Nepomuceno [60]. Foram feitos ajustes para o cálculo do novo material em estudo (os vários tipos de cinzas de lamas). A folha foi programada através do método de cálculo apresentado, sendo desta forma mais rápida e eficaz cada caracterização das argamassas com os novos tipos de finos calcinados no decorrer da experiência.

Um exemplo da resposta da folha de cálculo é ilustrado no Quadro 4.8, para a situação particular de uma mistura com os seguintes parâmetros: $a_1=0,35$; $a_2=0,65$; $f_{c1}=0,70$; $f_{sl}(900)=0,30$; $V_p/V_s=0,80$; $V_w/V_p=1,08$; e $S_p/P\%=4,25$.

Os valores de a_1 , a_2 , V_p/V_s e f_{c1} foram constantes em todas as famílias de argamassas. Os restantes valores V_w/V_p e $S_p/p\%$ foram ajustados em cada argamassa para obter as propriedades reológicas pretendidas, avaliada pela área de espalhamento relativa (G_m) e velocidade relativa do escoamento (R_m).

Quadro 4.7. Exemplo de uma folha Excel para o cálculo da Argamassa SL900 número 1.

ESTUDO DA COMPOSIÇÃO DE ARGAMASSAS																																																																				
Identificação da argamassa			Identificação da mistura de finos			Data																																																														
A.SG.SL900.1			70C1+30SL900			01-04-2010																																																														
Parâmetros da composição					<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th rowspan="2">Abertura da malha (mm)</th> <th>Areia02</th> <th>Areia04</th> <th>Mistura (Curva Real)</th> </tr> <tr> <th>a1</th> <th>a2</th> <th></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td></td> <td style="text-align: center;">0,35</td> <td style="text-align: center;">0,65</td> <td></td> </tr> <tr> <td colspan="4" style="text-align: center;">Percentagem de passados</td> </tr> <tr> <td>9,520</td> <td style="text-align: center;">100,00</td> <td style="text-align: center;">100,00</td> <td style="text-align: center;">100,00</td> </tr> <tr> <td>4,760</td> <td style="text-align: center;">100,00</td> <td style="text-align: center;">98,48</td> <td style="text-align: center;">99,01</td> </tr> <tr> <td>2,380</td> <td style="text-align: center;">99,94</td> <td style="text-align: center;">94,23</td> <td style="text-align: center;">96,23</td> </tr> <tr> <td>1,190</td> <td style="text-align: center;">99,51</td> <td style="text-align: center;">78,40</td> <td style="text-align: center;">85,79</td> </tr> <tr> <td>0,590</td> <td style="text-align: center;">82,79</td> <td style="text-align: center;">40,43</td> <td style="text-align: center;">55,26</td> </tr> <tr> <td>0,297</td> <td style="text-align: center;">20,53</td> <td style="text-align: center;">5,91</td> <td style="text-align: center;">11,03</td> </tr> <tr> <td>0,149</td> <td style="text-align: center;">1,24</td> <td style="text-align: center;">0,44</td> <td style="text-align: center;">0,72</td> </tr> <tr> <td>0,074</td> <td style="text-align: center;">0,16</td> <td style="text-align: center;">0,15</td> <td style="text-align: center;">0,15</td> </tr> <tr> <td>Residuo</td> <td style="text-align: center;">0,00</td> <td style="text-align: center;">0,00</td> <td style="text-align: center;">0,00</td> </tr> <tr> <td colspan="4" style="text-align: center;">Módulos de finura</td> </tr> <tr> <td></td> <td style="text-align: center;">1,960</td> <td style="text-align: center;">2,821</td> <td style="text-align: center;">2,520</td> </tr> </tbody> </table>					Abertura da malha (mm)	Areia02	Areia04	Mistura (Curva Real)	a1	a2			0,35	0,65		Percentagem de passados				9,520	100,00	100,00	100,00	4,760	100,00	98,48	99,01	2,380	99,94	94,23	96,23	1,190	99,51	78,40	85,79	0,590	82,79	40,43	55,26	0,297	20,53	5,91	11,03	0,149	1,24	0,44	0,72	0,074	0,16	0,15	0,15	Residuo	0,00	0,00	0,00	Módulos de finura					1,960	2,821	2,520
Abertura da malha (mm)	Areia02	Areia04	Mistura (Curva Real)																																																																	
	a1	a2																																																																		
	0,35	0,65																																																																		
Percentagem de passados																																																																				
9,520	100,00	100,00	100,00																																																																	
4,760	100,00	98,48	99,01																																																																	
2,380	99,94	94,23	96,23																																																																	
1,190	99,51	78,40	85,79																																																																	
0,590	82,79	40,43	55,26																																																																	
0,297	20,53	5,91	11,03																																																																	
0,149	1,24	0,44	0,72																																																																	
0,074	0,16	0,15	0,15																																																																	
Residuo	0,00	0,00	0,00																																																																	
Módulos de finura																																																																				
	1,960	2,821	2,520																																																																	
Vp/Vs	Vw/Vp	Sp/P%																																																																		
0,80	1,08	4,25																																																																		
Composição da mistura de finos																																																																				
fc1	fc2	fcv	fms	ffc	fsl																																																															
0,70	0,00	0,00	0,00	0,00	0,30																																																															
Massas volúmicas dos materiais finos, em kg/m ³																																																																				
δc1	δc2	δcv	δms	δfc	δsl																																																															
3140	3040	2380	2170	2720	2530																																																															
Massas volúmicas dos agregados, em kg/m ³																																																																				
δs1	δs2	---	---	---	---																																																															
2640	2610	---	---	---	---																																																															
Massas volúmicas dos adjuvantes, em kg/m ³																																																																				
δsp	---	---	---	---	---																																																															
1050	---	---	---	---	---																																																															
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tbody> <tr> <td style="text-align: center;">δp=</td> <td style="text-align: right;">2957,00 kg/m³</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">Vsp/Vp=</td> <td style="text-align: right;">0,1196881 m³/m³</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">Vp=</td> <td style="text-align: right;">0,2898813 m³/m³</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">Vw=</td> <td style="text-align: right;">0,3130718 m³/m³</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">Vsp=</td> <td style="text-align: right;">0,0346953 m³/m³</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">Vs=</td> <td style="text-align: right;">0,3623516 m³/m³</td> </tr> </tbody> </table>										δp=	2957,00 kg/m ³	Vsp/Vp=	0,1196881 m ³ /m ³	Vp=	0,2898813 m ³ /m ³	Vw=	0,3130718 m ³ /m ³	Vsp=	0,0346953 m ³ /m ³	Vs=	0,3623516 m ³ /m ³																																															
δp=	2957,00 kg/m ³																																																																			
Vsp/Vp=	0,1196881 m ³ /m ³																																																																			
Vp=	0,2898813 m ³ /m ³																																																																			
Vw=	0,3130718 m ³ /m ³																																																																			
Vsp=	0,0346953 m ³ /m ³																																																																			
Vs=	0,3623516 m ³ /m ³																																																																			
Quantidades para um volume de: 1000,00 litros					Quantidades para um volume de: 1,60 litros																																																															
C1=	637,2 kg				C1=	1019,5 g																																																														
C2=	0,0 kg	<u>Massa total, em kg</u>			C2=	0,0 g	<u>Massa total, em g</u>																																																													
CV=	0,0 kg	2156,2			CV=	0,0 g	3452,9																																																													
MS=	0,0 kg	<u>Razão água/(mat. cimentícios)</u>			MS=	0,0 g	<u>Razão água/(mat. cimentícios)</u>																																																													
FC=	0,0 kg	0,491			FC=	0,0 g	0,491																																																													
SL=	220,0 kg	<u>Razão água/cimento</u>			SL=	352,0 g	<u>Razão água/cimento</u>																																																													
W=	313,1 litros	0,491			W=	500,9 g	0,491																																																													
Sp=	34,70 litros	<u>Razão água/finos</u>			Sp=	58,29 g	<u>Razão água/finos</u>																																																													
S1=	334,8 kg	0,365			S1=	535,7 g	0,365																																																													
S2=	614,7 kg				S2=	983,6 g																																																														

4.4.1.3 - Definição do comportamento reológico pretendido

Em cada família de argamassas, para se obter as propriedades reológicas pretendidas, fez-se variar Vw/Vp e Sp/p% e realizaram-se ensaios das argamassas no estado fresco. Os valores de Vw/Vp e Sp/p% adequados são aqueles que conduzem a valores de (Rm e Gm) que se situam no intervalo desenhado a azul na Fig. 4.17.

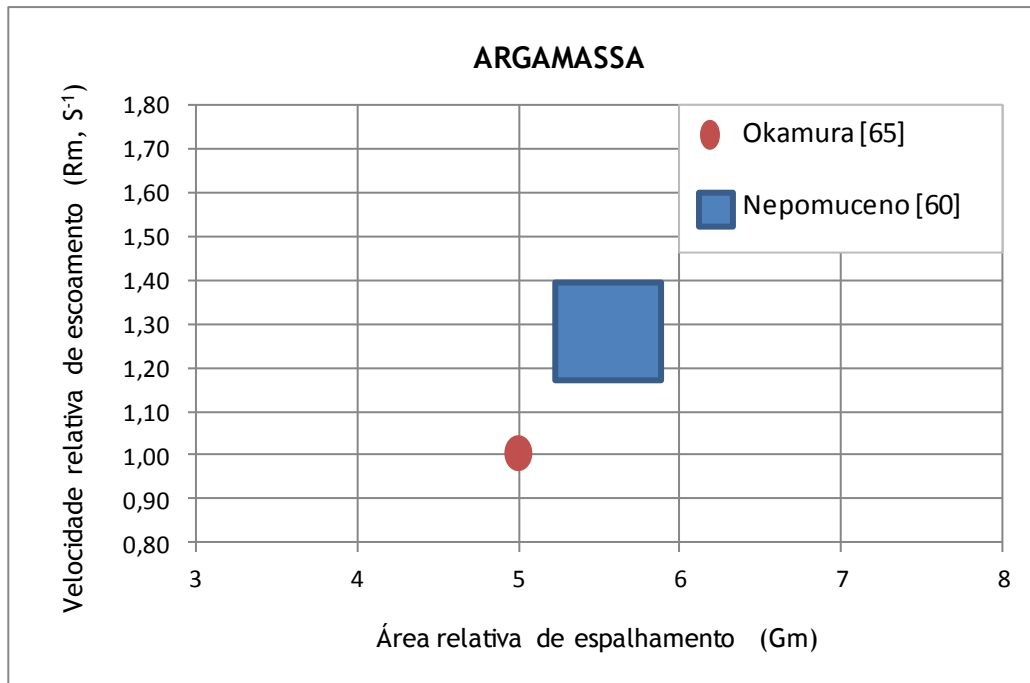


Fig. 4.17. Intervalo de variação dos parâmetros Gm e Rm [60, 66].

4.4.2 - ETAPA II: Caracterização das argamassas no estado fresco

4.4.2.1- Amassadura

Após a pesagem dos componentes da argamassa procedeu-se à amassadura. A amassadura deve decorrer de acordo com procedimentos bem definidos, quer em termos de tempos de mistura e de paragem, quer relativamente à sequência de introdução dos componentes. Num estudo levado a cabo por Nepomuceno, devido à maquinaria utilizada para a amassadura deste tipo de argamassas, fora constatado no seu trabalho que parte do material ficava “colado” às pás. Sendo importante não rejeitar este facto, o esquema desenvolvido de Domone et al. foi modificado ligeiramente com atribuição de um determinado tempo para a limpeza das pás (Fig. 4.18). O tempo de amassadura foi medido com um cronómetro que era parado sempre que era efetuada a limpeza da pá e superfície do recipiente que continha a argamassa [60].

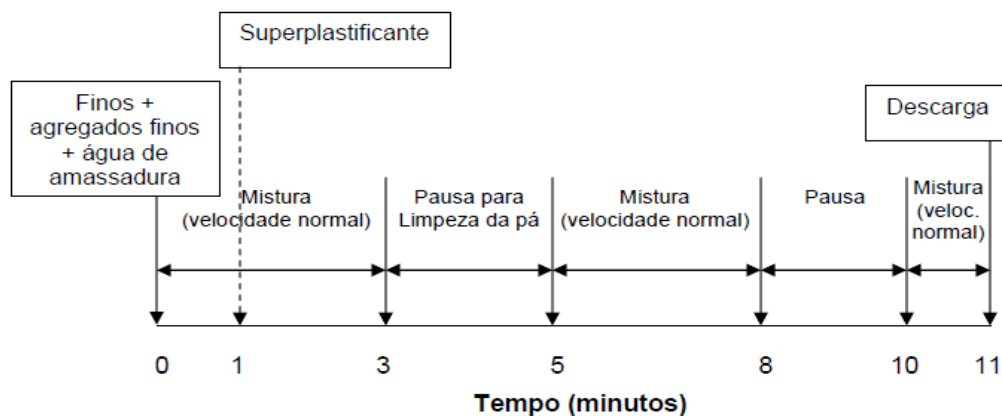


Fig. 4.18. Sequência de amassadura adotada neste trabalho [60].

A misturadora utilizada para as amassaduras é programável com o objetivo específico de produzir argamassas e pastas normalizadas. Esta tem mecanismos automatizados para a introdução dos diferentes materiais, mas foi usada manualmente. Quando foram ensaiadas as argamassas com cinzas de lamas a 700°C e 900°C, houve necessidade de introduzir a água antes de ser instalado no mecanismo da misturadora, pois foi verificado, anteriormente, que a água não teria sido adequadamente absorvida quando as pás fazem a mesma mistura. A solução foi conseguida pela impregnação total do material à mão para garantir homogeneidade em toda a mistura. A introdução do superplastificante foi realizada sem interrupção na mistura enquanto a pá da misturadora se encontrava em ação.

O processo de amassadura é ilustrado na Fig. 4.19. A primeira imagem [Fig. 4.19 a)] mostra as pás da betoneira; segue-se a inserção da água no material [Fig. 4.19 b)]. O conteúdo é colocado na misturadora e inicia-se a amassadura [Fig. 4.19 c)]. Com o apoio de um cronómetro começam aqui as etapas da mistura: após o primeiro minuto, acrescenta-se o superplastificante [Fig. 4.19 d)] à mistura, em que esta continua sem interrupção. A amassadura deve ser parada no terceiro minuto completo, pois é nesta fase que se faz a limpeza das pás e da superfície do recipiente [Fig. 4.19 e)]. Seguidamente, liga-se de novo a misturadora [Fig. 4.19 f)] durante três minutos sem interrupções. Concluído este tempo, faz-se de novo uma pausa de dois minutos. A argamassa só é finalizada quando se torna a fazer uma última amassadura de um minuto [Fig. 4.19 g)].



Fig. 4.19. Procedimento de amassadura das argamassas.

4.4.2.2 - Ensaio no estado fresco

No final de todo o processo de amassadura, efectuam-se os ensaios no estado fresco. A amassadura é levada imediatamente para os equipamentos de ensaio da área de espalhamento e da fluidez, apresentados no capítulo da exposição bibliográfica. Em primeiro lugar, é analisada pelo ensaio de espalhamento e, de seguida, pelo ensaio de fluidez. Como não existem normas nacionais ou estrangeiras aplicáveis a estes dois casos, inclui-se uma breve descrição para se poder compreender melhor estes ensaios.

Os ensaios escolhidos para caracterizar as propriedades reológicas são designados, por todo o mundo, como o “ensaio de espalhamento” e o “ensaio de fluidez”. Estes ensaios são uma boa alternativa ao ensaio feito por reómetros, pois um estudo bibliográfico comprova que a tensão de corte está relacionada com a deformabilidade medida através do diâmetro de espalhamento de um tronco cónico de argamassa e que a viscosidade plástica está relacionada com a fluidez medida pelo tempo de escoamento deste material num funil com faces planas.

4.4.2.2.1 - Ensaio de espalhamento

O ensaio de espalhamento começa quando o cone é enchido com argamassa no seu estado fresco, logo após a sua amassadura, conforme ilustra a Fig. 4.20 a) e b). Esta deve ficar ao mesmo nível do topo do cone [Fig. 4.20 c)] e não deve existir nenhuma perturbação de agitação ou vibração na base que esta for deformar.

Logo que este procedimento esteja concluído, deve levantar-se uniformemente o cone [Fig. 4.20 d)]. Deixa-se que a argamassa se deforme sozinha, para que, posteriormente, seja avaliado o seu diâmetro máximo [Fig. 4.19 e)]. Após cessar a deformação, procede-se à

medição de dois diâmetros perpendicularmente [Fig. 4.20 f)]. A resposta deste ensaio é traduzida pelo diâmetro médio de espalhamento (D_m).

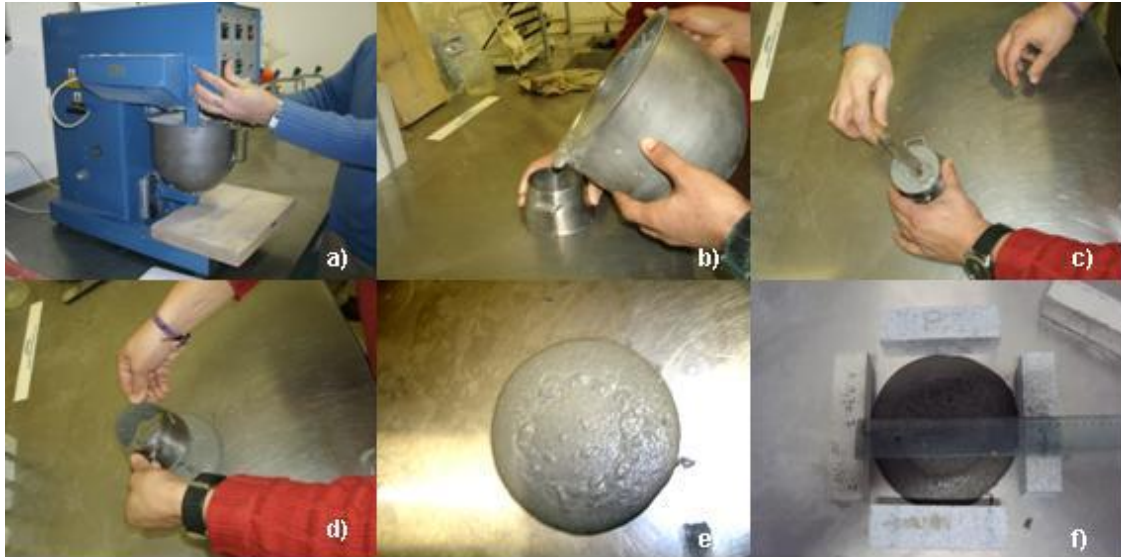


Fig. 4.20. Apresentação dos processos para o ensaio de espalhamento.

O resultado do ensaio pode ser expresso em termos de área de espalhamento relativa, traduzida pela seguinte expressão [69, 71, 89]:

$$G_m = (D_m/D_0)^2 - 1 \quad (4.21)$$

Sendo:

G_m , área de espalhamento relativa;

D_m , diâmetro médio de espalhamento [mm];

D_0 , diâmetro inicial na base do cone [mm].

4.4.2.2.2 - Ensaio de fluidez

A estrutura do funil de ensaio deve, em primeiro lugar, estar numa base firme e nivelada. Para um correto ensaio, deve-se humedecer o interior do funil. Mesmo durante o decorrer do ensaio até ao escoamento da argamassa não podem, em qualquer momento, existir oscilações que perturbem a análise deste.

Com as condições assim garantidas, procede-se ao enchimento do funil conforme ilustra a Fig. 4.21 a). Após o funil cheio, a superfície da argamassa deve estar paralela com o contorno interior do funil [Fig. 4.21 b)]. Como foi referido no anterior parágrafo, não deve existir nenhuma forma de vibração ou compactação.

Estando o funil preenchido com argamassa, procede-se à etapa seguinte. O cronómetro é acionado quando se abre a comporta para medição do tempo de escoamento. O tempo, porém, é cessado mal se vislumbre o primeiro raio de luz, observável do cimo do funil. A Figura 4.21 c) ilustra o escoamento da mistura após a abertura da comporta.

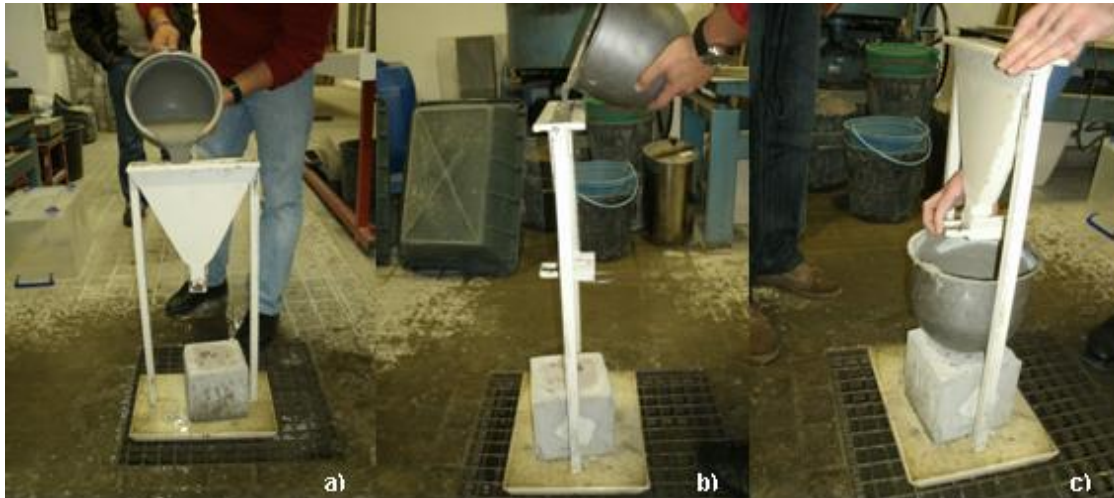


Fig. 4.21. Apresentação dos processos durante o ensaio de fluidez.

A interpretação dos resultados para o ensaio de fluidez é expresso diretamente pelo tempo de escoamento (t), medido em segundos. Okamura et al. desenvolveram outra forma de interpretar os resultados deste ensaio através da velocidade relativa de escoamento traduzida pela seguinte expressão [69, 71, 89]:

$$R_m = (10/t) \quad (4.22)$$

Sendo:

R_m , velocidade relativa de escoamento [s^{-1}];

t , tempo de escoamento [s].

4.4.2.3- Método de obtenção das propriedades reológicas pretendidas

Os ensaios para cada argamassa de “família de finos” só terminam quando estes atingem uma adequada deformabilidade. A Figura 4.22 ilustra o procedimento de acerto de uma mistura em particular (A.SG.FC). Nessa figura os primeiros parâmetros encontrados, $G_{m_{FC,1}}$ e $R_{m_{FC,1}}$, deram valores respetivamente de 5,50 e 0,60. São apresentados os limites ótimos pela área desenvolvida por Nepomuceno, mas estes não foram atingidos. Optou-se, então, por reduzir o superplastificante para aumentar um pouco a inclinação do ângulo da linha e aumentar o teor de água. Com isto, deu um $G_{m_{FC,2}}$ de 2,3 e um $R_{m_{FC,2}}$ de 0,70, muito abaixo do pretendido. Tomou-se a analisar a mistura, aumentando %Sp/P e deixando constante o teor de água. Com

isto, o $Gm_{FC,4}$ e $Rm_{FC,4}$ aproximaram-se (4,00; 1,00). Foram feitas as mesmas analogias até chegar ao ponto pretendido por $Gm_{FC,5}$ (5,70) e $Rm_{FC,5}$ (1,20). Quando este ponto é conseguido, a argamassa é depositada nos recipientes de cofragem para posterior exame às argamassas no estado endurecido. Posteriormente, serão submetidos aos ensaios de resistência (compressão), que encerram o objetivo desta dissertação.

