

Dimensionamento de Betões Autocompactáveis Coloridos com Agregados Britados Vulcânicos

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

José Celestino Vieira Gomes

MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL



UNIVERSIDADE da MADEIRA

A Nossa Universidade

www.uma.pt

setembro | 2012

UMa

M Dim

T/M UNCA

71546

624

GOM Dim

Dimensionamento de Betões Autocompactáveis Coloridos com Agregados Britados Vulcânicos

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

José Celestino Vieira Gomes

MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL

UNIVERSIDADE DA MADEIRA
SECTOR DE DOCUMENTAÇÃO
E ARQUIVO

ORIENTAÇÃO

Lino Manuel Serra Maia

CO-ORIENTAÇÃO

José Miguel da Silva Guimarães



Dimensionamento de Betões Autocompactáveis Coloridos com Agregados Britados Vulcânicos

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

por

JOSÉ CELESTINO VIEIRA GOMES

Orientador

Prof. Doutor Lino Maia

(Universidade da Madeira)

Coorientador

dr. Miguel Guimarães

(Laboratório Cimentos Madeira)

Setembro de 2012

Título: Dimensionamento de Betões Autocompactáveis Coloridos com Agregados Britados Vulcânicos

Palavras chave: Betão autocompactável, betão colorido, agregados britados vulcânicos.

Keywords: Self-compacting Concrete, colored concrete, volcanic crushed aggregates.

Autor: CELESTINO GOMES

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

Júri:

José Manuel Martins Neto dos Santos, *Professor Auxiliar Convidado da Universidade da Madeira*

Olga Isabel Río Suarez, *Investigadora do CSIC - Consejo Superior de Investigaciones Científicas*

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

José Miguel da Silva Guimarães, *Diretor do Laboratório da Cimentos Madeira*

Defesa a 16 de Novembro de 2012

Funchal, Madeira

Para a minha família

RESUMO

A incorporação de pigmentos na composição do betão é uma técnica aplicada como alternativa arquitetónica à pintura ou colocação de revestimentos em edifícios. Tratando-se de um betão à vista importa considerar cuidados adicionais na sua aplicação para assegurar a homogeneidade e qualidade do acabamento superficial. Utilizando betões autocompactáveis, não só a homogeneidade do material é aumentada devido à eliminação da compactação, como também o acabamento superficial é melhorado devido à maior capacidade de preenchimento dos moldes que estes betões apresentam.

Neste trabalho dimensionam-se cinco composições de betão autocompactável colorido utilizando agregados britados vulcânicos correntemente utilizados no fabrico de betão na Região Autónoma da Madeira. Para o dimensionamento dos betões, realizaram-se vários estudos em pastas, de seguida em argamassas e finalmente em betões. Com o estudo das pastas obtiveram-se as primeiras informações sobre o efeito da introdução de pigmentos. Depois estudaram-se argamassas que continham o mesmo volume de areia relativo mas incorporando pastas com diferentes cores. Identificaram-se as pastas que conduziam a argamassas com propriedades reológicas semelhantes às da argamassa da composição considerada como referência. Nos betões começou-se por produzir uma composição de betão autocompactável de referência que foi caracterizada em termos de autocompactabilidade pelos ensaios de espalhamento, caixa L, funil V e segregação. Finalmente, realizaram-se composições de betões coloridos cujos conteúdos em agregados e finos eram os mesmos que os da composição de referência mas substituindo parcialmente o volume de água por igual volume de pigmentos.

Os resultados mostraram que a incorporação de pigmentos conduz a uma ligeira perda de trabalhabilidade, sendo essa perda de trabalhabilidade facilmente compensada com um aumento da dosagem de superplastificante, cujo volume adicionado é substituído pela remoção de igual volume de água.

ABSTRACT

The incorporation of pigments in the concrete composition is applied as an alternative technique to painting or architectural coverings in buildings. Since this is a 'fair-faced concrete', it is important to consider additional care in its application to ensure homogeneity and quality in surface finish quality. Using self-compacting concrete, not only the homogeneity of the material is increased due to elimination of the compaction task, as well as the surface finish is improved due to the greater ability to fill the mold feature of these concretes.

Five self-compacting concrete compositions were studied, using volcanic crushed aggregates commonly used in the manufacture of concrete in the Autonomous Region of Madeira with the incorporation of pigments of different colors. To design these concretes various studies were conducted for pastes, mortars and then finally for concrete. By studying the pastes, early information was obtained on the effect of the introduction of pigments. Then studies were made on mortars containing the same volume of sand but incorporating pastes with different colors. Pastes leading to mortars with similar rheological properties to the composition of the mortar of reference were identified. Regarding the concrete, a reference self-compacting concrete composition was produced, which was characterized in terms of the self-compacting tests: Slump-Flow, L-box, V-funnel and segregation. Finally, colored concrete compositions were made, whose contents in fine and aggregate were the same as the reference composition, except replacing partially the volume of water by equal volume of pigment.

The results showed that the incorporation of pigments leads to a slight loss of workability, but this loss of workability could be easily compensated with an increase in the dosage of superplasticizer, and an equal diminishing in the volume of water.

ÍNDICE GERAL

Resumo.....	v
Abstract.....	vii
Índice geral.....	ix
Índice de figuras.....	xiii
Índice de tabelas.....	xvii
Notação e simbologia.....	xix
Agradecimentos.....	xxiii
1. Considerações iniciais.....	1
1.1. Introdução.....	1
1.2. Enquadramento.....	3
1.3. Motivação.....	4
1.4. Objetivos.....	4
1.5. Contribuições científicas e limitações.....	5
1.6. Apresentação da tese.....	6
2. Estado da arte.....	7
2.1. Introdução.....	7
2.2. Histórico de aplicações práticas de betão autocompactável.....	8
2.2.1. Portugal.....	11
2.2.2. Região Autónoma da Madeira.....	13
3. Betão autocompactável.....	15
3.1. Termos e definições.....	15
3.2. Conceito.....	16
3.3. Vantagens e desvantagens.....	18

3.4.	Propriedades físicas e mecânicas.....	18
3.5.	Dimensionamento de um BAC.....	19
3.6.	Classificação de um BAC.....	21
3.6.1.	Espalhamento.....	21
3.6.2.	Viscosidade.....	21
3.6.3.	Capacidade de passagem.....	22
3.6.4.	Estabilidade.....	22
4.	Trabalho experimental.....	25
4.1.	Materiais Constituintes.....	25
4.1.1.	Materiais finos.....	25
4.1.1.1.	Cimento.....	25
4.1.1.2.	Adições.....	27
4.1.2.	Água.....	27
4.1.3.	Adjuvantes.....	27
4.1.4.	Pigmentos.....	28
4.1.5.	Agregados.....	29
4.1.5.1.	Descrição petrográfica e processo de obtenção dos agregados.....	29
4.1.5.2.	Agregados finos.....	31
4.1.5.3.	Agregados grossos.....	32
4.2.	Formulação.....	34
4.3.	Pastas.....	36
4.3.1.	Equipamentos.....	36
4.3.2.	Procedimento de amassadura.....	37
4.3.3.	Ensaio.....	38
4.3.3.1.	Ensaio de espalhamento.....	38

4.3.3.2. Ensaio de viscosidade	40
4.4. Argamassas	40
4.4.1. Equipamentos	40
4.4.2. Procedimento de amassadura	43
4.4.3. Ensaio	45
4.4.3.1. Ensaio de espalhamento	45
4.4.3.2. Ensaio de viscosidade	46
4.4.3.3. Ensaio no estado endurecido	47
4.5. Betões	49
4.5.1. Equipamentos	49
4.5.2. Procedimento de amassadura	53
4.5.3. Ensaio	54
4.5.3.1. Ensaio de fluidez e capacidade de preenchimento	54
4.5.3.2. Ensaio de viscosidade	56
4.5.3.3. Ensaio de capacidade de passagem	57
4.5.3.4. Ensaio de resistência à segregação	58
4.5.3.5. Ensaio no estado endurecido	59
5. Resultados e discussão	65
5.1. Introdução	65
5.2. Pastas	65
5.2.1. Determinação da capacidade de retenção de água e do fator de deformabilidade	65
5.2.2. Afinidade do superplastificante	72
5.3. Argamassas	74
5.4. Betões	77
6. Considerações finais	83

6.1.	Notas finais.....	83
6.2.	Conclusões.....	84
6.3.	Trabalho futuro.....	84
Referências.....		87

Anexos

Formulação do BAC

Artigos publicados nas actas do Encontro Nacional BETÃO ESTRUTURAL (BE2012) realizado na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, de 24 a 26 de Outubro de 2012

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1 – Ponte Akashi-Kaikyo, Japão [26]	9
Figura 2-2 – Vista genérica do local de construção da obra durante a betonagem [9]	9
Figura 2-3 – Sondra Lanken Tunnels, em Estocolmo [27]	10
Figura 2-4 – Hotel Shangri La, Dubai [29]	11
Figura 2-5 – Exemplo de aplicação de BAC numa viga de um edifício em Lisboa [30].	12
Figura 2-6 – Edifício Vodafone, Porto [34]	12
Figura 3-1 – Proporções volumétricas de um BAC e de um betão convencional [37]	17
Figura 4-1 – Rocha basáltica, pedreira da Fundoa	30
Figura 4-2 – Armazenamento das rochas basálticas, Fundoa	30
Figura 4-3 – Esmagamento de rochas vulcânicas, Fundoa	30
Figura 4-4 – Vista geral do processo de britagem, Fundoa	30
Figura 4-5 – Transporte dos agregados britados em correias de transporte	30
Figura 4-6 – Curva granulométrica dos agregados finos	31
Figura 4-7 – Curva granulométrica dos agregados grossos	33
Figura 4-8 – Início do processo de secagem dos agregados	33
Figura 4-9 – Cone de espalhamento para as pastas	36
Figura 4-10 – Cone de Marsh	36
Figura 4-11 – Misturador mecânico utilizado nas amassaduras das pastas	37
Figura 4-12 – Cone de espalhamento de pastas preenchido com pasta	38
Figura 4-13 – Pasta com CEM II/B-L 32,5R (br), sem adição de pigmento	39
Figura 4-14 – Pasta com CEM II/B-L 32,5R (br) e com adição de 10% em volume de pigmento amarelo	39
Figura 4-15 – Pasta com CEM II/B-L 32,5R (br) e com adição de 10% em volume de pigmento laranja	39
Figura 4-16 – Pasta com CEM II/B-L 32,5R (br) e com adição de 10% em volume de pigmento vermelho	39

Figura 4-17 – Pasta com CEM II/B-L 32,5R (br) e com adição de 10% em volume de pigmento preto	39
Figura 4-18 – Pasta com CEM II/B-L 32,5R (br) e com adição de 10% em volume de pigmento verde	39
Figura 4-19 – Cone de espalhamento para as argamassas	41
Figura 4-20 – Funil V para as argamassas [65]	41
Figura 4-21 – Misturador mecânico utilizado na amassadura de argamassas	42
Figura 4-22 – Equipamento de ensaio das resistências mecânicas nas argamassas	42
Figura 4-23 – Câmara climática utilizada no armazenamento dos moldes de argamassa	43
Figura 4-24 – Moldes para armazenamento das argamassas	43
Figura 4-25 – Amassadura de uma argamassa	45
Figura 4-26 – Ensaio de espalhamento para uma argamassa	46
Figura 4-27 – Ensaio do funil V numa argamassa	47
Figura 4-28 – Armazenamento de argamassas na câmara climática	48
Figura 4-29 – Câmara de cura para armazenamento das argamassas	48
Figura 4-30 – Dimensões da placa de base utilizada nos ensaios de espalhamento de BACs [2]	49
Figura 4-31 – Dimensões do cone de espalhamento [68]	50
Figura 4-32 – Dimensões do funil V para os betões [2]	50
Figura 4-33 – Dimensões da caixa L [69]	51
Figura 4-34 – Peneiro [71]	51
Figura 4-35 – Betoneira utilizada na amassadura de betões	52
Figura 4-36 – Máquina de ensaios à compressão para os betões	52
Figura 4-37 – Moldes para provetes de betão	53
Figura 4-38 – Preenchimento do cone de espalhamento com um BAC	55
Figura 4-39 – Levantamento do cone no ensaio de espalhamento do BAC	55
Figura 4-40 – Medição do diâmetro de espalhamento de um BAC	56
Figura 4-41 – Preenchimento do funil V com um BAC	57
Figura 4-42 – Medição do tv de um BAC no funil V	57

Figura 4-43 – Ensaio da caixa L	58
Figura 4-44 – Ensaio de resistência à segregação	59
Figura 4-45 – Regularização de provetes de betão nos moldes	60
Figura 4-46 – Colocação de proteções à desidratação e variações térmicas dos provetes de BAC	61
Figura 4-47 – Desmoldagem dos moldes com os provetes de BAC	61
Figura 4-48 – Câmara de cura dos provetes de betão	62
Figura 4-49 – Execução do ensaio de resistência à compressão de um betão	63
Figura 5-1 – Gráfico genérico para determinação de β_p e de E_p	66
Figura 5-2 – Determinação do β_p e do E_p em pastas com $V_{fa}/V_p=0,00; 0,15$ e $0,30$	67
Figura 5-3 – Determinação do β_p e do E_p para pastas compostas por 2 tipos de cimento diferente	69
Figura 5-4 – Determinação do β_p para pastas com $V_{fa}/V_p=0,30$ e com diferentes pigs. $V_{pig}/V_p=0,05$	69
Figura 5-5 – Influência do pigmento no G_p : $V_w/V_p=1,60$; $V_{fa}/V_p=0,00$ e $V_{pig}/V_p=0,05$	70
Figura 5-6 – Influência do pigmento no G_p : $V_w/V_p=1,60$; $V_{fa}/V_p=0,00$ e $V_{pig}/V_p=0,10$	70
Figura 5-7 – Influência do pigmento no G_p : $V_w/V_p=1,40$; $V_{fa}/V_p=0,30$ e $V_{pig}/V_p=0,05$	71
Figura 5-8 – Influência do pigmento no G_p : $V_w/V_p=1,40$; $V_{fa}/V_p=0,30$ e $V_{pig}/V_p=0,10$	71
Figura 5-9 – Influência do pigmento no G_p : CEM II/B-L 32,5N com $V_w/V_p=1,60$; $V_{fa}/V_p=0,00$ e $V_{pig}/V_p=0,10$	72
Figura 5-10 – Efeito do superplastificante na viscosidade de pastas com e sem adição de cinzas volantes	73
Figura 5-11 – Efeito do superplastificante na fluidez de pastas com e sem adição de cinzas volantes	74
Figura 5-12 – Dosagem de superplastificante necessária para a obtenção de argamassas coloridas de G_p idêntico ao de uma argamassa de referência	75
Figura 5-13 – Ensaio de flexão das argamassas coloridas com propriedades autocompactáveis	76

Figura 5-14 – Ensaio de compressão das argamassas coloridas com propriedades autocompactáveis	77
Figura 5-15 – Diâmetros de espalhamento	79
Figura 5-16 – Tempos de escoamento no funil V	79
Figura 5-17 – Rácio da caixa L	79
Figura 5-18 – Segregação	80
Figura 5-19 – Resistência à compressão aos 7 dias dos BACs coloridos	80
Figura 5-20 – Resistência à compressão aos 28 dias dos BACs coloridos.....	81
Figura 5-21 – Resistência à compressão de betões com diferentes V_{pig}/V_p	82

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 3-1 – Valores recomendados pela JCSE, BIBM et al. e RILEM [7].....	20
Tabela 4-1 – Caracterização química, física e mecânica dos cimentos utilizados	26
Tabela 4-2 – Propriedades genéricas dos pigmentos.....	28
Tabela 4-3 – Dados técnicos dos pigmentos utilizados	29
Tabela 4-4 – Caracterização do conjunto de agregados finos.....	31
Tabela 4-5 – Caracterização do conjunto de agregados grossos	32
Tabela 5-1 – Massa por m ³ dos constituintes de um BAC de referência, sem adição de pigmentos.....	79

NOTAÇÃO E SIMBOLOGIA

p	[g]	Ligante
c	[g, Kg/m ³]	Cimento
fa	[g]	Cinzas volantes
s1	[g, Kg]	Areia britada 0/2 (fina)
s2	[g, Kg]	Areia britada 0/4 (grossa)
b1	[g, Kg]	Brita 4/10 (miúda)
b2	[g, Kg]	Brita 8/16 (média)
b3	[g, Kg]	Brita 11/22 (grossa)
w	[g, Kg/m ³]	Água
Sp	[g, Kg/m ³]	Superplastificante
pigA	[g]	Pigmento amarelo
pigL	[g]	Pigmento laranja
pigV	[g]	Pigmento vermelho
pigC	[g]	Pigmento castanho
pigP	[g]	Pigmento preto
pigVd	[g]	Pigmento verde
pig	[g]	Pigmento
V _{mass}	[l, dm ³]	Volume de amassadura
V _{w/Vp}	[-]	Relação volumétrica entre água e ligante
V _{fa/Vp}	[-]	Relação volumétrica entre cinzas volantes e ligante
V _{Sp/Vp}	[-]	Relação volumétrica entre superplastificante e ligante
V _{s/Vm}	[-]	Relação volumétrica entre areias totais e argamassa
V _{s1/Vs}	[-]	Relação volumétrica entre areia fina e areia total
V _{s2/Vs}	[-]	Relação volumétrica entre areia grossa e areia total
V _{pigA/Vp}	[-]	Relação volumétrica entre pigmento amarelo e ligante
V _{pigL/Vp}	[-]	Relação volumétrica entre pigmento laranja e ligante
V _{pigV/Vp}	[-]	Relação volumétrica entre pigmento vermelho e ligante
V _{pigC/Vp}	[-]	Relação volumétrica entre pigmento castanho e ligante
V _{pigP/Vp}	[-]	Relação volumétrica entre pigmento preto e ligante
V _{pigVd/Vp}	[-]	Relação volumétrica entre pigmento verde e ligante
V _{g/Vg,lim}	[-]	Relação volumétrica entre agregados grossos e limite de agregados grossos
V _{b1/Vg}	[-]	Relação volumétrica entre brita miúda e agregados grossos totais
V _{b2/Vg}	[-]	Relação volumétrica entre brita média e agregados grossos totais
V _{b3/Vg}	[-]	Relação volumétrica entre brita grossa e agregados grossos totais

Vvazios	[-]	Volume de vazios
Vg,lim ponderado	[-]	Relação entre baridade/massa específica para as britas, multiplicado pelas percentagens respetivas de brita a serem utilizadas na composição
Vsólidos	[-]	Volume de betão obtido quando se retira o volume de vazios
Vpasta	[-]	Volume ocupado pelos constituintes de uma pasta (água + cimento + cinzas volantes + superplastificante + pigmento)
Vm	[-]	Volume ocupado pelos constituintes de uma argamassa (pasta + agregados finos)
Vbetão	[-]	Volume ocupado pelos constituintes de um betão (argamassa + agregados grossos)
Vw'	[-]	Volume de água final, considerando uma redução de volume igual à ocupada pelo volume final de superplastificante e/ou pigmentos
w/c	[-]	Relação água/cimento, em massa
w/p	[-]	Relação água/ligante, em massa
Sp/c	[-]	Relação superplastificante/cimento, em massa
Sp/p	[-]	Relação superplastificante/ligante, em massa
\sum Pig/p	[-]	Relação entre pigmentos/ligante, em massa
\sum Pig/w	[-]	Relação entre pigmentos/água, em massa
d1	[mm]	Diâmetro de uma pasta ou argamassa numa direção de espalhamento
d2	[mm]	Diâmetro de espalhamento ortogonal a d1
d	[mm]	Valor médio do diâmetro espalhamento de uma pasta, argamassa ou betão
d0	[mm]	Valor do diâmetro interior inferior do cone de espalhamento para 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
tesc	[s]	Tempo de escoamento de uma pasta no cone de Marsh
Gm	[-]	Área de espalhamento relativa para uma argamassa
Dflow1	[mm]	Diâmetro de espalhamento do betão numa direção, após o ensaio de espalhamento
Dflow2	[mm]	Diâmetro de espalhamento do betão numa direção perpendicular a Dflow1
Dflow	[mm]	Diâmetro de espalhamento médio do betão
t ₅₀₀	[s]	Tempo necessário para o betão atingir um diâmetro de 500 mm no teste de espalhamento
t _v	[s]	Tempo necessário para o betão escoar no ensaio do funil V
Wp g	[g]	Massa vazia do peneiro, no ensaio de segregação
Wc g	[g]	Massa inicial do peneiro e amostra, no ensaio de segregação
Wps g	[g]	Massa final no ensaio de segregação
Segreg.	[%]	Percentagem de betão que passa no peneiro no ensaio de segregação

H1	[mm]	Altura do betão na parte de trás da caixa, no ensaio da caixa L
H2	[mm]	Altura do betão na parte da frente da caixa, no ensaio da caixa L
H2/H1	[-]	Rácio entre alturas de betão na parte de trás e da frente do ensaio da Caixa L
Ref ^a	[-]	Referência. Pasta, argamassa ou betão com parâmetros chave que se irão manter inalterados na composição de equivalentes coloridos. Para cada caso, especifica-se quais os parâmetros alterados relativamente a esta composição de referência
fc,7d	[MPa]	Resistência à compressão aos 7 dias da argamassa ou betão em prismas ou cubos normalizados, respetivamente
fc,28d	[MPa]	Resistência à compressão aos 28 dias do betão em cubos normalizados
f,7d	[MPa]	Resistência à flexão aos 7 dias da argamassa em prismas normalizados
SF		Classe de espalhamento
VF		Classe de viscosidade obtido no ensaio do funil V
PL		Capacidade de passagem no ensaio da 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
CCEE		Centro de Ciências Exatas e da Engenharia
UMa		Universidade da Madeira
LCM		Laboratório Cimentos Madeira
FEUP		Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
LABEST		Laboratório da Tecnologia do Betão e do Comportamento Estrutural
BRIMADE		Sociedade de Britas da Madeira, S.A.
LNEC		Laboratório Nacional de Engenharia Civil
LREC		Laboratório Regional de Engenharia Civil, IP-RAM
JCSE		Journal of Computing Science and Engineering
BIBM		Bureau International du Béton Manufacturé
RILEM		Reunion Internationale des Laboratoires et Experts des Materiaux
SNRA		The Construction and Maintenance Centre at the Swedish National Road Administration
CBI		Swedish Cement and Concrete Research Institute

AGRADECIMENTOS

Quero deixar aqui os meus sinceros agradecimentos a todas as pessoas diretamente envolvidas à elaboração desta tese de mestrado.

Ao professor Lino Maia, orientador desta dissertação. Pelo seu conhecimento, pela sua constante vontade e disponibilidade em ajudar, tal como pela sua orientação e apoio prestado. Meteu as mãos na massa ao se envolver pessoalmente na realização de todos os betões efetuados em laboratório.

À Joana Silva, colega de curso com quem partilhei o laboratório para a realização dos ensaios desta tese.

Agradecimento às empresas do Grupo Cimentos Madeira, de um modo especial ao Laboratório Cimentos Madeira, pela colaboração e disponibilidade na cedência dos recursos e equipamentos necessários, assim como pelo financiamento prestado para a participação no Encontro Nacional de Betão Estrutural – BE2012.

A todo o pessoal que trabalha no Laboratório da Cimentos Madeira: Ao Nélio Vieira, pelo interesse demonstrado e pelas diversas discussões em torno da conceção de um betão autocompactável, espero que as possamos continuar numa próxima fase de otimização. Ao Miguel Dinis, pela sua paciência, disponibilidade em ajudar e boa disposição. Ao Dr. Miguel Guimarães pelo apoio logístico, discussões e conselhos fornecidos. Aos restantes colaboradores com quem convivi nestes breves meses: Júlio Rodrigues, António Soares, Luís Pinto, Venâncio Pereira, e a todos os outros com quem lidei diariamente.

Por fim, mas não menos importante, um agradecimento muito especial aos meus amigos e familiares pelo apoio e motivação fornecida.

Funchal, Setembro de 2012

Celestino Gomes

1

CONSIDERAÇÕES INICIAIS

1.1. INTRODUÇÃO

Existe no sector da indústria da construção uma constante necessidade de inovar, de modo a se manter a competitividade entre empresas do ramo, e também de modo a contribuir para a sustentabilidade das estruturas. Construtores e donos de obra necessitam cada vez mais de materiais que cumpram não só requisitos económicos, mas também requisitos de produtividade, durabilidade, qualidade e ambientais.

O betão armado é um material com excepcionais propriedades enquanto material de construção. Tem sido amplamente utilizado em todo o mundo, como material de excelência em obras durante as últimas décadas. Uma das preocupações atuais relativamente às estruturas de betão armado são os processos de degradação que colocam em causa a sua durabilidade, com graves consequências sociais, ambientais e económicas, já que os custos associados às reparações e reabilitações podem vir a ser elevados, dependendo de quais os elementos estruturais afetados e da importância da estrutura a ser reparada.

A durabilidade de uma estrutura depende, entre outros fatores, da densidade e permeabilidade do betão de recobrimento, da qualidade de produção e das condições de betonagem, principalmente na dificuldade de colocação em zonas densamente armadas. Para se atingirem condições de durabilidade aceitáveis para a peça betonada na sua vida útil, é correntemente usada a compactação forçada, com recurso a vibradores.

Contudo, a vibração acarreta problemas técnicos e económicos como custos e atrasos adicionais no acabamento de superfícies e a homogeneidade do betão pode ser afetada, entre outras pelo operador do vibrador. Existem ainda problemas ambientais e sociais, tais como a poluição sonora que ocorre em

obra e nas imediações da mesma, para além dos problemas de saúde que ocorrem nos operadores de vibradores de agulha, devido à vibração dos aparelhos, denominada por ‘Vibration white finger’, que é uma forma secundária do síndrome de Raynaud [1].

Têm surgido novas variedades de betões com propriedades mecânicas e físicas superiores às definidas nas normas, tendo em conta não só a resistência, mas também a durabilidade para uma estrutura, entre outras especificações previamente definidas, tais como as suas propriedades no estado fresco. Como exemplo de um novo tipo de betão, temos o betão autocompactável (BAC), que surgiu no Japão no final da década de 80.

O BAC é um betão denominado de betão silencioso porque possui propriedades no estado fresco que lhe permitem fluir sobre o seu peso próprio, preenchendo de forma completa o molde em que é depositado, mesmo na presença de vários obstáculos [2, 3], como zonas densamente armadas, sem que para isso seja necessário fornecer energia adicional. A utilização de BAC conduz a uma produção mais industrializada, aumentando a produção e qualidade, já que os problemas previamente descritos associados à utilização de compactação são removidos ou minimizados [3, 4]. Mais do que para um betão convencional, este depende dos materiais utilizados na sua produção, das características físicas, químicas e das proporções relativas na composição do betão, para além do processo de produção, transporte e colocação do mesmo. Este é essencialmente caracterizado pelas suas propriedades no estado fresco. Possui geralmente uma maior quantidade de finos e uma menor relação entre água e ligante do que um betão convencional. Para colmatar a menor quantidade de água relativamente a um betão convencional, são usados adjuvantes redutores de água, capazes de melhorar a trabalhabilidade de um betão. Estas alterações tendem a agravar os problemas relativamente à fendilhação nas idades iniciais [5]. Contudo, apesar das excelentes propriedades dos BACs no estado fresco, até ao presente, não existe conhecimento sobre a utilização de BAC na Região Autónoma da Madeira (RAM).

Um dos principais problemas associados ao betão fabricado na RAM reside na indisponibilidade de agregados naturais rolados. Importa referir que os agregados utilizados na produção de betão na RAM são de origem vulcânica. Para além disso, com exceção de algumas empresas que utilizam a areia do mar como areia fina, todos os agregados utilizados são britados. Os agregados britados oferecem geralmente ao betão melhores propriedades mecânicas, mas possuem o inconveniente de piorarem a trabalhabilidade do betão no seu estado fresco [6]. Como um BAC necessita de boa trabalhabilidade, caracterizada essencialmente por 4 propriedades: (i) capacidade de passagem, (ii) viscosidade, (iii) fluidez e capacidade de preenchimento e (iv) resistência à segregação [7-9], compreende-se as dificuldades na aposta de produção de BAC na RAM.

À indisponibilidade de agregados rolados na RAM acresce ainda a dificuldade do acesso com preços competitivos a materiais finos (fíler calcário, metacaulino, sílica de fumo, escórias de alto forno, cinzas volantes, etc.) considerados como constituintes essenciais na produção de BAC [6]. Os materiais finos (<125 µm) são fundamentais para a produção de BAC porque permitem uma maior compactidade e maior controlo da viscosidade e segregação. Consequentemente, as reações químicas envolvendo estas adições de material fino normalmente conduzem a uma menor retração (reduzindo o risco de fendilhação) e a uma menor libertação do calor de hidratação conduzindo a uma durabilidade estrutural melhorada [10].

Atendendo à disponibilidade de materiais na RAM, compreende-se que até ao início deste trabalho não existissem na RAM os equipamentos necessários descritos em [8, 11-13] para verificar a autocompactabilidade de uma composição de BAC.

1.2. ENQUADRAMENTO

A indústria da construção necessita de se tornar mais ambiental, e melhorando a eficiência no dimensionamento de betão é uma possível contribuição. Para se obter um betão durável e com elevada resistência, especifica-se geralmente um consumo elevado de cimento Portland. Entre os materiais constituintes do betão, o cimento Portland é aquele que requer um 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 [14, 15]. A influência de adições cimentícias nas propriedades do betão, e o desempenho do betão nas idades jovens, são entre outros, assuntos importantes que devem ser considerados de modo a melhorar a eficiência do betão. São sugeridas algumas medidas para se atingir um betão mais sustentável: i) redução do consumo de betão através da otimização dos projetos e do uso de betão de alta durabilidade; ii) redução do consumo de cimento, através do uso de certos tipos de adições minerais e adjuvantes capazes de aumentar a trabalhabilidade do betão, em detrimento do uso de consumo de água e cimento [14, 15]. Com a utilização de um betão colorido, pretende-se reduzir os impactos ambientais associados a muitas obras de betão, habitualmente de cor cinzento sem qualquer tipo de pintura ou recobrimento, em áreas não urbanas. Considera-se assim a utilização de um BAC, já que este confere um acabamento homogéneo e uma superfície que não necessita de cuidados especiais em termos de acabamentos.

Pretende-se dimensionar várias composições de BACs, caracterizadas pelas suas propriedades no estado fresco através de ensaios normalizados [8, 11-13]. Realizaram-se composições de BACs

coloridos cujos conteúdos em agregados e finos eram os mesmos que os de uma composição de referência sem pigmento, mas substituindo parcialmente o volume de água por igual volume de pigmentos. Os resultados mostraram que a incorporação de pigmentos conduz a uma ligeira perda de trabalhabilidade, sendo essa perda de trabalhabilidade facilmente compensada com um aumento da dosagem de superplastificante.

1.3. MOTIVAÇÃO

A partir de Outubro de 2011, a possibilidade de utilização de cinzas volantes na produção de betão passou a ser uma alternativa na RAM. Visto que as cinzas volantes conduzem a betões com maior trabalhabilidade [6, 16], com a possibilidade de utilização destas na produção de betão, concluiu-se que seria oportuno investigar a possibilidade de produção de BAC com os materiais disponíveis na RAM (nomeadamente, utilizando agregados somente britados de origem vulcânica).

Por outro lado, está atualmente a decorrer na RAM um projeto cujo objetivo é a realização de uma parede através da aplicação de diversos betões coloridos produzidos com os materiais correntemente disponíveis na RAM [17]. Visto tratar-se de uma parede arquitetónica de betão à vista onde se pretende um acabamento superficial de elevada qualidade, julgou-se apropriado considerar a sua execução com BACs. Assim, o presente trabalho aborda conjuntamente as dificuldades do dimensionamento de BAC na RAM e a problemática da incorporação de pigmentos líquidos na composição para a produção de BACs coloridos.

1.4. OBJETIVOS

A presente dissertação pretende ser um contributo para a implementação sustentada de novas tecnologias no ramo da indústria da construção, com especial destaque para a RAM. Este trabalho enquadra-se na parte inicial de um projeto cujo objetivo é o desenvolvimento de ‘know-how’ e metodologias para auxiliar o dimensionamento de composições de BACs e BACs coloridos produzidos exclusivamente com os materiais disponíveis na RAM.

Assim, o objetivo principal deste trabalho é a produção em laboratório de uma composição de BAC cinzento produzido exclusivamente com os materiais disponíveis na RAM. Com base na composição de BAC cinzento, pretendia-se obter composições de BACs coloridos com propriedades reológicas (propriedades no estado fresco) semelhantes às da composição de referência.

1.5. CONTRIBUIÇÕES CIENTÍFICAS E LIMITAÇÕES

O presente documento reporta os resultados mais importantes dos trabalhos experimentais efetuados no Laboratório Cimentos Madeira. Foram efetuados ensaios em pastas, argamassas e betões de modo a aferir o efeito de alguns dos materiais constituintes do BAC, com especial destaque para a dosagem de superplastificante e o efeito dos pigmentos na composição. Dimensionou-se um BAC sem adição de pigmentos, sendo este denominado por betão de referência. Este é caracterizado em termos das suas propriedades no estado fresco: fluidez, viscosidade e resistência à segregação. Foram dimensionados outros BACs com utilização de pigmento, denominados por BACs coloridos, possuindo propriedades reológicas semelhantes às do betão de referência.

Em termos de contribuição científica, importa realçar que se demonstrou ser possível a produção de BAC cinzento na RAM. Para além disso, salienta-se o efeito da substituição parcial de água por igual volume de pigmento líquido, tendo-se verificado que a adição de certos pigmentos facilita a obtenção da autocompactabilidade.

Salienta-se a divulgação científica, visto que para além da presente tese foram publicados 2 artigos científicos [17, 18] (dos quais se apresentam uma cópia em anexo) nas atas do BE2012 – Encontro Nacional de Betão Estrutural, baseados nos resultados obtidos experimentalmente neste trabalho.

As principais limitações encontradas na realização desta dissertação, encontraram-se principalmente na falta de informação relativamente à interação entre os agregados britados vulcânicos existentes na RAM e os restantes constituintes dos BACs, já que não existia conhecimento da realização de algum tipo de BAC para estruturas na RAM.

Para caracterizar a autocompactabilidade de um BAC é necessário efetuar uma série de ensaios com equipamentos específicos normalizados para o betão [8, 11-13], assim como para as argamassas [19]. A inexistência inicial desses equipamentos na RAM implicou que o trabalho experimental tivesse de ser desenvolvido somente em 4 meses. Refira-se que o trabalho experimental foi conduzido com os materiais correntemente disponíveis/utilizados pela empresa Grupo Cimentos Madeira. Salienta-se ainda o facto de se terem testado apenas pigmentos líquidos e todos provenientes da mesma empresa.

Foi adotada uma metodologia de tentativa-erro para a obtenção das composições de BAC. Consequentemente, por se ter utilizado uma abordagem pouco científica o dimensionamento das composições BAC carece de justificação científica.

1.6. APRESENTAÇÃO DA TESE

Esta tese é constituída por seis capítulos. Apresentam-se nos próximos parágrafos uma descrição sumária de cada um dos restantes capítulos.

No presente capítulo são apresentados os objetivos e as motivações para a elaboração deste trabalho.

No capítulo 2 é apresentada a evolução ao longo do tempo da utilização do BAC em diversas regiões mundiais.

No capítulo 3 apresentam-se um conjunto de termos e definições teóricas importantes para o conhecimento de um BAC, assim como regras adotadas para a sua caracterização.

No capítulo 4 são apresentados todos os intervenientes utilizados na parte experimental desta dissertação: materiais, equipamentos, procedimentos de amassadura assim como os procedimentos de ensaio utilizados.

No capítulo 5 são apresentados e discutidos os resultados obtidos mais relevantes ao nível das pastas, argamassas e betões.

No capítulo 6 são apresentadas as considerações finais, resumindo alguns dos resultados mais pertinentes no estudo dos BACs coloridos com agregados britados vulcânicos. Inclui também sugestões de trabalhos futuros que possam vir a enriquecer o conhecimento atual de BAC na RAM.

