



Betão Autocompactável de Elevado Efeito Estético

A tese foi submetida para o grau de mestrado em Engenharia Civil na
Universidade da Madeira

por

JOANA MICAELA ANDRADE DA SILVA

Orientador

Prof. Lino Maia

(Universidade da Madeira – UMA)

Co-orientador

Dr. Miguel Guimarães

(Cimentos Madeira, Lda)

Setembro 2012

Título: Betão Autocompactável de Elevado Efeito Estético

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

Autoria de: JOANA SILVA

UMa – Universidade da Madeira

Centro de Competência das Ciências Exactas e da Engenharia

Caminho da Penteada

9020 – 105 Funchal, Portugal

Telefone + 351 291 705 000

Júri:

Doutor João Paulo Martins (Universidade da Madeira)

Doutor Joaquim de Azevedo Figueiras (Universidade do Porto)

Doutor Manuel Gomes Vieira (Laboratório Nacional de Engenharia Civil)

Dr. Miguel Guimarães (Laboratório Cimentos Madeira)

Doutor Lino Manuel Serra Maia (Universidade da Madeira)

Aos estudantes

RESUMO

As tendências arquitectónicas exigem uma evolução cada vez mais intensa dos materiais de construção. Notoriamente, os edifícios de betão mais emblemáticos expõem cada vez mais a sua estrutura, ao que se chama de ‘betão aparente’. O betão colorido, desenvolvido no último século, é uma solução corrente de ‘betão aparente’. Em edifícios com vida útil longa o betão colorido dispensa uma manutenção tão intensiva quanto os acabamentos superficiais correntes, tornando-se mais económico.

Neste trabalho produziu-se betão colorido através da incorporação de pigmentos na sua composição. Para tal, efectuou-se primeiramente um estudo intensivo em pastas e argamassas igualmente coloridas. Uma vez que o ‘betão aparente’ exige um bom acabamento superficial, considerou-se neste estudo o uso de Betão Autocompactável. Atendendo à disponibilidade de materiais na Região Autónoma da Madeira foram utilizados cimentos cinzentos, cinzas volantes e agregados vulcânicos britados. Analisou-se a incorporação de pigmentos líquidos de cor: amarelo, laranja, vermelho, castanho, preto e verde. Investigou-se e quantificou-se a influência dos diversos pigmentos nas propriedades do estado fresco e na resistência à compressão em argamassas e em betões. Codificaram-se as cores das pastas, argamassas e betões em diferentes idades através do ‘software’ Just Color Picker, utilizando a escala HSV em valores de matiz, saturação e luminosidade e a escala RGB (quantificando a percentagem de vermelho, verde e azul presente na cor).

Os resultados demonstraram que a incorporação de cinzas volantes, a passagem do tempo e exposição ambiental e o tipo de cimento são os parâmetros mais relevantes na alteração da cor. A adição de pigmentos tem grande influência na deformabilidade quer de pastas, quer de argamassas e betões, no entanto a nível da resistência a influência é reduzida.

A parte experimental deste trabalho foi concluída com a execução de uma pequena parede que foi betonada usando betões de várias cores. No que concerne à ‘interface’ entre os diversos betões, verificou-se que o tempo entre betonagens é crucial para a aderência entre betões de cores diferentes, observando-se que a fraca aderência entre betões provocou uma fragilidade na zona de ‘interface’ entre eles.

ABSTRACT

The architectural trends require an increase in the evolution of construction materials. Notoriously the most emblematic concrete buildings expose more and more their structure, the so-called 'exposed concrete'. The colored concrete, developed in the last century, is a solution of 'exposed concrete'. In buildings with long life cycle colored concrete does not require an intensive maintenance as current surface finishing, making it more economical.