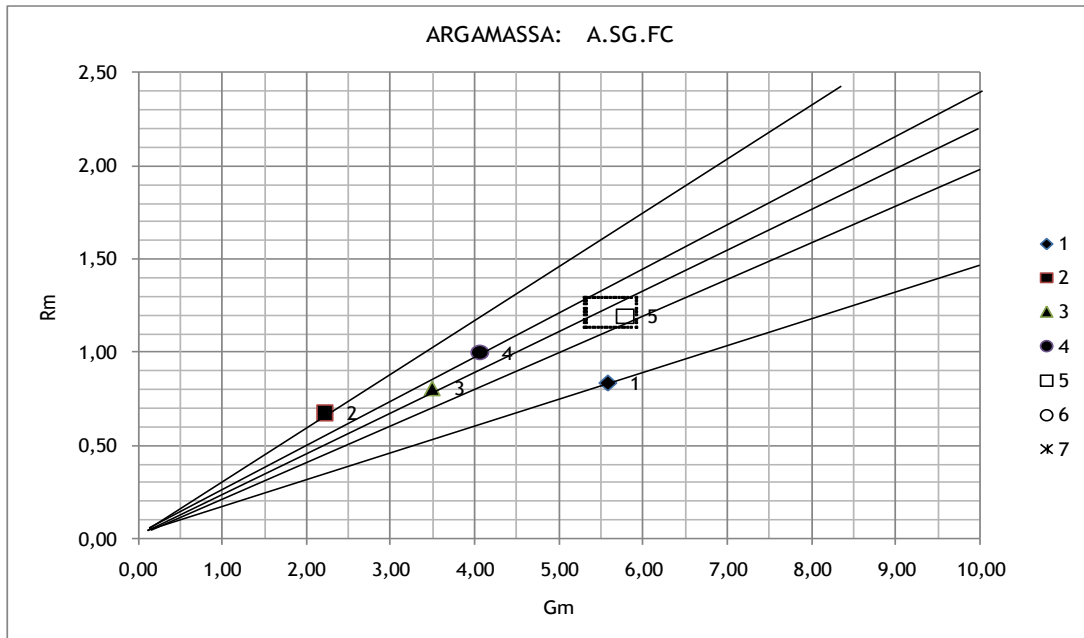


Fig. 4.22. Exemplo do processo de acerto da mistura.

4.4.2.4 - Moldagem de provetes

Após os ensaios no estado fresco, as argamassas que cumpriram os critérios reológicos foram vertidas em moldes prismáticos de $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}^3$, sem qualquer compactação ou outra acção externa similar, e devidamente catalogadas (Fig. 4.23). Após a moldagem, os provetes foram protegidos com um filme plástico e permanecem no interior do laboratório durante 24 horas, altura em que foram descofrados e colocados numa câmara de cura à temperatura de $20 \pm 2^\circ\text{C}$ e humidade relativa superior ou igual a 90%. A este respeito, importa referir que as argamassas com cinzas de lamas apresentaram um retardamento da presa muito elevado (por vezes alguns dias), pelo que, neste caso, as argamassas foram colocadas na câmara de cura às 24 horas de idade, mas permanecendo no interior dos moldes.

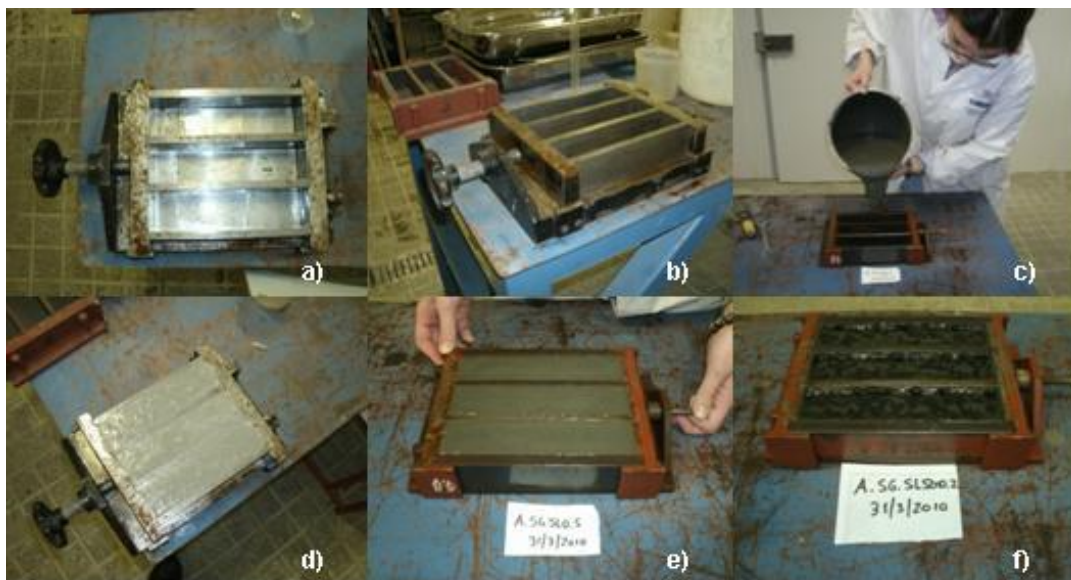


Fig. 4.23. Apresentação da introdução da argamassa fresca nos moldes de cofragem.

4.4.3 - ETAPA III: Caracterização das argamassas no estado endurecido

4.4.3.1- Preparação dos provetes

Aos 28 dias de idade os provetes foram retirados da câmara de cura e devidamente catalogados (Fig. 4.24). Seguidamente, procedeu-se à divisão dos 3 paralelepípedos de cada caixa de moldagem e foi cada um deles designado com uma sigla única e número para posteriores medições da resistência à compressão.



Fig. 4.24. Apresentação das argamassas aos 28 dias de idade.

4.4.3.2 - Ensaio de resistência à compressão

Todos os provetes foram medidos em três direções ortogonais para posteriores correções, pois verificou-se que alguns provetes mostravam variações díspares que poderiam prejudicar o resultado real. Antes do ensaio propriamente dito, foram pesados os provetes ainda inteiros assim como foram registadas as suas reais dimensões [Fig. 4.25 c)]. De seguida, e com cada provete numerado e partido ao meio [Fig. 4.25 d)] iniciou-se o ensaio à compressão, utilizando a prensa que as Fig.s 4.25 e) e f) assim ilustram.

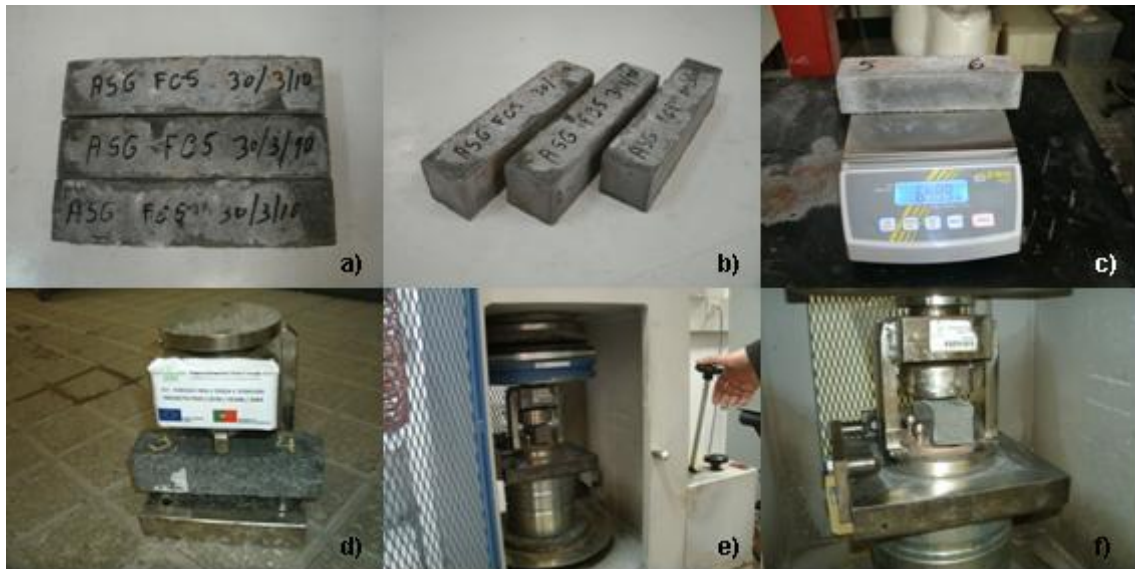


Fig. 4.25. Ensaio de resistência à compressão aos 28 dias.

Os provetes foram comprimidos segundo uma direção perpendicular à direção de moldagem (Fig. 4.26). A taxa de compressão foi de 1,0 kN/s. A Figura 4.25 ilustra os diferentes grupos de provetes ensaiados, a que correspondem diferentes famílias de argamassas.

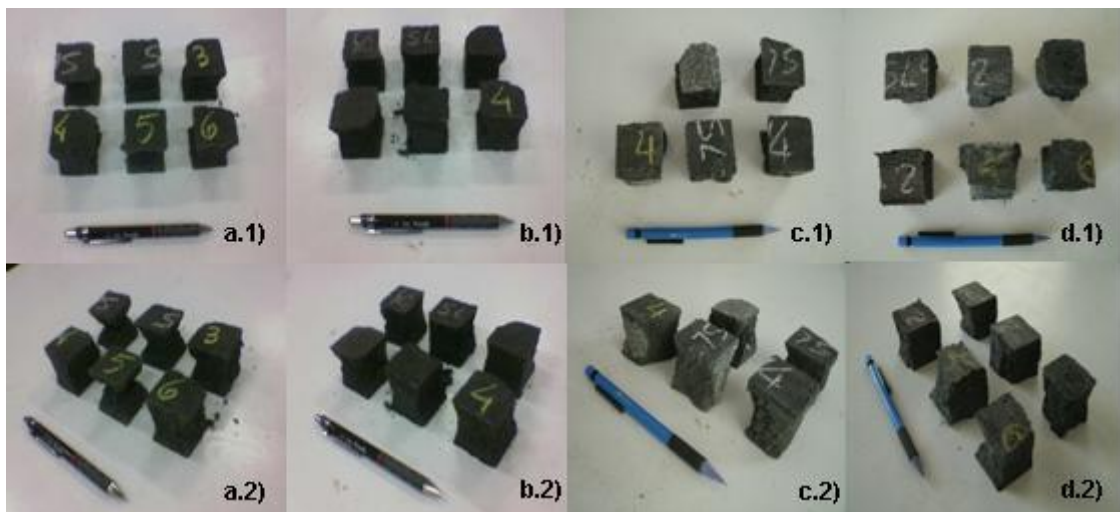


Fig. 4.26. Apresentação dos provetes no final do ensaio de resistência à compressão.

Capítulo 5- Apresentação e discussão dos resultados

5.1- Introdução

No presente capítulo são feitas as apresentações dos resultados inerentes ao caso de estudo que decorreu ao longo desta investigação. A sequência está estruturada conforme o capítulo anterior para melhor apreciação do conteúdo.

5.2- Caracterização dos materiais utilizados

O tamanho das partículas do Fíler Calcário situa-se entre os 1,047 a 22,73 μm e o tamanho das lamas nos vários estados de calcinação situa-se entre 1,49 e os 47,94 μm . O volume diferencial máximo no fíler calcário situa-se nos 2,42 μm , enquanto nas lamas SL0, SL500 e SL950, nos 33,01 μm . De SL500 para SL700 houve uma acentuada mudança nas partículas, situando-se o seu volume diferencial máximo em 22,73 μm e de SL700 para SL900, uma outra oscilação no tamanho da partícula deste volume que aumentou para os 36,24 μm .

Tendo em conta a média do intervalo de cada uma das adições correspondentes ao fíler calcário e lamas, respetivamente, a partícula do fíler calcário situa-se em média nos 6,16 μm , enquanto nos mais variados estados de calcinação existe uma significativa tendência na diminuição dos tamanhos médios de 14,26 μm (SL0) para 10,78 μm (SL700), e uma significativa mudança a partir deste estado subindo para os 17,18 μm .

Outros estudos mostram que o diâmetro da partícula em 90% e máxima, é respetivamente de 23,84 e 100 μm , e o valor médio de cerca de 17,82 μm [74, 76, 81]. Comparativamente a outro tipo de cinzas de ETAR, o tamanho médio maioritário situa-se entre 74 μm e os 300 μm [11]. Talvez se deva à variação do grau de moagem para os aglomerados das lamas secas, pois, quando dissipada a humidade que elas contém, estas têm que ser moídas para que possam ser usadas em argamassa [79].

5.3 - Caracterização física-química

5.3.1 - Massa volúmica

As massas volúmicas das lamas ao longo do tratamento térmico, como se pode constatar no gráfico apresentado na Fig. 5.1, foram variando desde o SL0, SL500, SL700, SL900 e SL950, respetivamente 1,7 g/cm^3 , 2,1 g/cm^3 , 2,2 g/cm^3 , 2,5 g/cm^3 e 3,1 g/cm^3 . Nota-se nitidamente um aumento da massa volúmica com o aumento da temperatura do tratamento térmico a que estiveram expostas as lamas de clarificação das águas (Caldeirão). Estudos mostram um peso específico médio de 2,2 g/cm^3 para as lamas de clarificação de água [76].

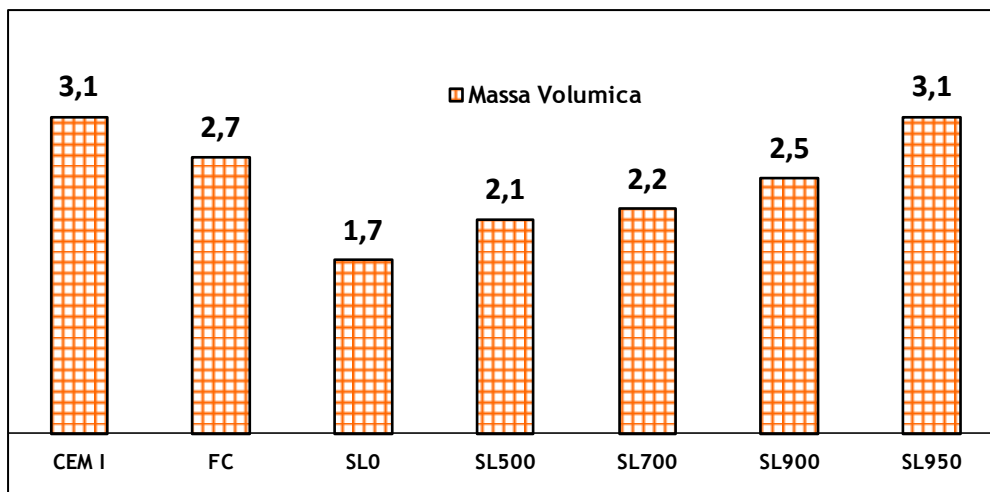


Fig. 5.1. Comparação das massas volúmicas de cada tipo de material.

A massa volúmica do Cimento CEM I 42,5 R é igual à da lama submetida a uma temperatura de 950°C durante 5 horas, com um valor de 3,1 g/cm³. Estudos revelam que a superfície específica destas lamas e do cimento é, respetivamente, de 3,29 m²/g e 4,00 m²/g, sendo sensivelmente maior a área desta última [76].

5.3.2 - Curva granulométrica das adições

A Figura 5.2 mostra que a variação da distribuição das partículas das lamas SL0, SL500, SL900 e SL950 é pouco significativa. As cinzas volantes e o fíler granítico são as adições minerais que se assemelham às lamas testadas em termos de distribuição granulométrica.

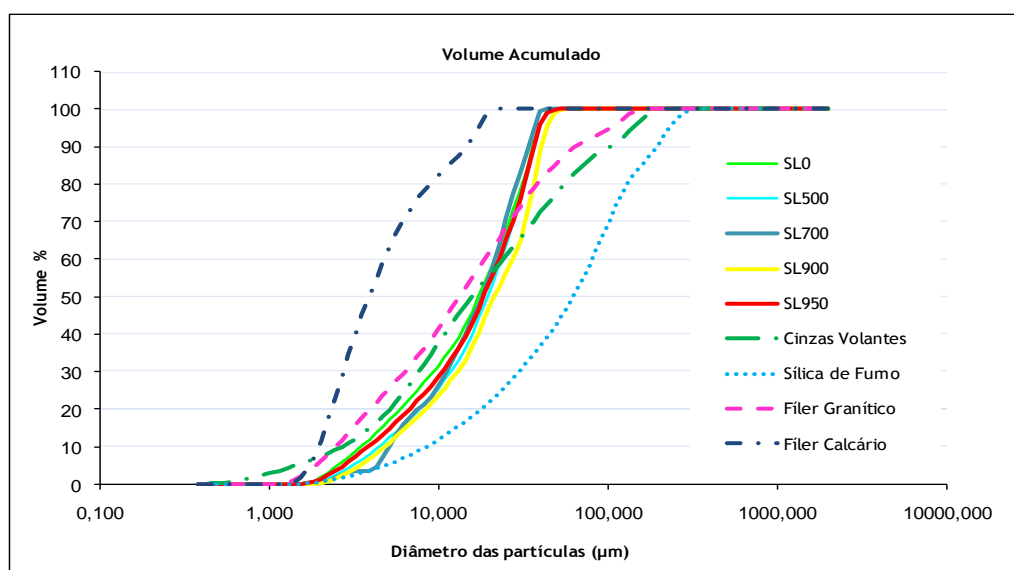


Fig. 5.2. Volume acumulado da distribuição do tamanho das partículas das adições.

Na variação diferencial das partículas das lamas SL0, SL500 e SL700 é nítida a instabilidade em alguns picos (Fig. 5.3), mas nas lamas SL900 e SL950 os picos principais tendem a igualar-

se. A discrepância destes dois relatos deve-se, provavelmente, à matéria orgânica e aos compostos de carbonos que não foram queimados. Nas restantes adições, a distribuição diferencial é muito divergente daquela obtida nas cinzas de lamas.

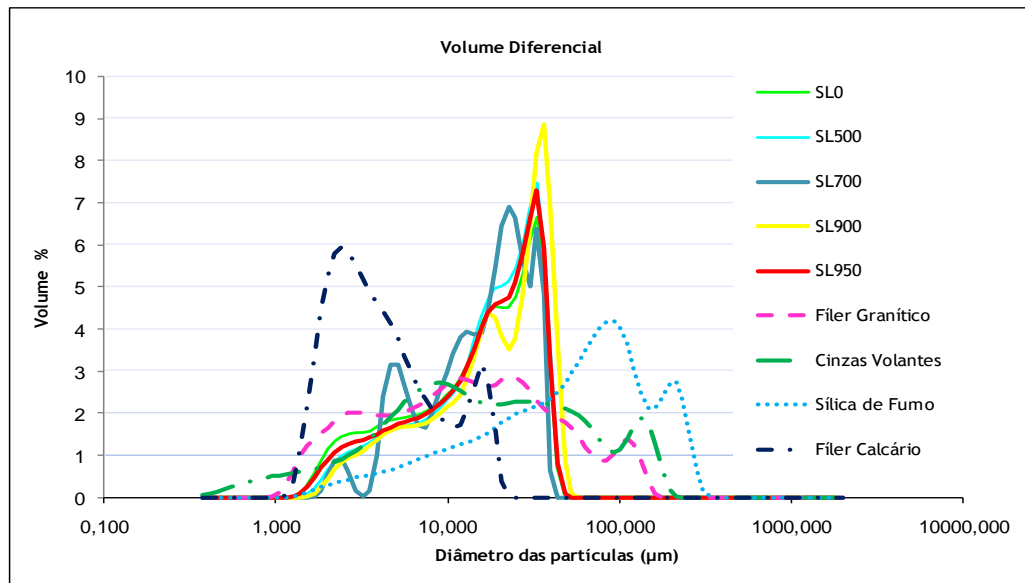


Fig. 5.3. Volume diferencial da distribuição das partículas das adições.

5.3.3 - Principais constituintes químicos e atômicos das lamas

As lamas de clarificação são um subproduto resultante do processo de tratamento de água para o consumo humano, compostas por matéria orgânica provinda da sujidade das águas e carbono que é um dos compostos utilizados para tratamento de águas.

A matéria orgânica e o carbono existentes foram observados no seu estado bruto, com valores de 58 e 31 por cento, respetivamente, como se pode comprovar na Fig. 5.4. Estes valores são muito mais altos do que os valores anunciados por alguns autores, tais como: Gonçalves et al., com valor de 6 por cento em matéria orgânica, e Rodríguez et al., com uma perda de matéria orgânica entre 10-12 por cento e carbono 2,9 por cento [36, 79]. Desta maneira, comprova-se que estes valores díspares são devidos à quantidade de matéria orgânica na água e à quantidade de produto necessário para a sua eliminação e purificação. Constatou-se noutros estudos que o carbono não é totalmente queimado aos 500°C com duração de 1 h, pois a cristalização na fase vítrea e aglomeração de partículas não ocorreu durante essa mesma fase [10]. Em experiências conduzidas por outros autores com cinzas de lamas secas, após a incineração a temperaturas até 1000 °C, observou-se que além da extinção da matéria orgânica as estruturas cristalinas foram eliminadas gerando assim uma pozolana artificial [76, 79].

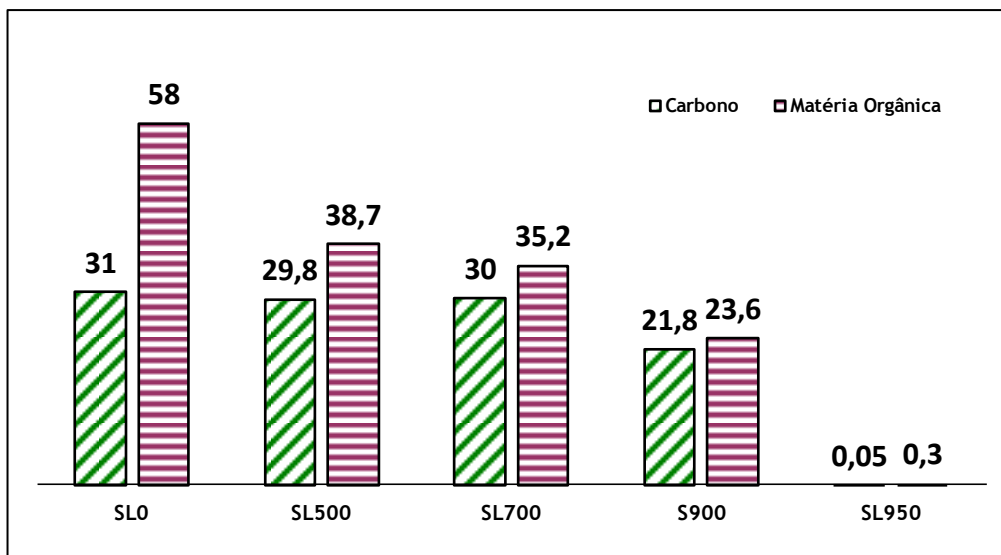


Fig. 5.4. Percentagem (%) de matéria orgânica e carbono nas cinzas de lamas.

Através da Figura 5.5 podem ser apurados os diferentes níveis atômicos com a presença evidente dos elementos maioritários de Carbono (C) e Oxigênio (O). Paralelamente, o Carbono (C) mantém-se em constante descida com o aumento da temperatura do tratamento térmico das lamas, enquanto para o Oxigênio (O) as percentagens tendem a subir ligeiramente, havendo uma maior subida a partir dos 950 °C. Para os elementos de C, os valores nas lamas SL0 são de 49,2 por cento; nas lamas SL900, de 42,1 por cento; a partir dos 950°C desaparece este elemento atômico. Para o elemento de O, os valores incrementam de 42,38 por cento (lamas SL0) para 74,7 por cento (nas lamas SL950). A percentagem de alumínio (Al) e silício (Si) tendem a aumentar a partir dos 950°C.