2

ESTADO DA ARTE

2.1. INTRODUÇÃO

O betão colocado nas estruturas depende de uma compactação eficiente, durante a colocação, de modo a atingir a resistência e durabilidade exigidas. Surgem zonas de compactação incompletas, principalmente em zonas com elevadas densidades de armaduras, que podem colocar em causa o desempenho estrutural. Esta compactação é geralmente feita por vibradores operados por trabalhadores sem formação específica. Para além dos problemas técnicos mencionados acima e dos respetivos custos que daí poderão advir, existem também problemas de saúde assim como problemas associados ao ruído emitido pelos vibradores [2, 7, 9].

Betões que necessitem de pouca vibração ou compactação têm sido usados na Europa desde o início dos anos 70 [20], embora com uma relação de água/ligantes superior à de um BAC, já que não se encontravam disponíveis superplastificantes de elevado desempenho. Estes betões fluidos eram usados essencialmente na execução de estacas, paredes diafragma e betonagens submersas, onde era habitual haver ausência de armaduras. A quantidade destas misturas de ligantes excediam muitas vezes os 450kg/m^3 , e os seus efeitos secundários combinados com custos elevados de procedimentos de colocação mais exigentes, restringiram a aplicação destes primeiros betões fluidos para situações específicas [9].

A fase final do desenvolvimento das composições de betão autocompactável iniciou-se com o estudo do comportamento do betão submerso, no estado fresco. Este estudo decorreu desde os anos 80 no Reino Unido (Paisley), América do Norte (Sherbrooke), Canadá e Estados Unidos (US Army Engineer Waterways Experiment Station) e Japão (Universidade de Tóquio). Esta fase originou composições com grande resistência à segregação durante a sua colocação, o que constituiu uma grande vantagem

resultando numa colocação submersa mais segura e económica. O elevado desempenho exigido foi conseguido à custa da adição controlada de diferentes agentes de viscosidade (VMA). O objetivo consistia em aumentar a coesão interna do betão para alcançar a resistência à segregação pretendida sem prejudicar em demasia a trabalhabilidade; o betão deveria manter-se autocompactável [9]. A ideia de alargar o campo de aplicação deste tipo de composições, para além das aplicações submersas, foi sugerida pelo Professor Okamura [21] da Universidade de Tóquio, em 1986.

O BAC, tal como o conhecemos hoje surgiu no final dos anos 80 no Japão, devido à falta de homogeneidade do betão e conseqüente falta de durabilidade, observada em algumas estruturas. A causa para esta falta de durabilidade deveu-se às técnicas de colocação e homogeneização utilizadas para o betão, devido a um decréscimo de mão-de-obra especializada [21, 22]. Esta situação de má homogeneização foi ampliada por um dimensionamento das estruturas para terem em conta a ação sísmica. Verifica-se um aumento da quantidade de armaduras como consequência, tornando a tarefa de homogeneização mais difícil de ser realizada.

Na Europa, julga-se que tenha sido usado pela primeira vez na Suécia, na década de 90 em obras de engenharia civil relacionadas com vias de comunicação. Desde essa altura, o BAC tem sido cada vez mais utilizado em vários países europeus [2] sempre que se pretende satisfazer as seguintes exigências: i) reduzir a mão-de-obra para uma construção de betão armado [23]; ii) reduzir o tempo de construção; iii) permitir uma boa homogeneidade na estrutura, principalmente em zonas densamente armadas, e onde a vibração é difícil de ser feita; iv) eliminar o ruído devido à vibração [22].

2.2. HISTÓRICO DE APLICAÇÕES PRÁTICAS DE BETÃO AUTOCOMPACTÁVEL

O BAC começou a ser utilizado mais intensamente no Japão e depois em alguns países europeus. É aplicado principalmente nos seguintes tipos de obras de engenharia: i) pontes; ii) edifícios; iii) túneis; iv) produtos de betão (blocos, tanques de água, lajes, paredes); v) colunas de aço preenchidas com betão; vi) barragens. Apresentam-se em seguida alguns exemplos de aplicações de BAC em diversas obras de notável importância.

A primeira aplicação de BAC ocorreu em Junho de 1990 num edifício no Japão, e foi depois utilizado nos mastros de uma ponte atirantada em 1991. Foi colocado BAC leve na viga principal de uma ponte atirantada em 1992, e desde então outras estruturas têm utilizado BACs [15]. Como outros exemplos notáveis da aplicação prática de BACs, refere-se a construção da ponte suspensa de Akashi-Kaikyo (Figura 2-1), acabada em Abril de 1998, que possuía naquele ano a maior extensão de vão central do mundo (comprimento total: 3991 metros; vão central de 1991 metros) [22, 24]. O volume de betão

utilizado para os dois maciços de ancoragem da ponte foi de 290000 m³ [9, 25]. Um novo sistema de construção, que fazia uso completo do desempenho do BAC foi introduzido para este efeito. O betão era produzido numa fábrica de betão próxima do local de construção. Era bombeado e transportado para fora da fábrica em diversos tubos, estes com uma extensão de 200 metros. Foram usados mecanismos que permitiram o controlo do betão em todo o seu percurso. Como análise final para esta obra, utilizando um BAC em relação a um betão convencional reduziu-se em 20% o período de construção dos maciços de ancoragens (de 2,5 anos para 2 anos) [22].



Figura 2-1 – Ponte Akashi-Kaikyo, Japão [26]

Outro exemplo relevante da utilização de BAC foi construção de um tanque pré esforçado, ilustrado na Figura 2-2, destinado ao armazenamento de gás natural liquefeito (LNG), pertencente à Osaka Gas Company, e acabada em Junho de 1998 [24]. O volume de BAC utilizado nesta construção foi de 12 000m³. A adoção de BAC 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 [24];

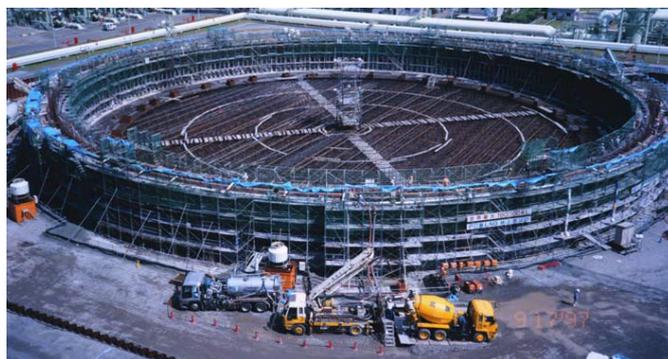


Figura 2-2 – Vista genérica do local de construção da obra durante a betonagem [9]

Já na Suécia o desenvolvimento de BAC surgiu devido à necessidade do aumento da produtividade e da melhoria das condições de trabalho. O BAC foi desenvolvido para uma utilização generalizada e não para uma utilização especial para um nicho de mercado. As primeiras aplicações práticas de BAC na Suécia foram realizadas em obras de arte. O SNRA (The Construction and Maintenance Centre at the Swedish National Road Administration) e o CBI (Swedish Cement and Concrete Research Institute) iniciaram um projeto conjunto que apontava para que, no final de 2002, 50% dos trabalhos de betão em pontes da Suécia fossem realizados em BAC. Na primavera de 1998 foram betonadas três pontes exclusivamente com BAC. A experiência positiva decorrente da aplicação em pontes fez despertar novos interesses e surgiram outras áreas de aplicação. Rapidamente foram reconhecidas as perspectivas positivas de utilização do BAC na construção de túneis, onde são importantes não só os aspetos da produtividade e das condições de trabalho, mas também as dificuldades de colocação do betão, em compactar por vibração estruturas com forma curva e em betonar as abóbadas. A utilização de BAC na construção de túneis tornou-se uma alternativa natural para os empreiteiros [9]. Um exemplo notável de utilização de BAC num túnel foi na construção do Sondra Lanken Tunnels, em Estocolmo, tal como ilustrado na Figura 2-3.

Verificando-se uma melhoria nas propriedades do betão endurecido, causada pela microestrutura melhorada do BAC, tem impulsionado ainda mais o seu desenvolvimento no que respeita à aplicação em obras de arte. Para isto contribuíram a melhoria da resistência, da durabilidade, coloração e uniformidade das superfícies. Um outro fator importante foi, naturalmente, a redução do custo do produto final.



Figura 2-3 – Sondra Lanken Tunnels, em Estocolmo [27]

Entre outras aplicações recentes, salientam-se algumas construções emblemáticas no Médio Oriente: o BAC foi usado no Dubai nas fundações do Burj Dubai Tower e no Shangri-La Hotel – nesta última aplicação, ilustrada na Figura 2-4, 780 m³ de BAC foram bombados até uma altura de 184 m para formarem as vigas que suportavam a armação de aço [28]; no Kuwait, o BAC foi utilizado na estação de tratamento de água de Sulaibiy – a utilização de um betão convencional teria sido muito difícil devido a um congestionamento elevado de armaduras [28]; na Arábia Saudita o BAC foi usado sobretudo em edifícios muito altos e elementos prefabricados, nomeadamente em Riyadhah, Jeddah [28].



Figura 2-4 – Hotel Shangri La, Dubai [29]

2.2.1. PORTUGAL

Em Portugal ainda não existe um consumo significativo de betão autocompactável. Muito provavelmente porque o preço dos materiais acabam por ter grande peso na decisão da utilização deste tipo de aplicação. Praticamente só se utilizam em aplicações especiais de betão branco onde há necessidade de ficar à vista, ou zonas onde não se consegue vibrar facilmente. No entanto, já foi aplicado na reparação e reforço de estruturas. Um exemplo de aplicação foi numa viga de coroamento da fachada de um edifício do Alto do Parque, em Lisboa, ilustrado na Figura 2-5. A viga tem 60 metros de vão, e por condicionamentos de projeto, de peso próprio admissível, originou espessuras do caixão de 10 centímetros. Tendo em conta os recobrimentos necessários da armadura, era bastante dificultada a vibração do betão. Assim foi adotada uma solução com betão autocompactável [29].



Figura 2-5 – Exemplo de aplicação de BAC numa viga de um edifício em Lisboa [30].

Outro exemplo, neste caso de um edifício onde a utilização de BAC se tornou muito relevante, foi no Edifício Vodafone, dos arquitetos José António Barbosa e Pedro Lopes Guimarães, situado na cidade do Porto. Foi distinguido na categoria de Arquitetura Institucional com o prémio para o melhor edifício de 2010 [31, 32] por parte da página de internet ‘Arch Daily’ [33] dedicada à arquitetura. A estrutura com a fachada de BAC branco permitiu chegar a todas as formas irregulares e é o primeiro do género em Portugal. A Figura 2-6 ilustra o exterior deste edifício.



Figura 2-6 – Edifício Vodafone, Porto [34]

Para além destes, convém referir que o BAC em Portugal é bastante utilizado na pré-fabricação, onde muitos dos elementos, especialmente os de dimensões reduzidas ou de acabamentos (como por exemplo as vigas de bordadura), são fabricados com BAC.

2.2.2. REGIÃO AUTÓNOMA DA MADEIRA

Não existe, até à data, conhecimento da utilização de BAC na RAM (Região Autónoma Da Madeira) em qualquer tipo de obras. Presume-se que a falta de conhecimento desta tecnologia associada aos materiais correntemente disponíveis no mercado da RAM para a produção de betão, assim como a falta de equipamento necessário para a caracterização de um BAC tenham sido os principais responsáveis pela não utilização do BAC na RAM. Importa realçar que até ao início deste trabalho não existiam na RAM os equipamentos necessários para caracterizar o estado fresco de um BAC.

3

BETÃO AUTOCOMPACTÁVEL

3.1. TERMOS E DEFINIÇÕES

Apresentam-se de seguida alguns termos comumente utilizados em bibliografia relativa ao BAC, com o objetivo de tornar a elegibilidade deste trabalho mais fácil.

Adição – Material inorgânico, de muito pequena dimensão usado em betão, a fim de melhorar ou conseguir certas propriedades especiais no betão. Habitualmente são utilizados dois tipos de adições inorgânicas definidos na NP EN 206 [35]: adições quase inertes (Tipo I); ii) adições pozolânicas ou hidráulicas latentes (Tipo II) [36]. Neste trabalho foram utilizadas adições do tipo II, nomeadamente as cinzas volantes.

Adjuvante – Material adicionado durante o processo de mistura de betão, em quantidades pequenas relativamente à massa de ligante, de modo a alterar as propriedades do betão fresco ou endurecido [2]. Para este trabalho foi utilizado um superplastificante e vários tipos de pigmentos líquidos.

Ligante – O ligante é constituído pelo cimento e pela adição de tipo II [2].

Capacidade de preenchimento – Capacidade do betão fresco fluir e preencher todos os lugares dentro da cofragem, sob a ação do seu peso próprio [2].

Finos – Normalmente, é o material com partículas de tamanho inferior a 0.125 milímetros – inclui as frações de cimento, adições e de agregados [2] (com granulometria inferior a 0.125 milímetros). Contudo, neste trabalho considerou-se como material fino apenas o cimento e a adição.

Propriedades reológicas – Propriedades do betão no seu estado fresco.

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

Argamassa – Fração do betão constituída pela pasta e pelos agregados com dimensão máxima inferior a 4 milímetros [2].

Pasta – Fração do betão constituída pelo cimento, adição e água [2]. Quando aplicável, a utilização de adjuvante (incluindo pigmentos) também é contabilizada como fazendo parte da pasta.

Capacidade de passagem – Capacidade do betão fresco fluir através de espaços confinados ou através de aberturas estreitas, tais como zonas com elevada densidade de armaduras [2].

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 [2].

Resistência à segregação – Habilidade do betão se manter homogéneo no seu estado fresco [2], sem que ocorra separação dos seus materiais constituintes.

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 aplicado uma fonte de energia [2].

Viscosidade – Resistência para um material (exemplo: BAC) fluir ou escoar assim que o escoamento se inicie [2].

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 compactabilidade [19].

3.2. CONCEITO

O BAC é um betão inovador que não requer vibração ou compactação na sua colocação. É capaz de fluir sob o seu peso próprio, preenchendo totalmente a cofragem e atingir uma compactação completa, mesmo na presença de zonas densamente congestionadas por armaduras ou outros obstáculos à passagem do betão fresco. O betão endurecido é denso, homogéneo e possui as mesmas propriedades de engenharia e durabilidade de um betão comum, vibrado tradicionalmente [2, 3].

Estas propriedades são testadas e avaliadas através de ensaios normalizados, e existem quatro requisitos funcionais que devem ser atendidos simultaneamente: capacidade de preenchimento, capacidade de escoamento, resistência à ocorrência de segregação e capacidade do betão de passar em espaços confinados [2].

O BAC oferece uma taxa célere de betonagem, com tempos mais rápidos de construção e facilidade de escoamento em zonas congestionadas por armaduras. A fluidez e a resistência à segregação do BAC asseguram um nível elevado de homogeneidade, valores mínimos de vazios no betão e uma resistência do betão uniforme, potenciando desta forma um nível superior de acabamento e durabilidade à estrutura. O BAC é muitas vezes produzido com um rácio baixo de água-cimento conduzindo muitas vezes a uma elevada resistência inicial. Permite uma desmoldagem mais rápida de cofragens, situação sempre útil e considerada como requerimento essencial em diversas obras de engenharia, principalmente naquelas que requerem pré-esforço [2].

A Figura 3-1 apresenta um comparativo genérico dos materiais constituintes de um BAC e dos materiais constituintes de um betão vibrado convencionalmente. Da análise desta figura pode-se concluir que:

- São utilizados os mesmos materiais em ambos os tipos de betão, à exceção do superplastificante, componente essencial num BAC, embora não seja um requisito num betão convencional;
- Existe uma utilização semelhante dos valores de água (w), agregados finos (s) e do volume de ar considerado (Ar).
- Num BAC, é utilizado um volume de ligante (p), (composto pelo cimento (c) e por uma adição) com valor superior ao utilizado num betão convencional, e conseqüentemente um menor volume de agregados grossos (g), para um volume de amassadura idêntico.

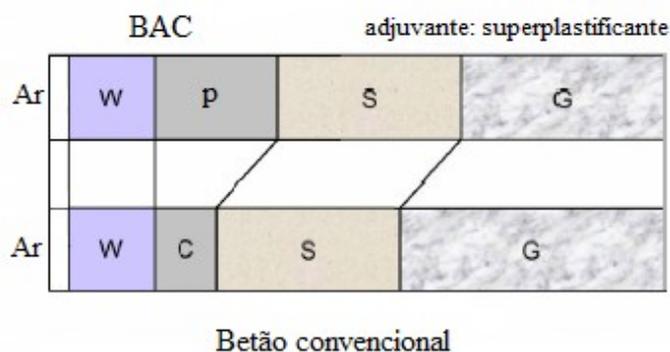


Figura 3-1 – Proporções volumétricas de um BAC e de um betão convencional [37]

3.3. VANTAGENS E DESVANTAGENS

Apresentam-se de seguida algumas vantagens do BAC:

- Redução do custo dos trabalhos e do período de construção, pois não são necessárias operações de compactação do betão, aumentando o ritmo de colocação do BAC comparativamente a um betão convencional e conseqüentemente uma redução do tempo total de obra.
- Melhoria das condições de trabalho no local de obra, devido à não utilização dos vibradores: reduz-se a poluição sonora e problemas associados à sua utilização, como o ‘vibration white finger’. A qualidade nas zonas envolventes ao local de obra não fica afetada pelo ruído, situação benéfica e muito útil em zonas urbanas.
- Maior flexibilidade na conceção estrutural e arquitetónica de uma estrutura, pois é possível usar elementos com formas complexas e de menores espessuras. Reduzem-se as restrições associadas ao nível das cofragens e armaduras.
- Maior homogeneidade, devido às propriedades reológicas que um BAC possui no seu estado fresco e conseqüente maior durabilidade das estruturas.

Como desvantagens, destacam-se os seguintes aspetos:

- Maior custo dos materiais constituintes, relativamente a uma amassadura de idêntico volume ao de um betão convencional. São usados mais finos, sendo estes economicamente mais caros que os agregados.
- Maior calor de hidratação, e maior suscetibilidade à retração e fluência em relação a um betão convencional, devido a um maior volume de finos utilizados na sua constituição.
- Necessita de maior controlo dos materiais constituintes, pois o BAC é muito influenciado pelas características físicas e químicas dos seus materiais constituintes, assim como das proporções em que estes são utilizados.
- Necessita de cofragens estanques, já que temos um betão muito fluido, capaz de fluir em pequenos espaços ou aberturas. Um BAC também poderá acarretar pressões adicionais às cofragens, se for betonado a partir da base [38].

3.4. PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS

O BAC e o betão vibrado tradicionalmente de idênticas tensões de rotura à compressão, têm geralmente características idênticas. Se existirem diferenças, estas são usualmente amparadas pelas assunções sobre os quais os eurocódigos são baseados, e que estão geralmente do lado da segurança [2].

Em relação à tensão de rotura à compressão do betão, um BAC terá normalmente uma maior tensão de rotura em relação a um betão convencional com uma relação água/ligante similar. A falta de vibração melhora e consolida a ligação entre agregado e pasta endurecida [2].

Em relação à resistência à tração, assume-se que estes valores são também idênticos aos de um betão convencional, já que o volume da pasta (cimento + finos + água) não tem um efeito significativo na resistência à tração para uma dada classe de resistência do betão [2].

Em termos de módulo de elasticidade, o tipo e quantidade de agregado grosso facultam a maior influência no betão. É sabido que utilizando um agregado grosso com um valor alto de módulo de elasticidade proporcionará um betão com elevado módulo de elasticidade. No entanto aumentando o volume de pasta poderá decrescer o módulo de elasticidade, situação que se poderá vir a verificar num BAC [2].

Devido ao maior volume de pasta, o valor de fluência para um BAC poderá ser ligeiramente superior ao de um betão convencional de igual tensão de rotura à compressão. Estas diferenças são geralmente pequenas e estão consideradas nas tabelas e fórmulas providas pelo Eurocódigo 2 [2, 28]. Testes foram feitos de modo a serem aferidas as propriedades de retração e fluência de diferentes tipos de BAC em relação a um betão convencional [39]: i) a deformação causada pela retração poderá ser superior; ii) a deformação causada pela fluência poderá ser menor; iii) o valor da soma das deformações devido à retração e fluência são similares [2].

Relativamente ao coeficiente de expansão térmica e resistência ao fogo, valores idênticos aos de um betão convencional serão utilizados para o BAC [2].

3.5. DIMENSIONAMENTO DE UM BAC

Os métodos de dimensionamento convencionais (por exemplo, através do método de Faury) para determinar a composição de um betão corrente não são aplicáveis para o BAC, devido ao facto deste ter um valor para a classe de consistência superior à classe mais alta especificada na norma para os betões [35]. É assim, necessário adotar uma nova metodologia de formulação da composição para o BAC.

Existem diversos métodos para se atingir a autocompactabilidade de um betão, onde o objetivo passa por não só garantir uma elevada deformabilidade da pasta ou agregado, mas também uma resistência à

segregação adequada entre os agregados grossos e a argamassa, quando esta flui através de armaduras ou zonas congestionadas [37].

Para se alcançar as propriedades de capacidade de enchimento, capacidade de passagem e resistência à segregação, deve-se limitar o volume de agregado grosso e deste modo reduzir as colisões entre partículas de agregado, assegurando a capacidade de passagem sem que existam bloqueios. Um aumento do volume de pasta na composição, uma relação baixa entre água e finos, assim como a introdução de superplastificante garantem simultaneamente a fluidez e a resistência à segregação da composição [30, 40]. São propostos vários métodos de dimensionamento para um BAC, em diferentes países. A maioria das abordagens baseia-se num procedimento por tentativa erro, para otimizar a composição do BAC. Geralmente, o volume de pasta deve ser alto relativamente a um betão convencional, com valores entre os 30 e os 40% do volume de betão, e consequentemente um elevado conteúdo de finos ligantes (380-600 Kg/m³). A quantidade de água utilizada está habitualmente entre os 150-210 Kg/m³ [7]. A Tabela 3-1 mostra alguns dos valores propostos pelos métodos de dimensionamento vulgarmente utilizados:

Tabela 3-1 – Valores recomendados pela JCSE, BIBM et al. e RILEM [7]

Organização	JCSE		BIBM et al.		RILEM	
	<i>Em volume [m³/m³]</i>	<i>Em massa [Kg/m³]</i>	<i>Em volume [m³/m³]</i>	<i>Em massa [Kg/m³]</i>	<i>Em volume [m³/m³]</i>	<i>Em massa [Kg/m³]</i>
<i>Agregado grosso</i>	0.30-0.32		0.27-0.36	750-1000	0.30-0.34	750-920
<i>Agregado fino</i>						710-900
<i>Cimento</i>					350-450	
<i>Total de finos</i>	0.16-0.19			380-600		450-600
<i>Água</i>		155-175	0.15-0.21	150-210		150-200
<i>Pasta</i>			0.30-0.38		0.34-0.40	
<i>Água/finos</i>	0.85-1.15		0.85-1.10		0.80-1.20	
<i>Agregado fino/ Argamassa</i>					0.40-0.50	
<i>Agregado Grosso/ Total de agregados</i>			0.48-0.55			

3.6. CLASSIFICAÇÃO DO ESTADO FRESCO DE UM BAC

3.6.1. ESPALHAMENTO

O valor de espalhamento está diretamente relacionado com a fluidez e capacidade de preenchimento em condições onde o BAC não se encontre confinado. Será normalmente especificado e requerido o ensaio relativo ao espalhamento do BAC. O ensaio não é adequado quando a máxima dimensão do agregado excede os 40 milímetros [36].

Um BAC terá uma de três classes de espalhamento possíveis e definidas na norma [8], definidas em termos dos resultados obtidos em ensaio [8]:

- SF1 (550 – 650) mm é apropriado para:
 - Estruturas de betão armado ligeiramente armadas, com livre deslocamento desde ponto de entrega do betão até à cofragem (por exemplo, lajes de habitação).
 - Vazamento através de um sistema de injeção de bomba, (por exemplo, revestimentos de túneis).
 - Seções suficientemente pequenas para impedir fluxo horizontal longo, (por exemplo, fundações profundas).
- SF2 (660 – 750) mm é adequado para muitas aplicações normais, (por exemplo, paredes, colunas).
- SF3 (760 – 850) mm é habitualmente produzido com um tamanho máximo de agregados limitados (inferior a 16 mm) e é tipicamente usado em aplicações verticais, em estruturas muito congestionadas com armaduras ou obstáculos e estruturas com formas complexas. Uma classe de espalhamento SF3 dará normalmente um melhor acabamento superficial para aplicações verticais, embora a resistência à segregação seja mais difícil de controlar [2].

3.6.2. VISCOSIDADE

O escoamento de um BAC com viscosidade baixa será inicialmente muito rápido e depois para. Um BAC com alta viscosidade poderá continuar a fluir lentamente por um período de tempo prolongado. A viscosidade pode ser avaliada medindo o tempo t_v no funil V, ou durante o ensaio de espalhamento, através do t_{500} . O ensaio do funil V não é apropriado quando a máxima dimensão do agregado excede os 22,4 milímetros [36].

Um BAC poderá possuir duas classes de viscosidade, baixa ou alta e só deverá ser requerida em casos especiais [2], definidas em termos dos resultados obtidos em ensaio [11]:

- VF1 (< 8s [2]; < 9s [36]) possui uma boa capacidade de preenchimento, mesmo na presença de zonas de armaduras congestionadas. É capaz de se auto nivelar e tem geralmente o melhor acabamento superficial. No entanto é mais passível de sofrer efeitos de exsudação e de segregação.
- VF2 (9-25s [2, 36]) é capaz de exibir sinais de efeitos de tixotropia, que podem ser úteis na limitação de pressão na cofragem ou melhorando a resistência à segregação. Os efeitos negativos podem ser obtidos no acabamento superficial (através do aparecimento de bolhas de ar), tal como uma maior sensibilidade quando existirem atrasos entre betonagens sucessivas.

3.6.3. CAPACIDADE DE PASSAGEM

A capacidade de passagem refere-se à capacidade do betão fresco escoar, sem perda de homogeneidade ou sem que este provoque bloqueios, através de aberturas estreitas ou espaços confinados, tais como zonas com elevada densidade de armaduras. Ao definir a capacidade de passagem, é preciso considerar a geometria da armadura. A dimensão condicionante é o menor espaço através do qual o BAC terá de escoar continuamente de modo a preencher a cofragem, denominado por espaço de escoamento. Em estruturas complexas que possuam um espaço de escoamento inferior a 60 milímetros, poderão ser requisitados ensaios à escala real [36].

Um BAC poderá possuir uma de duas classes de capacidade de passagem, definidas em termos dos resultados obtidos em ensaio [12]:

- PA1 [2] / PL1 [36] (≥ 0.80 com 2 barras no ensaio [12]) é a classe de capacidade de passagem atribuída a estruturas com um espaço de escoamento de 80-100 mm, (por exemplo casas e estruturas verticais) [2].
- PA2 [2] / PL2 [36] (≥ 0.80 com 3 barras no ensaio) é a classe de capacidade de passagem atribuída a estruturas com um espaço de escoamento de 60-100 mm, (por exemplo estruturas de engenharia civil) [2].

3.6.4. ESTABILIDADE

O valor de estabilidade revela a resistência à segregação e é fundamental para a homogeneidade e qualidade do BAC. O BAC pode segregar, tanto dinamicamente durante a sua colocação, como estaticamente após a sua colocação, mas ainda antes de endurecer. A segregação estática será mais prejudicial em elementos altos, embora possa conduzir a defeitos superficiais em lajes com pouca espessura, tais como a fissuração ou uma superfície fragilizada. A estabilidade é um critério importante nas classes de espalhamento mais altas ou nas classes de viscosidade mais baixas. Este ensaio de resistência à segregação não é aplicável ao betão com fibras ou agregados leves [36].

Um BAC poderá possuir uma de duas classes de resistência à segregação, definidas em termos dos resultados obtidos em ensaio [13]:

- SR1 ($\leq 20\%$) é geralmente aplicável em aplicações verticais e placas finas com uma distância de escoamento menor que cinco metros e com um espaço de escoamento superior a 80 mm.
- SR2 ($\leq 15\%$) é usado preferencialmente em aplicações verticais se a distância de escoamento for superior a cinco metros, com um espaço de escoamento superior a 80 mm, para permitir um controle da segregação durante o escoamento. Também poderá ser usado para um espaço de escoamento inferior a 80 mm, embora neste caso, e se a distância de escoamento for superior a cinco metros, um valor inferior a 10% seja recomendado. Esta classe poderá ser especificada se a resistência e qualidade da superfície for particularmente crítica.

4

TRABALHO EXPERIMENTAL

4.1. MATERIAIS CONSTITUINTES

Os materiais constituintes de um BAC são os mesmos que são utilizados num betão vibrado convencionalmente, caracterizado através da norma [35]. No entanto, para se manter um desempenho consistente e uniforme do BAC, são necessários cuidados adicionais na seleção inicial e uma monitorização contínua de todos os fornecimentos de materiais [2].

Para se atingirem tais requisitos, o controlo dos materiais constituintes necessita de ser aumentado e as variações toleráveis restringidas. Deste modo, a produção diária estará mais facilmente dentro dos critérios de conformidade sem a necessidade de testar ou ajustar os lotes de material [2].

4.1.1. MATERIAIS FINOS

4.1.1.1. CIMENTO

Todos os cimentos que cumpram com os requisitos da norma [41] podem ser utilizados na produção de BAC. A utilização correta de cimento é normalmente ditada pelo tipo de cimento correntemente utilizado pelo produtor ou por requisitos especificados para uma determinada aplicação [2].

O cimento utilizado para a elaboração deste trabalho experimental foi o cimento Portland CEM II/A-L 42,5R. É composto por 80%-94% de clínquer Portland, 6%-20% de Calcário e 0%-5% de outros constituintes. Segundo o fornecedor [42], este tipo de cimento é especialmente formulado para betão pronto ou fabricado em obra de média a elevada resistência, conjugando uma boa trabalhabilidade e elevadas resistências. É um cimento de cor cinzenta, com baixo calor de hidratação e melhor

trabalhabilidade que um cimento CEM I da mesma classe de resistência. Possui um desenvolvimento rápido de resistências.

Foram também utilizados, embora para uma menor quantidade de ensaios, o Cimento Branco Portland CEM II/B-L 32,5R (br) [43] e o Cimento Portland CEM II/B-L 32,5N [44]. Ambos são compostos por 65%-79% de clínquer Portland, 21%-35% de calcário e 0%-5% por outros constituintes. Segundo o fornecedor, este último possui uma excelente trabalhabilidade e baixo calor de hidratação. Pode ser utilizado em betão estrutural, pronto ou fabricado em obra, desde que em obras de resistência média. Possui menor calor de hidratação que um cimento CEM I da mesma classe de resistência. Possui também um desenvolvimento mais lento de resistências relativamente ao CEM II/A-L 42,5R. Já o cimento branco é recomendado no fabrico de betão armado e não armado de elevado efeito arquitetónico branco ou com adição de pigmentos de cor. Refira-se que o cimento branco não está correntemente disponível na RAM. Os cimentos utilizados neste trabalho foram provenientes da fábrica da Secil-Outão e encontram-se certificados segundo a norma NP EN 197-1 [41]. Apresentam-se, na Tabela 4-1 os valores das propriedades físicas e mecânicas, para cada um deles. Estes dados foram obtidos em laboratório a partir de ensaios normalizados.

Tabela 4-1 – Caracterização química, física e mecânica dos cimentos utilizados (dados do fornecedor)

		<i>CEM II/A-L 42,5R</i>	<i>CEM II/B-L 32,5R (br)</i>	<i>CEM II/B-L 32,5N</i>	<i>Método de ensaio</i>
Características químicas	<i>Perda ao fogo</i>	7,93%	-	14,21%	NP EN 196-2 [45]
	<i>Cal livre</i>	1,06%	-	0,88%	NP EN 451-1 [46]
Características físicas	<i>Massa volúmica</i>	3100 Kg/m ³	2940 Kg/m ³	3000 Kg/m ³	LNEC E-64 [47]
	<i>Superfície específica</i>	4780 cm ² /g	-	5330 cm ² /g	NP EN 196-6 [48]
	<i>Água da pasta</i>	28,2%	-	25,8%	
	<i>Tempo de início de presa</i>	110 min	>75min	115 min	NP EN 196-3 [49]
	<i>Tempo de fim de presa</i>	176 min	-	179 min	
Características mecânicas	<i>Resistência à compressão 2 dias</i>	29,2 MPa	>10,0 MPa	19,0 MPa	
	<i>Resistência à compressão 7 dias</i>	43,6 MPa	-	30,5 MPa	NP EN 196-1 [49]
	<i>Resistência à compressão 28 dias</i>	55,3 MPa	>32,5MPa e <52,5MPa	40,0MPa	

4.1.1.2. ADIÇÕES

Devido aos requisitos no estado fresco do BAC, adições inertes e/ou pozolânicas ou hidráulicas são habitualmente utilizadas para melhorar e manter a coesão e a resistência à segregação da composição. Estas adições também regulam o conteúdo de cimento, reduzindo o calor de hidratação e a retração térmica [5].

Nas composições ensaiadas foi utilizada a adição de cinzas volantes, com massa volúmica de 2360 Kg/m³ determinada em laboratório segundo a norma [50]. As cinzas volantes são um subproduto industrial, provenientes da queima de carvão pulverizado ou moído em centrais termoelétricas. Possuem forma esférica e uma elevada finura.

As cinzas volantes já demonstraram ser uma adição efetiva para o BAC providenciando uma redução de sensibilidade às mudanças do conteúdo de água, e uma coesão melhorada numa composição. No entanto, níveis muito elevados de cinzas volantes produzem uma fricção na pasta que é tão coesiva que a pode tornar muito resistente ao espalhamento [2]. Para além disso, as cinzas volantes reagem com o hidróxido de cálcio, facto que conduz ao abaixamento do pH do betão.

4.1.2. ÁGUA

Foram utilizados dois tipos de água para os ensaios. Nas pastas e argamassas, foi utilizada água destilada, e no fabrico dos betões água da rede de abastecimento.

4.1.3. ADJUVANTES

Os superplastificantes são um componente essencial do BAC. A escolha de um adjuvante para um desempenho ótimo de uma composição de betão poderá ser influenciada pelas propriedades químicas e físicas dos cimentos e adições utilizadas. Fatores como o conteúdo de carbono, alcalis, celite (C₃A) e finura poderão ter um efeito imprevisto. É recomendado que a compatibilidade seja cuidadosamente verificada, se existir uma mudança de fornecimento destes materiais [2].

Este tipo de adjuvantes é geralmente muito consistente de lote para lote, embora escolhendo um outro fornecedor, ou produto de um mesmo fornecedor possa produzir um efeito significativo no desempenho de um BAC [2].

Para as composições deste presente trabalho foi utilizado um único adjuvante, da marca BASF e de nome Glenium Sky 548. Este é um superplastificante de terceira geração, à base de polímeros de éter

policarboxílico (PCE) [51]. De acordo com o fabricante, este superplastificante apresenta uma massa volúmica de $1,038 \pm 0,020 \text{ g/cm}^3$.

Nota: como o teor de sólidos deste superplastificante era desconhecido e como o este se apresentava no estado líquido, neste trabalho considerou-se que o teor de sólidos do superplastificante era de 0% (ou seja, que o superplastificante era totalmente constituído por um matéria líquida) e como tal efetuou-se a incorporação do superplastificante na composição de betão através da substituição de igual volume de água (mantendo-se constante o volume total de fluídos na composição).

4.1.4. PIGMENTOS

Geralmente, devido à grande fluidez a dispersão de pigmentos é mais eficiente nos BACs do que no betão convencional, proporcionando a obtenção de cores mais uniformes. No entanto, e devido a uma maior quantidade de conteúdo em pasta de um BAC relativamente ao um betão convencional, pode ser necessária uma maior dosagem de pigmento para se atingir a densidade de coloração requerida [2].

