



**Betão Autocompactável
na Região Autónoma da Madeira**
Da composição de laboratório à comercialização

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Diana Nicole Aguiar Neves
MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL



UNIVERSIDADE da MADEIRA

A Nossa Universidade

www.uma.pt

setembro | 2013

UMa

V Bet

1

T/M Uma

624

NEV Bet

EX-1

**Betão Autocompactável
na Região Autónoma da Madeira**
Da composição de laboratório à comercialização

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Diana Nicole Aguiar Neves

MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL

UNIVERSIDADE DA MADEIRA
SECTOR DE DOCUMENTAÇÃO
E ARQUIVO

ORIENTADOR

Lino Manuel Serra Maia

CO-ORIENTADOR

José Miguel Guimarães



Betão Autocompactável na Região Autónoma da Madeira: da Composição de Laboratório à Comercialização

Tese submetida para o grau de Mestre em Engenharia Civil na Universidade da Madeira

por

DIANA NICOLE AGUIAR NEVES

Orientador

Lino Maia

(Universidade da Madeira)

Coorientador

José Miguel Guimarães

(Laboratório Cimentos Madeira)

setembro 2013

Título: Betão Autocompactável na Região Autónoma da Madeira: da Composição de Laboratório à Comercialização

Palavras-chave: Betão autocompactável, composição comercial, agregados vulcânicos.

Keywords: Self-compacting Concrete, commercial composition, volcanic aggregates.

Autor: DIANA NEVES

CCEE – Centro de Ciências Exatas e da Engenharia

Campus Universitário da Penteada

9020 - 105 Funchal – Portugal, s/n

Telefone + 351 291 705 230

Correio eletrónico: secretariadoscentros@uma.pt

Nota: Esta tese foi desenvolvida ao abrigo do protocolo UMa/Grupo Cimentos Madeira, tendo a parte experimental sido desenvolvida no Grupo Cimentos Madeira.

Júri:

Paulo Miguel de Macedo França, Professor Auxiliar da Universidade da Madeira

Sérgio António Neves Lousada, Professor Auxiliar Convidado da Universidade da Madeira

Lino Manuel Serra Maia, Professor Auxiliar Convidado da Universidade da Madeira

Defesa a 5 de dezembro de 2013

Funchal, Madeira

Para a minha família

RESUMO

A durabilidade das estruturas de betão armado é atualmente encarada como uma grande preocupação, é uma das principais incertezas e com graves consequências económicas, ambientais e sociais. Com a crescente falta de durabilidade e com a necessidade de construir estruturas sustentáveis, surge a preocupação do desenvolvimento do betão autocompactável (BAC). Este betão surge no final dos anos 80 no Japão e insere-se nos betões especiais, com capacidade de garantir à construção grandes benefícios tecnológicos, económicos e ambientais. Trata-se de uma tecnologia sustentável cuja principal vantagem é a qualidade dos trabalhos de compactação em obra, pois este surge para colocar inteiramente de parte o processo de compactação, obtendo-se assim um material homogéneo e conseqüentemente mais durável. Apesar do BAC possuir excelentes propriedades, a sua implementação na indústria da construção na RAM encontra-se ainda numa fase embrionária.

O presente trabalho consiste no estudo e desenvolvimento experimental deste novo material, utilizando os materiais correntemente utilizados na Região Autónoma da Madeira (RAM). Esta dissertação pretende, em parte, ser um contributo para o estabelecimento de uma metodologia que conduza a composições otimizadas, baseando-se num procedimento de tentativa-erro, de forma a satisfazer todos os requisitos de desempenho.

Verificou-se ao longo do desenvolvimento deste trabalho, aplicabilidade do BAC na RAM. Foram realizados alguns dimensionamentos de composições autocompactáveis, para isso, inicialmente realizaram-se vários estudos em pastas, argamassas e conseqüentemente em betões. De forma, avaliar a autocompactabilidade e caracterizar este tipo de betão no estado fresco, foram realizados um conjunto de ensaios em laboratório e ensaios de caracterização mecânica no betão endurecido.

Com o objetivo de validar o estudo das composições analisadas em laboratório, foram realizadas algumas aplicações em condições reais, isto é, em produção industrial. Conseguiram-se alcançar as propriedades adequadas de um BAC, sem alterar significativamente os procedimentos de amassadura, transporte e colocação estabelecidos para o betão convencional. Os resultados obtidos foram satisfatórios e culminaram com a apresentação de uma proposta de betão autocompactável otimizada para o lançamento do produto no mercado.

ABSTRACT

The durability of concrete structures is currently seen as a major concern, is one of the main uncertainties which brings serious economic, environmental and social problems. With the increasing lack of durability and the need to build sustainable structures, there is concern development of the Self-Compacting Concrete (SCC). This type of concrete emerges in the late 80's in Japan and represents an evolution of special concrete, with the ability to provide technological, economic and environmental benefits to building. It is a sustainable technology whose main advantage is the quality of compacting work on site, as this appears to place entirely in the compacting process, thereby obtaining a material uniform and therefore more durable. Despite the excellent properties of the SCC, its implementation in the construction industry in the Autonomous Region of Madeira (RAM) is still beginning.

The present work is the study and experimental development of this new material, using materials commonly used in the RAM. This dissertation aims to be a contribution to the establishment of a methodology that leads to optimized compositions, based on a trial and error procedure, in order to meet all performance requirements.

It was discovered during the development of this work, the applicability of SCC in RAM. Some designs of SCC compositions were produced, initially being held various studies into pastes, mortars and concretes. In order to evaluate and characterize this type of concrete in the fresh state, a series of laboratory tests and mechanical characterization tests on hardened concrete were performed.

In order to validate the study of the compositions analyzed in the laboratory some applications in real conditions, that is, in industrial production were carried out. We were able to achieve suitable properties of a SCC, without significantly altering the procedures of mixing, transporting and placing established for conventional concrete. The results were satisfactory and culminated with the presentation of a proposal of self-compacting concrete optimized for the product launch in the market.

ÍNDICE

| | |
|---|----------|
| Resumo..... | v |
| Abstract..... | vii |
| Índice | ix |
| Índice de figuras | xiii |
| Índice de tabelas..... | xvii |
| Notação e simbologia | xix |
| Termos e definições..... | xxiii |
| Agradecimentos..... | xxv |
| 1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS | 1 |
| 1.1. Introdução | 1 |
| 1.2. Enquadramento | 4 |
| 1.3. Motivação | 4 |
| 1.4. Objetivos..... | 5 |
| 1.5. Contribuições científicas e limitações..... | 5 |
| 1.6. Apresentação da dissertação..... | 6 |
| 2. ESTADO DA ARTE | 7 |
| 2.1. Introdução | 7 |
| 2.2. Aplicações práticas de betão autocompactável..... | 8 |
| 2.3. Conceito de betão autocompactável | 12 |
| 2.4. Propriedades no estado fresco e no estado endurecido do BAC..... | 13 |
| 2.4.1. Propriedades do BAC no estado fresco | 13 |
| 2.4.1.1. Capacidade de preenchimento | 13 |
| 2.4.1.2. Resistência à segregação..... | 14 |
| 2.4.1.3. Capacidade de passagem | 15 |
| 2.4.2. Ensaio de avaliação do betão fresco..... | 16 |
| 2.4.2.1. Ensaio de espalhamento (“Slump-Flow”)..... | 17 |
| 2.4.2.2. Ensaio de escoamento no funil V | 18 |
| 2.4.2.3. Ensaio de escoamento da caixa L..... | 19 |
| 2.4.2.4. Ensaio de estabilidade (Resistência à segregação) | 20 |
| 2.4.3. Propriedades do BAC no estado endurecido..... | 20 |
| 2.4.3.1. Resistência mecânica | 21 |
| 2.4.3.2. Retração e fluência..... | 21 |

| | | |
|-------------|---|-----------|
| 2.4.3.3. | Módulo de elasticidade | 22 |
| 2.4.3.4. | Durabilidade | 22 |
| 2.4.4. | Ensaio de avaliação do betão no estado endurecido | 23 |
| 2.4. | Vantagens e Desvantagens | 23 |
| 2.5. | Dimensionamento de um BAC | 24 |
| 3. | MATERIAIS CONSTITUINTES E SEUS EFEITOS NAS PROPRIEDADES DO BETÃO | 27 |
| 3.1. | Introdução | 27 |
| 3.2. | Materiais finos | 28 |
| 3.2.1. | Cimento..... | 28 |
| 3.2.2. | Adições..... | 30 |
| 3.2.2.1. | Adições do tipo I | 30 |
| 3.2.2.2. | Adições do tipo II | 31 |
| 3.3. | Água..... | 34 |
| 3.4. | Adjuvantes..... | 34 |
| 3.4.1. | Plastificante | 35 |
| 3.4.2. | Superplastificante | 35 |
| 3.4.3. | Modelador de viscosidade | 36 |
| 3.5. | Agregados | 37 |
| 3.5.1. | Descrição petrográfica e processo de obtenção dos agregados..... | 37 |
| 3.5.2. | Agregados finos | 38 |
| 3.5.3. | Agregados grossos | 39 |
| 4. | PROGRAMA EXPERIMENTAL..... | 43 |
| 4.1. | Introdução | 43 |
| 4.2. | Formulação de composições | 44 |
| 4.3. | Pastas | 44 |
| 4.3.1. | Equipamentos | 45 |
| 4.3.2. | Procedimento de amassadura | 47 |
| 4.3.3. | Ensaio no estado fresco..... | 48 |
| 4.3.3.1. | Ensaio de viscosidade | 48 |
| 4.3.3.2. | Ensaio de espalhamento | 49 |
| 4.4. | Argamassas | 50 |
| 4.4.1. | Equipamentos | 50 |
| 4.4.2. | Procedimento de amassadura | 53 |
| 4.4.3. | Ensaio no estado fresco..... | 53 |

| | | |
|-------------|--|-----------|
| 4.4.3.1. | Ensaio de escoamento no funil V | 53 |
| 4.4.3.2. | Ensaio de espalhamento | 54 |
| 4.4.4. | Ensaio no estado endurecido | 56 |
| 4.5. | Betões | 57 |
| 4.5.1. | Equipamentos | 58 |
| 4.5.2. | Procedimento de amassadura | 61 |
| 4.5.3. | Ensaio no estado fresco | 62 |
| 4.5.3.1. | Ensaio de escoamento no funil V | 62 |
| 4.5.3.2. | Ensaio de espalhamento (“Slump Flow”) | 63 |
| 4.5.3.3. | Ensaio de escoamento na caixa L | 65 |
| 4.5.3.4. | Ensaio de estabilidade (Segregação no peneiro) | 66 |
| 4.5.4. | Ensaio no estado endurecido | 67 |
| 5. | RESULTADOS E DISCUSSÃO | 71 |
| 5.1. | Introdução | 71 |
| 5.2. | Pastas | 71 |
| 5.2.1. | Avaliação do espalhamento | 71 |
| 5.2.1.1. | Influência das cinzas volantes | 74 |
| 5.2.1.2. | Influência do superplastificante | 76 |
| 5.2.2. | Avaliação da viscosidade | 77 |
| 5.2.2.1. | Influência das cinzas volantes | 77 |
| 5.2.2.2. | Influência do superplastificante | 79 |
| 5.3. | Argamassas | 80 |
| 5.3.1. | Avaliação no estado fresco | 81 |
| 5.3.2. | Avaliação no estado endurecido | 83 |
| 5.4. | Betões | 84 |
| 5.4.1. | Formulação de composições | 85 |
| 5.4.2. | Avaliação no estado fresco | 87 |
| 5.4.3. | Avaliação no estado endurecido | 91 |
| 6. | APLICAÇÃO PRÁTICA | 93 |
| 6.1. | Introdução | 93 |
| 6.2. | Descrição do ensaio à escala real | 94 |
| 6.2.1. | Elementos betonados | 94 |
| 6.2.2. | Amassadura, transporte e colocação | 94 |
| 6.3. | Propriedades do BAC no estado fresco | 96 |
| 6.3.1. | Primeira fase | 96 |

| | | |
|--------------------|---|------------|
| 6.3.2. | Segunda fase | 98 |
| 6.4. | Produto final – Aspeto do elemento betonado | 100 |
| 6.5. | Propriedades do BAC no estado endurecido | 102 |
| 7. | CONSIDERAÇÕES FINAIS..... | 103 |
| 7.1. | Notas finais | 103 |
| 7.2. | Conclusões | 104 |
| 7.3. | Desenvolvimentos futuros | 106 |
| REFERÊNCIAS | | 107 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 2-1 – a) Ancoragem da ponte suspensa de Akashi-Kaiky; b) Aspeto final da ponte..... | 9 |
| Figura 2-2 – Vista geral do local de construção durante a betonagem..... | 9 |
| Figura 2-3 – Sodra Lanken Tunnels, em Estocolmo..... | 10 |
| Figura 2-4 – a) Burj Dubai Tower; b) Shangri-La Hotel..... | 10 |
| Figura 2-5 – Edifício Alto do Parque, Lisboa..... | 11 |
| Figura 2-6 – Edifício Vodafone, Porto..... | 11 |
| Figura 2-7 – Mecanismo de bloqueio..... | 15 |
| Figura 3-1 – Porpoções volumétricas dos materiais constituintes de um BAC e de um betão convencional..... | 27 |
| Figura 3-2 – a) Rocha basáltica; b) Armazenamento das rochas; c) Esmagamento das rochas; d) Vista geral do processo de britagem, Fundoa..... | 38 |
| Figura 3-3 – Curva granulométrica de todos os agregados utilizados..... | 41 |
| Figura 4-1 – Misturador mecânico utilizado nas amassaduras de pastas e argamassas..... | 46 |
| Figura 4-2 – a) Dimensões do cone Marsh; b) Cone Marsh para pastas..... | 46 |
| Figura 4-3 – Cone de espalhamento para pastas..... | 47 |
| Figura 4-4 – Ensaio do cone Marsh..... | 48 |
| Figura 4-5 – Cone de espalhamento, preenchido com pasta..... | 49 |
| Figura 4-6 – a) Espalhamento da pasta; b) Medição do espalhamento da pasta..... | 49 |
| Figura 4-7 – Dimensões do funil V..... | 51 |
| Figura 4-8 – Cone de espalhamento para argamassas..... | 51 |
| Figura 4-9 – Moldes para armazenamento de argamassa..... | 52 |
| Figura 4-10 – Câmara climática de armazenamento de argamassas..... | 52 |
| Figura 4-11 – Equipamento de ensaio das resistências mecânicas das argamassas..... | 52 |
| Figura 4-12 – Ensaio de escoamento no funil V..... | 54 |
| Figura 4-13 – Cone de espalhamento, preenchido com argamassa..... | 55 |
| Figura 4-14 – a) Espalhamento da argamassa; b) Medição do espalhamento da argamassa..... | 55 |
| Figura 4-15 – Câmara de cura de armazenamento dos moldes de argamassas..... | 56 |
| Figura 4-16 – Ensaio à flexão aos prismas de argamassa..... | 57 |
| Figura 4-17 – Ensaio à compressão aos prismas de argamassa..... | 57 |
| Figura 4-18 – Misturadora utilizada na amassadura dos betões..... | 58 |
| Figura 4-19 – Dimensões da placa de base..... | 58 |
| Figura 4-20 – a) Dimensões do funil V; b) Funil V para betões..... | 59 |

| | |
|--|----|
| Figura 4-21 – Dimensões do cone de espalhamento. | 59 |
| Figura 4-22 – Dimensões da caixa L. | 60 |
| Figura 4-23 – Peneiro e fundo para o ensaio de segregação. | 60 |
| Figura 4-24 – Moldes para provetes de betão. | 61 |
| Figura 4-25 – Preenchimento do funil V com betão. | 63 |
| Figura 4-26 – Medição do t_{esc} no funil V. | 63 |
| Figura 4-27 – Cone de espalhamento preenchido com BAC. | 64 |
| Figura 4-28 – Levantamento do cone de espalhamento. | 64 |
| Figura 4-29 – Medição do espalhamento do betão. | 64 |
| Figura 4-30 – Nivlamento do BAC na caixa L. | 65 |
| Figura 4-31 – Medição das alturas na caixa L. | 65 |
| Figura 4-32 – Recipiente preenchido com BAC e tapado no ensaio de segregação. | 66 |
| Figura 4-33 – Pesagem da massa m_c no ensaio de segregação. | 66 |
| Figura 4-34 – Moldes preenchidos com BAC. | 67 |
| Figura 4-35 – Desmoldagem dos provetes de BAC. | 68 |
| Figura 4-36 – Colocação dos provetes de BAC na câmara de cura. | 68 |
| Figura 4-37 – Ensaio à compressão dos provetes de BAC. | 69 |
| Figura 5-1 – Gráfico genérico de determinação de β_p e E_p | 72 |
| Figura 5-2 – Gráfico de determinação do β_p e E_p para pastas compostas por diferentes tipos de cimento, com $t=0$ | 73 |
| Figura 5-3 – Gráfico de viscosidade de pastas, compostas por diferentes tipos de cimento, com $t=0$ | 74 |
| Figura 5-4 – Gráfico de determinação do β_p e E_p em pastas, com $V_{fa}/V_p= 0\%$ a 60% , com $t=0$ | 74 |
| Figura 5-5 – Gráfico de determinação do β_p e E_p em pastas, com $V_{fa}/V_p= 0\%$ a 60% , com $t=30$ | 75 |
| Figura 5-6 – Gráfico de determinação do β_p e E_p em pastas, com $V_{fa}/V_p= 30\%$ e $V_{sp}/v_p=0\%$ a $1,2\%$, com $t=0$ | 76 |
| Figura 5-7 – Gráfico de determinação do β_p e E_p em pastas, com $V_{fa}/V_p= 30\%$ e $V_{sp}/v_p=0\%$ a $1,2\%$, com $t=30$ | 77 |
| Figura 5-8 – Efeito das cinzas volantes na viscosidade das pastas, com $V_{fa}/V_p= 0\%$ a 60% , com $t=0$ | 78 |
| Figura 5-9 – Efeito das cinzas volantes na viscosidade das pastas, com $V_{fa}/V_p= 0\%$ a 60% , com $t=30$ | 78 |
| Figura 5-10 – Efeito do superplastificante na viscosidade da pasta, com $V_{fa}/V_p= 30\%$ e $V_{sp}/v_p=0\%$ a $1,2\%$, com $t=0$ | 79 |
| Figura 5-11 – Efeito do superplastificante na viscosidade da pasta, com $V_{fa}/V_p= 30\%$ e $V_{sp}/v_p=0\%$ a $1,2\%$, com $t=30$ | 80 |

Índice de figuras

| | |
|--|-----|
| Figura 5-12 – Áreas de espalhamento relativas (Gm) das várias composições de argamassas..... | 82 |
| Figura 5-13 – Tempo de escoamento (t_{esc}) das várias composições de argamassas..... | 82 |
| Figura 5-14 – Resistencia à flexão da composição 9 e 13..... | 83 |
| Figura 5-15 – Resistencia à compressão da composição 9 e 13..... | 83 |
| Figura 5-16 – Espalhamento das várias composições estudadas, com $t=0$ | 88 |
| Figura 5-17 – Espalhamento das várias composições estudadas, com $t=30$ | 88 |
| Figura 5-18 – Tempo de escoamento no funil V das várias composições estudadas. | 89 |
| Figura 5-19 – Racio da caixa L das várias composições estudadas. | 90 |
| Figura 5-20 – Percentagem de segregação das várias composições estudadas. | 90 |
| Figura 5-21 – Resistencia à compressão das Composições 2,7 e 15..... | 91 |
| Figura 6-1 – Ensaio de espalhamento do BAC da 1ª fase, logo após a amassadura. | 97 |
| Figura 6-2 – Ensaio de espalhamento do BAC da 1ª fase, no local da betonagem. | 97 |
| Figura 6-3 – Ensaio de espalhamento do BAC da 2ª fase, logo após a amassadura. | 98 |
| Figura 6-4 – Medição do espalhamento da 2ª fase, no local de betonagem..... | 99 |
| Figura 6-5 – Ensaio do funil V da 2ª fase, no local de betonagem..... | 99 |
| Figura 6-6 – Medição da caixa L na 2ª fase, no local de betonagem. | 100 |
| Figura 6-7 - Supercífie das vigas betonadas com BAC na 1ª e 2ª fase. | 101 |
| Figura 6-8 - Resistência à compressão da 1ª e 2ª fase..... | 102 |

ÍNDICE DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 2-1 – Valores recomendados pela JCSE, BIBM <i>et al.</i> RILEM. | 25 |
| Tabela 3-1 – Características químicas, físicas e mecânicas dos cimentos utilizados. | 29 |
| Tabela 3-2 – Principais características das cinzas volantes para betão. | 32 |
| Tabela 3-3 – Principais características dos agregados finos. | 39 |
| Tabela 3-4 – Principais características dos agregados grossos. | 40 |
| Tabela 5-1 – Composições de argamassas ensaiadas. | 81 |
| Tabela 5-2 – Variações dos principais parâmetros nas várias composições BAC. | 85 |
| Tabela 5-3 – Quantidades da Composição 2. | 85 |
| Tabela 5-4 – Resistência à compressão da Composição 2. | 85 |
| Tabela 5-5 – Quantidades da Composição 7. | 86 |
| Tabela 5-6 – Resistência à compressão da Composição 7. | 86 |
| Tabela 5-7 – Quantidades da Composição 15. | 87 |
| Tabela 6-1 – Composições fornecidas. | 95 |
| Tabela 6-2 – Caracterização do betão no estado fresco, em laboratório da composição com o modelador de viscosidade. | 95 |
| Tabela 6-3 – Caracterização do betão no estado fresco, logo após amassadura da 1ª fase. | 96 |
| Tabela 6-4 – Caracterização do betão no estado fresco, da segunda fase na chegada ao local de betonagem. | 98 |

NOTAÇÃO E SIMBOLOGIA

| | | |
|------------------------------------|-------------------------|--|
| p | [g] | Finos |
| c | [g, kg/m ³] | Cimento |
| fa | [g] | Cinzas volantes |
| s ₁ | [g, kg] | Areia do mar 0/2 (fina) |
| s ₂ | [g, kg] | Areia britada 0/4 (grossa) |
| b ₀ | [g, kg] | Brita 4/10 (fina) |
| b ₁ | [g, kg] | Brita 8/16 (média) |
| b ₂ | [g, kg] | Brita 11/22 (grossa) |
| w | [g, kg/m ³] | Água |
| Sp | [g, kg/m ³] | Superplastificante |
| Pl | [g, kg/m ³] | Plastificante |
| Mv | [g, kg/m ³] | Modelador de viscosidade |
| | | |
| V _w /V _p | [-] | Relação volumétrica entre água e finos |
| V _{fa} /V _p | [-] | Relação volumétrica entre cinzas volantes e finos |
| V _{Sp} /V _p | [-] | Relação volumétrica entre superplastificante e finos |
| V _{pl} /V _p | [-] | Relação volumétrica entre plastificante e finos |
| V _s /V _m | [-] | Relação volumétrica entre areias totais e argamassa |
| V _{s1} /V _s | [-] | Relação volumétrica entre areias fina e areia total |
| V _{s2} /V _s | [-] | Relação volumétrica entre areias grossa e areia total |
| V _g /V _{g,lim} | [-] | Relação volumétrica entre agregados grossos e limite de agregados grossos |
| V _{b0} /V _g | [-] | Relação volumétrica entre brita miúda e agregados grossos totais |
| V _{b1} /V _g | [-] | Relação volumétrica entre brita média e agregados grossos totais |
| V _{b2} /V _g | [-] | Relação volumétrica entre brita grossa e agregados grossos totais |
| | | |
| V _v | [-] | Volume de vazios |
| V _{g,lim} | [-] | Relação entre baridade/massa específica para as britas, multiplicado pelas percentagens respetivas de brita a serem utilizadas na composição |
| V _{pasta} | [-] | Volume ocupado pelos constituintes de uma pasta (Cimento + água + cinzas volantes + superplastificante + plastificante) |
| V _m | [-] | Volume ocupado pelos constituintes de uma argamassa (pasta + agregados finos) |
| V _{betão} | [-] | Volume ocupado pelos constituintes de um betão (argamassa + agregados grossos) |

Notação e simbologia

| | | |
|------------------|-------------------|---|
| Vw' | [-] | Volume de água final, considerando uma redução de volume igual à ocupada pelo volume final de superplastificante ou plastificante |
| w/c | [-] | Relação água/cimento, em massa |
| w/p | [-] | Relação água/finos, em massa |
| d0 | [mm] | Valor do diâmetro interior inferior do cone de espalhamento de uma pasta, argamassa ou betão |
| d1 | [mm] | Diâmetro de uma pasta, argamassa ou betão numa direção de espalhamento |
| d2 | [mm] | Diâmetro de espalhamento ortogonal a d1 |
| d | [mm] | Valor médio do diâmetro de espalhamento de uma pasta, argamassa ou betão |
| β_p | [-] | Valor máximo para a relação volumétrica água/ligante para que exista um espalhamento nulo no ensaio de espalhamento |
| Gp | [-] | Área de espalhamento relativa para uma pasta |
| t _{esc} | [s] | Tempo de escoamento de uma pasta no cone de Marsh, de uma argamassa ou betão no funil V |
| Gm | [-] | Área de espalhamento relativa para uma argamassa |
| t ₅₀₀ | [s] | Tempo necessário para o betão atingir um diâmetro de 500 mm no ensaio de espalhamento |
| mp | [g] | Massa vazia do peneiro, no ensaio de segregação |
| mc | [g] | Massa inicial do peneiro e amostra ou amostra, no ensaio de segregação |
| mps | [g] | Massa final no ensaio de segregação |
| SR | [%] | Porcentagem de betão que passa no peneiro no ensaio de segregação |
| H1 | [mm] | Altura do betão na parte de trás da caixa, no ensaio de escoamento na caixa L |
| H2 | [mm] | Altura do betão na parte da frente da caixa, no ensaio de escoamento na caixa L |
| H2/H1 | [-] | Rácio entre alturas de betão na parte de trás e da frente no ensaio de escoamento na caixa L |
| SF | | Classe de espalhamento |
| VF | | Classe de viscosidade obtido no ensaio de escoamento no funil V |
| PL | | Capacidade de passagem no ensaio de escoamento na caixa L |
| SR | | Classe de resistência à segregação |
| t | [s, min, h, dias] | Tempo |
| T | [°C] | Temperatura |
| RH | [%] | Humidade relativa |
| RAM | | Região Autónoma da Madeira |
| BAC | | Betão Autocompactável |

Notação e simbologia

| | |
|--------------|--|
| CCEE | Centro de Ciências Exatas e da Engenharia |
| UMa | Universidade da Madeira |
| LCM | Laboratório dos Cimentos Madeira |
| FEUP | Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto |
| BRIMADE | Sociedade de Britas da Madeira, Lda. |
| BETO MADEIRA | Betões e Britas da Madeira, S.A. |
| LNEC | Laboratório Nacional de Engenharia Civil |
| LREC | Laboratório Regional de Engenharia Civil |

TERMOS E DEFINIÇÕES

De maneira a facilitar e clarificar a leitura deste trabalho, apresentam-se de seguida alguns termos e definições utilizados na bibliografia relativamente ao BAC na dissertação.

Finos – Material com partículas de tamanho inferior a 0,125 milímetros, inclui as frações de cimento, adições e de agregados [1].

Adição – Segundo a EN NP 206 - 1 (2007), uma adição é um material inorgânico, de pequena dimensão, que pode ser adicionado ao betão (na amassadura) com a finalidade de melhorar as propriedades ou obter propriedades especiais [2]. Existem dois tipos de adições: i) adições do tipo I - adições quase inertes (Fíler Calcário) e ii) adições do tipo II - adições pozolánicas ou hidráulicas latentes (Cinzas volantes e sílica de fumo). Neste trabalho foram utilizadas adições do tipo II, nomeadamente cinzas volantes.

Adjuvante – Nos termos da EN NP 206 - 1 (2007), é um material adicionado, durante o processo de mistura do betão, em pequenas quantidades relativamente à massa de ligante, de modo a alterar as propriedades do betão fresco ou endurecido [3]. Neste trabalho foram utilizados como adjuvantes o plastificante, superplastificante e modelador de viscosidade.

Ligante – O ligante é constituído pelo cimento e pela adição de tipo II [1]. No dimensionamento das composições de BAC neste trabalho, o ligante é constituído pela quantidade de cimento e pela quantidade de cinzas volantes.

Pasta – Consiste numa fração de betão constituída pelo cimento, água, adição e adjuvante quando aplicado [1].

Argamassa – Fração do betão constituída pela pasta e pelos agregados com dimensão máxima inferior a 4 milímetros (areia fina e areia britada) [1].

Propriedades reológicas – Propriedades do betão no seu estado fresco.

Capacidade de preenchimento – Capacidade do betão fresco fluir e preencher todos os espaços dentro da cofragem, sob a ação do seu peso próprio [1].

Capacidade de Passagem – Segundo a norma NP EN 206 – 9 (2010) [4], é a capacidade do betão fresco escoar através de espaços confinados ou através de aberturas estreitas, tais como zonas com elevada densidade de armaduras, sem que ocorra segregação ou bloqueio [1].

Resistência à segregação – Habilidade do betão se manter homogêneo no seu estado fresco [1], sem que ocorra separação dos seus materiais constituintes.

Fluidez – Facilidade do betão fresco fluir quando este não se encontra confinado por cofragens ou outros obstáculos [2].

Viscosidade – Resistência para um material (exemplo: BAC) fluir ou escoar assim que o escoamento se inicie [1].

Trabalhabilidade – Característica que define a facilidade com que o betão fresco pode ser colocado e compactado. É uma combinação complexa de aspetos relacionados com a fluidez, viscosidade, transportabilidade e compatibilidade [5].

Robustez – Capacidade do betão manter as suas propriedades frescas quando são efetuadas pequenas alterações nas propriedades ou quantidades de material a serem utilizadas na composição [1].

Tixotropia – Tendência para um material (exemplo: BAC) perder progressivamente fluidez quando deixado repousar sem qualquer tipo de perturbações, mas capaz de recuperar essa fluidez quando lhe é aplicada uma fonte de energia [1].

AGRADECIMENTOS

Perante o espaço limitado desta secção de agradecimentos, seguramente, não me permite agradecer, com a devida venerabilidade, a todas as pessoas que, ao longo do meu Mestrado em Engenharia Civil me ajudaram, diretamente ou indiretamente, a cumprir todos os meus objetivos académicos.

Desta forma, com apenas algumas palavras, deixo os meus sinceros agradecimentos a todas as pessoas envolvidas na elaboração desta tese de mestrado.

Ao Professor Lino Maia, agradeço a sua disponibilidade na orientação desta dissertação.

Um grande agradecimento ao Grupo Cimentos Madeira, pela colaboração e disponibilidade de materiais e equipamentos necessários para a realização desta investigação.

Não posso deixar de agradecer também ao grupo do Laboratório Cimentos Madeira, nomeadamente ao Nélio Vieira, pela sua dedicação e apoio na conceção e otimização de composições de betão autocompactável. Ao Dr. Miguel Guimarães pelo apoio logístico, discussões e conselhos fornecidos. Aos restantes do grupo com quem lidei para a realização deste trabalho: Miguel, António, Venâncio, Júlio, entre outros.

Ao João, um profundo agradecimento pelo apoio incansável prestado aos longos destes anos e na realização da dissertação.

Quero ainda agradecer a todos os meus amigos e à família Neves, o facto de acreditarem sempre em mim e me incentivarem nos momentos de menor ânimo.

Por fim, e não com menor importância, um grande agradecimento a todos os meus familiares, em especial aos meus Pais, Adélia e José pela forma incondicional e constante como sempre me apoiaram.

Funchal, setembro 2013

Diana Neves

1

CONSIDERAÇÕES INICIAIS

1.1. INTRODUÇÃO

Nos tempos atuais, no que concerne ao processo construtivo são cada vez mais exigentes a agilidade e as técnicas construtivas utilizadas. Com o grande desenvolvimento das cidades e a escassez de mão-de-obra qualificada têm provocado inúmeros problemas na construção civil [6].

A grande aposta em novas técnicas de produtividade, durabilidade e qualidade relatam não só pontos positivos à indústria da construção civil, como também conduzem a uma grande rapidez e qualidade dos processos construtivos [6].

O betão armado, como material construtivo tornou-se um dos maiores aliados da construção civil, devido às suas excepcionais propriedades no seu estado fresco e endurecido, como também por possuir uma produtividade relativamente económica.

Nos últimos anos foram realizados diversos estudos relacionados com o betão estrutural, tentando de certa forma melhorar alguns aspetos sobre as suas propriedades e comportamento, nomeadamente porque são requeridas atualmente exigências mais diversificadas e complexas em termos de características de composição, fabrico, transporte, colocação e conservação do betão [7].

Indiscutivelmente a durabilidade das estruturas em betão armado, são uma das principais incertezas e com graves consequências económicas, ambientais e sociais. A durabilidade de uma estrutura de betão está relacionada com os processos de degradação do betão que dependem em grande parte da qualidade da produção do mesmo, do recobrimento, das condições de betonagem, da compactação em zonas com maior densidade de armadura e das condições de cura. Torna-se fulcral a prevenção da

durabilidade de estruturas de betão armado, com tempos de serviços mais longos e a baixos custos de manutenção [3, 8].

Por melhor e controlada que seja a composição de um betão convencional, e por melhores que sejam as técnicas de controlo de produção, transporte e colocação, a qualidade final do betão endurecido dependerá sempre do método de compactação e do processo de cura “in situ” [9].

Usualmente, o betão é compactado por vibradores de agulha, que requerem mão-de-obra qualificada para assegurar o adequado desempenho do betão no estado endurecido e conseqüentemente uma adequada durabilidade dos elementos estruturais, porém a vibração provoca não só atrasos e custos acrescidos, como também origina problemas ambientais e sociais. A utilização de vibradores é extremamente prejudicial à saúde dos operadores, devido à sua vibração provocam perturbações na circulação sanguínea, levando a uma das maiores conseqüências da sua utilização, à doença designada por “Vibration white finger” [10].

A crescente diminuição da qualidade dos trabalhos/processos construtivos e à necessidade de projetar estruturas com maiores propriedades mecânicas e duráveis, conduziu à necessidade de alternativas, como o exemplo do betão autocompactável, designado por BAC [9].

O BAC é um conceito de betão que oferece imensas vantagens não só nas suas propriedades no estado fresco como também no seu estado endurecido. Acresce ainda vantagens em termos de colocação, onde por sua vez elimina por completo a necessidade de compactação por vibração. Conseqüentemente a betonagem torna-se uma tarefa mais fácil e rápida, há um melhor acabamento das superfícies, diminuição da poluição sonora do local e zonas circundantes, e ainda a diminuição de equipamentos e operadores, que conduzem a vantagens relativamente à saúde dos mesmos, como também a vantagens económicas. Produzindo assim elementos betonados com qualidade, impermeabilidade e durabilidade.

Este betão é definido como um betão fluido, homogéneo, colocado sem vibração, apenas compactado pelo efeito da gravidade, preenchendo a cofragem através do seu próprio peso, mesmo na presença de vários obstáculos, como em zonas de maior densidade de armaduras [9, 11].