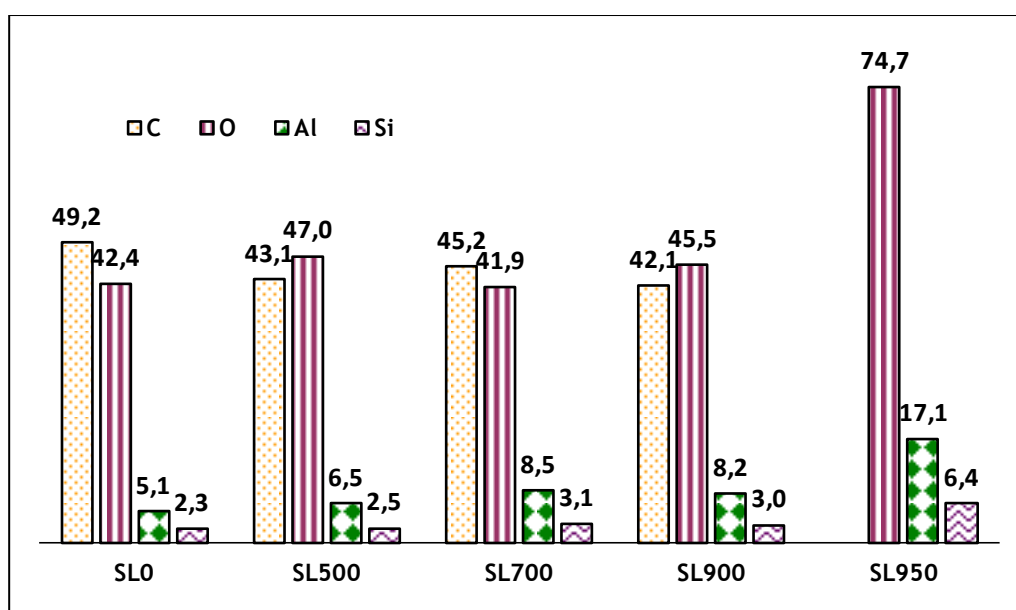


Fig. 5.5. Percentagem (%) dos compostos atômicos maioritários das cinzas de lamas.

Nos elementos atômicos minoritários presentes na Fig. 5.6, a percentagem maior é de ferro (Fe). Acredita-se, também, que essa quantidade anormal de ferro pode atribuir-se à libertação de partículas do molde de ensaio (aço) para o espécime. Outras percentagens que também são notórias e tendem a crescer com o tratamento térmico das lamas são o Cálcio (Ca) e o Potássio (K). O enxofre (S), por sua vez, deixa de existir a partir do tratamento térmico aos 950°C.

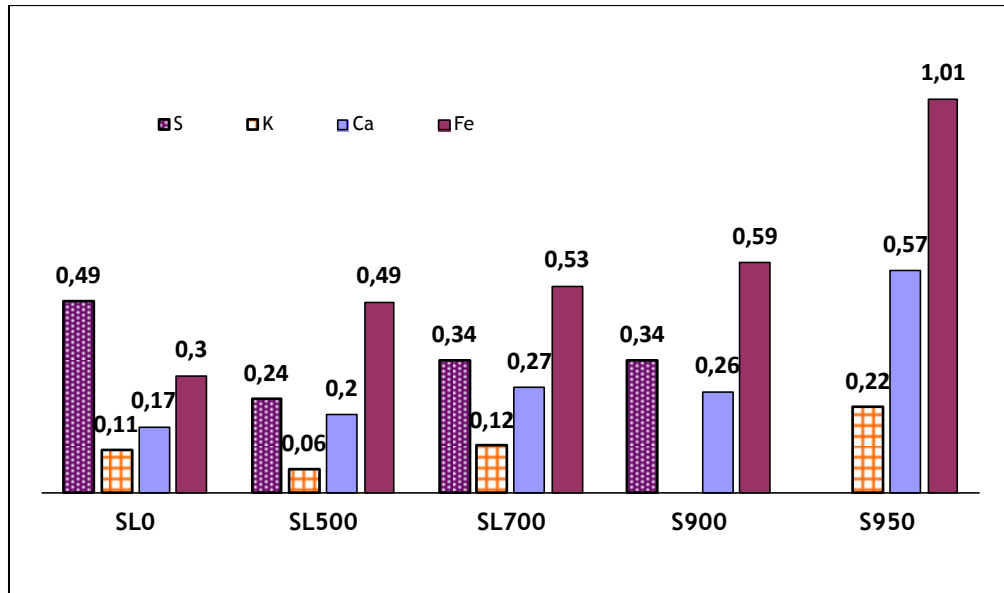


Fig. 5.6. Percentagem (%) dos principais constituintes atômicos minoritários das cinzas de lamas.

Em várias análises, tanto nas lamas de ETA como nas de ETAR, manifesta-se um potencial de lixiviação de metais, mas pode ser insignificante quando submetidas a altas temperaturas. Os elementos de metal encaminhados a um tratamento térmico mais elevado, normalmente, retribui estes elementos em forma de óxidos, e como resultado a percentagem de metais pesados é baixa, pois na presença das cinzas das lamas e argila, queimadas a estas temperaturas, sujeitas a uma formação de óxidos de metais, minimizam, desta forma, os metais pesados que possam estar presentes neste tipo de adições minerais de lamas [50].

Na Figura 5.7 apresentam-se os elementos químicos maioritários presentes nas cinzas de lamas: o óxido de Alumínio (Al_2O_3) e o óxido de silício ou sílica (SiO_2). Estes dois compostos devem-se sobretudo à recomposição das suas estruturas na presença de Oxigénio. O aumento de Al_2O_3 é maior em SL950, com valor de 60,6 por cento; é nesta fase que o composto de O é maior, enquanto o composto de SiO_2 vai sendo constante em todos os tipos de cinzas de lamas com um valor médio de 30 por cento.

Outros elementos constatados, mas em menor percentagem, são o óxido de ferro (Fe_2O_3), com valor médio de 6 por cento, sulfato (SO_4), com um decréscimo até as lamas calcinadas a

900°C, Óxido de cálcio (CaO), com um valor médio de 2 por cento, e o Óxido de potássio (K₂O) vai crescendo, moderadamente, com o aumento da temperatura de calcinação.

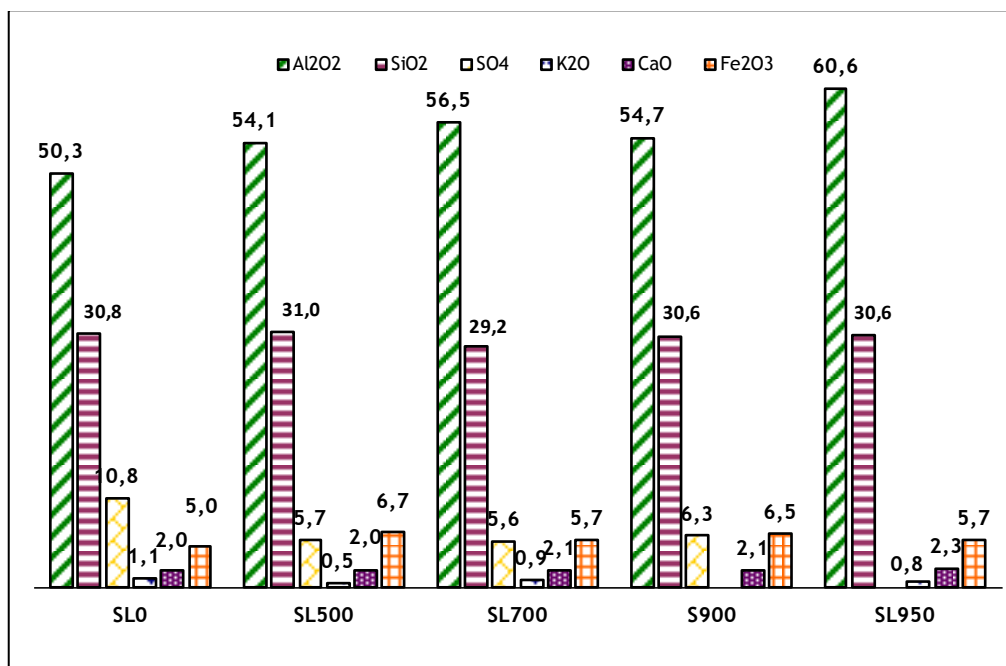


Fig. 5.7. Percentagem (%) dos principais constituintes químicos das cinzas de lamas.

Alguns estudos vêm comprovar, também, a presença de outros elementos maioritários como o alumínio e o cálcio. Estes elementos presenciais são os principais agentes flocculantes e clarificantes da água (sulfato de alumínio e cal), respectivamente. Assim, deste modo, justificam a existência de quantidades razoáveis destes elementos químicos presentes em cada fase de calcinação. Este material pode ser obtido com diferentes teores de CaO (óxido de cálcio), de acordo com o processo de manipulação dos resíduos gerados [36, 74, 76, 79]. Outros estudos comprovam a existência de hidróxido de cálcio e de calcite [79].

5.3.4 - Capacidade pozolânica das amostras de cinzas de lamas

As porcentagens maioritárias de composições químicas, tal como foram já referidas, são Al₂O₃ e SiO₂, respectivamente de 60,63 e 30,00 por cento. Estes compostos foram analisados através de estudos feitos anteriormente. Alguns investigadores relatam a incapacidade de eliminação dos coagulantes por tratamento térmico, sendo também os principais responsáveis pela atividade pozolana deste material [41, 79, 62]. Como contém a presença de silício, este funde-se com as pozolanas contribuindo para novos compostos como é o caso de SiO₄ e de AlO₄, como comprovam mais estudos, em que 4% deste material é refratário [14, 36, 63].

5.4 - Caracterização das argamassas auto-compactáveis

5.4.1 - Proporções das misturas

A percentagem de substituição do cimento pela adição foi mantida constante em todas as argamassas produzidas, situando-se nos 30%, quer para as argamassas com fíler calcário (FC), quer para cada uma das argamassas com cinzas de lamas (SL0, SL500, SL700 e SL900). A argamassa com SL950 não foi produzida. Em todas as misturas o valor de V_p/V_s manteve-se constante em 0,80. Os parâmetros V_w/V_p e $S_p/P\%$ foram sistematicamente ajustados até que se atingissem as propriedades reológicas pretendidas [60, 18].

Na Figura 5.8 apresentam-se as quantidades (expressas em gramas) de materiais utilizados em cada família de argamassas para produzir a amassadura de 1,6 litros com idênticas propriedades reológicas. As quantidades de cimento são sensivelmente iguais para as argamassas SL500 e SL700, com um ligeiro aumento para SL900. O maior consumo de cimento foi registado na mistura de referência com fíler calcário. Estas pequenas discrepâncias são consequência natural das diferenças em termos de massa volúmica das adições, uma vez que V_p/V_s permanece constante, ou seja, para um mesmo volume de adição obtém-se uma massa diferente. Também por essa mesma razão se verificou uma maior dosagem em massa de adição de lamas de SL900 do que SL0.

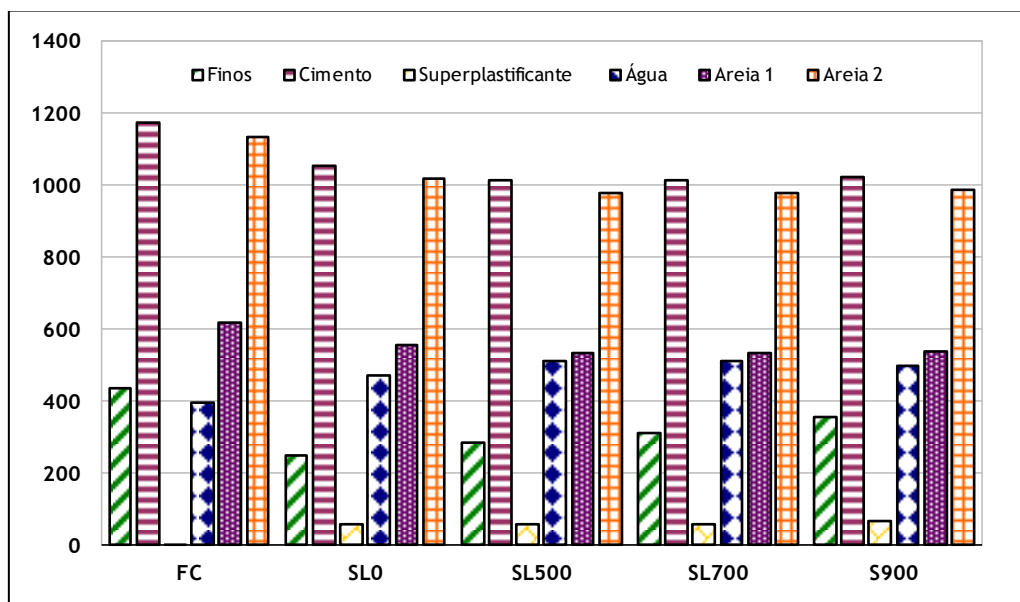


Fig. 5.8 Materiais utilizados em cada família de argamassas para um volume de 1,6 l, em gramas.

Na Figura 5.8 observa-se ainda que a dosagem de superplastificante em todas as misturas com cinzas de lamas foi sempre muito superior àquela registada na mistura com fíler calcário. Se se observar apenas as argamassas com cinzas de lamas, verifica-se uma ligeira oscilação dos níveis de superplastificante com um ligeiro aumento de 5g para SL900. Alguns investigadores comprovaram que a dosagem de superplastificante não está ligada ao grau de finura, mas ao

tipo de superplastificante empregue com determinadas adições [80, 8]. Porém, uma possível justificação para o elevado consumo de superplastificante nas argamassas com cinzas de lamas, comparativamente com a de fíler calcário, pode ficar dever-se à presença de carbono não queimado que adsorveu uma grande quantidade de superplastificante [10].

Ainda na Figura 5.8, no caso dos agregados finos, nota-se um maior consumo na mistura com fíler calcário face às restantes. Este facto está directamente associado aos menores volumes de água e de superplastificante nesta mistura, que deixaram maior volume disponível para a componente sólida.

A Figura 5.9 apresenta a variação das dosagens de água e de cimento (expressas em gramas) para cada amassadura de 1,6 litros. É visível um aumento das dosagens de água nas misturas que incorporaram cinzas de lamas comparativamente à mistura com fíler calcário, para obter as mesmas propriedades reológicas. O aumento das dosagens de água, mas também do superplastificante, obrigaram a uma redução do volume sólido e, em consequência, a uma redução das dosagens efectivas de cimento e de agregados finos.

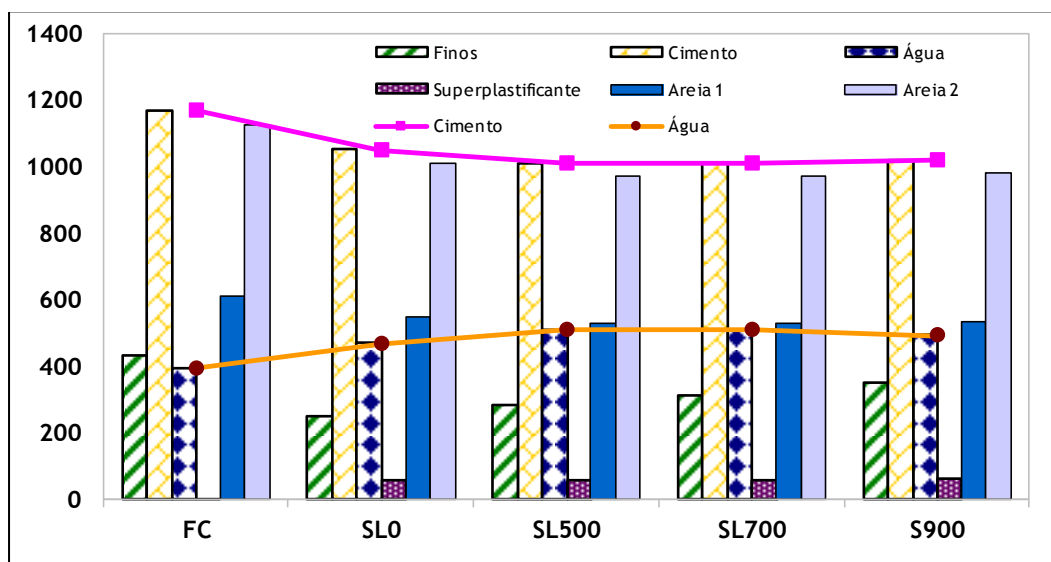


Fig. 5.9. Quantidades de água e de cimento para cada amassadura de 1,6 litros, em gramas.

5.4.2 - Razão água/cimento e água/finos.

A Figura 5.10 apresenta a razão água/cimento (A/C) e a razão água/finos (A/F) das diferentes argamassas produzidas. As razões A/C mais elevadas encontram-se nas argamassas com SL500 e SL700, porém, têm tendência a diminuir, como se mostra para a argamassa com SL900. O fíler calcário é o que detém menor razão A/C.

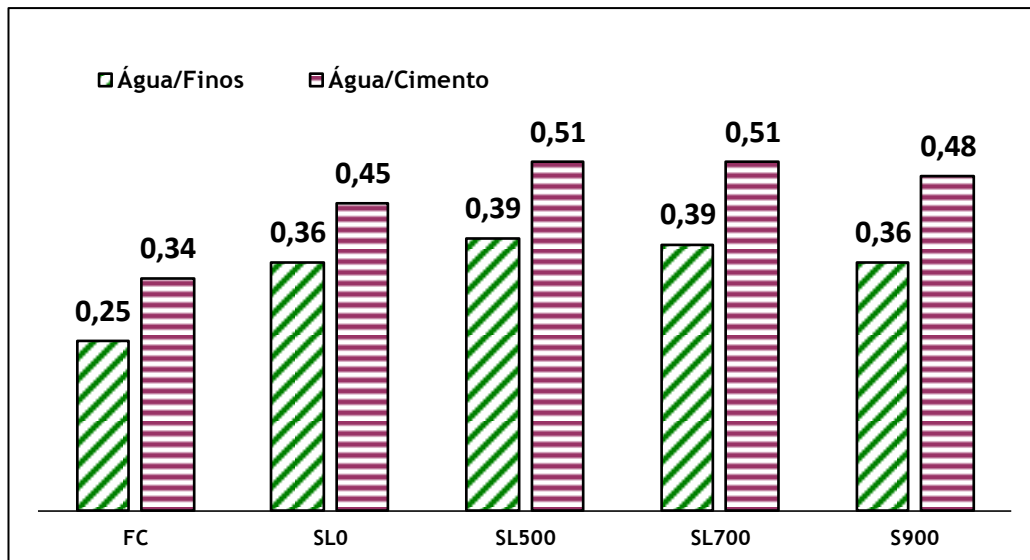


Fig. 5.10. Razões água/finos e água/cimento das argamassas produzidas.

5.4.3 - Parâmetros reológicos

Os parâmetros reológicos das argamassas foram avaliados indiretamente através do “cone de espalhamento” e do “funil-v”. No ensaio de espalhamento obteve-se um valor do diâmetro médio de espalhamento (D_m) de 261 mm para as argamassas com fíler calcário e SL500, 263 mm para a argamassa com SLO, 268 mm para a argamassa com SL700 e 247 mm para a argamassa com SL900. No ensaio de fluidez, registou-se um tempo de escoamento (t) de 8,36 s para a argamassa com fíler calcário, 8,32 s para a argamassa com SLO, 9,35 s para a argamassa com SL500, 8,24 s para a argamassa com SL700 e 5,22 s para a argamassa com SL900. Estes valores estão ligados diretamente com os limites ótimos de trabalhabilidade. No entanto, existem alguns inconvenientes para o caso dos vários tipos de cinzas de lamas no que se refere à trabalhabilidade, tendo a razão de água/finos e superplastificante que ser aumentada em comparação com o fíler calcário.

É relatado, também, em estudos, que as argamassas efetuadas com o tipo de cimento CEM I 42,5/SR Portland, cimento misturado com 30 por cento de lamas, exibem um decréscimo no escoamento [79]. Não obstante, as práticas com fíler calcário, cinzas volantes e lamas melhoraram consideravelmente a perda de fluidez ao longo do tempo com este tipo de adições [8, 80, 76].

Com a primeira análise para a “família de finos” de fíler calcário da argamassa A.SG.FC da Fig. 5.11, chegou-se a resultados para $G_{m_{FC,1}}$ de 5,58 e $R_{m_{FC,1}}$ de 0,84. Como estes valores estavam muito abaixo do valor pretendido, optou-se, então, por diminuir a quantidade de superplastificante e aumentar-se, assim, a quantidade de água V_w/V_p , para que o ângulo da curva atinja “área ótima”. Porém, com este processo, a reta afastou-se em demasia. Então, foi necessário aumentar o $Sp/P\%$ e manter-se o V_w/V_p constante, dando assim valores mais

aproximados. Este processo só foi alcançado quando se aumentaram as dosagens de Sp/P% (0,76) e a razão Vw/Vp de (0,54), atingindo deste modo os parâmetros pretendidos com um $Rm_{FC,final}$ de 1,2 e um $Gm_{FC,final}$ de 5,79.

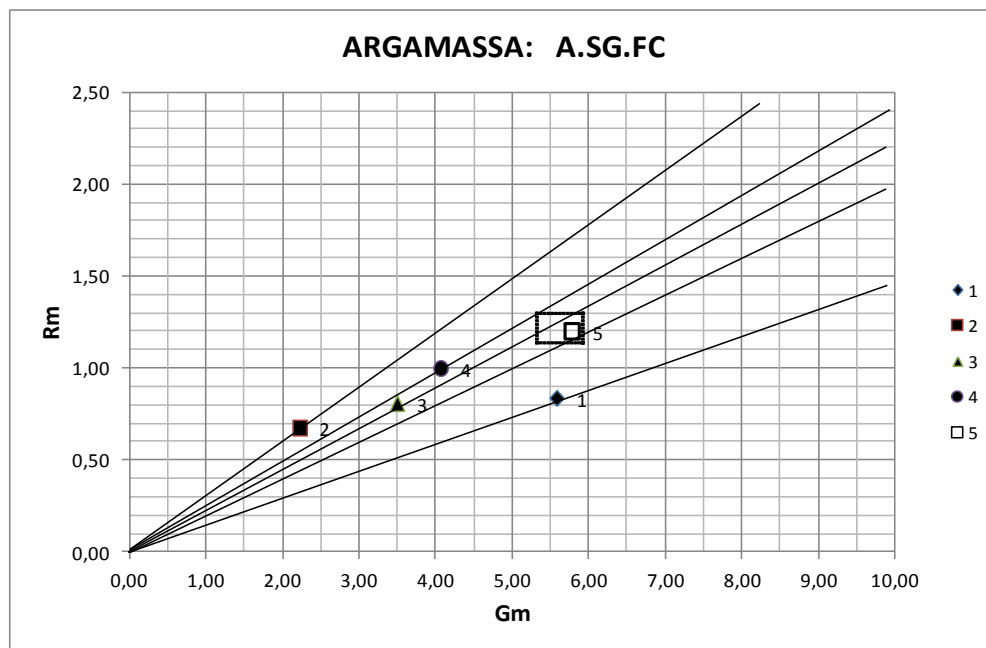


Fig. 5.11. Otimização dos parâmetros reológicos de Rm e Gm para FC

No caso da argamassa com SL0, de acordo com a bibliografia abordada anteriormente, averiguou-se que o superplastificante seria em maior quantidade para este tipo de material, como se pode observar na Fig. 5.12, onde o Vw/Vp foi de 1,35 e Sp/P% de 2,65. Para a argamassa A.SG.SL0, como era necessário que a curva tivesse uma tendência a diminuir para atingir a “área ótima”, aumentou-se a dose de superplastificante (3,50) e diminuiu-se a percentagem de Vw/Vp (1,10), deste modo ainda se afastou muito mais do ponto pretendido. Então, aumentou-se praticamente para o dobro de Sp/P% (4,50) e diminuiu-se a razão Vw/Vp (0,98). O ponto ótimo só foi alcançado quando se manteve constante o Sp/P% (4,5) e se diminuiu o teor de água Vw/Vp (0,94), atingindo-se desse modo um $Rm_{SL0,final}$ de 1,20 e um $Gm_{SL0,final}$ de 5,92.