O conjunto de pigmentos utilizados nos diversos ensaios desta tese foi fornecido pela empresa BASF e têm a denominação de Rheocolor. É um conjunto de pigmentos baseados em óxidos inorgânicos, na forma líquida para coloração de betões que contenham cimento ou cal como ligante. É recomendado utilizar uma dosagem de 2 a 10% de pigmento sobre a massa total do ligante. A Tabela 4-2 mostra-nos informações disponibilizadas pelo fornecedor (comum para todos os de pigmentos utilizados) [52].

Tabela 4-2 – Propriedades dos pigmentos

<i>Função principal</i>	Agente para coloração de argamassas ou betão
<i>Efeito secundário</i>	Aumento da água na composição
<i>Aspeto físico</i>	Líquido (cores diferentes)
<i>Ponto de ebulição</i>	100°C
<i>Ponto de inflamação</i>	Não inferior a 100°C

De notar que os valores das densidades dos pigmentos utilizadas neste trabalho foram obtidos experimentalmente porque em alguns pigmentos observaram-se diferenças significativas para os valores indicados pelo fabricante, tal como ilustrado na Tabela 4-3. Provavelmente a diferença de valores encontrada nas densidades foi devido ao facto de neste trabalho se ter utilizado amostras de

pigmentos que não terão sido colhidas de forma a serem completamente representativas dos pigmentos comercializados [52]).

Tabela 4-3 – Dados técnicos dos pigmentos utilizados

<i>Cor</i>	<i>Densidade (g/dm³)</i>	<i>Viscosidade</i>	<i>pH</i>
<i>Rheocolor 1 Amarelo</i>	1550 (1500) *	30±5	6-8
<i>Rheocolor 1 Laranja</i>	1580 (1500) *	35±5	6-8
<i>Rheocolor 1 Vermelho</i>	1500 (1900) *	25±5	6-8
<i>Rheocolor 1 Castanho</i>	1600 (1600) *	25±5	6-8
<i>Rheocolor 1 Preto</i>	1640 (1400) *	20±5	6-8
<i>Rheocolor 1 Verde</i>	1271 (1900) *	30±5	6-8

* Valores fornecidos pelo fabricante

Nota: à semelhança do superplastificante, também o teor de sólidos dos pigmentos era desconhecido. Assim, visto que estes se comercializavam no estado líquido (sendo inclusive designados de pigmentos líquidos), neste trabalho considerou-se que o teor de sólidos dos pigmentos era de 0% (ou seja, que os pigmentos eram totalmente constituídos por matéria líquida) e como tal efetuou-se a incorporação dos pigmentos na composição de betão através da substituição de igual volume de água (mantendo-se constante o volume total de fluidos na composição).

4.1.5. AGREGADOS

4.1.5.1. DESCRIÇÃO PETROGRÁFICA E PROCESSO DE OBTENÇÃO DOS AGREGADOS

Segundo a NP EN 932-3 [53], a descrição petrográfica dos agregados utilizados é: Basalto do Quaternário. Ou seja, partículas de forma subprismática a subdiscoidal e angulosidade caracterizada como muito angulosa a subangulosa. A superfície apresenta-se rugosa, observando-se em algumas partículas uma película avermelhada de óxidos e hidróxidos de ferro e magnésio provenientes de constituintes minoritários do tufo de Lapili. O grau de meteorização das partículas de agregado observado revela-se incipiente [54-56]. Esta descrição petrográfica aplica-se a todos os agregados definidos nas próximas subsecções.

Os agregados são provenientes da pedra da empresa Brimade Sociedade de Britas da Madeira, S.A. localizada na Fundoa, RAM. A Figura 4-1 ilustra um dos locais de extração do material bruto, após o

qual é transportado, armazenado e esmagado em várias partes, conforme ilustrado desde a Figura 4-1 até à Figura 4-5.



Figura 4-1 – Rocha basáltica, pedreira da Fundoa



Figura 4-2 – Armazenamento das rochas basálticas, Fundoa



Figura 4-3 – Esmagamento de rochas vulcânicas, Fundoa



Figura 4-4 – Vista geral do processo de britagem, Fundoa



Figura 4-5 – Transporte dos agregados britados em correias de transporte

4.1.5.2. AGREGADOS FINOS

Foram utilizados dois tipos de agregados finos nas composições de argamassas e betões. Ambos os tipos de agregados finos correspondiam a areias britadas de origem vulcânica, sendo que a areia mais fina era denominada por Areia 0/2 (s1) e a areia de granulometria mais grossa por Areia 0/4 (s2). Ambos os agregados estão em conformidade com a norma NP EN 12620 [57]. Na Tabela 4-4 resume-se o conjunto de ensaios normalizados efetuados para a caracterização dos mesmos (dados do produtor) e na Figura 4-6 apresentam-se as curvas granulométricas dos agregados finos utilizados.

Tabela 4-4 – Caracterização do conjunto de agregados finos

<i>Designação</i>	<i>Métodos de ensaio</i>	<i>Areia 0/2</i>	<i>Areia 0/4</i>
<i>Dimensão dos agregados (d/D) [mm]</i>		0/2	0/4
<i>% de partículas com d > 4,00 mm</i>		100	95
<i>% de partículas com d < 0,125 mm</i>	NP EN 933-1 [58]	22	2
<i>Módulo de finura</i>		1,85	4,43
<i>Centro de finura</i>		2,83	4,66
<i>Massa volúmica (I/Se/Sa) (Kg/m³)</i>	NP EN 1097-6 [59]	(3060/2830/2900)	(2990/2760/2840)
<i>Baridade não compactada (Kg/m³)</i>	NP EN 1097-3 [60]	1580	1580
<i>Absorção de água (%)</i>	NP EN 1097-6 [59]	2,7±1	2,8±1
<i>Teor de cloretos (%)</i>	NP EN 1744-1 [58]	<0,01	<0,01

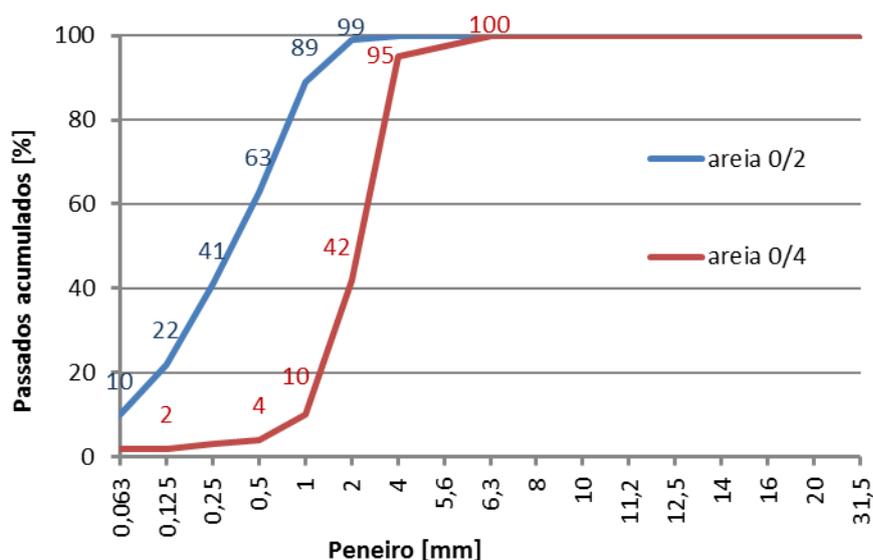


Figura 4-6 – Curva granulométrica dos agregados finos

4.1.5.3. AGREGADOS GROSSOS

O menor espaçamento por onde um BAC poderá fluir é um fator fundamental na determinação da dimensão máxima de agregado a ser utilizado. O bloqueio de agregados nestas zonas confinadas deverá ser evitado, sendo o teste da caixa L, um excelente indicativo da capacidade de passagem de uma composição de BAC. Recomenda-se uma máxima dimensão de agregado limitada a 16-20 mm [19]. A forma e a distribuição granulométrica influenciam diretamente o espalhamento e a capacidade de passagem de um BAC, assim como o volume de pasta a ser utilizado numa composição de BAC. Quanto mais esféricas forem as partículas dos agregados, menor a tendência para que estes provoquem bloqueios e maior será o espalhamento devido a uma menor fricção interna [2].

Os agregados britados oferecem geralmente ao betão melhores propriedades mecânicas, mas possuem o inconveniente de piorarem a trabalhabilidade do betão no seu estado fresco [6]. Estavam disponíveis três tipos de agregados grossos, todos britados de origem vulcânica: i) Brita 4/8, ii) Brita 8/16 e iii) Brita 11/22. Todos os agregados são provenientes da pedreira da empresa Brimade – Sociedade de Britas da Madeira, S.A. localizada na Fundoa, RAM. Apresenta-se na Tabela 4-5 e na Figura 4-7 as características (valores publicados pelo produtor em conformidade com a norma NP EN 12620 [57]) e as curvas granulométricas para o conjunto de agregados grossos utilizados.

Tabela 4-5 – Caracterização do conjunto de agregados grossos

<i>Designação</i>	<i>Método de ensaio</i>	<i>Brita 4/10</i>	<i>Brita 8/16</i>	<i>Brita 11/22</i>
Dimensão nominal (d/D)	NP EN 933-1 [58]	4/10	8/16	11/22
Índice de achatamento	NP EN 933-3 [61]	FI ₃₅	FI ₃₅	FI ₃₅
Massa volúmica (I/Se/Sa) (Kg/m³)	NP EN 1097-6 [59]	(3030/2820/2890)	(3020/2810/2880)	(3020/2840/2900)
Absorção de água (%)	NP EN 1744-1 [58]	2,7±1	2,6±1	2,1±1
Teor de cloretos (%)	ASTM C1260-05 ^a [62]	<0,01	<0,01	<0,01
Reatividade álcali-silica	NP EN 1097-3 [60]	Classe 1-Não reativa	Classe 1-Não reativa	Classe 1-Não reativa
Baridade não compactada (Kg/m³)	NP EN 1097-1 [60]	1455	1438	1548
Resistência ao Desgaste: (Micro Deval)	NP EN 1097-2 [60]	M _{DE25}	M _{DE25}	M _{DE25}
Resistência à fragmentação: Los Angeles		LA ₂₅	LA ₂₅	LA ₂₅

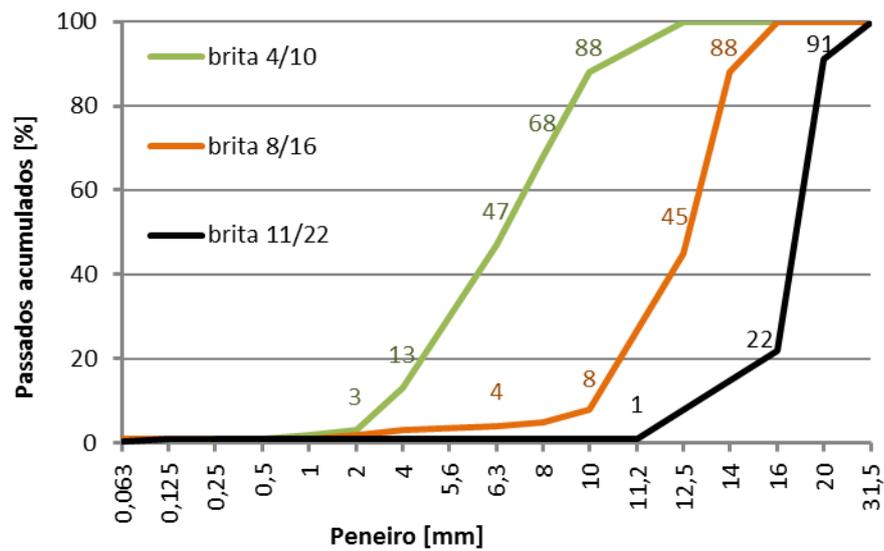


Figura 4-7 – Curva granulométrica dos agregados grossos

Para a realização dos ensaios laboratoriais, foram utilizados agregados secos. Embora fosse possível realizar composições tendo em conta o teor de humidade e percentagens de absorção destes materiais, o processo de determinação do teor de humidade seria dispendioso em termos de tempo disponível. A Figura 4-8 ilustra o processo de secagem (através do ar ambiente) dos agregados utilizados para a realização de betões e argamassas.



Figura 4-8 – Início do processo de secagem dos agregados

4.2. FORMULAÇÃO

Como o objetivo final neste trabalho era a produção de BACs, o dimensionamento das composições de betão foi realizado através das razões volumétricas entre os materiais constituintes que mais influenciam as propriedades do BAC [2, 3, 6, 63]. Habitualmente é utilizada uma relação em massa na constituição de betão. A formulação é feita para um volume genérico de 1 m^3 , sendo posteriormente alterada para a quantidade de volume de amassadura requerida. São no entanto apresentados alguns parâmetros em massa, tais como a relação entre água e cimento para uma maior facilidade de compreensão dos valores utilizados, já que a maioria das relações utilizadas nas constituições de betão são em massa.

Após a determinação dos volumes relativos para cada constituinte, foi necessário determinar a massa a utilizar para cada uma das amassaduras. Para isso, bastou multiplicar o volume de cada material a utilizar pela respetiva massa específica, de modo a obtermos a massa a ser utilizada em 1 m^3 de composição. Utilizando o volume de amassadura pretendido, chega-se ao valor final (em massa) para cada material constituinte, pois para a realização de uma composição, seja de pasta, argamassa ou betão, é mais prático pesar os materiais constituintes em balanças do que utilizar equipamentos que meçam volumes. No entanto, e tal como referido anteriormente, este dimensionamento é feito em termos volumétricos. Apresentam-se as fórmulas utilizadas no dimensionamento das composições em anexo.

Para as pastas foi utilizada uma formulação tendo em conta dois constituintes essenciais, água (w) e finos com propriedades ligantes (p). Foram definidos três parâmetros iniciais para a pasta:

- Volume de amassadura pretendido, geralmente de $0,6 \text{ dm}^3$. Foi optado usar este volume de amassadura tendo em conta o volume de amassadura capaz de ser misturado no equipamento de mistura, e tendo em conta os requisitos mínimos de volume de amassadura final necessários para a realização dos ensaios nas pastas;
- Relação volumétrica entre água e ligante (V_w/V_p);
- Relação volumétrica entre cinzas volantes e volume total de ligante (V_{fa}/V_p), com relações entre os 0% (ou seja, apenas cimento como material ligante) e os 30% de cinzas no volume total de ligantes;

Nos estudos em que era necessário utilizar superplastificante e/ou pigmentos, estes eram definidos em termos do volume total de finos. Ao introduzirmos estas novas quantidades de produto na pasta, e de modo a mantermos o volume inicial previsto, foi necessário remover água à amassadura. Foi optada uma redução de água à amassadura, pois estes produtos são maioritariamente líquidos (possuem um teor baixo de sólidos, embora este valor não estivesse especificado nas fichas técnicas dos

fornecedores [51, 52]). Assim, o volume dos materiais líquidos que se introduziam na composição era mantido sempre igual ao da respetiva composição de referência. Foram definidos à partida:

- Relações volumétricas entre superplastificante e ligante;
- Relação volumétrica entre pigmento e ligante;

Para as argamassas, foi definido à partida:

- Volume de amassadura total pretendido, neste caso de $1,5 \text{ dm}^3$, tendo em conta os requisitos mínimos necessários para a realização dos ensaios para as argamassas e da capacidade de mistura do equipamento de amassadura;
- Percentagem de volume de agregados finos (V_s/V_m) a serem utilizadas no volume de amassadura total, compreendido entre 40% e 50%. O restante volume corresponde ao volume de pasta na amassadura, sendo os valores dos seus diversos constituintes calculado de modo idêntico ao especificado anteriormente, na secção das pastas;
- Percentagem de utilização para cada um dos dois tipos de areias disponíveis, em relação ao volume de argamassa total (V_{s1}/V_m e V_{s2}/V_m);

Como neste trabalho se estavam a utilizar materiais comerciais, ao invés do sugerido na literatura [2, 3, 63] apenas foram considerados como materiais finos o cimento e as cinzas volantes. Assim, a parte dos agregados cuja granulometria era inferior a 0,125 mm foi considerada como constituintes do agregado.

Para a formulação do betão foram introduzidos dois novos parâmetros, correspondentes à utilização dos agregados grossos na composição:

- $V_g/V_{g,lim}$, correspondente à relação entre baridade/massa específica para as britas, multiplicado pelas percentagens respetivas de brita a serem utilizadas na composição;
- $V_{g,lim}$ ponderado;

O volume de vazios adotado foi de 4%, valor que poderá entrar em conflito com alguma bibliografia. Mesmo com uma excelente capacidade de enchimento, um BAC possui alguns poros vazios, de difícil medição;

4.3. PASTAS

4.3.1. EQUIPAMENTOS

- Fita de medição: Com subdivisões de 1 mm;
- Cronómetro: Com precisão de 0.1s;
- Nível: Para se verificar a horizontalidade das superfícies de ensaio e dos equipamentos;
- Recipientes: Com diferentes capacidades para transportar e pesar os materiais constituintes;
- Régua rígida, para eliminar o excesso de pasta no ensaio de espalhamento;
- Cone de espalhamento para as pastas, com dimensões interiores de 38 mm na base, 19 mm no topo e com altura de 57 mm, conforme especificado na Figura 4-9;

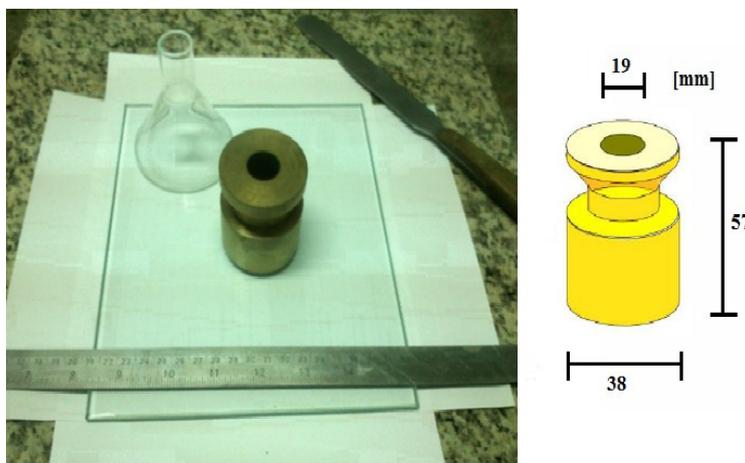


Figura 4-9 – Cone de espalhamento para as pastas

- Cone de Marsh, com as dimensões especificadas na Figura 4-10.

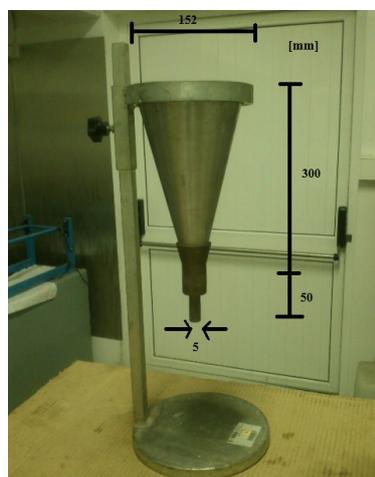


Figura 4-10 – Cone de Marsh

- Balança com precisão de 0.1g;
- Misturador mecânico, da marca 'Testing Bluhm&Feuerherdt GmbH' [64], com movimento de translação e de rotação. A Figura 4-11 ilustra este equipamento;



Figura 4-11 – Misturador mecânico utilizado nas amassaduras das pastas

- Mesa de ensaio com superfície plana, firme e nivelada;
- Funil: Para auxiliar o enchimento de pasta no cone de ensaio;
- Vareta: Para apiloar ligeiramente a pasta no cone de ensaio;

4.3.2. PROCEDIMENTO DE AMASSADURA

Após a determinação das quantidades de material a serem usados nas pastas, estes foram pesados e misturados com a seguinte sequência:

- Pesagem das massas de cimento e das cinzas volantes em diferentes recipientes numa balança com precisão de 0.1g;
- Pesagem da água no recipiente de amassadura, previamente limpo e seco numa balança com precisão de 0.1g;
- Se fosse necessária a utilização de pigmentos e/ou superplastificante, o recipiente com a água pesada era zerado, e logo depois adicionados e pesados os adjuvantes na balança com precisão de 0.1g;
- Adição do cimento e das cinzas volantes na água cuidadosamente de modo a evitar perdas de material. A duração desta operação não ultrapassou geralmente os 10 segundos;

- Amassadura da pasta utilizando um misturador mecânico com movimento rotacional e planetário. Esta amassadura foi efetuada a uma velocidade lenta (rotação: 140 ± 5 rotações por minuto; planetário: 62 ± 5 movimentos planetários por minuto) durante 3 minutos. Parava depois durante 15 segundos, durante os quais a pasta aderente às paredes do recipiente era recolocada à restante pasta com um raspador de borracha. A pasta voltava a ser amassada novamente por 90 segundos, a uma velocidade igual à especificada anteriormente;
- Após a amassadura estar completa, esta era rapidamente retirada do misturador e mexida manualmente em poucos segundos para evitar a acumulação de grumos junto às paredes ou fundo do recipiente;

4.3.3. ENSAIOS

4.3.3.1. ENSAIOS DE ESPALHAMENTO

Foi adotado o seguinte procedimento para o ensaio de espalhamento com as pastas:

- Colocação da placa de fundo numa superfície firme, plana e nivelada;
- Humedecimento do interior do cone de espalhamento, da superfície em contacto com a pasta da placa de fundo e do interior do funil de enchimento através de um pano húmido;
- Após o final da amassadura, procedia-se ao enchimento do cone com a pasta, com o auxílio de um funil. Esta pasta era ligeiramente apiloada através de uma vareta de modo a ajudar o preenchimento de todo o volume do cone. Após o enchimento do mesmo, a superfície superior do cone era rasurada, de modo a termos o mesmo volume de pasta para todos os ensaios, conforme demonstrado na Figura 4-12;
- Levantamento suave, sem movimentos horizontais, e de forma contínua do cone;
- Aguardam-se alguns segundos até que o espalhamento da pasta se mantivesse constante, após os quais eram efetuadas as medições do espalhamento das pastas. Estas medições eram realizadas em duas direções ortogonais.



Figura 4-12 – Cone de espalhamento de pastas preenchido com pasta

Apresentam-se, desde a Figura 4-13 até à Figura 4-18, exemplos de espalhamentos obtidos com cimento CEM II/B-L 32,5 R (br), com as seguintes características:

- $V_w/V_p = 1,60$
- $V_{fa}/V_p = 0,00$
- $V_{pig}/V_p = 0,10$ para todas as pastas realizadas com pigmento; 0,00 para a pasta sem pigmento



Figura 4-13 – Pasta com CEM II/B-L 32,5R (br), sem adição de pigmento



Figura 4-14 – Pasta com CEM II/B-L 32,5R (br) e com adição de 10% em volume de pigmento amarelo



Figura 4-15 – Pasta com CEM II/B-L 32,5R (br) e com adição de 10% em volume de pigmento laranja



Figura 4-16 – Pasta com CEM II/B-L 32,5R (br) e com adição de 10% em volume de pigmento vermelho



Figura 4-17 – Pasta com CEM II/B-L 32,5R (br) e com adição de 10% em volume de pigmento preto

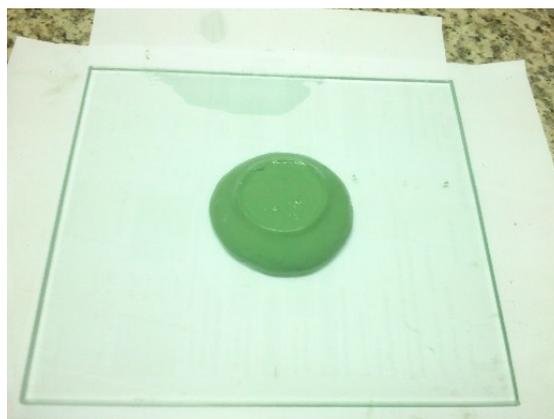


Figura 4-18 – Pasta com CEM II/B-L 32,5R (br) e com adição de 10% em volume de pigmento verde

4.3.3.2. ENSAIOS DE VISCOSIDADE

Para este ensaio foi utilizado o cone de Marsh, normalmente utilizado em ensaios que avaliam a viscosidade de caldas para enchimento de bainhas no pré-esforço. Foi adotada a seguinte metodologia:

- Colocação do aparelho de suporte do cone numa superfície firme, plana e nivelada;
- Humedecimento do interior do cone de Marsh;
- Mantendo o orifício inferior do cone tapado com um dedo, verteu-se a pasta cuidadosamente no interior do cone, de modo a evitar a formação de bolhas de ar;
- Iniciava-se a contagem do tempo de escoamento da pasta com o auxílio de um cronómetro. O tempo começava a ser cronometrado a partir do momento em que o orifício inferior era destapado, e era parado assim que a totalidade da pasta no cone era escoada (à exceção daquela que aderiu naturalmente às paredes do cone);

4.4. ARGAMASSAS

4.4.1. EQUIPAMENTOS

- Fita de medição: Com subdivisões de 1 mm;
- Cronómetro: Com resolução de 0.1s;
- Nível: Para se verificar a horizontalidade das superfícies de ensaio e equipamentos;

- Recipientes: Com diferentes capacidades para transportar e pesar os materiais constituintes. Foi utilizado um recipiente com superfície apolar para a pesagem das quantidades de pigmento, de modo a diminuir as perdas de pigmento na superfície do recipiente;
- Régua rígida, para eliminar o excesso de pasta no topo do cone de ensaio de espalhamento e no funil V;
- Cone de espalhamento em aço inoxidável para as argamassas, com dimensões interiores de 100 mm na base, 70 mm no topo e com altura de 60 mm, conforme especificado na Figura 4-19;

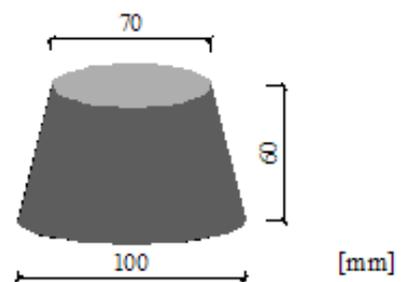


Figura 4-19 – Cone de espalhamento para as argamassas

- Funil V em aço inoxidável para as argamassas, com dimensões especificadas na Figura 4-20;

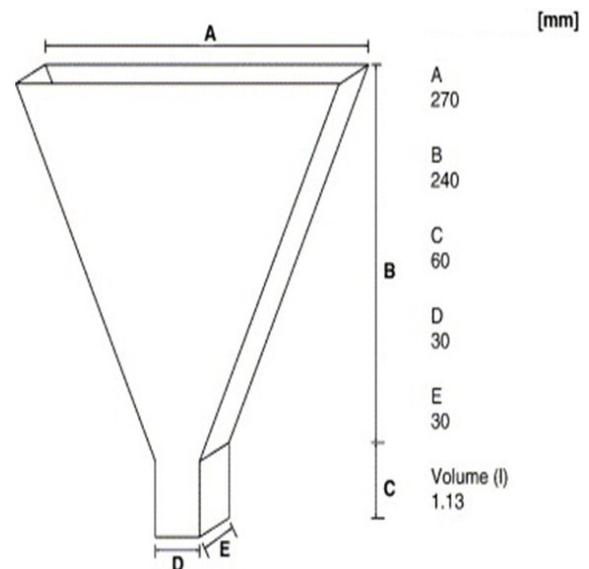


Figura 4-20 – Funil V para as argamassas [65]

- Balanças com resoluções de 0.1g e de 1g;

- Misturador mecânico com movimento de translação e de rotação da marca ‘RMT – Rego. Maschinentechologie GmbH’ [66], representado na Figura 4-21;



Figura 4-21 – Misturador mecânico utilizado na amassadura de argamassas

- Equipamento de ensaio das resistências mecânicas: ensaio à flexão e ensaio à compressão da marca ‘Walter+Baieg’ [67], ilustrado na Figura 4-22;



Figura 4-22 – Equipamento de ensaio das resistências mecânicas nas argamassas

- Mesa de ensaio com superfície plana, firme e nivelada;
- Câmara climática, que permite a realização de ensaios de envelhecimento, com temperatura e humidade relativas controladas, na gama dos -50°C aos 180°C , de marca e modelo ‘Fitoclima 300 EDTU’. A Figura 4-23 mostra este equipamento;



Figura 4-23 – Câmara climática utilizada no armazenamento dos moldes de argamassa

- Moldes para armazenamento e consequente endurecimento das argamassas, de dimensões: $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}^3$ para cada prisma, possuindo cada molde 3 prismas. A Figura 4-24 representa um destes moldes;



Figura 4-24 – Moldes para armazenamento das argamassas

4.4.2. PROCEDIMENTO DE AMASSADURA

Após a determinação das quantidades de material a serem usados nas argamassas, e tal como nas pastas estes foram pesados e misturados com a seguinte sequência:

- Pesagem das massas de cimento e das cinzas volantes em diferentes recipientes, numa balança com precisão de 0,1g;
- Pesagem da água num recipiente previamente limpo e seco, numa balança com precisão de 0,1g;
- Se necessário, pesagem da quantidade de pigmento a ser utilizado num recipiente com superfície apolar (de modo a termos o mínimo de perdas possíveis junto às paredes do recipiente);
- Enchimento de uma pipeta com superplastificante;
- Pesagem das quantidades de areia a serem utilizadas em dois tabuleiros diferentes. Para ambas as areias foi utilizada uma balança com precisão de 1g;
- Adição no recipiente de amassadura da areia fina e da areia grossa;
- Adicionadas logo depois as cinzas volantes e o cimento com cuidado de modo a não se perder material;
- Estes materiais eram depois mexidos manualmente de forma a termos uma composição mais uniforme;
- Adição da totalidade de água na mistura;
- Amassadura da argamassa utilizando um misturador mecânico com movimento rotacional e planetário. Esta amassadura foi efetuada a uma velocidade lenta (rotação: 140 rotações por minuto; planetário: 62 ± 5 movimentos planetários por minuto) durante 1 minuto;
- Paragem de 1 minuto, durante o qual o material aderente às paredes do recipiente era recolocado à restante argamassa. Devido á pouca quantidade de água a ser utilizada, a argamassa era remexida manualmente;
- Adição em vários pontos do recipiente de amassadura do superplastificante;
- A argamassa voltava a ser amassada novamente por 1 minuto ou 2 minutos (se fosse necessário adicionar pigmento), a uma velocidade igual à especificada anteriormente;

A Figura 4-25 exemplifica a amassadura de uma argamassa no misturador mecânico.

Após a amassadura estar completa, esta era rapidamente retirada do misturador e mexida manualmente durante breves segundos antes de se proceder aos ensaios.



Figura 4-25 – Amassadura de uma argamassa

4.4.3. ENSAIOS

4.4.3.1. ENSAIOS DE ESPALHAMENTO

Foi adotado o seguinte procedimento para o ensaio de espalhamento com as argamassas:

- Colocação da placa de fundo numa superfície firme, plana e nivelada;
- Humedecimento do interior do cone de espalhamento e da superfície em contacto com a argamassa da placa de fundo através de um pano húmido;
- Após o final da amassadura, procedeu-se ao enchimento do cone com a argamassa. Esta argamassa era ligeiramente apiloada através de uma vareta de modo a ajudar o preenchimento de todo o volume do cone. Após o enchimento do mesmo, a superfície superior do cone era rasurada, de modo a termos o mesmo volume para todos os ensaios;
- Levantamento suave, sem movimentos horizontais, e de forma contínua do cone;
- Aguardaram-se alguns segundos até que o espalhamento da argamassa se mantenha constante, após os quais são efetuadas as medições de espalhamento da mesma. Estas medições eram realizadas em 2 direções ortogonais;

A Figura 4-26 ilustra a conclusão de um ensaio de espalhamento numa argamassa.



Figura 4-26 – Ensaio de espalhamento para uma argamassa

4.4.3.2. ENSAIOS DE VISCOSIDADE

Para as argamassas, foram realizados ensaios para a aferição da viscosidade. Foi utilizado o seguinte procedimento:

- Colocação do suporte do funil numa superfície firme e plana, livre de vibrações ou choques;
- Colocação do funil V das argamassas, no suporte e posteriormente verificação da horizontalidade do mesmo;
- Humedecimento do interior do funil, previamente limpo. Confirmação da não existência de vestígios de água no interior do funil, através da abertura da porta que permite escoamento do funil. Esta porta era depois fechada para o enchimento do funil;
- Preenchimento do funil, com a amostra de argamassa através de uma única operação sem qualquer tipo de compactação ou agitação, garantindo que o topo do funil não possuía argamassa em excesso ou defeito para o ensaio;
- Colocação de um recipiente sob o funil para a recolha da argamassa;
- Medição do tempo de escoamento da argamassa com um cronómetro. Esta operação era efetuada assim que a porta de escoamento do funil era aberta, e terminada quando se vissem os primeiros raios de luz no topo do funil, ou seja, aquele momento em que era possível ver verticalmente o recipiente através do funil;
- Medição do tempo de escoamento;

A Figura 4-27 ilustra a introdução de uma argamassa dentro do funil V, e ajuste do topo do funil através da remoção de argamassa em excesso, de modo a se manter constante o volume de argamassa a ser ensaiada para este ensaio. Após estas operações, procedia-se à contabilização do tempo de escoamento, através do uso de um cronómetro.