In this work colored concrete was produced by incorporating pigments into its composition. To this end, firstly colored pastes and mortars were studied. Since the 'exposed concrete' requires a good surface finishing, it was considered in this study the use of Self Compacting Concrete. Being aware about the availability of materials in Madeira Island gray cement, fly ash and volcanic crushed aggregates were used. The incorporation of liquid pigments of color (yellow, orange, red, brown, black and green) was analysed. The effect of various pigments on the properties of the fresh state and the compressive strength in mortar and concrete were investigated and quantified. The colors of the pastes, mortars and concretes were coded at different ages through the 'software' Just Color Picker, using the scale HSV on values of hue, saturation and brightness and RGB scale (quantifying the percentage of red, green and blue into the color).

The results showed that incorporation of fly ash, the passage of time and environmental exposure and the kind of cement are the most relevant parameters in the color change. The addition of pigments has markedly influence on deformability of pastes, mortars and concretes, however the influence in the concrete strength is almost neglected.

The experimental part of this work was ended with the construction of a small wall using different colored concretes. In regarding to the concrete interfaces, it was observed that the time between the castings is crucial for the connection of different colored concretes. Therefore, it was observed that the weak connection between different colored concretes reduced notably the concrete strength in the interface zone.

ÍNDICE GERAL

Resumo.....	i
Abstract	iii
Índice geral.....	v
Índice de figuras.....	ix
Índice de quadros	xiii
Notação e simbologia.....	xv
Agradecimentos.....	xvii
1. Considerações iniciais	1
1.1. Introdução	1
1.2. Motivação.....	2
1.3. Objectivos	3
1.4. Limitações e contribuições científicas	5
1.5. Apresentação da tese	6
2. Estado da arte.....	7
2.1. Introdução	7
2.2. Origem do betão como elemento decorativo.....	8
2.3. Betão autocompactável (BAC).....	10
2.4. A cor e os pigmentos.....	12
2.4.1. Introdução.....	12
2.4.2. Pigmentos	13
2.4.3. Efeito dos pigmentos nas propriedades do betão	15
2.4.4. Aspectos que influenciam a cor.....	16

2.5.	Notas finais	17
3.	Principais materiais, equipamentos e ensaios utilizados no estudo.....	19
3.1.	Materiais	19
3.1.1.	Cimento	19
3.1.2.	Cinzas volantes	20
3.1.3.	Agregados	20
3.1.4.	Super-plastificante	21
3.1.5.	Pigmentos	22
3.1.6.	Água	23
3.2.	Ensaio e equipamentos.....	23
3.2.1.	Pastas	23
3.2.2.	Argamassas.....	23
3.2.3.	Betões	24
3.3.	Codificação das cores – ‘software’ Just Color Picker	25
3.4.	Notas Finais	27
4.	Resultados experimentais em Pastas.....	29
4.1.	Introdução.....	29
4.2.	Influência da percentagem de cinzas adicionadas	33
4.3.	Influência do pigmento.....	34
4.4.	Influência do tipo de cimento	36
4.5.	Comparação da ‘performance’ entre pigmentos	38
4.6.	Influência da passagem do tempo.....	39
4.7.	Notas finais.....	41
5.	Resultados experimentais em Argamassas.....	43
5.1.	Introdução.....	43
5.2.	Ajuste da quantidade de super-plastificante	46

5.3.	Influência das areias na cor das argamassas.....	47
5.4.	Resistência de argamassas com pigmento.....	47
5.5.	Notas finais.....	49
6.	Resultados experimentais em Betões	51
6.1.	Introdução	51
6.2.	Resistências à compressão de betões pigmentados	54
6.3.	Análise da cor do betão	56
6.3.1.	Influência do passar do tempo na cor	56
6.3.2.	Influência da percentagem de pigmento adicionado	56
6.3.3.	Catálogo com a definição das cores obtidas através das constituições produzidas	57
6.4.	Notas finais.....	58
7.	Protótipo e propriedades na ‘interface’	61
7.1.	Introdução	61
7.2.	Betonagem, resultados e problemas	62
7.3.	Possíveis Soluções.....	63
7.4.	Propriedades na interface	64
7.5.	Notas finais.....	68
8.	Considerações finais.....	69
8.1.	Introdução	69
8.2.	Conclusões	69
8.3.	Trabalho futuro.....	71
	Referências.....	73
	ANEXOS	75
	Anexo I – pastas (registo fotográfico).....	75