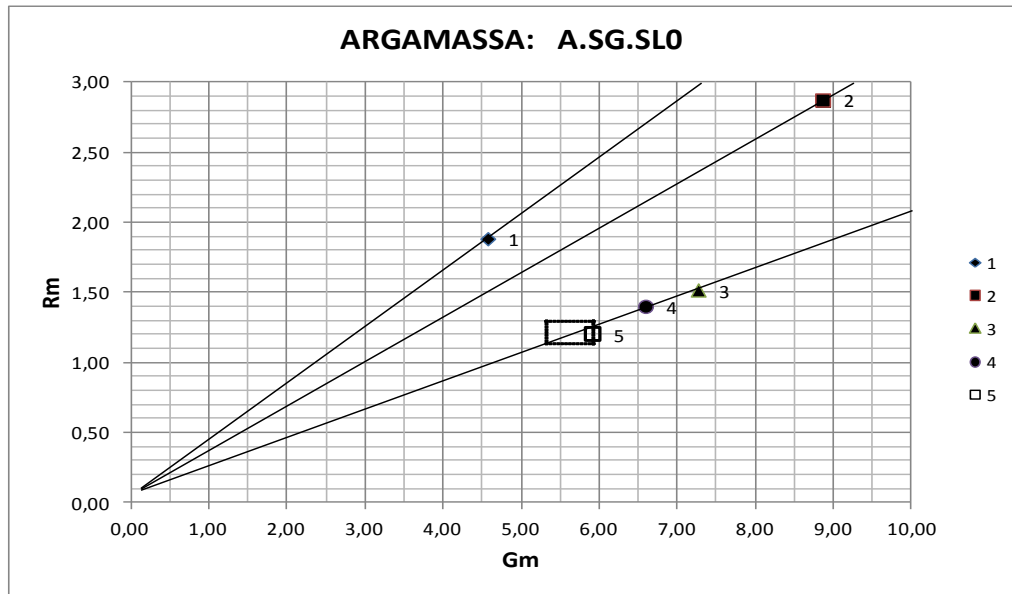


Fig. 5.12. Otimização dos parâmetros reológicos de Rm e Gm para SL0.

Tomando em consideração os valores obtidos na argamassa com SL0, extrapolaram-se de maneira a analisar-se a argamassa A.SG.SL500, como é observado na Fig. 5.13. Os valores para o Sp/P% (4,90) e Vw/Vp (0,98) não intersestaram a área, desse modo, foi necessário reduzir no Sp/P% e aumentar Vw/Vp. Os valores de $R_{m_{SL500,final}}$ e $G_{m_{SL500,final}}$ foram de 5,79 e 1,07, respetivamente.

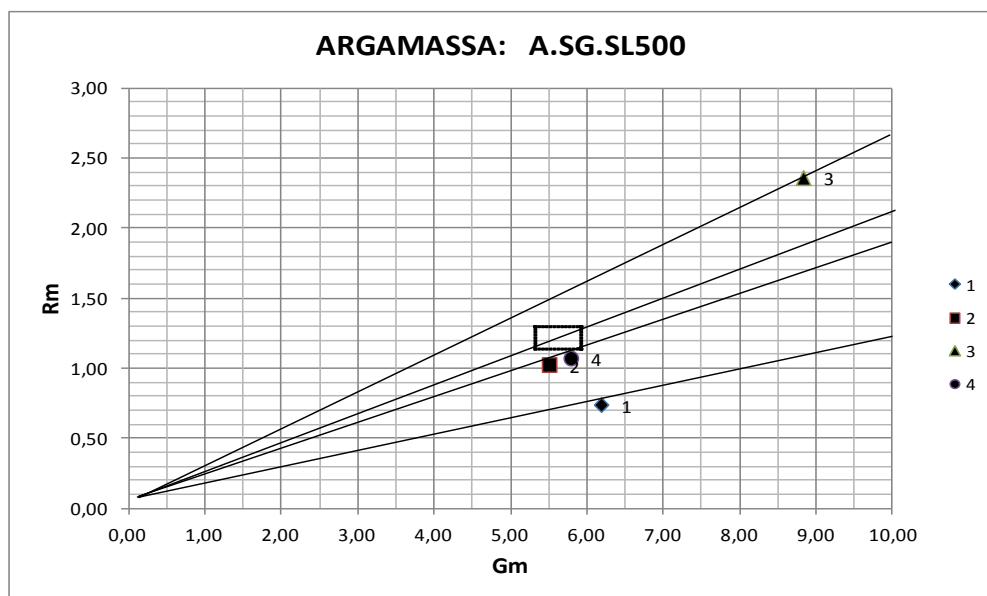


Fig. 5.13. Otimização dos parâmetros reológicos de Rm e Gm para SL500.

Com os valores anteriormente obtidos estimou-se Vw/Vp e Sp/P% para as argamassas com SL700. Com isto, os primeiros valores de Rm e Gm foram bastante afastados da área “ótima”, presentes na Fig. 5.14. Foi necessário, então, aumentar a percentagem de Sp/P% de

A.SG.SL700 e diminuir singelamente o teor de água V_w/V_p . Obtiveram-se, assim, valores $G_{m_{SL700,final}}$ de 6,16 e $R_{m_{SL700,final}}$ de 1,21.

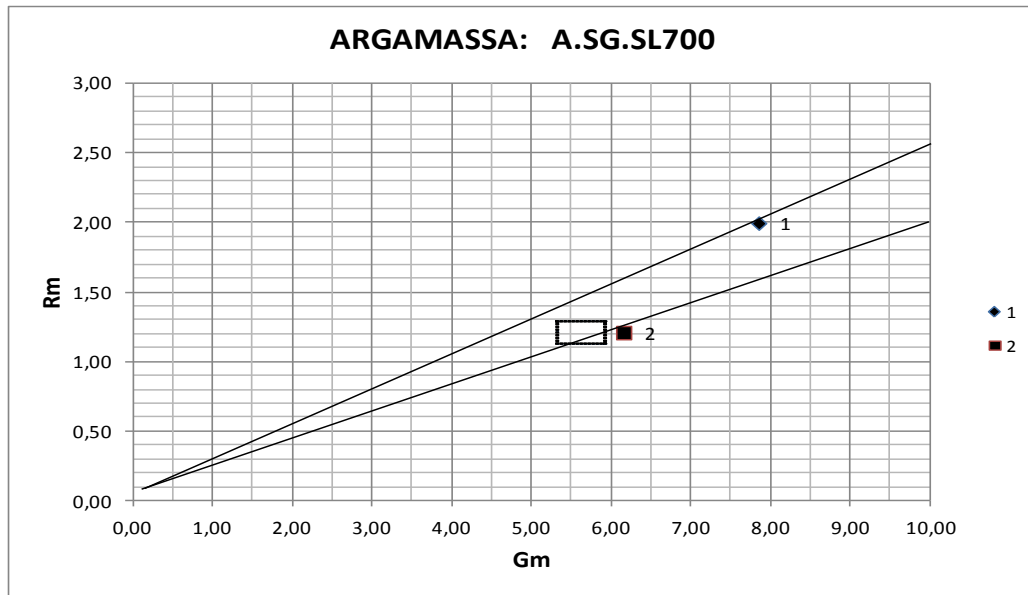


Fig. 5.14. Otimização dos parâmetros reológicos de R_m e G_m para SL700.

Para a argamassa A.SG.SL900 (Fig. 5.15), em termos reológicos, obtiveram-se valores de $R_{m_{SL900,final}}$ (5,10) e $G_{m_{SL900,final}}$ (1,92), mas não foi atingida a área “ótima”, em que o valor de $Sp/P\%$ (5,0) foi o mais alto, comparativamente com as restantes argamassas, enquanto o valor de V_w/V_p (1,05) se manteve semelhante. A opção de não progredir neste ensaio até à área ótima em termos de reologia esteve relacionada com a necessidade de ser calcinado mais material a esta temperatura, o que nessa fase não foi possível.

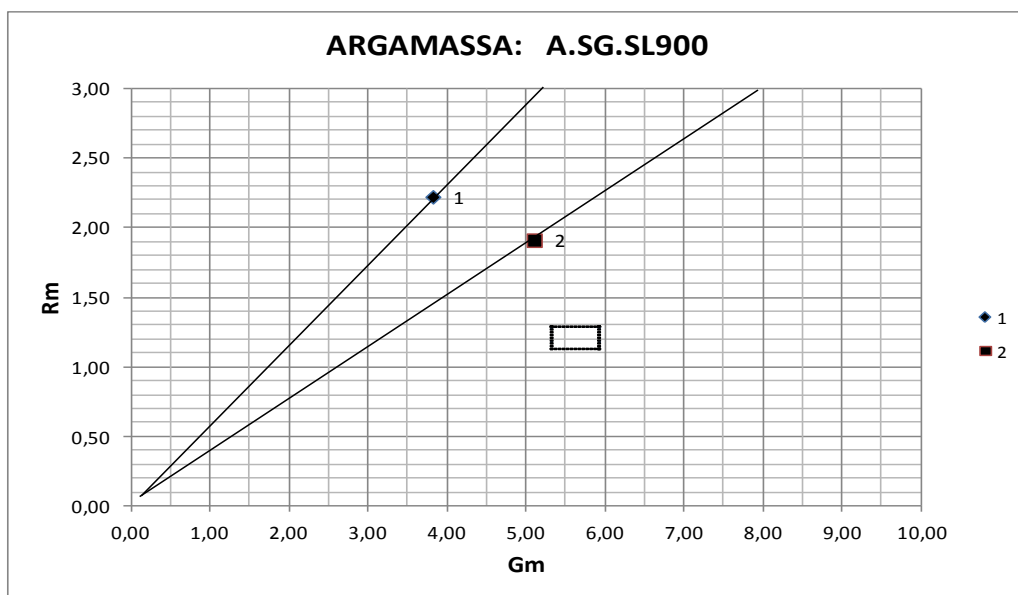


Fig. 5.15. Otimização dos parâmetros reológicos de R_m e G_m para SL900.

5.4.5 - Cura das argamassas

Foi constatado que nas amostras da “família de finos” de “SL0”, “SL500” e “SL700” a presa e o endurecimento, relativamente à argamassa de fíler calcário, foram muito lentos. O seu endurecimento só começou a ser notório no final de uma semana. Tem sido relatado que as misturas com aditivos químicos e minerais desta natureza afetam negativamente o tempo de presa das argamassas devido à má ionização nos materiais [80].

Na argamassa com FC, o pó de calcário age como um acelerador precoce durante a hidratação do cimento. Os resultados mostram que a evolução do calor de hidratação é impedida pela presença de fíler calcário na mistura [98].

Estudos comprovaram que as lamas desidratadas ou aquecidas a uma temperatura de 105°C, inibem a fixação dos elementos de endurecimento da argamassa e, por isso, não devem ser incorporadas em argamassas de cimento [36]. Não obstante, o efeito retardador de presa poderá estar associado à presença de iões de sódio ou aluminato de cálcio [36, 76].

5.5 - Argamassas no estado endurecido

5.5.1 - Resistência à compressão das argamassas

A Figura 5.16 mostra os valores da tensão de rotura à compressão das argamassas no estado endurecido. É óbvio o alcance de uma maior resistência (~72 MPa) na argamassa de referência com fíler calcário (FC), comparativamente às restantes argamassas com cinzas de lamas. As argamassas com SL0, SL500 e SL700, no seu estado endurecido, mostram valores médios de resistência à compressão de cerca de 0,88 MPa; 2,41 MPa e 1,39 MPa, respetivamente. Nas argamassas de SL900, o valor é bastante díspar, com uma média de 45 MPa de resistência e os seus valores máximo e mínimo são de 55 MPa e de 24 MPa. Estudos comprovam que a adição de finos destes subprodutos decresce a resistência mecânica significativamente [35]. Não obstante, a presença de alumina acelera a hidratação das misturas que pode comprovar dessa forma o incremento de resistência com o aumento do calor de calcinação [41].

Outro fator ligado ao decréscimo da resistência é a provável incompatibilidade do aditivo químico superplastificante com as adições minerais de lamas, podendo ter sido uma das causas para a fraca ligação química das partículas e, conseqüentemente, uma redução da resistência das argamassas com estas lamas [80]. Este motivo é devido às grandes dosagens de superplastificante que reduzem a razão de hidratação de C_3A e C_3S , aumentando dessa forma as quantidades de cimento que não reagiram com a água, aumentando a porosidade da pasta endurecida. Em suma, grandes dosagens de superplastificante levam a uma menor resistência mecânica [34].

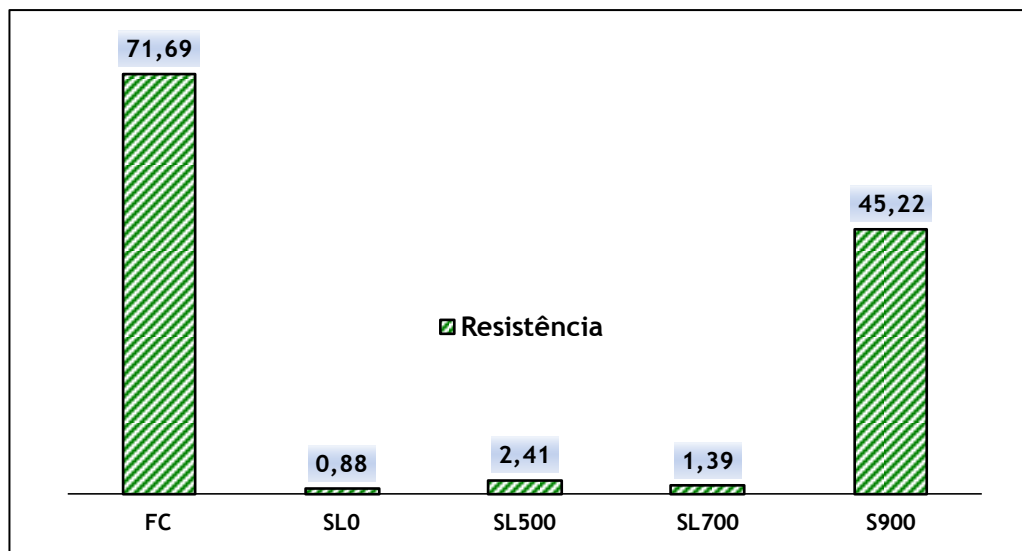


Fig. 5.16. Resistência à compressão das várias famílias de argamassas (fm, 28), em MPa.

É notório na Fig. 5.17 que a redução dos teores de carbono e de matéria orgânica para valores da ordem de 22% permitiram já alguma recuperação da resistência à compressão das argamassas. Eventualmente, o ensaio da argamassa com SL950, onde estes teores foram anulados, teria ajudado a esclarecer esta questão. Comprova-se, de qualquer forma, na análise deste problema, que as lamaz não se comportam como um material inerte.

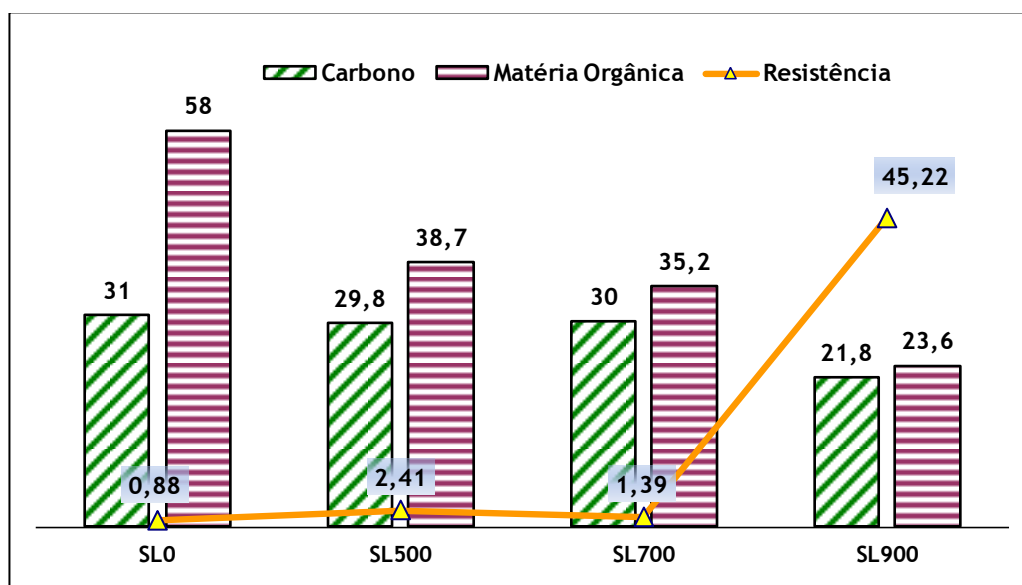


Fig. 5.17. Percentagem (%) de carbono e matéria orgânica versus resistência (MPa) à compressão.

As massas volúmicas são também um factor relevante. As argamassas com SLO e SL700 apresentaram massas volúmicas muito baixas de 1693 e 1619 kg/m³, respectivamente. Uma excepção aconteceu com os provetes de SL500, em que SL500.4 apresentou valores superiores (2276,4 kg/m³), comparativamente com SL500.2 (1827,0 kg/m³), mas com valores semelhantes em questões de resistência (~2 MPa). A argamassa com SL900 apresentou uma

massa volúmica de 2036 kg/m³, ainda assim abaixo dos valores obtidos na argamassa com fíler calcário (2536,1 kg/m³). Existem estudos que encontraram vantagens na reduzida massa volúmica destas argamassas pelo fato de apresentarem baixa condutibilidade térmica [81].

5.6 - Conclusões

As conclusões principais deste capítulo são a seguir resumidas para cada um dos subcapítulos analisados, ou seja, caracterização dos materiais, caracterização física e química e caracterização das argamassas auto-compactáveis.

5.6.1 - Caraterização dos materiais

Com os resultados obtidos na análise do tamanho das partículas, constata-se que, pelo seu grau de finura, as lamas pode ser incluídas no grupo das adições.

5.6.2 - Caraterização física e química

As lamas são constituídas por agentes flocurantes, carbono e matéria orgânica, em que estes dois últimos só foram eliminados a partir dos 950°C e após 5 horas de calcinação, mas certos elementos químicos presentes a estas temperaturas são reorganizados em outro tipo de estruturas químicas, pois, devido à presença de oxigénio, tendem a formar novos compostos em forma de óxidos.

As lamas de ETA têm como principais constituintes atômicos o carbono e o oxigénio. O elemento de carbono é eliminado a partir dos 950°C e o oxigénio é aumentado devido a uma reestruturação dos óxidos que ocorre a partir dos 900°C com a eliminação de outros elementos como o enxofre.

Os elementos químicos maioritários nas cinzas de lamas são o óxido de alumínio e a sílica. Comprovou-se que as lamas calcinadas a 950°C detêm uma maior percentagem destes elementos.

5.6.3 - Caraterização das argamassas auto-compactáveis

A presença de carbono influencia a demanda de superplastificante, aumentando dessa forma as quantidades utilizadas.

Para a mesma taxa de substituição do cimento pela adição de 30 por cento, as lamas, face ao fíler calcário, apresentaram uma demanda de água maior e um substancial aumento nas dosagens de superplastificante, para obtenção de propriedades reológicas idênticas.

A hidratação lenta das argamassas que incorporaram lamas pode dever-se aos constituintes de sódio, aluminato de cálcio e a uma sobredosagem de superplastificante na mistura. Existem

indicações de que as reações do C_3A e C_3S mal formadas, devido à dosagem de superplastificante, implicam que, no processo de hidratação, o cimento não forme ligações quimicamente resistentes, dando, assim, origem a uma débil resistência à compressão nas argamassas endurecidas [34].

A avaliação apreciada aos valores praticamente nulos ao ensaio de compressão aos 28 dias de idade por parte das argamassas de SL0, SL500 e SL700 devem-se, irrefutavelmente, à presença de grandes quantidades de matéria orgânica e carbono que desse modo prejudicam as ligações internas durante o processo de endurecimento destas argamassas com as reações de C_3A e C_3S .

Da análise efectuada pode-se presumir que as cinzas de lamas calcinadas a mais de 900°C , nomeadamente aquelas calcinadas a 950°C , serão as mais indicadas para viabilizar a utilização destas lamas como adição no betão auto-compactável, porque a essa temperatura desaparecem quer o carbono, quer a matéria orgânica, para além de serem eliminados possíveis metais pesados presentes nas lamas.

Capítulo 6- Conclusões e propostas para trabalhos futuros

6.1 - Introdução

Ao longo do presente trabalho experimental foi possível caracterizar do ponto de vista físico e químico as lamas provenientes da ETA do Caldeirão, sujeitas a diferentes temperaturas de calcinação. Os resultados obtidos na caracterização de argamassas que incorporaram estas lamas permitiram uma avaliação preliminar acerca das suas potencialidades como adição na produção de betões, em especial dos betões auto-compactáveis. As principais conclusões deste trabalho de investigação são apresentadas no Subcapítulo 6.2 enquanto no Subcapítulo 6.3 serão apresentadas propostas para trabalhos futuros nesta área.

6.2 - Conclusões

Como conclusões finais deste capítulo, é de salientar, em primeiro lugar, que o objetivo principal deste trabalho foi parcialmente atingido, visto que os resultados obtidos permitiram caracterizar as argamassas com incorporação de adições provenientes das lamas obtidas na ETA do caldeirão. Ficou por caracterizar a argamassa com a incorporação das cinzas de lamas SL950 e, só por este facto, se considerou o objectivo parcialmente atingido.

Da caracterização efectuada às argamassas com incorporação de cinzas de lamas da ETA do Caldeirão salientam-se as seguintes conclusões:

- As cinzas de lamas da ETA do Caldeirão não podem ser usadas como adição no betão auto-compactável sem tratamento térmico, uma vez que contêm elevados teores de carbono e de matéria orgânica que prejudicam a hidratação do cimento.
- Após sujeitar as lamas da ETA do Caldeirão a tratamento térmico a diferentes temperaturas, nomeadamente a calcinação a 500, 700 e 900 °C durante duas horas, verificou-se uma redução substancial dos teores de carbono e de matéria orgânica com o aumento da temperatura, permanecendo ainda assim em valores da ordem de 22% para a temperatura de 900 °C. A remoção total do carbono e matéria orgânica só se registou para as lamas calcinadas a 950 °C durante 5 horas.
- As argamassas produzidas com cinzas de lamas originais (sem calcinação) e com cinzas de lamas calcinadas à temperatura de 500 e 700 °C durante duas horas, apresentaram, aos 28 dias de idade, uma resistência muito baixa (em média 1,6 MPa), que corresponde a uma quebra de 98% face à mistura padrão com fíler calcário (71,7 MPa). Para além disso, estas argamassas só iniciaram o endurecimento decorridos vários dias após a amassadura.

- A recuperação parcial da resistência e a redução dos tempos de presa ocorreu quando se usaram as lamas calcinadas a 900 °C durante duas horas, obtendo-se um valor da tensão de rotura à compressão de 45,2 MPa, o que, ainda assim, representa uma quebra de 37% face à mistura padrão com fíler calcário (71,7 MPa).

- As melhores adições de cinzas de lamas testadas em argamassas comprovaram ser as que foram calcinadas a 900°C durante duas horas, pois eliminaram parcialmente o material prejudicial à cura das amostras, ou seja, a matéria orgânica e o carbono. A argamassas com cinzas de lamas calcinadas a 950°C revelaram teores quase nulos de matéria orgânica e de carbono. Contudo, tais lamas não foram testadas em argamassas, podendo apenas presumir-se que essas lamas seriam as mais adequadas.

A título de consideração final, importa salientar que a calcinação detém custos elevados, não só sobre a forma de energia dispensada mas também pelos danos ambientais causados. Contudo, estudos comprovam que se pode reduzir o impacto ambiental, com a implementação destes resíduos na indústria da construção [79].

6.3 - Propostas para trabalhos futuros

Muitas investigações que podem ser levadas a cabo para dar sequência ao trabalho aqui apresentado, listando-se a seguir apenas algumas pistas para trabalhos futuros:

- A calcinação neste trabalho só foi feita até os 950 °C. O clínquer no cimento é feito a maiores temperaturas, daí deveria existir um estudo para temperaturas a mais de 1000°C.