Figura 4-27 – Ensaio do funil V numa argamassa

4.4.3.3. ENSAIOS NO ESTADO ENDURECIDO

De modo a se conhecerem as propriedades mecânicas, foram realizados os ensaios de resistência à flexão e resistência à compressão [49]. Foi utilizado o seguinte procedimento:

- Após a amassadura e consequente realização de ensaios no estado fresco para as argamassas, colhia-se uma amostra e efetuava-se o preenchimento de forma única e contínua dos moldes para argamassas;
- Armazenamento dos moldes numa câmara climática, que os mantinha a uma temperatura constante de 20 ± 1 °C e a humidade relativa superior a 80%. A Figura 4-28 ilustra o local de armazenamento temporário dos moldes com argamassa até à sua desmoldagem;



Figura 4-28 – Armazenamento de argamassas na câmara climática

- Estes moldes com argamassa eram retirados e desmoldados 24 horas depois, após os quais as argamassas endurecidas eram catalogadas com um marcador à prova de água, e colocadas numa câmara de cura, estando estas totalmente submersas em água até à data da realização do tipo de ensaio requerido. A Figura 4-29 mostra o local onde as argamassas foram armazenadas;



Figura 4-29 – Câmara de cura para armazenamento das argamassas

- Realização dos ensaios de flexão à data especificada (2, 7 ou 28 dias): Retiravam-se os 3 provetes representativos de uma única argamassa, de dimensões $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}^3$ da tina de cura e procedia-se ao ensaio de flexão no equipamento de ensaio. Colocava-se o primeiro provete na prensa de flexão, sendo utilizado um programa de carga automático que realizava o

ensaio segundo a norma [49], registrando a tensão de rotura à flexão, situação em que o provete era partido ao meio. Repetia-se esta operação para os outros 2 provetes;

- Realização dos ensaios à compressão, com os 6 provetes provenientes do ensaio de flexão. Colocavam-se estes provetes, um por um, numa prensa de compressão e utilizava-se novamente o programa de carga automatizado, que realizava o ensaio de compressão segundo a norma [49], registrando a tensão de rotura à compressão dos provetes;

4.5. BETÕES

4.5.1. EQUIPAMENTOS

- Placa de base: Foi utilizada uma placa de aço inoxidável, de dimensões 900 mm x 900 mm. Esta placa está marcada por no centro por 2 linhas perpendiculares entre si e paralelas aos bordos da placa. Possui 2 circunferências traçadas, de centro coincidente com o centro da placa, com 210 mm e 500 mm de diâmetro, respetivamente. Estas linhas possuem uma profundidade inferior a 1mm, e uma largura inferior a 2 mm. A Figura 4-30 apresenta visualmente alguns destes valores;

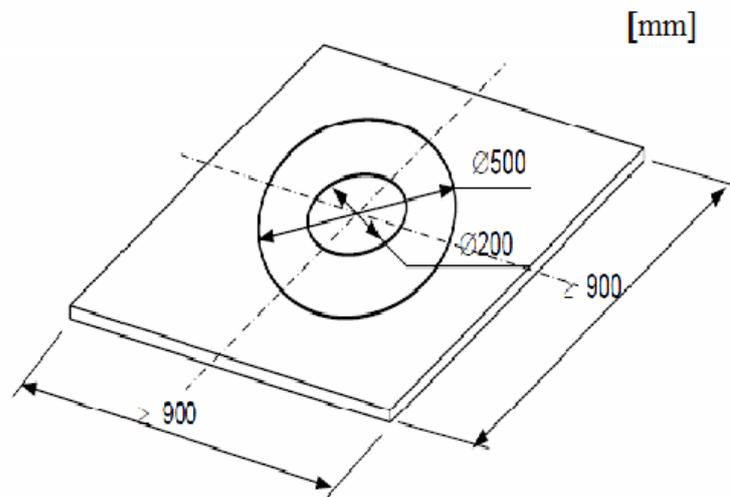


Figura 4-30 – Dimensões da placa de base utilizada nos ensaios de espalhamento de BACs [2]

- Fita de medição: Com comprimento total de 5 m, e subdivisões de 1 mm;
- Cronómetro: Com resolução de 0.1s;
- Nível: Para se verificar a horizontalidade das superfícies de ensaio e equipamentos;

- Recipientes: Com diferentes capacidades, usados para guardar e transportar as amostras, assim como para transportar e pesar os materiais constituintes;
- Régua rígida, para eliminar o excesso de betão nos ensaios de espalhamento, funil V e da caixa L;
- Cone de espalhamento em aço inoxidável, com dimensões interiores de 200 mm na base, 100 mm no topo e com altura de 300 mm, conforme especificado Figura 4-31. Este cone de espalhamento é o mesmo cone utilizado no ensaio de abaixamento para o betão, e é vulgarmente denominado por Cone de Abrams ou Slump Cone;



Figura 4-31 – Dimensões do cone de espalhamento [68]

- Funil V em aço inoxidável, com as dimensões indicadas na Figura 4-32;

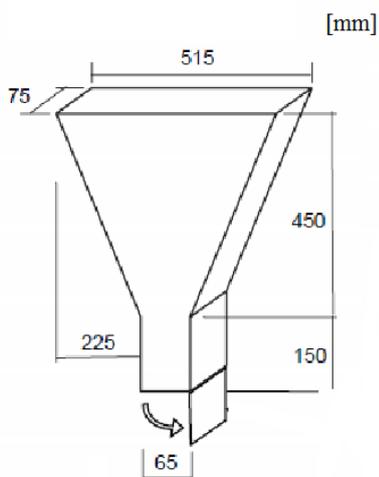


Figura 4-32 – Dimensões do funil V para os betões [2]

- Caixa L, com as dimensões especificadas na Figura 4-33;

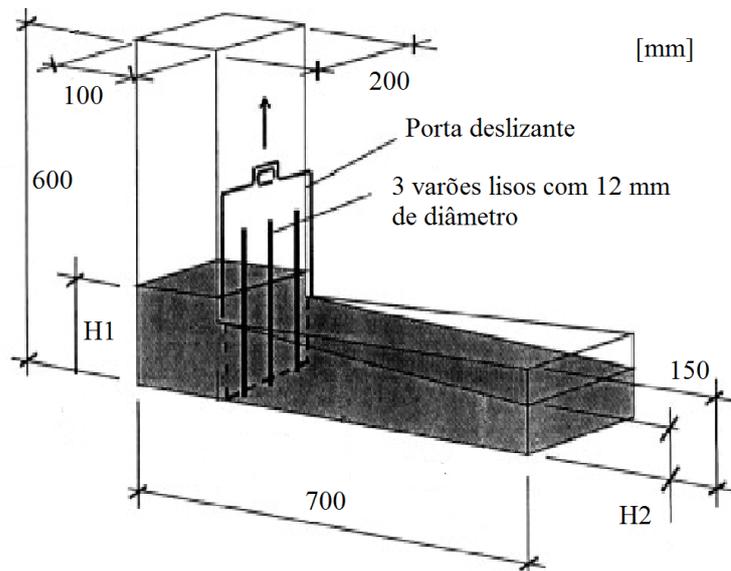


Figura 4-33 – Dimensões da caixa L [69]

- Peneiro com malha quadrada, de espaçamento igual a 5 mm, conforme a ISO 3310-2 [70], ilustrado na Figura 4-34;



Figura 4-34 – Peneiro [71]

- Balanças com resoluções de 0.1g, 1.0g, e de 10.0g;
- Termómetro, com resolução de 1 °C;
- Betoneira, da marca Lisprene [67], com carga útil para 120 litros, conforme ilustrado na Figura 4-35;



Figura 4-35 – Betoneira utilizada na amassadura de betões

- Moldes cúbicos, destinados ao armazenamento do betão fresco até à sua desmoldagem, geralmente 24 horas após a sua amassadura, tempo em que se garantia o seu endurecimento.
- Máquina de ensaios à compressão do betão, de marca e modelo ‘Walter+Baig [67], Switzerland, Prufmaschinen / Machines d’essais / Testing Machines – CH-8224 Löhningen’), conforme ilustrado na Figura 4-36 e cumprindo os requisitos da norma para as características das máquinas de ensaio [72].



Figura 4-36 – Máquina de ensaios à compressão para os betões

- Moldes cúbicos para armazenamento e endurecimento dos provetes de BAC, com 150 mm de aresta, tal como ilustrados na Figura 4-37 e em conformidade com a norma para os moldes de ensaio ao betão endurecido[65];



Figura 4-37 – Moldes para provetes de betão

4.5.2. PROCEDIMENTO DE AMASSADURA

Após a determinação das quantidades de material a serem usados nos betões, e tal como nas pastas e argamassas estes foram pesados e misturados com a sequência que a seguir se indica:

- Pesagem das massas de cimento, cinzas volantes, agregados finos e grossos em diferentes recipientes;
- Pesagem da água em dois recipientes (25% + 75% da massa total, respetivamente) previamente limpos e secos, numa balança com precisão de 1g;
- Se necessário, pesagem da quantidade de pigmento a ser utilizado num recipiente com superfície apolar. A balança utilizada possuía uma precisão de 0.1g;
- Pesagem da quantidade de superplastificante num recipiente limpo e seco, numa balança com precisão de 0.1g;
- Misturaram-se os agregados finos e grossos, estes são depois colocados na betoneira de amassadura;
- Adicionou-se 25% do total de água a ser utilizado na mistura. Este é o tempo 0 da nossa amassadura. Todos os tempos mencionados nos próximos pontos referem-se sempre a este instante inicial. Aguardam-se 2 minutos durante os quais a betoneira mistura a água necessária à absorção de água aos agregados;
- Misturaram-se os finos (cimento + cinzas volantes) e logo de seguida a restante água de amassadura. Normalmente deixava-se um pouco de água para ser misturado e adicionados ao superplastificante e pigmento que ficavam retidos nas paredes dos seus respetivos recipientes;

- Adição perdurável do superplastificante aos 4 minutos, tendo esta adição a duração de aproximadamente 1 minuto;
- Adição dos pigmentos (se necessários) aos 6 minutos, tendo estes também uma colocação aproximada de 1 minuto;

A misturadora continuou a sua amassadura sem interrupções enquanto foram retiradas amostras para os diversos ensaios a serem realizados.

4.5.3. ENSAIOS

4.5.3.1. ENSAIOS DE FLUIDEZ E CAPACIDADE DE PREENCHIMENTO

Para avaliar a fluidez do BAC, é efetuado o ensaio de espalhamento na ausência de obstruções. Este ensaio é realizado segundo a norma para o ensaio de espalhamento de um BAC [8], que é por sua vez baseada no ensaio de abaixamento do betão [68]. Com este ensaio também é possível determinar a viscosidade do BAC através da medição do t_{500} .

Este ensaio de espalhamento é o teste habitualmente mais utilizado quando se quer obter uma informação rápida sobre as suas condições no estado fresco, à semelhança daquilo que acontece com um betão convencional, embora nesse caso através do ensaio de abaixamento. Dá uma boa indicação da capacidade de enchimento de um BAC. Não nos dá, no entanto indicações se os agregados grossos do betão poderão ficar ou não bloqueados em zonas confinadas. Através de uma visualização atenta do betão fresco, também poderão ser obtidos indícios de segregação do betão[19].

Para os ensaios de espalhamento do betão, foi utilizado o seguinte procedimento:

- Colocação da placa de fundo numa superfície firme e plana, livre de vibrações ou choques;
- Verificação da horizontalidade da superfície, com recurso ao nível;
- Humedecimento do interior do cone de Abrams, da superfície em contacto com o betão e da placa de fundo através de um pano húmido;
- Colocação do cone na parte central da placa e preenchimento do cone com o betão de forma contínua, sem qualquer tipo de compactação ou agitação, tal como ilustrado na Figura 4-38. Após o enchimento do mesmo, procedeu-se ao nivelamento da superfície superior do cone;
- Levantamento suave, sem movimentos horizontais, e de forma contínua do cone. Esta operação foi efetuada poucos segundos após o enchimento do cone, tal como ilustrado na Figura 4-39;

- Aguardavam-se alguns segundos ou minutos até que o espalhamento do betão se mantivesse constante, após os quais eram efetuadas as medições de espalhamento;
- Eram registados os valores dos 2 diâmetros ortogonais de espalhamento obtidos, como Dflow1 e Dflow2, conforme ilustrado na Figura 4-40;



Figura 4-38 – Preenchimento do cone de espalhamento com um BAC



Figura 4-39 – Levantamento do cone no ensaio de espalhamento do BAC



Figura 4-40 – Medição do diâmetro de espalhamento de um BAC

4.5.3.2. ENSAIOS DE VISCOSIDADE

Para se medir a viscosidade de um BAC utiliza-se geralmente o ensaio do funil V ou a medição do tempo que é necessário para o BAC atinja um diâmetro de 500 mm no ensaio de espalhamento. No entanto, não foram realizadas medições para esta última situação, pois considera-se que o erro associado a este ensaio é apreciável (o betão atinge um diâmetro de espalhamento em ± 2 segundos). Foi optado utilizar o ensaio do funil V para a determinação mais rigorosa deste parâmetro.

Foi utilizado o seguinte procedimento, em conformidade com a norma do ensaio de escoamento no funil V [11].

- Colocação do suporte do funil numa superfície firme e plana, livre de vibrações ou choques;
- Colocação do funil V, no suporte e posteriormente verificação da horizontalidade do mesmo;
- Humedecimento do interior do funil, previamente limpo. Confirmação da não existência de vestígios de água no interior do funil, através da abertura da porta que permite escoamento do funil. Esta porta era depois fechada para o enchimento do funil;
- Preenchimento do funil, com a amostra de betão através de uma única operação sem qualquer tipo de compactação ou agitação, garantindo que o topo do funil não possuía betão em excesso ou defeito para o ensaio. A Figura 4-41 ilustra este processo;
- Colocação de um recipiente sob o funil para a recolha do betão;
- Medição do tempo de escoamento do betão – t_V com um cronómetro. Esta operação foi efetuada assim que a porta de escoamento do funil era aberta, e terminada quando se vissem os primeiros raios de luz no topo do funil, ou seja, aquele momento em que era possível ver

verticalmente o recipiente através do funil. A Figura 4-42 mostra a conclusão do ensaio de escoamento efetuado com um BAC;

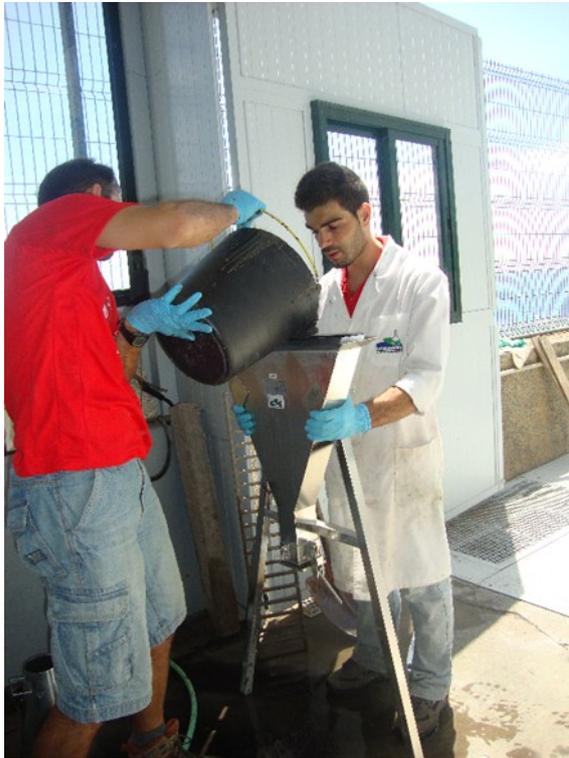


Figura 4-41 – Preenchimento do funil V com um BAC



Figura 4-42 – Medição do t_v de um BAC no funil V

4.5.3.3. ENSAIOS DE CAPACIDADE DE PASSAGEM

Utiliza-se geralmente o ensaio na caixa L para avaliar a capacidade de passagem do BAC, em escoar através de espaços confinados, incluindo espaços entre armaduras e outras obstruções, sem bloquear ou segregar. Faz-se escoar horizontalmente um determinado volume de betão fresco através dos espaços existentes entre varões lisos colocados na vertical. Medem-se as alturas de betão na parte de trás e da frente da caixa L, e determina-se a relação existente entre essas 2 alturas. Esta razão é uma medida de capacidade de passagem ou bloqueio do BAC [11].

Para este ensaio podem ser dispostos dois tipos de obstáculos. Para a mesma secção da caixa L, podem ser utilizados dois varões (com espaçamento entre varões de aproximadamente 59 mm) ou três varões (espaçamento entre varões de aproximadamente 41 mm), conforme o estudo que se pretenda fazer. Em ambos os casos são utilizados varões lisos com 12 mm de diâmetro. Para os ensaios realizados nesta dissertação optou-se pelos três varões, que conduziam a um espaçamento entre varões menor, e consequentemente a resultados mais exigentes em termos de bloqueio dos agregados.

O seguinte procedimento foi efetuado segundo a norma para o ensaio de escoamento na caixa L [11].

- Apoiar a caixa L numa base firme, plana, nivelada e livre de vibrações ou choques;
- Humedecimento da caixa L, previamente limpa, e evitando o excesso de humidade. Garantir que a tampa deslizante entre a secção vertical e a secção horizontal se encontra fechada;
- Preenchimento da secção vertical da caixa, sem qualquer compactação ou agitação;
- Abrir completamente a tampa deslizante num movimento contínuo, de modo a permitir que o betão flua para a secção horizontal da caixa L;
- Após a cessação de movimento do betão no interior da caixa, procedeu-se às medições na parte da frente e na parte de trás da caixa. Para cada uma destas medições foram retirados valores em dois pontos distintos, utilizando depois um valor médio para atribuição de H1 e H2;

A Figura 4-43 ilustra o enchimento da caixa L com um BAC (colorido com pigmento verde), e a regularização do topo da secção vertical da caixa L.



Figura 4-43 – Ensaio da caixa L

4.5.3.4. ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À SEGREGAÇÃO

Utiliza-se o ensaio de segregação no peneiro para determinar a resistência de uma composição de betão à segregação.

Após a amostragem, permite-se que o betão fresco repouse por 15 minutos, anotando-se qualquer separação de água exsudada. Verte-se uma determinada quantidade da parte superior do betão fresco sobre um peneiro com aberturas quadradas de 5 mm. Após 2 minutos regista-se o peso do material que escoou através do peneiro. A parcela segregada é então calculada como a proporção de amostra que escoou através do peneiro em relação à quantidade vertida [13].

Foi utilizado o seguinte procedimento:

- Enchimento de uma amostra de betão num recipiente;
- Preservação da amostra numa posição firme e nivelada durante 15 minutos;
- Colocação do fundo do peneiro na balança. Esta era zerada após esta ação;
- Colocação do peneiro sobre o fundo e registo da sua massa (mp), em gramas;
- Após os 15 minutos, o betão foi vertido cuidadosamente de forma contínua no peneiro, incluindo alguma água exsudada. Registou-se novamente esta massa (mc), em gramas;
- Aguardou-se 2 minutos, após os quais o peneiro era retirado sem agitação;
- Registo da massa que escoava para o fundo do peneiro (mps), em gramas;

A Figura 4-44 mostra a colocação de um BAC (colorido com pigmento vermelho) no peneiro.



Figura 4-44 – Ensaio de resistência à segregação

4.5.3.5. ENSAIOS NO ESTADO ENDURECIDO

Após a realização das amassaduras e ensaios no estado fresco para os BACs, procedeu-se ao processo de amostragem, execução e ensaios de compressão através do seguinte procedimento:

- Retiravou-se amostras dos BACs segundo a norma [69];
- Preenchimento dos moldes cúbicos, de forma única e contínua e sem qualquer tipo de compactação ou vibração forçada. De notar que esta vibração ou compactação é requerida pela norma [65] para um betão convencional. No entanto, e devido às propriedades do BAC no seu estado fresco, não se considerou ser necessário efetuar esta operação;
- Remoção do excesso de betão no topo do molde, e regularização do mesmo com uma colher de mestre ou régua rígida, conforme ilustrado na Figura 4-45. De notar que esta regularização ilustrada na Figura 4-45 foi feita para um betão convencional, efetuada num local de obra;



Figura 4-45 – Regularização de provetes de betão nos moldes

- Acondicionamento dos provetes com 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. Ambas as situações encontram-se ilustradas na Figura 4-46. Estas figuras são de um betão convencional, efetuado em local de obra, embora o procedimento utilizado para o armazenamento dos BACs produzidos em laboratório tenha sido idêntico;



Figura 4-46 – Colocação de proteções à desidratação e variações térmicas dos provetes de BAC

- Aguardava-se um período de cura do BAC nos moldes, de pelo menos 16 horas, geralmente de 24 horas e não mais de 36 horas. Estes encontravam-se protegidos contra choques, vibrações e desidratação a uma temperatura de $25^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$, pois os BACs foram efetuados em clima quente [65]. Após este tempo, procedia-se à desmoldagem dos provetes, conforme ilustrado na Figura 4-47. Registavam-se dados relevantes para identificação do BAC realizado, na face superior do provete com um marcador à prova de água e que não danificasse o provete de betão;



Figura 4-47 – Desmoldagem dos moldes com os provetes de BAC

- Colocação dos provetes de BAC numa câmara de cura, totalmente submersos em água e a uma temperatura de $20 \pm 2^{\circ}\text{C}$, conforme ilustrado na Figura 4-48. Estes permaneciam na câmara de

cura até à realização dos ensaios à compressão, geralmente 7 dias ou 28 dias após a realização da amassadura de betão;



Figura 4-48 – Câmara de cura dos provetes de betão

- Realização do ensaio de resistência à compressão segundo a norma [69] e conforme ilustrado na Figura 4-49, no equipamento adequado ao ensaio, especificado anteriormente na seção de equipamentos. Para tal:
 - Removeu-se o excesso de humidade da superfície do provete antes da sua colocação na máquina de ensaio. Esta tinha sido previamente limpa e tinham sido retirados quaisquer resíduos das superfícies de contacto da máquina com os provetes;
 - Posicionou-se o provete cúbico para que a carga fosse aplicada perpendicularmente à direção de moldagem;
 - Selecionou-se uma velocidade de aplicação de carga constante, dentro do intervalo (0.6 ± 0.2) MPa/s;
- Registou-se o valor de tensão de rotura do provete, obtido automaticamente pelo equipamento de ensaio;
- Se obtivéssemos uma rotura satisfatória [69], validava-se o valor obtido anteriormente;



Figura 4-49 – Execução do ensaio de resistência à compressão de um betão

5

RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. INTRODUÇÃO

Como neste trabalho os materiais disponíveis para a produção dos BACs eram substancialmente diferentes dos materiais referidos na literatura [6], iniciou-se o trabalho experimental com ensaios realizados ao nível das pastas para avaliarmos alguns parâmetros isoladamente. Foram realizados ensaios de espalhamento e de fluidez para a caracterização dos parâmetros reológicos, e ver o efeito dos diferentes materiais finos utilizados na constituição da pasta. Estes ensaios identificam valores a adotar nas pastas de modo a se obterem determinados resultados e auxiliarem as consequentes composições de betões e argamassas. Apresentam-se gráficos com os resultados obtidos nos diversos ensaios realizados.

5.2. PASTAS

5.2.1. DETERMINAÇÃO DA CAPACIDADE DE RETENÇÃO DE ÁGUA E DO FATOR DE DEFORMABILIDADE

O ensaio de espalhamento em pastas, descrito no capítulo anterior, pode ser utilizado para estudar as propriedades físicas das composições de materiais finos. Este estudo é feito através da medição do diâmetro médio de espalhamento nas pastas para diferentes relações volumétricas entre água e ligante (V_w/V_p), sem adição de superplastificante [19]. Este diâmetro médio de espalhamento é o valor obtido em duas direções ortogonais para cada um dos ensaios de espalhamento efetuados nas pastas. Através do diâmetro médio de espalhamento, calcula-se a área de espalhamento relativa (G_p), conforme descrito na Equação 5-1.

$$Gp = \left(\frac{d}{d0}\right)^2 - 1 \quad \text{Equação 5-1}$$

Com os pares de valores ($G_p; V_w/V_p$) resultantes dos vários ensaios de espalhamento nas pastas, obtém-se um gráfico e uma linha de tendência (linear para este estudo), que nos fornecem os valores de β_p e de E_p . O valor β_p representa a capacidade de retenção de água dos materiais finos, e corresponde ao valor mínimo da relação volumétrica entre água e ligante a partir do qual esta começa a se espalhar no ensaio de espalhamento para as pastas. O valor E_p é um fator de deformabilidade que indica em que medida a viscosidade da pasta é sensível a variações da razão volumétrica entre água e ligante. Ambos estes parâmetros são calculados ou obtidos automaticamente através da equação da linha de tendência linear obtida no gráfico dos pares de valores ($G_p; V_w/V_p$). Tal como se pode verificar na Figura 5-1, o valor de β_p é obtido através da ordenada na origem da linha de tendência, e o valor de E_p corresponde à inclinação da linha de tendência.

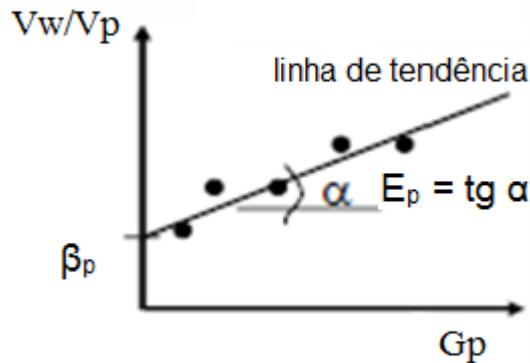


Figura 5-1 – Gráfico genérico para determinação de β_p e de E_p

Iniciou-se o estudo para o cimento CEM II/A-L 42,5R com base nas Referências [7, 9, 19]. Foi estudada a fluidez através do ensaio de espalhamento de pastas, e a partir deste obtido o valor da área relativa de espalhamento. Estes ensaios foram realizados para diferentes relações volumétricas entre: água/ligante (V_w/V_p) e cinzas volantes/ligante (V_{fa}/V_p), conforme demonstrado na Figura 5-2.

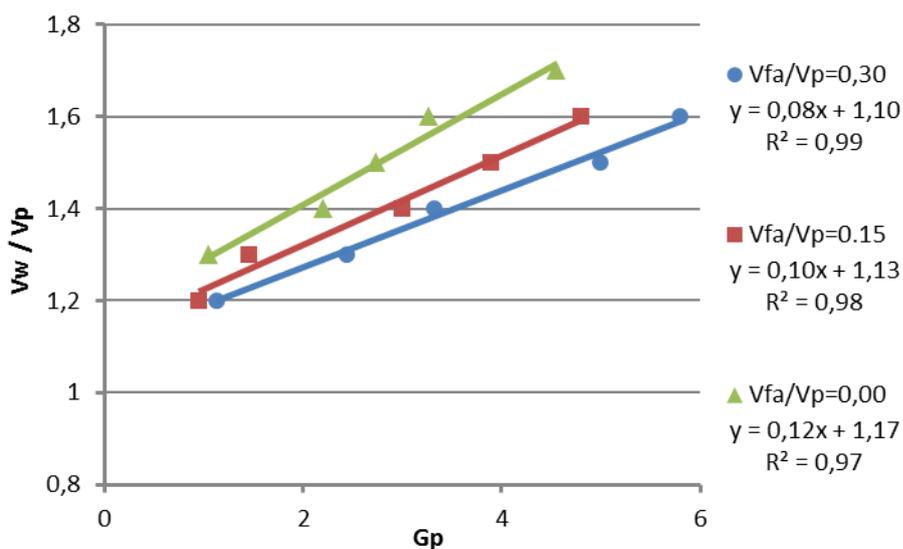


Figura 5-2 – Determinação do β_p e do E_p em pastas com Vfa/Vp=0,00; 0,15 e 0,30

Pela análise da Figura 5-2 verifica-se que à medida que se aumenta a percentagem de substituição do cimento por cinzas volantes (Vfa) obtêm-se maiores áreas de espalhamento relativo (G_p) para a mesma quantidade de água na composição. Esta tendência compreende-se pelo facto de o tamanho reduzido, a forma esférica e a lisura da superfície das partículas das cinzas volantes, proporcionarem baixos coeficientes de atrito entre as partículas constituintes da pasta. Facilitam assim a deslocação dessas mesmas partículas, conseqüentemente melhorando a deformabilidade da pasta.

Verifica-se de igual modo que o parâmetro β_p é inferior nas pastas com adição de cinzas volantes, necessitando estas de um menor volume de água inicial para possuírem uma deformação não nula após o levantamento do cone de espalhamento para pastas. Antevê-se assim que a inclusão de cinzas volantes reduz a quantidade de água necessária para que se obtenham valores de fluidez idênticos aos de uma pasta sem cinzas volantes, situação que se virá a confirmar nas argamassas e betões.

Relativamente ao valor de E_p , verifica-se que as pastas sem adição de cinzas volantes necessitam de uma maior quantidade de água para atingirem uma mesma área de espalhamento relativa, em relação a uma pasta que contenha cinzas volantes. As pastas com cinzas volantes são mais sensíveis à quantidade de água utilizada, podendo obter uma maior gama de valores de G_p .

De modo a tornar a análise das próximas figuras mais fácil, apresenta-se um resumo dos valores obtidos na Figura 5-2:

- Vfa/Vp=0,00
 - $\beta_p = 1,17$

- $E_p = 0,12$
- $V_{fa}/V_p = 0,15$
 - $\beta_p = 1,13$
 - $E_p = 0,10$
- $V_{fa}/V_p = 0,30$
 - $\beta_p = 1,10$
 - $E_p = 0,08$

Foram ensaiadas pastas com um tipo de cimento diferente, CEM II/B-L 32,5N (32,5N) e comparados os valores obtidos com os de uma pasta composta por um cimento CEM II/A-L 42,5R (42,5R). Em ambos os casos, utilizou-se um $V_{fa}/V_p = 0,00$; o que equivale a dizer que os finos da pasta eram totalmente constituídos pelo respetivo tipo de cimento, sem adição de cinzas volantes. Tal como se pode verificar na Figura 5-3, as pastas constituídas com cimento 32,5 N possuem um requisito de V_w/V_p inferior para que se inicie uma deformação no ensaio de espalhamento das pastas, com um valor de $\beta_p = 0,08$; para uma pasta constituída pelo cimento 42,5 R este valor é de 0,12. Para além disso, as pastas compostas pelo cimento 32,5 N possuem também um fator de deformabilidade inferior, sendo mais sensíveis às variações de água na composição. Conclui-se que o cimento CEM II/B-L 32,5N possui melhores características em termos de trabalhabilidade para uma pasta. Para além disso, e após análise visual das pastas efetuadas, possui a vantagem de representar de forma mais fidedigna a coloração escolhida, através da adição de pigmento na pasta quer no estado fresco, quer no estado endurecido. No entanto, e apesar destas vantagens óbvias, optou-se por se manter o cimento CEM II/A-L 42,5R como alvo de estudo para as restantes composições. Pretendia-se obter uma boa classe de resistência, para aplicação em estruturas com requisitos de resistência à compressão superiores aos de uma estrutura vulgar. No entanto, e devido aos parâmetros utilizados na composição de um BAC (elevado teor de finos), muito provavelmente teria sido possível obter elevadas resistências utilizando o cimento do tipo CEM II/B-L 32,5 N.

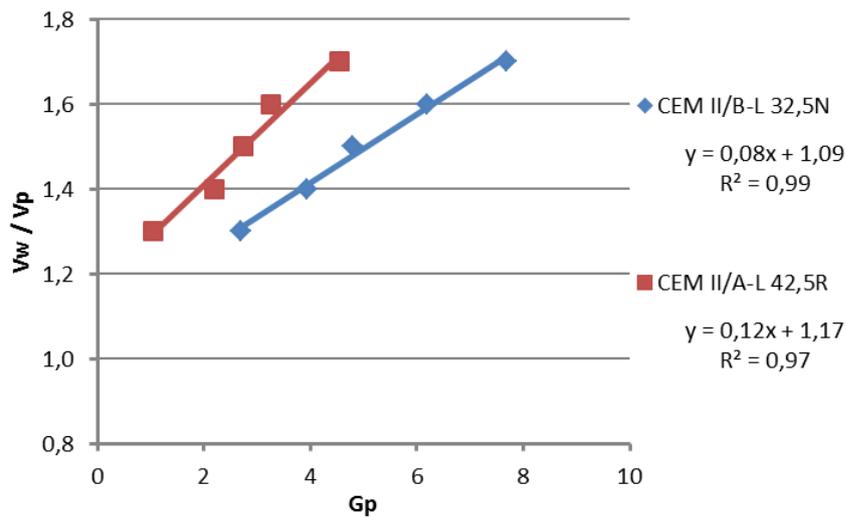


Figura 5-3 – Determinação do β_p e do E_p para pastas compostas por 2 tipos de cimento diferente

No sentido de se obter as primeiras indicações sobre o comportamento dos pigmentos utilizados, realizaram-se pastas com um $V_{fa}/V_p=0,30$ que incorporavam diferentes pigmentos líquidos com uma dosagem de $V_{pig}/V_p=0,05$ (importa lembrar que o volume de pigmento foi colocado por substituição de igual volume de água, neste caso de 5%). Convém também notar que o fabricante sugere a utilização de 2% a 10% de pigmento em relação à massa do cimento nas diversas composições a realizar. Na Figura 5-4 apresentam-se os valores de β_p e de E_p obtidos.

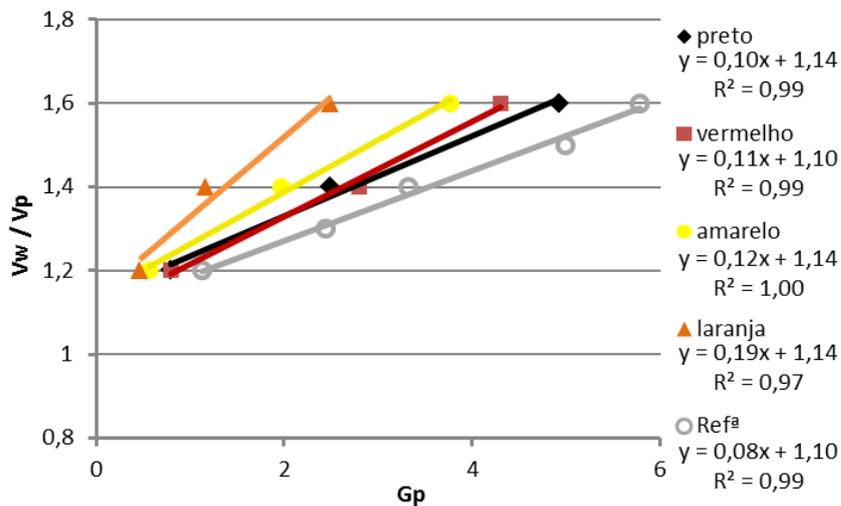


Figura 5-4 – Determinação do β_p para pastas com $V_{fa}/V_p=0,30$ e com diferentes pigmentos $V_{pig}/V_p = 0,05$

Comparando as composições que incorporavam pigmentos em relação à composição de referência observa-se um efeito notável de perda de capacidade de espalhamentos por incorporação de pigmentos. Verifica-se um aumento geral, na ordem dos 4% do valor de β_p para as pastas que incorporam adição de pigmentos relativamente a uma composição de referência sem pigmentos, com

os mesmos parâmetros. Verifica-se contudo uma maior alteração no fator de deformabilidade (E_p). A introdução de um volume de pigmento por igual volume de água numa pasta conduz a um aumento considerável do E_p , dependente do tipo (cor) de pigmento utilizado, desde 25% até cerca de 137%. O pigmento laranja é aquele que possui um E_p mais elevado e conseqüentemente é aquele que possui uma menor sensibilidade à variação do volume de água utilizado na composição da pasta. Alterações significativas na dosagem de água não provocam grandes diferenças de áreas de espalhamento relativas para este pigmento.