As propriedades do BAC no estado endurecido dependem essencialmente dos materiais utilizados na sua produção, das proporções e características físicas e químicas dos materiais constituintes, como também da sua produção, transporte e colocação de igual modo a um betão convencional (BC).

O BAC é essencialmente caracterizado pelas suas propriedades no estado fresco, este possui uma maior quantidade de ligante, isto é, uma maior quantidade de pasta e ainda possui uma baixa relação

água e finos em relação ao betão convencional. Devido a uma menor quantidade de água existente, são utilizados adjuvantes redutores de água (plastificantes e superplastificantes), com a capacidade de trazer melhorias em termos de trabalhabilidade do betão e maiores resistências com a diminuição da água [12].

A trabalhabilidade do BAC é caracterizada essencialmente por 4 propriedades: i) capacidade de passagem, ii) viscosidade, iii) fluidez e capacidade de preenchimento e iv) resistência à segregação [3, 11]

Os materiais finos ($< 125 \mu\text{m}$) são essenciais na composição do BAC, pois permitem uma maior compactidade e proporcionam maior controlo de viscosidade e segregação. O aumento dos materiais finos proporciona maior calor de hidratação. Porém as adições de material fino inerte ou pozolânico normalmente conduzem a uma menor retração, reduzindo assim o risco de fendilhação, melhorando a durabilidade estrutural devido à menor libertação do calor de hidratação [9]. Para alcançar maiores resistências foi descoberta uma grande vantagem nas adições do tipo II, com propriedades pozolânicas, fundamentalmente as cinzas volantes e sílica de fumo.

Contudo, apesar do BAC possuir excelentes propriedades no estado fresco, a sua utilização nas obras em Portugal é escassa, principalmente na Região Autónoma da Madeira (RAM).

Na RAM usualmente são utilizados agregados de origem vulcânica na produção de betão convencional, a areia do mar é utilizada como areia fina e os restantes agregados são britados. Geralmente os agregados britados oferecem melhores propriedades mecânicas ao betão mas em contrapartida pioram a trabalhabilidade do mesmo no seu estado fresco o que dificulta a produção de BAC. Para uma melhor trabalhabilidade do BAC no estado fresco a utilização de agregados rolados é fundamental, tal facto faz com que a ausência dos agregados rolados na RAM seja um dos problemas associados à utilização de BAC [8]. Para além disso, importa referir que o BAC é um betão muito sensível a quaisquer tipos variações na sua composição. Compreende-se, assim, a resistência das empresas produtoras de betão na aposta neste novo tipo de betão.

No entanto, também existem outros inconvenientes associados a sua utilização, como um exigente controlo de qualidade e vigilância em obra, como também o seu custo pode ser um dos fatores. A utilização de grandes quantidades de cimento e de adjuvantes encarecem a sua produção, no entanto é de salientar que em compensação podemos beneficiar em outros aspetos, tais como, maior resistência e originando numa menor quantidade de betão para a mesma solicitação [12].

1.2. ENQUADRAMENTO

A formulação japonesa para BAC [13], tem estado na base dos trabalhos de investigação para obtenção de dimensionamento de BACs. A sua utilização em obras com maior especificidade e com recursos a materiais existentes em cada região, origina readaptações e, nalguns casos, tem permitido a obtenção de novas formulações baseadas em métodos de tentativa-erro [14].

Para obtenção de um BAC, geralmente é utilizado uma grande quantidade de cimento Portland, este sem dúvida é um dos constituintes do betão que requer maior custo e consumo energético para a sua produção: são emitidas cerca de uma tonelada de dióxido de carbono por cada tonelada de clínquer produzido, o que representa cerca de 90% das emissões de dióxido de carbono da indústria do betão [15, 16].

As adições do tipo II, nomeadamente as cinzas volantes têm uma grande influência nas propriedades do betão, permitem melhorar o comportamento mecânico e a durabilidade dos betões, sem necessariamente aumentar o seu custo. A sua adição está relacionada diretamente com o cimento, com a adição de cinzas volantes há uma redução no consumo de cimento, tornando-se vantajoso a sua utilização [17]. A utilização de adjuvantes, sobretudo superplastificante reduz significativamente a água de amassadura (w/p), ajudando nas propriedades do betão no estado fresco, como uma melhor trabalhabilidade e ainda aumentam a sua resistência, assegurando estruturas com durabilidade e qualidade de produção.

Perante estas vantagens mencionadas, e como este apresenta um acabamento homogéneo e uma superfície que não necessita de cuidados especiais, em termos de acabamentos, pretende-se dimensionar várias composições de BAC otimizadas, de forma a serem lançadas à comercialização, apenas utilizando agregados originários da RAM.

1.3. MOTIVAÇÃO

Com o desenvolvimento de dissertações realizadas na UMA, nomeadamente “*Dimensionamento de Betões Autocompactáveis Coloridos com Agregados Britados Vulcânicos*” de José Celestino Gomes [8], o estudo por este efetuado verificou-se a possibilidade de desenvolvimento do BAC comercial na RAM.

Um das grandes motivações na realização deste trabalho, foi o fornecimento de betão solicitado ao Laboratório Cimentos Madeira, para o preenchimento de vigas armadas onde a aderência era

importante. Como as vigas possuíam uma betonagem de difícil acesso e onde o envolvimento das armaduras era importante, achou-se por bem fornecer o BAC, pois o BAC possui características benéficas para a aplicação em causa. Assim, o presente trabalho aborda as várias dificuldades no decorrer dos estudos de dimensionamento de BACs na RAM, desde a composição de laboratório à comercialização. Além disso, também apresenta todas as dificuldades e vantagens encontradas durante esta aplicação BAC, desde a produção em central, do tipo de betonagem à qualidade final do produto.

1.4. OBJETIVOS

Existe uma constante necessidade de inovar e introduzir novas tecnologias no sector da indústria da construção, de modo a contribuir para a sustentabilidade das estruturas de betão. O presente trabalho pretende ser um contributo para a implementação de novas tecnologias, como o BAC na indústria da construção da RAM.

Perante o interesse manifestado na implementação desta nova tecnologia, um dos principais objetivos deste trabalho, é numa primeira estância a avaliação e produção em laboratório de várias composições de BAC, de modo, a alcançar composições económicas e robustas, apenas com materiais disponíveis na RAM. Numa segunda estância a validação de uma composição de BAC para o lançamento do produto no mercado, de forma a criar confiança na utilização do “novo” betão, demonstrando as suas vantagens e identificando o processo de fabrico, transporte e colocação.

1.5. CONTRIBUIÇÕES CIENTÍFICAS E LIMITAÇÕES

A presente dissertação reporta os trabalhos experimentais realizados no LCM. Com o propósito de conhecer melhor as dosagens e comportamento dos materiais constituintes do BAC, foram efetuados ensaios em pastas, argamassas e posteriormente em betões. Dimensionaram-se composições BAC, de forma a obter estabilidade no seu estado fresco no decorrer do tempo, caracterizado pelas suas principais propriedades no estado fresco: capacidade de passagem, viscosidade, fluidez e resistência à segregação.

O desconhecimento relativamente à interação dos agregados disponíveis na RAM com os restantes materiais constituintes do BAC, foram umas das principais limitações encontradas durante a realização desta dissertação.

Foi adotada a metodologia de tentativa-erro para a obtenção de pastas, argamassas e de composições BAC, onde surgem algumas dúvidas e conseqüentemente alguns gastos significativos de tempo e recursos para a realização dos vários ensaios [3]. Na realização dos ensaios foram utilizados os equipamentos específicos e normalizados para o BAC, e os materiais correntemente utilizados pelo Grupo Cimentos Madeira.

Como contribuições científicas, é de salientar que se demonstrou ser exequível a produção de BAC de forma otimizada e a viabilidade na sua comercialização e utilização como material construtivo na RAM.

1.6. APRESENTAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

Para além do presente capítulo, esta dissertação compreende ainda mais seis, organizados e distribuídos pela forma em que se apresentam os próximos parágrafos.

No capítulo 2 é apresentada a evolução e utilização do material construtivo estudado. Para além disso, definem-se as propriedades e ensaios para avaliação do BAC no seu estado fresco e endurecido.

No capítulo 3 são expostos os efeitos dos principais materiais constituintes do BAC nas propriedades do betão.

No capítulo 4 será feita a alusão à metodologia adotada com vista à caracterização dos objetivos propostos, também serão descritos os equipamentos utilizados, procedimentos de amassadura e dos ensaios realizados.

No capítulo 5 são apresentados e discutidos os resultados obtidos nos ensaios das pastas, argamassas e betões.

No capítulo 6 é apresentado todo procedimento de uma aplicação prática do BAC otimizado à escala real e caracterizado no estado fresco e endurecido, recorrendo aos mesmos ensaios utilizados em laboratório, apresentando-se as diferenças entre as misturas produzidas no laboratório e as produzidas nas condições reais de comercialização.

No capítulo 7 são expostas as considerações finais, mostrando alguns resultados pertinentes neste estudo e também são apresentadas algumas sugestões para trabalhos futuros que venham completar o conhecimento do BAC na RAM.

2

ESTADO DA ARTE

2.1. INTRODUÇÃO

Durante a colocação do betão convencional, a eficiência da compactação do betão reflete diretamente no desempenho estrutural, sobretudo em termos de durabilidade, independente da qualidade da sua produção e da própria composição. O processo de compactação é fundamental para expelir o ar do interior do betão e envolver completamente as armaduras, de modo a preencher todos os espaços dentro da cofragem, para que no final atinga os níveis de resistência e durabilidade requeridos. A compactação, geralmente é realizada por vibradores operados por trabalhadores sem formação específica, onde para além de problemas de supervisão deste processo, conduz a problemas de ruído e saúde associados à sua utilização [3].

Com a crescente falta de durabilidade e a necessidade de construir estruturas com requisitos relacionados com forte ação sísmica, que reflete num aumento da quantidade de armadura, surge a preocupação de desenvolver um novo material de modo a satisfazer certos requisitos. Como resposta a este conjunto de preocupações surge o desenvolvimento do BAC [11].

Este novo tipo de betão surge no final dos anos 80 no Japão, proposto pelo professor *Okamura*, tendo em vista a garantia de uma maior homogeneidade do betão e melhoria na durabilidade das estruturas, independentemente da qualidade dos trabalhos de compactação em obra, visto que este surge para colocar inteiramente de parte o processo de compactação, tornando-o tolerante em termos de variações de vibração e silencioso pela eliminação do ruído associado à compactação [3, 9]. A principal inovação do BAC não consta no material utilizado, pois os materiais são os mesmos de um betão convencional, mas sim nas suas características no seu estado fresco [11].

Seguindo-se do Japão, a nova tecnologia divulgou-se através da Ásia e chegou à Europa por volta da década de 90, muito utilizado pela indústria de pré-fabricação, mas também com aplicações em betão pronto para estruturas de pontes, edifícios, entre outras aplicações [18].

2.2. APLICAÇÕES PRÁTICAS DE BETÃO AUTOCOMPACTÁVEL

Com o crescente desenvolvimento do BAC, o número de aplicações práticas aumentaram, inicialmente com maior intensidade no Japão e depois alargando-se para outros países da Europa [11]. É aplicado geralmente em vários tipos de obras de engenharia civil: i) edifícios; ii) pontes; iii) túneis; iv) barragens; v) produtos de betão (blocos, tanques de água, lajes paredes); vi) colunas de aço preenchidas com betão. Nos pontos seguintes pretende-se apresentar de forma sucinta, algumas aplicações práticas notáveis em diversos países.

Após o desenvolvimento do protótipo do BAC na universidade de Tóquio, iniciou-se uma intensiva investigação para aplicação em vários tipos de estrutura. A primeira aplicação surge no Japão em Junho de 1990 na construção de um edifício, e já mais tarde em 1991 foi utilizado nos mastros de uma ponte atirantada, desde então o uso do BAC nas estruturas atuais tem aumentado gradualmente. O progressivo aumento da sua utilização nas estruturas atuais advém da redução do período de construção, a garantia de compactação na totalidade da estrutura, mesmo em zonas densamente armadas e de difícil acesso e a redução do ruído devido à vibração [11].

Outros pontos notáveis da sua utilização, foi na construção da ponte suspensa de Akashi-Kaikyo (Figura 2-1), concluída em Abril de 1998, com 3991 m de comprimento e um vão de 1991 m, tornando-se um recorde mundial. O maciço de ancoragem da ponte, que por sua vez possuía uma elevada densidade de armadura, foi necessário 290 000 m³ de BAC. Este betão foi produzido numa central próxima do local de obra, depois era bombeado através de uma tubagem de 200 m até ao local de aplicação. Em análise, com a utilização do BAC em relação a um betão convencional reduziu-se cerca de 20% do tempo de construção.

Outro exemplo, foi a construção de um tanque pré-esforçado (Figura 2-2), destinado ao armazenamento de gás natural liquefeito (LNG), terminado em Junho de 1998. O volume de BAC utilizado nesta construção foi de 12 000 m³, este permitiu que: i) o número de fases de betonagem fosse diminuído de 14 para 10; ii) o número de trabalhadores habitualmente utilizados numa obra deste género fosse reduzido de 150 para 50 trabalhadores; iii) o período de construção fosse reduzido de 22 para 18 meses [8].



Figura 2-1 – a) Ancoragem da ponte suspensa de Akashi-Kaikyo; b) Aspecto final da ponte.

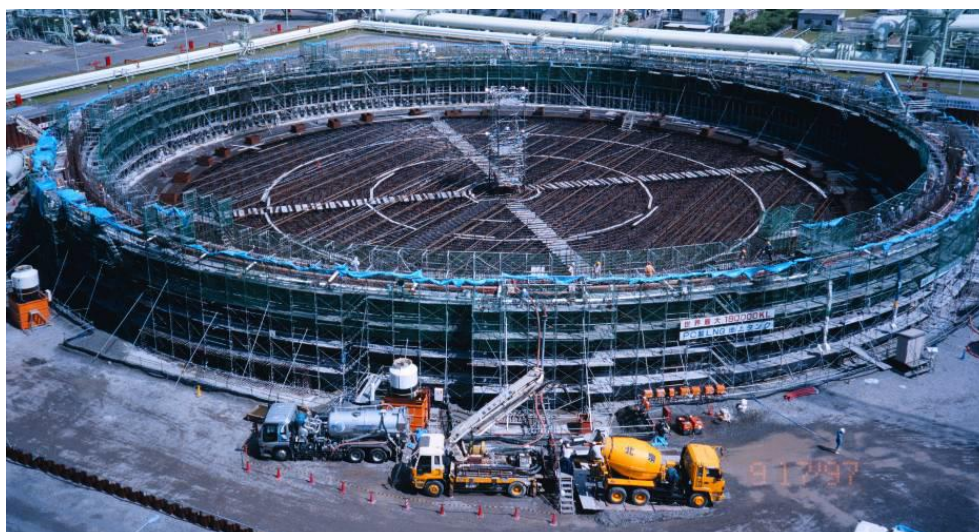


Figura 2-2 – Vista geral do local de construção durante a betonagem.

Já na Suécia, o BAC surge devido à grande necessidade de melhoria dos trabalhos e ao aumento da produtividade. As suas primeiras aplicações foram em obras de arte, como o SNRA (The Construction and Maintenance Centre at the Swedish National Road Administration) e o CBI (Swedish Cement and Concrete Research Institute). Estas aplicações levaram que no final de 2002, 50% dos trabalhos de betão em pontes realizados na Suécia fossem em BAC. Com a experiência positiva resultante da aplicação em pontes fez despertar novos interesses, onde surgiram novos campos de aplicação. A utilização de BAC na construção de túneis foi uma das novas aplicações na Suécia, devido às grandes dificuldades de colocação e compactação. Esta aplicação apresentava grandes melhorias nos aspetos de produtividade como nas condições de trabalho, perante estas vantagens tornou-se uma alternativa natural para os empreiteiros [11]. Um exemplo notável da utilização de BAC em túneis, foi na construção do Sodra Lanken Tunnels, em Estocolmo, ilustrado na Figura 2-3.



Figura 2-3 – Sodra Lanken Tunnels, em Estocolmo.

Entre outras aplicações de BAC recentemente efetuadas, salientam-se algumas construções emblemáticas no Médio Oriente: como as fundações do Burj Dubai Tower e no Shangri-La Hotel, ilustradas na Figura 2-4. Nesta última, foi necessário 780 m³ de BAC, onde foram lançados até uma altura de 184 m. No Kuwait, o BAC foi utilizado na construção da estação de tratamento de água de Sulaibiy, na Arábia Saudita este é utilizado sobretudo em edifícios altos e em elementos de fabricação.



Figura 2-4 – a) Burj Dubai Tower; b) Shangri-La Hotel.

Depois da Suécia, alguns países europeus com maior experiência em estruturas de betão armado desencadearam uma intensa investigação de BAC, nomeadamente Holanda, Reino Unido, França, Suíça, Dinamarca, Islândia e entre outros.

Em Portugal, o consumo de BAC ainda não é muito significativo, possivelmente pelo custo dos materiais constituintes possuírem um grande peso na decisão da sua utilização, mas em contrapartida a

redução de operadores no que concerne aos trabalhos de vibração faz com que este se torne relativamente económico, sendo este apenas muito utilizado na pré-fabricação em Portugal. Praticamente foram aplicadas betão branco em situações especiais, para betão à vista, em zonas densamente armadas e também na reparação e reforço de estruturas. Uma das aplicações de BAC, foi numa viga de coroamento da fachada do Edifício Alto do Parque, em Lisboa, ilustrada na Figura 2-5.



Figura 2-5 – Edifício Alto do Parque, Lisboa.

Outro exemplo notável da sua utilização, foi o Edifício Vodafone no Porto, ilustrado na Figura 2-6, desenhado pelos arquitetos José António Barbosa e Pedro Lopes Guimarães. Foi reconhecido com o prémio de melhor edifício de 2010, na categoria de Arquitetura Institucional. A utilização do BAC branco permitiu contornar todas as formas irregulares existentes no edifício, tornando-se o primeiro de aplicação BAC em Portugal.



Figura 2-6 – Edifício Vodafone, Porto.

Na Região Autónoma da Madeira, até à data não existe a utilização de BAC em nenhum campo de aplicação. Apenas foram realizados trabalhos de investigação em dissertações, onde foi possível certificar a possibilidade de utilização do BAC com os materiais correntemente disponíveis na RAM. Possivelmente, uma das razões de não ter sido utilizado este novo conceito de betão, possivelmente a falta de agregados rolados na RAM, que favorecem muito na composição do BAC. Para além disso, até ao início do projeto de investigação em que esta tese se insere (em outubro de 2011), não existiam (na RAM) os equipamentos necessários para aferir a autocompactabilidade.

2.3. CONCEITO DE BETÃO AUTOCOMPACTÁVEL

Segundo Okamura [13], o BAC deve satisfazer os seguintes três requisitos. Primeiro, o betão deve fluir livremente dentro da cofragem sem o uso de vibração. Segundo, os efeitos devidos ao calor de hidratação, endurecimento ou retração por secagem devem ser mínimos. Terceiro, a permeabilidade do betão frente à penetração, de oxigénio, cloretos, dióxido de carbono e água deve ser mínimo [3].

O BAC no seu estado fresco, tem a capacidade de preencher a cofragem na sua totalidade e envolver todas as armaduras apenas pela ação do seu peso próprio sem que haja perda da homogeneidade. Este novo betão não necessita de vibração ou energia adicional para a compactação na sua colocação, é capaz de fluir livremente mesmo na presença de zonas densamente armadas ou outros obstáculos e ainda é capaz de expelir o ar, atingindo uma compactação completa. No seu estado endurecido, é um betão homogéneo que possui propriedades semelhantes, mas ligeiramente superiores ao do betão convencional [8, 9, 11].

Para que este seja praticável, é necessário que satisfaça três requisitos: i) capacidade de preenchimento; ii) resistência à segregação e iii) capacidade de passagem [1]. Para isso são realizados ensaios normalizados de modo a serem analisadas e avaliadas as suas propriedades no estado fresco. A composição BAC deve de oferecer uma elevada resistência à segregação, de modo a que não haja exsudação e assentamento de partículas mais grossas (sedimentação) [11].

O BAC proporciona uma betonagem e desmoldagem mais fácil e rápida, diminuindo os tempos de construção. A durabilidade da estrutura e os acabamentos de superfície de alta qualidade são umas das principais características do BAC, benefício este que advém da sua grande fluidez, resistência à segregação e dos minorados valores de vazios, que proporcionam um nível elevado de homogeneidade. O facto do BAC não necessitar de qualquer tipo de compactação, nomeadamente de vibração, dá origem a um produto final potencialmente mais homogéneo, com um menor teor em ar e

uma maior compacidade. Muitas das vezes o BAC é produzido com uma relação baixa de w/p, a diminuição da água leva a que este obtenha elevadas resistências iniciais.

2.4. PROPRIEDADES NO ESTADO FRESCO E NO ESTADO ENDURECIDO DO BAC

Serão abordados aspetos relativos ao comportamento reológico e requisitos de trabalhabilidade, pois as propriedades do BAC no estado fresco assumem uma especial relevância e no estado endurecido serão avaliados o comportamento mecânico e a durabilidade das estruturas. Porém neste trabalho apenas serão avaliadas a resistência à compressão e as restantes propriedades serão abordadas de forma superficial. Também serão apresentados e discutidos os principais ensaios para avaliação das propriedades do BAC no seu estado fresco e endurecido.

2.4.1. PROPRIEDADES DO BAC NO ESTADO FRESCO

As propriedades apresentadas pelo BAC no seu estado fresco são a sua principal característica, o que distingue nitidamente de um betão convencional [18].

A trabalhabilidade do BAC assume um papel muito importante, pois uma adequada trabalhabilidade pressupõe a obtenção de uma adequada autocompactabilidade [9]. A autocompactabilidade, enquanto propriedade no estado fresco, pode ser caracterizada, fundamentalmente, por três requisitos principais: i) capacidade de preenchimento, ii) resistência à segregação e iii) capacidade de passagem [3].

2.4.1.1. CAPACIDADE DE PREENCHIMENTO

A capacidade de preenchimento ou fluidez do BAC está relacionada com a facilidade do betão no estado fresco se deformar, em termos de distância alcançada pelo betão desde o ponto de descarga e a velocidade com que este se move, preenchendo todos espaços e contornando todos os obstáculos através do seu peso próprio, sem recorrer a qualquer método de compactação e sem a ocorrência de segregação [3, 18].

A deformação do betão aumenta com a redução do atrito entre as partículas sólidas (agregado e materiais finos), para isso é necessário a redução do volume de agregado ou aumento do volume de pasta [11].

Para uma adequada capacidade de preenchimento é necessário um equilíbrio entre a capacidade de deformação e a velocidade de deformação. Esta pode ser melhorada através da introdução de moduladores de viscosidade ou da redução do volume de agregado grosso. As alterações ocorridas na viscosidade da pasta influenciam a capacidade de preenchimento do BAC. Assim uma viscosidade muito elevada pode provocar bloqueio do betão em zonas densamente armadas ou estreitas e uma viscosidade muito baixa pode ocorrer segregação e exsudação. A viscosidade pode ser controlada através das quantidades de agregado grosso, relação w/p e na introdução de adjuvantes e adições [18].

De uma forma mais resumida, para se conseguir uma capacidade de preenchimento adequada devem ser consideradas as seguintes ações:

Reduzir o atrito inter-partículas, é necessário:

- ✓ Baixar o volume do agregado grosso (aumentar o volume da pasta);
- ✓ Usar agregados rolados;
- ✓ Otimizar a granulometria.

Aumentar a deformabilidade da pasta, é necessário:

- ✓ Equilíbrio entre a razão w/p;
- ✓ Introdução de adjuvantes, nomeadamente superplastificastes.

2.4.1.2. RESISTÊNCIA À SEGREGAÇÃO

O fenómeno de segregação do betão fresco é caracterizado pela ausência de homogeneidade na distribuição dos seus materiais constituintes. Numa composição com uma boa resistência à segregação, as partículas do agregado grosso devem permanecer dispersas na mistura, isto é, as partículas deve ser relativamente equivalentes em todas as localizações da mistura [3, 18].

O BAC não deve de evidenciar qualquer tendência para a segregação, tanto em repouso como em movimento. A exsudação (segregação entre sólidos e água), a segregação da pasta e agregados, a segregação do agregado grosso originando o bloqueio e a não uniformidade na distribuição dos poros de ar, são tipos de segregação que não devem ser exibidos [3]. Para evitar o fenómeno de exsudação é essencial reduzir a quantidade de água livre na composição e introdução de agentes de viscosidade. A água livre é definida como a água que não se encontra aderente à superfície das partículas e que se pode mover livremente [9]. A redução de água livre pode ser obtida pela redução da dosagem de água e por uma baixa razão de w/p. A utilização de materiais finos com elevada superfície específica, favorece a redução de água livre, pois estes aumentam absorção de água [11]. Note-se que a exsudação

pode provocar o desenvolvimento de fissuras (devido à retração plástica), especialmente em zonas sobre as armaduras [19].

Para se atingir uma adequada resistência à segregação, devem ser tomadas as seguintes ações:

Para minimizar a exsudação:

- ✓ Reduzir a dosagem de água;
- ✓ Reduzir a razão w/p;
- ✓ Utilizar materiais finos com elevada superfície específica;
- ✓ Introduzir agentes de viscosidade.

Redução da segregação dos sólidos:

- ✓ Limitar a quantidade de agregado;
- ✓ Reduzir a máxima dimensão do agregado;
- ✓ Reduzir a razão w/p;
- ✓ Introduzir agentes de viscosidade.

2.4.1.3. CAPACIDADE DE PASSAGEM

A capacidade de passagem, representa a capacidade que o betão tem de fluir livremente dentro da cofragem através das armaduras. No caso de existir espaços congestionados de armadura na cofragem é necessário evitar a ocorrência de bloqueio dos agregados grossos (Figura 2-7), que afeta a capacidade de passagem do BAC.

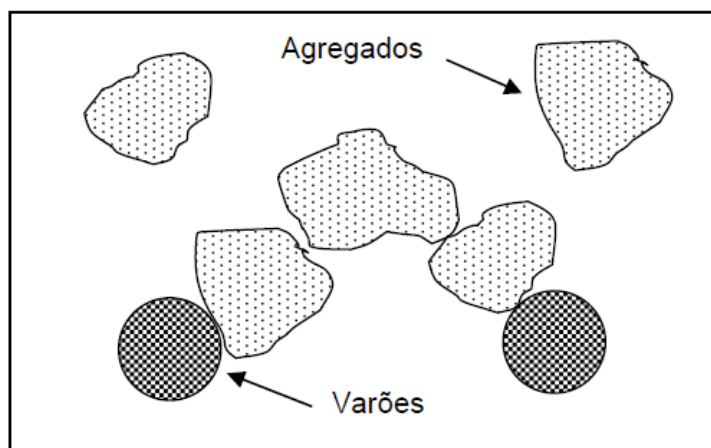


Figura 2-7 – Mecanismo de bloqueio.

O formato das cofragens, o espaçamento/densidade das armaduras e compatibilidade entre a dimensão máxima e a quantidade de agregado grosso, devem ser corretamente compatibilizadas de forma a não influenciar a capacidade de passagem do betão fresco [18].

A existência de obstáculos provoca alterações no percurso das partículas dos agregados, em consequência ocorrem colisões e contactos instantâneos entre os agregados próximos das aberturas entre varões, possibilitando que algumas das partículas do agregado formem um arco estável, o qual bloqueia a passagem do resto da mistura, isto é, ocorre o mecanismo de bloqueio dos agregados. A tendência de ocorrer o mecanismo de bloqueio incide quando existe uma elevada dosagem de agregados e com agregados de maior dimensão. Por outro lado, a probabilidade de ocorrer bloqueio é maior quando o diâmetro dos varões é maior, pois varões maiores providenciam um apoio mais estável para a formação do arco de agregados.

Para se atingir uma adequada capacidade de passagem, devem ser tomadas as seguintes ações:

Para melhorar a coesão e reduzir a segregação do agregado:

- ✓ Reduzir a razão w/p;
- ✓ Introduzir agentes de viscosidade.

Para compatibilizar as características das aberturas e dos agregados grossos:

- ✓ Reduzir o volume de agregados grossos;
- ✓ Reduzir a máxima dimensão dos agregados.

2.4.2. ENSAIOS DE AVALIAÇÃO DO BETÃO FRESCO

A necessidade de avaliar as propriedades e o desempenho do BAC, levou ao desenvolvimento de novos métodos, pois muitos dos métodos tradicionalmente utilizados para avaliar a trabalhabilidade do betão corrente são totalmente desadequados para o BAC. Destacam-se na EN NP 12350 – 8,9,10,11 e 12 (2010) [4], como novos métodos desenvolvidos os ensaios de espalhamento, funil V, caixa L e de resistência à segregação. O objetivo destes ensaios é avaliar a autocompactabilidade do betão no estado fresco, nomeadamente a capacidade de preenchimento, a resistência à segregação e a capacidade de passagem [3, 9, 18].

Os três requisitos funcionais para a autocompactabilidade não são avaliados de forma independente nos novos métodos de avaliação, mas sim avaliam alguns requisitos em simultâneo. De uma forma

resumida, os ensaios de espalhamento e do funil V permitem avaliar o seu comportamento reológico do betão em alguns requisitos de autocompactabilidade, enquanto que o ensaio de caixa L, designado por ensaio de autocompactabilidade, permite avaliar a trabalhabilidade do betão fresco, avaliando os três requisitos funcionais em simultâneo [9].

2.4.2.1. ENSAIO DE ESPALHAMENTO (“SLUMP-FLOW”)

O ensaio de espalhamento do betão é o mais utilizado para avaliar a consistência do BAC no estado fresco, pois o procedimento é relativamente simples. O ensaio é realizado com um cone de “Abrams” e uma placa com uma circunferência de 500 mm desenhada, é de realçar que este ensaio não é adequado quando a máxima dimensão do agregado excede os 40 mm. O cone é preenchido com betão e levantado, após cessar o movimento é medido o diâmetro médio de espalhamento, e durante a deformação do betão é possível medir o tempo (t_{500}) que o betão demora a atingir um diâmetro de 500 mm [3, 9, 11].

O valor do diâmetro de espalhamento é um índice útil para avaliar a capacidade de deformação do BAC e o tempo de escoamento para o diâmetro 500 mm (t_{500}) é correntemente utilizados para avaliar a viscosidade da mistura [9]. O valor de t_{500} , por si só não representa uma medida de viscosidade, porém pode constituir um índice útil para avaliação relativa da viscosidade de composições BAC que apresentem o mesmo diâmetro final de espalhamento.

Contudo, o valor de espalhamento está diretamente relacionado com a fluidez e capacidade de preenchimento, ou capacidade do betão se deformar em condições não confinadas e ainda permite avaliar qualitativamente a resistência à segregação do betão fresco, por observação visual [9].

O espalhamento da composição BAC será classificada consoante a norma NP EN 206-9 (2010) [4], esta apresenta 3 classes de espalhamento:

- ✓ SF1 (550 – 650 mm) é adequada para:
 - Estruturas de betão armado, ligeiramente armadas (ex. lajes ou pavimentos);
 - Betão bombeado, através do sistema de injeção de bomba (ex. revestimentos de tuneis);
 - Secções suficientemente pequenas, de modo a prevenir os escoamentos horizontais (ex. Pilares e fundações profundas).
- ✓ SF2 (660 – 750 mm) é adequada para várias aplicações correntes, como paredes, pilares, colunas, entre outras;

- ✓ SF3 (760 – 850 mm) é geralmente produzido com dimensão máxima do agregado $D_{\max} \leq 16$ mm e é tipicamente usado em aplicações complexas, verticais e em estruturas extremamente congestionadas de armaduras. Esta classe de acabamento apresenta normalmente um melhor acabamento superficial em aplicações verticais, embora seja mais difícil de controlar a ocorrência de segregação [8].

O tempo de espalhamento t_{500} da composição BAC será classificada consoante a norma NP EN 206-9 (2010) [4], esta apresenta 2 classes de viscosidade no ensaio de espalhamento:

- ✓ VS1 ($< 2,0$ s), apresenta uma boa capacidade de preenchimento, capacidade de auto nivelar e melhor superfície de acabamento, porém apresenta um maior risco de exsudação ou segregação;
- ✓ VS2 ($\geq 2,0$ s), com o crescer do tempo de espalhamento (t_{500}), pode exibir efeitos de tixotropia que melhoram a resistência à segregação e na superfície de acabamento pode surgir bolhas de ar.

2.4.2.2. ENSAIO DE ESCOAMENTO NO FUNIL V

O ensaio de viscosidade ou ensaio de escoamento no funil V é realizado com um funil em forma de V, com uma abertura na base que serve de comporta. Este permite avaliar a capacidade de passagem do betão fresco por uma abertura estreita ou por um espaço confinado, na direção vertical e apenas sob ação do seu peso próprio. O funil V é utilizado para betões altamente fluidos com adjuvantes, particularmente superplastificante e com agregados com máxima dimensão inferior a 22,4 mm [3, 9].

A execução do ensaio é relativamente simples, após o enchimento do funil, a comporta da base é aberta e dá-se o início da contagem do tempo de escoamento (t_{esc}), este termina quando em observação no interior do funil surge o aparecimento do primeiro raio de luz no fundo do funil [3, 9].

A viscosidade do BAC pode ser avaliada pelo tempo de escoamento no funil ou durante o ensaio de espalhamento através do t_{500} . Se o escoamento do BAC apresentar uma viscosidade elevada, os tempos de escoamento serão maiores, pode fluir lentamente por um determinado tempo. Por outro lado, um BAC com uma viscosidade baixa, apresenta tempos de escoamento menores, embora possa resultar em tempos longos se eventualmente ocorrer segregação ou bloqueio dos agregados. Segundo vários autores, o tempo de escoamento (t_{esc}) desejável para o BAC deve ser na ordem dos 10 segundos [11].

No ensaio de escoamento no funil V, a composição de BAC pode possuir duas classes de viscosidade, baixa ou alta, descritos na norma NP EN 206-9 (2010) [4]:

- ✓ VF1 (< 9 s), possui uma boa capacidade de preenchimento, mesmo na presença de obstáculos, tem a capacidade de se auto nivelar e apresenta um melhor acabamento superficial. No entanto, é mais provável a ocorrência de segregação e exsudação;
- ✓ VF2 (9 a 25 s), com o crescer do tempo, pode exibir efeitos de tixotropia que melhoram a resistência à segregação e a superfície de acabamento pode surgir bolhas de ar.

2.4.2.3. ENSAIO DE ESCOAMENTO DA CAIXA L

O ensaio de escoamento na caixa L, designado como ensaio de autocompactabilidade, permite avaliar simultaneamente diferentes requisitos funcionais de autocompactabilidade do betão fresco. Avalia a capacidade de passagem do betão sob o seu peso próprio, sem perda de homogeneidade ou sem bloqueio dos agregados, através da passagem de espaços confinados, ou seja, entre varões que simulam armaduras [20]. O ensaio permite determinar valores que quantificam o bloqueio e a fluidez do betão após a passagem pelos obstáculos, e ainda é possível avaliar de forma qualitativa a resistência à segregação mediante observação visual. Em estruturas complexas, onde o espaçamento entre varões seja inferior a 60 mm, será necessário realizar ensaios à escala real [3, 8, 9, 11].