- Ainda não existe uma base de dados coerente sobre a produção destas lamas, para que o seu destino possa ser gerido com eficácia. É certo que a produção de lamas de ETA existe, praticamente, em cada País, por isso é uma área de interesse fulcral. Um dos estudos que poderia ser feito passaria pela monitorização dos tanques de lamas, de forma a gerar em tempo real informação sobre os principais constituintes químicos em cada uma das ETA's e fazer-se, assim, uma base de dados nacional. Na prática, seriam tabelas técnicas para o promissor empreendedor no tratamento destas lamas para a indústria cimentícia.

- O tipo de superplastificante mais adequado e o tempo em que este é adicionado devem também ser estudados.

- Outros estudos deveriam ter em consideração os tipos de ambientes (os mais estáveis e/ ou os mais agressivos). Analisarem até que ponto estas lamas podem ou não aumentar a suscetibilidade a ataques de sais alcalis, etc.

- Vários produtos para a construção civil já foram feitos com resíduos, incluindo agregados leves a tijolos, e poderiam ser realizados, também, com as lamas.

Referências bibliográficas

- [1] Agência Europeia do Ambiente. Acedido em 2010, The problems of water stress, em: <http://www.eea.europa.eu/publications/92-9167-025-1/page003.html>
- [2] Água de Barretos. Texto << Como é o tratamento da água de Barretos>>. Página acedida em 2010, em: <http://www.novoguiabarretos.com/paginas/nossa%20agua.html>
- [3] ALBERS, A.; MELCHIADES, F.; MACHADO, R.; BALDO, J.; BOSCHI, A. - “Um método simples de caracterização de argilominerais por difração de raios-X”, *Cerâmica* 48 (305), Jan/Fev/Mar/, 2002, p.34-37.
- [4] ATHENS, L.; FERGUSON, B. - “Water Issues”, Chapter 6, *SUSTANAIBLE BUIDING TECHOGICAL MANUAL, Green Building Design, Construction, and Operations*, Public Tecnology, inc.
- [5] BAYASI, Z.; ZHOU, J.- Properties of Silica Fume Concreteand Mortar, *ACI Materials Journal*, July-August, 1993, p. 349-356.
- [6] BIGNOZI, M.; SANDROLINI, F. - “Tyre rubber waste recycling in self-compacting concrete”, *Cement and Concrete Research*, No 36, 2006, p. 735-739.
- [7] BRENHAS, M. J.; MACHADO, R.; DINIS, M. A.;BARROS, N.- Co-incineração em fornos de cimenteiras. Análise de caso. *Revista da Faculdade de Ciência e Tecnologia*. Porto: Edições Universidade Fernando Pessoa. ISSN 1646-0499.6, 2009, p. 82-94.
- [8] CAMÕES, a. (2005). “Influência da presença de adições minerais no comportamento do betão fresco em composições com incorporação de superplastificantes”. *Universidade do Minho. Guimarães*, No. 23. P. 19-29.
- [9] Catálogo Sika “Tecnologia ViscoCrete”, *Innovation & Consistency*. Acedido em setembro, 2010, em: http://www.sika.pt/doc15_viscocrete.pdf.
- [10] CHANDARA, C., SAKAI, E., AZIZLI e K.; AHMAD, Z. (2010). “The effect of unburned carbon in Palm oil fuel ash on fluidity of cement pastes containing superplasticizer”, *Construction and Building Materials xxx-xxx*. Acedido em 2010, em: <http://www.sciencedirect.com>.
- [11] CHIANG, K.; CHOU, P.; CHIEN, K. - “Novel lightweight building bricks manufactured from water treatment sludge and agricultural waste”, *Department of Ênvironmental Engineering and Science, Feng-Chia University, Tai-Chung*, 407, Taiwan.
- [12] COSTA, C., CARVALHO, P., BORDADO, J. e NUNES, A. (2009) Estudo de

- Argamassas de Base Cimentícia por Microscopia Eletrónica de Varrimento”, *Ciência & Tecnologia dos Materiais*, Vol. 21, N.º 3/4. P. 31-37.
- [13] COUTINHO, A. (1988) “Fabrico e Propriedades do Betão”. 2ª Edição, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Volume 1, Lisboa.
- [14] CYR, M., COUTAND, M. e CLASTRES, P. (2007). “Technological and environmental behavior of sewage sludge ash (SSA) in cement-based mortars”. *Cement and Concrete Research*, 37. P. 1278-1289. Acedido em 2010, em: <http://www.sciencedirect.com>
- [15] Decisão 2000/532/CE da Comissão de 3 de maio de 2000 que substitui a Decisão 94/3/CE, que estabelece uma lista de resíduos em conformidade com a alínea a) do artigo 1.º da Diretiva 75/442/CEE do Conselho relativa aos resíduos, e a Decisão 94/904/Ce do Conselho
- [16] Decreto-lei n.º 152/2002 de 23 maio, “Diretiva sobre a disposição de resíduos em aterros” (2002).
- [17] Dicionário Técnico, EMO European Mortar Industry Organization, 3ª Edição, 2001 [Versão Eletrónica].
- [18] DOMONE, P. - “Self-compacting concrete: An alaysis of 11 years of cases studies”, *Cement & Concrete Composites* 28, 2006, p. 197-208.
- [19] E 245 (1971). Especificação do LNEC de Inertes para Argamassas e Betões. Análise da Granulométrica.
- [20] E 376 (1993). Especificação do LNEC do Filer Calcário para Betões. Características e Verificação da Conformidade.
- [21] E 64 (1968). Especificação do LNEC para Determinação da massa volúmica de adições de finos.
- [22] EEA Briefing, “Melhorar a gestão dos resíduos urbanos para reduzir as emissões de gases com efeito de estufa”, Agência Europeia do Ambiente, 2008, ISSN 1830-2378.
- [23] Empresa Municipal de Água e Saneamento de Beja. Acedido em 2010, em: http://www.emas-beja.pt/eta_do_roxo.asp
- [24] Escola Augusto Gil-Guarda. Acedido em 2010, em: <http://www.eb1-augusto-gil.rcts.pt/atividades.htm>
- [25] Estação de Tratamento de águas. In *Infopédia* [Em linha]. Porto: Porto Editora, 2003 - 2010, Acedido em 2010, em: [http://www.infopedia.pt/\\$estacao-de-tratamento-de-aguas](http://www.infopedia.pt/$estacao-de-tratamento-de-aguas)
- [26] EUR-Lex Acesso ao direito da União Europeia. Acedido em 2010, em: <http://eurlex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=CELEX:31986L0278:PT:HT ML>

- [27] Europe's water: An indicator-based assessment Summary (2003). European Environment Agency. Copenhagen. Acedido em 2010, em: <http://europa.eu.int> - ISBN 92-9167-576-8.
- [28] EUROPEAN CONSTRUCTION TECHNOLOGY PLATAFORM, MATERIALS (2005) Vision 2030 & Strategic Research Agenda Focus Area Materials, Version 1, European Construction Techonoly Platform (ECTP), Semptember. Acedido em 2010, em: <http://www.ectp.org>.
- [29] European Ready Mixed Concrete Organization. Acedida em 2010, em: <http://www.ermco.eu/documents/ermco-documents/>
- [30] FELEKOGLU, B.; TOSUN, K.; BARADAN, B.; ALTUN, A.; UYULGAN, B. - The effect of fly ash and limestone fillers on the viscosity and compressive strength of self-compacting repair mortars, Cement and Concrete Research, No 36, 2006, p. 1719-1726, Acedido em 2010: www.sciencedirect.com.
- [31] FIHO, S. F. F. "Otimização da Aplicação do Carvão Ativado, em Pó no Tratamento de Água visando a Redução de Compostos Orgânicos Causadores de Odor e Sabor em Águas de Abastecimento", Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
- [32] FULGÊNCIO, C. (2003). Texto "Água- Um Recurso Limitado",; <http://www.aguaonline.net/thematicarticle/content.php?id=10>.
- [33] FYTILI, D.; ZABANIOTOU, A. (2008) "Utilization of sewage sludge in EU application of old and new methods - A review", Renewable and Sustainable Energy Reviews 12. p. 116-140. Acedido em 2010, em: www.sciencedirect.com.
- [34] GAGNÉ, R., BOISVERT, A. e PIGEON, M. (1996). "Effect of Superplasticizer Dosage on Mechanical Properties, Permeability, and Freeze-Thaw Durability of High-Strength Concretes With and Without Silica Fume". Title no. 93-M13. ACI Materials Journal. P. 111-120.
- [35] GARCÉS, P.; CARRIÓN, M.; GARCÍA-ALCOCEL, E.; PAYÁ, J.; MONZÓ, J.; BORRACHERO, M. - "Mechanical and physical properties of cement blended with sewage sludge ash", Waste Management 28, 2008, p. 2495-2502.
- [36] GONÇALVES, A., ESTEVES, A., CARVALHO, M., MACHADO, Ã. e CORREIA, E. "Incorporation of sludge from a water treatment plant in cement mortars", LNEC.
- [37] HO, D. W. S.; SHEINN, A. M. M.; NG, C. C.; TAM, C. T. - The Use of Quarry Dust for SCC Applications, Cement and Concrete Research, No 32, 2002, p. 505-511.
- [38] HSU, K.; CHIU, J.; CHEN, S.; TSENG, Y. - Effect of addiction time of a superplasticizer on cement adsorption and on concrete workability, in "Cement & Concrete Composites", vol. 21, 1999, p. 425- 430.
- [39] Instituto Americano de Betão. Acedido em 2010, em:

http://www.concrete.org/Technical/CCT/FlashHelp/ACI_Terminology.htm.

- [40] JACOBSEN, H.; KRISTOFFERSEN, M. - "Case studies on waste minimisation practices in Europe", European Topic Centre on Waste, EEA, Copenhagen, 2002, ISBN 92-9167-505-9.
- [41] KADRI, H. e DUVAL, R. (2002). "Effect ultrafine Particles on Heat of Hydration of cement Mortars". ACI Materials Journal. P. 138-142.
- [42] KAOSOL, T. - "Reuse Water Treatment Sludge for Hollow Concrete Block Manufacture", Energy Research Journal 1 (2), Science Publications, ISSN 1949-0151, 2010, p. 131-134.
- [43] KATZ, A.; BAUM, H. - Effect of High Levels of Fines Content on Concrete Properties, ACI Materials Journal, November-December, 2006, p. 474-482.
- [44] KHATIB, J. e MANGAT, P. (1999). "Influence of superplasticizer and curing on porosity and pore structure of cement paste", Cement & Concrete Composites 21. p. 431-437.
- [45] KHAYAT, K. H. - Workability, Testing, and Performance of Self-Consolidating Concrete, ACI Materials Journal, May-June, 1999, p.346-353.
- [46] KHAYAT, K.; YAHIA, A.; SAYED, M. - "Effect of Supplementary Cementitious Materials on Rheological Properties, Bleeding, and Strength of Structural Grout", Title no. 105-M66, ACI Materials Journal, November-December, 2008, p. 585-593.
- [47] KYNCL, M. - Opportunities for water treatment sludge re-use, GeoScience Engineering, Volume LIV, No 1, 2008, p. 11-22, ISSN 1802-5420.
- [48] LARRARD, F. e BELLOC, A. (1997) "The influence of Aggregate on the Compressive Strength of Normal and High-Strength Concrete", ACI Materials Journal. p. 417-426.
- [49] LEPECH, M. D., LI, V. C. L., ROBERTSON, R. E. e KEOLEIAN, G. A. (2008). "Design of Green Engineered Cementitious Composites for improved Sustainability". ACI Material Journal. P. 567-575.
- [50] LIN, D. e WENG, C. (2001) "Use of Sewage Sludge Ash as Brick Material", JOURNAL ENVIRONMENTAL ENGINEERING. p. 922-927.
- [51] LIU, M. (2010). "Construction and Building Materials". Construction and Building Materials . Acedido em 2010, em: <http://www.elsevier.com/locate/conduilmat>
- [52] LNEC E 248 (1971). Especificação do LNEC para Inertes para Argamassas e Betões. Determinação das massas volúmicas e da absorção de água de areias.
- [53] LNEC E372 (1993). Água de Amassadura para Betões. Características e verificação da conformidade. ISSN: 0870-8592.
- [54] MAEYAMA, A., MARUYAMA, K., MIDORIKAWA, T. e SAKATA, N. (1998). "Characterization of Powder for Self-Compacting Concrete". Technical Session: Materials & Design. International Workshop on Self-Compacting Concrete . p. 191-200.
- [55] Manual "COULTER© LS Precourse Reading 9912094-C", Coulter Electronics

- Limited, Northwell Drive, Beds, LU3 3RH England.
- [56] MARTINS, E. J. (2009) - Procedimento para dosagem de pastas para argamassa auto-nivelante, << Dissertação de Mestrado apresentada na Universidade Federal do Paraná>>, Curitiba.
- [57] MEYER, C. - “Concrete and Sustainable Development”, Concrete Materials Science to Application - A Tribute to Surendra P. Shah, Special Publication ACI 206, 2002.
- [58] NAWA, T., IZUMI, T. e EDAMATSU, Y. (2000). “State-of-the-art Report on Materials and Design of Self-Compacting Concrete”. Technical Session: Materials & Design, International Workshop on Self-Compacting Concrete, August, 1998, p. 160-190.
- [59] NEPOMUCENO, M. - Aulas práticas de Materiais de Construção II (1812, 1276), BETÃO: “Estudo da Composição e Propriedades”, Universidade da Beira Interior, 1999/2000.
- [60] NEPOMUCENO, M. C. S. (2005). Tese de Doutoramento em “Metodologia para a Composição de Betões Auto - Compactáveis”. Universidade da Beira Interior. Covilhã. 799 pp.
- [61] NEPOMUCENO, M.; OLIVEIRA, L.; LOPES, S. M. R. - “Methodology for mix design of the mortar phase of self-compacting concrete using different mineral additions in binary blends of powders”, Construction and Building, Elsevier, 2011 [*in press*], p. 317-326.
- [62] NORMA EUROPEIA EN 197-1:2000/A1 EM Versão portuguesa NP EN 197-1:2001/A1, Cimento Parte 1: “Composição, especificações e critérios de conformidade para cimentos correntes”, 2005.
- [63] Norma Portuguesa NP 4220 - Pozolanas para betão, argamassa e caldas. Definições, requisitos e verificação da conformidade - Lisboa, Instituto Português da Qualidade, 2009.
- [64] NP 954 (1973. Norma Portuguesa para Inertes para Argamassa e Betões. Determinação da massa volúmica de água e areias.
- [65] NP EN 206-1 (2007). Norma portuguesa para Betão: Especificação, desempenho, produção e conformidade. Lisboa, Instituto Português da Qualidade, 2ª Edição.
- [66] OKAMURA, A.; OZAWA, K.; OUCHI, M. (2000) “Self - compacting concrete”. Structural Concrete, 1, No. 1. p. 3-17.
- [67] OKUMURA H.; OUCHI, M. (2003) Self-Compacting Concrete in “Journal of Advanced Concrete Technology”. Vol. 1, No. 1. p. 5-15.
- [68] Organização Industrial Europeia de Argamassas. Acedido em 2010, em: <http://www.euromortar.com>
- [69] OUCHI, M. (1998). “State-of-the-Art Report: Self-Compactibility Evaluation for Mix-Proportioning and Inspection”. International Workshop on Self-Compacting Concrete. Technical Session: Self-Compactibility Evaluation. P. 23-26.

- [70] OUCHI, M., EDAMATSU, Y., OZAWA, K. e OKAMURA, H. “ A simple Evaluation Method for interaction Between Coarse Aggregate and Mortar’s Particles in Self-Compacting Concrete”.
- [71] OUCHI, M.; HIBINO, M.; OZAWA, K.; OKAMURA, H. “A Rational Mix-Design for Mortar in Self-Compacting Concrete”.
- [72] PEAASAR II (2007). « Plano Estratégico de Abastecimento de Água e de Saneamento De Águas Residuais 2007-2013», Ministério do Ambiente, do Ordenamento do Território e do Desenvolvimento Regional, 1.ª edição. ISBN 978-989-8097-00-2.
- [73] PENTTALA, V. (1997) “Concrete and Sustainable Development”. ACI Materials Journal. P. 409-416.
- [74] PEREIRA, F. R. (2006) Tese de Doutoramento sobre “Valorização de resíduos industriais como fonte alternativa mineral: composições cerâmicas e cimentíceas”, Departamento de Engenharia Cerâmica e do Vidro, Universidade de Aveiro, Aveiro.
- [75] RAO, G. A. (2001). “Influence of silica fume on long-term strength of mortars containing different aggregate fractions”. Cement and Concrete Research, 31. P. 7-12.
- [76] RAUPP-PEREIRA, F.; SILVA, L.; SEGALHAES, A. M.; LABRICHA, J. A. (2007). “Effects of potable water filtration sludge on the rheological behaviour of one-coat plastering mortars”. ELSEVIER. Journal of Materials Processing Technology. 197; p. 12-17.
- [77] RELATÓRIO ANUAL DO SETOR DE ÁGUAS E RESÍDUOS EM PORTUGAL (2009). “2008 Sumário Executivo”, Entidade Reguladora dos Serviços de Águas e Resíduos. ISBN: 978-989-8360-00-7.
- [78] Relatório de Sustentabilidade 2008. Águas de Portugal. Acedido em 2010, em: <http://www.adp.pt/>.
- [79] RODRIGUEZ, N. H., RAMIREZ, S. M., VARELA, M. T. B., GUILLEM, M., PUIG, J. (2009) “Reuse of drinking water treatment plant (DWTP) sludge: Characterization and technological behaviour of cement mortars with atomized sludge additions”. Journal Cement and Concrete Research. XXX-XXX. Acedido em 2010, em: <http://www.sciencedirect.com>.
- [80] SAHMARAN, M., CHRISTIANO, H. e YAMAN, I (2006). “The effect of chemical admixtures and mineral additives on the properties of self-compacting mortars”, Cement & Concrete 28. p. 432-440. Acedido em 2010, em: www.sciencedirect.com.
- [81] SALES, A.; SOUZA, F.; SANTOS, W.; ZIMER, A.; ALMEIDA, F. - “Lightweight composite concrete produced with water treatment sludge and sawdust: Thermal properties and potential application”, Construction and Building Materials 24, 2010, pp. 2446-2453.

- [82] SANTANA, F., ALMEIDA, G.; MARTINS, S. E CORREIA, M. F. (1998). Metodologia da Avaliação do Funcionamento de Estações de Tratamento de Águas para Abastecimento Público. Universidade Nova de Lisboa e Ministério do Ambiente.72 p.
- [83] SATTERFIELD, P. (2004)“Jar Testing”, Published by the National Environmental Services Center.
- [84] SCHAFER, G., CERVELLIN, S., FEITH, M. e FRITZ, M.(2005) “Europe in figures, Eurostat yearbook 2005”, Panorama of the European Union, European Commission, Eurostat. ISSN 1681-4789. 288 pp .
- [85] Selection and Safe use of Alternatives to CTC, “Activated Carbon Testing”, Published by Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ) GmbH, German Technical Cooperation, Edition 1, July, 2009.
- [86] SKARENDAHL, Å e PETERSSON, Ö - “Self - Compacting Concrete”, State-of-the-Art Report of RILEM Technical Committee 174-SCC, RILEM Publications S.A.R.L..
- [87] Specification and Guidelines for Self-Compacting Concrete, EFNARC, February 2002. Acedido em 2010: www.efnarc.org
- [88] STUMM, W., FELLOW; ASCE - Water, Endangered Ecosystem: Assessment of Chemical Pollution, Journal of Environmental Engineering, Vol. 118, No. 4, July/August, 1992, ISSN 0733-9372/92/0004, p. 466-476.
- [89] TAKADA, K., PELOVA, G. I., e WALRAVEN, J. C. (1998) - Influence of Mixing Efficiency on the Fresh Properties of Self-Compacting Concrete; Technical Session: Manufacturing & Concrete Products, International Workshop on Self-compacting Concrete, August, p. 368-383.
- [90] TAY, J-H., HONG, S-Y., SHOW, K-Y. (2000). “Reuse of Industrial Sludge as Pelletized Aggregate for Concrete”. Journal of Environmental Engineering. P. 279-287.
- [91] Texto “UM EXEMPLO NA VALORIZAÇÃO DE RESÍDUOS”, Águas do Douro e Paiva, Case study, BCSD Portugal, 2008.
- [92] The Impact Global Change on Water Resources, The Response of UNESCO’s: International Hydrological Programme, United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, Acedido em 2011: <http://unesdoc.unesco.org/images/0019/001922/192216e.pdf>.
- [93] Tratamentos de água do Município de Mirandela. Acedido em 2010, em: <http://www.cm-mirandela.pt/index.php?oid=4215>
- [94] TRAUNER, E. - “Sludge Ash Fired to Above and below Ash-Vitrifying Temperature”, Journal of Environmental Engineering, November, 2003 - ISSN 0733-9372/93/0003-0506.
- [95] TUTIKIAN, B. F. (2004). Dissertação ” Método para Dosagem de Concretos Auto - Adensáveis”, Porto Alegre, 149 pp.

- [96] VIEIRA, M. G.(2008). Reologia do betão no estado fresco. Doutoramento em “BETÕES AUTOCOMPACTÁVEIS. UNIVERSIDADE TÉCNICA DE LISBOA, Instituto Superior Técnico, 386 pp.
- [97] WEBER, P.; TORRES, T. - “Estudo para a Caracterização Quantitativa e Qualitativa de Lodo de Estação de Tratamento de Água”.
- [98] YE, G., LIU, X., SCHUTTER, G., POPPE, A. e TAERWE, L. (2007). “Influence of limestone powder used as filler in SCC on hydration and microstructure of cement pastes”, *Cement & Concrete Composites* 29. p. 94-102. Acedido em 2010, em: www.sciencedirect.com.
- [99] ZHU, W. e GIBBS, J. (2005) “Use of different limestone and chalk powders in self-compacting concrete”, *Cement and Concrete Research* 35. p. 1467-1462.

ANEXO A.1- Caracterização dos materiais constituintes

Quadro A1.1. Massa volúmica do ligante CEM I 42,5R.

Material		Massa Volúmica
Tipo	Designação Comercial	Valor médio [kg/m ³]
Ligante	CEM I 42,5R	$\delta\chi l=3140$

Quadro A1.2. Ensaio mecânicos do ligante CEM I 42,5R.

LIGANTES	ENSAIOS MECÂNICOS [NP EN 196-1]				
	Idade [dias]	Resistências [Mpa]			
		Flexão		Compressão	
		Mensal	Anual	Mensal	Anual
CEM I 42,5R	2	5,5	6,1	32,5	33,4
	7	7,6	8,0	47,8	46,3
	28	8,8	9,2	59,3	58,0
Observações: Anual - Valor médio dos últimos 12 meses					

Quadro A1.3. Ensaio físicos do ligante CEM I 42,5R.

ENSAIOS FÍSICOS		Ligante	
		CEM I 42,5R	
		Mensal	Anual
Peso Específico (g/cm ³)		3,13	3,12
Resíduo de peneiração (%)	90 um		
	63 um		
	45 um	3,4	4,4
	32 um		
Específica de Blaine (cm ² /g) [NP]		4009	3848
Água na Pasta Normal (%) [NP]		28,7	28,7
Tempo de presa (min)	Início	106	104
	Fim	137	136
Expansibilidade (mm) [NP EN 196-1]		0,9	0,9
Índice de Brancura (0 a 100)			
Observações Anual - Valor médio dos últimos 12 meses			

Quadro A1.4. Análise Química do ligante CEM I 42,5R.