De seguida, verificou-se a influência que os diversos pigmentos possuem na área de espalhamento relativa (G_p), relativamente a uma pasta de referência, sem pigmento e possuindo os mesmos parâmetros que as pastas com pigmento. Para o fabrico destas pastas utilizou-se somente o cimento CEM II/A-L 42,5R. Os parâmetros utilizados são apresentados nas legendas das próximas figuras:

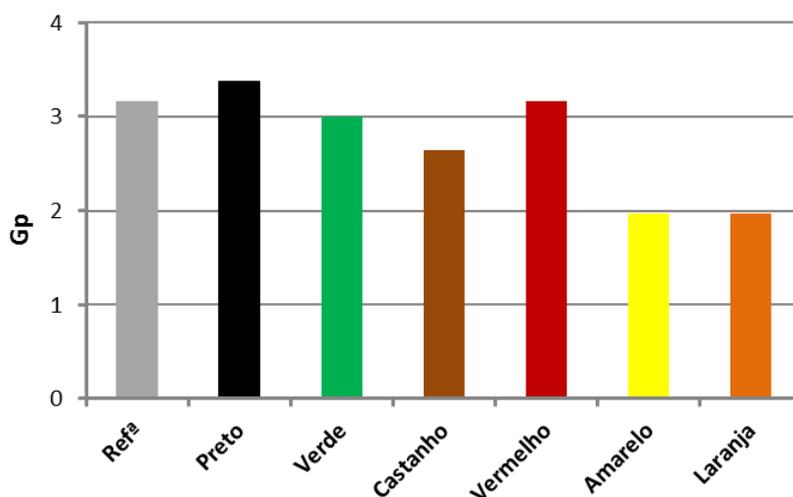


Figura 5-5 – Influência do pigmento no G_p : $V_w/V_p=1,60$; $V_{fa}/V_p=0,00$ e $V_{pig}/V_p=0,05$

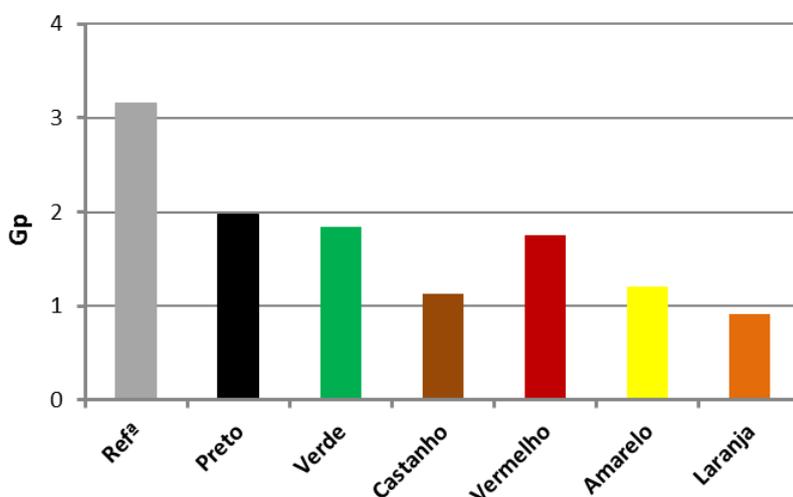


Figura 5-6 – Influência do pigmento no G_p : $V_w/V_p=1,60$; $V_{fa}/V_p=0,00$ e $V_{pig}/V_p=0,10$

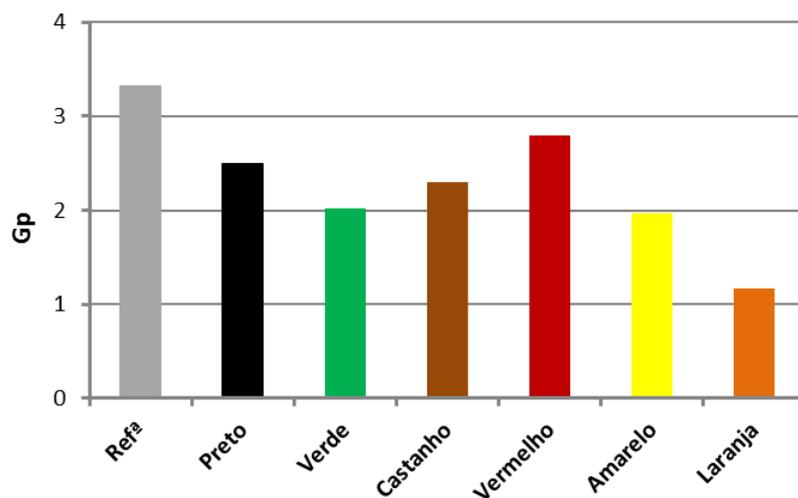


Figura 5-7 – Influência do pigmento no Gp: $V_w/V_p=1,40$; $V_{fa}/V_p=0,30$ e $V_{pig}/V_p=0,05$

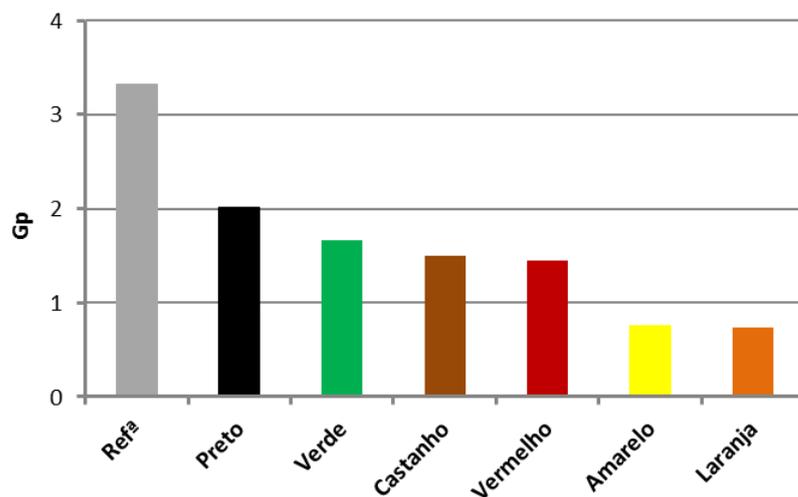


Figura 5-8 – Influência do pigmento no Gp: $V_w/V_p=1,40$; $V_{fa}/V_p=0,30$ e $V_{pig}/V_p=0,10$

Tal como se pode verificar desde a Figura 5-5 até à Figura 5-8, uma pasta sem qualquer adição de pigmento possui uma área de espalhamento relativa superior a qualquer pasta com adição de pigmento (à exceção do pigmento preto na Figura 5-5, situação que poderá ter ocorrido devido ao pouco volume de pigmento introduzido na composição). Notam-se efeitos consideráveis de redução da área de espalhamento, e consequentemente do Gp para as pastas que incorporem pigmentos na sua constituição, principalmente nos pigmentos amarelo e laranja, onde este efeito é mais drástico, facilmente visível nas pastas constituídas por 10% de volume de pigmento em relação ao volume de ligante total. Para além disso, quanto maior o volume de pigmento utilizado, maior será a redução do Gp relativamente a uma pasta de referência sem pigmento.

Fez-se o mesmo estudo para o cimento CEM II/B-L 32,5N, sendo alcançados resultados idênticos aos obtidos anteriormente, conforme ilustrado na Figura 5-9.

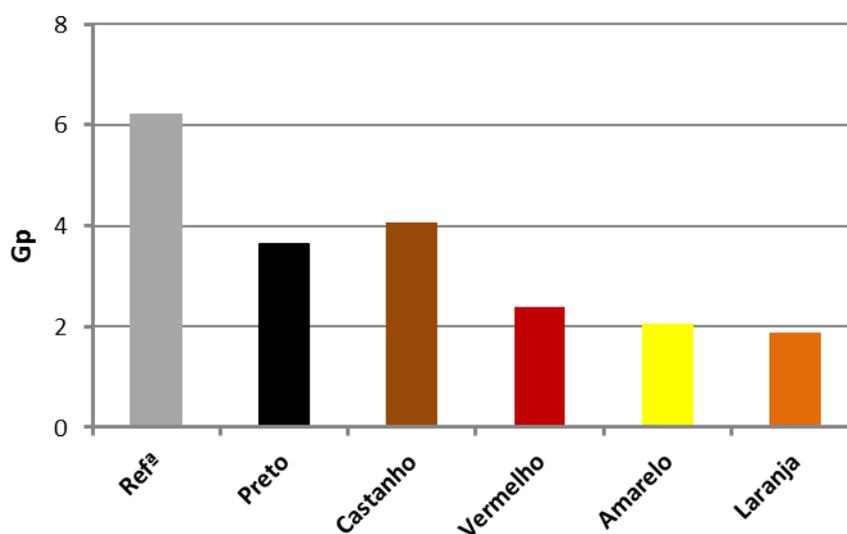


Figura 5-9 – Influência do pigmento no Gp: CEM II/B-L 32,5N com $V_w/V_p=1,60$; $V_{fa}/V_p=0,00$ e $V_{pig}/V_p=0,10$

Assim, tornou-se evidente que a introdução de pigmentos numa composição por substituição de igual volume de água conduzia a uma redução significativa da área de espalhamento relativa, Gp. Para se obterem diâmetros de espalhamento idênticos e consequentemente áreas de espalhamento relativas idênticas, teríamos de optar por uma das seguintes soluções:

- Aumentar o volume de água utilizado, que não se revelaria prático devido à pouca sensibilidade à alteração de quantidades de água, verificados no fator de deformação, E_p , obtidos nalguns pigmentos, para além de problemas de resistência e segregação que poderiam daí advir;
- Utilização de um cimento que proporcionasse uma melhor trabalhabilidade, como o cimento CEM II/B-L 32,5N. No entanto, este estudo não faria sentido, pois mudaríamos um constituinte essencial da argamassa de referência, o tipo de cimento (CEM II/A-L 42,5R) para outro com propriedades diferentes para a utilização de pigmentos;
- Utilização de um adjuvante redutor de água de alta atividade (adjuvante ou superplastificante), capaz de repor as características de uma pasta com pigmento às de uma pasta de referência, mantendo todos os parâmetros idênticos, à exceção do volume de superplastificante utilizado. Como um superplastificante é um componente fundamental num BAC, foi esta a solução escolhida;

5.2.2. AFINIDADE DO SUPERPLASTIFICANTE

Os superplastificantes são constituintes fundamentais dos BACs. Nesse sentido, tornava-se vital compreender a afinidade do superplastificante para com os materiais a utilizar. Assim, ao nível das pastas, foram efetuados ensaios com recurso ao cone de Marsh, de modo a avaliar o efeito do

superplastificante na viscosidade, representadas na Figura 5-10 e no espalhamento das pastas no ensaio do cone de espalhamento de pastas, conforme ilustrado na Figura 5-11. Em ambos os ensaios foram utilizados os seguintes parâmetros:

- Cimento CEM II/A-L 42,5R;
- $V_w/V_p=1,20$;
- $V_{fa}/V_p=0,30$ ou $V_{fa}/V_p=0,00$ para as pastas constituídas com e sem cinzas volantes, respetivamente;
- $V_{pig}/V_p=0,00$;

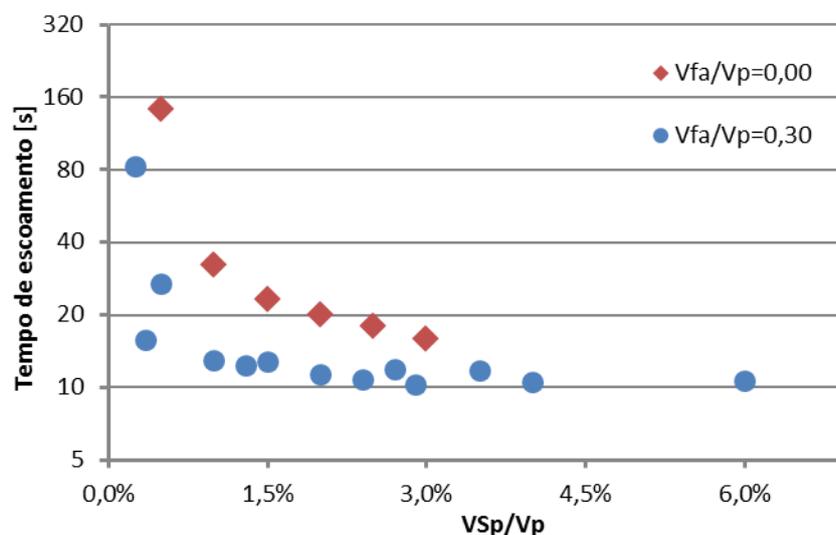


Figura 5-10 – Efeito do superplastificante na viscosidade de pastas com e sem adição de cinzas volantes

Tal como se pode verificar na Figura 5-10:

- A adição de superplastificante numa pasta conduz a tempos de escoamento cada vez menores, sendo especialmente eficaz em dosagens pequenas, onde a alteração da quantidade volumétrica de superplastificante conduz a reduções drásticas do tempo de escoamento. No entanto, e após um determinado valor de volume de superplastificante utilizado, denominado por dosagem de saturação do superplastificante, são obtidas reduções de tempo de escoamento muito marginais. Verifica-se uma tendência logarítmica inversa na análise de ambas as pastas;
- A adição de superplastificante é mais significativa numa pasta constituída somente por cimento. Uma pasta constituída por cinzas volantes possui uma maior quantidade de partículas de menor dimensão, que possibilitam um menor atrito interno e conseqüentemente um tempo de escoamento inferior. A utilização de um superplastificante nesta situação não é tão eficaz quanto seria numa pasta composta totalmente por cimento. Verifica-se uma dosagem de saturação mais precoce para a pasta constituída com cinzas volantes, num valor inferior aos 1,5% de V_{Sp}/V_p , enquanto este valor é mais elevado para as pastas sem cinzas volantes.

Relativamente aos resultados obtidos tendo em conta o efeito do superplastificante na fluidez da pasta, conclui-se que a adição contínua do conteúdo de superplastificante provoca um aumento também contínuo da área de espalhamento relativa de uma pasta, exceto para dosagens muito elevadas, quando já é notável uma elevada segregação da pasta. A Figura 5-11 resume o conjunto de valores obtidos neste estudo.

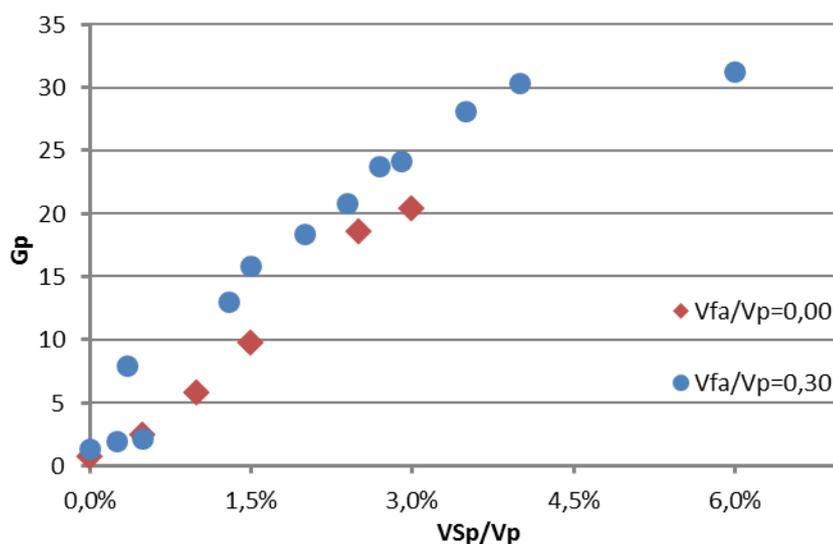


Figura 5-11 – Efeito do superplastificante na fluidez de pastas com e sem adição de cinzas volantes

Verifica-se também que a introdução de superplastificante conduz a maiores áreas de espalhamento relativas nas pastas que possuem cinzas volantes na sua composição, situação facilmente compreendida, pois as pastas com cinzas volantes possuem um maior Gp relativamente a uma pasta constituída somente por cimento e com semelhantes restantes parâmetros. A adição de superplastificante também evidencia esta situação. Refira-se que estes resultados estão de acordo com os observados na Figura 5-2, ou seja, confirma-se que as cinzas volantes possibilitam maiores deformações.

5.3. ARGAMASSAS

Devido a limitações em termos de equipamento necessário à realização dos ensaios de viscosidade, que só viria a chegar ao LCM algum tempo depois do início do estudo em argamassas, procedeu-se ao estudo das argamassas para os ensaios de fluidez, ou seja, através do ensaio de espalhamento no cone de argamassas. Para este estudo, pretendia-se dimensionar composições de argamassas coloridas com áreas de espalhamento relativas idênticas a uma composição de referência, mas sem pigmento. Para

além disso, pretendia-se manter o esqueleto sólido da argamassa, ao manter as mesmas proporções de areias na composição.

Adotou-se uma metodologia de tentativa-erro para obter uma argamassa que tivesse propriedades autocompactáveis [63]. Após um elevado número de tentativas obteve-se uma composição de argamassa de referência, baseada nos valores sugeridos pela literatura [19, 63] que especificavam que se obtivesse um espalhamento na entre os 240 mm e 260 mm. Esta composição possuía os seguintes parâmetros, que se mantinham iguais nas restantes composições com pigmento:

- $V_w/V_p=0,90$ correspondente ao valor máximo compreendido no intervalo de 80% a 90% do valor de β_p [19] obtido anteriormente no estudo das pastas;
- $V_{fa}/V_p=0,30$ que tal como vimos anteriormente era o valor de cinzas volantes que melhor características oferecia às propriedades reológicas de uma pasta;
- $V_s/V_m=0,50$ podendo este volume de areias estar compreendido entre 40% a 50% do volume total da argamassa [19];
- $V_{s1}/V_s=0,60$ valor obtido após alguns ensaios, tendo em conta a consistência da argamassa;
- $V_{s2}/V_s=0,40$;
- $V_{pig}/V_p=0,00$ para a pasta de referência e $V_{pig}/V_p=0,10$ para as restantes pastas constituídas com a utilização de pigmento;

O V_{Sp}/V_p utilizado na argamassa de referência foi de 1,7%, obtendo-se um diâmetro de espalhamento de 250 mm.

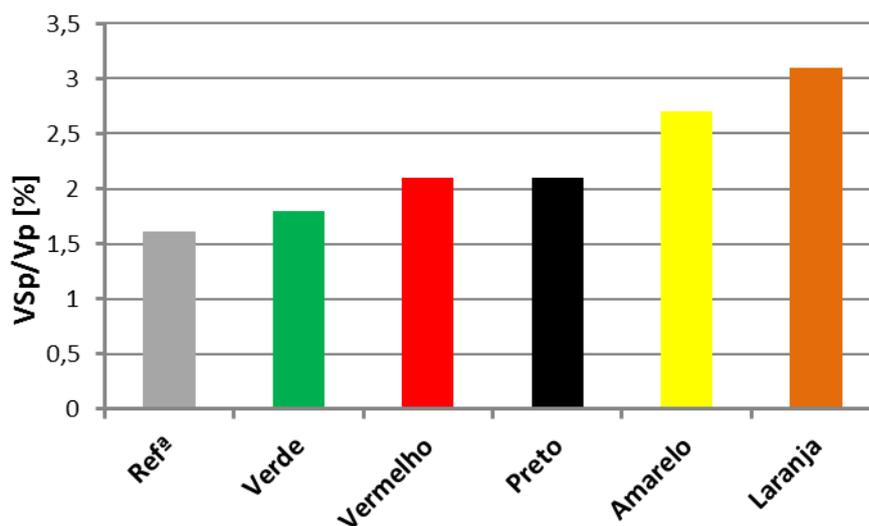


Figura 5-12 – Dosagem de superplastificante necessária para a obtenção de argamassas coloridas de G_p idêntico ao de uma argamassa de referência

Analisando os valores da Figura 5-12 verifica-se que todos os pigmentos necessitam de um acréscimo de superplastificante para se obterem diâmetros de espalhamento idênticos aos da argamassa de referência. O pigmento amarelo e o pigmento laranja são aqueles que necessitam, relativamente à amassadura de referência de um acréscimo maior de superplastificante, de 70% e 90% respetivamente, para atingirem as mesmas propriedades reológicas.

Para todas as argamassas apresentadas na Figura 5-12, realizaram-se ensaios de resistência à flexão e à compressão aos 7 dias, cujos resultados são apresentados na Figura 5-13 e Figura 5-14, respetivamente.

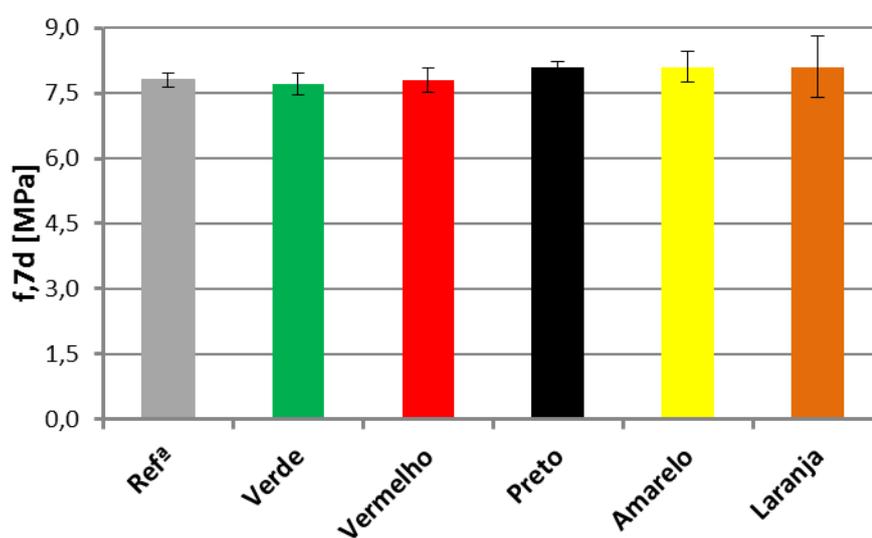


Figura 5-13 – Ensaios de flexão das argamassas coloridas com propriedades autocompactáveis

Através da Figura 5-13 verifica-se que não existe uma diminuição da resistência à flexão das argamassas coloridas, observa-se efetivamente um ligeiro aumento da resistência à flexão para a maioria das argamassas constituídas com pigmento, especialmente para os pigmentos amarelo e laranja. Contudo, e tendo em conta as barras de erros associadas, será mais prudente dizer que todas as composições possuem resistências semelhantes.

Pelos resultados da Figura 5-14 conclui-se que os pigmentos não diminuem a resistência à compressão. De facto, observa-se um ligeiro aumento da resistência à compressão para a maioria dos pigmentos. Este efeito observado, deve-se possivelmente ao facto da introdução de pigmentos ter sido feita com substituição de igual volume de água, ou seja, como os pigmentos não devem ser 100% material líquido, deverá estar a ocorrer uma diminuição da água efetiva.

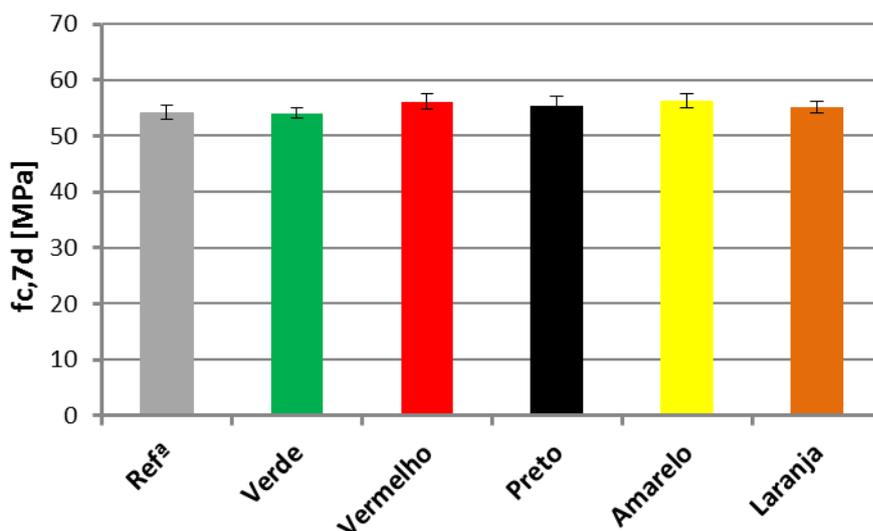


Figura 5-14 – Ensaio de compressão das argamassas coloridas com propriedades autocompactáveis

5.4. BETÕES

Com os resultados obtidos anteriormente nas pastas e argamassas, manteve-se os parâmetros associados aos agregados finos constantes e iguais aos utilizados nas argamassas, assim como os parâmetros relativamente aos finos. Após algumas amassaduras através do método tentativa erro, foi possível determinar uma composição de referência, capaz de atingir os requisitos necessários à autocompactabilidade. Esta composição de BAC possuía os seguintes parâmetros:

- $V_w/V_p = 0,90$;
- $V_{fa}/V_p = 0,30$;
- $V_{Sp}/V_p = 2,5\%$;
- $V_{pig}/V_p = 0,00$;
- $V_s/V_m = 0,50$;
- $V_{s1}/V_s = 0,60$;
- $V_{s2}/V_s = 0,40$;
- $V_g/V_{g,lim} = 0,50$;
- $V_{b1}/V_b = 0,70$;
- $V_{b2}/V_b = 0,30$;
- $V_{vazios} = 4\%$;

Apresentam-se na Tabela 5-1 os valores, em massa, dos constituintes deste BAC de referência. Note-se, por exemplo, no valor de ligante (cimento + cinzas volantes) utilizado, claramente superior aos valores utilizados para um betão convencional. Refira-se também que a relação em massa utilizada de água/ligante (w/p) foi de 0.31, possuindo a relação água/cimento (w/c) um valor de 0.41.

Tabela 5-1 – Massa por m³ dos constituintes de um BAC de referência, sem adição de pigmentos

	<i>Cimento</i>	<i>Cinzas volantes</i>	<i>Água efetiva</i>	<i>Adjuvante</i>	<i>Areia 1</i>	<i>Areia 2</i>	<i>Pigmento</i>	<i>Brita 1</i>	<i>Brita 2</i>	<i>Brita 3</i>
<i>1m³ [kg]</i>	412	134	169	4.8	625	408	0.0	488	208	0

Posteriormente, foram produzidas composições semelhantes à composição de referência incorporando pigmentos – $V_{pig}/V_p=10\%$, ou seja, incorporando 19,0 litros/m³ de pigmentos (que foram introduzidos através da substituição de 19,0 litros de água). Como a substituição parcial da água por pigmentos reduzia substancialmente as propriedades autocompactáveis da composição, corrigiu-se a dosagem de superplastificante de acordo com as necessidades introduzidas por cada pigmento – com base nos resultados obtidos ao nível das argamassas.

Assim, produziram-se cinco composições diferentes de BACs coloridos. Após a mistura realizou-se o ensaio do espalhamento, seguido do Funil V, da Caixa L e da segregação. Utilizaram-se os mesmos parâmetros utilizados na composição de referência (descritos anteriormente) à exceção dos seguintes parâmetros: V_{pig}/V_p e V_{Sp}/V_p , cujos valores são apresentados de seguida:

- $V_{pig}/V_p = 10\%$ para todos os pigmentos utilizados;
- $V_{Sp}/V_p =$
 - 3,9% para o pigmento verde;
 - 3,5% para os pigmentos vermelho e preto;
 - 4,0 % para os pigmentos amarelo e laranja;

Apresentam-se os resultados obtidos para o ensaio de autocompactabilidade desde a Figura 5-15 até à Figura 5-18. Note-se que com a introdução de pigmentos e de superplastificante a mais relativamente a uma composição de referência, diminuiu-se ligeiramente a área de espalhamento dos BACs coloridos. Se introduzíssemos superplastificante a mais obteríamos diâmetros superiores, contudo teríamos também aumentos significativos na segregação, situação nada favorável.

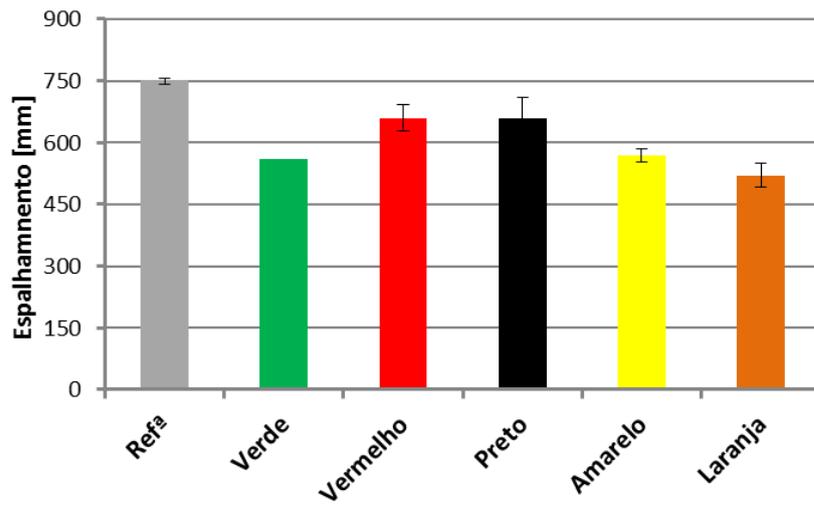


Figura 5-15 – Diâmetros de espalhamento

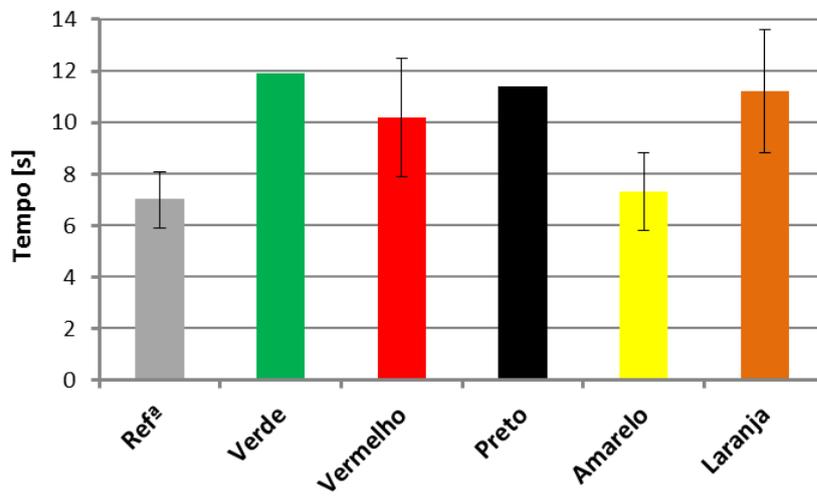


Figura 5-16 – Tempos de escoamento no funil V

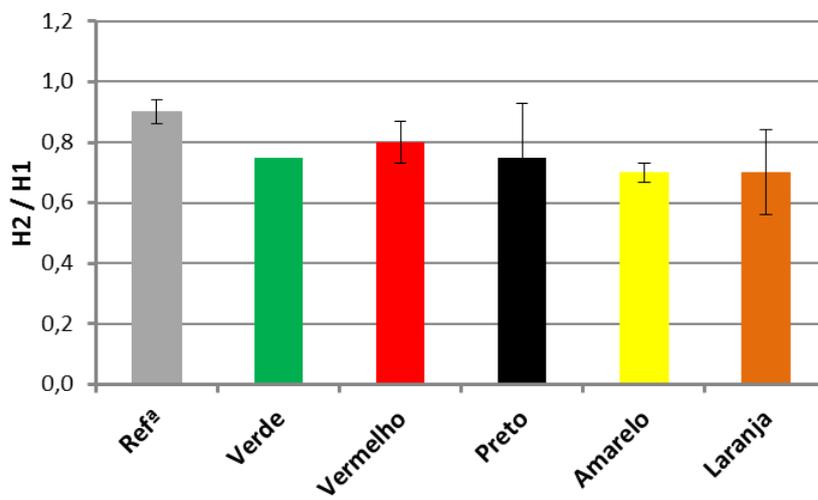


Figura 5-17 – Rácio da caixa L

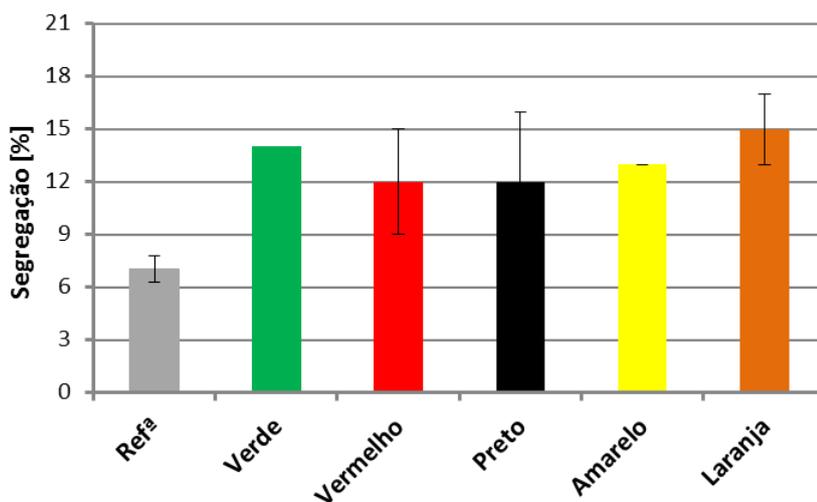


Figura 5-18 – Segregação

Analisando os resultados, verifica-se que os valores obtidos são aceitáveis, o que permite atribuir a designação de BAC aos betões produzidos. Importa contudo referir que se observou uma perda de trabalhabilidade relativamente rápida – cerca de 15 minutos após o término da amassadura já se começavam a encontrar dificuldades para moldar provetes sem qualquer vibração.

Após a conclusão dos ensaios para avaliar a autocompactabilidade moldaram-se provetes cúbicos com 150 mm de aresta para a realização do ensaio da resistência à compressão aos 7 e aos 28 dias. Apresentam-se os resultados obtidos na Figura 5-19 e Figura 5-20.

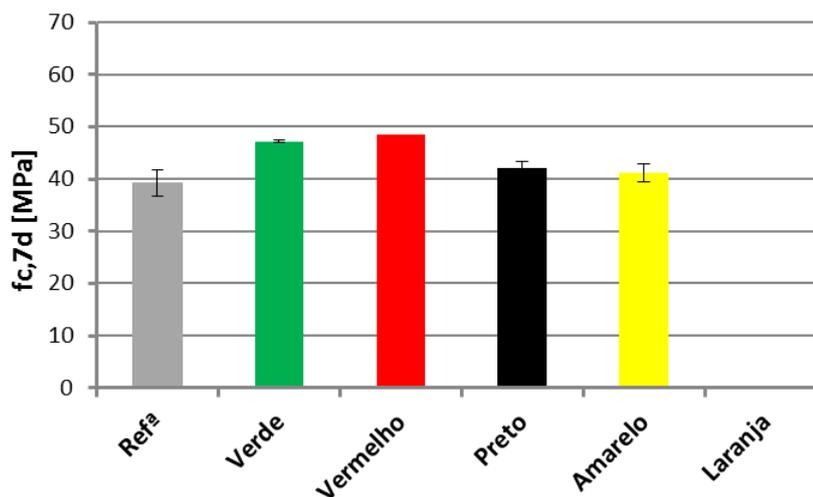


Figura 5-19 – Resistência à compressão aos 7 dias dos BACs coloridos

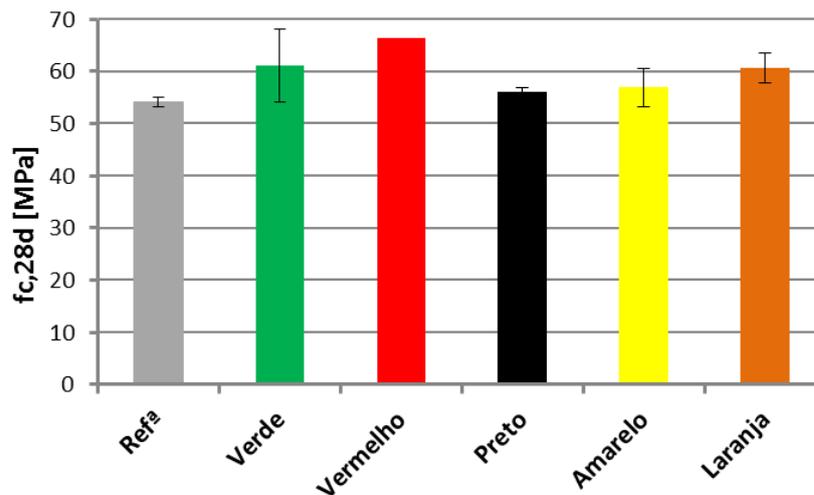


Figura 5-20 – Resistência à compressão aos 28 dias dos BACs coloridos

Pelos resultados da Figura 5-20 observa-se que todos os betões tinham aos 28 dias uma resistência à compressão superior a 50 MPa. Assim desde logo se verificou que para a maior parte das aplicações correntes estas composições deveriam conduzir a betões sobredimensionados ao nível da classe de resistência. Finalmente, no que concerne à resistência à compressão, importa referir que à semelhança do que se observou nas argamassas, os betões coloridos tinham uma resistência à compressão ligeiramente superior à do betão de referência. Este efeito observado, deve-se possivelmente ao facto da introdução de pigmentos ter sido feita com substituição de igual volume de água, ou seja, como os pigmentos não devem ser 100% material líquido, deverá estar a ocorrer uma diminuição da água efetiva.