Para este ensaio é utilizada uma caixa com a forma de “L”, formando uma parte vertical e horizontal separadas por uma tampa deslizante. Inicialmente a parte vertical da caixa é cheia com betão, que se deixa repousar cerca de um minuto, posteriormente a tampa deslizante é aberta e o betão flui da parte vertical para a parte horizontal da caixa atravessando o obstáculo constituído pelas armaduras. Permite ainda determinar a velocidade de movimento do betão medindo o tempo que o betão demora a percorrer ao longo da parte horizontal os 200 e 400 mm, respetivamente t_{200} e t_{400} . Na cessão do movimento, procede-se a medição dos parâmetros H_1 e H_2 , onde a razão entre estes define o coeficiente de bloqueio, sendo este um bom indicador da capacidade do betão passar por espaços estreitos, o que inclui a capacidade de deformação e resistência ao bloqueio [3, 9, 11].

Segundo a EN NP 206-9 (2010) [4], o BAC pode possuir duas classes de capacidade de passagem no ensaio de escoamento da caixa L:

- ✓ PL1 ($\geq 0,8$ com 2 varões), esta classe de capacidade de passagem é atribuída a estruturas com um espaçamento entre armaduras de 80 a 100 mm, como edifícios e estruturas verticais;
- ✓ PL2 ($\geq 0,8$ com 3 varões), esta classe de capacidade de passagem é atribuída a estruturas com um espaçamento entre armaduras de 60 a 80 mm, como estruturas correntes de engenharia civil.

2.4.2.4. ENSAIO DE ESTABILIDADE (RESISTÊNCIA À SEGREGAÇÃO)

O BAC pode segregar, tanto dinamicamente durante a colocação, como estaticamente após a colocação, antes de endurecer. A segregação estática será prejudicial em elementos altos, embora em lajes de menor espessura pode conduzir a defeitos superficiais, tais como a fissuração ou superfície enfraquecida. Para as classes mais altas de espalhamento e as classes mais baixas de viscosidade, a estabilidade é um parâmetro de extrema relevância [4]. O valor de estabilidade obtido no ensaio de segregação no peneiro descreve a resistência à segregação, característica fundamental para a homogeneidade e qualidade final do BAC.

No ensaio de segregação no peneiro, o betão é colocado num recipiente com cerca de 10 litros, tapado de modo a evitar evaporação durante 15 minutos. No fim desse período é retirado a tampa e por observação visual é avaliada a existência de exsudação na superfície de betão. É vertido o betão num peneiro e deixando-o repousar durante 120 segundos, terminado o tempo é registada a massa do fundo do peneiro.

Segundo a EN NP 206-9 (2010) [4], o BAC pode possuir duas classes de resistência à segregação no ensaio do peneiro:

- ✓ SR1 ($\leq 20\%$), normalmente utilizado em lajes esbeltas e em aplicações verticais com uma distância de espalhamento < 5 m e um intervalo de escoamento > 80 mm;
- ✓ SR2 ($\leq 15\%$), utilizado em situações em que a resistência e qualidade da superfície de acabamento são importantes e em elementos verticais, se a distância de espalhamento > 5 m, com um intervalo de escoamento > 80 mm.

2.4.3. PROPRIEDADES DO BAC NO ESTADO ENDURECIDO

As propriedades do BAC exigidas no estado endurecido, são semelhantes às de um betão convencional, pois os materiais constituintes são praticamente os mesmos. A norma NP EN 206-9: Regras adicionais para betão autocompactável, remete muitos dos requisitos e outras especificações do BAC para a norma NP EN 206-1: Especificação, desempenho, produção e conformidade de um betão convencional [18].

Os estudos referentes às propriedades do betão no estado endurecido são fundamentais para um correto dimensionamento e previsão do comportamento das estruturas durante o seu tempo de vida

útil. Em geral estas propriedades incluem a resistência às tensões, fadiga, retração, deformações sob cargas e propriedades relacionadas com a durabilidade da estrutura [9].

A granulometria do BAC é alterada, pois para atingir a autocompactabilidade e simultaneamente garantir uma elevada deformabilidade e resistência à segregação é necessário maior volume de materiais finos, perfazendo-se um maior volume de pasta e paralelamente uma diminuição dos agregados. Para tal, normalmente são utilizadas maiores quantidades de adjuvantes e adições, sobretudo plastificante, superplastificante e cinzas volantes [9, 18]. Estas modificações no betão, irão não só alterar o comportamento no estado fresco como no endurecido. São o caso das alterações ao nível da resistência mecânica, módulo de elasticidade, bem como de retração e deformação [18]. Para a avaliação destas alterações é necessário a realização de ensaios em diversas idades, de modo a avaliar a evolução do seu desempenho [12].

2.4.3.1. RESISTÊNCIA MECÂNICA

Quando comparada uma composição BAC com uma equivalente de um betão convencional, os valores de resistência mecânica, tanto à compressão como à flexão, não diferem significativamente entre si. Porém, para garantir as propriedades no estado fresco do BAC, é necessário a utilização de quantidades significativas de superplastificante, que provocam reduções significativas na quantidade de água na amassadura e, conseqüentemente, uma redução da relação w/c. Devido à microestrutura melhorada, especialmente pela menor porosidade e distribuição dos poros, o BAC apresenta uma resistência à compressão superior ao betão convencional. A maior presença de materiais finos na composição BAC, melhora igualmente o seu comportamento à flexão [9, 18]. Por outras palavras, para uma mesma classe de resistência, algumas das propriedades do BAC no seu estado endurecido difere das do betão convencional, possivelmente pela maior homogeneidade do BAC nas estruturas e pelo facto de este não depender da qualidade dos trabalhos de compactação do betão em obra.

No entanto, no que respeita à resistência mecânica, têm surgido indicações ligeiramente contraditórias, alguns dos autores apontam valores semelhantes, e outros identificaram ligeiras diferenças [9].

2.4.3.2. RETRAÇÃO E FLUÊNCIA

O estudo relacionado com a retração e fluência, são importantes para clarificar questões relacionadas com o comportamento reológico dos materiais, de modo obter a informação acerca do tempo de vida da estrutura. A retração e a fluência conduzem a variações das extensões do betão, que estão relacionados com a composição do betão, as dimensões da peça e a humidade ambiente. Podemos

afirmar, que a retração representa a parcela da deformação que é independente da carga, enquanto a fluência representa a parcela da deformação que é dependente da carga. Uma peça de betão quando sujeita a uma tensão constante com carácter de permanência, verifica-se que a sua deformação instantânea aumenta progressivamente com o tempo de aplicação, este fenómeno designa-se por fluência. A retração ou expansão, traduz-se nas variações das dimensões das peças de betão desde o final da betonagem até ao estado limite de equilíbrio, a temperatura constante e na ausência de qualquer tensão aplicada [3, 21].

A retração, é definida como a diminuição de dimensões provocada numa fase inicial pelas reacções químicas e numa fase posterior provocada pela secagem [3, 21]. Se o processo de cura não for o mais adequado, os fenómenos de retração e conseqüentemente fissuração tendem a ser mais significativos nas idades jovens do BAC do que no betão convencional, fenómeno que está relacionado com a elevada proporção de materiais finos utilizados no BAC [18].

O BAC é normalmente susceptível a ser mais deformável que o betão convencional de igual resistência, devido ao facto de possuírem um maior volume de pasta. Estas diferenças são geralmente pequenas e são consideradas nas tabelas e fórmulas fornecidas pelo Eurocódigo 2 [1, 9]. Testes realizados para avaliar as propriedades de retração e fluência de um BAC em relação a um betão convencional, exibiram: i) deformação causada pela retração pode ser superior; ii) deformação causada pela fluência pode ser menor; e iii) o valor da soma das deformações devido à retração e fluência são semelhantes [1, 8].

2.4.3.3. MÓDULO DE ELASTICIDADE

Em termos de módulo de elasticidade, o tipo e quantidade de agregado são um dos fatores que mais influenciam numa composição de betão. Para um betão que contenha agregados com resistências mais elevadas, tem tendência a aumentar o módulo de elasticidade. Por outro lado, tem tendência a diminuir com o aumento da quantidade de pasta, situação que se pode vir a verificar num BAC. É expectável que um BAC obtenha menores valores do módulo de elasticidade, devido à elevada proporção de materiais finos. O módulo de elasticidade é utilizado para o cálculo da deformação elástica [1, 9, 18].

2.4.3.4. DURABILIDADE

As propriedades no estado endurecido relativamente à durabilidade, são ainda um pouco incertas, pois as proporções utilizadas na amassadura, dos diversos componentes do BAC são diferentes [18]. A

durabilidade de uma estrutura de betão está inteiramente associada à permeabilidade da camada de superfície, que limita a penetração de substâncias prejudiciais (dióxido de carbono, cloreto, sulfato de água, oxigénio, álcalis, ácidos, entre outros). No entanto, uma perfeita durabilidade, depende da seleção do material, da composição de betão, da colocação, compactação, acabamento e cura do mesmo. Por outras palavras, a durabilidade está associada a todo o processo de fabricação do betão.

O processo de compactação é fundamental para expelir o ar e envolver completamente as armaduras, de modo a preencher todos os espaços dentro da cofragem, para que no final atinga os níveis de resistência e durabilidade requeridos. Uma compactação mal sucedida afeta de imediato a durabilidade do betão, pois fornece mais pontos fracos para eventuais penetrações de substâncias prejudiciais.

O BAC com as devidas propriedades, está livre de tais deficiências, resulta num material uniforme e com permeabilidade relativamente baixa, que oferece menos pontos fracos para a penetração de substâncias prejudiciais, e conseqüentemente, uma melhor durabilidade. A permeabilidade do BAC em relação ao betão vibrado correntemente incidirá na escolha dos materiais e da proporção de água e ligante [1].

2.4.4. ENSAIOS DE AVALIAÇÃO DO BETÃO NO ESTADO ENDURECIDO

Nesta dissertação, apenas foram realizados ensaios para a determinação da resistência à compressão, segundo a NP EN 12390-3 (2011) [22]. Os provetes realizados foram cubos com as dimensões especificadas na norma NP EN 12390-1 (2010) [23], onde a sua amostragem foi realizada segundo a norma NP EN 12350-1 (2009) [24], e a sua execução e cura de acordo com a NP EN 12390-2 (2009) [25]. Os provetes foram ensaiados até à rotura numa máquina de ensaio de compressão conforme a NP EN 12390-4 (2009) [26]. Após este ser ensaiado, regista-se a carga máxima suportada pelo provete e calcula-se a resistência à compressão do betão.

2.4. VANTAGENS E DESVANTAGENS

Algumas das vantagens do BAC:

- ✓ Aumento da produtividade, pela diminuição dos custos de mão-de-obra, e do período de construção, pois a eliminação por completo dos trabalhos de compactação na utilização do BAC, permite aumentar a velocidade e reduzir custos de construção e equipamentos associados à vibração, ou seja, permite melhorar a relação custo/eficiência [3, 9];

- ✓ Melhor ambiente de trabalho devido á eliminação da utilização de vibradores para a compactação do betão. A dispensa dos trabalhos de vibração traz a diminuição do ruído e problemas de saúde associados à sua utilização, vantagens não só para os operadores mas também às zonas circundantes à obra [3, 9];
- ✓ Maior flexibilidade na conceção de estruturas com maior complexidade e mais adequado para trabalhos de reabilitação [8];
- ✓ Melhor homogeneidade, devida às suas propriedades reológicas no seu estado fresco. Obtenção de uma adequada compactação, melhor qualidade de superfície ou reduzida permeabilidade, proporciona maior durabilidade nas estruturas [8, 9].

Como desvantagens, apresenta-se as seguintes:

- ✓ O BAC apresenta um custo superior comparativamente aos betões correntemente vibrados, resultante das elevadas percentagens de materiais finos, sobretudo o cimento onde o seu custo é superior aos restantes constituintes;
- ✓ A elevada percentagem de materiais finos utilizados no BAC, particularmente o cimento, torna suscetível a maior libertação de calor de hidratação, conduzindo a fenómenos de retração e fluência no seu estado endurecido [9];
- ✓ Necessita de um maior controlo dos materiais constituintes, pois o BAC no seu estado fresco e endurecido depende muito das dosagens e das características físicas e químicas dos materiais constituintes [8];
- ✓ Necessita de cofragens estanques para que não haja perdas de betão, pois o BAC é muito fluido e capaz de fluir em espaços muito estreitos ou até em pequenas aberturas [8].

2.5. DIMENSIONAMENTO DE UM BAC

Existem vários métodos para se atingir a autocompactabilidade, garantindo não só uma elevada deformabilidade da pasta ou agregado, como também elevada resistência à segregação. Para alcançar as propriedades de autocompactabilidade, como a capacidade de preenchimento, capacidade de passagem e resistência à segregação, é necessário: i) limitar o volume de agregado grosso, reduzindo assim as colisões entre as partículas e assegurando a capacidade de passagem; ii) aumentar o volume da pasta na composição; iii) baixar a relação w/p; iv) introduzir superplastificante. Garantindo assim simultaneamente a fluidez e resistência à segregação da composição.

A maioria das propostas de métodos de dimensionamento do BAC, baseiam-se no procedimento tentativa-erro, para a otimização das composições. Os métodos utilizados para o dimensionamento de

betões convencionais, não são aplicáveis para o dimensionamento do BAC. Foi necessário recorrer a uma nova metodologia para a formulação da composição BAC em termos volumétricos. O novo método utilizado nesta dissertação, consiste numa adaptação do método de *Bolomay* utilizado na formulação de betões convencionais.

Geralmente o volume da pasta deve rondar os 30 e 40% do volume de betão e um elevado conteúdo de finos com 380 - 600 kg/m³, ou seja, elevadas proporções em relação a um betão convencional. A quantidade de água geralmente utilizada numa composição BAC, incide entre 150 - 210 kg/m³. Na Tabela 2-1, são apresentados valores recomendados dos materiais constituintes de alguns métodos.

Tabela 2-1 – Valores recomendados pela JCSE, BIBM *et al.* RILEM.

| Métodos Materiais constituintes | JCSE | | BIBM <i>et al.</i> | | RILEM | |
|-------------------------------------|---|-------------------------------|---|-------------------------------|---|-------------------------------|
| | Volume (m ³ /m ³) | Massa (Kg/m ³) | Volume (m ³ /m ³) | Massa (Kg/m ³) | Volume (m ³ /m ³) | Massa (Kg/m ³) |
| Cimento (c) | | | | | | 350-450 |
| Total de finos (p) | 0,16-0,19 | | | 380-600 | | 450-600 |
| Água (w) | | 155-175 | 0,15-0,21 | 150-210 | | 150-200 |
| Água/finos (w/p) | 0,85-1,15 | | 0,85-1,10 | | 0,80-1,20 | |
| Pasta | | | 0,30-0,38 | | 0,34-0,40 | |
| Agregado fino (s) | | | | | | 710-900 |
| Agregado fino/argamassa (s/m) | | | | | 0,40-0,50 | |
| Agregado grosso (g) | 0,30-0,32 | | 0,27-0,36 | 750-1000 | 0,30-0,34 | 750-920 |
| Agregado fino/agregado grosso (s/g) | | | 0,48-0,55 | | | |

3

MATERIAIS CONSTITUINTES E SEUS EFEITOS NAS PROPRIEDADES DO BETÃO

3.1. INTRODUÇÃO

Os materiais utilizados na produção de BAC são exatamente os mesmos de um betão convencional, nomeadamente cimento, água, agregados, adjuvantes e adições, caracterizados na norma NP EN 206-1 [2]. O que difere na composição do BAC em relação ao betão convencional é a presença de elevada viscosidade, de modo a garantir a elevada viscosidade utiliza-se um elevado conteúdo de materiais finos e só em casos excecionais se utilizam agentes de viscosidade. O maior consumo de materiais finos no BAC é acompanhado pela redução do conteúdo dos agregados, especialmente o agregado grosso. Devido à elevada superfície específica dos materiais finos, promove uma grande absorção de água, conferindo ao BAC no seu estado fresco uma elevada estabilidade [3]. De uma forma geral, a Figura 3-1 apresenta uma comparação de proporções dos vários materiais empregues geralmente em composições BAC relativamente ao de um betão vibrado convencionalmente.

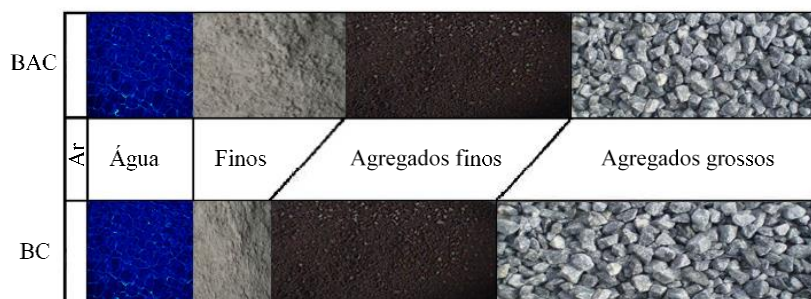


Figura 3-1 – Porções volumétricas dos materiais constituintes de um BAC e de um betão convencional.

Como podemos verificar na Figura 3-1, o volume de vazios (V_v), o volume de água (V_w) e o volume de areias ou agregado fino (V_s) são relativamente semelhantes. O BAC apresenta uma dosagem de finos (p) superior, composto por cimento (c) e adições (nomeadamente, cinzas volantes e sílica de fumo) e conseqüentemente um menor volume de agregados grossos. Relativamente à diminuição de agregado grosso, consiste na obtenção de uma maior fluidez e uma maior viscosidade com o aumento dos materiais finos.

Os principais constituintes do BAC, nomeadamente o cimento, as cinzas volantes e os agregados foram objeto de estudo nesta dissertação. Realizaram-se os vários ensaios e criaram-se fichas de ensaio, de forma obter algum conhecimento efetivo dos vários constituintes e de valores característicos.

3.2. MATERIAIS FINOS

Os materiais finos incluem todas as partículas sólidas do betão com dimensões inferiores a 125 μm , os quais podem ser constituídos por cimento e adições [3, 9]. Para além destas ainda podem ser contabilizados como materiais finos as partículas finas (pó) que são transportadas pelos agregados, em especial dos agregados finos, este pode ser designado como pó de pedra (“Stone powder”) [9].

A seleção dos materiais finos são de extrema importância para o BAC, pois as propriedades dos materiais afetam não só o grau de autocompactabilidade do betão como também a qualidade do betão no estado endurecido [3].

Atendendo ao facto de uma composição de BAC requerer grande quantidade de finos, uma combinação de cimento e adições torna-se vantajosa quer ao nível técnico, quer ao nível económico, dado que o cimento constitui uma parcela importante no custo da composição final [3].

3.2.1. CIMENTO

Todos os cimentos que estejam em conformidade com a NP EN 197-1 (2005) [27], podem ser utilizados na produção do BAC. O tipo, características e a quantidade de cimento influenciam as propriedades do BAC, no seu estado fresco e endurecido. No entanto não existe, qualquer restrição quanto ao tipo de cimento a utilizar numa composição BAC.

Na elaboração do trabalho experimental foi utilizado o cimento Portland CEM II/A-L 42,5R [28] certificado pela NP EN 197-1 [27], proveniente da fábrica Secil-Outão. Este cimento é constituído por 80-94% de clínquer Portland, 6-20% de calcário e 0-5% de outros constituintes minoritários. Segundo o fornecedor [28], este tipo de cimento é utilizado para betão pronto ou fabricado em obra de média a elevada resistência, com a particularidade de conjugar uma boa trabalhabilidade e um desenvolvimento rápido de elevadas resistências. É um cimento de cor cinzenta, com baixo calor de hidratação e com uma melhor trabalhabilidade que um cimento CEM I com a mesma classe de resistência [8].

Para além deste, ainda foram realizados alguns trabalhos experimentais, mas em menor quantidade, com cimento Portland CEM II/B-L 32,5N [29]. Este é composto por 65-79% de clínquer Portland, 21-35% de calcário e 0-5% por outros constituintes minoritários.

Na tabela 3-1, são apresentados valores das propriedades físicas, mecânicas e químicas de ambos os cimentos Portland utilizados, obtidos através de ensaios normalizados realizados no Laboratório Cimentos Madeira.

Tabela 3-1 – Características químicas, físicas e mecânicas dos cimentos utilizados.

| Características | | CEM II/A-L 42,5R | CEM II/B-L 32,5N | Método de ensaio |
|-----------------|--------------------------------------|-------------------------|-------------------------|------------------|
| Químicas | Perda ao fogo | 7,74% | 13,32% | NP EN 196-2 [30] |
| | Cal livre | 1.06% | 0.88% | NP EN 451-1 [31] |
| Físicas | Massa Volúmica | 3100 Kg/m ³ | 3000 Kg/m ³ | LNEC E-64 [32] |
| | Tempo de início/fim de presa | 110 – 176 min | 115 – 179 min | NP EN 196-3 [33] |
| | Água da Pasta | 28,2% | 25,8% | |
| | Superfície específica | 4780 cm ² /g | 5330 cm ² /g | NP EN 196-6 [34] |
| Mecânicas | Resistência à compressão aos 2 dias | 29,2 MPa | 19,0 MPa | NP EN 196-1 [35] |
| | Resistência à compressão aos 7 dias | 43,6 MPa | 30,5 MPa | |
| | Resistência à compressão aos 28 dias | 55,3 MPa | 40,0 MPa | |

3.2.2. ADIÇÕES

Uma adição é um material inorgânico, de pequena dimensão, que pode ser adicionado ao betão (na amassadura) com a finalidade de melhorar as propriedades ou obter propriedades especiais.

Atendendo ao facto do BAC necessitar de uma grande dosagem de materiais finos (380 a 600 kg/m³), as adições são extremamente vantajosas, pois permitem melhorar certas propriedades reológicas do betão como também traduz benefícios ao nível das propriedades do betão endurecido (melhores propriedades mecânicas). Outras vantagens são a nível económico, pois a substituição do cimento por adição reduz o custo do betão, como também ambiental, pela redução de clínquer, há uma menor emissão de CO₂ na atmosfera [3].

A substituição parcial do cimento por adições representa, portanto, um excelente compromisso em termos do comportamento reológico dos BAC, melhora a resistência à ocorrência de segregação, resistência mecânica e trabalhabilidade inclusivamente.

No BAC são utilizados vários tipos de adições, segundo a norma EN NP 206-1 (2007) [2]. Existem dois tipos de adições: i) adições do tipo I - adições quase inertes; e ii) adições do tipo II - adições pozolânicas ou hidráulicas latentes. No BAC as principais adições utilizadas são o fíler calcário, as cinzas volantes e a sílica de fumo.

3.2.2.1. ADIÇÕES DO TIPO I

As adições do tipo I, são materiais quimicamente quase inertes, que na forma de pó são atacados pela cal e álcalis libertados durante a hidratação do cimento Portland, onde conduz a benefícios de resistência mecânica, permeabilidade e resistência química [9]. Para além destas, as adições também regulam o conteúdo de cimento, reduzindo o calor de hidratação e retração, e são habitualmente utilizadas para melhorar e manter a coesão entre as partículas e obter a resistência à segregação necessária [36].

i) Fíler Calcário

O fíler calcário é um material finamente moído, muito semelhante à finura do cimento, proveniente da rocha calcária. Consiste em calcário pulverizado cujo principal componente é a calcite (CaCO₃), apresenta uma superfície específica *Blaine* de 2500 a 2800 cm²/g [3, 11].

Este material tem sido tradicionalmente utilizado para aumentar a viscosidade da pasta, através da substituição parcial do cimento com a finalidade de aumentar a quantidade de finos, uma vez que apresenta benefícios no controlo da segregação e da deformabilidade do betão fresco [9, 11].

3.2.2.2. ADIÇÕES DO TIPO II

As adições do tipo II ou adições pozolânicas ou potencialmente hidráulicas são materiais siliciosos ou siliciosos e aluminosos, que possuem um baixo ou nulo poder cimentício, mas na presença de humidade, reagem quimicamente com o hidróxido de cálcio em temperaturas normais, formando propriedades cimentícias semelhantes aos originados na hidratação dos constituintes do clínquer Portland.

A introdução de adições, em dosagens variáveis entre os 60 a 200 kg/m³, contribuem para a diminuição da dosagem de cimento e com a sua capacidade de absorção de água, reduzem a água em excesso libertada [12], fornecendo propriedades especiais ao betão fresco e endurecido. Nas composições ensaiadas foram utilizadas adições de cinzas volantes.

i) Cinzas volantes

As cinzas volantes (fa) são um subproduto industrial, resultante da combustão do carvão pulverizado ou moído, em fornos de centrais termoelétricas com temperaturas no interior normalmente entre 1500 a 2000 °C. O carvão é um pó geralmente muito fino e com uma combustão muito rápida. No processo de queima do carvão, para a produção de energia elétrica, são libertadas cinzas em conjunto com os gases da combustão sobre a forma de partículas residuais em suspensão no ar, daí o nome de cinzas volantes. As cinzas são obtidas por precipitação eletrostática ou mecânica das poeiras arrastadas dos gases de combustão da queima das caldeiras alimentadas a carvão pulverizado. A qualidade das cinzas volantes depende do tipo de carvão, da caldeira utilizada e dos diferentes procedimentos empregues na combustão e até ao modo como estas são recolhidas e armazenadas, pois a qualidade das cinzas volantes podem afetar de forma significativa as propriedades do BAC [3, 9, 12, 37].

Segundo a norma NP EN 450-1 (2008) [37], as cinzas volantes são definidas como um pó fino constituído principalmente por partículas esféricas e vítreas oriundas da queima do carvão pulverizado, composto por propriedades pozolânicas e constituídas essencialmente, por SiO₂ e AlO₃ [3, 11].

As cinzas volantes utilizadas nas composições ensaiadas nesta dissertação, são provenientes do Centro de Produção de Sines e a sua introdução foi efetuada através da substituição parcial do cimento.

A Tabela 3-2, apresenta as principais características das cinzas volantes para betão segundo o certificado de conformidade do centro de produção e os valores obtidos no laboratório, LCM.

Tabela 3-2 – Principais características das cinzas volantes para betão.

| Cinzas volantes NP EN 450-1 (2008) [37] | | | |
|--|--|--|--------------------------------------|
| Características | Valores declarados CE | Valores obtidos em laboratório, LCM | Métodos de ensaio |
| Densidade das partículas | 2300 kg/m ³ | 2300/2270 kg/m ³ | LNEC E 64 [32] NP EN 1097-7 [38] |
| Finura | Categoria N, com valor declarado de finura 16% | 3520 cm ² /g - 16% | NP EN 196-6 [34] NP EN 451-2 [39] |
| Perda ao Fogo | Categoria B | 4.79% - Categoria B | NP EN 196-2 [30] |

Para a caracterização das cinzas volantes insere-se de acordo com a norma NP EN 450-1 (2008) [37], realizando-se assim em laboratório os ensaios adstritos para obter algum conhecimento efetivo. Para determinação da densidade das partículas foi realizado através do método de voluminómetro Densímetro de Le Chatelier, de acordo com a especificação LENC-64 [32] e pelo método de picnómetro, de acordo com a NP EN 1097-7 (2008) [38]. Na avaliação da finura, devido à ausência de equipamento necessário atribuído pela norma, este foi realizado entre um método comparativo do resíduo no peneiro 45 µm com o método de permeabilidade do ar do ensaio *Blaine*, aplicado num estudo da finura das cinzas volantes [40]. A perda ao fogo foi realizada na íntegra da norma referida. Em análise os valores obtidos em laboratório aproximam-se aos valores declarados.

Alguns estudos sobre cinzas volantes concluem que estas atuam de forma semelhante aos agentes de viscosidade, isto é, permitem aumentar a viscosidade do betão fresco de modo a obter melhor resistência à segregação, sem que haja diminuição da fluidez. A sua utilização também conduz a vantagens ao nível da durabilidade, retenção da trabalhabilidade, retração de secagem e propriedades mecânicas [9]. O facto de as partículas serem com superfície pouco rugosa e de pequenas dimensões, ligeiramente mais pequenas que o cimento, mas bastante mais finas que os restantes constituintes do betão, promove uma mistura com maior compacidade [3, 9]. Uma vez que as cinzas com uma boa qualidade apresentam uma forma aproximadamente esférica, influenciam as propriedades reológicas do betão, conferindo maior deformabilidade ao betão, pelo efeito de rolamento entre as partículas (consequência da sua forma esférica) ou mesmo a

diminuição da água necessária para atingir uma determinada trabalhabilidade, resultando em baixas relações w/p ou a/c. Por esta razão a introdução de cinzas volantes é frequentemente utilizada em composições BAC [9, 11, 12].

ii) Sílica de Fumo

A sílica de fumo é um subproduto industrial recolhido em filtros, através do processo de fusão que permite produzir metal silício e ligas de ferro-silício [41].

Segundo a NP EN 13263-1 (2007) [41], a sílica de fumo é composta essencialmente por partículas esféricas de dióxido de silício amorfo e é altamente pozzolânica. A superfície específica é de 15000 a 2500 m²/kg e o diâmetro das partículas varia entre 0,01 a 0,5 µm, com valor medio de 0,1 µm, cerca de 100 vezes inferior ao cimento [3, 9].

A introdução da sílica de fumo numa composição BAC, promove melhorias nas propriedades do betão no estado fresco, nomeadamente, uma grande redução da exsudação, devido à dimensão reduzida das partículas e aumento da coesão, perfazendo misturas mais estáveis. No entanto uma composição que inclui sílica de fumo, é potencialmente menos deformável do que uma composição idêntica (relação w/p constante) sem sílica de fumo. Para a obtenção de uma determinada viscosidade, aquando uso de sílica de fumo é necessário a redução significativa da relação w/p, no entanto com esta redução a deformabilidade da mistura diminui, para uma dosagem de superplastificante constante. Para além deste, a adsorção do superplastificante é bastante intensa devido à sua elevada finura e reatividade inicial [3].

Contudo, com a introdução de sílica de fumo na mistura a necessidade de superplastificante cresce significativamente, pois para garantir uma elevada deformabilidade e viscosidade adequada é necessário grandes dosagens de superplastificante. Segundo Nepomuceno (2005), a utilização da sílica de fumo em substituição parcial do cimento, por vezes a dosagem de superplastificante triplica, em relação a uma mistura sem sílica de fumo [9].

Em termos do betão no estado endurecido, a sua utilização da sílica de fumo, promove inúmeras vantagens, tais como o aumento da resistência à compressão e proporciona maior durabilidade às estruturas, pois a maior densidade da pasta reduz a permeabilidade [9].

Devido à elevada superfície específica, a introdução das adições aumentam a tixotropia e a capacidade de reter água na mistura. Permitem ainda reduzir a dosagem de cimento na pasta, evitando problemas relacionados com o excesso de calor de hidratação e retração [3].

A resistência à compressão e trabalhabilidade do BAC aumenta com percentagem de substituição do cimento por sílica de fumo, no entanto o uso desta adição leva a grandes dosagens de superplastificante. Ao contrário, o aumento da percentagem de substituição do cimento por cinzas volantes não contribui para o aumento da resistência, mas o seu efeito em termos de trabalhabilidade, sem acréscimo de superplastificante, é muito grande. Ou seja, as cinzas volantes não necessitam de grandes dosagens de superplastificante como a sílica de fumo, para atingirem a mesma trabalhabilidade.

3.3. ÁGUA

A utilização da água no betão tem como função de hidratação e permite alterar a reologia do betão, ou seja, permite alterar a deformabilidade e a viscosidade do betão fresco. O aumento da quantidade de água traduz uma maior deformabilidade e numa diminuição da viscosidade da mistura, aumentando o risco ocorrência de segregação. Para além disso, elevadas quantidades de água podem comprometer a resistência e a durabilidade do betão [3, 9].

Na realização dos vários ensaios a água foi utilizada segundo a NP EN 1008 (2003) [42], nomeadamente as pasta e argamassas foi utilizada água destilada e nas composições BAC foi utilizada água da rede de abastecimento.

3.4. ADJUVANTES

Segundo a EN NP 206-1 (2007) [2], o adjuvante é um material adicionado, durante o processo de mistura do betão, em quantidades pequenas relativamente à massa ligante, de modo a alterar as propriedades do betão fresco e endurecido [3].

A introdução de adjuvantes no BAC permite obter resultados benéficos, em termos de autocompactabilidade. A sua utilização combinada com uma elevada quantidade de materiais finos (cimento e adições), permite uma grande resistência à segregação. Existem vários tipos de adjuvantes, neste trabalho foram utilizados como adjuvantes, o plastificante, o superplastificante e modeladores de viscosidade [3, 9, 18].

Os adjuvantes representam materiais de extrema importância numa composição BAC, nomeadamente o superplastificante, torna-se indispensável para garantir as principais características do betão fresco.

O ótimo desempenho pode ser promovido através da introdução de um adjuvante, no entanto, este pode ser influenciado pelas propriedades químicas e físicas do cimento e adições utilizadas [1].

3.4.1. PLASTIFICANTE

O plastificante utilizado foi o Pozzolith 390N, da marca BASF, no estado líquido, na conformidade da norma NP EN 934-2 (2009) [43]. Trata-se de um adjuvante polifuncional que permite obter betões com diferentes características, alterando apenas a sua dosagem. É recomendado para todo o tipo de centrais de betão pronto, permite melhorar as propriedades mecânicas e reológicas, tornando-as mais uniformes e duráveis, e ainda permite uma boa manutenção da trabalhabilidade, sendo ideal para betões transportados a longas distâncias. De acordo com o fabricante, o plastificante possui uma densidade das partículas de $1180 \pm 10 \text{ kg/m}^3$. A sua dosagem recomendada são de 0,5 a 1,0 Kg por 100 Kg de cimento (ligante) [44].

3.4.2. SUPERPLASTIFICANTE

Se, por um lado, a água em abundância melhora as propriedades reológicas do betão no estado fresco, aumentando a sua trabalhabilidade e possibilitando que todas as partículas de cimentos sejam hidratadas. Porém, as partículas não consumidas na reação de hidratação significam espaços não preenchidos por materiais resistentes ou até pontos frágeis. Como é evidente, a existência destes pontos frágeis conduzem à diminuição da compacidade do betão, os quais danificam a continuidade das ligações o que resulta numa menor capacidade resistente do conjunto. De modo a contornar esta situação, surgiram os novos adjuvantes, sobretudo superplastificantes [12].

O superplastificante é um componente essencial do BAC e imprescindível na sua composição. A sua introdução na composição permite modificar consideravelmente a reologia do betão, pois reduz a quantidade de água necessária e mantém uma elevada fluidez, por outro lado, a fluidificação é tal que o betão reduz o atrito interno, tornando-se praticamente autonivelante e portanto capaz de fluir e envolver as armaduras apenas sob o seu peso próprio. Para além destas vantagens, também a redução da água aumenta a compacidade da mistura e conseqüentemente uma melhor resistência, reduz a retração plástica, absorção capilar e a permeabilidade, entre outros.