ANÁLISE QUÍMICA			LIGANTE	
			CEM I 42,5R	
			Mensal	Anual
Perda ao Fogo	%	P.F.	1,8	1,5
Resíduo Insólúvel	%	RI	1,1	1,3
Óxido de Silício	%	SiO ₂	20,31	21,08
óxido de Alumínio	%	Al ₂ O ₃	4,33	4,84
Óxido de Ferro	%	Fe ₂ O ₃	3,11	3,12
Óxido de Cálcio	%	CaO	61,86	62,08
Óxido de Magnésio	%	MgO	3,6	3,41
Sulfatos	%	SO ₃	3,69	3,19
Óxido de Potássio	%	K ₂ O		
Óxido de Sódio	%	Na ₂ O		
Cloretos	%	Cl-	0,02	0,02
Cal livre	%		1,49	1,67
N/D (não doseados)	%		1,5	1,03
Observações: Anual -Valor médio dos últimos 12 meses				

Quadro A1.5. Características químicas do fíler calcário BETOCARB P1-OU.

FÍLER CALCÁRIO		
Características Químicas		%
Carbonato de Cálcio	CaCO ₃	99
	MgCO ₃	0,3
Óxido de Ferro	FeO ₃	0,02
Insólúveis em HCL		0,2
Sulfatos soluveis em ácido		< 0,05
Cloretos		< 0,001
Enxofre total		< 0,04

Quadro A1.6. Características físicas do fíler calcário BETOCARB P1-OU

Características físicas	Resultados (valores médios)
Dureza na escala de Mohs	3
Índice de refração	1,55
Peso específico	2,7 g/cm ³
Perda ao fogo	43,36%
pH - (ISSO 787/9)	9
Teor de humidade (na expedição) - (ISSO 787/2)	0,10%
Densidade aparente - (ISSO 903)	0,90 g/cm ³
Partículas < 325 um	100%
Corte superior - (ISO 787/7)	125 um
Partículas < 80 um (ISSO 787/7)	92,00%
Partículas < 2 um - (Sedigraph 5100)	15,00%
Diâmetro médio (d50%) - (Sedigraph 5100)	5 um
Observação: Os resultados apresentados foram fornecidos pela empresa COMITA	

Quadro A1.7. Curvas granulométricas dos agregados finos.

Peneiro	Malha [mm]	Areia 02	Areia 04
		Porcentagem acumuladas de material que passa nos peneiros	
3"	76,20	100,00	100,00
(*) 2"	50,80	100,00	100,00
1" 1/2	38,10	100,00	100,00
(*) 1"	25,40	100,00	100,00
3/4"	19,10	100,00	100,00
(*) 1/2"	12,70	100,00	100,00
3/6"	9,52	100,00	100,00
N.º 4	4,76	100,00	98,48
N.º 8	2,38	99,94	94,23
N.º 16	1,19	99,51	78,40
N.º 30	0,590	82,79	40,43
N.º 50	0,297	20,53	5,91
N.º 100	0,149	1,24	0,44
N.º 200	0,074	0,16	0,15
Resíduo		0	0
Módulo de Finura ►		1,96	2,821
(*) Série secundária			
Peneiros para o cálculo do módulo de finura			

Quadro A1.8. Características químicas e físicas do superplastificante ViscoCrete 3005 da SIKA.

SIKA VISCOCRETE 3005	
Base	Policarboxilatos modificados
Aspecto	Líquido com tom amarelado torrado
Massa Volúmica	1,05 ± 0,02 kg/dm³
pH	4,0 ± 1,0
Dosagem para SCC	1,0 % a 1,4 % da massa do cimento

Quadro A1.9. Caracterização das partículas para FC, SLO, SL500, SL700, SL900 e SL950

ANALISADOR DE PARTÍCULAS													
COULTER LS 200													
Número do canal	Diâmetro das partículas (µm)	FÍLER CALCÁRIO		SLO		SL500		SL700		SL900		SL950	
		Volume diferencial %	Volume acumulado	Volume diferencial %	Volume acumulado	Volume diferencial %	Volume acumulado	Volume diferencial %	Volume acumulado	Volume diferencial %	Volume acumulado	Volume diferencial %	Volume acumulado
1	0,375	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0,412	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0,452	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0,496	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0,545	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0,598	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0,656	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0,721	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0,791	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0,868	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0,953	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	1,047	0,0044	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	1,149	0,066	0,0044	0,00063	0	0	0	0	0	0	0	0,001	0
14	1,261	0,38	0,07	0,013	0,00063	0,00042	0	0	0	0	0	0,015	0,001
15	1,384	1,1	0,45	0,082	0,013	0,0091	0,00042	0	0	0,001	0	0,084	0,016
16	1,52	2,19	1,55	0,27	0,095	0,061	0,0095	0	0	0,015	0,001	0,24	0,1
17	1,668	3,37	3,74	0,56	0,36	0,2	0,07	0,011	0	0,086	0,016	0,47	0,34
18	1,832	4,45	7,11	0,88	0,92	0,42	0,27	0,17	0,011	0,24	0,1	0,71	0,81
19	2,011	5,29	11,6	1,15	1,8	0,66	0,69	0,58	0,18	0,46	0,35	0,91	1,52
20	2,207	5,8	16,8	1,34	2,94	0,86	1,36	0,89	0,77	0,68	0,81	1,08	2,43
21	2,423	5,97	22,7	1,46	4,28	1	2,22	0,9	1,66	0,84	1,49	1,19	3,5
22	2,66	5,84	28,6	1,51	5,74	1,09	3,22	0,6	2,56	0,94	2,33	1,27	4,7
23	2,92	5,52	34,5	1,53	7,25	1,14	4,3	0,17	3,15	1,01	3,27	1,32	5,96
24	3,205	5,16	40	1,55	8,78	1,21	5,45	0,024	3,33	1,09	4,28	1,36	7,28
25	3,519	4,87	45,1	1,59	10,3	1,3	6,66	0,15	3,35	1,22	5,37	1,43	8,64
26	3,863	4,63	50	1,66	11,9	1,41	7,96	1,02	3,5	1,36	6,6	1,5	10,1
27	4,24	4,41	54,6	1,76	13,6	1,52	9,36	2,39	4,52	1,49	7,96	1,59	11,6
28	4,655	4,12	59	1,83	15,3	1,6	10,9	3,15	6,9	1,59	9,45	1,67	13,2
29	5,11	3,77	63,2	1,88	17,2	1,66	12,5	3,17	10,1	1,65	11	1,74	14,8
30	5,61	3,36	66,9	1,91	19	1,7	14,1	2,66	13,2	1,69	12,7	1,79	16,6
31	6,158	2,96	70,3	1,93	21	1,73	15,8	2,07	15,9	1,7	14,4	1,84	18,3
32	6,76	2,61	73,2	1,97	22,9	1,78	17,6	1,71	18	1,72	16,1	1,9	20,2
33	7,421	2,33	75,9	2,03	24,9	1,85	19,4	1,66	19,7	1,75	17,8	1,97	22,1
34	8,147	2,12	78,2	2,14	26,9	1,97	21,2	1,97	21,3	1,86	19,5	2,09	24
35	8,943	1,91	80,3	2,26	29	2,12	23,2	2,49	23,3	1,98	21,4	2,22	26,1
36	9,818	1,75	82,2	2,41	31,3	2,3	25,3	2,97	25,8	2,13	23,4	2,38	28,4
37	10,78	1,65	84	2,57	33,7	2,49	27,6	3,4	28,8	2,25	25,5	2,54	30,7
38	11,83	1,73	85,6	2,8	36,3	2,76	30,1	3,79	32,2	2,43	27,8	2,76	33,3
39	12,99	2,07	87,3	3,15	39,1	3,15	32,9	3,95	35,9	2,8	30,2	3,08	36
40	14,26	2,6	89,4	3,61	42,2	3,68	36	3,87	39,9	3,34	33	3,52	39,1
41	15,65	3,19	92	4,1	45,8	4,27	39,7	3,9	43,8	4	36,3	4,03	42,6
42	17,18	2,76	95,2	4,43	49,9	4,73	44	4,42	47,7	4,38	40,3	4,4	46,7
43	18,86	1,61	98	4,54	54,4	4,97	48,7	5,46	52,1	4,26	44,7	4,59	51,1
44	20,71	0,4	99,6	4,5	58,9	5,03	53,7	6,45	57,5	3,84	49	4,64	55,6
45	22,73	0,043	99,96	4,51	63,4	5,13	58,7	6,89	64	3,5	52,8	4,76	60,3
46	24,95	0	100	4,76	67,9	5,44	63,8	6,64	70,9	3,78	56,3	5,12	65,1
47	27,39	0	100	5,34	72,7	6,07	69,3	5,63	77,5	4,81	60,1	5,8	70,2
48	30,07	0	100	6,08	78	6,86	75,3	5	83,1	6,48	64,9	6,63	76
49	33,01	0	100	6,67	84,1	7,48	82,2	6,38	88,1	8,18	71,4	7,29	82,6
50	36,24	0	100	5,42	90,8	6,06	89,7	4,84	94,5	8,84	79,6	5,92	89,9
51	39,78	0	100	3,02	96,2	3,37	95,7	0,63	99,4	6,96	88,4	3,3	95,8
52	43,67	0	100	0,73	99,2	0,82	99,1	0	100	3,67	95,4	0,8	99,1
53	47,94	0	100	0,079	99,9	0,088	99,9	0	100	0,88	99	0,086	99,9
54	52,62	0	100	0	100	0	100	0	100	0,094	99,9	0	100
55	57,77	0	100	0	100	0	100	0	100	0	100	0	100

Quadro A1.10 Caracterização da distribuição das partículas para FG, CV e SF.

ANALISADOR DE PARTICULAS							
COULTER LS 200							
Número do canal	Diâmetro das partículas (µm)	Filer Granítico		Cinzas Volantes		Sílica de Fumo	
		Volume diferencial %	Volume acumulado %	Volume diferencial %	Volume acumulado %	Volume diferencial %	Volume acumulado %
1	0,375	0	0	0,052	0	0	0
2	0,412	0	0	0,092	0,052	0	0
3	0,452	0	0	0,13	0,14	0	0
4	0,496	0	0	0,19	0,28	0	0
5	0,545	0	0	0,25	0,47	0	0
6	0,598	0	0	0,29	0,72	0	0
7	0,656	0	0	0,34	1,01	0	0
8	0,721	0	0	0,38	1,34	0	0
9	0,791	0	0	0,42	1,73	0	0
10	0,868	0,0012	0	0,46	2,15	0	0
11	0,953	0,02	0,0012	0,5	2,61	0,000005	0
12	1,047	0,11	0,021	0,53	3,11	0,00069	0,000005
13	1,149	0,33	0,13	0,56	3,63	0,0063	0,0007
14	1,261	0,65	0,47	0,59	4,19	0,029	0,007
15	1,384	0,98	1,12	0,62	4,78	0,07	0,036
16	1,52	1,22	2,1	0,65	5,39	0,13	0,11
17	1,668	1,39	3,32	0,68	6,04	0,18	0,23
18	1,832	1,51	4,71	0,72	6,72	0,24	0,42
19	2,011	1,65	6,23	0,77	7,45	0,29	0,66
20	2,207	1,81	7,87	0,83	8,22	0,34	0,95
21	2,423	1,94	9,68	0,91	9,05	0,38	1,28
22	2,66	2,02	11,6	1	9,96	0,42	1,67
23	2,92	2,02	13,6	1,11	11	0,47	2,09
24	3,205	2	15,7	1,24	12,1	0,5	2,56
25	3,519	1,96	17,7	1,39	13,3	0,53	3,05
26	3,863	1,95	19,6	1,56	14,7	0,57	3,59
27	4,24	1,94	21,6	1,73	16,3	0,61	4,15
28	4,655	1,95	23,5	1,91	18	0,66	4,76
29	5,11	1,99	25,5	2,09	19,9	0,71	5,42
30	5,61	2,03	27,5	2,26	22	0,77	6,13
31	6,158	2,11	29,5	2,41	24,2	0,83	6,91
32	6,76	2,18	31,6	2,54	26,7	0,9	7,74
33	7,421	2,29	33,8	2,64	29,2	0,96	8,64
34	8,147	2,41	36,1	2,7	31,8	1,03	9,61
35	8,943	2,55	38,5	2,73	34,5	1,09	10,6
36	9,818	2,69	41	2,71	37,3	1,15	11,7
37	10,78	2,79	43,7	2,64	40	1,21	12,9
38	11,83	2,84	46,5	2,55	42,6	1,26	14,1
39	12,99	2,79	49,4	2,44	45,1	1,31	15,4
40	14,26	2,72	52,2	2,33	47,6	1,37	16,7
41	15,65	2,64	54,9	2,25	49,9	1,45	18
42	17,18	2,62	57,5	2,21	52,2	1,54	19,5
43	18,86	2,68	60,1	2,2	54,4	1,65	21
44	20,71	2,78	62,8	2,21	56,6	1,77	22,7
45	22,73	2,86	65,6	2,24	58,8	1,88	24,4
46	24,95	2,85	68,5	2,27	61	1,98	26,3
47	27,39	2,74	71,3	2,29	63,3	2,05	28,3
48	30,07	2,55	74,1	2,29	65,6	2,11	30,3
49	33,01	2,32	76,6	2,28	67,9	2,17	32,5
50	36,24	2,12	78,9	2,25	70,1	2,25	34,6
51	39,78	1,97	81	2,2	72,4	2,35	36,9
52	43,67	1,88	83	2,16	74,6	2,51	39,2
53	47,94	1,78	84,9	2,11	76,7	2,71	41,7
54	52,62	1,65	86,7	2,05	78,9	2,95	44,4
55	57,77	1,45	88,3	1,96	80,9	3,21	47,4
56	63,41	1,2	89,8	1,82	82,9	3,49	50,6
57	69,61	0,99	91	1,62	84,7	3,76	54,1
58	76,42	0,87	91,9	1,38	86,3	3,99	57,8
59	83,89	0,89	92,8	1,18	87,7	4,16	61,8
60	92,09	1,05	93,7	1,08	88,9	4,2	66
61	101,1	1,26	94,7	1,14	89,9	4,04	70,2
62	111	1,38	96	1,38	91,1	3,64	74,2
63	121,8	1,28	97,4	1,68	92,5	3,05	77,9
64	133,7	0,86	98,7	1,88	94,1	2,48	80,9
65	146,8	0,39	99,5	1,76	96	2,12	83,4
66	161,2	0,083	99,9	1,29	97,8	2,1	85,5
67	176,9	0,0072	99,99	0,67	99,1	2,36	87,6
68	194,2	0	100	0,21	99,8	2,68	90
69	213,2	0	100	0,033	99,97	2,75	92,7
70	234	0	100	0,0015	99,999	2,34	95,4
71	256,9	0	100	0	100	1,47	97,8
72	282,1	0	100	0	100	0,62	99,2
73	309,6	0	100	0	100	0,13	99,9
74	339,9	0	100	0	100	0,011	99,99
75	373,1	0	100	0	100	0	100
76	409,6	0	100	0	100	0	100
77	449,7	0	100	0	100	0	100

ANEXO A.2- Caracterização das argamassas no estado fresco

Quadro A2.1. Estudo da composição da argamassa auto-compactável FC número 1.

ESTUDO DA COMPOSIÇÃO DE ARGAMASSAS											
Identificação da argamassa A.SG.FC.1			Identificação da mistura de finos 70C1+30FC			Data 30-03-2010					
Parâmetros da composição			Composição da mistura de finos			Abertura da malha (mm)			Mistura (Curva Real)		
Vp/Vs	Vw/Vp	Sp/P%	fc1	fc2	fcv	fms	ffc	fsl	a1	a2	
0,80	0,72	0,55	0,70	0,00	0,00	0,00	0,30	0,00	0,35	0,65	
Massas volúmicas dos materiais finos, em kg/m ³			Massas volúmicas dos agregados, em kg/m ³			Massas volúmicas dos adjuvantes, em kg/m ³			Módulos de finura		
δc1	δc2	δcv	δms	δfc	δsl	δs1	δs2	---	---	---	---
3140	3040	2380	2170	2720	1730	2640	2610	---	---	---	---
Massas volúmicas dos agregados, em kg/m ³			Massas volúmicas dos adjuvantes, em kg/m ³			δsp			δp= 3014,00 kg/m ³		
δs1			δs2			---			Vsp/Vp= 0,0157876 m ³ /m ³		
2640			2610			---			Vp= 0,33492 m ³ /m ³		
---			---			---			Vw= 0,2411424 m ³ /m ³		
---			---			---			Vsp= 0,0052876 m ³ /m ³		
---			---			---			Vs= 0,41865 m ³ /m ³		
1050			---			---					
Quantidades para um volume de: 1000,00 litros						Quantidades para um volume de: 1,60 litros					
C1=	736,2 kg	Massa total, em kg		C2=	0,0 kg	Massa total, em g		C1=	1177,8 g	Massa total, em g	
CV=	0,0 kg	2353,2		CV=	0,0 g	3765,6		C2=	0,0 g	3765,6	
MS=	0,0 kg	Razão água/(mat. cimentícios)		MS=	0,0 g	Razão água/(mat. cimentícios)		CV=	0,0 g	Razão água/(mat. cimentícios)	
FC=	273,3 kg	0,328		FC=	437,3 g	0,328		MS=	0,0 g	Razão água/(mat. cimentícios)	
SL=	0,0 kg	Razão água/cimento		SL=	0,0 g	Razão água/cimento		FC=	437,3 g	Razão água/cimento	
W=	241,1 litros	0,328		W=	385,8 g	0,328		SL=	0,0 g	Razão água/cimento	
Sp=	5,29 litros	Razão água/finos		Sp=	8,88 g	Razão água/finos		W=	385,8 g	Razão água/cimento	
S1=	386,8 kg	0,239		S1=	618,9 g	0,239		Sp=	8,88 g	Razão água/finos	
S2=	710,2 kg			S2=	1136,4 g			S1=	618,9 g	Razão água/finos	
								S2=	1136,4 g	Razão água/finos	

Quadro A2.2. Estudo da composição da argamassa auto-compactável FC número 2.

ESTUDO DA COMPOSIÇÃO DE ARGAMASSAS											
Identificação da argamassa A.SG.FC.2			Identificação da mistura de finos 70C1+30FC			Data 30-03-2010					
Parâmetros da composição			Composição da mistura de finos			Abertura da malha (mm)			Mistura (Curva Real)		
Vp/Vs	Vw/Vp	Sp/P%	fc1	fc2	fcv	fms	ffc	fsl	a1	a2	
0,80	0,74	0,45	0,70	0,00	0,00	0,00	0,30	0,00	0,35	0,65	
Massas volúmicas dos materiais finos, em kg/m ³			Massas volúmicas dos agregados, em kg/m ³			Massas volúmicas dos adjuvantes, em kg/m ³			Módulos de finura		
δc1	δc2	δcv	δms	δfc	δsl	δs1	δs2	---	---	---	---
3140	3040	2380	2170	2720	1730	2640	2610	---	---	---	---
Massas volúmicas dos agregados, em kg/m ³			Massas volúmicas dos adjuvantes, em kg/m ³			δsp			δp= 3014,00 kg/m ³		
δs1			δs2			---			Vsp/Vp= 0,0129171 m ³ /m ³		
2640			2610			---			Vp= 0,3330095 m ³ /m ³		
---			---			---			Vw= 0,246427 m ³ /m ³		
---			---			---			Vsp= 0,0043015 m ³ /m ³		
1050			---			---			Vs= 0,4162619 m ³ /m ³		
Quantidades para um volume de: 1000,00 litros						Quantidades para um volume de: 1,60 litros					
C1=	732,0 kg	Massa total, em kg		C2=	0,0 kg	Massa total, em g		C1=	1171,1 g	Massa total, em g	
CV=	0,0 kg	2345,4		CV=	0,0 g	3753,1		C2=	0,0 g	3753,1	
MS=	0,0 kg	Razão água/(mat. cimentícios)		MS=	0,0 g	Razão água/(mat. cimentícios)		CV=	0,0 g	Razão água/(mat. cimentícios)	
FC=	271,7 kg	0,337		FC=	434,8 g	0,337		MS=	0,0 g	Razão água/(mat. cimentícios)	
SL=	0,0 kg	Razão água/cimento		SL=	0,0 g	Razão água/cimento		FC=	434,8 g	Razão água/cimento	
W=	246,4 litros	0,337		W=	394,3 g	0,337		SL=	0,0 g	Razão água/cimento	
Sp=	4,30 litros	Razão água/finos		Sp=	7,23 g	Razão água/finos		W=	394,3 g	Razão água/cimento	
S1=	384,6 kg	0,246		S1=	615,4 g	0,246		Sp=	7,23 g	Razão água/finos	
S2=	706,2 kg			S2=	1129,9 g			S1=	615,4 g	Razão água/finos	
								S2=	1129,9 g	Razão água/finos	

Quadro A2.3. Estudo da composição da argamassa auto-compactável FC número 3.

ESTUDO DA COMPOSIÇÃO DE ARGAMASSAS									
Identificação da argamassa A.SG.FC.3			Identificação da mistura de finos 70C1+30FC			Data 30-03-2010			
Parâmetros da composição Vp/Vs Vw/Vp Sp/Pk 0,80 0,74 0,52			Composição da mistura de finos fc1 fc2 fcv fms ffc fsl 0,70 0,00 0,00 0,00 0,30 0,00			Abertura da malha (mm) Areia02 Areia04 Mistura (Curva Real) a1 a2 0,35 0,65			
Massas volúmicas dos materiais finos, em kg/m ³ δc1 δc2 δcv δms δfc δsl 3140 3040 2380 2170 2720 1730			Massas volúmicas dos agregados, em kg/m ³ δs1 δs2 --- --- --- 2640 2610 --- --- ---			Módulos de finura 1,960 2,821 2,520			
Massas volúmicas dos adjuvantes, em kg/m ³ δsp --- --- --- --- 1050 --- --- --- ---			Quantidades para um volume de: 1000,00 litros C1= 731,5 kg C2= 0,0 kg <u>Massa total, em kg</u> CV= 0,0 kg <u>2344,6</u> MS= 0,0 kg <u>Razão água/(mat. cimentícios)</u> FC= 271,6 kg <u>0,337</u> SL= 0,0 kg <u>Razão água/cimento</u> W= 246,3 litros <u>0,337</u> Sp= 4,97 litros <u>Razão água/finos</u> S1= 384,4 kg <u>0,246</u> S2= 705,7 kg			Quantidades para um volume de: 1,60 litros C1= 1170,3 g C2= 0,0 g <u>Massa total, em g</u> CV= 0,0 g <u>3751,7</u> MS= 0,0 g <u>Razão água/(mat. cimentícios)</u> FC= 434,5 g <u>0,337</u> SL= 0,0 g <u>Razão água/cimento</u> W= 394,0 g <u>0,337</u> Sp= 8,35 g <u>Razão água/finos</u> S1= 615,0 g <u>0,246</u> S2= 1129,1 g			
						$\delta_p = 3014,00 \text{ kg/m}^3$ $V_{sp}/V_p = 0,0149265 \text{ m}^3/\text{m}^3$ $V_p = 0,3327868 \text{ m}^3/\text{m}^3$ $V_{wv} = 0,2462623 \text{ m}^3/\text{m}^3$ $V_{sp} = 0,0049673 \text{ m}^3/\text{m}^3$ $V_s = 0,4159836 \text{ m}^3/\text{m}^3$			

Quadro A2.4. Estudo da composição da argamassa auto-compactável FC número 4.