Estudou-se o efeito do aumento do volume de pigmento nas composições de BACs coloridos, cujos resultados são apresentados na Figura 5-21. Foram utilizados os seguintes parâmetros de V_{pig}/V_p :

- 0% para os betões de referência (Ref^{ra});
- 10 % para todos os BACs coloridos apresentados no lado esquerdo do par de resultados apresentados no eixo do gráfico;
- 15% para os BACs coloridos preto e vermelho apresentados no lado direito do par de resultados apresentados no eixo do gráfico – obteve-se um acréscimo médio de 22% na resistência à compressão relativamente a um BAC colorido idêntico que incorpore 10% de V_{pig}/V_p ;
- 25% para os BACs coloridos amarelo e laranja apresentados no lado direito do par de resultados apresentados no eixo do gráfico – obteve-se um acréscimo médio de 36% de resistência à compressão relativamente a um BAC colorido idêntico que incorpore 10% de V_{pig}/V_p ;

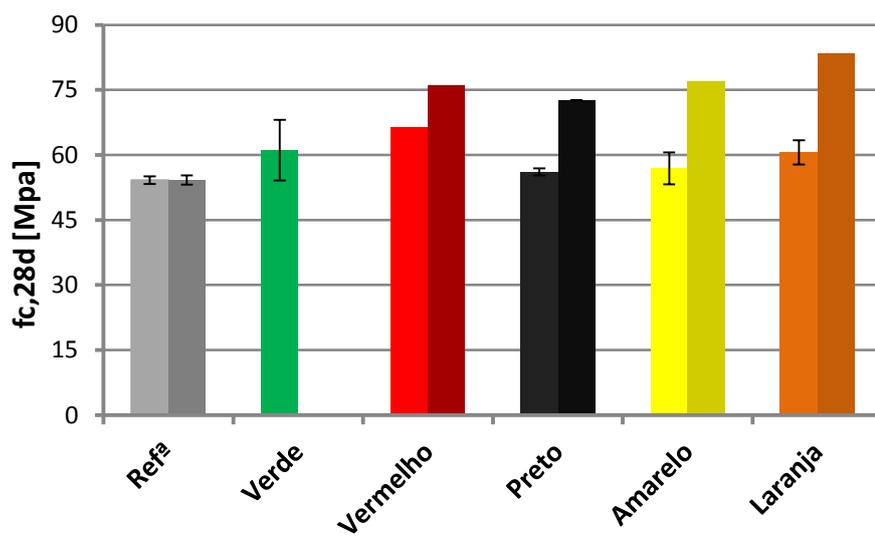


Figura 5-21 – Resistência à compressão de betões com diferentes Vpig/Vp

6

CONSIDERAÇÕES FINAIS

6.1. NOTAS FINAIS

O presente trabalho é uma contribuição para o dimensionamento de betões autocompactáveis coloridos com agregados britados vulcânicos. Esta contribuição é suportada por ensaios experimentais desenvolvidos ao nível das pastas, argamassas e betões no Laboratório Cimentos Madeira.

Foram ensaiadas 112 composições de pastas com diferentes relações volumétricas entre água e ligante, várias percentagens de adição (cinzas volantes) no volume de ligante, diferentes tipos de cimento, e quantidades variáveis de pigmentos e adjuvante. Foram obtidos valores de áreas de espalhamento relativas para diversas pastas, assim como tempos de escoamento no cone de Marsh.

Ao nível das argamassas, foram ensaiadas 93 composições, com o objetivo de se estudar as alterações provocadas pelos agregados finos no comportamento reológico da argamassa. Após a determinação de uma argamassa de referência, sem adição de pigmentos, caracterizada pelos ensaios ao nível das argamassas, manteve-se um esqueleto sólido, composto pelos agregados finos. Manteve-se constante o volume de agregados finos totais em relação ao volume total de argamassa, tais como os volumes de areia fina e grossa. As composições das pastas foram ajustadas para se obterem parâmetros reológicos semelhantes ao da argamassa de referência, tendo em conta as alterações provocadas pelos pigmentos.

Relativamente aos betões, foram dimensionados vários betões autocompactáveis coloridos com agregados vulcânicos basálticos, que possuíssem características reológicas semelhantes às de um betão autocompactável de referência (sem pigmento). Para este efeito, e tal como nas argamassas, foi mantido um esqueleto sólido no betão, composto pelos agregados finos e grossos.

6.2. CONCLUSÕES

Para os resultados experimentais apresentados e discutidos anteriormente, podem-se retirar as seguintes conclusões:

Testes efetuados nas pastas/argamassas:

- A introdução de cinzas volantes numa pasta conduz a um aumento substancial da trabalhabilidade no estado fresco;
- Para a produção de BAC, o cimento CEM II/B-L 32,5N melhora as propriedades reológicas de uma composição, relativamente a um cimento CEM II/A-L 42,5R;
- A introdução de pigmentos, determinada em relação à dosagem de ligante utilizada (volumetricamente), e consequente diminuição do volume de água a ser utilizada, conduz a uma perda de deformabilidade e a um aumento ligeiro das propriedades mecânicas;
- Da adição de superplastificante em doses controladas numa composição, advém ganhos significativos nas propriedades reológicas. Uma sobredosagem de superplastificante conduz a efeitos quase nulos nalgumas propriedades e afeta negativamente a segregação;

Testes efetuados nos betões:

- Foi possível produzir BACs utilizando os materiais correntemente disponíveis na Região Autónoma da Madeira (britas e areias britadas de origem vulcânica, ausência de filer calcário, etc.);
- Foi exequível a produção de BACs coloridos através da incorporação de pigmentos líquidos. Contudo, a incorporação de pigmentos líquidos realizada através da substituição por igual volume de água reduziu substancialmente as propriedades autocompactáveis (tal redução dependeu do tipo (cor) de pigmento), embora aumentasse ligeiramente a resistência à compressão;

6.3. TRABALHO FUTURO

Apesar dos estudos que têm vindo a ser efetuados na última década para avaliar o comportamento do BAC, este não é ainda implementado na indústria da construção da RAM. No sentido de auxiliar a utilização de BAC e de BAC colorido na RAM, são sugeridos os seguintes trabalhos futuros:

- Aferição das propriedades do BAC no estado endurecido, nomeadamente, no que respeita à fluência, retração e parâmetros de durabilidade (penetração dos cloretos, permeabilidade, carbonatação, entre outros). Deste modo, poderiam ser mais facilmente comparadas as propriedades entre um betão convencional e um BAC produzido com os materiais correntemente disponíveis na RAM;

- Otimização das composições obtidas neste trabalho. Embora se tivessem obtido composições de BAC com agregados britados vulcânicos, há modificações que podem ser feitas de modo a obtermos um betão mais sustentável. Devido aos requisitos que um BAC possui, é habitual atingir elevados valores de resistência, mesmo nas idades jovens. De forma a obtermos composições de BACs mais económicas, importa estudar a utilização de um cimento CEM II/B-L 32,5 N;
- Utilização de um método mais científico, através da utilização de metodologias estatísticas, como por exemplo através dos planos fatoriais [4, 8]. Um estudo através do método de tentativa-erro conduz a muitas composições efetuadas, das quais se retiram poucas conclusões.

REFERÊNCIAS

1. Vibration white finger. Disponível em: http://en.wikipedia.org/wiki/Vibration_white_finger. Última visita em: 31 de Agosto de 2012
2. The european guidelines for self compacting concrete. 2005 May 2005. Disponível em: <http://www.efnarc.org/pdf/SCCGuidelinesMay2005.pdf>. Última visita em 16 de Fevereiro de 2012
3. RILEM TC 174-SCC, Self-compacting concrete State-of-the-Art report. RILEM2001, Cachan: RILEM Publications. XI, 154, [2] p.-XI, 154, [2] p.
4. Nunes, S., Performance-based design of self-compacting concrete (SCC) a contribution to enhance SCC mixtures robustness2008, Porto. XXXVIII, 319 p.-XXXVIII, 319 p.
5. Maia, L., Design Based Concrete To Enhance Early Age Properties, in FEUP2010, University of Porto. p. 149.
6. Wallevik, J.E., Rheology of Particle Suspensions: Fresh Concrete, Mortar and Cement Paste with Various Types of Lignosulfonates, F.o.E.S.a.T. Norwegian University of Science and Technology, Editor 2003, Norwegian University of Science and Technology, Faculty of Engineering Science and Technology. p. 397.
7. Figueiras, H.I.M., Estudo e desenvolvimento experimental de composições de betão auto-compactável aferição das suas características mecânicas e durabilidade2006, Porto: [s. n.]
8. Nunes, S., et al. Optimização de um betão auto-compactável branco de elevada durabilidade. in Actas do Encontro Nacional Betão Estrutural 2010. 2010. Lisboa, Portugal: Gráfica Sobralense.
9. Nunes, S.C.B., Betão auto-compactável Tecnologia e propriedades2001, Porto: FEUP.
10. Coutinho, J.S., The combined benefits of CPF and RHA in improving the durability of concrete structures, Cement and Concrete Composites. 2003: p. 51-59.
11. EN 12350-9:2010 – Testing fresh concrete – Part 9: Self-compacting concrete – V-funnel test E.c.f. standardization, Editor 2010.
12. EN 12350-10:2010 – Testing fresh concrete – Part 10: Self-compacting concrete – L box test, E.c.f. standardization, Editor 2010.
13. EN 12350-8:2010 – Testing fresh concrete – Part 8: Self-compacting concrete – Slump-flow test, E.c.f. standardization, Editor 2010.
14. Mehta, P.K. Society, sustainability, and the global concrete industry. in 51º Congresso Brasileiro do Concreto. 2009.

15. Pereira, T.A.d.C., Concreto auto-adensável, de alta resistência, com baixo consumo de cimento Portland e com adições de fibras de lã de rocha ou poliamida, in Departamento de Engenharia de Estruturas 2010, Universidade de São Paulo: São Carlos.
16. Bouzoubaâ, N. and M. Lachemi, Self-compacting concrete incorporating high volumes of class F fly ash: Preliminary results. *Cement and Concrete Research*, 2001. 31(3): p. 413-420.
17. Silva, J., et al. Betão Autocompactable de elevado efeito estético. in *Actas do Encontro Nacional Betão Estrutural 2012*, 2012. págs. 53-54. Porto, Portugal.
18. Gomes, C., et al. Dimensionamento de betões autocompactáveis coloridos com agregados britados vulcânicos. in *Actas do Encontro Nacional Betão Estrutural 2012*. 2012. Págs. 55-56. Porto, Portugal.
19. EFNARC. Specification and Guidelines for Self-Compacting Concrete. 2002; Disponível em: <http://www.efnarc.org/pdf/SandGforSCC.PDF>. Última visita em 9 de Novembro de 2012.
20. Collepardi, M. Self-Compacting Concrete: what is new? in 7th International conference on superplasticizers and other chemical admixtures in concrete. 2003, Berlin.
21. Okamura, H. and O. M., Self-Compacting Concrete. Development, Present Use and Future. *Proceedings of First International RILEM Symposium on Self Compacting Concrete*, 1999: p. 3-14.
22. Ouchi, M. and M. Hibino, Development, applications and investigations of self-compacting concrete. p. 3.
23. Gibbs, J.C. The prospects for self-compacting concrete. in *Proceedings of the Concrete Communication Conference*. 1999.
24. Ozawa, K. and M. Ouchi, *Proceedings of the international workshop on self compacting concrete*. 1999.
25. Kashima, S., et al. Application of Self Compacting Concrete Made with Low-heat Cement for Bridge Substructures of Honshu-shikoku Bridge Authority. in *International Workshop on Self-compacting Concrete*. 1998.
26. Ponte Akashi-Kaikyo. Disponível em: <http://www.egalizer.hu/szarazfold/epitmeny/egyeb/akb/bevezet.htm>. Última visita em 16 de Outubro de 2012.
27. Sondra Lanken Tunnels, Stockholm. Disponível em: http://joe-landscapeissanders.blogspot.pt/2009_03_01_archive.html. Última visita em 28 de Junho de 2012.
28. Society, T.C., *Guide to the design of concrete structures in the Arabian Peninsula*. 2011.
29. RILEM. Betões de elevado desempenho económico. in *Novos Desenvolvimentos do Betão*. 2003. Lisboa.

30. Autor_Desconhecido. Disponível em:
<https://dspace.ist.utl.pt/bitstream/2295/150733/1/Dissertacao.pdf>. Última visita em 7 de Janeiro de 2012.
31. Entrevista aos arquitetos do Edifício Vodafone. Disponível em:
http://www.publico.pt/Cultura/porto-arrecada-tres-premios-mundiais-de-arquitectura_1480563.
Última visita em 1 de Outubro de 2012.
32. Edifício Vodafone, Porto –Video. Disponível em:
<http://www.youtube.com/watch?v=AsgoVQDcwl8>. Última visita em 18 de Março de 2012.
33. Arch Daily. Disponível em: <http://www.archdaily.com>. Última visita em 26 Agosto de 2012.
34. Edifício Vodafone, Porto. Disponível em: <http://www.barbosa-guimaraes.com/recent-projects/vodafone-headquarters-building-oporto/>. Última visita em 26 Agosto de 2012.
35. NP EN 206-1:2005 - Betão - Parte 1: Especificação, desempenho, produção e conformidade, 2005.
36. NP EN 206-9:2010 - Regras adicionais para betão autocompactável (BAC), 2010.
37. Okamura, H. and M. Ouchi, Self-compacting Concrete. Journal of Advanced Concrete Technology, 2003. 1.
38. Torgal, F.P. and S. Jalali. Considerações sobre o impulso dos BAC's no dimensionamento de cofragens verticais. in bac2010 - 2º Congresso Ibérico sobre betão auto-compactável. 2010. Guimarães.
39. Den Uijl, J.A., Zelfverdichtend Beton. Onderzoek in opdracht van CUR Commissie B79 Zelfverdichtend Beton, 2002-4.
40. Skarendahl, A. and Ö. Petersson, State-of-the-Art Report of RILEM Technical Committee 174-SCC 2000: RILEM Publications S.A.R.L, 2000.
41. NP EN 197-1:2005 - Cimento. Parte 1: Composição, especificações e critérios de conformidade para cimentos correntes, 2005.
42. Secil, C.G.d.C.e.C.S.A., Cimento Portland de Calcário CEM II /A-L 42,5R, 2003.
43. Secil, C.G.d.C.e.C.S.A., Cimento Portland de Calcário CEM II /B-L 32,5R (br), 2004.
44. Secil, C.G.d.C.e.C.S.A., Cimento Portland de Calcário CEM II /B-L 32,5N, 2003.
45. NP EN 196-2:2000 - Métodos de ensaio de cimento. Parte 2: Análise química dos cimentos, 2000.
46. NP EN 451-1:1994 - Métodos de ensaio das cinzas volantes. Parte 1 - Determinação do teor de óxido de cálcio livre., 1994.
47. LNEC, E 64: Cimentos. Determinação da massa volúmica, 1979. p. 2.

48. NP EN 196-6:2005 - Métodos de ensaio de cimento. Parte 6: Determinação da finura, 2005.
49. NP EN 196-1: 2000 – Métodos de ensaio de cimento. Parte 1: Determinação das resistências mecânicas, 2000.
50. NP EN 450-1:2005 - Cinzas volantes para betão – Parte 1: Definição, especificações e critérios de conformidade., 2005.
51. BASF, T.C.C., Glenium Sky 548: Superplastificante de éter policarboxílico para produção de betão de elevada performance com especial relevância sobre as resistências iniciais, 2011. p. 2.
52. BASF, T.C.C., Rheocolor: Sistema para coloración en masa de hormigón., 2010. p. 3.
53. NP EN 932-3:2002 - Ensaio das propriedades gerais dos agregados. Parte 3: Método e terminologia para a descrição petrográfica simplificada, 2002.
54. Brimade, S.d.B.d.M.S.A., Ficha técnica - Brita 4/10, 2011.
55. Brimade, S.d.B.d.M.S.A., Ficha técnica - Brita 8/16, 2011.
56. Brimade, S.d.B.d.M.S.A., Ficha técnica - Brita 11/22, 2011.
57. NP EN 12620:2004 - Agregados para betão, 2004.
58. NP EN 933-1:2000 - Ensaio das propriedades geométricas dos agregados. Parte 1: Análise granulométrica. Método de peneiração, 2000.
59. NP EN 1097-6:2003 - Ensaio das propriedades mecânicas e físicas dos agregados. Parte 6: determinação da massa volúmica e da absorção de água, 2003.
60. NP EN 1097-2:2002 - Ensaio das propriedades mecânicas e físicas dos agregados. Parte 2: Métodos para determinação da resistência à fragmentação – Los Angeles, 2002.
61. NP EN 933-3:2002 - Ensaio das propriedades geométricas dos agregados. Parte 3: Determinação da forma das partículas. Índice de achatamento, 2002.
62. ASTM C1260 - 05a - Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Aggregates (Mortar-Bar Method), 2005.
63. Okamura, H.H., Self-compacting high-performance concrete. Concrete international, 1997. 19(7): p. 50-54.
64. Peneiro. Disponível em: <http://www.gravimeta.pt/fotos/produtos/Sieves1.jpg>. Última visita em 26 Agosto de 2012.
65. NP EN 12390-2:2003 - Ensaio de betão endurecido. Parte 2: Execução e cura dos provetes para ensaios de resistência mecânica, 2003.
66. Máquina de amassadura das argamassas. Disponível em: <http://www.rego-herlitzius.com/>. Última visita em 26 Agosto de 2012.

67. NP EN 12390-3:2003 - Ensaio de betão endurecido. Parte 3: Resistência à compressão dos provetes de ensaio.
68. NP EN 12350-2:2002 - Betão fresco. Parte 2: Ensaio de abaixamento, 2002.
69. NP EN 12350-1: 2009 (Ed. 2) – Ensaio do betão fresco. Parte 1: Amostragem, 2009.
70. ISO 3310-2:1999 - Test sieves. Technical requirements and testing. Part 2: Test sieves of perforated metal plate, 1999.
71. Betoneira Lisprene. Disponível em: <http://www.lisprene.com/site/catpt.html>. Última visita em 26 Agosto de 2012.
72. NP EN 12390-4:2003 - Ensaio de betão endurecido. Parte 4: características das máquinas de ensaio, 2003

ANEXOS

FORMULAÇÃO DO BAC

Após a determinação dos volumes relativos para cada constituinte, foi necessário determinar a massa a utilizar para cada uma das amassaduras. Para isso, bastou multiplicar o volume de cada material a utilizar pela respectiva massa específica, de modo a obtermos a massa a ser utilizada em 1 m³ de composição. Utilizando o volume de amassadura pretendido, chega-se ao valor final (em massa) para cada material constituinte, pois para a realização de uma composição, seja de pasta, argamassa ou betão, é mais prático pesar os materiais constituintes em balanças do que utilizar equipamentos que meçam volumes. No entanto, e tal como referido anteriormente, este dimensionamento é feito em termos volumétricos.

$$massa = volume * densidade$$

○ Pastas

Para as pastas foi utilizada uma formulação tendo em conta dois constituintes essenciais, água (w) e finos com propriedades ligantes (p). Eram definidos 3 parâmetros iniciais para a nossa pasta:

- Volume de amassadura pretendido, geralmente de 0,6litros. Foi optado usar este volume de amassadura tendo em conta o volume de amassadura capaz de ser misturado no equipamento de mistura, e tendo em conta os requisitos mínimos de volume de amassadura final necessários para a realização dos ensaios nas pastas;
- Relação volumétrica entre água e ligante (V_w/V_p);
- Relação volumétrica entre cinzas volantes e volume total de ligante (V_{fa}/V_p), com relações entre os 0% (ou seja, apenas cimento como material ligante) e os 30% de cinzas no volume total de ligantes;

$$V_p + V_w = 1,0$$

$$V_p + \frac{V_w}{V_p} * V_p = 1,0$$

$$Vp = \frac{1}{1 + \frac{Vw}{Vp}}$$

$$Vw = \frac{Vw}{Vp} * Vp$$

$$Vfa = \frac{Vfa}{Vp} * Vp$$

$$Vc = \left(1 - \frac{Vfa}{Vp}\right) * Vp$$

Nos estudos em que era necessário utilizar superplastificante e/ou pigmentos, estes eram definidos em termos do volume total de finos. Ao introduzirmos estas novas quantidades de produto na pasta, e de modo a mantermos o volume inicial previsto, foi necessário remover água à amassadura. Foi optada uma redução de água à amassadura, pois estes produtos são maioritariamente líquidos (possuem um teor baixo de sólidos, embora este valor não estivesse especificado nas fichas técnicas dos fornecedores [51, 52]). Assim, o volume dos materiais líquidos que se introduziam na composição era mantido sempre igual ao da respetiva composição de referência. Eram definidos à partida:

- Relações volumétricas entre superplastificante e ligante;
- Relação volumétrica entre pigmento e ligante;

$$VSp = \frac{VSp}{Vp} * Vp$$

$$Vpig = \frac{Vpig}{Vp} * Vp$$

$$Vw' = Vw - (VSp + Vpig)$$

○ Argamassas

Para as argamassas, foi definido à partida:

- Volume de amassadura total pretendido, neste caso de 1,5 litros, tendo em conta os requisitos mínimos necessários para a realização dos ensaios para as argamassas e da capacidade de mistura do equipamento de amassadura;

- Percentagem de volume de agregados finos (V_s/V_m) a serem utilizadas no volume de amassadura total, compreendido entre 40% e 50%. O restante volume corresponde ao volume de pasta na amassadura, sendo os valores dos seus diversos constituintes calculado de modo idêntico ao especificado anteriormente, na secção das pastas;
- Percentagem de utilização para cada um dos 2 tipos de areias disponíveis, em relação ao volume de argamassa total (V_{s1}/V_m e V_{s2}/V_m);

$$V_s + V_{pasta} = 1,0$$

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

Como neste trabalho se estavam a utilizar materiais comerciais, ao invés do sugerido na literatura [2, 3, 63], apenas foram considerados como materiais finos o cimento e as cinzas volantes. Assim, a parte dos agregados cuja granulometria era inferior a 0,125 mm foi considerada como constituintes do agregado.

○ Betões

Para a formulação do betão foram introduzidos 2 novos parâmetros, correspondentes à utilização dos agregados grossos na composição:

- $V_g/V_{g,lim}$, correspondente à relação entre baridade/massa específica para as britas, multiplicado pelas percentagens respetivas de brita a serem utilizadas na composição;
- $V_{g,lim}$ ponderado;
- O volume de vazios adotado foi de 4%, valor que poderá entrar em conflito com alguma bibliografia. Mesmo com uma excelente capacidade de enchimento, um BAC possui alguns poros vazios, de difícil medição;

$$V_{brita} = V_{b1} + V_{b2} + V_{b3}$$

$$V_{g,lim} = \sum \left(\frac{\text{baridade brita } i}{\text{massa volúmica brita } i} \right) * V_{brita \ i \ no \ V \ total \ de \ britas}$$

$$50\% \leq V_g/V_{g,lim} \leq 60\%$$

$$V_{argamassa} = V_{pasta} + V_{areias}$$

$$V_{betão} = V_{argamassa} + V_{britas} + V_{vazios}$$

ARTIGOS PUBLICADOS NAS ACTAS DO ENCONTRO NACIONAL BETÃO ESTRUTURAL (BE2012) REALIZADO NA FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO, DE 24 A 26 DE OUTUBRO DE 2012.

1. **C. Gomes**, J. Silva, M. Guimarães, L. Maia, Dimensionamento de betões autocompactáveis coloridos com agregados artificiais vulcânicos, págs. 55-56.
2. J. Silva, **C. Gomes**, M. Guimarães, L. Maia, Betão Autocompactável de elevado efeito estético, págs. 53-54.

Dimensionamento de betões autocompactáveis coloridos com agregados britados vulcânicos



Celestino Gomes¹



Joana Silva²



Miguel Guimarães³



Lino Maia^{4,5}

RESUMO

A incorporação de pigmentos na composição do betão é uma técnica aplicada como alternativa arquitetónica à pintura ou colocação de revestimentos em edifícios. Tratando-se de um ‘betão à vista’ importa considerar cuidados adicionais na sua aplicação para assegurar a homogeneidade e qualidade do acabamento superficial. Utilizando betões autocompactáveis, não só a homogeneidade do material é aumentada devido à eliminação da compactação, como também o acabamento superficial é melhorado devido à maior capacidade de preenchimento dos moldes que estes betões apresentam. Neste trabalho dimensionam-se 5 composições de betão autocompactável coloridos utilizando agregados britados vulcânicos correntemente utilizados no fabrico de betão na Região Autónoma da Madeira. Para o dimensionamento dos betões, realizaram-se vários estudos, em pastas, de seguida em argamassas e finalmente em betões. Com o estudo das pastas obteve-se as primeiras informações sobre o efeito da introdução de pigmentos. Depois, estudaram-se argamassas que continham o mesmo volume de areia mas incorporando pastas com diferentes cores. Identificaram-se as pastas que conduziam a argamassas com propriedades reológicas semelhantes às da argamassa da composição considerada como referência. Nos betões, começou-se por produzir uma composição de betão autocompactável de referência, que foi caracterizada em termos de autocompactabilidade pelos ensaios de espalhamento, caixa L, funil V e segregação. Finalmente, realizaram-se composições de betões coloridos cujos conteúdos em agregados e finos eram os mesmos que os da composição de referência mas substituindo parcialmente o volume de água por igual volume de pigmentos. Os resultados mostraram que a incorporação de pigmentos conduz a uma ligeira perda de trabalhabilidade, sendo essa perda de trabalhabilidade facilmente compensada com um aumento da dosagem de superplastificante.

Palavras-chave: Betão autocompactável, agregados britados vulcânicos, betão colorido

¹ Centro de Ciências Exatas e da Engenharia, Universidade da Madeira, Campus Universitário da Penteada, 9020-105 Funchal, Portugal. a2050206@max.uma.pt

² Centro de Ciências Exatas e da Engenharia, Universidade da Madeira, Campus Universitário da Penteada, 9020-105 Funchal, Portugal. a2002307@max.uma.pt

³ Cimentos Madeira Lda. Estrada Monumental, 433 9000-236 Funchal, Portugal. miguelguimaraes@sapo.pt

⁴ LABEST, Laboratório da Tecnologia do Betão e do Comportamento Estrutural, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Departamento de Engenharia Civil, Porto, Portugal. lino.maia@fe.up.pt

⁵ Centro de Ciências Exatas e da Engenharia, Universidade da Madeira, Campus Universitário da Penteada, 9020-105 Funchal, Portugal. linomaia@uma.pt

1. INTRODUÇÃO E ENQUADRAMENTO

O betão autocompactável (BAC) é um betão que não necessita de vibração na sua colocação. É capaz de fluir sobre o seu peso próprio, preenchendo de forma completa o molde em que é depositado, mesmo na presença de vários obstáculos [1, 2]. Contudo, apesar das excelentes propriedades dos BACs no estado fresco, até ao presente, não existe conhecimento sobre a utilização de BAC na Região Autónoma da Madeira (RAM).

Um dos principais problemas associados ao betão fabricado na RAM reside, provavelmente, na indisponibilidade de agregados naturais rolados. Importa referir que os agregados utilizados na produção de betão na RAM são de origem vulcânica. Note-se que, à exceção de algumas empresas que utilizam a areia do mar como areia fina, todos os agregados utilizados são britados. Os agregados britados oferecem geralmente ao betão melhores propriedades mecânicas, mas possuem o inconveniente de piorarem a trabalhabilidade do betão no seu estado fresco [3]. Como um BAC necessita de boa trabalhabilidade, caracterizada essencialmente por 4 propriedades: (i) capacidade de passagem, (ii) viscosidade, (iii) fluidez e capacidade de preenchimento e (iv) resistência à segregação [4-6], compreende-se as dificuldades na aposta de produção de BAC na RAM.

À indisponibilidade de agregados naturais na RAM acresce ainda a dificuldade do acesso com preços competitivos a materiais finos (fíler calcário, metacaulino, sílica de fumo, escórias de alto forno, cinzas volantes, etc.) considerados como constituintes essenciais na produção de BAC [3]. Assim, compreende-se que até ao início deste trabalho não existissem na RAM os equipamentos necessários [7-10] para verificar a autocompactabilidade de uma composição de BAC.

Contudo, a partir de Outubro de 2011, a possibilidade de utilização de cinzas volantes na produção de betão passou a ser uma alternativa na RAM. Visto que as cinzas volantes conduzem a betões com maior trabalhabilidade [3, 11], concluiu-se que seria oportuno investigar a possibilidade de produção de BAC com os materiais disponíveis na RAM (nomeadamente, utilizando agregados somente britados de origem vulcânica).

Assim, o presente trabalho enquadra-se na parte inicial de um projeto cujo objetivo é o desenvolvimento de ‘know-how’ e metodologias para auxiliar o dimensionamento de composições de BAC produzidos exclusivamente com os materiais disponíveis na RAM. Por outro lado, está atualmente a decorrer na RAM um projeto cujo objetivo é a realização de uma parede através da aplicação de diversos betões coloridos produzidos com os materiais correntemente disponíveis na RAM [12]. Visto tratar-se de uma parede arquitetónica de betão à vista onde se pretende um acabamento superficial de elevada qualidade, julgou-se apropriado considerar a sua execução com BACs. Assim, o presente trabalho aborda conjuntamente as dificuldades do dimensionamento de BAC na RAM e a problemática da incorporação de pigmentos líquidos na composição para a produção de BACs coloridos.

O presente documento reporta os resultados mais importantes dos trabalhos experimentais efetuados no Laboratório Cimentos Madeira. Foram efetuados ensaios em pastas, argamassas e betões de modo a aferir o efeito de alguns dos materiais constituintes do BAC, com especial destaque para as dosagens de superplastificante e efeito dos pigmentos na composição.

2. TRABALHO EXPERIMENTAL

2.1. Materiais e composições

Embora na RAM estejam correntemente disponíveis os cimentos CEM II/A-L 42,5R e CEM II/B-L 32,5N [13] (massas volúmicas de 3100 e 3000 kg/m³, respetivamente) neste trabalho utilizou-se somente o CEM II/A-L 42,5R. O cimento era proveniente da fábrica da Secil-Outão. Para além do cimento, devido à (esperada) necessidade de materiais finos [2, 3] para a obtenção da

autocompactabilidade também se utilizaram cinzas volantes como material ligante. Procedeu-se à avaliação em laboratório da massa volúmica das cinzas volantes, tendo-se obtido o valor de 2360 kg/m³.

Na produção de pastas e de argamassas foi utilizada água destilada, contudo na produção de betões foi utilizada água da rede de abastecimento. Foi utilizado o superplastificante Glenium Sky 548.

Todos os pigmentos utilizados nos ensaios deste trabalho para coloração de pastas, argamassas e betões foram fornecidos pela empresa BASF. Os pigmentos são denominados ‘Rheocolor’ e são produzidos à base de óxidos inorgânicos, na forma líquida (não foi disponibilizada qualquer outra informação sobre os pigmentos).

Foram utilizados dois tipos de agregados finos nas composições de argamassas e betões. Ambos os tipos de agregados finos correspondiam a areias britadas de origem vulcânica, sendo que a areia mais fina era denominada por ‘Areia 0/2’ e a areia de granulometria mais grossa era denominada ‘Areia 0/4’. O Quadro 1 resume o conjunto de ensaios normalizados efetuados para a caracterização dos agregados finos e na Figura 1 apresentam-se as respetivas curvas granulométricas.

Quadro 1. Caracterização dos agregados finos

Designação	Métodos de ensaio	Areia 0/2	Areia 0/4
Dimensão nominal (d/D) [mm]	NP EN 933-1 [14]	0/2	0/4
Módulo de finura		1,85	4,43
Massa volúmica (I/Se/Sa) [Kg/m ³]	NP EN 1097-6 [15]	(3060/2830/2900)	(2990/2760/2840)
Baridade não compactada [Kg/m ³]	NP EN 1097-3 [16]	1580	1580
Absorção de água [%]	NP EN 1097-6 [15]	2,7±1	2,8±1

Estavam disponíveis 3 tipos de agregados grossos (todos britados de origem vulcânica): (i) ‘Brita 4/10’, (ii) ‘Brita 8/16’ e (iii) ‘Brita 11/22’. Na Figura 1 apresentam-se as respetivas curvas granulométricas e no Quadro 2 apresentam-se as características e os respetivos valores de caracterização para o conjunto dos agregados grossos.

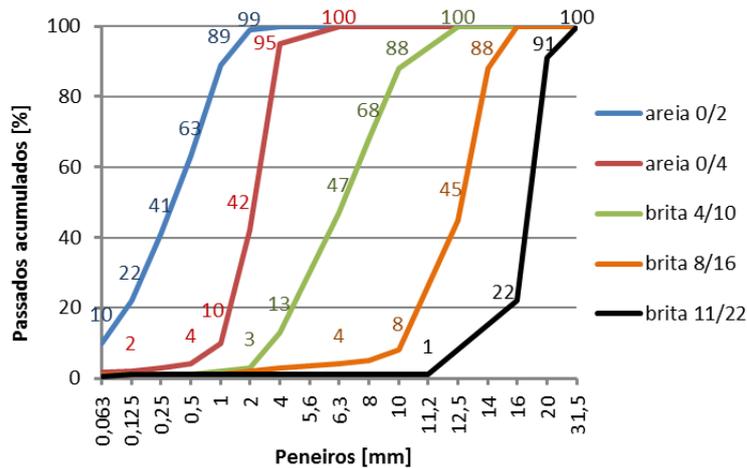


Figura 1. Curva granulométrica de todos os agregados disponíveis

Quadro 2. Caracterização do conjunto de agregados grossos

Designação	Método de ensaio	Brita 4/10	Brita 8/16	Brita 11/22
Dimensão nominal (d/D)	NP EN 933-1	4/10	8/16	11/22
Massa volúmica (I/Se/Sa) [Kg/m ³]	NP EN 1097-6	(3030/2820/2890)	(3020/2810/2880)	(3020/2840/2900)
Absorção de água [%]	NP EN 1097-6	2,7±1	2,6±1	2,1±1
Baridade não compactada [Kg/m ³]	NP EN 1097-3	1455	1438	1548

Refira-se que todos os agregados (areias e britas) eram provenientes da pedreira da empresa ‘Brimade – Sociedade de Britas da Madeira, S.A.’ localizada na Fundoa, na RAM. Atendendo que a ‘Brita 11/22’ possuía uma granulometria muito elevada para a produção de BAC [2, 3, 17], optou-se por não utilizar a ‘Brita 11/22’ neste trabalho.

2.2. Equipamentos para avaliar o estado fresco

Para avaliar o espalhamento em pastas utilizou-se o mini-cone de pastas (dimensões interiores: 19 mm no diâmetro superior; 38 mm de diâmetro inferior; 57 mm de altura). Utilizou-se o cone de Marsh para avaliar a viscosidade das pastas.

Para aferir a reologia das argamassas estudou-se a capacidade de espalhamento e a viscosidade de diversas argamassas. Estes ensaios foram realizados através da utilização do cone e do funil V para argamassas descritos na Ref. [1].

Para avaliar as propriedades autocompactáveis dos betões realizaram-se os ensaios do espalhamento, do funil V, da caixa L e da segregação de acordo com as normas para o BAC [7-10].

Importa referir que os equipamentos usados e procedimentos de amassaduras em pastas e argamassas, embora ligeiramente adaptados para os materiais utilizados, foram semelhantes aos procedimentos descritos na Norma NP EN 196-1: 2000 [18]. Para as amassaduras de betão foi usada uma betoneira com capacidade para 150 litros e aplicou-se o seguinte procedimento: i) Misturam-se durante 2 min os agregados finos e grossos com 25% do total de água; ii) Introduzem-se os ligantes, seguindo-se a restante água e após 2 minutos o superplastificante; iii) Introduz-se o pigmento (caso existisse) 4 minutos após o superplastificante; iv) Deixam-se misturar todos os materiais constituintes por mais 2 minutos; v) Realizam-se os ensaios de autocompactabilidade.

2.3. Formulação das composições e ensaios realizados

Como o objetivo final neste trabalho era a produção de BACs, o dimensionamento das composições de betão foi realizado através das razões volumétricas entre os materiais constituintes que mais influenciam as propriedades do BAC [1-3, 17]: volume de água / volume de finos (V_w/V_p); volume de areia / volume de argamassa (V_s/V_m); volume de cinzas volantes / volume de finos (V_{fa}/V_p); volume de agregado grosso / volume ‘limite’ de agregado grosso ($V_g/V_{g.lim}$). Atendendo que se estava a trabalhar com razões volumétricas nos parâmetros atrás referidos, decidiu-se utilizar também uma razão volumétrica para os restantes parâmetros: (i) para o controlo da dosagem de superplastificante – volume de superplastificante / volume de finos (V_{Sp}/V_p); (ii) para o controlo da dosagem de pigmento – volume de pigmento / volume de finos ($V_{pigmento}/V_p$); (iii) para a razão entre as areias – volume de ‘Areia 0/2’ / volume de areia; e (iv) para a razão entre as britas – volume de ‘Brita 4/10’ / volume de brita.

Como neste trabalho se estavam a utilizar materiais comerciais, ao invés do sugerido na literatura [1, 2, 17], apenas foram considerados como materiais finos o cimento e as cinzas volantes. Assim, a parte dos agregados cuja granulometria era inferior a 0,125 mm foi considerada como sendo agregado.