A principal função do superplastificante numa amassadura é provocar a dispersão das partículas finas dos materiais constituintes, nomeadamente o cimento e adições. A baixa relação w/p e a introdução de superplastificante permitem reduzir a quantidade de água livre, promovendo uma viscosidade com a

capacidade de garantir a uniforme suspensão das partículas sólidas, evitando assim a colisão entre as partículas dos agregados [18].

O superplastificante utilizado nas composições de BAC, foi o Glenium Sky 548, da marca BASF no estado líquido, na conformidade da norma NP EN 934-2 (2009) [43]. Este é composto à base de polímeros de éter policarboxílico (PCE). De acordo com o fabricante o superplastificante Sky 548 apresenta uma massa volúmica de $1038 \pm 20 \text{ kg/m}^3$ [45].

Como era desconhecido o teor de sólidos do superplastificante utilizado, e como este apresentava-se no estado líquido, considerou-se que o teor de sólidos do superplastificante era de 0%, ou seja, considerado como fosse totalmente constituído por líquido. Então a sua introdução efetuou-se através da substituição de igual volume de água, mantendo constante o volume total de líquidos. A introdução do plastificante efetuou-se de igual modo ao do superplastificante.

Na realização de vários ensaios, constatou-se que apenas com a introdução de superplastificante na mistura não promovia as características principais no estado fresco, então achou-se por bem introduzir o plastificante, uma vez que só o superplastificante utilizado não estava a resultar adequadamente. Com a introdução do plastificante e superplastificante em simultâneo obtiveram-se os requisitos necessários.

3.4.3. MODELADOR DE VISCOSIDADE

O modelador de viscosidade utilizado nas composições BAC, foi o RheoMATRIX 175, da marca BASF, no estado líquido, na conformidade da norma NP EN 934-2 (2009) [43]. Trata-se de um adjuvante modelador de viscosidade de nova geração para BAC de elevada robustez. São especialmente indicadas para BAC, produzidos com agregados de granulometrias variadas, melhorando a coesão, compacidade e estabilidade da mistura. Este modelador de viscosidade permite um maior nível de tolerância às variações de água, menor risco de segregação, mantendo a estabilidade da mistura em todas as fases do betão e ainda permite produzir BAC com baixos conteúdos de cimento. De acordo com o fabricante o RheoMATRIX 175 possui uma densidade das partículas de $1000 \pm 10 \text{ Kg/m}^3$. A sua dosagem recomendada é de 0,5 a 0,8 sobre o peso do cimento. A sua introdução efetuou-se de igual forma aos restantes adjuvantes [46].

3.5. AGREGADOS

Os agregados usualmente empregues na fabricação do betão convencional servem para a produção do BAC [5]. É preferível que os agregados utilizados na composição sejam limpos e de granulometria contínua, pois uma distribuição granulométrica dos agregados pouco contínua promove um maior consumo de cimento, menor fluidez na mistura e aumento dos vazios entre os agregados, o que afeta nas suas características mecânicas e na durabilidade. Para além disso, as características dos próprios agregados influenciam as propriedades do betão no estado fresco, tais como a sua forma, textura, o teor de humidade, absorção e classificação. As variações no teor de finos de todos os agregados devem ser monitorizadas continuamente, de modo a produzir uma constante qualidade de betão autocompactável, ou sem grandes variações na sua qualidade [3, 18].

Os agregados que apresentam uma elevada superfície específica e textura áspera, necessitam de maiores quantidades de pasta e água para garantir elevada fluidez, no entanto, os agregados rolados potenciam melhor fluidez e promovem uma redução de vazios [3].

O volume total de agregado na composição e a proporção entre o agregado fino e grosso, são aspetos que podem ter grande influência na reologia do betão. Quando o volume de agregado grosso é elevado, a probabilidade de ocorrência de bloqueio é maior, pois o contacto direto entre as partículas aumenta drasticamente [11]. Para uma adequada autocompactabilidade da composição, é necessário reduzir a quantidade de agregados grosso em função do aumento do teor de partículas finas [47].

3.5.1. DESCRIÇÃO PETROGRÁFICA E PROCESSO DE OBTENÇÃO DOS AGREGADOS

Os agregados utilizados nas composições ensaiadas, são agregados vulcânicos, provenientes da pedra da empresa Brimade (Sociedade de Britas da Madeira, Lda) situada na Fundoa, S. António na RAM.

Nos termos da NP EN 932-3 [48], a descrição petrográfica dos agregados utilizados é o Basalto do Quaternário. São partículas de forma subprismática a subdiscoidal e com angulosidade designada muito angulosa a subangulosa. Após a sua observação, é possível verificar que a sua superfície apresenta uma textura rugosa, e algumas das partículas apresentam uma película avermelhada de óxidos e hidróxidos de ferro e magnésio provenientes dos constituintes minoritários do tufo de Lapili.

A Figura 3-2 mostra os locais do processo de produção, desde extração até o armazenamento dos agregados utilizados.



Figura 3-2 – a) Rocha basáltica; b) Armazenamento das rochas; c) Esmagamento das rochas; d) Vista geral do processo de britagem, Fundoa.

3.5.2. AGREGADOS FINOS

Todos os tipos de agregado fino, nomeadamente areias naturais e britadas podem ser utilizadas na composição BAC. A distribuição granulométrica e a sua forma, assim como a sua proporção na composição afeta o comportamento do betão no estado fresco. Ou seja, quanto maior for o seu conteúdo e mais angulosas forem as partículas, maior a resistência ao corte e menor a deformabilidade [47]. As partículas inferiores a 125 μm contidas nos agregados finos, que são consideradas como pó (Stone powder), são partículas muito importantes para BAC no estado fresco. Estas partículas, considerados materiais finos influenciam a constituição da pasta, pois estas envolvem as partículas de maior dimensão e mantem-nas afastadas de maneira a evitar a segregação ou floculação das mesmas. Por outras palavras, as partículas de menores dimensões preenchem os espaços deixados pelos agregados de maiores dimensões, proporcionando uma maior resistência à segregação, maior compacidade e uma maior fluidez [17].

O volume do agregado fino numa composição BAC, não deve ser demasiado elevado nem demasiado baixo. Deve existir um volume total ótimo de agregado fino por unidade de volume de argamassa (V_s/V_m), normalmente deve incidir no intervalo de 0,4 a 0,5 ou 710 a 900 Kg/m³. Se V_s/V_m for demasiado elevado, a fluidez do betão diminui devido a quantidade da pasta ser insuficiente entre as partículas de agregados e se o V_s/V_m for muito baixo, o esqueleto granular pode ser insuficiente para a quantidade de pasta, promovendo segregação ou exsudação [3].

Foram utilizados dois tipos de agregados finos nas composições de argamassa e betões em conformidade com a norma NP EN 12620 (2010) [49]. A areia fina é designada por Areia 0/2 (s_1), proveniente do mar e a areia britada por Areia 0/4 (s_2), com granulometria mais grossa. Nomeadamente, a utilização da areia mar (Areia 0/2), consiste por estas possuírem uma forma mais arredondada, que são benéficas na produção do BAC. A areia britada, são menos indicadas, mas não contraindicadas, apenas apresentarem uma superfície específica superior, provocando maior consumo de água e de adjuvante de modo a garantir a fluidez necessária. Na Tabela 3-3, são apresentadas as características dos agregados finos utilizados, os valores apresentados na tabela foram adquiridos em laboratório através dos ensaios normalizados.

Tabela 3-3 – Principais características dos agregados finos.

| Designação | Areia 0/2 | Areia Britada 0/4 | Métodos de ensaio |
|---|-----------|-------------------|-------------------|
| Dimensão nominal d/D (mm) | 0/2 | 0/4 | NP EN 933-1 [50] |
| Massa volúmica (kg/m³) | 2820 | 2940 | NP EN 1097-6 [51] |
| Absorção de água (%) | 2,6±1 | 2,4±1 | |
| Baridade não compactada (kg/m³) | 1520 | 1590 | NP EN 1097-3 [52] |
| Teor em cloretos (%) | ≤ 0,01 | ≤ 0,01 | NP EN 1744-1 [53] |
| % de partículas com de < 0,125 mm | 15,4 | 11,2 | NP EN 933-1 [50] |
| Módulo de finura | 1,30 | 3,53 | - |

3.5.3. AGREGADOS GROSSOS

As propriedades de autocompactabilidade do betão são interferidas pelas características dos agregados grossos, sobretudo a sua forma, a natureza, a quantidade e a máxima dimensão do agregado. A distância mínima entre os obstáculos por onde um BAC pode fluir, é um fator fundamental para

determinar a dimensão máxima dos agregados a ser utilizados na composição. Para isso o ensaio da caixa L é um excelente indicativo da capacidade de passagem de uma composição BAC, evitando assim o bloqueio dos agregados em zonas confinadas [1, 3]. Para o BAC a máxima dimensão do agregado grosso não deve ultrapassar os 20 mm, sendo normalmente limitada a 16-20 mm [3, 8]. Uma elevada dimensão e quantidade de agregado grosso, conduz a um fluxo menos uniforme e a uma menor capacidade do betão fluir através de obstáculos [3]. Por outras palavras, com aumento da quantidade do agregado e da sua dimensão máxima, obriga a possuir maior viscosidade de modo a evitar o fenómeno de segregação, gerando maior ocorrência de bloqueio em zonas congestionadas [1].

Os agregados britados oferecem normalmente melhores propriedades mecânicas, no entanto, pioram a trabalhabilidade do betão no estado fresco. Quanto mais esféricas forem as partículas dos agregados, menor tendência a ocorrer bloqueio dos agregados e maior será o seu espalhamento [1, 3, 18].

Os agregados grossos utilizados, foram a Brita 4/10 (b_0), Brita 8/16 (b_1) e a Brita 11/22 (b_2), com dimensão máxima de 22 mm em conformidade com NP EN 12620 (2010) [49]. Na Tabela 3-4 são apresentadas as características dos agregados grossos. Os valores apresentados na tabela foram adquiridos em laboratório através dos ensaios normalizados.

Tabela 3-4 – Principais características dos agregados grossos.

| Designação | Brita 4/10 | Brita 8/16 | Brita 11/22 | Métodos de ensaio |
|---|----------------------|----------------------|----------------------|------------------------------------|
| Dimensão nominal d/D (mm) | 4/10 | 8/16 | 11/22 | NP EN 933-1[50] |
| Massa volúmica (kg/m³) | 2840 | 2940 | 2941 | NP EN 1097-6 [51] |
| Absorção de água (%) | 2,1±1 | 1,1±1 | 1,1±1 | |
| Índice de achatamento | FI ₃₅ | FI ₃₅ | FI ₃₅ | NP EN 933-3 [54] |
| Baridade não compactada (kg/m³) | 1520 | 1420 | 1430 | NP EN 1097-3 [52] |
| Teor em cloretos (%) | ≤ 0,01 | ≤ 0,01 | ≤ 0,01 | NP EN 1744-1 [53] |
| Reatividade álcalis-sílica | Classe 1-Não reativa | Classe 1-Não reativa | Classe 1-Não reativa | ASTM C1260-05 ^a [55] |
| Resistência ao desgaste: (Micro Deval) | M _{DE25} | M _{DE25} | LA ₂₅ | NP EN 1097-1 [56] |
| Resistência à fragmentação: Los Angeles | LA ₂₅ | LA ₂₅ | LA ₂₅ | NP EN 1097-2 [57] |

Na Figura 3-3 apresentam-se as curvas granulométricas dos agregados grossos utilizados no desenvolvimento deste trabalho.

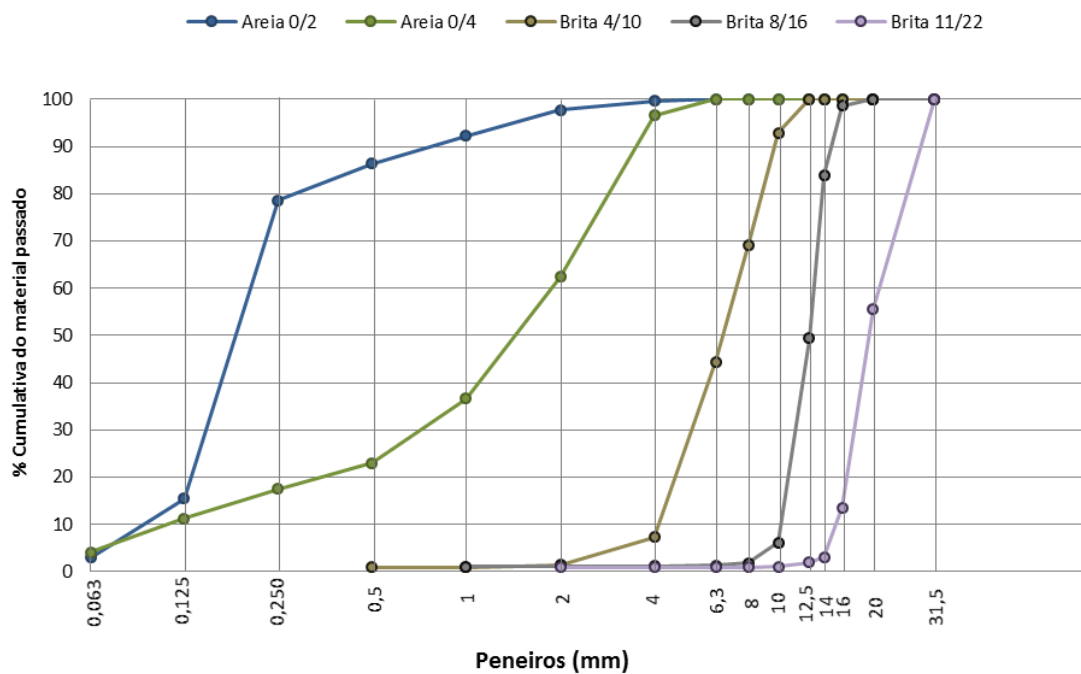


Figura 3-3 – Curva granulométrica de todos os agregados utilizados.

4

PROGRAMA EXPERIMENTAL

4.1. INTRODUÇÃO

Antes de iniciar qualquer tipo de avaliação das propriedades do BAC, no estado fresco e endurecido, foi necessário recorrer a uma formulação da composição. A composição BAC deve satisfazer um conjunto de requisitos, nomeadamente, autocompactabilidade, resistência e durabilidade. A autocompactabilidade resulta basicamente em virtude das exigências funcionais impostas ao comportamento do betão no estado fresco, como a obtenção da capacidade preenchimento, capacidade de passagem e resistência à segregação. É evidente que a principal preocupação na formulação de composições de BAC, é produzir um betão com adequada autocompactabilidade no estado fresco, posteriormente uma menor atenção, mas não menos importante, a verificação das suas propriedades no estado endurecido [3, 9].

A metodologia adotada traduziu-se na definição de um programa experimental, com objetivo principal de obter uma composição otimizada. Os ensaios foram realizados à medida da interpretação de cada resultado obtido, devendo prosseguir somente quando fossem obtidas conclusões fundamentadas que suportam a fase seguinte. No programa experimental será feita uma alusão a metodologia adotada, com vista à concretização dos objetivos propostos e ainda serão descritos os procedimentos adotados na realização de todos os ensaios. Os procedimentos dos ensaios adotados neste trabalho foram definidos sempre recorrendo a documentos normativos nacionais.

O desenvolvimento do programa experimental traduziu-se numa sequência de etapas:

- ✓ Seleção e caracterização dos materiais utilizados;
- ✓ Definição das curvas granulométricas dos agregados;

- ✓ Estudos em pastas;
- ✓ Estudos em argamassas;
- ✓ Estudos em betões.

Nota: Os estudos e resultados dos materiais constituintes foram referidos no capítulo anterior.

4.2. FORMULAÇÃO DE COMPOSIÇÕES

O dimensionamento do BAC baseou-se no procedimento de tentativa-erro, mas de uma forma guiada, permitindo na generalidade dos casos chegar rapidamente a uma composição de BAC que cumpra os requisitos do estado fresco e endurecido. Como já foi supracitado, os métodos de dimensionamento de betões convencionais, não são aplicáveis para o dimensionamento do BAC, assim foi necessário adaptar uma nova metodologia. Entre as diferentes metodologias divulgadas, procurou-se um método que permitisse realizar o estudo da composição de uma forma mais científica, recorrendo a ensaios com equipamentos já existentes ou de execução simples. Para a formulação das composições estudadas nesta dissertação foi realizada uma adaptação do método de *Bolomay* utilizado na formulação de betões convencionais, através de razões volumétricas entre os materiais constituintes que mais influência têm na composição BAC. As dosagens dos materiais constituintes foram baseados no método de Okamura [13], como também os ensaios propostos para pastas, argamassas e betões.

A formulação habitualmente é feita para um volume genérico de 1 m³, sendo posteriormente alterado para o volume necessário para a amassadura. Para a realização de qualquer amassadura, foi necessário através dos volumes obtidos para a composição determinar a massa de cada constituinte, pois é mais simples e prático pesar os materiais em balanças do que utilizar equipamentos que medem volumes. Para isso, basta apenas multiplicar o volume obtido de cada constituinte pela sua respetiva massa específica/volúmica.

$$Massa (kg) = Volume (m^3) \times Massa Volúmica (kg/m^3)$$

4.3. PASTAS

Na formulação das pastas foram utilizados inicialmente os constituintes essenciais, água (w) e os finos (p). Foram realizados ensaios de escoamento no cone Marsh (t_{esc}) e de espalhamento de pastas, para determinar os valores de β_p (razão da água retida pelos finos) e E_p (fator de deformação), que ajudam a selecionar o tipo de adição ou percentagem de substituição parcial do cimento pela adição.

Para a realização dos ensaios foi utilizado um volume de amassadura de 1,5 litros, de modo a realizar os dois ensaios com a mesma amassadura. As principais variações realizadas nas pastas foram a relação volumétrica entre água e finos (V_w/V_p) e a relação volumétrica entre cinzas volantes e o volume total de finos (V_{fa}/V_p), com relações de V_w/V_p entre 1 a 1,7 e de V_{fa}/V_p entre 0% a 60%.

$$V_p + V_w = 1,0 \text{ m}^3 \quad \text{ou} \quad \left(\frac{m_c}{\rho_c} + \frac{m_{fa}}{\rho_{fa}} \right) + \frac{m_w}{\rho_w} = 1,0 \text{ m}^3$$

$$V_p + \frac{V_w}{V_p} \times V_p = 1,0 \quad \rightarrow \quad V_p = \frac{1}{1 + \frac{V_w}{V_p}}$$

$$V_w = \frac{V_w}{V_p} \times V_p$$

$$V_{fa} = \frac{V_{fa}}{V_p} \times V_p$$

$$V_c = \left(1 - \frac{V_{fa}}{V_p} \right) \times V_p$$

Nos estudos também foram introduzidos adjuvantes, como plastificantes (Pl) e superplastificante (Sp). Para a introdução dos adjuvantes foi necessário remover água da amassadura de modo a manter o volume inicial previsto. Como os adjuvantes são produtos maioritariamente líquidos, ou com baixo teor de sólidos, foi feita a substituição da água por adjuvante, mantendo assim o mesmo volume de líquidos na composição. A sua introdução foi realizada em relação volumétrica entre adjuvante e os finos.

$$V_{pl} = \frac{V_{Pl}}{V_p} \times V_p$$

$$V_{Sp} = \frac{V_{Sp}}{V_p} \times V_p$$

$$V_w' = V_w - (V_{Pl} + V_{Sp})$$

4.3.1. EQUIPAMENTOS

Os pontos seguintes identificam o equipamento utilizado na elaboração dos ensaios das pastas:

- ✓ Mesa de ensaio com superfície plana e nivelada;
- ✓ Nível, de modo a verificar a horizontalidade da superfície de ensaio e equipamentos;
- ✓ Recipientes para pesar e transportar os materiais constituintes;
- ✓ Balança com precisão de 0,1 g;
- ✓ Misturador mecânico, com movimentos de translação e rotação, como ilustra a Figura 4-1;



Figura 4-1 – Misturador mecânico utilizado nas amassaduras de pastas e argamassas.

- ✓ Cone Marsh, com dimensões de 350 mm de altura e com abertura superior com 152 mm de diâmetro e 5 mm no inferior, como ilustra a Figura 4-2;

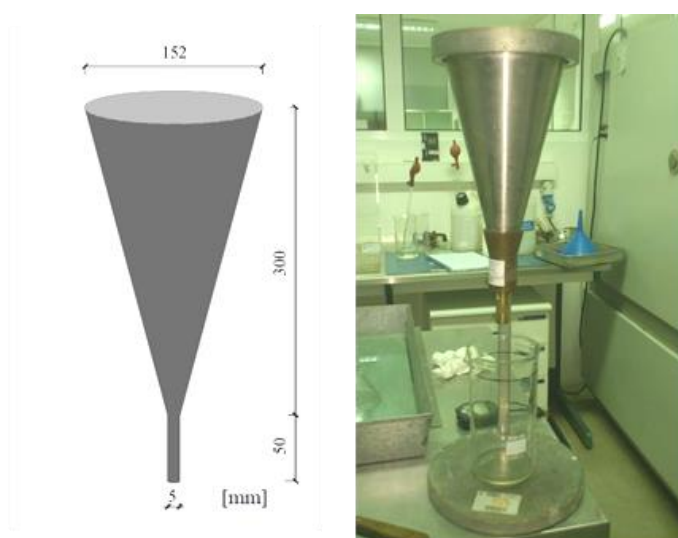


Figura 4-2 – a) Dimensões do cone Marsh; b) Cone Marsh para pastas.

- ✓ Cronómetro com precisão de 0,1s;
- ✓ Espátula para eliminar o excesso de pasta no ensaio de espalhamento;

- ✓ Cone de espalhamento para pasta, com dimensões interiores de 38 mm de base, 19 mm na base superior e com altura de 57 mm, conforme especificado na Figura 4-3;
- ✓ Régua de medição com subdivisões de 1mm.

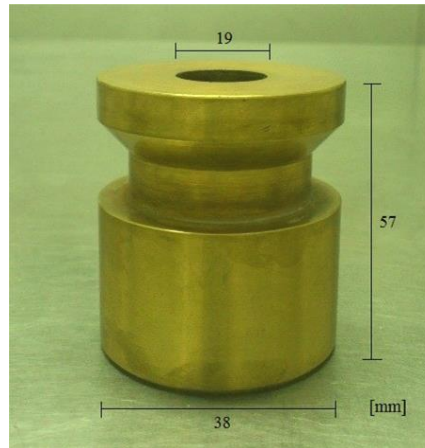


Figura 4-3 – Cone de espalhamento para pastas.

4.3.2. PROCEDIMENTO DE AMASSADURA

O procedimento de amassadura das pastas teve a seguinte sequência:

- ✓ Pesagem da massa de cimento e cinzas volantes quando é o caso, em diferentes recipientes;
- ✓ Pesagem da água num recipiente previamente limpo e seco;
- ✓ Na utilização de adjuvantes, nomeadamente o plastificante é medido em volume, numa pipeta graduada e misturado no recipiente da água. O superplastificante é medido da mesma forma mas introduzido no intervalo da amassadura;
- ✓ Colocação do cimento e as cinzas volantes no recipiente de amassadura, e cuidadosamente adicionar a água. Posteriormente colocar na misturadora o recipiente, esta operação não deve de exceder os 10 segundos;
- ✓ A amassadura foi efetuada de acordo com a norma NP EN 196-3 [33], a uma velocidade lenta, aproximadamente 140 ± 5 rotações por minuto e 62 ± 5 movimentos planetários, durante 3 minutos. A meio do período de amassadura (aos 90s) é feito uma pausa de 15 segundos, nos quais com auxílio de um raspador de borracha, a pasta aderente nas paredes do recipiente é recolocada no recipiente e introduzido o superplastificante, quando é o caso. E automaticamente, a pasta voltava a ser misturada, durante 90 segundos, isto é, a outra metade

do período de amassadura. Considerou-se como $t=0$, logo após terminar a amassadura da pasta;

- ✓ Após terminar a amassadura da pasta, é retirada do misturador e mexida manualmente, de modo a evitar acumulação de grumos no fundo do recipiente e junto às paredes.

4.3.3. ENSAIOS NO ESTADO FRESCO

4.3.3.1. ENSAIO DE VISCOSIDADE

Começou-se por realizar em primeiro lugar o ensaio de viscosidade, ou ensaio do cone Marsh, normalmente utilizado para avaliação de caldas para enchimento de bainhas de pré-esforço. Foi adotado o seguinte procedimento:

- ✓ Colocação do cone de Marsh numa superfície firme, plana e nivelada, e humedecimento do interior do cone;
- ✓ Quando terminada amassadura, procede-se ao enchimento do cone de Marsh com a pasta amassada. Para o enchimento é necessário manter o orifício inferior do cone tapado com um dedo, depois verte-se a pasta cuidadosamente no interior do cone, de modo a evitar a formação de bolhas de ar;
- ✓ Com o auxílio do cronómetro, inicia-se a contagem do tempo de escoamento da pasta (t_{esc}). O início da contagem, começa a ser contabilizada a partir do momento em que o orifício inferior é destapado, e terminado assim que este complete um 1 litro de pasta, ilustrada na Figura 4-4.



Figura 4-4 – Ensaio do cone Marsh.

4.3.3.2. ENSAIO DE ESPALHAMENTO

Para o ensaio de espalhamento de pastas procedeu-se da seguinte forma:

- ✓ Colocação do cone numa superfície firme, plana e nivelada e humedecimento do interior do cone e da superfície em contacto com a pasta;
- ✓ Após o ensaio de viscosidade, procede-se ao enchimento do cone com a pasta amassada. Após o enchimento do cone, a superfície superior é rasurada, para obtenção do mesmo volume em todos os ensaios realizados, como demonstra a Figura 4-5;



Figura 4-5 – Cone de espalhamento, preenchido com pasta.

- ✓ Posteriormente, é efetuado o levantamento do cone suavemente, sem movimentos horizontais e de forma contínua;
- ✓ Aguardam-se alguns segundos até o espalhamento da pasta cessar, depois são efetuadas as medições do espalhamento (d_1 e d_2), em duas direções ortogonais com auxílio de duas barras, de maneira a proceder uma melhor medição.

A Figura 4-6, apresenta o espalhamento da pasta e a sua medição obtida nos ensaios realizados.

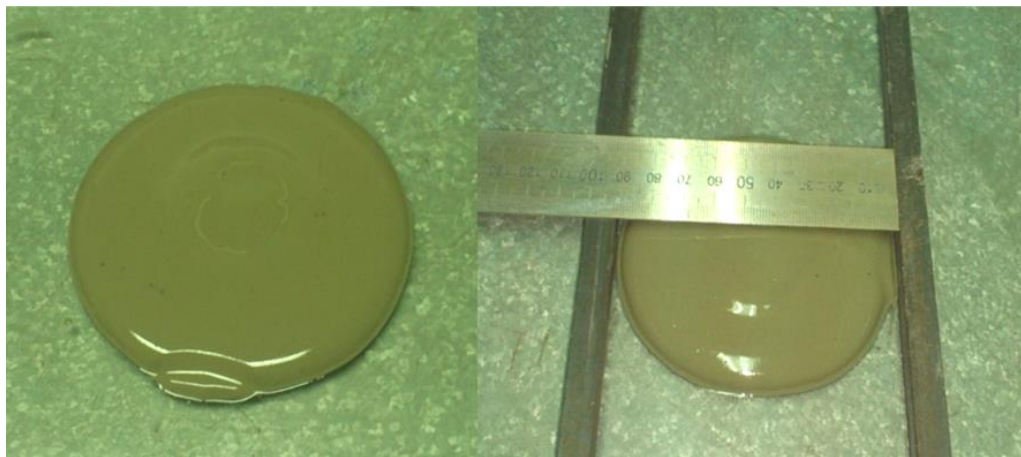


Figura 4-6 – a) Espalhamento da pasta; b) Medição do espalhamento da pasta.

Realizados ambos os ensaios, a pasta é de novo colocada na misturadora, a uma rotação baixa e sem pausas, durante 30 minutos. Passado esse tempo foram realizados os mesmos ensaios com o mesmo procedimento, mas registando o valor passados 30 minutos e identificando algumas alterações na mistura.

4.4. ARGAMASSAS

Na formulação de argamassas foi utilizado o volume de pasta (V_{pasta}) e o volume de areias (V_s) e foram realizados os ensaios de escoamento no funil V (t_{esc}) e de espalhamento. Para a realização dos ensaios foram utilizados um volume de amassadura de 1,2 litros, de modo a realizar os dois ensaios com a mesma amassadura. As principais variações realizadas nas argamassas foram a relação volumétrica entre o volume de agregado fino e o volume total de argamassa (V_s/V_m) e a relação volumétrica entre os dois tipos de areia e o volume de total de agregado fino (V_{s1}/V_s e V_{s2}/V_s), com relações de V_s/V_m entre 40 a 50% e de V_{s1}/V_s ou V_{s2}/V_s entre 40 a 60%. As percentagens dos agregados finos utilizados em cada composição estudada foram obtidas através da adaptação do método de *Bolomay*.

$$V_s + V_{pasta} = 1,0 m^3$$

$$V_{s1} + V_{s2} = V_s$$

4.4.1. EQUIPAMENTOS

Os pontos seguintes identificam o equipamento utilizado na elaboração dos ensaios às argamassas:

- ✓ Mesa de ensaio com superfície plana e nivelada;
- ✓ Nível, de modo a verificar a horizontalidade da superfície de ensaio e equipamentos;
- ✓ Recipientes para pesar e transportar os materiais constituintes;
- ✓ Balança com precisão de 0,1 g;
- ✓ Misturador mecânico, com movimentos de translação e rotação;
- ✓ Funil V em aço inoxidável para argamassas, com as dimensões especificadas na Figura 4-7;
- ✓ Cronómetro com precisão de 0,1 s;

Programa experimental

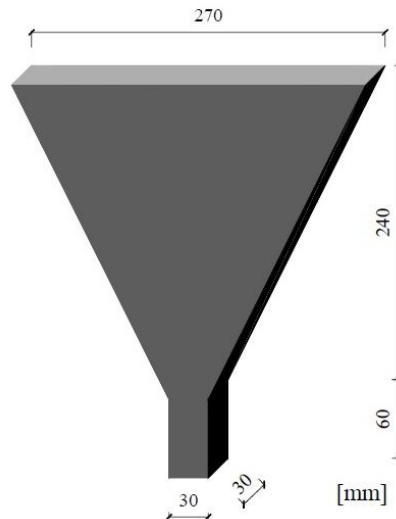


Figura 4-7 – Dimensões do funil V.

- ✓ Espátula para eliminar o excesso de argamassa no ensaio do funil V, no ensaio de espalhamento e nos moldes para primas;
- ✓ Cone de espalhamento para argamassas, com dimensões interiores de 100 mm de base, 70 mm no topo e 60 mm de altura, conforme especificado na Figura 4-8;



Figura 4-8 – Cone de espalhamento para argamassas.

- ✓ Régua de medição com subdivisões de 1 mm;
- ✓ Moldes para armazenamento e endurecimento das argamassas. Os prismas apresentam dimensões $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}^3$, cada molde possui 3 prismas, como demonstra a Figura 4-9;
- ✓ Câmara climática, que permite a realização de ensaios de envelhecimento, com temperaturas e humidades relativas controladas, entre os -50°C aos 180°C , representado na Figura 4-10;



Figura 4-9 – Moldes para armazenamento de argamassa.



Figura 4-10 – Câmara climática de armazenamento de argamassas.

- ✓ Câmara de cura para armazenamento dos prismas de argamassa;
- ✓ Equipamento de ensaio de resistência mecânica, ensaio à flexão e à compressão, ilustrado na Figura 4-11.



Figura 4-11 – Equipamento de ensaio das resistências mecânicas das argamassas.

4.4.2. PROCEDIMENTO DE AMASSADURA

O procedimento de amassadura das argamassas teve a seguinte sequência:

- ✓ Pesagem da massa de cimento e cinzas volantes quando é o caso, em diferentes recipientes;
- ✓ Pesagem da água num recipiente, previamente limpo e seco;
- ✓ Na utilização de adjuvantes, nomeadamente o plastificante é medido em volume, numa pipeta graduada e misturado no recipiente da água. O superplastificante é medido da mesma forma mas introduzido no intervalo da amassadura;
- ✓ Pesagem da areia s_1 no recipiente de amassadura, tarar e passar à pesagem da areia s_2 ;
- ✓ Adição do cimento e das cinzas volantes no recipiente de amassadura e misturar com uma colher cuidadosamente, de modo a obter uma composição mais homogénea. Depois cuidadosamente adicionar a água, para que não haja perdas de material. Posteriormente colocar na misturadora o recipiente, esta operação não deve de exceder os 10 segundos;
- ✓ A amassadura é efetuada segundo a norma NP EN 196-1 [35], com programa automático. A amassadura inicia a uma velocidade lenta, aproximadamente 140 ± 5 rotações por minuto e 62 ± 5 movimentos planetários, durante 60 segundos e depois 30 segundos a uma velocidade rápida de 285 ± 10 rotações por minuto e 125 ± 10 movimentos planetários. Passados os 90 segundos é feito uma pausa de 90 segundos, nos quais com auxílio de um raspador de borracha, a argamassa aderente nas paredes do recipiente é recolocada no recipiente e introduz-se o superplastificante, quando é o caso. E automaticamente, a argamassa volta a ser amassada a uma velocidade rápida, durante 60 segundos, perfazendo-se um total de 4 minutos contabilizando a pausa. Considerou-se como $t=0$, logo após terminar a amassadura;
- ✓ Após terminar a amassadura da argamassa, é retirada do misturador e mexida manualmente, de modo a evitar acumulação de grumos no fundo recipiente e junto às paredes.

4.4.3. ENSAIOS NO ESTADO FRESCO

4.4.3.1. ENSAIO DE ESCOAMENTO NO FUNIL V

Começou-se por realizar em primeiro lugar o ensaio de viscosidade ou ensaio de escoamento no funil V, para avaliação da viscosidade. Foi adotado o seguinte procedimento:

- ✓ Colocação do suporte do funil numa superfície firme, plana e nivelada, livre de vibrações;
- ✓ Colocação do funil V de argamassas no suporte e verificação da horizontalidade, posteriormente é humedecido o interior do funil V, previamente limpo. A porta da abertura na parte inferior do funil é fechada para o seu enchimento, de modo que não haja qualquer escoamento;
- ✓ Quando terminada amassadura, procede-se ao enchimento do funil V com argamassa amassada. Verte-se a argamassa cuidadosamente para o interior do funil, numa única operação sem qualquer tipo de compactação ou agitação, e no topo do funil é rasurado de modo a que fique nivelado;
- ✓ Colocação de um recipiente sob o funil para a recolha da argamassa;
- ✓ Medição do tempo de escoamento da argamassa (t_{esc}) com o auxílio do cronómetro. O início da contagem, começa a ser contabilizada assim que a porta de escoamento do funil seja aberta, e termina assim que se vê os primeiros raios de luz pelo topo do funil, isto é, no primeiro momento em que é possível ver verticalmente o recipiente através do funil. A Figura 4-12 demonstra o ensaio de escoamento no funil V.