ESTUDO DA COMPOSIÇÃO DE ARGAMASSAS									
Identificação da argamassa A.SG.FC.4			Identificação da mistura de finos 70C1+30FC			Data 30-03-2010			
Parâmetros da composição Vp/Vs Vw/Vp Sp/Pk 0,80 0,76 0,52			Composição da mistura de finos fc1 fc2 fcv fms ffc fsl 0,70 0,00 0,00 0,00 0,30 0,00			Abertura da malha (mm) Areia02 Areia04 Mistura (Curva Real) a1 a2 0,35 0,65			
Massas volúmicas dos materiais finos, em kg/m ³ δc1 δc2 δcv δms δfc δsl 3140 3040 2380 2170 2720 1730			Massas volúmicas dos agregados, em kg/m ³ δs1 δs2 --- --- --- 2640 2610 --- --- ---			Módulos de finura 1,960 2,821 2,520			
Massas volúmicas dos adjuvantes, em kg/m ³ δsp --- --- --- --- 1050 --- --- --- ---			Quantidades para um volume de: 1000,00 litros C1= 726,6 kg C2= 0,0 kg <u>Massa total, em kg</u> CV= 0,0 kg <u>2335,7</u> MS= 0,0 kg <u>Razão água/(mat. cimentícios)</u> FC= 269,8 kg <u>0,346</u> SL= 0,0 kg <u>Razão água/cimento</u> W= 251,2 litros <u>0,346</u> Sp= 4,93 litros <u>Razão água/finos</u> S1= 381,8 kg <u>0,252</u> S2= 701,1 kg			Quantidades para um volume de: 1,60 litros C1= 1162,6 g C2= 0,0 g <u>Massa total, em g</u> CV= 0,0 g <u>3737,5</u> MS= 0,0 g <u>Razão água/(mat. cimentícios)</u> FC= 431,6 g <u>0,346</u> SL= 0,0 g <u>Razão água/cimento</u> W= 402,0 g <u>0,346</u> Sp= 8,29 g <u>Razão água/finos</u> S1= 610,9 g <u>0,252</u> S2= 1121,7 g			
						$\delta_p = 3014,00 \text{ kg/m}^3$ $V_{sp}/V_p = 0,0149265 \text{ m}^3/\text{m}^3$ $V_p = 0,3305865 \text{ m}^3/\text{m}^3$ $V_{wv} = 0,2512458 \text{ m}^3/\text{m}^3$ $V_{sp} = 0,0049345 \text{ m}^3/\text{m}^3$ $V_s = 0,4132332 \text{ m}^3/\text{m}^3$			

Quadro A2.7. Estudo da composição da argamassa auto-compactável SL0 número 2.

ESTUDO DA COMPOSIÇÃO DE ARGAMASSAS																																																			
Identificação da argamassa A.SG.SL0.2			Identificação da mistura de finos 70C1+30SL0			Data 31-03-2010																																													
Parâmetros da composição Vp/Vs Vw/Vp Sp/P%			Composição da mistura de finos fc1 fc2 fcv fms ffc fsl			Abertura da malha (mm)																																													
0,80 1,10 3,50			0,70 0,00 0,00 0,00 0,00 0,30			<table border="1"> <thead> <tr> <th>Areia02</th> <th>Areia04</th> <th>Mistura (Curva Real)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0,35</td> <td>0,65</td> <td></td> </tr> <tr> <th colspan="3">Porcentagem de passados</th> </tr> <tr> <td>9,520</td> <td>100,00</td> <td>100,00</td> </tr> <tr> <td>4,760</td> <td>100,00</td> <td>98,48</td> </tr> <tr> <td>2,380</td> <td>99,94</td> <td>94,23</td> </tr> <tr> <td>1,190</td> <td>99,51</td> <td>78,40</td> </tr> <tr> <td>0,590</td> <td>82,79</td> <td>40,43</td> </tr> <tr> <td>0,297</td> <td>20,53</td> <td>5,91</td> </tr> <tr> <td>0,149</td> <td>1,24</td> <td>0,44</td> </tr> <tr> <td>0,074</td> <td>0,16</td> <td>0,15</td> </tr> <tr> <td>Resíduo</td> <td>0,00</td> <td>0,00</td> </tr> <tr> <th colspan="3">Módulos de finura</th> </tr> <tr> <td>1,960</td> <td>2,821</td> <td>2,520</td> </tr> </tbody> </table>				Areia02	Areia04	Mistura (Curva Real)	0,35	0,65		Porcentagem de passados			9,520	100,00	100,00	4,760	100,00	98,48	2,380	99,94	94,23	1,190	99,51	78,40	0,590	82,79	40,43	0,297	20,53	5,91	0,149	1,24	0,44	0,074	0,16	0,15	Resíduo	0,00	0,00	Módulos de finura			1,960	2,821	2,520
Areia02	Areia04	Mistura (Curva Real)																																																	
0,35	0,65																																																		
Porcentagem de passados																																																			
9,520	100,00	100,00																																																	
4,760	100,00	98,48																																																	
2,380	99,94	94,23																																																	
1,190	99,51	78,40																																																	
0,590	82,79	40,43																																																	
0,297	20,53	5,91																																																	
0,149	1,24	0,44																																																	
0,074	0,16	0,15																																																	
Resíduo	0,00	0,00																																																	
Módulos de finura																																																			
1,960	2,821	2,520																																																	
Massas volúmicas dos materiais finos, em kg/m ³ δc1 δc2 δcv δms δfc δsl			Massas volúmicas dos agregados, em kg/m ³ δs1 δs2 --- --- ---			δp= 2720,00 kg/m ³ Vsp/Vp= 0,0906667 m ³ /m ³ Vp= 0,2906413 m ³ /m ³ Vw= 0,3197055 m ³ /m ³ Vsp= 0,0263515 m ³ /m ³ Vs= 0,3633017 m ³ /m ³																																													
3140 3040 2380 2170 2720 1740			2640 2610 --- --- ---																																																
Massas volúmicas dos adjuvantes, em kg/m ³ δsp --- --- --- ---			Massas volúmicas dos adjuvantes, em kg/m ³ δsp --- --- --- ---																																																
1050 --- --- --- ---			1050 --- --- --- ---																																																
Quantidades para um volume de: 1000,00 litros					Quantidades para um volume de: 1,60 litros																																														
C1= 638,8 kg					C1= 1022,1 g																																														
C2= 0,0 kg					C2= 0,0 g																																														
CV= 0,0 kg					CV= 0,0 g																																														
MS= 0,0 kg					MS= 0,0 g																																														
FC= 0,0 kg					FC= 0,0 g																																														
SL= 151,7 kg					SL= 242,7 g																																														
W= 319,7 litros					W= 511,5 g																																														
Sp= 26,35 litros					Sp= 44,27 g																																														
S1= 335,7 kg					S1= 537,1 g																																														
S2= 616,3 kg					S2= 986,1 g																																														
Massa total, em kg: 2090,0 Razão água/(mat. cimentícios): 0,500 Razão água/cimento: 0,500 Razão água/finos: 0,404					Massa total, em g: 3346,1 Razão água/(mat. cimentícios): 0,500 Razão água/cimento: 0,500 Razão água/finos: 0,404																																														

Quadro A2.8. Estudo da composição da argamassa auto-compactável SL0 número 3.

ESTUDO DA COMPOSIÇÃO DE ARGAMASSAS																																																			
Identificação da argamassa A.SG.SL0.3			Identificação da mistura de finos 70C1+30SL0			Data 31-03-2010																																													
Parâmetros da composição Vp/Vs Vw/Vp Sp/P%			Composição da mistura de finos fc1 fc2 fcv fms ffc fsl			Abertura da malha (mm)																																													
0,80 0,98 4,50			0,70 0,00 0,00 0,00 0,00 0,30			<table border="1"> <thead> <tr> <th>Areia02</th> <th>Areia04</th> <th>Mistura (Curva Real)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0,35</td> <td>0,65</td> <td></td> </tr> <tr> <th colspan="3">Porcentagem de passados</th> </tr> <tr> <td>9,520</td> <td>100,00</td> <td>100,00</td> </tr> <tr> <td>4,760</td> <td>100,00</td> <td>98,48</td> </tr> <tr> <td>2,380</td> <td>99,94</td> <td>94,23</td> </tr> <tr> <td>1,190</td> <td>99,51</td> <td>78,40</td> </tr> <tr> <td>0,590</td> <td>82,79</td> <td>40,43</td> </tr> <tr> <td>0,297</td> <td>20,53</td> <td>5,91</td> </tr> <tr> <td>0,149</td> <td>1,24</td> <td>0,44</td> </tr> <tr> <td>0,074</td> <td>0,16</td> <td>0,15</td> </tr> <tr> <td>Resíduo</td> <td>0,00</td> <td>0,00</td> </tr> <tr> <th colspan="3">Módulos de finura</th> </tr> <tr> <td>1,960</td> <td>2,821</td> <td>2,520</td> </tr> </tbody> </table>				Areia02	Areia04	Mistura (Curva Real)	0,35	0,65		Porcentagem de passados			9,520	100,00	100,00	4,760	100,00	98,48	2,380	99,94	94,23	1,190	99,51	78,40	0,590	82,79	40,43	0,297	20,53	5,91	0,149	1,24	0,44	0,074	0,16	0,15	Resíduo	0,00	0,00	Módulos de finura			1,960	2,821	2,520
Areia02	Areia04	Mistura (Curva Real)																																																	
0,35	0,65																																																		
Porcentagem de passados																																																			
9,520	100,00	100,00																																																	
4,760	100,00	98,48																																																	
2,380	99,94	94,23																																																	
1,190	99,51	78,40																																																	
0,590	82,79	40,43																																																	
0,297	20,53	5,91																																																	
0,149	1,24	0,44																																																	
0,074	0,16	0,15																																																	
Resíduo	0,00	0,00																																																	
Módulos de finura																																																			
1,960	2,821	2,520																																																	
Massas volúmicas dos materiais finos, em kg/m ³ δc1 δc2 δcv δms δfc δsl			Massas volúmicas dos agregados, em kg/m ³ δs1 δs2 --- --- ---			δp= 2720,00 kg/m ³ Vsp/Vp= 0,1165714 m ³ /m ³ Vp= 0,2988133 m ³ /m ³ Vw= 0,292837 m ³ /m ³ Vsp= 0,0348331 m ³ /m ³ Vs= 0,3735166 m ³ /m ³																																													
3140 3040 2380 2170 2720 1740			2640 2610 --- --- ---																																																
Massas volúmicas dos adjuvantes, em kg/m ³ δsp --- --- --- ---			Massas volúmicas dos adjuvantes, em kg/m ³ δsp --- --- --- ---																																																
1050 --- --- --- ---			1050 --- --- --- ---																																																
Quantidades para um volume de: 1000,00 litros					Quantidades para um volume de: 1,60 litros																																														
C1= 656,8 kg					C1= 1050,9 g																																														
C2= 0,0 kg					C2= 0,0 g																																														
CV= 0,0 kg					CV= 0,0 g																																														
MS= 0,0 kg					MS= 0,0 g																																														
FC= 0,0 kg					FC= 0,0 g																																														
SL= 156,0 kg					SL= 249,6 g																																														
W= 292,8 litros					W= 468,5 g																																														
Sp= 34,83 litros					Sp= 58,52 g																																														
S1= 345,1 kg					S1= 552,2 g																																														
S2= 633,7 kg					S2= 1013,9 g																																														
Massa total, em kg: 2121,0 Razão água/(mat. cimentícios): 0,446 Razão água/cimento: 0,446 Razão água/finos: 0,360					Massa total, em g: 3396,5 Razão água/(mat. cimentícios): 0,446 Razão água/cimento: 0,446 Razão água/finos: 0,360																																														

Quadro A2.9. Estudo da composição da argamassa auto-compactável SLO número 4.

ESTUDO DA COMPOSIÇÃO DE ARGAMASSAS					
Identificação da argamassa		Identificação da mistura de finos		Data	
A.SG.SLO.4		70C1+30SLO		31-03-2010	
Parâmetros da composição					
Vp/Vs	Vw/Vp	Sp/P%			
0,80	0,96	4,50			
Composição da mistura de finos					
fc1	fc2	fcv	fms	ffc	fsl
0,70	0,00	0,00	0,00	0,00	0,30
Massas volúmicas dos materiais finos, em kg/m ³					
δc1	δc2	δcv	δms	δfc	δsl
3140	3040	2380	2170	2720	1740
Massas volúmicas dos agregados, em kg/m ³					
δs1	δs2	---	---	---	---
2640	2610	---	---	---	---
Massas volúmicas dos adjuvantes, em kg/m ³					
δsp	---	---	---	---	---
1050	---	---	---	---	---
Abertura da malha (mm)			Areia02	Areia04	Mistura (Curva Real)
			a1	a2	
			0,35	0,65	
Percentagem de passados					
9,520	100,00	100,00	100,00	100,00	
4,760	100,00	98,48	98,48	99,01	
2,380	99,94	94,23	94,23	96,23	
1,190	99,51	78,40	78,40	85,79	
0,590	82,79	40,43	40,43	55,26	
0,297	20,53	5,91	5,91	11,03	
0,149	1,24	0,44	0,44	0,72	
0,074	0,16	0,15	0,15	0,15	
Resíduo	0,00	0,00	0,00	0,00	
Módulos de finura					
			1,960	2,821	2,520
δp= 2720,00 kg/m ³ Vsp/Vp= 0,1165714 m ³ /m ³ Vp= 0,3006098 m ³ /m ³ Vw= 0,2885854 m ³ /m ³ Vsp= 0,0350425 m ³ /m ³ Vs= 0,3757623 m ³ /m ³					
Quantidades para um volume de: 1000,00 litros			Quantidades para um volume de: 1,60 litros		
C1=	660,7 kg		C1=	1057,2 g	
C2=	0,0 kg	Massa total, em kg	C2=	0,0 g	Massa total, em g
CV=	0,0 kg	2127,7	CV=	0,0 g	3407,3
MS=	0,0 kg	Razão água/(mat. cimentícios)	MS=	0,0 g	Razão água/(mat. cimentícios)
FC=	0,0 kg	0,437	FC=	0,0 g	0,437
SL=	156,9 kg	Razão água/cimento	SL=	251,1 g	Razão água/cimento
W=	288,6 litros	0,437	W=	461,7 g	0,437
Sp=	35,04 litros	Razão água/finos	Sp=	58,87 g	Razão água/finos
S1=	347,2 kg	0,353	S1=	555,5 g	0,353
S2=	637,5 kg		S2=	1020,0 g	

Quadro A2.10. Estudo da composição da argamassa auto-compactável SLO número 5.

ESTUDO DA COMPOSIÇÃO DE ARGAMASSAS					
Identificação da argamassa		Identificação da mistura de finos		Data	
A.SG.SLO.5		70C1+30SLO		31-03-2010	
Parâmetros da composição					
Vp/Vs	Vw/Vp	Sp/P%			
0,80	0,94	4,50			
Composição da mistura de finos					
fc1	fc2	fcv	fms	ffc	fsl
0,70	0,00	0,00	0,00	0,00	0,30
Massas volúmicas dos materiais finos, em kg/m ³					
δc1	δc2	δcv	δms	δfc	δsl
3140	3040	2380	2170	2720	1740
Massas volúmicas dos agregados, em kg/m ³					
δs1	δs2	---	---	---	---
2640	2610	---	---	---	---
Massas volúmicas dos adjuvantes, em kg/m ³					
δsp	---	---	---	---	---
1050	---	---	---	---	---
Abertura da malha (mm)			Areia02	Areia04	Mistura (Curva Real)
			a1	a2	
			0,35	0,65	
Percentagem de passados					
9,520	100,00	100,00	100,00	100,00	
4,760	100,00	98,48	98,48	99,01	
2,380	99,94	94,23	94,23	96,23	
1,190	99,51	78,40	78,40	85,79	
0,590	82,79	40,43	40,43	55,26	
0,297	20,53	5,91	5,91	11,03	
0,149	1,24	0,44	0,44	0,72	
0,074	0,16	0,15	0,15	0,15	
Resíduo	0,00	0,00	0,00	0,00	
Módulos de finura					
			1,960	2,821	2,520
δp= 2720,00 kg/m ³ Vsp/Vp= 0,11657 m ³ /m ³ Vp= 0,30243 m ³ /m ³ Vw= 0,28428 m ³ /m ³ Vsp= 0,03525 m ³ /m ³ Vs= 0,37804 m ³ /m ³					
Quantidades para um volume de: 1000,00 litros			Quantidades para um volume de: 1,60 litros		
C1=	664,7 kg		C1=	1063,6 g	
C2=	0,0 kg	Massa total, em kg	C2=	0,0 g	Massa total, em g
CV=	0,0 kg	2134,5	CV=	0,0 g	3418,2
MS=	0,0 kg	Razão água/(mat. cimentícios)	MS=	0,0 g	Razão água/(mat. cimentícios)
FC=	0,0 kg	0,428	FC=	0,0 g	0,428
SL=	157,9 kg	Razão água/cimento	SL=	252,6 g	Razão água/cimento
W=	284,3 litros	0,428	W=	454,9 g	0,428
Sp=	35,25 litros	Razão água/finos	Sp=	59,23 g	Razão água/finos
S1=	349,3 kg	0,346	S1=	558,9 g	0,346
S2=	641,3 kg		S2=	1026,1 g	

Quadro A2.11 Estudo da composição da argamassa auto-compactável SL500 número 1.

ESTUDO DA COMPOSIÇÃO DE ARGAMASSAS					
Identificação da argamassa A.SG.SL500.1		Identificação da mistura de finos 70C1+30SL500		Data 31-03-2010	
Parâmetros da composição				Abertura da malha	
Vp/Vs	Vw/Vp	Sp/P%			Areia02
0,80	0,98	4,90			a1
				Areia04	
				a2	
				Mistura (Curva Real)	
				Percentagem de passados	
				9,520	100,00
				4,760	100,00
				2,380	99,94
				1,190	99,51
				0,590	82,79
				0,297	20,53
				0,149	1,24
				0,074	0,16
				Residuo	0,00
				Módulos de finura	
				1,960	2,821
					2,520
Composição da mistura de finos					
fc1	fc2	fcv	fms	ffc	fsl
0,70	0,00	0,00	0,00	0,00	0,30
Massas volúmicas dos materiais finos, em kg/m ³					
δc1	δc2	δcv	δms	δfc	δsl
3140	3040	2380	2170	2720	2060
Massas volúmicas dos agregados, em kg/m ³					
δs1	δs2	---	---	---	---
2640	2610	---	---	---	---
Massas volúmicas dos adjuvantes, em kg/m ³					
δsp	---	---	---	---	---
1050	---	---	---	---	---
δp= 2816,00 kg/m ³ Vsp/Vp= 0,1314133 m ³ /m ³ Vp= 0,2974939 m ³ /m ³ Vw= 0,291544 m ³ /m ³ Vsp= 0,0390947 m ³ /m ³ Vs= 0,3718674 m ³ /m ³					
Quantidades para um volume de: 1000,00 litros			Quantidades para um volume de: 1,60 litros		
C1=	653,9 kg		C1=	1046,2 g	
C2=	0,0 kg	Massa total, em kg	C2=	0,0 g	Massa total, em g
CV=	0,0 kg	2144,8	CV=	0,0 g	3435,0
MS=	0,0 kg	Razão água/(mat. cimentícios)	MS=	0,0 g	Razão água/(mat. cimentícios)
FC=	0,0 kg	0,446	FC=	0,0 g	0,446
SL=	183,9 kg	Razão água/cimento	SL=	294,2 g	Razão água/cimento
W=	291,5 litros	0,446	W=	466,5 g	0,446
Sp=	39,09 litros	Razão água/finos	Sp=	65,68 g	Razão água/finos
S1=	343,6 kg	0,348	S1=	549,8 g	0,348
S2=	630,9 kg		S2=	1009,4 g	

Quadro A2.12 Estudo da composição da argamassa auto-compactável SL 500 número 2.

ESTUDO DA COMPOSIÇÃO DE ARGAMASSAS					
Identificação da argamassa A.SG.SL500.2		Identificação da mistura de finos 70C1+30SL500		Data 31-03-2010	
Parâmetros da composição				Abertura da malha	
Vp/Vs	Vw/Vp	Sp/P%			Areia02
0,80	1,10	4,40			a1
				Areia04	
				a2	
				Mistura (Curva Real)	
				Percentagem de passados	
				9,520	100,00
				4,760	100,00
				2,380	99,94
				1,190	99,51
				0,590	82,79
				0,297	20,53
				0,149	1,24
				0,074	0,16
				Residuo	0,00
				Módulos de finura	
				1,960	2,821
					2,520
Composição da mistura de finos					
fc1	fc2	fcv	fms	ffc	fsl
0,70	0,00	0,00	0,00	0,00	0,30
Massas volúmicas dos materiais finos, em kg/m ³					
δc1	δc2	δcv	δms	δfc	δsl
3140	3040	2380	2170	2720	2060
Massas volúmicas dos agregados, em kg/m ³					
δs1	δs2	---	---	---	---
2640	2610	---	---	---	---
Massas volúmicas dos adjuvantes, em kg/m ³					
δsp	---	---	---	---	---
1050	---	---	---	---	---
δp= 2816,00 kg/m ³ Vsp/Vp= 0,1180038 m ³ /m ³ Vp= 0,2883503 m ³ /m ³ Vw= 0,3171853 m ³ /m ³ Vsp= 0,0340264 m ³ /m ³ Vs= 0,3604379 m ³ /m ³					
Quantidades para um volume de: 1000,00 litros			Quantidades para um volume de: 1,60 litros		
C1=	633,8 kg		C1=	1014,1 g	
C2=	0,0 kg	Massa total, em kg	C2=	0,0 g	Massa total, em g
CV=	0,0 kg	2109,4	CV=	0,0 g	3378,0
MS=	0,0 kg	Razão água/(mat. cimentícios)	MS=	0,0 g	Razão água/(mat. cimentícios)
FC=	0,0 kg	0,500	FC=	0,0 g	0,500
SL=	178,2 kg	Razão água/cimento	SL=	285,1 g	Razão água/cimento
W=	317,2 litros	0,500	W=	507,5 g	0,500
Sp=	34,03 litros	Razão água/finos	Sp=	57,16 g	Razão água/finos
S1=	333,0 kg	0,391	S1=	532,9 g	0,391
S2=	611,5 kg		S2=	978,4 g	

Quadro A2.13. Estudo da composição da argamassa auto-compactável SL500 número 3.

ESTUDO DA COMPOSIÇÃO DE ARGAMASSAS					
Identificação da argamassa A.SG.SL500.3		Identificação da mistura de finos 70C1+30SL500		Data 31-03-2010	
Parâmetros da composição Vp/Vs Vw/Vp Sp/P%		0,80 1,25 4,35			
Composição da mistura de finos					
fc1	fc2	fcv	fms	ffc	fsl
0,70	0,00	0,00	0,00	0,00	0,30
Massas volúmicas dos materiais finos, em kg/m ³					
δc1	δc2	δcv	δms	δfc	δsl
3140	3040	2380	2170	2720	2060
Massas volúmicas dos agregados, em kg/m ³					
δs1	δs2	---	---	---	---
2640	2610	---	---	---	---
Massas volúmicas dos adjuvantes, em kg/m ³					
δsp	---	---	---	---	---
1050	---	---	---	---	---
Quantidades para um volume de: 1000,00 litros		Quantidades para um volume de: 1,60 litros			
C1= 607,7 kg		C1= 972,4 g			
C2= 0,0 kg	Massa total, em kg	C2= 0,0 g	Massa total, em g		
CV= 0,0 kg	2063,8	CV= 0,0 g	3304,8		
MS= 0,0 kg	Razão água/(mat. cimentícios)	MS= 0,0 g	Razão água/(mat. cimentícios)		
FC= 0,0 kg	0,569	FC= 0,0 g	0,569		
SL= 170,9 kg	Razão água/cimento	SL= 273,4 g	Razão água/cimento		
W= 345,6 litros	0,569	W= 553,0 g	0,569		
Sp= 32,26 litros	Razão água/finos	Sp= 54,19 g	Razão água/finos		
S1= 319,4 kg	0,444	S1= 511,0 g	0,444		
S2= 586,3 kg		S2= 938,2 g			
		Abertura da malha (mm) Areia02 Areia04 Mistura (Curva Real) Percentagem de passados 9,520 100,00 100,00 100,00 4,760 100,00 98,48 99,01 2,380 99,94 94,23 96,23 1,190 99,51 78,40 85,79 0,590 82,79 40,43 55,26 0,297 20,53 5,91 11,03 0,149 1,24 0,44 0,72 0,074 0,16 0,15 0,15 Resíduo 0,00 0,00 0,00 Módulos de finura 1,960 2,821 2,520 δp= 2816,00 kg/m ³ Vsp/Vp= 0,1166629 m ³ /m ³ Vp= 0,276498 m ³ /m ³ Vw= 0,3456225 m ³ /m ³ Vsp= 0,032257 m ³ /m ³ Vs= 0,3456225 m ³ /m ³			

Quadro A2.14. Estudo da composição da argamassa auto-compactável SL500 número 4.