Atendendo que os pigmentos eram designados de ‘pigmentos líquidos’ e visto que se desconhecia o teor em sólidos quer dos pigmentos quer do superplastificante (comercializado no estado líquido), importa referir que a introdução destes constituintes foi feita sempre (pastas, argamassas ou betões) através da substituição de igual volume de água. Assim, o volume dos materiais líquidos que se introduziam na composição era mantido sempre igual ao da respetiva composição de referência.

Com os parâmetros atrás definidos de acordo com a literatura do BAC [1-3, 17], com o auxílio da literatura [1-6, 11, 17, 19] procedeu-se ao dimensionamento (inicialmente por tentativa erro, posteriormente como base nos resultados que se estavam a adquirir) de algumas composições de pastas, argamassas e betões.

2.3.1. Pastas

Ao nível das pastas foram realizados apenas dois tipos de testes: (i) Espalhamento do mini-cone de pastas onde era determinado o diâmetro de espalhamento (D_{esp}) e posteriormente calculada a área relativa de espalhamento ($G_p = \text{Área de espalhamento} / \text{Área inferior da base do mini-cone}$); (ii) Tempo de escoamento no cone de Marsh para aferir a viscosidade das pastas.

Iniciou-se o estudo em pastas com base nas Refs [5, 6]. Assim, ao nível das pastas, foram realizados diferentes ensaios para a determinação do V_w/V_p de modo a obter uma deformação nula (β_p) no ensaio do cone de espalhamento de pastas (consultar a Ref. [6] para ver como se calcula o β_p). Foram analisados 3 casos distintos: i) Pastas com 0% de cinzas volantes em relação ao ligante ($V_{fa}/V_p=0,00$); ii) Pastas com 15% de cinzas volantes ($V_{fa}/V_p=0,15$); iii) Pastas com 30% de cinzas volantes ($V_{fa}/V_p=0,30$). Posteriormente, iniciaram-se os primeiros estudos com os pigmentos: realizou-se um estudo também para a determinação do β_p mas para pastas que incorporavam pigmentos com o objetivo de perceber qual o efeito dos pigmentos na deformabilidade das pastas. Avaliou-se, também, a influência que os pigmentos introduziam na área de espalhamento relativa (G_p).

Ainda ao nível das pastas foi estudada a afinidade do superplastificante para com os materiais finos que se estavam a utilizar [6]. Para a realização deste estudo, realizaram-se duas pastas de referência (uma com $V_{fa}/V_p=0$ e outra com $V_{fa}/V_p=0,30$) e estudou-se o efeito da dosagem de superplastificante no ensaio do G_p e no tempo de escoamento do cone de Marsh.

2.3.2. Argamassas

Ao nível das argamassas foram realizados os ensaios do espalhamento do cone e do funil V para argamassas (ver Ref. [1]). Para além disso realizaram-se os primeiros ensaios com vista a conhecer as propriedades mecânicas – resistência à flexão e resistência à compressão [18].

Adotou-se uma metodologia de “tentativa-erro” para obter uma argamassa que tivesse propriedades autocompactáveis (de acordo com Ref. [17]), ou seja, diâmetro de espalhamento próximo de 250 mm e tempo de escoamento no funil próximo de 10 segundos. Após um elevado número de tentativas, obteve-se uma argamassa que foi definida como sendo a argamassa de referência. Os parâmetros da argamassa de referência eram os seguintes: (i) $V_s/V_m=0.50$, (ii) o volume de areia era constituído por 60% de ‘Areia 0/2’ e 40% de ‘Areia 0/4’; (iii) $V_w/V_p=0.9$; (iv) $V_{fa}/V_p=30\%$; (v) $V_{Sp}/V_p=1,7\%$.

Posteriormente, tendo em conta os resultados previamente obtidos nas pastas e utilizando a metodologia de tentativa-erro, determinou-se a correção necessária que se tinha de realizar ao nível da dosagem de superplastificante para que ao introduzir um determinado pigmento ($V_{pigmento}/V_p=10\%$) na argamassa o estado fresco permanecesse semelhante ao da argamassa de referência.

Importa referir que foram realizadas mais de 80 amassaduras de argamassas. Tal deve-se provavelmente ao facto de se ter adotado uma metodologia de tentativa erro. Para além de ser pouco científica, neste caso esta metodologia obrigou à realização de um elevado número de amassaduras cujos resultados foram rejeitados. Estando ciente da existência de outras metodologias para o dimensionamento de composições de BAC, nomeadamente através de métodos estatísticos como os planos fatoriais [4, 19], provavelmente o número de amassaduras teria sido inferior e o conhecimento adquirido superior. Assim, considera-se vital a aplicação de outra metodologia em trabalhos futuros.

2.3.3. Betões

Ao nível dos betões, realizaram-se alguns ensaios pelo método de tentativa-erro. Para esses ensaios definiu-se que a argamassa da composição de referência deveria ter os mesmos parâmetros que a argamassa de referência (determinada da Secção 2.3.2), com exceção da dosagem de superplastificante. Assim, realizaram-se algumas composições por tentativa erro e definiu-se como composição de referência uma composição que tinha os seguintes parâmetros: $V_w/V_p=0.90$; $V_{fa}/V_p=0.30$; $V_{Sp}/V_p=2,5\%$; $V_s/V_m=0.50$; volume da ‘Areia 0/2’ / volume de areia = 60%; $V_{pig}/V_p=0.0\%$; $V_g/V_{g,lim}=0.50$; volume da ‘Brita 4/10’ / volume de brita = 70%; o volume de vazios foi considerado 4.0%.

Os parâmetros referidos conduziam a uma composição com as seguintes dosagens por m³: cimento = 412 kg, cinzas volantes = 134 kg, água efetiva = 169 kg, superplastificante = 4.8 kg, Areia 0/2 = 625 kg, Areia 0/4 = 408 kg, Brita 4/10 = 488 kg e Brita 8/16 = 208 kg. Refira-se que o rácio água / cimento e água / finos (em massa) eram de 0.41 e 0.31, respetivamente.

Posteriormente, foram produzidas composições semelhantes à composição de referência incorporando pigmentos – $V_{\text{pigmento}}/V_p=10\%$, ou seja, incorporando 19.0 litros/m³ de pigmentos (que foram introduzidos através da substituição de 19.0 litros de água). Como a substituição parcial da água por pigmentos reduzia substancialmente as propriedades autocompactáveis da composição, corrigiu-se a dosagem de superplastificante de acordo com as necessidades introduzidas por cada pigmento – com base nos resultados obtidos ao nível das argamassas.

Assim, produziram-se seis composições de betão. Após a mistura realizou-se o ensaio do espalhamento, seguido do Funil V, da Caixa L e da segregação. Após os ensaios para avaliar a autocompactabilidade moldaram-se provetes cúbicos com 150 mm de aresta para a realização do ensaio da resistência à compressão aos 7 e aos 28 dias.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Pastas

3.1.1. Determinação do valor água/ligante, β_p

Como neste trabalho os materiais disponíveis para a produção dos BACs eram substancialmente diferentes dos materiais referidos na literatura, iniciou-se o trabalho experimental com ensaios realizados ao nível das pastas para avaliarmos alguns parâmetros isoladamente. Assim, ao nível das pastas começou-se por avaliar o efeito da substituição parcial de cimento por igual volume de cinzas volantes (V_{fa}/V_p) no espalhamento da pasta.

Pela análise da Figura 2 verifica-se que à medida que se aumenta a percentagem de substituição do cimento por cinzas volantes obtêm-se maiores áreas de espalhamento relativa (parâmetro 'Gp') para a mesma quantidade de água na composição. Esta tendência compreende-se pelo facto do tamanho reduzido, da forma esférica e a lisura da superfície das partículas das cinzas volantes proporcionarem baixos coeficientes de atrito entre as partículas constituintes da pasta, facilitando a deslocação dessas mesmas partículas – melhorando a deformabilidade da pasta.

No sentido de se obter as primeiras indicações sobre o comportamento dos pigmentos utilizados, realizaram-se pastas com um $V_{fa}/V_p=0,30$ que incorporavam diferentes pigmentos com uma dosagem de $V_{\text{pigmento}}/V_p=5\%$ (importa lembrar que o volume de pigmento foi colocado por substituição de igual volume de água). Na Figura 3 apresentam-se os valores de Gp obtidos. Comparando as composições que incorporavam pigmentos com a composição de referência observa-se um efeito notável de perda de capacidade de espalhamentos por incorporação de pigmentos. Mais se nota que o pigmento laranja aparenta ser o que conduz a uma maior perda de deformabilidade.

De seguida, foi avaliado o efeito dos pigmentos na área de espalhamento relativa (Gp) em relação a uma pasta de referência com $V_w/V_p=1,40$ e $V_{fa}/V_p=0,30$. A Figura 4 resume os resultados obtidos para dosagens de pigmentos $V_{\text{pigmento}}/V_p=10\%$.

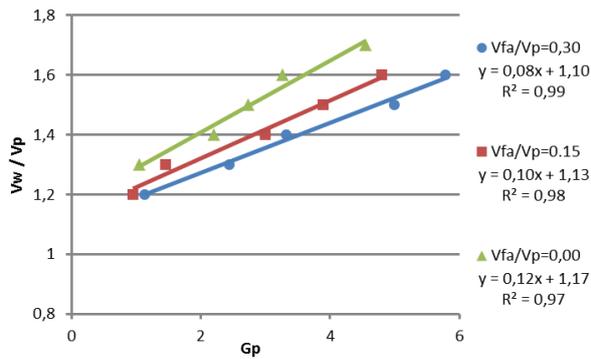


Figura 2. Determinação do β_p em pastas $V_{fa}/V_p = 0; 0,15$ e $0,30$

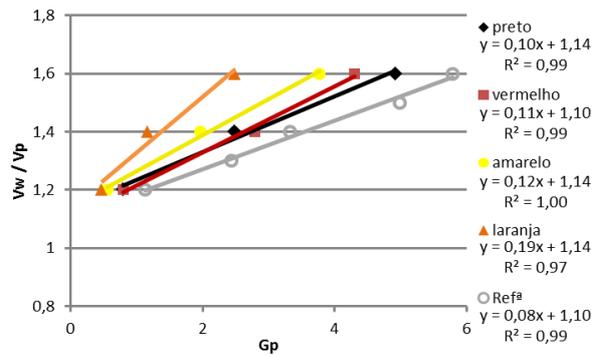


Figura 3. Determinação do β_p para pastas com diferentes pigmentos $V_{fa}/V_p = 0,30$; $V_{pigmento}/V_p = 5\%$.

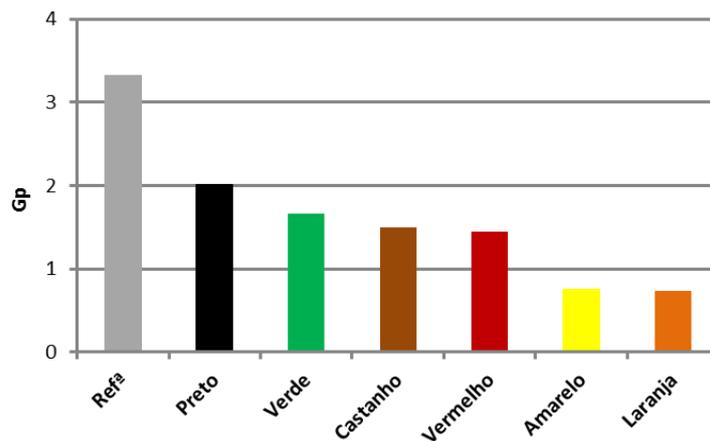


Figura 4. Influência do pigmento no G_p : $V_{pigmento}/V_p=10\%$, $V_w/V_p=1,40$, $V_{fa}/V_p=0,30$

Tal como se pode verificar na Figura 4, todos os pigmentos diminuíram a área de espalhamento, ou seja, reduziram a deformabilidade da pasta. Mais se observa que, os pigmentos amarelo e laranja produzem um efeito mais drástico. Nota: fora do âmbito deste trabalho foram realizados outros ensaios: com 5% de pigmento; para pastas sem cinzas, com cimento CEM II/B-L 32,5N; e ensaios com cimento branco. Verificou-se a tendência apresentada na Figura 4 para todos os casos estudados. Assim, tornou-se evidente que a introdução de pigmentos numa composição por substituição de igual volume de água conduzia ao aumento da dosagem de superplastificante para que fossem repostas as propriedades do estado fresco.

3.1.2. Afinidade do superplastificante (S_p)

Os superplastificantes são constituintes fundamentais dos BACs. Nesse sentido, tornava-se vital compreender a afinidade do superplastificante com os materiais a utilizar. Assim, ao nível das pastas, foram efetuados ensaios com recurso ao cone de Marsh, de modo a avaliar o efeito do superplastificante na viscosidade (Figura 5) e no espalhamento (Figura 6) das pastas sem pigmentos. Analisando a Figura 5 é possível identificar a dosagem de saturação do superplastificante utilizado. Refira-se que os resultados estão de acordo com os observados na Figura 5 e com a Figura 2, ou seja, confirma-se que as cinzas volantes possibilitam maiores deformabilidades. Refira-se que ao nível da deformabilidade não se consegue identificar uma dosagem de saturação. Observa-se na Figura 6 que o aumento do conteúdo de superplastificante conduz a um aumento da área de espalhamento relativa (exceto para dosagens muito elevadas, quando já é notável elevada segregação).

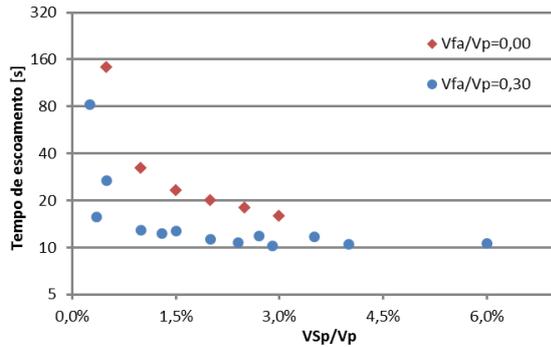


Figura 5. Efeito da dosagem de superplastificante no tempo de escoamento do cone de Marsh

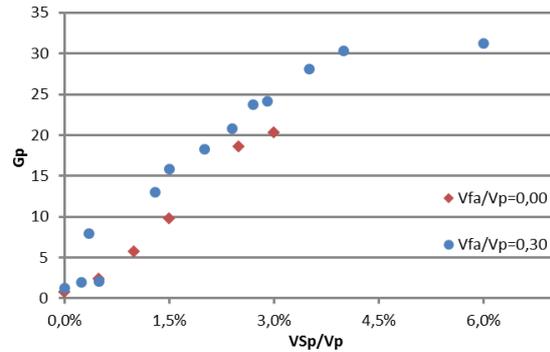


Figura 6. Efeito da dosagem de superplastificante na área de espalhamento relativa

3.2. Argamassas

Ao nível das argamassas, após definida a composição de referência, calculou-se o acréscimo de superplastificante necessário para adicionar nas argamassas que incorporavam pigmentos, de modo a se obterem propriedades reológicas semelhantes às da argamassa de referência. A Figura 7 apresenta graficamente as dosagens de superplastificante (VSp/Vp) necessárias. Analisando os diversos valores, verifica-se que os pigmentos amarelo e laranja, necessitam relativamente à amassadura de referência de um acréscimo de 70% e 90% de superplastificante, respetivamente, para atingirem as mesmas propriedades reológicas.

Para todas as argamassas apresentadas na Figura 7 realizaram-se ensaios de resistência à flexão e à compressão aos 7 dias (ver resultados dos ensaios à compressão na Figura 8). Pelos resultados da Figura 8 observa-se que todas as argamassas tinham aos 7 dias uma resistência à compressão superior a 50 MPa. Assim desde logo se verificou que para a maior parte das aplicações correntes estas composições deveriam conduzir a betões sobredimensionados ao nível da classe de resistência. Para além disso, pela Figura 8 conclui-se que os pigmentos não diminuem a resistência à compressão. De facto, observa-se um ligeiro aumento da resistência à compressão para a maioria dos pigmentos. Este efeito observado, deve-se possivelmente ao facto da introdução de pigmentos ter sido feita com substituição de igual volume de água, ou seja, como os pigmentos não devem ser 100% material líquido, deverá estar a ocorrer uma diminuição da água efetiva.,

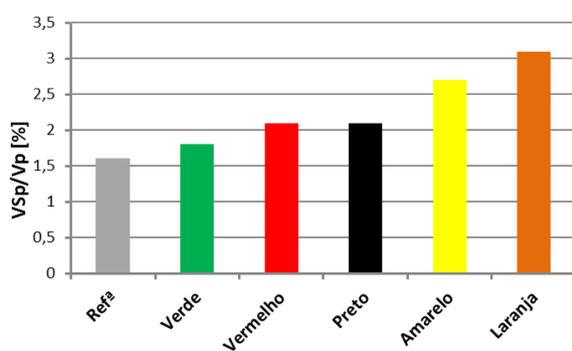


Figura 7. Dosagem de superplastificante para a obtenção de argamassas coloridas com propriedades autocompactáveis

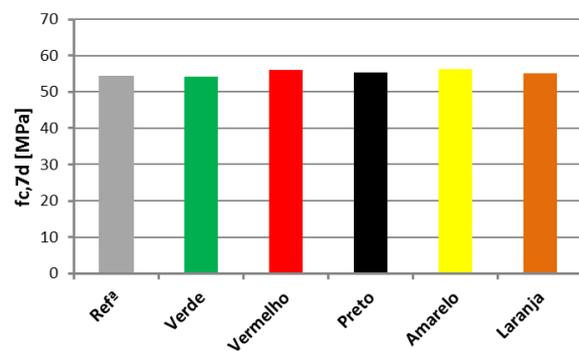


Figura 8. Ensaios de compressão das argamassas coloridas com propriedades autocompactáveis

3.3. Betões

Com os resultados obtidos anteriormente nas pastas e nas argamassas, após definida a composição de betão referência apresentada na Secção 2.3.3., com poucas amassaduras foi possível rapidamente determinar as dosagens de superplastificantes que deveriam ser utilizadas nos betões coloridos (com $V_{pigmento}/V_p=10\%$) para que fosse atingida a autocompactabilidade. Assim, o parâmetro VSp/Vp

que era de 2,5% no BAC de referência passou a ser de: 3,9% para o pigmento verde, 3,5% para os pigmentos vermelho e preto, e 4,0 % para os pigmentos amarelo e laranja.

Nas Figs. 9 a 12 apresentam-se os resultados obtidos para os ensaios da autocompactabilidade (nota: por esquecimento não foram registados os valores da caixa L para o betão laranja). Analisando os resultados, verifica-se que os valores obtidos são todos aceitáveis, o que permite atribuir a designação de BAC aos betões produzidos. Importa contudo referir que se observou uma perda de trabalhabilidade relativamente rápida – cerca de 15 minutos após o término da amassadura já se começavam a encontrar dificuldades para moldar provetes sem qualquer vibração.

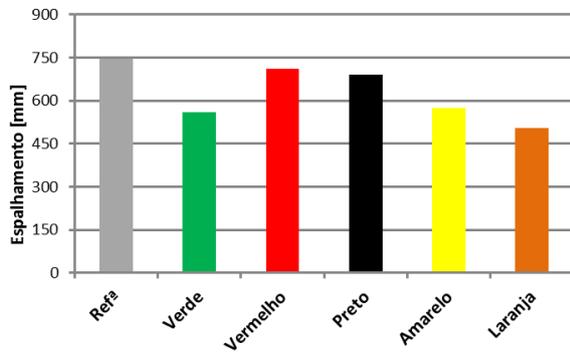


Figura 9. Diâmetros de espalhamento

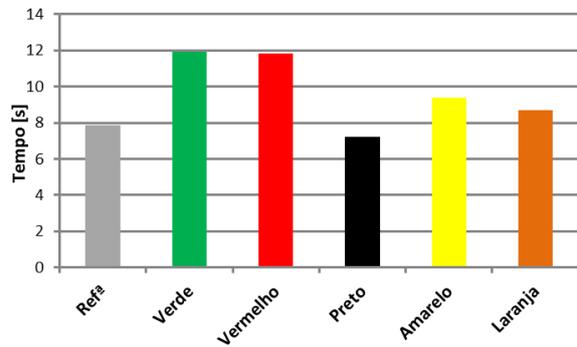


Figura 10. Tempos de escoamento no Funil V

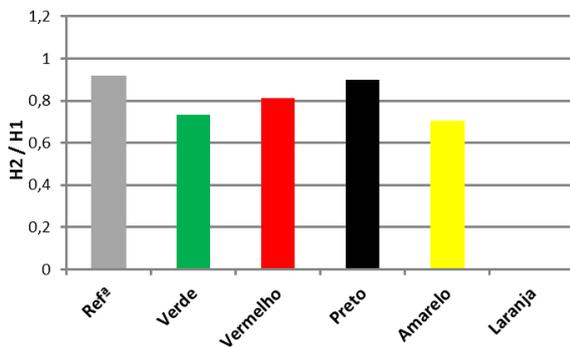


Figura 11. Rácio da Caixa L

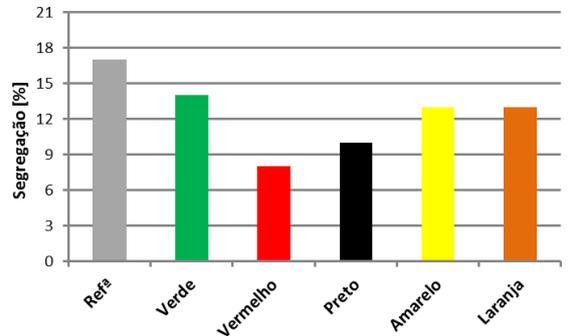


Figura 12. Segregação

Finalmente, no que concerne à resistência à compressão, importa referir que à semelhança do que se observou nas argamassas, os betões coloridos tinham uma resistência à compressão ligeiramente superior à do betão de referência.

4. NOTAS FINAIS

Neste trabalho investigaram-se questões associadas ao dimensionamento de BACs coloridos produzidos a partir dos materiais disponíveis na Região Autónoma da Madeira. Dos resultados dos ensaios realizados em pastas, argamassas e BACs podem ser retiradas as seguintes conclusões:

1. Foi possível produzir BACs utilizando os materiais disponíveis na Região Autónoma da Madeira (britas e areias britadas de origem vulcânica, ausência de filer calcário, etc.).
2. Foi possível a produção de BACs coloridos através da incorporação de pigmentos líquidos. Contudo, a incorporação de pigmentos líquidos realizada através da substituição de igual volume de água reduziu substancialmente as propriedades autocompactáveis (tal redução dependeu do tipo (cor) de pigmento), mas aumentou ligeiramente a resistência à compressão.

Finalmente, conclui-se que é necessário recorrer a processos de otimização das composições obtidas, no sentido de as tornar mais económicas – por exemplo, utilizando o cimento CEM II/B-L 32.5 N.

AGRADECIMENTOS

Agradecimento às empresas do ‘Grupo Cimentos Madeira’, de um modo especial ao ‘Laboratório Cimentos Madeira’, pela colaboração e disponibilidade na cedência dos recursos necessários, assim como pelo financiamento prestado ao primeiro e segundo autor para a participação no Encontro Nacional de Betão Estrutural – BE2012.

REFERÊNCIAS

- [1] The european guidelines for self compacting concrete, in, EFNARC, 2005.
- [2] RILEM TC 174-SCC, Self-compacting concrete State-of-the-Art report, RILEM Publications, Cachan, 2001.
- [3] J.E. Wallevik, Rheology of Particle Suspensions: Fresh Concrete, Mortar and Cement Paste with Various Types of Lignosulfonates, in: F.o.E.S.a.T. Norwegian University of Science and Technology (Ed.), Norwegian University of Science and Technology, Faculty of Engineering Science and Technology, 2003, pp. 397.
- [4] S. Nunes, L. Maia, H. Figueiras, J.S. Coutinho, J. Figueiras, Optimização de um betão auto-compactável branco de elevada durabilidade, in: C.O.d. BE2010 (Ed.) Actas do Encontro Nacional Betão Estrutural 2010, Gráfica Sobralense, Lisboa, Portugal, 2010, pp. 77 (Ed. CD-ROM: 10 pag.).
- [5] H.I.M. Figueiras, Estudo e desenvolvimento experimental de composições de betão auto-compactável aferição das suas características mecânicas e durabilidade, [s. n.], Porto, 2006.
- [6] S.C.B. Nunes, Betão auto-compactável Tecnologia e propriedades, FEUP, Porto, 2001.
- [7] EN 12350-8:2010 – Testing fresh concrete – Part 8: Self-compacting concrete – Slump-flow test, 2010.
- [8] EN 12350-9:2010 – Testing fresh concrete – Part 9: Self-compacting concrete – V-funnel test 2010.
- [9] EN 12350-9:2010 – Testing fresh concrete – Part 9: Self-compacting concrete – V-funnel test in: E.c.f. standardization (Ed.), 2010.
- [10] EN 12350-10:2010 – Testing fresh concrete – Part 10: Self-compacting concrete – L box test, in: E.c.f. standardization (Ed.), 2010.
- [11] N. Bouzoubaâ, M. Lachemi, Self-compacting concrete incorporating high volumes of class F fly ash: Preliminary results, Cement and Concrete Research, 31 (2001) 413-420.
- [12] J. Silva, C. Gomes, M. Guimarães, L. Maia, Betão Autocompactável de elevado efeito estético, in: Comissão Organizadora do BE2012 (Ed.) Actas do Encontro Nacional Betão Estrutural 2012, Porto, Portugal, 2012, pp. Ed. CD-ROM: 10 pag.
- [13] EN 197-1:2000 - Cement - Part 1: Composition, specifications and conformity criteria for common cements, 2000.
- [14] NP EN 933-1:2000 - Ensaio das propriedades geométricas dos agregados : NP EN 933-1 2000. parte 1, análise granulométrica in, 2000.
- [15] L. Maia, Design Based Concrete To Enhance Early Age Properties, in: FEUP, University of Porto, 2010, pp. 149.
- [16] NP EN 1097-3 2002 - Ensaio das propriedades mecânicas e físicas dos agregados : NP EN 1097-3 2002. Parte 3, determinação da baridade e do volume de vazios, in, 2002.
- [17] H.H. Okamura, Self-compacting high-performance concrete, Concrete international, 19 (1997) 50-54.
- [18] NP EN 196-1: 2000 – Métodos de ensaio de cimento. Parte 1: Determinação das resistências mecânicas, 2000.
- [19] S. Nunes, Performance-based design of self-compacting concrete (SCC) a contribution to enhance SCC mixtures robustness, Porto, 2008.

Dimensionamento de Betões Autocompactáveis Coloridos com Agregados Britados Vulcânicos

Celestino Gomes
Universidade da Madeira
a2050206@max.uma.pt

Joana Silva
Universidade da Madeira
a2002307@max.uma.pt

Miguel Guimarães
Laboratório Cimentos Madeira
miguelguimaraes@sapo.pt

Lino Maia
Univ. Madeira ; LABEST/FEUP
linomaia@uma.pt

INTRODUÇÃO

A incorporação de pigmentos na composição do betão é uma técnica aplicada como alternativa arquitetónica à pintura ou colocação de revestimentos em edifícios. Tratando-se de um 'betão à vista' importa considerar cuidados adicionais na sua aplicação para assegurar a homogeneidade e qualidade do acabamento superficial. Utilizando betões autocompactáveis, não só a homogeneidade do material é aumentada devido à eliminação da compactação, como também o acabamento superficial é melhorado devido à maior capacidade de preenchimento dos moldes. Neste trabalho dimensionaram-se 5 composições de BACs coloridos utilizando agregados britados vulcânicos correntemente utilizados no fabrico de betão na Região Autónoma da Madeira (dada a indisponibilidade de filer calcário, utilizaram-se cinzas volantes). Estes betões coloridos possuíam os mesmos parâmetros chave de uma composição de BAC referência sem pigmento, com exceção da quantidade de superplastificante – foi necessário aumentar nos betões coloridos para se obterem valores idênticos nas propriedades do estado fresco.

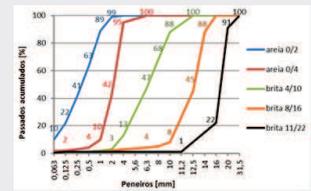
MATERIAIS

Finos

CEM II/A-L 42,5R
Cinzas volantes

Adjuvantes

Superplastificantes
Pigmentos Líquidos

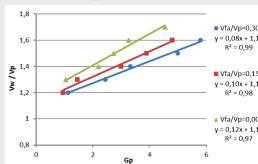


Agregados disponíveis na RAM

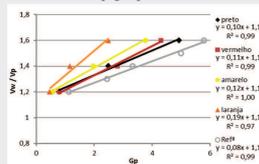
RESULTADOS

Pastas

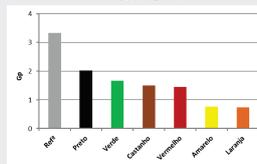
Determinação do β_p e do Ep em pastas com $V_{fa}/V_p=0,00; 0,15$ e $0,30$



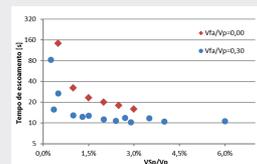
Determinação do β_p para pastas com $V_{fa}/V_p=0,30$ e $V_{pig}/V_p = 0,05$



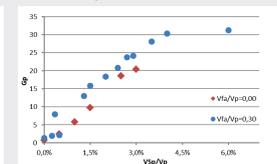
Influência do pigmento no Gp : $V_w/V_p=1,40$; $V_{fa}/V_p=0,30$ e $V_{pig}/V_p=0,10$



Efeito do superplastificante na viscosidade de pastas com e sem adição de cinzas volantes



Efeito do superplastificante na fluidez de pastas com e sem adição de cinzas volantes



Betões

Betão de referência:

- $V_w/V_p=0,90$
- $V_{fa}/V_p=0,30$
- $V_{Sp}/V_p=2,5\%$
- $V_{pig}/V_p=0,00$
- $V_s/V_m=0,50$
- $V_{s1}/V_{s0}=0,60$
- $V_{s2}/V_{s0}=0,40$

- $V_g/V_{g,lim}=0,50$
- $V_{b1}/V_b=0,70$
- $V_{b2}/V_b=0,30$
- $V_{vazios}=4\%$

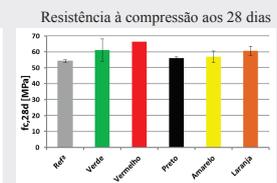
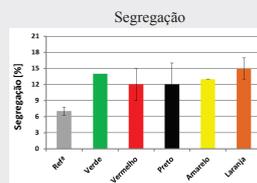
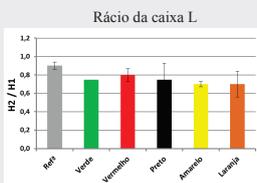
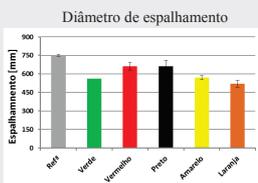
Betão colorido*:

- $V_{pig}/V_p = 10\%$
- $V_{Sp}/V_p = 3,9\%$ pig. verde
- $3,5\%$ pig. vermelho e preto
- $4,0\%$ pig. amarelo e laranja

Constituição em massa de um BAC de referência, num m^3 de betão

	Cimento	Cinzas volantes	Água efetiva	Adjuvante	Areia 1	Areia 2	Pigmento	Brita 1	Brita 2
$1m^3$	412	134	169	4,8	625	408	0	488	208
[kg]									

* A introdução de pigmento líquido foi efetuada através da substituição de igual volume de água da amassadura.



CONSIDERAÇÕES FINAIS

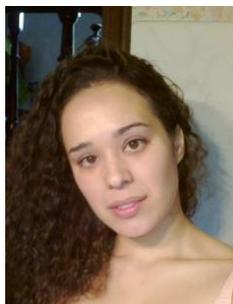
Pastas e argamassas:

- A introdução de cinzas volantes numa pasta conduziu a um aumento substancial de trabalhabilidade no estado fresco;
- Com a adição de superplastificante em doses controladas obtiveram-se ganhos significativos nalgumas das propriedades reológicas. Quando testadas, as sobredosagens de superplastificante não melhoraram a deformabilidade mas afetaram negativamente resistência à segregação.

Betões:

- Produziram-se BACs utilizando os materiais disponíveis na Região Autónoma da Madeira (agregados grossos e areias britadas de origem vulcânica, cinzas volantes, etc.);
- Foi exequível a produção de BACs coloridos através da incorporação de pigmentos líquidos. Contudo, a incorporação de pigmentos líquidos realizada através da substituição de igual volume de água reduziu substancialmente as propriedades autocompactáveis (tal redução dependeu do tipo (cor) de pigmento), embora aumentasse ligeiramente a resistência à compressão.

Betão Autocompactável de elevado efeito estético



Joana Silva¹



Celestino Gomes²



Miguel Guimarães³



Lino Maia^{4,5}

RESUMO

As soluções arquitectónicas exigem cada vez mais dos materiais de construção e o betão à vista é uma tendência cada vez mais notória nas construções emblemáticas. Entre os diversos tipos de betão à vista, o betão colorido constitui uma alternativa aos acabamentos superficiais correntes. Em estruturas com vida útil longa o betão colorido dispensa uma manutenção tão intensiva tornando-se mais económico a longo prazo. Neste trabalho foi efectuado o estudo de pastas, argamassas e betões com a incorporação de pigmentos coloridos na sua composição. Devido às exigências de acabamento superficial necessárias nos betões coloridos, os estudos foram realizados tendo em conta a necessidade de utilizar betões autocompactáveis nas aplicações reais. Tendo em conta a disponibilidade de materiais na Região Autónoma da Madeira foram utilizados cimentos cinzentos, cinzas volantes e agregados vulcânicos britados. Investigou-se a incorporação de pigmentos líquidos de cor: Vermelha, Laranja, Verde, Amarelo e Preto. Avaliou-se a influência dos diversos pigmentos nas propriedades do estado fresco e na resistência à compressão em argamassas e em betões. Analisaram-se as cores das pastas, argamassas e betões em diferentes idades através do ‘software’ Just Color Picker, codificando-as através da escala HSV em valores de matiz, saturação e luminosidade. Segundo os resultados obtidos neste estudo, o tipo de pigmento, as cinzas volantes e o tipo de cimento são os parâmetros mais relevantes na alteração da cor.

Palavras-chave: Betão colorido, pigmentos, cor, betão autocompactável, resistência.

¹ Centro de Ciências Exatas e da Engenharia, Universidade da Madeira, Campus Universitário da Penteada, 9020-105 Funchal, Portugal. a2002307@max.uma.pt

² Centro de Ciências Exatas e da Engenharia, Universidade da Madeira, Campus Universitário da Penteada, 9020-105 Funchal, Portugal. a2050206@max.uma.pt

³ Cimentos Madeira Lda. Estrada Monumental, 433 9000-236 Funchal, Portugal. miguelguimaraes@sapo.pt

⁴ LABEST, Laboratório da Tecnologia do Betão e do Comportamento Estrutural, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Departamento de Engenharia Civil, Porto, Portugal. lino.maia@fe.up.pt

⁵ Centro de Ciências Exatas e da Engenharia, Universidade da Madeira, Campus Universitário da Penteada, 9020-105 Funchal, Portugal. linomaia@uma.pt

1. INTRODUÇÃO

A aplicação de ‘betão aparente’ é uma tecnologia cada vez mais utilizada na indústria da construção. Esta tecnologia de construção consiste na aplicação do material ‘betão’ sem qualquer revestimento, maximizando o proveito estético da estrutura e do próprio material estrutural [1]. De forma semelhante, e sem a utilização de qualquer outro tipo de acabamento adicional, nomeadamente a pintura, ladrilhos, entre outros, apresenta-se em expansão a tecnologia do ‘betão colorido’. Este tipo de betão obtém-se com a introdução de pigmentos (em pó ou líquidos) no betão.