Figura 4-12 – Ensaio de escoamento no funil V.

4.4.3.2. ENSAIO DE ESPALHAMENTO

O ensaio de espalhamento da argamassa procedeu-se da seguinte forma:

- ✓ Colocação do cone de espalhamento numa superfície firme, plana e nivelada e humedecimento do interior do cone e da superfície em contacto com a argamassa;

- ✓ Após o ensaio de viscosidade, procede-se ao enchimento do cone com a argamassa amassada. Após o enchimento do cone, a superfície superior é rasurada, para obtenção do mesmo volume em todos os ensaios realizados, como demonstra a Figura 4-13;



Figura 4-13 – Cone de espalhamento, preenchido com argamassa.

- ✓ Posteriormente, é efetuado o levantamento do cone suavemente, sem movimentos horizontais e de forma contínua;
- ✓ Aguardam-se alguns segundos até o espelhamento da argamassa cessar, depois são efetuadas as medições do espalhamento (G_p), em duas direções ortogonais com auxílio de duas barras, de maneira a proceder uma melhor medição.

Realizados ambos os ensaios, a argamassa é de novo colocada na misturadora, a uma rotação constante e sem pausas, durante 30 minutos. Passado esse tempo são realizados os mesmos ensaios com o mesmo procedimento, mas registrando o valor passado meia hora e identificando algumas alterações na mistura.

A Figura 4-14, apresenta o espalhamento da argamassa e a sua medição obtida nos ensaios realizados.

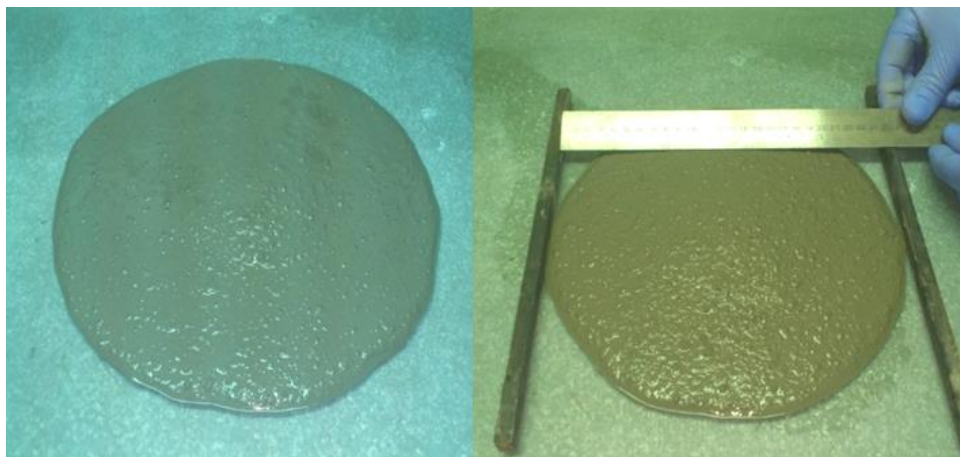


Figura 4-14 – a) Espalhamento da argamassa; b) Medição do espalhamento da argamassa.

4.4.4. ENSAIOS NO ESTADO ENDURECIDO

Foram realizados ensaios de resistência à flexão e compressão de modo a conhecer as suas propriedades mecânicas. Para a realização destes ensaios seguiu-se o seguinte procedimento:

- ✓ Após a realização dos ensaios no estado fresco das argamassas, nomeadamente o ensaio de viscosidade e de espalhamento, recolhe-se uma amostra e de forma contínua e preenche-se os moldes para os prismas de argamassas. Mas antes do preenchimento é necessário aplicar uma película fina de óleo descofrante em toda a superfície do molde;
- ✓ Posteriormente ao preenchimento dos moldes, a superfície é rasurada de modo a obter uma superfície nivelada e com um bom acabamento superficial;
- ✓ Armazenamento dos moldes na câmara climática, com uma temperatura constante de $T=20\pm 1^{\circ}\text{C}$ e a com uma humidade relativa superior a 90%;
- ✓ Passado 24 h, os moldes de argamassa são retirados da câmara e desmoldados. Os prismas são identificados com marcador à prova de água e colocadas numa câmara de cura, totalmente submersos em água até à data de realização do ensaio requerido, como demonstra a Figura 4-15;



Figura 4-15 – Câmara de cura de armazenamento dos moldes de argamassas.

- ✓ Realização dos ensaios na data prevista, nomeadamente aos 2, 7 e 28 dias. Retiram-se os prismas da tina de cura e procede-se aos ensaios de flexão e compressão. Primeiro realiza-se o ensaio à flexão, colocando o prisma na prensa de flexão, registando a tensão de rotura à flexão. Os prismas ao serem ensaiados à flexão partem-se ao centro dividindo-se em duas partes, como ilustra a Figura 4-16;
- ✓ Na realização do ensaio à compressão são ensaiadas as duas partes do prisma, coloca-se um a um na prensa de compressão, registando o valor da tensão de rotura à compressão, como na Figura 4-17.



Figura 4-16 – Ensaio à flexão aos prismas de argamassa.



Figura 4-17 – Ensaio à compressão aos prismas de argamassa.

4.5. BETÕES

Na formulação do betão foram introduzidos dois novos parâmetros, relacionados com os agregados grossos na composição (V_g). As percentagens utilizadas para os agregados grossos em cada composição estudada foram obtidas através da adaptação do método de *Bolomay*, com relações volumétricas entre o volume de cada brita e o volume total de agregados grossos (V_{b0}/V_g e V_{b1}/V_g). O volume de vazios (V_v) adotado foi de 1,5%, pois o BAC apresenta poucos vazios.

$$V_p + V_s + V_g + V_w + V_v = 1,0 \text{ m}^3$$

$$V_{\text{betão}} = V_{\text{argamassa}} (V_m) + V_{\text{britas}} (V_g) + V_{\text{vazios}} (V_v)$$

$$V_{\text{argamassa}} (V_m) = V_{\text{pasta}} + V_{\text{areias}} (V_s)$$

$$V_{\text{total de britas}} (V_g) = V_{b0} + V_{b1}$$

$$V_{g, \text{lim}} = \sum \left(\left(\frac{\text{Baridade brita } i}{\text{Massa volúmica brita } i} \right) \times \frac{V_{\text{brita } i}}{V_g} \right)$$

4.5.1. EQUIPAMENTOS

Os seguintes pontos identificam os equipamentos utilizados na elaboração dos ensaios do BAC:

- ✓ Mesa de ensaio com superfície plana e nivelada;
- ✓ Nível, de modo a verificar a horizontalidade da superfície de ensaio e equipamentos;
- ✓ Recipientes para pesar e transportar os materiais constituintes;
- ✓ Balanças com precisões de 0,1g, 1,0g, e de 10,0g;
- ✓ Misturador mecânico com capacidade de 56 litros, com movimentos de rotação, como ilustra a Figura 4-18;



Figura 4-18 – Misturadora utilizada na amassadura dos betões.

- ✓ Termómetro, com resolução de 1°C;
- ✓ Placa de base, de aço inoxidável, de dimensões 900×900 mm². A placa possui 2 circunferências com diâmetro de 210 mm e 500 mm e com o centro da placa coincidente com o centro das circunferências, como apresenta a Figura 4-19. As linhas apresentam uma profundidade e largura inferior a 1 mm e 2 mm, respetivamente;

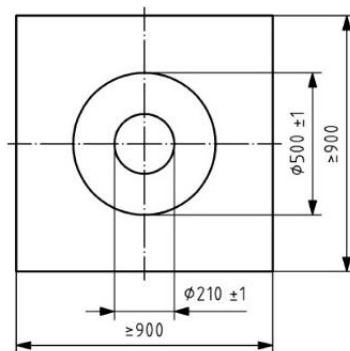


Figura 4-19 – Dimensões da placa de base.

- ✓ Funil V em aço inoxidável para betões, com as dimensões indicadas na Figura 4-20;

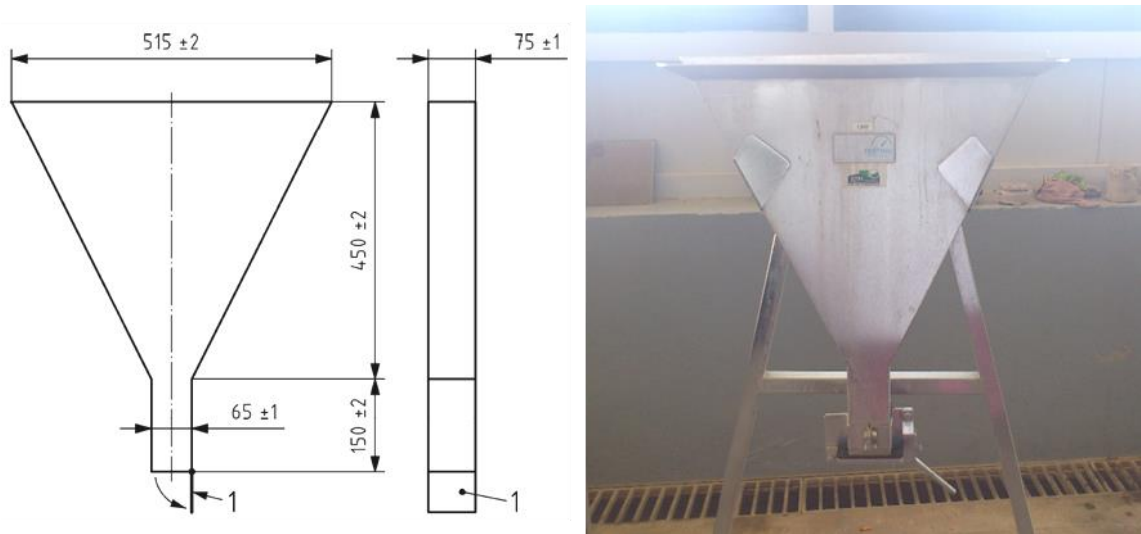


Figura 4-20 – a) Dimensões do funil V; b) Funil V para betões.

- ✓ Cronómetro com precisão de 0,1s;
- ✓ Espátula para eliminar o excesso de betão no ensaio do funil V, de espalhamento, da caixa L, de segregação e cubos;
- ✓ Cone de espalhamento em aço inoxidável, com dimensões interiores na base e topo de 200 mm e 100 mm, respetivamente e com uma altura de 300 mm, conforme especificado Figura 4-21. É habitualmente denominado por Cone de Abrams ou Slump Cone, utilizado para o ensaio de abaixamento do betão convencional;

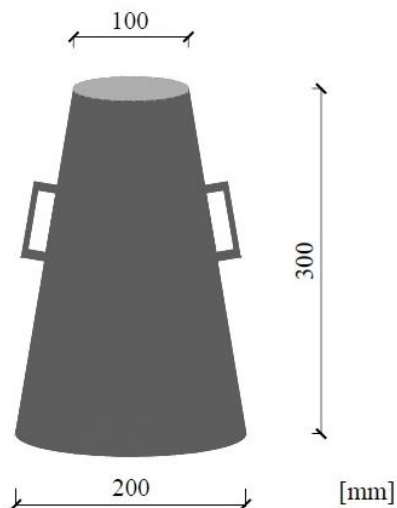


Figura 4-21 – Dimensões do cone de espalhamento.

- ✓ Fita de medição, com subdivisões de 0,1 mm e de comprimento total de 5 m;

- ✓ Caixa L, com as dimensões especificadas na Figura 4-22;

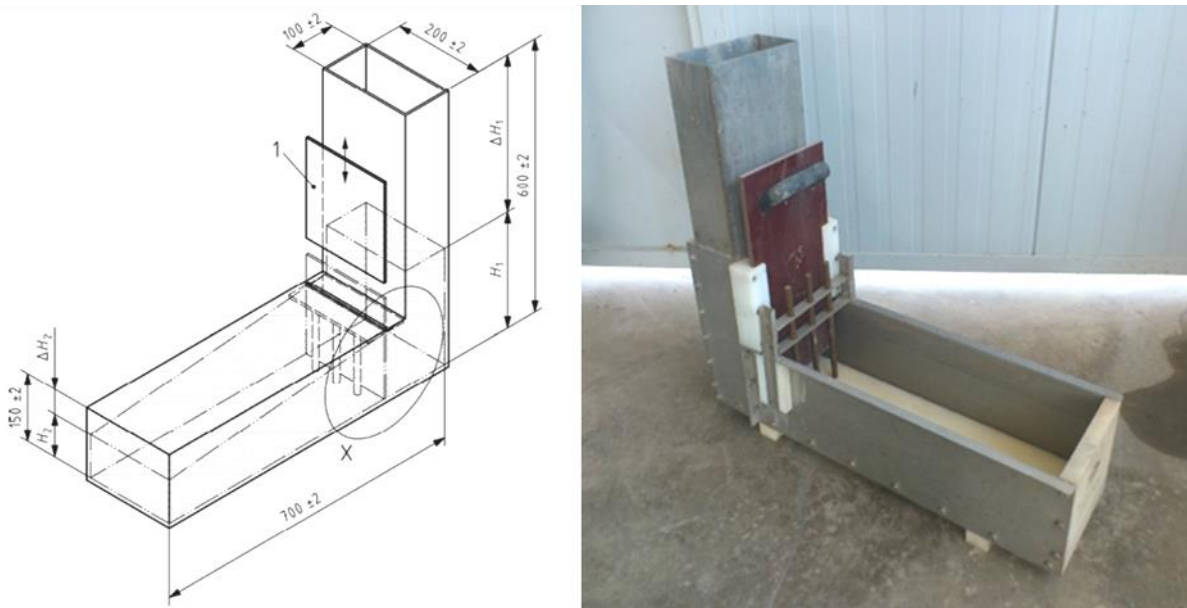


Figura 4-22 – Dimensões da caixa L.

- ✓ Recipiente com capacidade de $10 \pm 0,5$ litros e uma placa acrílica para tapar o recipiente na realização do ensaio de segregação;
- ✓ Peneiro com malha quadrada, de espaçamento igual a 5 mm, conforme a ISO 3310-2 [58], ilustrado na Figura 4-23 e fundo do peneiro;



Figura 4-23 – Peneiro e fundo para o ensaio de segregação.

- ✓ Moldes cúbicos, destinados ao armazenamento do betão fresco até à sua desmoldagem, geralmente 24 horas após a sua amassadura, tempo de garantia do endurecimento dos provetes

de BAC. Com dimensões de 150 mm de aresta, ilustrados na Figura 4-24, em conformidade com a norma para moldes de ensaio de betão endurecido;



Figura 4-24 – Moldes para próvetes de betão.

- ✓ Câmara de cura para os próvetes de betão;
- ✓ Equipamento de ensaios à compressão do betão, de acordo com a norma de características das máquinas de ensaio [26].

4.5.2. PROCEDIMENTO DE AMASSADURA

O procedimento de amassadura do BAC teve a seguinte sequência:

- ✓ Pesagem da massa de cimento, cinzas volantes e agregados finos e grossos em diferentes recipientes;
- ✓ Pesagem da água num recipiente graduado, previamente limpo e seco;
- ✓ Os adjuvantes, nomeadamente o plastificante, superplastificante e modelador de viscosidade são medidos em próvetas diferentes e introduzidos durante a amassadura;
- ✓ Não existe um princípio pré-definido para a ordem de introdução dos componentes do betão na betoneira, pois estes dependem do tipo de betoneira e da natureza do betão. Então, começou-se por introduzir as areias, depois o cimento e as cinzas volantes na betoneira. Ligou-se a misturadora e adicionou-se metade da água de amassadura. Posteriormente introduziu-se os agregados grossos e uma grande parte da água, deixando apenas um pouco de água. De seguida, adicionou-se os adjuvantes, e com ajuda do pouco de água deixado removeu-se dos próvetes o restante dos adjuvantes, de maneira a não haver perda de material. Considerou-se que o tempo de amassadura ($t=0$), se inicia após todos os materiais constituintes estejam introduzidos na misturadora;

- ✓ A misturadora apresenta um movimento rotacional, e a duração da amassadura foi cerca de 5 minutos sem interrupções, após os constituintes serem colocados;
- ✓ Após terminar a amassadura do BAC, a betoneira foi desligada e retiraram-se as amostras para a realização dos vários ensaios no estado fresco do betão.

4.5.3. ENSAIOS NO ESTADO FRESCO

4.5.3.1. ENSAIO DE ESCOAMENTO NO FUNIL V

O ensaio de viscosidade ou ensaio de escoamento no funil V avalia a capacidade de passagem numa abertura estreita, na direção vertical e apenas sob ação do seu peso próprio. Por outras palavras, o ensaio do funil V é utilizado para avaliar a viscosidade e a capacidade de preenchimento, e ainda permite por observação da velocidade de escoamento, quantificar a tendência a segregação e bloqueio dos agregados [59].

Começou-se por realizar o ensaio de escoamento no funil V de acordo com a norma NP EN 12350-9 [59], foi adotado o seguinte procedimento:

- ✓ Colocação do suporte do funil numa superfície firme, plana e nivelada, livre de vibrações;
- ✓ Colocação do funil V para betão no suporte e verificação da horizontalidade, posteriormente humedecimento do interior do funil V, previamente limpo. A porta de abertura na parte inferior do funil é fechada para o seu enchimento, de modo que não haja qualquer escoamento;
- ✓ Quando termina a amassadura, procede-se ao enchimento do funil V com o betão amassado. Verte-se o betão cuidadosamente para o interior do funil, numa única operação sem qualquer tipo de compactação ou agitação e no topo do funil é rasurado de modo a que fique nivelado;
- ✓ Colocação de um recipiente sob o funil para a recolha do betão;
- ✓ Medição do tempo de escoamento do betão (t_{esc}), com o auxílio do cronómetro. O início da contagem, começa a ser contabilizada assim que a porta de escoamento do funil seja aberta, e termina assim que se veja os primeiros raios de luz pelo topo do funil, isto é, no primeiro momento em que é possível ver verticalmente o recipiente através do funil.

As Figuras 4-25 e 4-26 mostram alguns passos do procedimento do ensaio de escoamento no funil V.



Figura 4-25 – Preenchimento do funil V com betão.

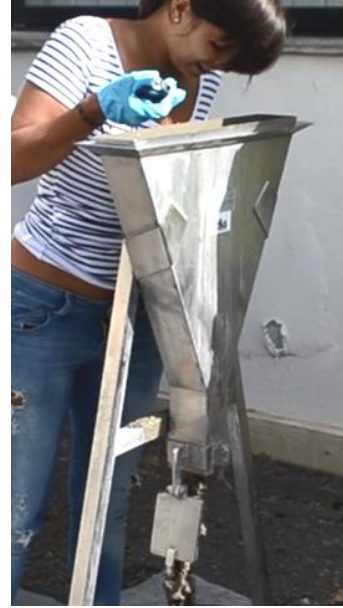


Figura 4-26 – Medição do t_{esc} no funil V.

4.5.3.2. ENSAIO DE ESPALHAMENTO (“SLUMP FLOW”)

O ensaio de espalhamento permite avaliar a fluidez e capacidade de preenchimento em condições não confinadas e ainda avaliar qualitativamente, por observação visual, a presença de segregação [4]. Após o ensaio, o aspeto final do betão deve ser examinado de forma a verificar a presença de sinais de segregação ou exsudação, distingue-se pela presença de uma auréola de pasta ou argamassa em volta do perímetro de espalhamento, presença de agregados acumulados no centro e/ou irregularidade na sua distribuição e pela presença de uma auréola de pasta ou argamassa em volta do perímetro de espalhamento. O espalhamento do betão deve apresentar as partículas dos agregados distribuídos uniformemente até à periferia [3, 9, 11].

O ensaio de espalhamento do betão procedeu-se de acordo com norma NP EN 12350-8 [60], e da seguinte forma:

- ✓ Colocação da placa na mesa de superfície firme, plana e nivelada;
- ✓ Verificação da horizontalidade da superfície, com recurso ao nível;
- ✓ Humedecimento do interior do cone e da superfície em contacto com o betão e colocação do cone no centro da placa;
- ✓ Após o ensaio de viscosidade, procede-se ao enchimento do cone com o betão de forma contínua. Após o enchimento do cone, a superfície superior é nivelada, para obtenção do mesmo volume em todos os ensaios realizados, como demonstra a Figura 4-27;

- ✓ Posteriormente, é efetuado o levantamento do cone suavemente, sem movimentos horizontais e de forma contínua, poucos segundos após seu enchimento;
- ✓ Aguardam-se alguns segundos até o espelhamento do betão cessar, depois foram efetuadas as medições do espalhamento (d_1 e d_2), em duas direções ortogonais e por observação visual verifica-se se há ocorrência de segregação.

Nas Figuras 4-27, 4-28 e 4-29 são apresentadas alguns passos deste procedimento nos ensaios realizados.

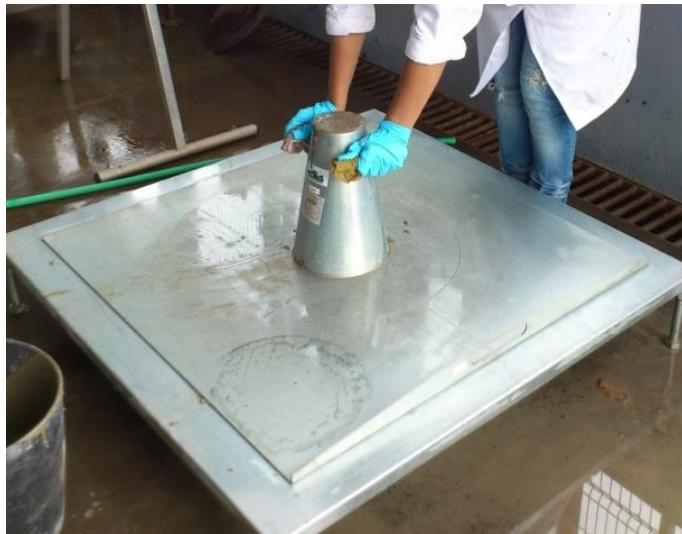


Figura 4-27 – Cone de espalhamento preenchido com BAC.

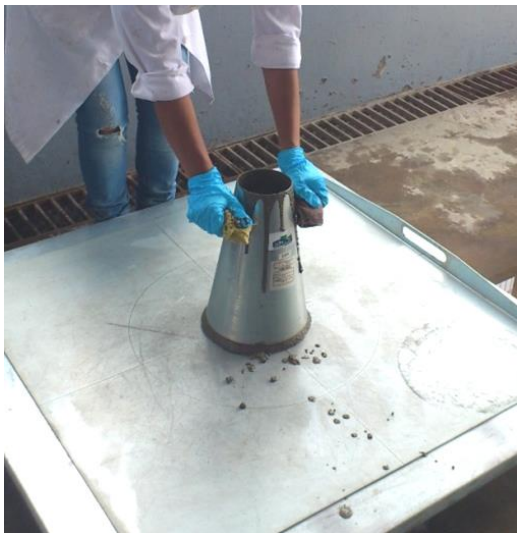


Figura 4-28 – Levantamento do cone de espalhamento.



Figura 4-29 – Medição do espalhamento do betão.

4.5.3.3. ENSAIO DE ESCOAMENTO NA CAIXA L

O ensaio de escoamento na caixa L, permite avaliar simultaneamente diferentes requisitos funcionais de autocompactabilidade do betão fresco, como a capacidade passagem pelos obstáculos, fluidez e por observação visual quantificar a resistência à segregação [3, 8, 9, 11]. Neste ensaio foi utilizado o obstáculo de três varões, com espaçamento entre varões de aproximadamente 41 mm. Consiste no obstáculo mais condicionante e conseqüentemente com resultados mais exigentes em termos de bloqueio dos agregados. Os pontos seguintes identificam o procedimento utilizado na elaboração do ensaio de escoamento na caixa L, de acordo com a norma NP EN 12350-10 [20]:

- ✓ Colocação da caixa L numa base firme, plana, nivelada e livre de vibrações ou choques;
- ✓ Humedecimento da caixa L, previamente limpa. Garantir que a tampa deslizante se encontra fechada;
- ✓ Preenchimento da secção vertical da caixa, sem qualquer compactação ou agitação. Após o preenchimento da secção vertical a parte superior é nivelada e deixa-se repousar cerca de um minuto;
- ✓ Abrir completamente a tampa deslizante num movimento contínuo, de modo a permitir que o betão flua da secção vertical para a secção horizontal da caixa L;
- ✓ Após cessar o movimento do betão no interior da caixa, procede-se às medições na parte de trás e da frente da caixa. Para cada uma destas medições foram retirados valores em três pontos distintos, utilizando depois um valor médio para atribuição de H1 e H2.

As Figuras 4-30 e 4-31 ilustram alguns passos do procedimento do ensaio de escoamento na caixa L.



Figura 4-30 – Nivlamento do BAC na caixa L.



Figura 4-31 – Medição das alturas na caixa L.

4.5.3.4. ENSAIO DE ESTABILIDADE (SEGREGAÇÃO NO PENEIRO)

O valor de estabilidade obtido no ensaio de segregação no peneiro descreve a resistência à segregação, característica fundamental para a homogeneidade e qualidade final do BAC.

Foi utilizado o seguinte procedimento na elaboração do ensaio de resistência à segregação, de acordo com a norma NP EN 12350-11 [61]:

- ✓ Enchimento de um recipiente de $10\pm 0,5$ litros, com uma amostra de betão, procedendo-se ao nivelamento da parte superior do mesmo;
- ✓ Manter amostra numa posição firme e nivelada durante $15\pm 0,5$ minutos, tapar o recipiente com uma placa de acrílico, de forma a evitar evaporação;
- ✓ Colocação do fundo do peneiro na balança, registrar a sua massa (m_p), em gramas e depois colocação do peneiro sobre o fundo e tarar após esta ação;
- ✓ Após 15 minutos, verifica-se se existe qualquer separação de água exsudada. Posteriormente, o betão é vertido cuidadosamente de forma contínua no peneiro, incluindo alguma água exsudada. Regista-se novamente a massa (m_c), em gramas;
- ✓ Aguarda-se 2 minutos, após os quais o peneiro é retirado sem agitação. Regista-se a massa que escoou para o fundo do peneiro (m_{ps}), em gramas.

As Figuras 4-32 e 4-33 demonstram alguns passos do procedimento do ensaio de segregação.



Figura 4-32 – Recipiente preenchido com BAC e tapado no ensaio de segregação.



Figura 4-33 – Pesagem da massa m_c no ensaio de segregação.

Após realizar todos os ensaios, o betão foi de novo colocado na misturadora desligada durante 30 minutos. Passado esse tempo, ligou-se a misturadora durante 2 minutos e foram realizados os mesmos

ensaios com o mesmo procedimento, mas registrando o valor passado 30 minutos e identificando algumas alterações na mistura.

4.5.4. ENSAIOS NO ESTADO ENDURECIDO

Foram realizados ensaios de resistência à compressão de modo a conhecer as suas propriedades mecânicas. Para a realização destes ensaios seguiu-se o seguinte procedimento:

- ✓ Após a realização dos ensaios no estado fresco do betão, retiraram-se as amostras de BACs segundo a norma NP EN 12350-1 [24];
- ✓ Preenchimento dos moldes cúbicos, de forma contínua e sem qualquer tipo de compactação ou vibração forçada. Mas antes do preenchimento é necessário aplicar uma película fina de óleo descofrante em toda a superfície do molde. Para um betão convencional a vibração ou compactação é requerida na norma NP EN 12390-2 [25], no entanto devido às excepcionais propriedades do BAC no estado fresco não se efetuou;
- ✓ Posteriormente ao preenchimento dos moldes e feita a remoção do excesso de betão no topo do molde, isto é, regularização do mesmo com uma colher de mestre, de modo a obter uma superfície nivelada e com um bom acabamento superficial, ilustrados na Figura 4-34;

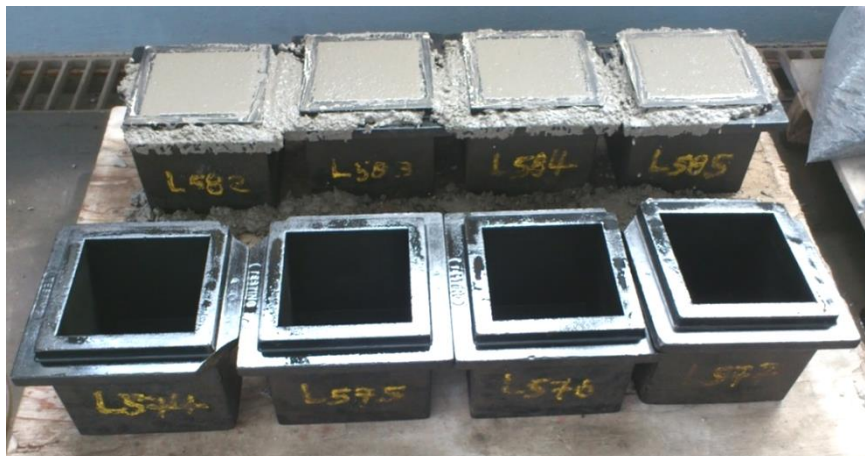


Figura 4-34 – Moldes preenchidos com BAC.

- ✓ Colocação de uma placa de vidro no topo do molde, de modo a minimizar a perda de humidade e desidratação. Posteriormente, foi colocada uma caixa com proteção a variações térmicas;

- ✓ Aguarda-se um período de pelo menos 16 horas, geralmente de 24 horas e não mais de 36 horas. Estes encontram-se protegidos contra choques, vibrações e desidratação [25];
- ✓ Passado esse tempo de cura, procede-se à desmoldagem dos provetes, conforme ilustrado na Figura 4-35. Os provetes de BAC são identificados na face superior com um marcador à prova de água;



Figura 4-35 – Desmoldagem dos provetes de BAC.

- ✓ Colocação dos provetes de BAC numa câmara de cura, totalmente submersos em água e a uma temperatura de 20 ± 2 °C, ilustrado na Figura 4-36, até à data de realização do ensaio requerido;



Figura 4-36 – Colocação dos provetes de BAC na câmara de cura.

- ✓ Realização dos ensaios à compressão segundo a norma NP EN 12390-3 [62], na data prevista, nomeadamente aos 2, 3, 7 e 28 dias após a realização da amassadura do betão. Remove-se o excesso de humidade da superfície do provete antes da sua colocação na máquina de ensaio. Posiciona-se o provete cúbico e aplica-se uma velocidade de aplicação de carga constante,

dentro do intervalo (0.6 ± 0.2) MPa/s, como na Figura 4-37. Regista-se o valor de tensão de rotura do provete, obtido automaticamente pelo equipamento de ensaio.



Figura 4-37 – Ensaio à compressão dos provetes de BAC.

5

RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo, será feita a apresentação dos resultados obtidos ao longo do programa experimental descrito no capítulo 4. Como os materiais utilizados no programa experimental eram substancialmente diferentes dos referidos e utilizados na bibliografia consultada, começou-se por realizar ensaios ao nível de pastas de modo avaliar alguns parâmetros. Na avaliação das pastas foram realizados ensaios de espalhamento e viscosidade, de modo avaliar a influência dos diferentes materiais constituintes no comportamento do estado fresco da pasta. Os valores obtidos na elaboração das pastas auxiliaram a elaboração de composições de argamassas e conseqüentemente composições de betões. Todo o programa experimental desenvolvido no âmbito deste trabalho foi direcionado para análise de aspetos relativos ao comportamento físico e mecânico dos BACs, e a discussão dos resultados que se apresenta neste capítulo irá refletir sobre isso. A caracterização dos materiais constituintes foi realizada numa fase preparatória, onde estão apresentados no capítulo 3. A influência dos materiais constituintes será avaliada neste capítulo pela sua ação do comportamento nas pastas, argamassas e betões.

5.2. PASTAS

5.2.1. AVALIAÇÃO DO ESPALHAMENTO

A avaliação do espalhamento permite estudar propriedades físicas das composições de materiais finos, como cimento e adições. O ensaio consiste na medição do diâmetro médio de espalhamento das pastas

para diferentes razões volumétricas entre água e finos (V_w/V_p), com ou sem adição de superplastificante. O diâmetro médio de espalhamento, é obtido através da medição do diâmetro em duas direções ortogonais (d_1 e d_2) em cada ensaio de espalhamento em pastas. Consequentemente através do diâmetro médio (d), pode ser calculada a área de espalhamento relativa (G_p), ilustrada na seguinte equação (sendo d_0 a dimensão interior da base do cone de espalhamento) [3,8].

$$G_p = \left(\frac{d}{d_0}\right)^2 - 1$$

Nos vários ensaios realizados às pastas obteve-se vários espalhamentos relativos (G_p), para diferentes razões volumétricas (V_w/V_p). Através destes valores é possível obter um gráfico com uma linha de tendência linear para o estudo em causa, que permite calcular os valores de β_p e E_p , como ilustra a Figura 5-1.

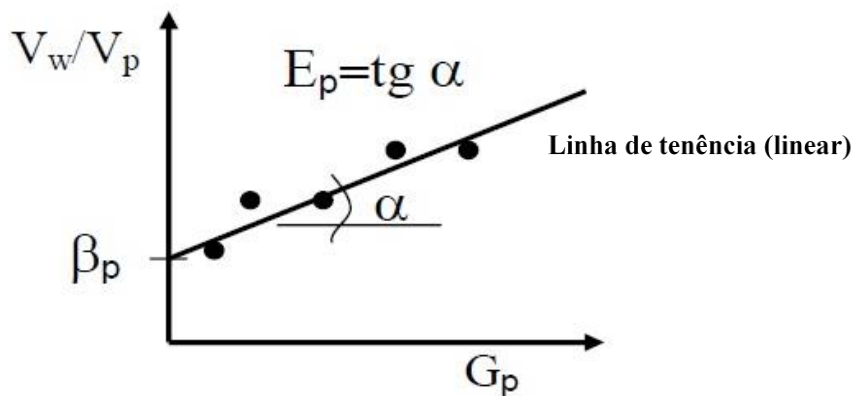


Figura 5-1 – Gráfico genérico de determinação de β_p e E_p .

Em que o valor β_p representa a capacidade de retenção de água pelos materiais finos, entre a qual também corresponde à menor razão volumétrica (V_w/V_p), que garante o começo do espalhamento. Este valor, é obtido através da ordenada na origem da linha de tendência. O valor E_p é obtido através da inclinação da referida reta e corresponde ao fator de deformabilidade que indica em que medida da viscosidade da pasta é sensível a variações da razão entre água e finos (w/p) [3].

Iniciou-se o estudo analisando pastas com diferentes tipos de cimentos, com o CEM II/B-L 32,5N e CEM II/A-L 42,5R no instante de $t=0$, apresentados na Figura 5-2 e 5-3. Em ambos os casos variou-se V_w/V_p e utilizou-se 0% de cinzas volantes, o que corresponde que os finos da pasta eram totalmente constituídos pelo respetivo cimento.