ESTUDO DA COMPOSIÇÃO DE ARGAMASSAS					
Identificação da argamassa A.SG.SL500.4		Identificação da mistura de finos 70C1+30SL500		Data 31-03-2010	
Parâmetros da composição Vp/Vs Vw/Vp Sp/P%		0,80 1,12 4,36			
Composição da mistura de finos					
fc1	fc2	fcv	fms	ffc	fsl
0,70	0,00	0,00	0,00	0,00	0,30
Massas volúmicas dos materiais finos, em kg/m ³					
δc1	δc2	δcv	δms	δfc	δsl
3140	3040	2380	2170	2720	2060
Massas volúmicas dos agregados, em kg/m ³					
δs1	δs2	---	---	---	---
2640	2610	---	---	---	---
Massas volúmicas dos adjuvantes, em kg/m ³					
δsp	---	---	---	---	---
1050	---	---	---	---	---
Quantidades para um volume de: 1000,00 litros		Quantidades para um volume de: 1,60 litros			
C1= 630,4 kg		C1= 1008,6 g			
C2= 0,0 kg	Massa total, em kg	C2= 0,0 g	Massa total, em g		
CV= 0,0 kg	2103,4	CV= 0,0 g	3368,3		
MS= 0,0 kg	Razão água/(mat. cimentícios)	MS= 0,0 g	Razão água/(mat. cimentícios)		
FC= 0,0 kg	0,510	FC= 0,0 g	0,510		
SL= 177,2 kg	Razão água/cimento	SL= 283,6 g	Razão água/cimento		
W= 321,2 litros	0,510	W= 513,9 g	0,510		
Sp= 33,53 litros	Razão água/finos	Sp= 56,34 g	Razão água/finos		
S1= 321,2 kg	0,398	S1= 530,0 g	0,398		
S2= 608,2 kg		S2= 973,1 g			
		Abertura da malha (mm) Areia02 Areia04 Mistura (Curva Real) Percentagem de passados 9,520 100,00 100,00 100,00 4,760 100,00 98,48 99,01 2,380 99,94 94,23 96,23 1,190 99,51 78,40 85,79 0,590 82,79 40,43 55,26 0,297 20,53 5,91 11,03 0,149 1,24 0,44 0,72 0,074 0,16 0,15 0,15 Resíduo 0,00 0,00 0,00 Módulos de finura 1,960 2,821 2,520 δp= 2816,00 kg/m ³ Vsp/Vp= 0,116931 m ³ /m ³ Vp= 0,2867851 m ³ /m ³ Vw= 0,3211994 m ³ /m ³ Vsp= 0,035341 m ³ /m ³ Vs= 0,3584814 m ³ /m ³			

Quadro A2.15. Estudo da composição da argamassa auto-compactável SL700 número 1.

ESTUDO DA COMPOSIÇÃO DE ARGAMASSAS					
Identificação da argamassa		Identificação da mistura de finos		Data	
A.SG.SL700.1		70C1+30SL700		01-04-2010	
Parâmetros da composição			Abertura da malha		
Vp/Vs	Vw/Vp	Sp/PS	Areia02	Areia04	Mistura (Curva Real)
0,80	1,14	4,30	0,35	0,65	
Composição da mistura de finos					
fc1	fc2	fcv	fms	ffc	fsl
0,70	0,00	0,00	0,00	0,00	0,30
Massas volúmicas dos materiais finos, em kg/m ³					
δc1	δc2	δcv	δms	δfc	δsl
3140	3040	2380	2170	2720	2248
Massas volúmicas dos agregados, em kg/m ³					
δs1	δs2	---	---	---	---
2640	2610	---	---	---	---
Massas volúmicas dos adjuvantes, em kg/m ³					
δsp	---	---	---	---	---
1050	---	---	---	---	---
Quantidades para um volume de: 1000,00 litros			Quantidades para um volume de: 1,60 litros		
C1=	626,6 kg	Massa total, em kg	C1=	1002,6 g	Massa total, em g
C2=	0,0 kg	2113,0	C2=	0,0 g	3383,6
CV=	0,0 kg	Razão água/(mat. cimentícios)	CV=	0,0 g	0,519
MS=	0,0 kg	0,519	MS=	0,0 g	0,519
FC=	0,0 kg	Razão água/cimento	FC=	0,0 g	0,519
SL=	192,3 kg	0,519	SL=	307,6 g	0,519
W=	325,0 litros	0,397	W=	520,0 g	0,397
Sp=	33,54 litros		Sp=	56,34 g	
S1=	329,3 kg		S1=	526,9 g	
S2=	604,6 kg		S2=	967,3 g	

Quadro A2.16. Estudo da composição da argamassa auto-compactável SL700 número 2.

ESTUDO DA COMPOSIÇÃO DE ARGAMASSAS					
Identificação da argamassa		Identificação da mistura de finos		Data	
A.SG.SL700.2		70C1+30SL700		01-04-2010	
Parâmetros da composição			Abertura da malha		
Vp/Vs	Vw/Vp	Sp/PS	Areia02	Areia04	Mistura (Curva Real)
0,80	1,08	4,32	0,35	0,65	
Composição da mistura de finos					
fc1	fc2	fcv	fms	ffc	fsl
0,70	0,00	0,00	0,00	0,00	0,30
Massas volúmicas dos materiais finos, em kg/m ³					
δc1	δc2	δcv	δms	δfc	δsl
3140	3040	2380	2170	2720	2248
Massas volúmicas dos agregados, em kg/m ³					
δs1	δs2	---	---	---	---
2640	2610	---	---	---	---
Massas volúmicas dos adjuvantes, em kg/m ³					
δsp	---	---	---	---	---
1050	---	---	---	---	---
Quantidades para um volume de: 1000,00 litros			Quantidades para um volume de: 1,60 litros		
C1=	637,4 kg	Massa total, em kg	C1=	1019,9 g	Massa total, em g
C2=	0,0 kg	2132,2	C2=	0,0 g	3414,4
CV=	0,0 kg	Razão água/(mat. cimentícios)	CV=	0,0 g	0,491
MS=	0,0 kg	0,491	MS=	0,0 g	0,491
FC=	0,0 kg	Razão água/cimento	FC=	0,0 g	0,491
SL=	195,6 kg	0,491	SL=	312,9 g	0,491
W=	313,2 litros	0,376	W=	501,1 g	0,376
Sp=	34,27 litros		Sp=	57,58 g	
S1=	335,0 kg		S1=	535,9 g	
S2=	615,0 kg		S2=	984,0 g	

Quadro A2.19 Resumo das propriedades reológicas para cada acerto da argamassa FC.

ARGAMASSA: A.SG.FC								
Mistura	Parâmetros da mistura			Leituras			Reologia	
	Vp/Vs	Vw/Vp	Sp/p%	d1 [mm]	d2 [mm]	t [s]	Gm	Rm [s ⁻¹]
A.SG.FC.1	0,80	0,72	0,55	257	256	11,96	5,58	0,84
A.SG.FC.2	0,80	0,74	0,45	181	178	14,83	2,22	0,67
A.SG.FC.3	0,80	0,74	0,52	211	213	12,38	3,49	0,81
A.SG.FC.4	0,80	0,76	0,52	225	225	10,02	4,06	1,00
A.SG.FC.5	0,80	0,76	0,54	261	260	8,36	5,79	1,20

Quadro A2.20 Resumo das propriedades reológicas para cada acerto da argamassa SL0.

ARGAMASSA: A.SG.SL0								
Mistura	Parâmetros da mistura			Leituras			Reologia	
	Vp/Vs	Vw/Vp	Sp/p%	d1 [mm]	d2 [mm]	t [s]	Gm	Rm [s ⁻¹]
A.SG.SL0.1	0,80	1,35	2,65	236	236	5,31	4,57	1,88
A.SG.SL0.2	0,80	1,10	3,50	319	309	3,48	8,86	2,87
A.SG.SL0.3	0,80	0,98	4,50	287	288	6,59	7,27	1,52
A.SG.SL0.4	0,80	0,96	4,50	275	276	7,14	6,59	1,40
A.SG.SL0.5	0,80	0,94	4,50	263	263	8,32	5,92	1,20

Quadro A2.21 Resumo das propriedades reológicas para cada acerto da argamassa SL500.

ARGAMASSA: A.SG.SL500								
Mistura	Parâmetros da mistura			Leituras			Reologia	
	Vp/Vs	Vw/Vp	Sp/p%	d1 [mm]	d2 [mm]	t [s]	Gm	Rm [s ⁻¹]
A.SG.SL500.1	0,80	0,98	4,90	269	267	13,56	6,18	0,74
A.SG.SL500.2	0,80	1,10	4,40	256	254	9,77	5,50	1,02
A.SG.SL500.3	0,80	1,25	4,35	314	313	4,24	8,83	2,36
A.SG.SL500.4	0,80	1,12	4,36	261	260	9,35	5,79	1,07

Quadro A2.22 Resumo das propriedades reológicas para cada acerto da argamassa SL700.

ARGAMASSA: A.SG.SL700								
Mistura	Parâmetros da mistura			Leituras			Reologia	
	Vp/Vs	Vw/Vp	Sp/p%	d1 [mm]	d2 [mm]	t [s]	Gm	Rm [s ⁻¹]
A.SG.SL700.1	0,80	1,14	4,30	295	300	5,00	7,85	2,00
A.SG.SL700.2	0,80	1,08	4,32	266	269	8,24	6,16	1,21

Quadro A2.23 Resumo das propriedades reológicas para cada acerto da argamassa SL900.

ARGAMASSA: A.SG.SL900								
Mistura	Parâmetros da mistura			Leituras			Reologia	
	Vp/Vs	Vw/Vp	Sp/p%	d1 [mm]	d2 [mm]	t [s]	Gm	Rm [s ⁻¹]
A.SG.SL900.1	0,80	1,08	4,25	216	223	4,49	3,82	2,23
A.SG.SL900.2	0,80	1,05	5,00	243	251	5,22	5,10	1,92

ANEXO A.3- Caracterização das argamassas no estado endurecido

Quadro A3.1. Massa volúmica das argamassas no estado endurecido de FC nº 5.

MASSA VOLÚMICA DAS ARGAMASSAS (PROVETES PRISMÁTICOS DE 40 x 40 x 160 mm ³)									
Identificação		Registos efectuados				Massa volúmica			
Argamassa n.º	Provete n.º	Data fabrico	Data ensaio	Idade [dias]	Massa [g]	Valor indiv. [kg/m ³]	Valor médio [kg/m ³]	Desvio padrão [kg/m ³]	Coef. variação [%]
A.SG.FC.5	1 e 2	30-03-2010	27-04-2010	28	648,6	2533,6	2536,1	3,6	0,1
	3 e 4				648,8	2534,4			
	5 e 6				650,3	2540,2			

Notas:

- Todos os provetes foram sujeitos a cura à temperatura de 20 ± 2 °C e Humidade Relativa de 90 %
- Todos os provetes foram ensaiados saturados de água mas com a superfície seca
- A taxa de aplicação da carga foi de 1,0 kN/s (6 kgf.cm². s⁻¹)
- Todos os provetes apresentaram uma rotura do tipo normal

Quadro A3.2. Valores da resistência à compressão da argamassa FC nº 5.

RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DE ARGAMASSAS (PROVETES CÚBICOS DE 40 mm DE ARESTA)									
Identificação		Registos efectuados				Tensão de rotura à compressão			
Argamassa n.º	Provete n.º	Data fabrico	Data ensaio	Idade [dias]	Carga de rotura [kN]	Valor indiv. [MPa]	Valor médio [MPa]	Desvio padrão [MPa]	Coef. variação [%]
A.SG.FC.5	1	30-03-2010	27-04-2010	28	104,5	65,3	71,69	3,56	5,0
	2				119,8	74,9			
	3				114,3	71,4			
	4				114,3	71,4			
	5				115,0	71,9			
	6				120,3	75,2			

Notas:

- Todos os provetes foram sujeitos a cura à temperatura de 20 ± 2 °C e Humidade Relativa de 90 %
- Todos os provetes foram ensaiados saturados de água mas com a superfície seca
- A taxa de aplicação da carga foi de 1,0 kN/s (6 kgf.cm². s⁻¹)
- Todos os provetes apresentaram uma rotura do tipo normal

Quadro A3.3. Massa volúmica das argamassas no estado endurecido de SL0 nº 5.

MASSA VOLÚMICA DAS ARGAMASSAS (PROVETES PRISMÁTICOS DE 40 x 40 x 160 mm ³)									
Identificação		Registos efectuados				Massa volúmica			
Argamassa n.º	Provete n.º	Data fabrico	Data ensaio	Idade [dias]	Massa [g]	Valor indiv. [kg/m ³]	Valor médio [kg/m ³]	Desvio padrão [kg/m ³]	Coef. variação [%]
A.SG.SL0.5	1 e 2	31-03-2010	28-04-2010	28	434,1	1695,7	1693,9	8,7	0,5
	3 e 4				435,6	1701,6			
	5 e 6				431,2	1684,4			

Notas:

- Todos os provetes foram sujeitos a cura à temperatura de 20 ± 2 °C e Humidade Relativa de 90 %
- Todos os provetes foram ensaiados saturados de água mas com a superfície seca
- A taxa de aplicação da carga foi de 1,0 kN/s (6 kgf.cm². s⁻¹)
- Todos os provetes apresentaram uma rotura do tipo normal

Quadro A3.4. Valores da resistência à compressão da argamassa SL0 n° 5.

RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DE ARGAMASSAS (PROVETES CÚBICOS DE 40 mm DE ARESTA)									
Identificação		Registos efectuados				Tensão de rotura à compressão			
Argamassa n.º	Proвете n.º	Data fabrico	Data ensaio	Idade [dias]	Carga de rotura [kN]	Valor indiv. [MPa]	Valor médio [MPa]	Desvio padrão [MPa]	Coef. variação [%]
A.SG.SL0.5	1	31-03-2010	28-04-2010	28	1,2	0,8	0,88	0,10	12,0
	2				1,4	0,9			
	3				1,6	1,0			
	4				1,2	0,8			
	5				1,5	0,9			
	6				1,5	0,9			

Notas:

- Todos os provetes foram sujeitos a cura à temperatura de 20 ± 2 °C e Humidade Relativa de 90 %
- Todos os provetes foram ensaiados saturados de água mas com a superfície seca
- A taxa de aplicação da carga foi de 1,0 kN/s (6 kgf.cm⁻². s⁻¹)
- Todos os provetes apresentaram uma rotura do tipo normal

Quadro A3.5. Massa volúmica das argamassas no estado endurecido de SL500 n° 2.

MASSA VOLÚMICA DAS ARGAMASSAS (PROVETES PRISMÁTICOS DE 40 x 40 x 160 mm ³)									
Identificação		Registos efectuados				Massa volúmica			
Argamassa n.º	Proвете n.º	Data fabrico	Data ensaio	Idade [dias]	Massa [g]	Valor indiv. [kg/m ³]	Valor médio [kg/m ³]	Desvio padrão [kg/m ³]	Coef. variação [%]
A.SG.SL500.2	1 e 2	01-04-2010	29-04-2010	28	456,4	1782,8	1827,0	44,9	2,5
	3 e 4				479,4	1872,7			
	5 e 6				467,3	1825,4			

Notas:

- Todos os provetes foram sujeitos a cura à temperatura de 20 ± 2 °C e Humidade Relativa de 90 %
- Todos os provetes foram ensaiados saturados de água mas com a superfície seca
- A taxa de aplicação da carga foi de 1,0 kN/s (6 kgf.cm⁻². s⁻¹)
- Todos os provetes apresentaram uma rotura do tipo normal

Quadro A3.6. Valores da resistência à compressão da argamassa SL500 n° 2

RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DE ARGAMASSAS (PROVETES CÚBICOS DE 40 mm DE ARESTA)									
Identificação		Registos efectuados				Tensão de rotura à compressão			
Argamassa n.º	Proвете n.º	Data fabrico	Data ensaio	Idade [dias]	Carga de rotura [kN]	Valor indiv. [MPa]	Valor médio [MPa]	Desvio padrão [MPa]	Coef. variação [%]
A.SG.SL500.2	1	01-04-2010	29-04-2010	28	4,1	3,1	2,55	0,57	22,3
	2				4,1	3,4			
	3				2,7	2,1			
	4				2,8	2,1			
	5				2,7	2,3			
	6				3,0	2,3			

Notas:

- Todos os provetes foram sujeitos a cura à temperatura de 20 ± 2 °C e Humidade Relativa de 90 %
- Todos os provetes foram ensaiados saturados de água mas com a superfície seca
- A taxa de aplicação da carga foi de 1,0 kN/s (6 kgf.cm⁻². s⁻¹)
- Todos os provetes apresentaram uma rotura do tipo normal

Quadro A3.7. Massa volúmica das argamassas no estado endurecido de SL500 n° 4.

MASSA VOLÚMICA DAS ARGAMASSAS (PROVETES PRISMÁTICOS DE 40 x 40 x 160 mm ³)									
Identificação		Registos efectuados				Massa volúmica			
Argamassa n.º	Proвете n.º	Data fabrico	Data ensaio	Idade [dias]	Massa [g]	Valor indiv. [kg/m ³]	Valor médio [kg/m ³]	Desvio padrão [kg/m ³]	Coef. variação [%]
A.SG.SL500.4	1 e 2	31-03-2010	28-04-2010	28	579,5	2263,7	2276,4	23,8	1,0
	3 e 4				589,8	2303,9			
	5 e 6				579,0	2261,7			
Notas:									
1. Todos os provetes foram sujeitos a cura à temperatura de 20 ± 2 °C e Humidade Relativa de 90 %									
2. Todos os provetes foram ensaiados saturados de água mas com a superfície seca									
3. A taxa de aplicação da carga foi de 1,0 kN/s (6 kgf.cm ⁻² . s ⁻¹)									
4. Todos os provetes apresentaram uma rotura do tipo normal									

Quadro A3.8. Valores da resistência à compressão da argamassa SL500 n° 4.

RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DE ARGAMASSAS (PROVETES CÚBICOS DE 40 mm DE ARESTA)									
Identificação		Registos efectuados				Tensão de rotura à compressão			
Argamassa n.º	Proвете n.º	Data fabrico	Data ensaio	Idade [dias]	Carga de rotura [kN]	Valor indiv. [MPa]	Valor médio [MPa]	Desvio padrão [MPa]	Coef. variação [%]
A.SG.SL500.4	1	31-03-2010	28-04-2010	28	3,7	2,3	2,26	0,29	13,0
	2				3,3	2,1			
	3				3,6	2,3			
	4				4,5	2,8			
	5				3,4	2,1			
	6				3,2	2,0			
Notas:									
1. Todos os provetes foram sujeitos a cura à temperatura de 20 ± 2 °C e Humidade Relativa de 90 %									
2. Todos os provetes foram ensaiados saturados de água mas com a superfície seca									
3. A taxa de aplicação da carga foi de 1,0 kN/s (6 kgf.cm ⁻² . s ⁻¹)									
4. Todos os provetes apresentaram uma rotura do tipo normal									

Quadro A3.9. Massa volúmica das argamassas no estado endurecido de SL700 n° 2.

MASSA VOLÚMICA DAS ARGAMASSAS (PROVETES PRISMÁTICOS DE 40 x 40 x 160 mm ³)									
Identificação		Registos efectuados				Massa volúmica			
Argamassa n.º	Proвете n.º	Data fabrico	Data ensaio	Idade [dias]	Massa [g]	Valor indiv. [kg/m ³]	Valor médio [kg/m ³]	Desvio padrão [kg/m ³]	Coef. variação [%]
A.SG.SL700.2	1 e 2	01-04-2010	29-04-2010	28	411,3	1606,6	1619,1	35,3	2,2
	3 e 4				424,7	1659,0			
	5 e 6				407,5	1591,8			
Notas:									
1. Todos os provetes foram sujeitos a cura à temperatura de 20 ± 2 °C e Humidade Relativa de 90 %									
2. Todos os provetes foram ensaiados saturados de água mas com a superfície seca									
3. A taxa de aplicação da carga foi de 1,0 kN/s (6 kgf.cm ⁻² . s ⁻¹)									
4. Todos os provetes apresentaram uma rotura do tipo normal									

Quadro A3.10. Valores da resistência à compressão da argamassa SL700 n° 2.

RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DE ARGAMASSAS (PROVETES CÚBICOS DE 40 mm DE ARESTA)									
Identificação		Registos efectuados				Tensão de rotura à compressão			
Argamassa n.º	Provete n.º	Data fabrico	Data ensaio	Idade [dias]	Carga de rotura [kN]	Valor indiv. [MPa]	Valor médio [MPa]	Desvio padrão [MPa]	Coef. variação [%]
A.SG.SL700.2	1	01-04-2010	29-04-2010	28	1,7	1,1	1,39	0,79	56,8
	2				3,7	2,3			
	3				2,7	1,7			
	4				2,7	1,7			
	5				2,5	1,6			
	6				0,0				

Notas:

- Todos os provetes foram sujeitos a cura à temperatura de 20 ± 2 °C e Humidade Relativa de 90 %
- Todos os provetes foram ensaiados saturados de água mas com a superfície seca
- A taxa de aplicação da carga foi de 1,0 kN/s (6 kgf.cm⁻². s⁻¹)
- Todos os provetes apresentaram uma rotura do tipo normal

Quadro A3.11. Massa volúmica das argamassas no estado endurecido de SL900 n° 2.

MASSA VOLÚMICA DAS ARGAMASSAS (PROVETES PRISMÁTICOS DE 40 x 40 x 160 mm ³)									
Identificação		Registos efectuados				Massa volúmica			
Argamassa n.º	Provete n.º	Data fabrico	Data ensaio	Idade [dias]	Massa [g]	Valor indiv. [kg/m ³]	Valor médio [kg/m ³]	Desvio padrão [kg/m ³]	Coef. variação [%]
A.SG.SL900.2	1 e 2	01-04-2010	29-04-2010	28	493,4	1927,3	2035,8	100,9	5,0
	3 e 4				525,6	2053,1			
	5 e 6				544,5	2127,0			

Notas:

- Todos os provetes foram sujeitos a cura à temperatura de 20 ± 2 °C e Humidade Relativa de 90 %
- Todos os provetes foram ensaiados saturados de água mas com a superfície seca
- A taxa de aplicação da carga foi de 1,0 kN/s (6 kgf.cm⁻². s⁻¹)
- Todos os provetes apresentaram uma rotura do tipo normal

Quadro A3.12. Valores da resistência à compressão da argamassa SL900 n° 2.

RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DE ARGAMASSAS (PROVETES CÚBICOS DE 40 mm DE ARESTA)									
Identificação		Registos efectuados				Tensão de rotura à compressão			
Argamassa n.º	Provete n.º	Data fabrico	Data ensaio	Idade [dias]	Carga de rotura [kN]	Valor indiv. [MPa]	Valor médio [MPa]	Desvio padrão [MPa]	Coef. variação [%]
A.SG.SL900.2	1	01-04-2010	29-04-2010	28	77,1	55,1	45,22	11,30	25,0
	2				55,7	41,0			
	3				72,9	52,1			
	4				70,9	50,6			
	5				35,0	24,3			
	6				71,4	48,2			

Notas:

- Todos os provetes foram sujeitos a cura à temperatura de 20 ± 2 °C e Humidade Relativa de 90 %
- Todos os provetes foram ensaiados saturados de água mas com a superfície seca
- A taxa de aplicação da carga foi de 1,0 kN/s (6 kgf.cm⁻². s⁻¹)
- Todos os provetes apresentaram uma rotura do tipo normal