Dada a vasta gama de pigmentos actualmente disponíveis no mercado, para além dos tradicionais tons de cinza, preto e branco, é possível obter betão em tons terrosos, amarelo, vermelho, azul e verde. Quando se pretende obter cores brilhantes e nítidas o betão deve ser produzido com cimento branco e filer calcário (ou, eventualmente, outro material fino da cor que se pretende obter) [2]. Tratando-se de betões produzidos para ficar à vista, é fundamental assegurar a homogeneidade, a capacidade de preenchimento de moldes e o acabamento superficial. Assim, facilmente se conclui que betão autocompactável (BAC) [3-4] é o material de excelência para as aplicações de betão colorido.

Para além de ser de uso corrente em pavimentos, painéis e peças pré-fabricadas, o betão colorido já tem sido aplicado enquanto material estrutural – entre outros, são exemplos a ‘Ciudad de la Justicia’ em Barcelona e a ‘Casa das Histórias Paula Rego’ em Cascais. No entanto, importa referir que quer nos diversos edifícios da ‘Ciudad de la Justicia’, quer na ‘Casa das Histórias Paula Rego’ foi aplicado apenas um tipo de betão colorido em cada edifício/painel. De facto, até ao presente, desconhecem-se aplicações onde tenham sido usados mais do que um tipo de betão colorido no mesmo painel. Deste modo, desconhece-se a problemática da interacção entre os vários betões coloridos nas interfaces em elementos estruturais. Tornar exequível e prático a coloração de superfícies quer horizontais, quer verticais com diversos tipos de pigmentos, formas e texturas seria uma forma simples e económica de exibir o betão e todas as suas potencialidades estéticas [5].

Para investigar as potencialidades estéticas dos betões coloridos foi concebido um projecto com o objectivo de realizar uma parede com cerca de 8 metros de comprimento e 7 metros de altura através da aplicação de diversos betões coloridos. Atendendo que a referida parede será construída na Região Autónoma da Madeira (RAM), pretende-se que os betões coloridos sejam produzidos usando os materiais correntemente disponíveis na RAM. Assim, importa referir que, na construção da parede, como materiais finos, apenas poderão ser utilizados os cimentos CEM II/B-L 32.5 N e CEM II/A-L 42.5 R e as cinzas volantes. Quanto aos agregados (inclusive as areias) apenas poderão ser utilizados agregados britados de origem vulcânica.

Visto que a cor de um betão é essencialmente controlada pela cor da pasta desse betão, compreende-se que a indisponibilidade de cimento branco e de filer calcário constituem fortes limitações ao dimensionamento das diversas composições. Para além disso, a ausência de filer calcário na RAM conduz à necessidade da incorporação de cinzas volantes nas composições de betão para que estes sejam autocompactáveis. Por outro lado, como todos os agregados são britados, a obtenção da autocompactabilidade torna-se ainda mais difícil.

Tratando-se de um projecto difícil, mas ambicioso, o presente trabalho enquadra-se na parte inicial desse projecto. Estando ciente das limitações estabelecidas – necessidade de utilização de BAC, materiais disponíveis, etc., este trabalho tem como objectivo principal obter e testar composições de BAC colorido para a execução da parede protótipo esquematizada na Figura 1 (a sua execução será parte de um trabalho futuro onde através de carotes se estudarão as zonas de interface entre os vários betões coloridos). Assim, neste trabalho pretende-se (i) propor uma metodologia para classificar a cor dos BACs, (ii) estudar as cores dos BACs que são possíveis produzir com os materiais disponíveis, (iii) analisar a influência da evolução do tempo nas cores dos BACs sujeitos à exposição ambiental, e (iv) avaliar a influência dos pigmentos na resistência e no estado fresco dos BACs.

Assim, para se alcançarem os objectivos do presente trabalho realizaram-se inicialmente estudos em pastas e argamassas e só posteriormente, após compreendidos os principais efeitos introduzidas pelos pigmentos, se efectuaram estudos em betões. Nas pastas, realizou-se um estudo preliminar sobre a cor, utilizando diferentes tipos de cimento e incorporando diferentes conteúdos em cinzas volantes. Para além disso, obtiveram-se os primeiros resultados sobre a influência de cada pigmento na deformabilidade das pastas. Nas argamassas, confirmou-se a forma como cada pigmento afectava o estado fresco e avaliou-se a influência na resistência. No betão, analisaram-se as cores obtidas, a sua evolução no tempo e a influência dos pigmentos na resistência.

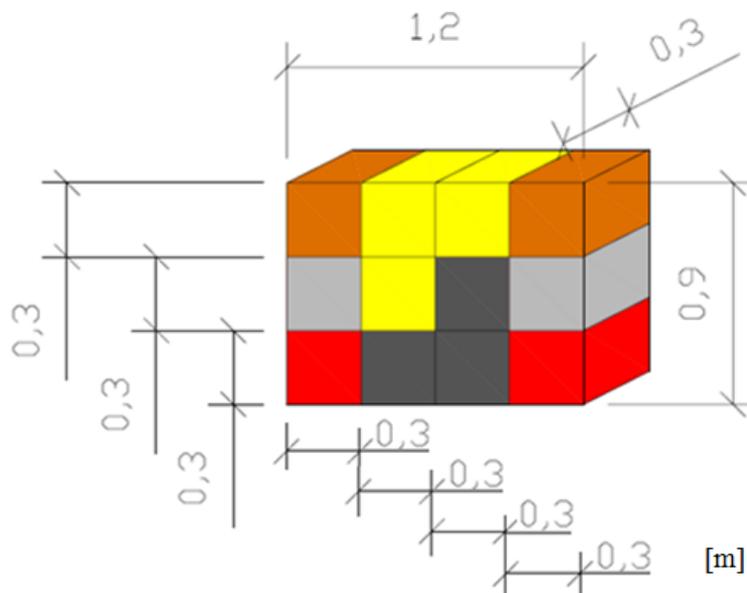


Figura 1. Esquema do protótipo a betonar.

2. METODOLOGIA E TRABALHO EXPERIMENTAL

2.1 'Software' Just Color Picker

O 'software' Just Color Picker permite a codificação de qualquer cor de qualquer pixel, no formato desejado. Para tal, basta seleccionar o pixel cuja cor se pretende quantificar e carregar em Alt+X. Para além deste procedimento, deve-se escolher o formato que se pretende utilizar na codificação das cores. Estão disponíveis os seguintes formatos: HTML, RGB, HEX, HSB/HSV e HSL. Os formatos HTML, RGB e HEX, consistem na codificação da cor a partir de 3 partes que definem a combinação entre vermelho, verde e azul na cor seleccionada. As escalas HSV/HSB definem a cor em relação aos parâmetros seguintes: Hue (H), Saturation (S) e Value (V), que representam respectivamente: a cor definida em termos comparativos entre o vermelho e o amarelo (matiz), sendo que a escala varia de 0° (vermelho) a 360° (amarelo), o verde a 120° e o azul a 240°; a saturação da cor que representa a sua pureza, isto é, quanto mais baixa a saturação de uma cor, menos colorida parece e quanto mais alta mais definida parece. Esta escala traduz-se em percentagem, de 0% (ausência de saturação da cor) a 100% (saturação total da cor); o valor da cor que consiste na sua variação entre escuro e claro (0% é preto e 100% é branco) [6].

Na análise da cor utilizou-se uma câmara fotográfica (telemóvel Nokia X2) com resolução de 5 mega pixel para o registo fotográfico e o 'software' Just Color Picker na codificação das cores. Todas as fotografias foram tiradas em circunstâncias semelhantes, quer em termos de luminosidade da sala quer em termos de posicionamento da câmara relativamente à amostra. Em cada amostra analisada seleccionaram-se 5 pontos representativos da amostra: 1 ao centro e 4 nos bordos. Efectuou-se a média e o desvio padrão, e de seguida elaboraram-se gráficos utilizando esses parâmetros.

2.2 Materiais e equipamentos

Na fase inicial deste trabalho, experimentaram-se três tipos de cimento: CEM II/B-L 32.5 N, CEM II/A-L 42.5 R e CEM II/B-L 32.5 R (br). Note-se que apesar do cimento branco (CEM II/B-L 32.5 R (br)) não poder ser utilizado na realização da parede, foi utilizado neste trabalho para ajudar a compreender a influência da cor do cimento no material final. Quer o cimento CEM II/B-L 32.5 N quer o CEMII/B-L 32.5 R (br) foram apenas utilizados nas pastas. Mediram-se as massas volúmicas dos respectivos materiais e obtiveram-se os seguintes valores: 3100 kg/m³ para o CEMII/A-L 42.5 R; 3000 kg/m³ para o CEMII/B-L 32.5 N; e 2940 kg/m³ para o CEMII/B-L 32.5 R (br). Utilizou-se também um tipo de cinzas volantes com uma massa específica no valor de 2360 kg/m³ e um superplastificante (Glenium Sky 548), cuja massa volúmica era 1020 kg/m³.

Os agregados utilizados na produção das argamassas e dos betões foram fornecidos pela empresa ‘Brimade – Sociedade de Britas da Madeira, S.A.’ localizada na Fundoa, Funchal. Quer os agregados grossos quer os finos eram britados, de origem vulcânica e apresentavam uma cor cinzenta com tons variantes entre claros e escuros, podendo por vezes ter resíduos de argilas em tom avermelhado. Para as argamassas utilizaram-se duas areias: ‘Areia 0/2’ e ‘Areia 0/4’. Nos betões, para além das duas areias supra referidas utilizaram-se ainda duas britas: ‘Brita 4/10’ e ‘Brita 8/16’.

Nas pastas e argamassas utilizou-se água destilada e nos betões água da rede de abastecimento. Os pigmentos utilizados neste estudo foram fornecidos pela empresa ‘BASF, The Chemical Company’. Não foi possível obter informações sobre a composição química dos pigmentos utilizados. No entanto, com base na literatura [2] e [7], julga-se que, muito provavelmente, os pigmentos amarelo, laranja, vermelho, castanho e preto, devem ser compostos de óxido de ferro e o pigmento verde proveniente de óxido de crómio. No Quadro 1 apresenta-se as massas volúmicas determinadas no laboratório para os pigmentos utilizados.

Quadro 1. Características gerais dos pigmentos utilizados ao longo do estudo.

Pigmento	Estado	Massa volúmica [kg/m ³]
Amarelo	Líquido	1550
Laranja	Líquido	1580
Vermelho	Líquido	1500
Castanho	Líquido	1600
Verde	Líquido	1270
Preto	Líquido	1640

Na determinação dos diâmetros de espalhamento nas pastas utilizou-se um cone metálico com as seguintes dimensões: diâmetro da abertura inferior – 38 mm, diâmetro da abertura superior – 19 mm e altura – 57 mm. Nas argamassas utilizaram-se os equipamentos (cone e funil V para aferir a autocompactabilidade das argamassas. As dimensões destes equipamentos estão descritas na Ref.[8]). Nos betões, a autocompactabilidade foi avaliada pelos ensaios de: espalhamento, funil V, caixa L e segregação (consultar Ref.[8] para informações sobre dimensões e procedimentos de ensaio). Para a determinação das resistências mecânicas (flexão e compressão) no estado endurecido das argamassas utilizou-se uma prensa (Walter+Baiag Switzerland, Prufmaschinen Machines d’essais Testing Machines CH-8224 Lohningen). Os ensaios foram realizados de acordo com a Norma NP EN 196-1 [9].

2.3 Composições e ensaios

Como o objetivo final é a produção de BACs, neste trabalho o dimensionamento das composições de betão foi realizado através das razões volumétricas entre os materiais constituintes que mais influenciam as propriedades do BAC [3, 10-14]: volume de água / volume de finos (V_w/V_p); volume de areia / volume de argamassa (V_s/V_m); volume de cinzas volantes / volume de finos (V_{fv}/V_p); volume de agregado grosso / volume ‘limite’ de agregado grosso ($V_g/V_{g,lim}$); e massa de superplastificante /

massa de finos (sp/p). Em consequência, a quantidade de pigmento introduzida na amassadura foi sempre uma percentagem do volume dos materiais finos (V_{pigmento}/V_p).

Visto que neste trabalho se estavam a utilizar materiais comerciais, ao invés do sugerido na literatura [3, 12-13], apenas foram considerados como materiais finos os cimentos e as cinzas volantes. Assim, a parte dos agregados cuja granulometria era inferior a 0.125 mm foi considerada como sendo agregado.

Visto que os pigmentos eram designados de ‘pigmentos líquidos’ e atendendo que se desconhecia o teor em sólidos quer dos pigmentos quer do superplastificante (comercializado no estado líquido), importa referir que a introdução destes constituintes foi feita sempre (pastas, argamassas ou betões) através da substituição de igual volume de água. Assim, o volume dos materiais líquidos que se introduziam na composição era mantido sempre igual ao da respetiva composição de referência.

2.3.1 Pastas

Ao nível das pastas começou-se por realizar pastas (a) apenas de cimento e água (sem cinzas volantes e sem pigmentos) para avaliar a influência do tipo de cimento na cor das pastas – $V_w/V_p=1.6$. Posteriormente, ainda sem utilizar cinzas volantes, foram realizados os primeiros estudos com os pigmentos: (b) testaram-se todos os pigmentos com todos os cimentos – $V_{\text{pigmento}}/V_p=10\%$ e $V_w/V_p=1.6$.

Na fase seguinte, (c) avaliou-se a influência das cinzas volantes na cor (apenas para o cimento CEM II/A-L 42.5 R) através da realização de pastas com $V_{\text{fa}}/V_p=0\%$, 15% e 30%. Finalmente, realizaram-se pastas que incorporavam (d) diferentes níveis de pigmentos ($V_{\text{pigmento}}/V_p=0\%$, 5% e 10%) e diferentes níveis de cinzas volantes ($V_{\text{fa}}/V_p=0\%$ e 30%). Nota: devido à alteração da reologia introduzida pelas cinzas volantes, nos estudos (c) e (d) houve a necessidade de alterar o parâmetro V_w/V_p para assegurar que as deformabilidades fossem semelhantes – quando $V_{\text{fa}}/V_p=15\%$ usou-se $V_w/V_p=1.5$ e quando $V_{\text{fa}}/V_p=30\%$ usou-se $V_w/V_p=1.4$.

Após a realização de cada mistura avaliou-se o espalhamento através do ensaio do cone metálico de pastas. Guardou-se parte da pasta em recipientes plásticos transparentes a fim de analisar a evolução da cor ao longo do tempo. Tais provetes foram desmoldados aos 7 dias. Fotografou-se o diâmetro de espalhamento e as pastas no recipiente ainda no estado fresco. No estado endurecido os provetes foram fotografados aos 7 e 40 dias.

2.3.2 Argamassas

Todas as argamassas foram produzidas sempre com: (i) $V_s/V_m=0.50$, (ii) o volume de areia era constituído por 60% de ‘Areia 0/2’ e 40% de ‘Areia 0/4’; (iii) $V_w/V_p=0.9$; e (iv) $V_{\text{fa}}/V_p=30\%$. Nas argamassas, estudou-se apenas o cimento CEM II/A-L 42.5 R.

Foi produzida uma argamassa de referência que incorporava superplastificante – sp/p=0.6%. Posteriormente foram realizadas argamassas coloridas cuja diferença para a argamassa de referência residia no facto de incorporarem pigmentos. Todas as argamassas coloridas foram realizadas com $V_{\text{pigmento}}/V_p=10\%$. Importa referir que a quantidade de superplastificante foi ajustada nas pastas que incorporavam pigmentos de forma a obter uma viscosidade e deformabilidade semelhante à da argamassa de referência.

Após a realização de cada amassadura, analisou-se o diâmetro de espalhamento e o tempo de escoamento. Após os ensaios em estado fresco, guardou-se argamassa em recipientes plásticos e analisou-se a progressão da cor ao longo dos dias. Também foram executados prismas (dimensões: $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}^3$) de modo a ensaiar as argamassas à flexão e compressão aos 7 dias para comparar a resistência entre argamassas pigmentadas e não pigmentadas.

2.3.3 Betões

Utilizou-se um BAC de referência (o dimensionamento da composição sai fora do âmbito do presente trabalho). A composição de referência era definida pelos seguintes parâmetros: (i) $V_g/V_{g,\text{lim}}=0.50$; (ii) o

volume de brita era constituído por 70% de ‘Brita 4/10’ e 40% de ‘Brita 8/16’; (iii) o volume de ar foi estimado em 4%; (iv) a argamassa dessa composição BAC tinha os mesmos parâmetros da argamassa de referência referida na Secção 2.3.2 (com excepção da dosagem de superplastificante que era $sp/p=0.9\%$). Os parâmetros referidos conduziam a uma composição com as seguintes dosagens por m^3 : cimento = 412 kg, cinzas volantes = 134 kg, água efetiva = 169 kg, superplastificante = 4.8 kg, ‘Areia 0/2’ = 625 kg, ‘Areia 0/4’ = 408 kg, ‘Brita 4/10’ = 488 kg e ‘Brita 8/16’ = 208 kg. Refira-se que o rácio água / cimento e água / finos (em massa) eram de 0.41 e 0.31, respectivamente.

Posteriormente, foram produzidas composições semelhantes à composição de referência incorporando pigmentos – $V_{pigmento}/V_p=10\%$, ou seja, incorporando 19.0 litros de pigmentos (que foram introduzidos através da substituição de 19.0 litros de água). Como a substituição parcial da água por pigmentos reduzia substancialmente a autocompactabilidade da composição, corrigiu-se a dosagem de superplastificante de acordo com as necessidades introduzidas por cada pigmento.

Assim, no total foram produzidas seis composições de betão. Após a mistura realizou-se o ensaio do espalhamento, seguido do Funil V, da Caixa L e da segregação. Após os ensaios para avaliar a autocompactabilidade moldaram-se provetes cúbicos $150 \times 150 \text{ mm}^2$. Moldaram-se cinco cubos: dois para ensaiar à compressão aos 7 dias, dois aos 28 dias e outro para colocar sujeito à exposição ambiental e fotografar ao longo do tempo. Também se retiraram amostras dos betões para os recipientes de plástico a fim de analisar a evolução da cor. Fotografou-se o espalhamento do betão e o seu estado endurecido 7 dias depois (após descofrar os copos). Pretende-se continuar a fotografar o estado dos cubos sujeitos à exposição ambiental até pelo menos à idade de 90 dias.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Pastas: Influência das cinzas volantes, tipo de cimento e pigmentos na cor e no espalhamento e evolução da cor no tempo

Estando ciente de que a cor de um betão é essencialmente controlada pela cor da pasta de cimento, então os primeiros estudos consistiram na avaliação da influência do tipo de cimento e da quantidade de cinzas volantes na cor da pasta de cimento. Na Figura 2 apresenta-se a influência do tipo de cimento na cor da pasta quantificado através do parâmetro ‘Valor’ (variação entre escuro e claro). Como se pode observar, o cimento que proporciona uma qualidade melhor a nível de cor é o CEMII/B-L 32.5 R (br), seguido do CEMII/B-L 32.5 N, sendo que o CEMII/A-L 42.5 R é o que apresenta resultados piores.

No sentido de perceber de que forma os pigmentos disponíveis influenciam o estado fresco de uma amassadura, realizou-se, ao nível das pastas, um conjunto de amassaduras onde foram introduzidos os pigmentos. Refira-se que esse estudo foi numa primeira fase realizado para todos os cimentos em composições que não incorporavam cinzas volantes (Figura 3).

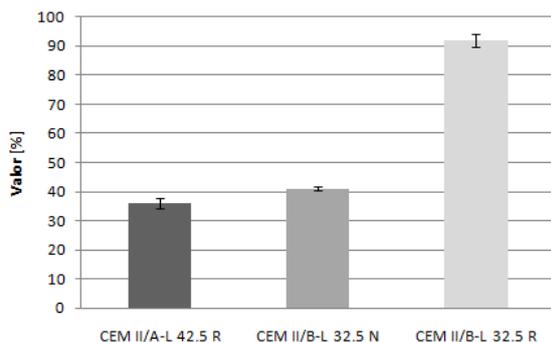


Figura 2. Influência do tipo de cimento na cor das pastas.

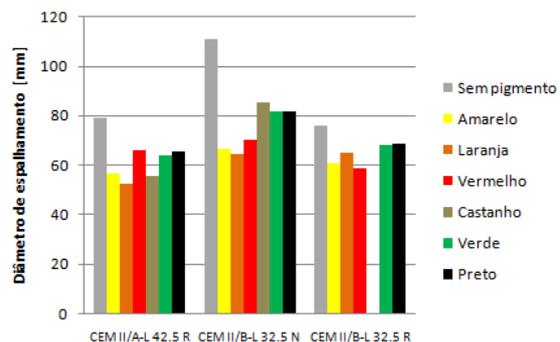


Figura 3. Influência do tipo de cimento no diâmetro de espalhamento ($V_{pigmento}/V_p = 10\%$).

Posteriormente, estudaram-se pastas que também incorporavam cinzas volantes (realizado apenas para o cimento CEMII/A-L 42.5 R). Avaliou-se a influência das cinzas volantes na cor através da quantificação da evolução do parâmetro ‘Valor’ em amassaduras com diferentes níveis de V_{fa}/V_p . De acordo com a Figura 4, é notável que a cor da pasta obtida escurece com o aumento do conteúdo em cinzas volantes. Refira-se que foi obtida uma tendência similar para o estado endurecido.

De seguida, foram estudadas composições com cinzas que incorporavam pigmentos. Embora se tenha realizado este estudo para todos os pigmentos, todos tiveram efeito semelhante no estado fresco. Assim, apresenta-se na Figura 5 os resultados do diâmetro do espalhamento para o pigmento verde. Comparando a Figura 3 e a Figura 5 torna-se evidente que a introdução dos pigmentos conduziu sempre a uma diminuição do diâmetro de espalhamento – perda de deformabilidade. Provavelmente, tal deve-se ao facto da introdução do pigmento ter sido efectuado através da substituição de igual volume de água. Note-se que apesar dos pigmentos serem classificados como ‘pigmentos líquidos’, provavelmente contêm uma percentagem de material sólido, conduzindo a uma redução efectiva do V_w/V_p . Não obstante, observa-se que o pigmento amarelo e o pigmento laranja parecem impor uma maior redução do diâmetro de espalhamento do que os restantes.

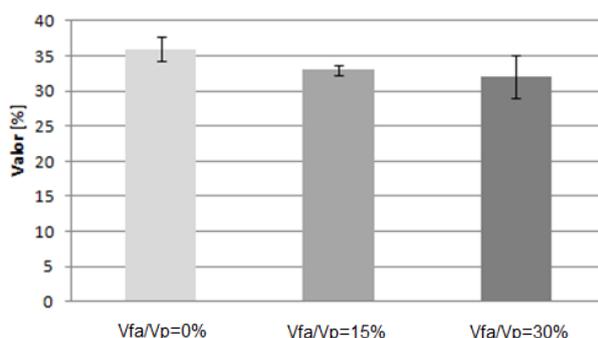


Figura 4. Influência da adição de cinzas volantes na cor das pastas.

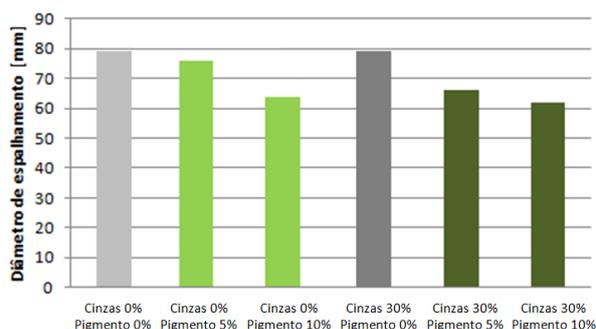


Figura 5. Efeito do pigmento verde no diâmetro de espalhamento da pasta.

Para o cumprimento do objectivo de avaliar a estabilidade da cor no tempo, realizaram-se medições da cor em algumas pastas em idades diferentes (estado fresco, 7 dias e 40 dias) nos provetes moldados nos recipientes de plástico (ver Figura 6). Importa referir que os provetes estiveram guardados dentro de uma caixa de papelão resguardados da luz solar e a uma temperatura de $22 \pm 3^\circ\text{C}$.

Conforme se verifica na Figura 6, há uma ligeira perda de cor com o passar do tempo (sendo recuperável aquando do humedecimento da superfície), facto que se verifica com mais intensidade na passagem de estado fresco a endurecido. Note-se que a pasta de referência também apresentou a mesma tendência. Assim, aparentemente, a estabilidade da cor no tempo parece ser uma desvantagem desta tecnologia.

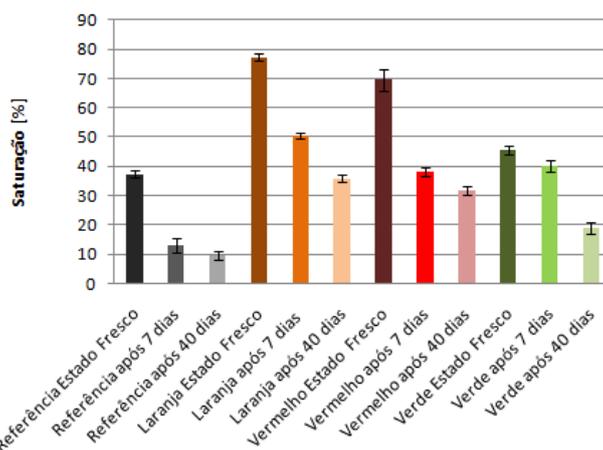


Figura 6. Alteração da cor devido à passagem do tempo nas pastas.

3.2 Argamassas: Influência dos pigmentos na resistência à compressão

A influência dos pigmentos nas propriedades mecânicas é fundamental para os casos em que os betões pigmentados sejam aplicados em elementos estruturais. Assim, ao nível das argamassas realizou-se um conjunto de amassaduras onde se pretendia avaliar a influência dos pigmentos na resistência. Assim, para cada pigmento realizaram-se argamassas utilizando cimento CEMII/A-L 42.5 R com $V_{fa}/V_p=30\%$, $V_s/V_m=0.50$, $V_w/V_p=0.90$ e $V_{pigmento}/V_p=10\%$ e moldaram-se para cada argamassa três provetes com $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}^3$. Como se pode ver na Figura 7 e na Figura 8, os pigmentos parecem não introduzir alterações significativas quer na resistência à flexão quer na resistência à compressão, embora seja observado um ligeiro aumento (inferior 5%) em algumas composições com pigmentos. Tal deve-se provavelmente ao facto da introdução dos pigmentos ser realizada através da substituição de igual volume de água, ou seja, o volume de material fluido mantém-se constante (desprezando o teor em sólidos do pigmento).

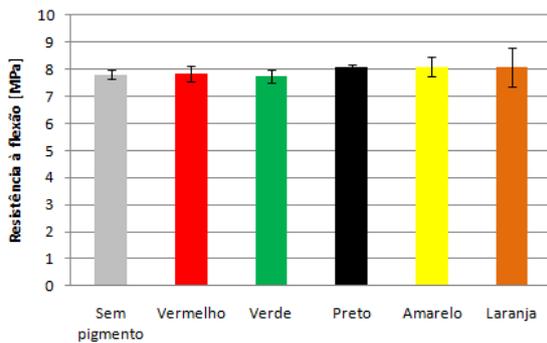


Figura 7. Resistência à flexão aos 7 dias em provetes de argamassa pigmentados e não pigmentados.

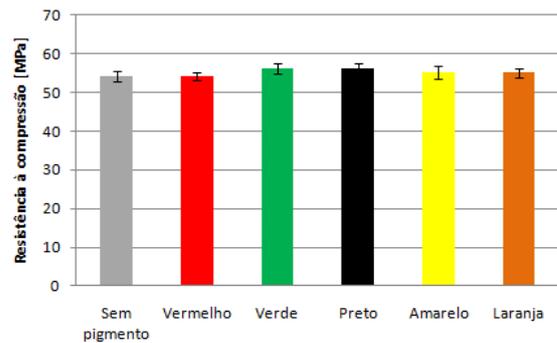


Figura 8. Resistência à compressão aos 7 dias em provetes de argamassa pigmentados e não pigmentados.

3.3 Betões: Influência dos pigmentos na resistência à compressão e codificação das cores obtidas na escala HSV

Após a realização de vários estudos em pastas e argamassas estudaram-se composições de BAC. Na Figura 9 apresenta-se as resistências à compressão obtidas em provetes cúbicos $15 \times 15 \times 15 \text{ cm}^2$. A análise da Figura 9 confirma (de acordo com os resultados obtidos na Secção 3.2) que os pigmentos não provocam diminuição de resistência, antes pelo contrário – observa-se que todos os betões coloridos apresentam uma resistência à compressão média superior à do betão de referência (sem pigmentos). No caso do betão vermelho a resistência é aproximadamente 20% superior.

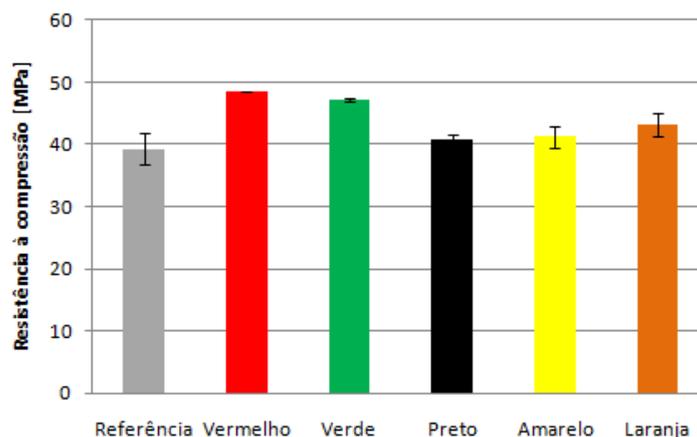
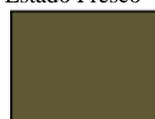


Figura 9. Resistências à compressão dos betões produzidos aos 7 dias.

Quanto às cores, apresenta-se no Quadro 2 a catalogação das mesmas (de acordo com a escala HSV) para os diversos betões. Apresentam-se os resultados para o estado fresco e para a idade de 7 dias. Como se pode observar no Quadro 2 todos os betões apresentaram cores relativamente escuras (parâmetro 'V'). Importa, contudo, referir que à semelhança do que foi reportado na Secção 3.1, também ao nível dos betões se observa uma modificação significativa entre a cor observada no estado fresco e a cor observada à idade de 7 dias – ocorre uma perda de cor.

Nesse sentido, conclui-se que é necessário melhorar não só as cores (obter cores mais claras) como também a estabilidade (permanência) das mesmas. É necessário investigar composições de referência com pastas mais claras e investigar produtos que aplicados na superfície dos painéis de betão colorido ajudem a manter a cor (tal como verificada em estado fresco ou com a superfície humedecida).

Quadro 2. Catálogo das cores obtidas nos betões produzidos – escala HSV.

a) Referência		b) Amarelo		c) Laranja	
Estado Fresco	7 dias	Estado Fresco	7 dias	Estado Fresco	7 dias
					
H:34, S:14, V:48	H:91, S:7, V:46	H:49, S:46, V: 38	H:55, S:53, V:41	H:21, S:53, V:32	H:34, S:44, V:38
d) Vermelho		e) Preto		f) Verde	
Estado Fresco	7 dias	Estado Fresco	7 dias	Estado Fresco	7 dias
					
H:11, S:81, V:43	H:13, S:49, V:38	H:20, S:15, V:25	H:211, S:9, V: 26	H:112, S:32, V:26	H:103, S: 30, V:35

NOTAS FINAIS

Neste trabalho investigaram-se questões associadas ao dimensionamento de BACs coloridos produzidos a partir de materiais de cor escura. Dos resultados dos ensaios realizados em pastas, argamassas e BACs podem ser retiradas as seguintes conclusões:

1. Dos parâmetros analisados neste estudo, os que mais influenciam a cor do betão são o tipo de cimento e pigmento e a percentagem de cinzas volantes incorporadas.
2. A cor obtida no estado fresco é bem mais nítida do que a que é visível no estado endurecido.
3. A introdução de pigmentos através da substituição de igual volume de água conduz a uma perda significativa da autocompactabilidade. Contudo, aumentando a quantidade de superplastificante na composição é possível reajustar as propriedades do estado fresco.
4. Para dosagens de pigmentos iguais a 10% do volume de finos, a introdução de pigmento na composição via substituição de igual volume de água conduz a um ligeiro aumento da resistência.

Tendo em conta o objectivo de dimensionamento de composições de betão colorido para a realização de uma parede com cerca de 8 metros de comprimentos e 7 metros de altura apontam-se os seguintes trabalhos futuros:

- a. Execução de protótipo (uma parede de pequenas dimensões) para se estudar a interface entre betões de cores diferentes. Num dos lados dessa parede aplicar na superfície um produto protector (verniz, anti-graffiti, etc.) para posteriormente comparar a evolução das cores com a face em que não foi aplicado qualquer produto.
- b. Investigação da influência da introdução de dosagens mais elevadas de pigmentos. Desenvolvimento de composições de BAC coloridas com o cimento CEM II/B-L 32.5 N e com um menor conteúdo de cinzas volantes.

AGRADECIMENTOS

Agradecimento às empresas do ‘Grupo Cimentos Madeira’, de um modo especial ao ‘Laboratório Cimentos Madeira’, pela colaboração e disponibilidade na cedência dos recursos necessários, assim como pelo financiamento prestado ao primeiro e segundo autor para a participação no Encontro Nacional de Betão Estrutural – BE2012.

REFERÊNCIAS

1. Ribeiro, R., *Concreto aparente: uma contribuição para a construção sustentável*, in *Departamento de Engenharia de materiais e construção*. 2010, Universidade Federal de Minas gerais: Belo Horizonte. p. 101.
2. Resheidat, M. and A.-. Kharabsheh. *Development of colored concrete in Jordan*. in *International Conference on Construction and Bulding Tecnology*. 2008. Jordan: International Conference on Construction and Bulding Tecnology.
3. *The european guidelines for self compacting concrete*. 2005 May 2005 [cited 2008 June 5]; Available from: <http://www.efnarc.org/pdf/SCCGuidelinesMay2005.pdf>.
4. Nunes, S., *Performance-based design of self-compacting concrete (SCC) a contribution to enhance SCC mixtures robustness*. 2008, Porto. XXXVIII, 319 p.-XXXVIII, 319 p.
5. Chusid, M., E. Strockbine, and N. Paris (s.d.) *Colored Concrete Bridges: Construction and life-cycle cost*. Special Products & Practice Spotlight, 1-6.
6. AnnyStudio. *Just Color Picker*. 2003 [cited 2012 15 de Junho de 2012]; Available from: <http://annystudio.com/software/colorpicker/>.
7. Al-Kharabsheh, B., *An Experimental Study on Colored Concrete using Pigments from Raw Local Materials*, in *Departamento de Engenharia Civil*. 2007, Jordan University of Science and Technology.
8. EFNARC, et al., *The European Guidelines for Self-Compacting Concrete*, T.E.F.o.S.C.C.a.C. Systems, Editor. 2002. p. 1-32.
9. *NP EN 196-1: 2000 – Métodos de ensaio de cimento. Parte 1: Determinação das resistências mecânicas*. 2000.
10. Figueiras, H.I.M., *Estudo e desenvolvimento experimental de composições de betão auto-compactável aferição das suas características mecânicas e durabilidade*. 2006, Porto: [s. n.]. pag. var.-pag. var.
11. Nunes, S.C.B., *Betão auto-compactável Tecnologia e propriedades*. 2001, Porto: FEUP. p.ir.-p.ir.
12. Okamura, H.H., *Self-compacting high-performance concrete*. *Concrete international*, 1997. **19**(7): p. 50-54.
13. RILEM TC 174-SCC, *Self-compacting concrete State-of-the-Art report*. RILEM. 2001, Cachan: RILEM Publications. XI, 154, [2] p.-XI, 154, [2] p.
14. Wallevik, J.E., *Rheology of Particle Suspensions: Fresh Concrete, Mortar and Cement Paste with Various Types of Lignosulfonates*, F.o.E.S.a.T. Norwegian University of Science and Technology, Editor. 2003, Norwegian University of Science and Technology, Faculty of Engineering Science and Technology. p. 397.