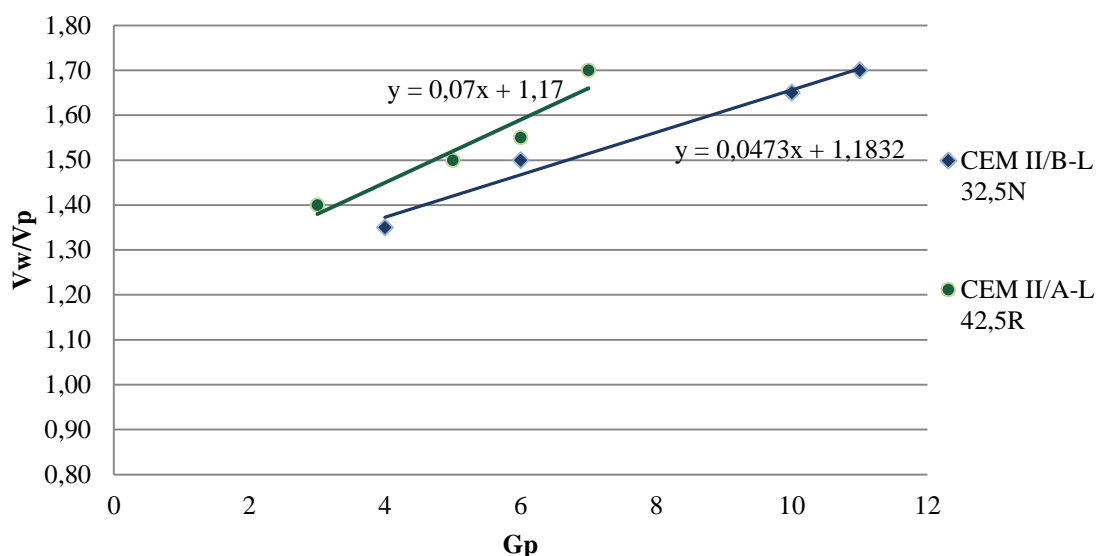


Figura 5-2 – Gráfico de determinação do β_p e E_p para pastas compostas por diferentes tipos de cimento, com $t=0$.

Como se pode verificar na Figura 5-2, as pastas constituídas pelo cimento 32,5N, iniciam a deformação no ensaio de espalhamento com relações de V_w/V_p ligeiramente inferiores ao cimento 42,5R. Uma pasta com cimento 42,5R, necessita de maior quantidade de água ou uma maior relação V_w/V_p , para obter os mesmos espalhamentos que as pastas constituídas com cimento 32,5N. Ambas as composições apresentam valores de β_p muito semelhantes, a pasta constituída com cimento 32,5N apresenta um valor de $\beta_p=1,18$ e $\beta_p=1,17$ para o cimento 42,5R. Para além disso, as pastas compostas pelo cimento 32,5N, apresentam maior sensibilidade às variações da água na composição, pois apresentam um fator de deformabilidade inferior, respetivamente $E_p=0,047$ e para o cimento 42,5R de $E_p=0,07$. Verificou-se que o cimento CEM II/B-L 32,5N possui melhores características em termos de trabalhabilidade de uma pasta mas não demasiado afastadas do CEM II/A-L 42,5R, então optou-se por utilizar o CEM II/A-L 42,5R nas composições a serem ensaiadas. Pois pretendia-se obter uma boa classe de resistência, de modo a não gerar problemas relacionados com resistência à compressão na aplicação prática.

Na Figura 5-3, verifica-se que o tempo de escoamento (t_{esc}) aumenta com a diminuição do V_w/V_p , pois com a diminuição do V_w/V_p , a quantidade de água diminui e a pasta torna-se menos fluida. Relativamente ao tipo de cimento, o cimento 42,5R apresenta maiores tempos de escoamento que o 32,5N, ou seja, o 32,5N apresenta maior fluidez ou menor viscosidade para os mesmos V_w/V_p .

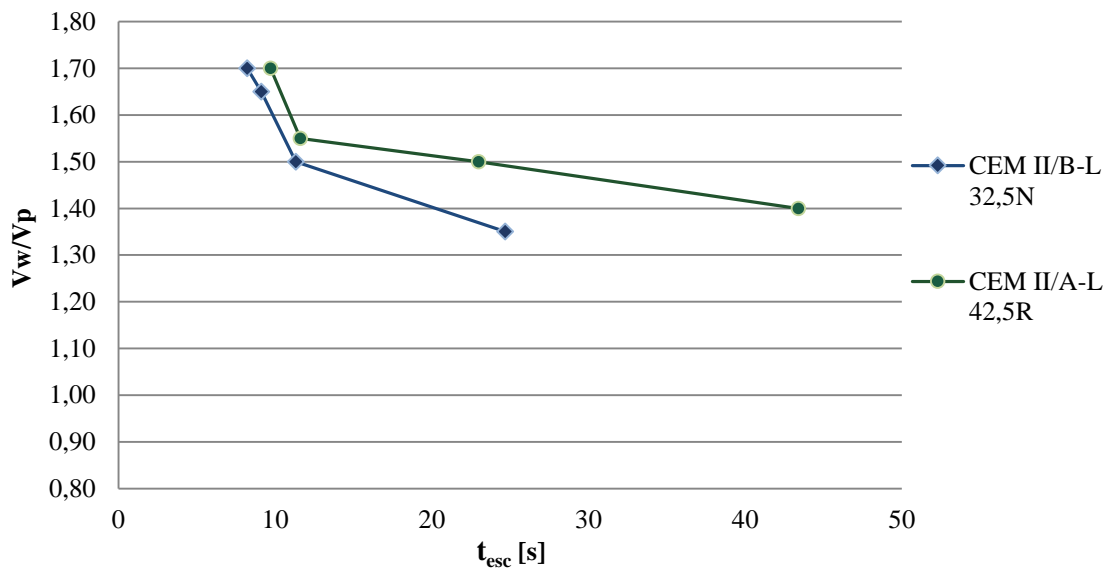


Figura 5-3 – Gráfico de viscosidade de pastas, compostas por diferentes tipos de cimento, com t=0.

5.2.1.1. INFLUÊNCIA DAS CINZAS VOLANTES

Foram estudadas a fluidez através do valor da área relativa de espalhamento (G_p) obtida no ensaio de espalhamento. Foram ensaiadas pastas com CEM II/A-L 42,5R para diferentes razões volumétricas entre água e finos (V_w/V_p), e de cinzas volantes e finos (V_{fa}/V_p), no instante t=0 e t=30 minutos, como ilustra a Figura 5-4 e 5-5.

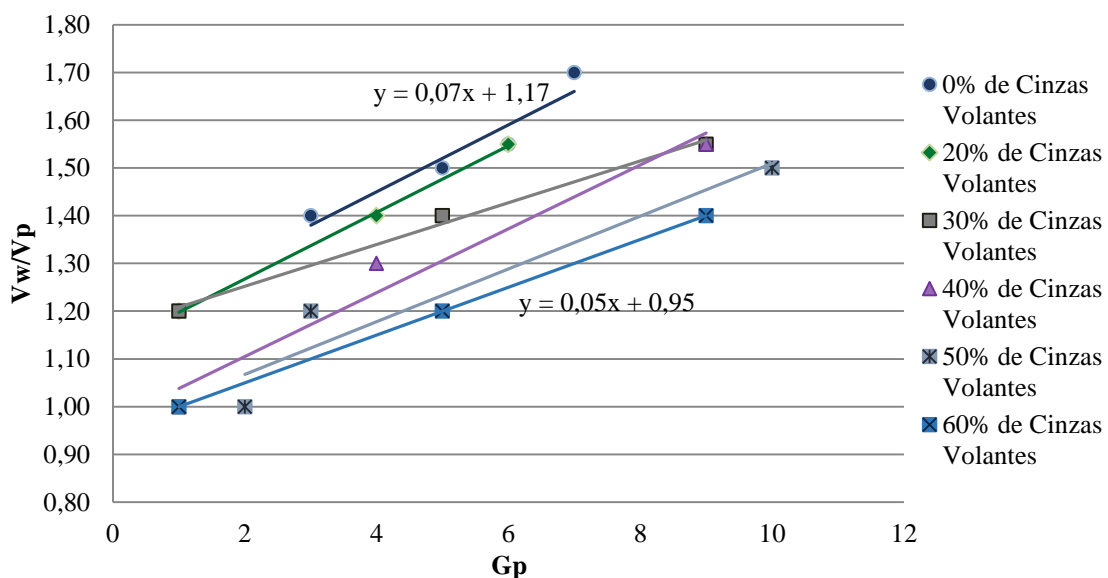


Figura 5-4 – Gráfico de determinação do β_p e E_p em pastas, com $V_{fa}/V_p = 0\%$ a 60% , com t=0.

Na análise da Figura 5-4, verifica-se que à medida que se aumenta a percentagem de cinzas volantes obtêm-se maiores áreas de espalhamento relativo (G_p) para mesma quantidade de água na composição. Este facto compreende-se pela pequena dimensão, a forma esférica e a superfície não muito rugosa das partículas das cinzas volantes, onde proporcionam baixos coeficientes de atrito entre as partículas da pasta e que melhoram a sua deformabilidade. Como estas apresentam uma absorção inferior ao cimento, oferecem maiores espalhamentos, resultando na utilização de baixas relações V_w/V_p . Tal verifica-se no parâmetro β_p , pois este é inferior com o aumento da adição de cinzas volantes, isto é, necessita de menor quantidade de água inicial para igual espalhamento numa composição sem adição de cinzas volantes.

Contudo, a utilização das cinzas volantes reduz significativamente a quantidade de água utilizada na composição para iguais valores de fluidez de uma pasta sem a utilização de cinzas volantes. Ao valor de E_p , verifica-se que nas pastas com adição de cinzas volantes apresentam um valor inferior, em relação à pasta sem adição. No que resulta maior sensibilidade à quantidade de água utilizada nas pastas com cinzas volantes, proporcionando uma maior gama de valores G_p . Além disso, é possível verificar que com o aumento de cinzas volantes proporcionam maiores áreas relativas de espalhamento (G_p).

Após os 30 minutos desde o início de amassadura da pasta, realizou-se novamente o ensaio de espalhamento, como demonstra a Figura 5-5.

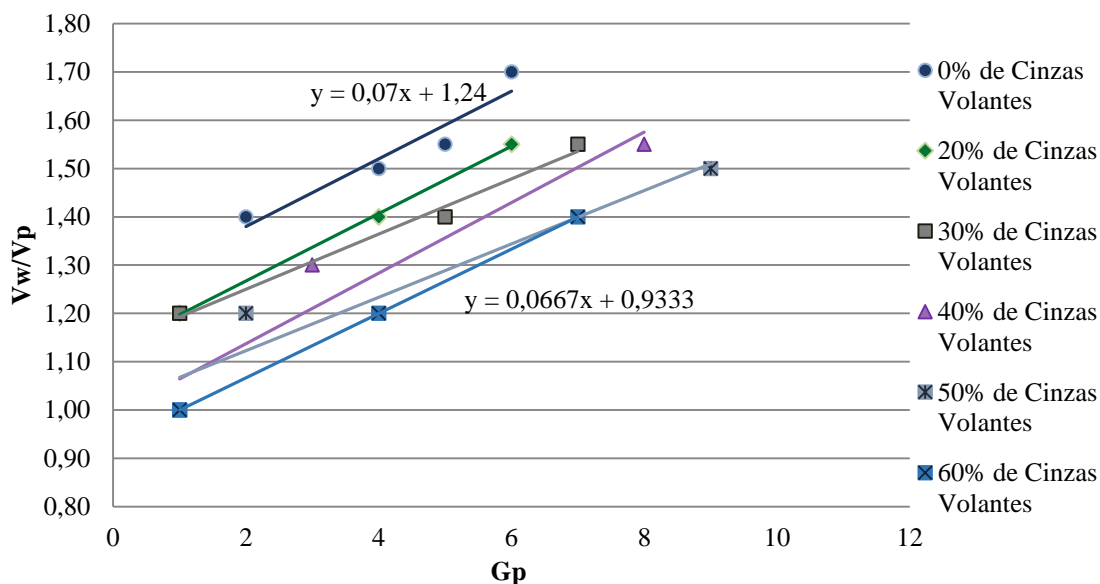


Figura 5-5 – Gráfico de determinação do β_p e E_p em pastas, com $V_{fa}/V_p= 0\%$ a 60% , com $t=30$.

Verificou-se que na maioria dos casos o fator de deformabilidade (E_p) aumentou, no entanto o valor de β_p diminuiu ligeiramente nas pastas com adição de cinzas. Nota-se que há um ligeiro deslocamento

dos pontos do gráfico para a esquerda, isto é, os valores do espalhamento diminuem ligeiramente com o passar do tempo. Podemos dizer que a pasta perde um pouco de trabalhabilidade com o passar do tempo, facto este, que se deve por esta se encontrar a ganhar presa.

5.2.1.2. INFLUÊNCIA DO SUPERPLASTIFICANTE

Como o superplastificante é um dos constituintes fundamentais do BAC, houve a necessidade de compreender a afinidade do superplastificante para com os materiais a utilizar. Assim, de modo a obter informações sobre os adjuvantes a serem utilizados nas composições BAC, foram realizados ensaios em pastas com cimento CEM II/A-L 42,5R, com $V_{fa}/V_p=30\%$ e variando as dosagens de superplastificante $V_{sp}/V_p=0\%$ a 1,2%, no instante $t=0$ e $t=30$ minutos. Na Figura 5-6 são apresentados a influência do superplastificante no espalhamento das pastas, com diferentes V_w/V_p .

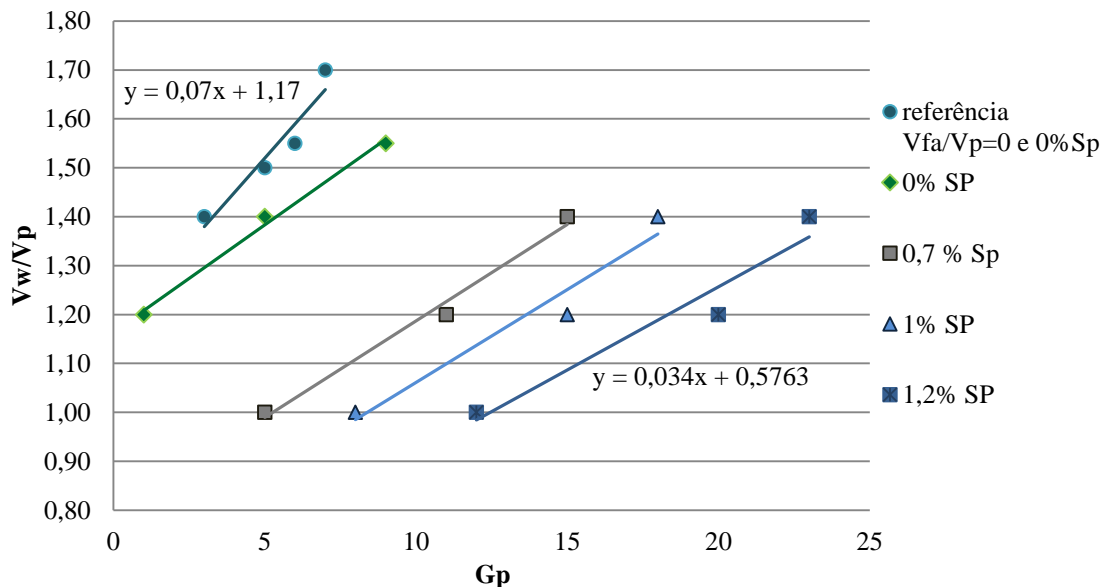


Figura 5-6 – Gráfico de determinação do β_p e E_p em pastas, com $V_{fa}/V_p= 30\%$ e $V_{sp}/v_p=0\%$ a 1,2%, com $t=0$.

Comparando as várias composições apresentadas na Figura 5-6 em relação à composição de referência, observa-se um aumento da capacidade de espalhamento com a incorporação do superplastificante. Verifica-se também que a introdução de superplastificante nas pastas que possuem cinzas volantes na composição conduz a maiores espalhamentos, pois como já foi referido anteriormente, uma pasta com adição de cinzas conduz a maiores espalhamento em relação a uma pasta sem adição. A utilização de cinzas volantes possibilitam maiores deformações e consequentemente com a introdução do superplastificante possibilitam deformações ainda maiores.

A Figura 5-7 apresenta o espalhamento relativo (G_p) após 30 minutos. É possível verificar que com o decorrer do tempo todos os pontos do gráfico movem-se para a esquerda, o que significa que passados os 30 minutos o espalhamento diminui ligeiramente, isto é, ocorre perda de deformabilidade.

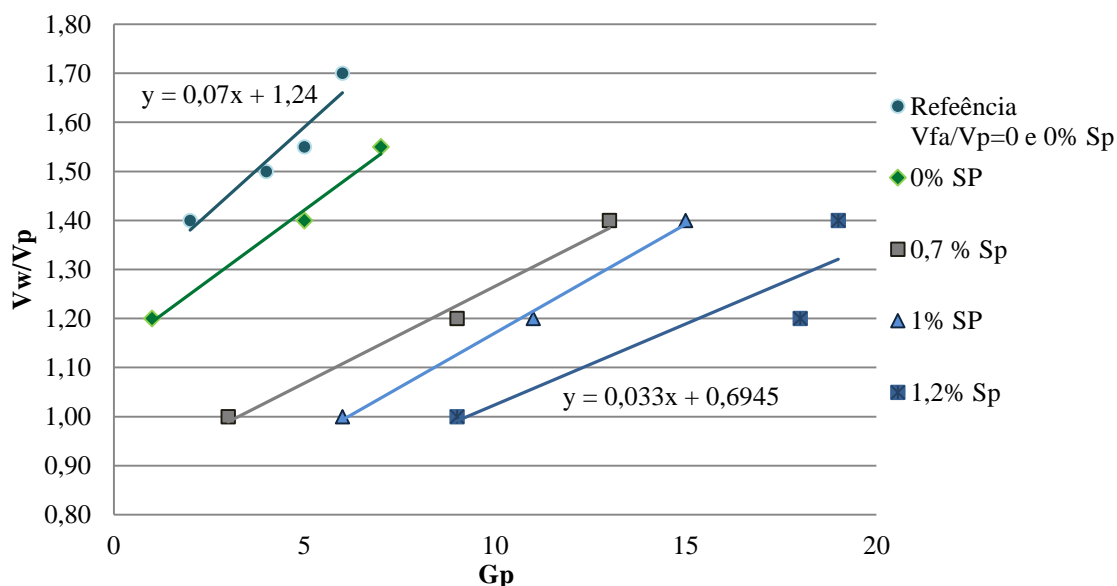


Figura 5-7 – Gráfico de determinação do β_p e E_p em pastas, com $V_{fa}/V_p = 30\%$ e $V_{sp}/v_p = 0\%$ a 1,2%, com $t=30$.

5.2.2. AVALIAÇÃO DA VISCOSIDADE

Nos ensaios às pastas avaliou-se em paralelo com o espalhamento a viscosidade, através do ensaio designado por cone Marsh, trata-se de um método simples e prático, e que tem sido utilizado para avaliar a fluidez das caldas. Como referido no capítulo anterior, o método baseia-se na medição do tempo necessário para que um determinado volume de material escoe através do funil. O tempo de escoamento do cone Marsh, transcreve o inverso da medida relativa da fluidez da pasta, isto é, quanto menor for o tempo de escoamento, maior será a fluidez e menor será a sua viscosidade. No caso particular do BAC, os adjuvantes, sobretudo o superplastificante tem uma elevada importância no seu comportamento no estado fresco, o que neste ensaio permite uma melhor seleção dos adjuvantes e também determinar a sua dosagem de saturação [3].

5.2.2.1. INFLUÊNCIA DAS CINZAS VOLANTES

Foram ensaiadas pastas com CEM II/A-L 42,5R para diferentes razões volumétricas entre água e finos (V_w/V_p) e de cinzas volantes e finos (V_{fa}/V_p), no instante $t=0$ e $t=30$ minutos, como ilustra a Figura 5-8 e 5-9.

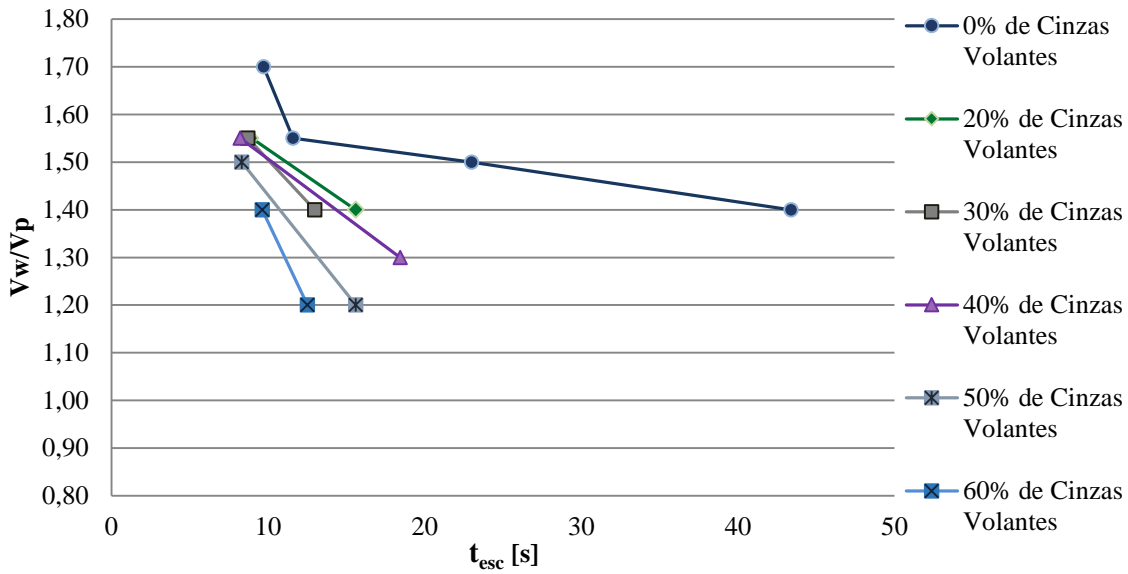


Figura 5-8 – Efeito das cinzas volantes na viscosidade das pastas, com $V_{fa}/V_p = 0\%$ a 60% , com $t=0$.

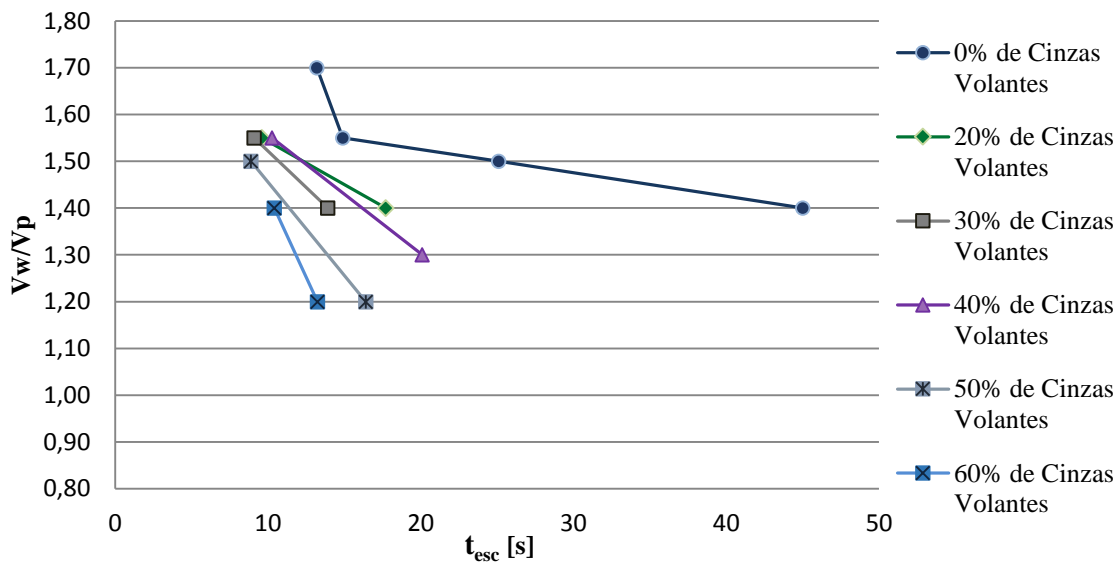


Figura 5-9 – Efeito das cinzas volantes na viscosidade das pastas, com $V_{fa}/V_p = 0\%$ a 60% , com $t=30$.

Através da Figura 5-8, verifica-se que a adição de cinzas volantes na composição conduz a tempos de escoamento cada vez menores, pois as cinzas volantes possuem partículas de dimensão reduzida que ajudam a reduzir o atrito interno e consequentemente levam a tempos de escoamento inferiores. As composições sem adição de cinzas volantes apresentam tempos de escoamento muito superiores às das composições com adição de cinzas volantes.

Passados os 30 minutos, é possível verificar na Figura 5-9 que o tempo de escoamento não aumentou significativamente. Verifica-se um aumento geral cerca de 8% do tempo de escoamento, sendo este um aumento praticamente insignificante.

5.2.2.2. INFLUÊNCIA DO SUPERPLASTIFICANTE

De modo a permitir uma melhor seleção dos adjuvantes a serem utilizados nas composições BAC e a sua dosagem de saturação, foram realizados ensaios em pastas com cimento CEM II/A-L 42,5R, com $V_{fa}/V_p=30\%$ e variando as dosagens de superplastificante $V_{sp}/V_p=0\%$ a 1.2%, no instante $t=0$ e $t=30$ minutos. Na Figura 5-10 e 5-11 são apresentadas a influência do superplastificante no tempo de escoamento das pastas, com diferentes V_w/V_p .

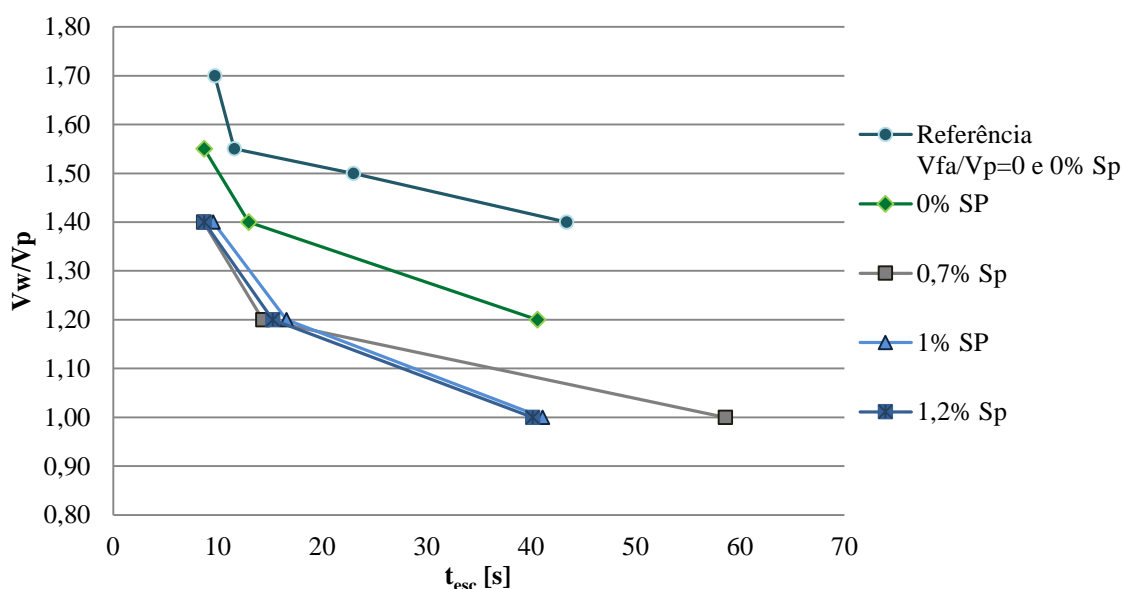


Figura 5-10 – Efeito do superplastificante na viscosidade da pasta, com $V_{fa}/V_p=30\%$ e $V_{sp}/V_p=0\%$ a 1.2%, com $t=0$.

Através da Figura 5-10, verifica-se que adição de superplastificante na composição conduz a tempos de escoamento cada vez menores. No entanto, após um determinado volume de superplastificante, denominado por dosagem de saturação do superplastificante, levam a tempos de escoamentos demasiado reduzidos, significa que ocorre segregação. A introdução de superplastificante em composições com adição de cinzas volantes proporciona tempos de escoamento inferiores às das composições sem adição de cinzas volantes. Contudo, podemos observar na Figura 5-10, com a adição do superplastificante podemos obter os mesmos tempos de escoamentos com menores quantidades de água.

Passados os 30 minutos, é possível verificar na Figura 5-11, que o tempo de escoamento não aumentou significativamente. É de salientar que nas pastas sem superplastificante, o tempo de escoamento praticamente não aumentou, isto é, significa que estas mantêm a mesma viscosidade, enquanto que nas pastas com superplastificante a sua viscosidade aumenta ligeiramente no decorrer do tempo.

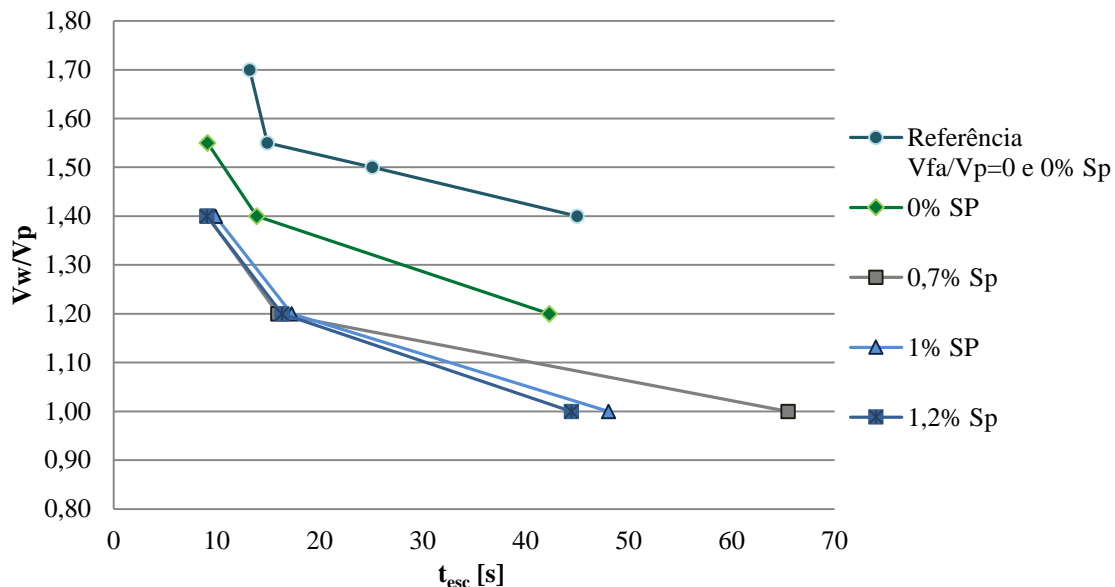


Figura 5-11 – Efeito do superplastificante na viscosidade da pasta, com $V_{fa}/V_p = 30\%$ e $V_{sp}/V_p = 0\%$ a 1,2%, com $t = 30$.

5.3. ARGAMASSAS

O BAC pode ser encarado como sendo constituído por agregados dispersos numa matriz formada pela argamassa [9]. Uma justificação do estudo nas argamassas reside na maior facilidade da sua execução comparativamente ao betão, com a possibilidade de ensaiar volumes menores e maior rapidez na execução de amassadura e ensaios.

O principal objetivo na análise das argamassas, consistiu no estudo das alterações provocadas pelos agregados finos no comportamento reológico da argamassa. Como também na produção de composições de argamassas que cumprissem todos os critérios ao nível do seu estado fresco e endurecido. Uma adequada viscosidade, para determinado espalhamento da argamassa são parâmetros importantes no estado fresco, sem esquecer que um bom nível de resistência à compressão é também um parâmetro muito importante.

5.3.1. AVALIAÇÃO NO ESTADO FRESCO

Foram ensaiadas 13 composições, com diferentes razões de V_w/V_p , V_{fa}/V_p , V_s/V_m , V_{Sp}/V_p e V_{PI}/V_p . Inicialmente começou-se por ensaiar uma composição com um V_w/V_p , adquirido nos ensaios das pastas, onde apresenta um melhor comportamento reológico.

As restantes composições foram surgindo consoante algumas necessidades no comportamento do estado fresco, onde aquelas em que se conseguiu o espalhamento e viscosidade adequada, moldaram-se prismas para avaliar a resistência à compressão e à flexão no estado endurecido. Na Tabela 5-1 são apresentadas as várias composições de argamassas ensaiadas em laboratório.

Tabela 5-1 – Composições de argamassas ensaiadas.

| Composição | V_w/V_p | V_{fa}/V_p [%] | V_s/V_m [%] | V_{s1}/V_m [%] | V_{s2}/V_m [%] | $V_{Sp}/V_p + V_{PI}/V_p$ [%] |
|------------|-------------|---------------------|------------------|---------------------|---------------------|----------------------------------|
| 1 | 1,04 | 40 | 45,71 | 47 | 53 | 1,55 |
| 2 | 1,07 | 40 | 44,93 | 45 | 55 | 1,6 |
| 3 | 1,02 | 40 | 45,56 | 46 | 54 | 1,1 |
| 4 | 0,97 | 35 | 47,98 | 48 | 52 | 1,2 |
| 5 | 1,04 | 35 | 45,20 | 48 | 52 | 1,2 |
| 6 | 1,07 | 35 | 44,64 | 50 | 50 | 1,3 |
| 7 | 1,00 | 40 | 45,31 | 47 | 53 | 1,3 |
| 8 | 1,03 | 40 | 44,84 | 47 | 53 | 1,4 |
| 9 | 1,04 | 40 | 44,22 | 43 | 57 | 1,3+0,7 |
| 10 | 1,04 | 40 | 44,35 | 43 | 57 | 0,85+1,05 |
| 11 | 1,04 | 40 | 44,29 | 43 | 57 | 1,2+0,7 |
| 12 | 1,04 | 40 | 44,35 | 43 | 57 | 1,0+0,7 |
| 13 | 1,04 | 40 | 44,35 | 43 | 57 | 1,1+0,7 |

Durante o estudo das argamassas foi necessário introduzir o plastificante juntamente com o superplastificante, pois somente com o superplastificante não foi possível chegar aos resultados pretendidos no estado fresco. Perante grandes espalhamentos, as composições apresentam baixos tempos de escoamentos, o que significa que possui uma baixa viscosidade, isto é, apresenta-se demasiado fluida. Portanto, a introdução do plastificante ajudou a obter uma melhor viscosidade da composição mesmo obtendo grandes espalhamentos. Pois o pretendido é obter um espalhamento significativo ($G_m > 5$) paralelamente a um tempo de escoamento razoável ($> 8s$).

Nas Figuras 5-12 e 5-13 são apresentadas as áreas de espalhamento relativo e o tempo de escoamento de cada composição ensaiada.

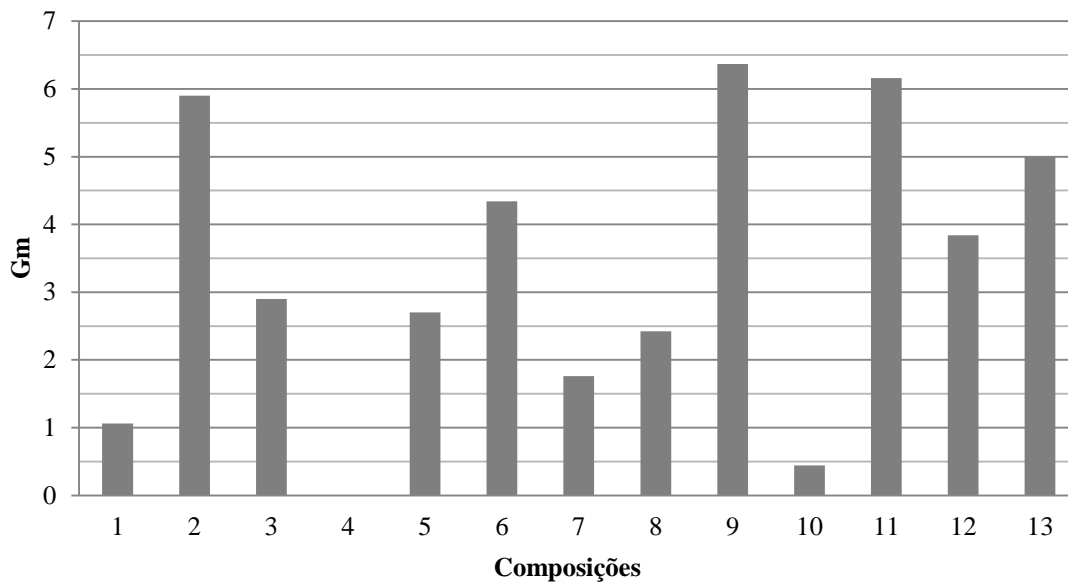


Figura 5-12 – Áreas de espalhamento relativas (Gm) das várias composições de argamassas.

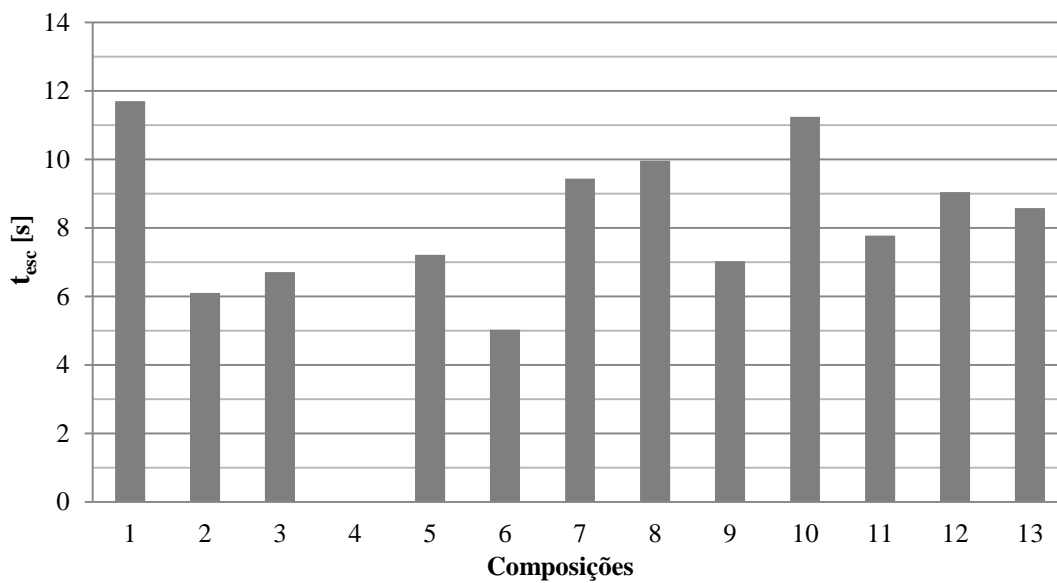


Figura 5-13 – Tempo de escoamento (t_{esc}) das várias composições de argamassas.

Na análise dos gráficos é possível verificar que a composição 4, não obteve espalhamento nem conseguiu escoar no funil V, o que significa que estava demasiado consistente. Contudo os maiores espalhamentos encontram-se na Composição 2, 9, 11 e 13, todavia, apenas a Composição 13 obteve um espalhamento adequado e conseqüentemente um tempo de escoamento apropriado.

5.3.2. AVALIAÇÃO NO ESTADO ENDURECIDO

Foram realizados prismas apenas em algumas das composições de argamassas mais relevantes, nomeadamente a composição 9 e 13, apresentando elevadas resistências à compressão. As figuras 5-14 e 5-15, apresentam a resistência à flexão e à compressão, respetivamente.

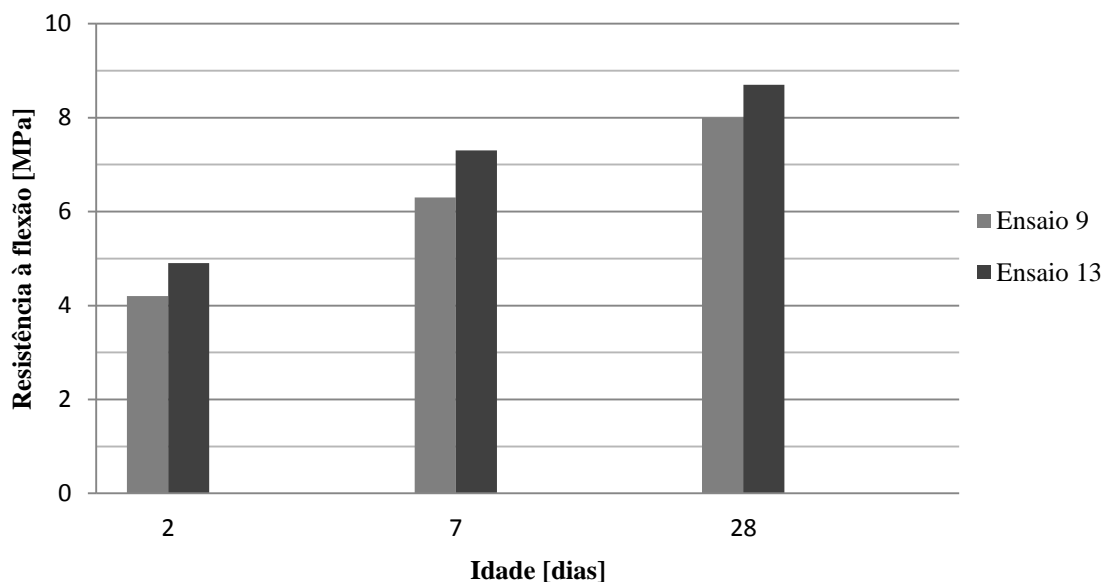


Figura 5-14 – Resistencia à flexão da composição 9 e 13.

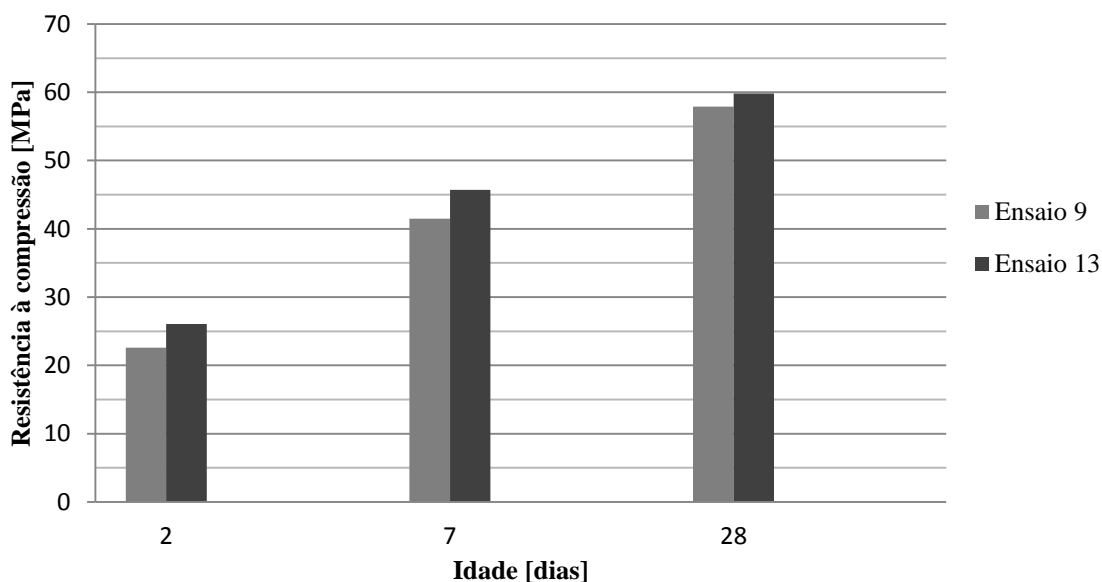


Figura 5-15 – Resistencia à compressão da composição 9 e 13.

Como podemos constatar nas Figuras 5-14 e 5-15, que a composição de argamassa 13 apresenta uma maior resistência à flexão e à compressão em todos os dias ensaiados. Possivelmente, tal facto é

devido à quantidade de plastificante e de superplastificante (causa um atraso na hidratação por haver maior dispersão das partículas).

Apesar do superplastificante ser um grande redutor de água, é necessário ajustar a sua percentagem para uma dosagem ótima, para um espalhamento ideal no tempo pretendido. A diminuição ligeira existente entre a composição 9 e 13 ganhou outras particularidades, como a viscosidade e resistência, o que significa a permanência adequada da água na argamassa, quer perante as características dos materiais ou em relação ao ligante é importante.

Observa-se que na composição 9 havia demasiada fluidez, pelo facto do superplastificante não ter atuado devidamente na argamassa, perante uma dosagem excessiva ou de saturação do superplastificante. No entanto a Composição 13, obteve menor fluidez e uma maior viscosidade, pois o superplastificante foi absorvido com maior eficácia, perfazendo assim maior resistência. Nesta mesma composição conseguiu-se os parâmetros pretendidos nos ensaios no estado fresco e endurecido, o que leva a uma composição de argamassa ótima.

5.4. BETÕES

Durante o estudo foram realizadas 15 composições de BAC recorrendo ao método tentativa-erro. Das composições realizadas, de seguida serão expostas as composições mais relevantes para este estudo do BAC, os problemas associados a cada composição e as expectativas geradas pelos resultados obtidos.

Através dos resultados obtidos no estudo das pastas e argamassas, nomeadamente nas argamassas, iniciou-se o estudo dos betões mantendo os mesmos parâmetros na composição ótima encontrada no estudo das argamassas (Composição 13). Adicionou-se 30% dos agregados grossos ($V_g/V_{g,lim} = 48.77\%$) à composição, nomeadamente 50% de brita 0, 35% de brita 1 e 15% de brita 2 (V_{b_0}/V_g , V_{b_1}/V_g e V_{b_2}/V_g). Após a realização desta, verificou-se que esta composição não era a mais adequada, pois apresentava demasiada fluidez no seu estado fresco e com forte indício a ocorrência de segregação.

Nas seguintes composições ensaiadas, considerou-se vantajoso não utilizar a brita 2 (Brita 11/22), pois estas possuem uma forma angulosa e porque devem ser preferencialmente utilizados agregados com granulometrias mais finas, de modo a que a redução da fluidez seja mínima e obter um aspeto mais homogéneo da mistura. Deste modo, com uma dimensão máxima do agregado mais baixa, isto é, 16 mm proporciona composições mais económicas e ainda podem apresentar um melhor comportamento em termos de trabalhabilidade [18]. Ao realizar esta tarefa verificou-se que havia um melhor

comportamento do BAC no estado fresco, pois diminuindo a dimensão dos agregados melhorava a coesão entre as partículas da mistura.

Ao longo do estudo dos BACs foram realizadas várias alterações consoante os resultados obtidos nos ensaios no estado fresco e endurecido. Inicialmente como a Composição 1 estava demasiado fluida, havendo a necessidade de baixar o V_w/V_p , os restantes parâmetros foram sujeitos a pequenos ajustamentos consoante a necessidade de cada composição. A Tabela 5-2 apresenta as variações dos principais parâmetros nas várias composições BAC estudadas em laboratório.

Tabela 5-2 – Variações dos principais parâmetros nas várias composições BAC.

| V_w/V_p | V_{fa}/V_p [%] | $V_{Sp}/V_p + V_{PI}/V_p$ [%] |
|-------------|---------------------|----------------------------------|
| 0,92 a 1,26 | 20 a 45 | 0,8 a 1,4 + 0,6 a 0,9 |

5.4.1. FORMULAÇÃO DE COMPOSIÇÕES

A Tabela 5-3, apresenta as quantidades dos vários constituintes da Composição 2 de BAC. Nesta composição as principais alterações realizadas para além da diminuição da quantidade de água, foi o aumento da dosagem de cinzas volantes, perfazendo-se num aumento do ligante (480 kg). Uma outra alteração foi a diminuição do adjuvante na mistura, pois a composição anterior apresentava demasiada fluidez.

Tabela 5-3 – Quantidades da Composição 2.

| | Cimento | Cinzas volantes | Água | Sp+PI | Areia do mar | Areia britada | Brita 0 | Brita 1 |
|---|---------|-----------------|------|-----------|--------------|---------------|---------|---------|
| Composição 2 [Kg/m ³] | 280 | 200 | 175 | 4,01+4,01 | 309 | 726 | 583 | 199 |

Perante a avaliação da Composição 2 no estado endurecido, notou-se que a resistência à compressão era baixa relativamente ao pretendido, como podemos constatar na Tabela 5-4. O objetivo consiste em idealizar uma composição de BAC com propriedades de resistência à compressão iguais ou superiores ao C30/37.

Tabela 5-4 – Resistência à compressão da Composição 2.

| Idade [Dias] | Rotura [MPa] |
|-----------------|-----------------|
| 2 | 13,2 |
| 7 | 21,6 |
| 28 | 36,1 |

Como podemos verificar na Tabela 5-4, aos 7 dias de idade o provete teve uma resistência de 21,6 MPa, no qual deveria ter apresentado um valor um pouco superior, ou seja, aos 7 dias de idade devia ser pelo menos de 30 MPa. Perante este facto foi necessário introduzir uma maior dosagem de cimento de modo aumentar a sua resistência.

Após várias dosagens de cimento e cinzas, conseguiu-se chegar a uma composição, nomeadamente a Composição 7, em que as suas propriedades no estado endurecido fossem próximas ao pretendido. A Tabela 5-5 apresenta as quantidades dos vários constituintes da Composição 7 de BAC.

Tabela 5-5 – Quantidades da Composição 7.

| Composição 7 [Kg/m³] | Cimento | Cinzas volantes | Água | Sp+Pl | Areia do mar | Areia britada | Brita 0 | Brita1 |
|--|----------------|----------------------------|-------------|--------------|-------------------------|--------------------------|----------------|---------------|
| | 330 | 120 | 175 | 5,40+3,48 | 325 | 763 | 525 | 251 |

Uma grande alteração na Composição 7, foi o aumento da dosagem de cimento e a diminuição das cinzas volantes, perfazendo-se numa diminuição da quantidade de ligante (450 Kg) na composição, pois verificou-se que não seria necessário tanta quantidade de ligante e assim tornando-se uma composição um pouco mais económica. O aumento da dosagem de cimento consiste em adquirir uma maior resistência no estado endurecido. Outra alteração foi o aumento do superplastificante na mistura, pois o aumento do cimento diminui a quantidade de água livre na mistura, sendo necessário aumentar a quantidade de superplastificante de modo a obter uma boa trabalhabilidade ou semelhante ao adquirido anteriormente. Na Tabela 5-6 podemos verificar que a resistência à compressão é superior nesta composição. Relativamente ao estado fresco do BAC, este apresenta uma boa trabalhabilidade, nomeadamente uma elevada fluidez, mas em contrapartida apresenta uma baixa viscosidade.

Tabela 5-6 – Resistência à compressão da Composição 7.

| Idade [Dias] | Rotura [MPa] |
|-------------------------|-------------------------|
| 2 | 17,1 |
| 7 | 28,0 |
| 28 | 40,1 |

Como o BAC é um betão sensível, requer mais cuidados e atenção às variações dos materiais constituintes, pois por vezes as suas características no estado fresco alteram-se devido a essas variações. Ao longo do estudo de composições BAC, foram surgindo algumas dificuldades no seu dimensionamento. Uma das principais dificuldades foram as ligeiras alterações dos agregados, pois estes por vezes podem apresentar uma alteração na granulometria, como também no seu teor de

humidade. Uma das possibilidades para contornar esta situação, é manter os materiais sempre em locais protegidos e com algum rigor controlar o teor de humidade e, sempre que se observar algum desvio de comportamento da mistura recorrer à verificação das suas propriedades.

Procedeu-se à otimização desta composição, pois o objetivo final passava por um fornecimento comercial, para as aplicações descritas no capítulo 6. Obtida a composição pretendida (Composição 15) apresenta-se na Tabela 5-7 as quantidades de cada constituinte da composição.

Tabela 5-7 – Quantidades da Composição 15.

| Composição 15 [Kg/m³] | Cimento | Cinzas volantes | Água | Sp+Pl | Areia do mar | Areia britada | Brita 0 | Brita1 |
|---|---------|--------------------|------|-----------|-----------------|------------------|---------|--------|
| | 337 | 103 | 186 | 5,72+3,08 | 419 | 555 | 566 | 297 |

Nesta última fase de estudo, verificaram-se todas as limitações conhecidas na formulação de composições de BAC, deste modo os parâmetros utilizados encontram-se dentro das limitações estudadas na bibliografia. Na otimização da composição procedeu-se apenas a pequenos ajustes da mistura, como por exemplo, o melhoramento da pasta e dos agregados.

5.4.2. AVALIAÇÃO NO ESTADO FRESCO

Em todas as composições estudadas, foram realizados ensaios de caracterização no estado fresco, sobretudo o ensaio de espalhamento, pois este permite ver a sua fluidez, viscosidade e segregação por observação visual e trata-se de um procedimento simples e de rápida execução. Os restantes ensaios apenas foram realizados em composições benéficas para o estudo de BAC.

As Figuras 5-16 e 5-17 apresentam os vários espalhamentos das composições ensaiadas, no tempo $t=0$ e $t=30$. Podemos verificar, na Figura 5-16 que os espalhamentos são relativamente próximos uns dos outros, pois as variações dos materiais constituintes foram pouco significativas.

No entanto obtiveram-se espalhamentos entre 500 mm e os 800 mm. Como o principal objetivo consistia na realização de uma composição a fornecer para uma aplicação prática, considerou-se que a composição devia apresentar uma classe espalhamento SF2 (660 a 750 mm) logo após amassadura. A qual, no momento da chegada ao local de aplicação devia apresentar um espalhamento no mínimo de 500 mm. Como podemos constatar na Figura 5-16 praticamente todas as composições apresentam espalhamentos superiores a 660 mm.

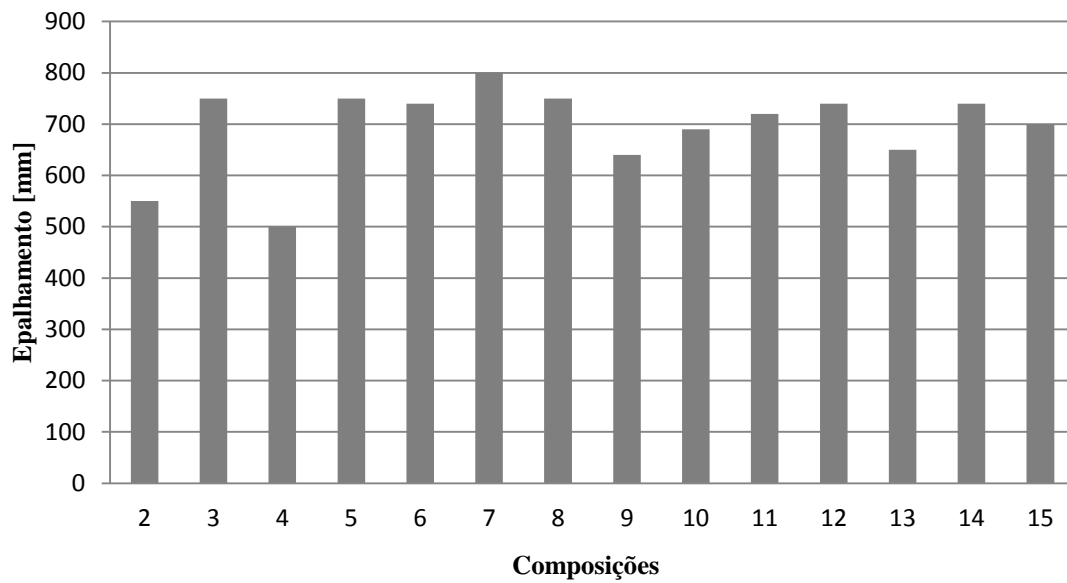


Figura 5-16 – Espalhamento das várias composições estudadas, com t=0.

A Composição 15, como anteriormente referido, foi a composição em que se obteve melhores características quer a nível do estado fresco, quer no estado endurecido comparativamente às restantes composições. No entanto muitas das composições ensaiadas apresentam espalhamentos superiores, mas em contrapartida nos restantes parâmetros, nomeadamente a viscosidade e a resistência à compressão não são os mais adequados para o BAC a fornecer.

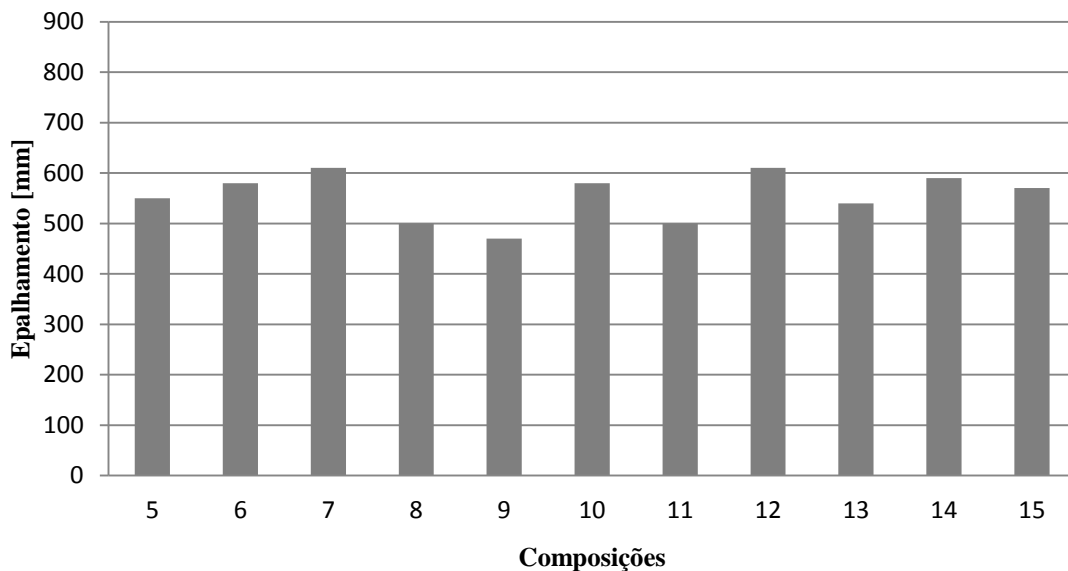


Figura 5-17 – Espalhamento das várias composições estudadas, com t=30.

De acordo com a Figura 5-17, podemos visualizar os espalhamentos de algumas composições, 30 minutos após amassadura. Pois para o fornecimento é necessário garantir que o BAC tenha uma boa

trabalhabilidade desde o início ao fim da aplicação. Podemos observar na figura, que os espalhamentos são relativamente semelhantes e na maioria com valores superiores aos pretendidos. Indiscutivelmente pode-se verificar que após 30 minutos há uma perda significativa de trabalhabilidade no betão fresco. O espalhamento diminui cerca de 23%, não sendo uma perda muito significativa. A Composição 15, apresenta logo após a amassadura um espalhamento de 700 mm e por observação visual é possível verificar a não ocorrência de segregação. Após 30 minutos, a composição apresenta um espalhamento de 570 mm e com bom aspeto visual.

Relativamente à viscosidade das composições ensaiadas, estas não apresentam elevadas viscosidades, pois realizaram-se composições com alguma fluidez, pois no ensaio do funil V, o tempo de escoamento é relativamente curto. Como podemos constatar na Figura 5-18, a Composição 15 apresenta uma maior viscosidade, sendo benéfico na sua colocação, pois a correta viscosidade do BAC reduz a segregação, ajuda no preenchimento da cofragem e melhora o envolvimento das armaduras. Para além disso, apresenta melhor acabamento superficial da peça betonada e a sua resistência.

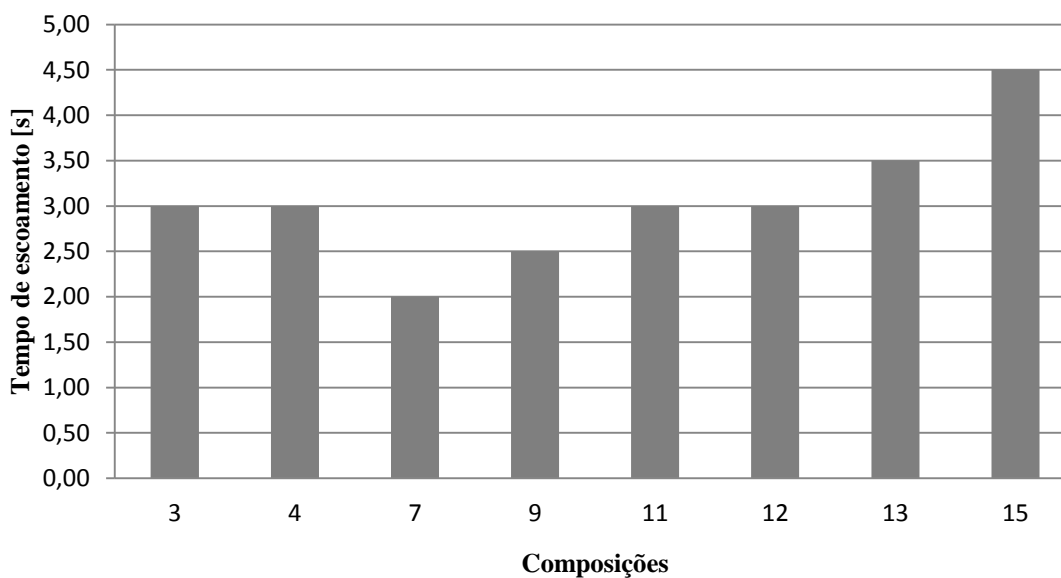


Figura 5-18 – Tempo de escoamento no funil V das várias composições estudadas.

É possível verificar na Figura 5-18, que os tempos de escoamentos nas várias composições ensaiadas são muito curtos, o que significa que possuem uma baixa viscosidade, pois 10 segundos é o tempo de escoamento aconselhado para composições BAC.

Nas Figuras 5-19 e 5-20, são apresentados os resultados obtidos nos ensaios da caixa L e segregação de algumas das composições estudadas.

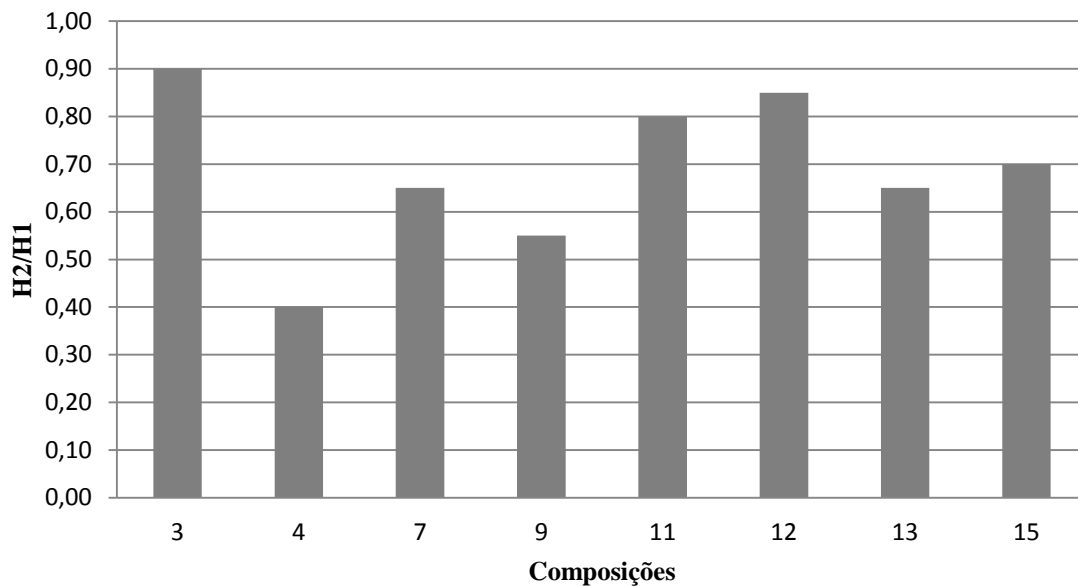


Figura 5-19 – Racio da caixa L das várias composições estudadas.

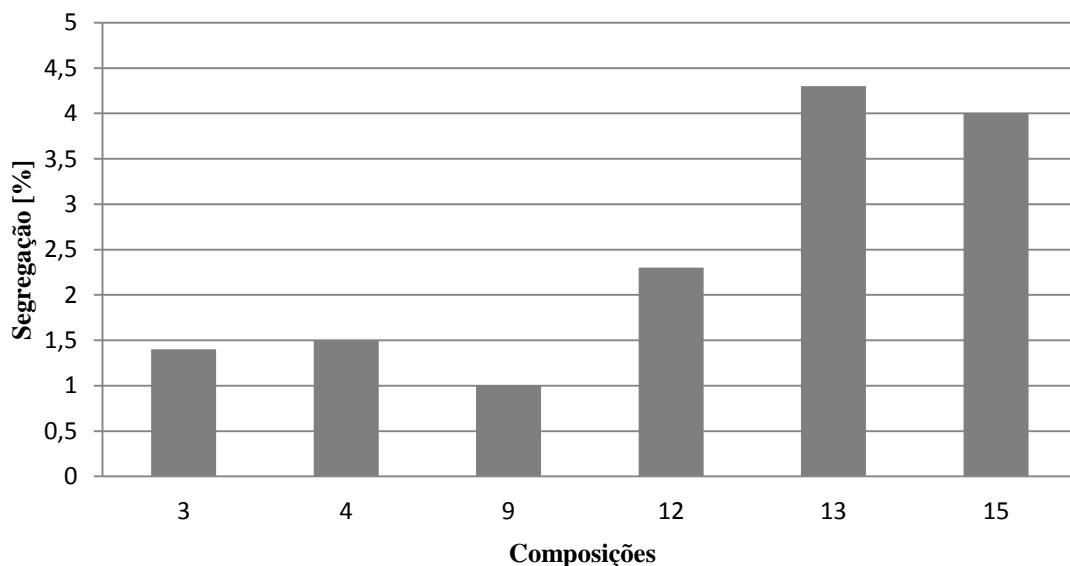


Figura 5-20 – Percentagem de segregação das várias composições estudadas.

Pela análise da Figura 5-19, verifica-se que o betão da Composição 15 apresenta dificuldades de passagem entre as armaduras, não sendo aconselhado para peças densamente armadas. Note-se que o valor H2/H1 é inferior a 0.80, contudo importa referir que foram usados 3 varões na caixa L (ou seja, o ensaio mais exigente – que simula peças densamente armadas). Já a Figura 5-20 demonstra que os betões produzidos não têm qualquer problema de segregação (<15%), facto que pode conduzir a imperfeições no acabamento superficial.

5.4.3. AVALIAÇÃO NO ESTADO ENDURECIDO

Para a avaliação do BAC no estado endurecido foram realizados diversos provetes cúbicos, com 150 mm de aresta para a execução dos ensaios de resistência à compressão aos 2, 3, 7 e 28 dias.

Na Figura 5-21, são apresentadas a resistência à compressão das principais composições ensaiadas e referidas anteriormente.

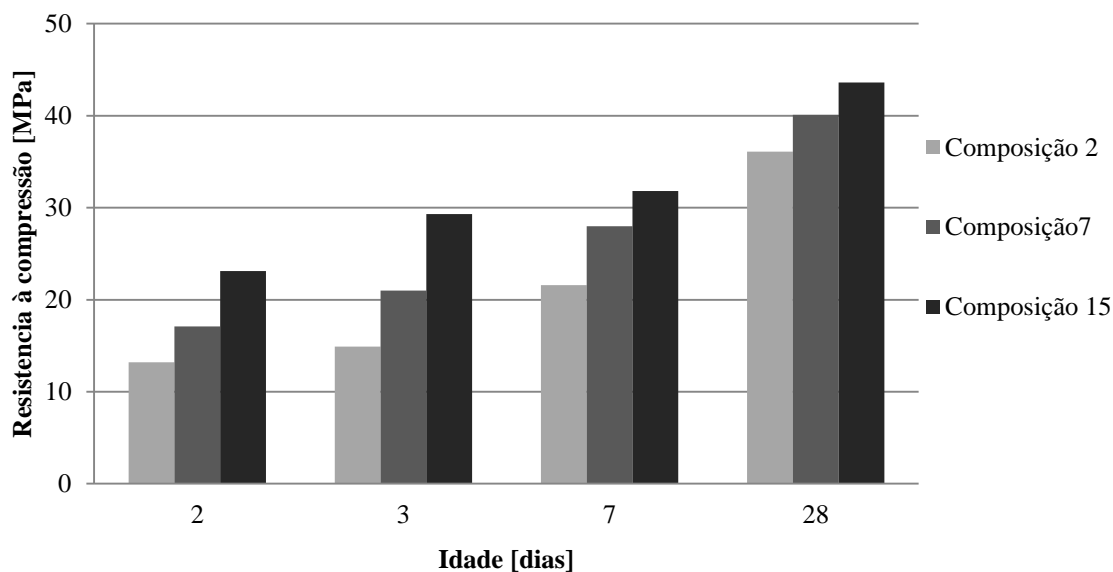


Figura 5-21 – Resistência à compressão das Composições 2, 7 e 15.

Desta forma, foi possível visualizar a crescente evolução de resistência ao longo dos dias de cada composição ensaiada. Perante a Figura 5-21 podemos constatar que a resistência das principais composições ensaiadas, aumentam com o decorrer dos dias, verifica-se que há um acréscimo de resistência à compressão de composição para composição, sendo a Composição 15 a que apresenta maior resistência no decorrer da sua idade. Nota-se que na evolução das composições houve algumas melhorias nas suas características. Além disso, ainda é possível verificar que a Composição 2 e 7 apresentam nos primeiros dias de idade, nomeadamente aos 2 e 3 dias uma resistência à compressão muito inferior à resistência da Composição 15. Sem dúvida que a Composição 15 ou a composição ótima selecionada para o fornecimento solicitado apresenta um crescimento de resistência normal e adequado. Esta apresenta valores de resistência à compressão adequados, equivalentes ou superiores a um betão convencional C30/37 e ainda apresentam resistências superiores relativamente às restantes composições ensaiadas. Este aumento de resistência na Composição 15, deve-se ao facto do aumento de finos na composição, nomeadamente a ligeira subida de cimento e ao aumento de areia do mar. Também o aumento do superplastificante traduz uma maior resistência à composição pelo facto de permitir reduzir a quantidade de água da amassadura (deste modo reduzindo a razão água / finos).

6

APLICAÇÃO PRÁTICA

6.1. INTRODUÇÃO

Foi solicitado ao Laboratório Cimentos Madeira, um fornecimento de betão para o preenchimento de vigas armadas onde a aderência era importante. Com o intuito de conhecer melhor as características numa produção comercial, tratando-se de uma aplicação que possuía uma betonagem de difícil acesso e onde o envolvimento das armaduras era fundamental, sugeriu-se o fornecimento de BAC, pois o mesmo possui algumas características benéficas nesta aplicação. Esta aplicação tornava-se uma excelente aquisição de conhecimentos a nível industrial muito importante para a comercialização do produto, pois o Grupo Cimentos Madeira pretendia lançar o produto no mercado.

Visto que a tecnologia do BAC ainda é uma novidade na RAM, a abordagem experimental assume uma importância especial, exigindo um contacto mais próximo entre o laboratório e a central de produção de betão. Assim, o presente capítulo aborda várias dificuldades nesta primeira aplicação prática, bem como todo o seu procedimento, desde a produção do betão à desmoldagem da cofragem. Os principais objetivos desta experiência, prendem-se essencialmente no desenvolvimento de métodos de produção e colocação aplicáveis ao BAC e otimização, de forma a conseguir uma produção mais competitiva diminuindo os custos globais.

A composição utilizada nesta aplicação, previamente estudada em laboratório, foi caracterizada no estado fresco e endurecido, recorrendo aos mesmos ensaios utilizados durante os estudos em laboratório, onde permitiu verificar diferenças entre as misturas produzidas no laboratório e nas condições reais de produção.

6.2. DESCRIÇÃO DO ENSAIO À ESCALA REAL

6.2.1. ELEMENTOS BETONADOS

A aplicação prática realizou-se no LREC (Laboratório Regional de Engenharia Civil) e consistiu na betonagem de vigas. Numa primeira fase foram betonadas 8 vigas, com dimensões de 4,30×0,20×0,40 metros. Na segunda fase da aplicação, foram betonadas mais 8 vigas semelhantes às anteriormente betonadas na primeira fase e 23 provetes cúbicos, 21 cilíndricos e 3 prismas.

As cofragens utilizadas em ambas aplicações, foram cofragens habitualmente utilizadas no betão convencional, ou seja, cofragens recuperáveis racionalizadas. Foram utilizados painéis de contraplacado de madeira com dimensões de 1,25×2,5 metros.

6.2.2. AMASSADURA, TRANSPORTE E COLOCAÇÃO

A amassadura do BAC foi realizada na central de betão do Centro de Produção da Fundoa, da empresa Beto Madeira, S.A. Efetuou-se na primeira fase uma primeira amassadura de 2 m³, em dois ciclos de amassaduras de 1 m³ e numa segunda amassadura foram realizados mais 2 m³, novamente em dois ciclos de amassadura, perfazendo os 4 m³. Na segunda fase da aplicação apenas efetuou-se uma amassadura de 4 m³, em quatro ciclos de amassadura de 1 m³. Para a produção do BAC na central relativamente ao betão convencional, apenas foram realizadas alterações, nas quantidades da composição, pois o BAC apresenta uma elevada quantidade de finos, entre outros aspetos, já referidos anteriormente. Para além disso, também se alterou o tempo de mistura, aumentando de 60 segundos para 180 segundos, pelo facto do BAC ser constituído por muita quantidade de adjuvante, sendo necessário maior tempo de mistura.

Após a aplicação da primeira fase, verificou-se que o betão produzido na central possuía pequenas alterações relativamente ao betão produzido no laboratório. Essas alterações verificaram-se essencialmente ao nível da fluidez da composição, uma vez que os espalhamentos do BAC obtidos em laboratório foram inferiores aos espalhamentos obtidos na central de produção, porém este apresentava uma pequena ocorrência de segregação. Esta alteração deve-se ao facto da produção do betão na central ser mais eficiente que no laboratório, na medida que se consegue obter uma amassadura mais homogénea. Perante a grande fluidez do betão produzido na primeira fase, decidiu-se, introduzir na segunda fase da aplicação um modelador de viscosidade (RheoMATRIX 175) [46], de modo obter maiores espalhamentos, com maior viscosidade e sem que haja segregação das partículas.

Na Tabela 6-1 apresenta-se as composições BAC utilizada nas duas fases para betonagem destes elementos.

Tabela 6-1 – Composições fornecidas.

| Materiais [Kg/m³] | Composição 1ª Fase | Composição 2ª Fase |
|-------------------------------------|---------------------------|---------------------------|
| Cimento (CEM II/A-L 42,5R) | 337 | 337 |
| Cinzas | 103 | 103 |
| Areia do mar (0/2) | 419 | 419 |
| Areia britada (0/4) | 555 | 555 |
| Brita 0 (4/10) | 566 | 566 |
| Brita 1 (8/16) | 297 | 297 |
| Água | 186 | 186 |
| Plastificante (Pozzolith 390N) | 5,56 L | 5,56 L |
| Superplastificante (Sky 548) | 2,61 L | 2,61 L |
| RheoMATRIX 175 | - | 2,00 L |

Realizaram-se todos os ensaios em laboratório de modo a verificar a conformidade da composição, com o novo adjuvante. Os resultados obtidos em laboratório com a introdução do modelador de viscosidade (Mv), foram satisfatórios.

Na Tabela 6-2, são apresentados os resultados obtidos em laboratório da composição utilizada na segunda fase.

Tabela 6-2 – Caracterização do betão no estado fresco, em laboratório da composição com o modelador de viscosidade.

| Caracterização do betão no estado fresco | | Classes |
|---|------|----------------|
| Ensaio de espalhamento – Diâmetro de espalhamento [mm] | 700 | SF2 |
| Ensaio do funil V - Tempo de escoamento [s] | 2,43 | VF1 |
| Ensaio da caixa L – Índice de capacidade de passagem [-] | 0,7 | - |
| Ensaio de segregação – Parcela segregada [%] | 3 | SR2 |

Com a introdução do modelador de viscosidade, a mistura apresenta um espalhamento adequado, uma viscosidade um pouco baixa e uma capacidade de passagem relativamente boa, quanto à parcela segregada, 3% não se trata propriamente de um número muito relevante, visto ser bem inferior a 15%.

O transporte do betão desde da central de betão até ao local de betonagem, foi realizado através de um camião betoneira. A betonagem dos elementos foi realizada através de carros de mão, pois as vigas encontravam-se no chão dentro de um edifício. A betonagem foi uma das limitações, pois pelo facto das vigas se encontrarem no interior do edifício a descarga do betão não foi contínua, o que gerou alguns atrasados na betonagem. Não foram utilizadas quaisquer utensílios de vibração durante a colocação do betão na cofragem em ambas as fases.

6.3. PROPRIEDADES DO BAC NO ESTADO FRESCO

Durante aplicação do BAC, foram realizados ensaios para caracterização do BAC no seu estado fresco. Os ensaios realizados foram os mesmos que se utilizou em laboratório, executados após amassadura, e à chegada ao local de descarga do betão.

6.3.1. PRIMEIRA FASE

Na primeira fase, a amostra do betão foi retirada do camião betoneira após a sua descarga da misturadora na central de produção. Os ensaios foram realizados de igual forma aos do laboratório de acordo com as normas. Iniciou-se por realizar o ensaio de espalhamento, por ser o mais indicativo da sua classificação. Na Tabela 6-3, são apresentados os resultados obtidos na primeira fase, logo após à descarga da misturadora na central de produção.

Tabela 6-3 – Caracterização do betão no estado fresco, logo após amassadura da 1ª fase.

| Caracterização do betão no estado fresco | | Classes |
|---|------|----------------|
| Ensaio de espalhamento – Diâmetro de espalhamento [mm] | 730 | SF2 |
| Ensaio do funil V - Tempo de escoamento [s] | 2,3 | VF1 |
| Ensaio da caixa L – Índice de capacidade de passagem [-] | 0,65 | - |

Podemos verificar que o objetivo foi efetivamente alcançado, pois pretendia-se obter uma classe de espalhamento SF2. Portanto, até ao local da betonagem era pretendido um betão com uma boa trabalhabilidade ou semelhante à de saída da central, pois o transporte demorava cerca de 20 minutos

até chegar ao local. O tempo de transporte, fez com que o betão perdesse alguma trabalhabilidade, como já tinha sido verificado nos estudos anteriores. Relativamente às restantes características do betão fresco, podemos verificar que a sua viscosidade não era muito elevada e apresentava uma capacidade de passagem relativamente boa. Na Figura 6-1 é apresentado o ensaio de espalhamento realizado na central de produção de betão da Fundoa.



Figura 6-1 – Ensaio de espalhamento do BAC da 1ª fase, logo após a amassadura.

Na análise da Figura 6-1, podemos verificar no ensaio de espalhamento que a composição apresenta um aspeto consideravelmente homogéneo, pois é visível a dispersão dos agregados no espalhamento. Observa-se uma pequena ocorrência de segregação, pois este apresentava-se demasiado líquido.

Na chegada ao local de aplicação, realizou-se novamente o ensaio de espalhamento para verificar a trabalhabilidade do betão, dado que o mesmo deveria apresentar um diâmetro de 500 mm no mínimo. Como podemos constatar na Figura 6-2, o diâmetro de espalhamento foi de 560 mm e ainda é possível verificar alteração na consistência da composição.



Figura 6-2 – Ensaio de espalhamento do BAC da 1ª fase, no local da betonagem.

6.3.2. SEGUNDA FASE

Na segunda fase, realizou-se apenas o ensaio de espalhamento na central de produção, logo após a amassadura, de modo a poder controlar e se necessário afinar a composição. A amostra do betão foi retirada de igual forma à primeira fase.

No ensaio de espalhamento na central de produção de betão, a composição fornecida apresenta um diâmetro de espalhamento de 730 mm, e como podemos observar na Figura 6-3 o betão apresenta um aspeto muito mais homogéneo e com maior viscosidade, pois este espalhou lentamente e sem qualquer vestígio de ocorrência de segregação.



Figura 6-3 – Ensaio de espalhamento do BAC da 2ª fase, logo após a amassadura.

Já na chegada ao local de betonagem, realizou-se os restantes ensaios de igual forma aos do laboratório de acordo com as normas. Na Tabela 6-3, apresenta-se os resultados obtidos na segunda fase, logo após à chegada do camião betoneira, ou seja, passados sensivelmente 20 minutos.

Tabela 6-4 – Caracterização do betão no estado fresco, da segunda fase na chegada ao local de betonagem.

| Caracterização do betão no estado fresco | | Classes |
|--|-----|---------|
| Ensaio de espalhamento – Diâmetro de espalhamento [mm] | 660 | SF2 |
| Ensaio do funil V - Tempo de escoamento [s] | 3,5 | VF1 |
| Ensaio da caixa L – Índice de capacidade de passagem [-] | 0,7 | - |

Podemos verificar que o objetivo foi efetivamente alcançado, pois pretendia-se obter uma classe de espalhamento SF2 logo após amassadura. O tempo de transporte do betão ao local de betonagem fez

com que o betão perdesse alguma trabalhabilidade, como já tinha sido verificado nos estudos anteriores, mas não tanto, pois nesta fase à chegada ao local de betonagem também foi possível obter a mesma classe de espalhamento inicial.

Relativamente às restantes características do betão fresco, podemos verificar que a sua viscosidade não é muito elevada, mas um pouco superior relativamente à fase anterior e apresenta uma capacidade de passagem relativamente boa.

As Figuras 6-4, 6-5 e 6-6, ilustram alguns dos procedimentos dos principais ensaios realizados para caracterização do BAC no estado fresco.



Figura 6-4 – Medição do espalhamento da 2ª fase, no local de betonagem.



Figura 6-5 – Ensaio do funil V da 2ª fase, no local de betonagem.



Figura 6-6 – Medição da caixa L na 2ª fase, no local de betonagem.

É possível verificar na Figura 6-4, que a composição produzida nesta segunda fase da aplicação apresenta um ótimo aspeto, nota-se uma certa viscosidade e coesão entre as partículas da mistura. Na realização dos restantes ensaios de caracterização do betão fresco, verificou-se que a realização destes em obra é pouco prática. Sendo um pouco morosos, trazendo atrasos no transporte e na sua betonagem. Estes ensaios são mais de encontro com validações de composições formuladas em laboratório, sendo apenas o ensaio de espalhamento o mais indicado para a verificação das suas características em obra, tal como no betão convencional.

6.4. PRODUTO FINAL – ASPETO DO ELEMENTO BETONADO

A durabilidade da estrutura e os acabamentos de superfície de alta qualidade são umas das principais características do BAC, benefício este que advém da sua grande fluidez, resistência à segregação e dos minorados valores de vazios, proporcionando um nível elevado de homogeneidade.

Depois de descobrir as vigas betonadas, é possível verificar que estas ficaram totalmente preenchidas, aparentemente com as armaduras completamente envolvidas e sem vazios interiores (Figura 6-7). No entanto, é possível verificar na parte superior da face vertical das vigas, uma pequena percentagem de poros superficiais de pequena dimensão. Estes são originados por bolhas de ar que se libertam do interior do betão no estado fresco, o ar pode ser introduzido durante o processo de mistura mas também durante o transporte e descarga do betão fresco. Da própria betonagem difícil, como também pela composição ser mais viscosa potenciam a existência de maior quantidade de bolhas de ar no interior do betão.



Figura 6-7 - Superfície das vigas betonadas com BAC na 1ª e 2ª fase.

A qualidade da superfície final das peças betonadas é um aspeto muito importante, especialmente quando se formam à superfície cavidades profundas resultantes de grandes bolhas de ar. Estas cavidades constituem não só um problema a nível estético como também um problema de durabilidade da estrutura [3].

O BAC, como material permite uma melhor durabilidade da estrutura e uma elevada qualidade no acabamento das superfícies, necessitando sempre um cuidado especial na seleção do tipo de cimento e adições a utilizar, na qualidade da cofragem e do produto descofrante, nos processos de mistura, transporte e colocação. A quantidade de ar que permanece no interior do BAC, depende da coesão da mistura. O BAC deve apresentar uma elevada viscosidade de modo a impedir a ocorrência de segregação, no entanto deve ser suficientemente baixa para garantir a homogeneidade e para evitar a formação de poros à superfície.

Todavia, mesmo na presença de alguns poros na superfície da viga, é possível notar que a superfície da viga apresenta um bom acabamento superficial. Apresenta uma textura lisa, com uma coloração uniforme sem a presença de manchas na superfície, e é possível verificar as delimitações dos elementos betonados bem definidas. É de notar que a viga da 2ª fase apresenta um acabamento ligeiramente melhor que a da 1ª fase, deve-se pelo facto de apresentar uma mistura mais homogénea do betão no estado fresco (provavelmente devido à introdução do modelador de viscosidade).

6.5. PROPRIEDADES DO BAC NO ESTADO ENDURECIDO

Durante as várias fases da aplicação prática, realizaram-se amostragens de BAC produzido, para posteriormente caracterização em laboratório. Para a aplicação, foi sugerido um betão de classe C30/37 para que fosse garantida uma boa aderência. Na Figura 6-8, apresentam-se as resistências à compressão obtidas aos 3, 7 e 28 dias.

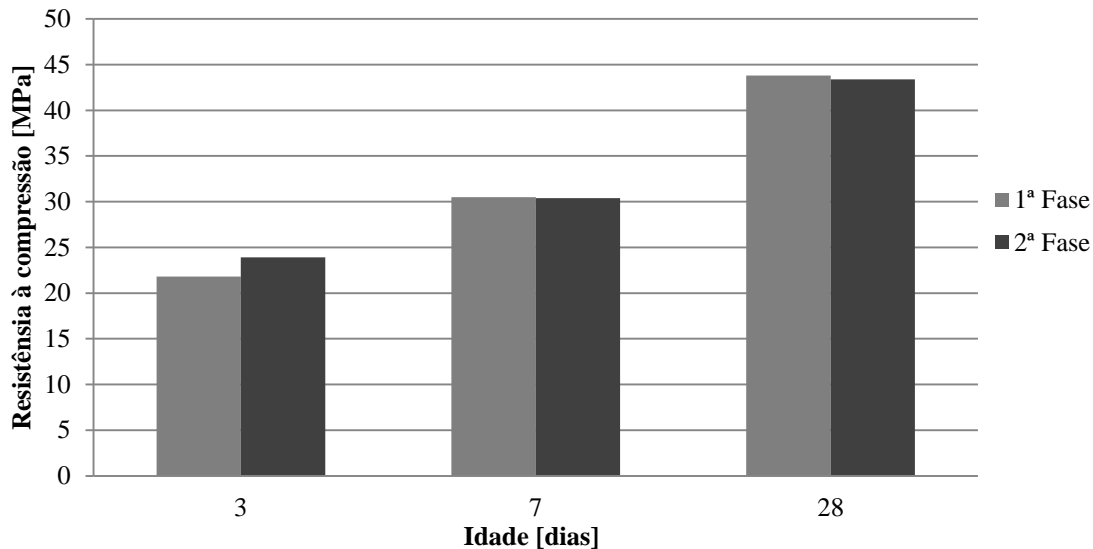


Figura 6-8 - Resistência à compressão da 1ª e 2ª fase.

Perante a Figura 6-8, é possível constatar que os resultados obtidos nos ensaios realizados de resistência à compressão aos provetes BAC foram superiores aos previstos para a classe pretendida nesta aplicação. Em qualquer uma das fases de aplicação BAC as resistências à compressão obtidas são muito semelhantes, apenas são notadas ligeiras diferenças não muito significantes.

Pode-se verificar que a resistência à compressão nos primeiros dias de idade é gradualmente crescente de fase para fase. No entanto, com o aumento da idade esse facto modifica, exatamente nos 7 e 28 dias a 2ª fase apresenta valores de resistência ligeiramente abaixo aos obtidos na 1ª fase. É de notar que estas pequenas alterações são desprezáveis. Por este facto que ambas aplicações tornam-se muito semelhantes em termos de resistência á compressão.

Relativamente á aplicação prática, em geral foi bem sucedida. Durante a aplicação surgiram alguns contratemplos, mas todos eles ultrapassados com sucesso. Conseguiu-se alcançar os principais objetivos da aplicação, apesar da difícil betonagem (devido ao elevado tempo requerido para a betonagem), a obtenção do bom acabamento superficial e das resistências pretendidas/adequadas. Neste sentido, o cliente ficou satisfeito com aplicação de BAC, concordou que foi uma boa opção e mostrou-se aberto a futuramente substituir as aplicações de betão convencional por BAC.

7

CONSIDERAÇÕES FINAIS

7.1. NOTAS FINAIS

Ao longo desta dissertação foi exposto de forma detalhada todo o trabalho experimental desenvolvido tendo em vista os objetivos estabelecidos. Como ponto de partida deste trabalho temos como principal objetivo, numa primeira estância a avaliação e produção em laboratório de várias composições de BAC de modo alcançar composições económicas e robustas, apenas com materiais disponíveis na RAM. Numa segunda estância a validação de uma composição de BAC para o lançamento do produto no mercado, de forma a criar confiança na utilização do “novo” betão, demonstrando as suas vantagens e identificando o processo de fabrico, transporte e colocação.

Contudo, o presente trabalho pretende ser um contributo para a implementação de novas tecnologias, como o BAC na indústria da construção da RAM. Esta contribuição é suportada por ensaios experimentais desenvolvidos ao nível das pastas, argamassas e betões no Laboratório Cimentos Madeira.

Foram realizadas e ensaiadas 39 composição de pastas, de diferentes tipos de cimento e com diversas razões volumétricas entre água e finos (Vw/Vp). Para além disso adicionaram-se várias percentagens de adição de cinzas volantes, por substituição parcial do cimento e várias percentagens de adjuvante (plastificante e superplastificante). Foram obtidos inúmeros valores de áreas de espalhamentos relativos das diversas pastas, assim como os tempos de escoamento no cone Marsh.

Também ao nível das argamassas, foram ensaiadas 13 composições, com o objetivo de se estudar as alterações provocadas pelos agregados finos no comportamento reológico da argamassa, como também, na produção de composições de argamassas que cumprissem todos os critérios ao nível do seu estado fresco e endurecido. Pois, o estudo nas argamassas reside na maior facilidade da sua execução comparativamente ao betão, com a possibilidade de ensaiar volumes menores e maior rapidez na execução de amassadura e ensaios. Realizaram-se ensaios em argamassas com diferentes parâmetros descritos no capítulo 5. Com a determinação de uma argamassa de referência (Composição 13), manteve-se os parâmetros para a continuação do estudo em betões.

Relativamente aos betões, foram executadas 15 composições de betões autocompactáveis com agregados vulcânicos basálticos. Estes apresentaram boas características a nível reológico, como também a nível endurecido. A principal inovação do BAC reside não no material em si, pois os materiais são os mesmos utilizados num betão convencional, mas sim na facilidade de colocação pela eliminação do processo de vibração.

Já na aplicação prática, conseguiu-se alcançar os principais objetivos da aplicação, com a difícil betonagem (devido ao elevado tempo de betonagem), a obtenção do bom acabamento superficial e das resistências pretendidas/adequadas. O cliente concordou que aplicação do BAC foi uma melhor opção e mostrou-se aberto a futuramente substituir as aplicações de betão convencional por BAC.

7.2. CONCLUSÕES

Perante os resultados experimentais apresentados e discutidos no capítulo 5, podemos retirar algumas conclusões ao nível das pastas e argamassas, quer ao nível dos betões.

Nos testes realizados às pastas e às argamassas podemos concluir:

- ✓ Verificou-se que na produção de BAC, o cimento CEM II/B-L 32,5N possui melhores características reológicas relativamente ao CEM II/A-L 42,5R, embora próximas. Em contrapartida, o cimento CEM II/A-L 42,5R apresenta melhor classe de resistência no estado endurecido;
- ✓ A introdução de cinzas volantes numa pasta conduz a um aumento substancial da trabalhabilidade no estado fresco, obtendo maiores áreas de espalhamento relativo;

A adição de superplastificante em dosagens controladas numa composição, conduz a ganhos significativos nas propriedades reológicas, observando-se um aumento da capacidade de espalhamento

com a incorporação do superplastificante e um ligeiro aumento das propriedades mecânicas. Uma dosagem excessiva de superplastificante conduz a efeitos quase nulos na deformabilidade e afeta negativamente a segregação da composição. Nos estudos das argamassas, foi possível verificar que somente a utilização de superplastificante (Sky 548 [45]) não garantia todas as características reológicas. Então adicionou-se o plastificante (Pozzolith 390N [44]), verificando grandes melhorias no comportamento reológico.

Nos testes realizados aos betões conclui-se:

- ✓ A possibilidade da implementação do novo produto (BAC) na indústria da construção da RAM, com composições robustas, utilizando os materiais correntemente disponíveis na RAM (areia do mar, areia britada e britas);
- ✓ Os ensaios realizados, que atestam a autocompactabilidade são de simples execução. No entanto, visto tratar-se de mais que um ensaio a sua execução em obra revelou-se pouco prática;
- ✓ Os agregados finos revelaram-se bastantes favoráveis para a obtenção de uma autocompactabilidade adequada, pois as partículas mais finas alteram bastante o comportamento do betão fresco – aumentam a compacidade e a viscosidade;
- ✓ Perante um controlo sobre as características dos materiais constituintes, verificou-se que é possível produzir as propriedades do BAC, sem alterar significativamente os procedimentos habituais numa central de produção de betão convencional;
- ✓ A principal dificuldade encontrada na central foi a variação do teor de humidade presente nos agregados o que altera a quantidade de água livre. Houve a necessidade de introduzir um modelador de viscosidade (ReoMATRIX 175), de modo a obter uma mistura mais homogénea, com viscosidade e sem indícios de segregação;
- ✓ As aplicações práticas foram executadas com sucesso, dado que o cliente ficou satisfeito com o desempenho do “novo” betão e mostrou-se aberto para no futuro pagar mais pelas vantagens que este produto apresenta.

Esta experiência contribuiu, fundamentalmente, para encorajar o desenvolvimento e implementação de futuros projetos utilizando esta tecnologia na RAM.

7.3. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Com as inúmeras contribuições científicas que têm sido publicadas na última década, o “estado de arte” no domínio do BAC encontra-se atualmente a um nível de elevado conhecimento. Apesar disso, tem sido reconhecida a necessidade de prosseguir a investigação nesta área, para que seja possível de uma forma eficiente beneficiar do grande potencial do BAC. Como este material não está implementado na indústria da construção da RAM, são sugeridos os seguintes trabalhos futuros, no sentido de auxiliar a sua utilização e produção na RAM.

Apesar das inúmeras investigações, ainda persiste algumas dúvidas, na evolução das propriedades do BAC no estado endurecido, ao longo do tempo, mais especificamente, no que respeita à resistência, deformabilidade, retração, fluência e a parâmetros de durabilidade (penetração dos cloretos, permeabilidade, carbonatação, entre outros). Trata-se de propriedades que dependem de inúmeros fatores. Assim, comprovar a sua maior homogeneidade relativamente a um betão convencional, e avaliar a sua influência em termos de segurança estrutural.

Para além destas, é importante estudar composições BAC com cimento CEM II/B-L 32,5N, de forma obter composições mais económicas. Do mesmo modo, seria importante um estudo económico sobre a substituição do betão convencional por BAC.

REFERÊNCIAS

1. BIBM CEMBUREAU ERMCO EFCA EFNARC, *The european guidelines for self compacting concrete - Specification, Production an Use*. May 2005, Available at: www.efca.info or www.efnarc.org;
2. *NP EN 206-1:2007 - Betão - Parte 1: Especificação, desempenho, produção e conformidade*, 2007.
3. Figueiras, H.I.M., *Estudo e desenvolvimento experimental de composições de betão auto-compactável. Aferição das suas características Mecanicas e durabilidade*. 2006, Porto.
4. *NP EN 206-9:2010 - Regras adicionais para betão autocompactável (BAC)* 2010.
5. EFNARC, *Specification and Guidelines for Self-Compacting Concrete*. 2002.
6. Zamin, C.A., *Comparação de custos entre sistema construtivo de casa popular executado em concreto pré.moldado e o sistema convencional de construção*. 2009, Rio Grande do Sul.
7. *Betão - Propriedades e Controlo de Qualidade*. Associação, Portuguesa, das Empresas, de Betão, Pronto.
8. Gomes, J.C.V., *Dimensionamento de betões Autocompactáveis Coloridos com Agregados Britados Vulcânicos*. 2012, Funchal.
9. Nepomuceno, M.C.S., *Metodologia para a Composição de betões auto-compactáveis*. 2005, Covilhã.
10. *Vibration white finger*. 23 de Maio de 2013; Available from: http://en.wikipedia.org/wiki/Vibration_white_finger
11. Nunes, S.C.B., *Betão auto-compactável: Tecnologia e propriedades*. 2001, Porto: FEUP.
12. Teixeira, A., Martins J, *Materiais de Construção: betões de elevado desempenho*, ed. 1ª. 2003.
13. H. Okamura, K.O., and M. Ouchi. Self-compacting concrete. *Structural Concrete: Journal of FIB*, 2000.
14. João Santos et al, *O betão aotocompactável e o seu desempenho. Estado da arte em termos de investigação*, in *Encontro Nacional Betão Estrutural - BE2012*. 2012: FEUP.
15. Mehta, P.K., *Society, sustainability, and the global concrete industry*, in *51º Congresso Brasileiro do Concreto* 2009.
16. Pereira, T.A.d.C., *Concreto auto-adensável, de alta resistência, com baixo consumo de cimento Protland e com adições de fibras de lã de rocha ou poliamida*, in *Departamento de Engenharia de Estruturas2010*, Universidade de São Paulo: São Carlos.
17. Azevedo, A.F.F.L.C., *Betões de Elevado Desempenho com Incorporação de Cinzas Volantes*. 2002, Universidade do Minho.
18. Silva, P., e Brito J, *Betão auto-compacavel (BAC) - estado actual do conhecimento*, 2009, UM.
19. Khayat K. H., *Workability, testing, and performance of self-consolidating concrete*. *ACI Materials Journal*, May-June 1999: p. 346-353.
20. *NP EN 12350-10:2010 - Ensaio do betão fresco - Parte 10: Betão autocompactável - Ensaio de escoamento na Caixa-L*. 2010.
21. Coutinho, A., e Gonçalves, A., *Fabrico e propriedades do betão*. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 1994.
22. *NP EN 12390-3:2011 -Ensaio de betão endurecido – Parte 3: Resistência à compressão de provetes*, 2011.
23. *NP EN 12390-1 Ensaio do betão endurecido - Parte 1: Forma, dimensões e outros requisitos para o ensaio de provetes e para os moldes.*, 2010.
24. *NP EN 12350-1:2009 - Ensaio de betão fresco - Parte 1: Amostragem*, 2009.

Referências

25. NP EN 12390-2:2009 - *Ensaio do betão endurecido - Parte 2: Execução e cura dos provetes para ensaios de resistência mecânica*, 2009.
26. NP EN 12390-4:2009 - *Ensaio do betão endurecido - Parte 4: Resistência à compressão – Características das máquinas de ensaio*, 2009.
27. NP EN 197-1:2005 - *Cimento - Parte 1: Composição, especificações e critérios de conformidade para cimentos correntes*, 2005.
28. Secil Companhia Geral de Cal e Cimento, S.A., *Cimento Portland de Calcário CEM II /A-L 42,5R*, in <http://www.secil.pt/pdf/CEMIIL425R.pdf2004>.
29. Secil Companhia Geral de Cal e Cimento, S.A., *Cimento Portland de Calcário CEM II /B-L 32,5N*, <http://www.secil.pt/pdf/CEMIIBL325N.pdf>. 2004.
30. NP EN 196-2:2000 - *Métodos de ensaio de cimento - Parte 2: Análise química dos cimentos*, 2000.
31. NP EN 451-1:1994 - *Métodos de ensaio das cinzas volantes - Parte 1 - Determinação do teor de óxido de cálcio livre*, 1994.
32. LNEC E 64: *Cimentos - Determinação da massa volúmica*, 1979.
33. NP EN 196-3:2006 - *Métodos de ensaio de cimento - Parte 6: Determinação do tempo de presa e de expansibilidade*, 2006.
34. NP EN 196-6:2005 - *Métodos de ensaio de cimento - Parte 6: Determinação da finura*, 2005.
35. NP EN 196-1: 2000 – *Métodos de ensaio de cimento - Parte 1: Determinação das resistências mecânicas*, 2000.
36. Maia, L., *Design Based Concrete To Enhance Early Age Properties*, FEUP 2010, University of Porto.
37. NP EN 450-1:2008 - *Cinzas volantes para betão – Parte 1: Definição, especificações e critérios de conformidade*, 2008.
38. NP EN 1097-7:2008 - *Tests for mechanical and physical properties of aggregates - Part 7: Determination of the particle density of filler – Pycnometer method*, 2008.
39. NP EN 451-2:1995 - *Métodos de ensaio de cinzas volantes - Parte 2: Determinação da finura por peneiração húmida*, 1995.
40. S.S. Bagchi, S.V.G., an R T Jadhav, *Fly ash fineness – Comparing residue on 45 micron sieve with Blaine's surface area*. The Indian concrete journal, August 2012.
41. NP EN 13263-1:2007 - *Sílica de fumo para betão – Parte1: Definições, requisitos e critérios de conformidade*, 2007.
42. NP EN 1008:2003 - *Água de amassadura para betão - Especificações para a amostragem, ensaio e avaliação da aptidão da água, incluindo água recuperada nos processos da indústria de betão, para o fabrico de betão*, 2003.
43. NP EN 934-2:2009 - *Adjuvantes para betão, argamassas e caldas de injeção – Parte 2: Adjuvantes para betão. Definições, requisitos, conformidade, marcação e etiquetagem*, 2009.
44. *Pozzolith 390N*. 2 de Abril de 2013; Available from: <http://www.basf-cc.ae/en/products/Readymix/Pozzolith390N/Documents/TDS%20-%20POZZOLITH%20390N.pdf>.
45. *Glenium Sky 548*. 2 de Abril de 2013; Available from: http://macoseco.pt/admin2/imgs/glenium_sky_548.pdf.
46. BASF, T.C.C., *ReoMATRIX 175: Adjuvante modelador de viscosidade de nova geração para betão autocompactável de elevada robustez*, 2011.
47. Okamura, H., e Ouchi, M. , *Self-compacting concrete*. Journal of Advanced Concrete Technology, vol. 1, 2003.
48. NP EN 932-3:2002 - *Ensaio das propriedades gerais dos agregados - Parte 3: Método e terminologia para a descrição petrográfica simplificada*, 2002.
49. NP EN 12620:2010 - *Agregados para betão*, 2010.
50. NP EN 933-1:2000 - *Ensaio das propriedades geométricas dos agregados - Parte 1: Análise granulométrica. Método de peneiração*. 2000.

Referências

51. NP EN 1097-6:2003 - *Ensaaios das propriedades mecânicas e físicas dos agregados - Parte 6: determinação da massa volúmica e da absorção de água*. 2003.
52. NP EN 1097-3:2002 - *Ensaaios das propriedades mecânicas e físicas dos agregados - Parte 3 - Determinação da baridade e do volume de vazios*, 2002.
53. NP EN 1744-1:2000 - *Ensaaios das propriedades químicas dos agregados - Parte 1 - Análise química*, 2000.
54. NP EN 933-3:2002 - *Ensaaios das propriedades geométricas dos agregados - Parte 3: Determinação da forma das partículas. Índice de achatamento*. 2002.
55. ASTM C1260 - 05a - *Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Aggregates (Mortar-Bar Method)*, 2005.
56. NP EN 1097-1:2010 - *Ensaaios das propriedades mecânicas e físicas dos agregados - Parte 1 - Determinação da resistência ao desgaste (Micro-Deval)*, 2010.
57. NP EN 1097-2:2002 - *Ensaaios das propriedades mecânicas e físicas dos agregados - Parte 2: Métodos para determinação da resistência à fragmentação – Los Angeles*, 2002.
58. ISO 3310-2:1999 - *Test sieves. Technical requirements and testing - Part 2: Test sieves of perforated metal plate*, 1999.
59. NP EN 12350-9:2010 - *Ensaaios do betão fresco - Parte 9: Betão autocompactável - Ensaio de escoamento do Funil-V*. 2010.
60. NP EN 12350-8:2010 - *Ensaaios do betão fresco - Parte 8: Betão autocompactável - Ensaio de espalhamento (Slump-flow)*. 2010.
61. NP EN 12350-11:2010 - *Ensaaios de betão fresco - Parte 11: Betão Autocompactável Ensaio de Segregação no peneiro* 2010.
62. NP EN 12390-3:2003 - *Ensaaios de betão endurecido - Parte 3: Resistência à compressão dos provetes de ensaio.*, 2003.