Anexo II – argamassas.....	82
Composições e resultados das argamassas efectuadas com argamassa de referência com 1.6% superplastificante, 45% areia e $V_w/V_{\text{powder}} = 1.0$ (CEM II/A-L 42.5 R).....	82
Registo Fotográfico.....	83
Argamassas efectuadas com argamassa de referência com 1.7% superplastificante, 50% areia e $V_w/V_{\text{powder}} = 0.9$ (CEM II/A-L 42.5 R)	84
Registo Fotográfico.....	85
Anexo III – betões	86
Registo Fotográfico das primeiras composições produzidas.....	86
Registo Fotográfico das composições efectuadas para a betonagem da parede protótipo	87
Anexo IV - Artigos publicados no livro de actas do Encontro Nacional BETÃO ESTRUTURAL (BE2012) realizado na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, de 24 a 26 de Outubro de 2012.	89

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Sede da Vodafone no Porto (fonte: [5]): a) Fotografia original [4], b) Fotografia alterada com contrastes e saturação da cor modificados, c) e d) Sugestões de construção com betão colorido.....	3
Figura 2. Localização da parede a construir futuramente (Fundoa, Madeira).....	4
Figura 3. Estádio Soccer City (Arquitectos Boogertman & Partners Populous) (fonte: [6]).	8
Figura 4. Ciudad de la Justicia (Arquitecto David Chipperfield) (fonte: [7]).	8
Figura 5. Madison Square Children’s Park (Arquitectos George Bloomer City of NY Parks and Recreation) (fonte: [8]).	8
Figura 6. Hotel ESO (fonte: [10]).	10
Figura 7. Casa das Histórias (fonte: [13]).	10
Figura 8. Equipamento utilizado no ensaio de espalhamento (‘Slump Flow’).	24
Figura 9. Equipamento utilizado no ensaio de escoamento (Funil V).	24
Figura 10. Equipamento utilizado no ensaio de passagem (Caixa L).	24
Figura 11. Equipamento utilizado no ensaio de segregação (peneiro).	24
Figura 12. Exemplo de utilização do ‘software’ Just Color Picker.....	25
Figura 13. Influência da adição de cinzas na cor das pastas ($V_w/V_{\text{powder}} = 1.6, 1.5$ e 1.4 respectivamente para 0%, 15% e 30% de cinzas).	34
Figura 14. Influência da percentagem de pigmento adicionado na cor das pastas ($V_w/V_{\text{powder}} = 1.6$)... ..	35
Figura 15. Influência da adição de pigmento amarelo no diâmetro de espalhamento (CEM II/A-L 42.5 R).	36
Figura 16. Influência do tipo de cimento na cor das pastas ($V_w/V_{\text{powder}} = 1.6$).	38
Figura 17. Performance dos pigmentos relativamente ao tingimento das pastas ($V_w/V_{\text{powder}} = 1.6$).	39

Figura 18. Pasta produzida com 0% de cinzas volantes, 10% de pigmento verde e CEM II/B-L 32.5 R (br): a) Estado fresco, b) Estado endurecido aos 7 dias, c) Estado endurecido aos 40 dias.	39
Figura 19. Influência da passagem de estado fresco a endurecido no parâmetro ‘valor’ da cor das pastas: $V_w/V_{\text{powder}} = 1.6$ e 1.4 respectivamente para 0% e 30% de cinzas.	40
Figura 20. Influência da passagem de estado fresco a endurecido no parâmetro ‘saturação’ da cor das pastas: $V_w/V_{\text{powder}} = 1.6$ e 1.4 respectivamente para 0% e 30% de cinzas.	41
Figura 21. Alteração da cor devido à passagem do tempo.	41
Figura 22. Provetes prismáticos com argamassa amarela a serem ensaiados à flexão e à compressão aos 7 dias.	45
Figura 23. Comparação entre valores das duas constituições de argamassas.	47
Figura 24. Resistência à compressão aos 7 dias em provetes pigmentados.	48
Figura 25. Resistência à flexão aos 7 dias em provetes pigmentados.	48
Figura 26. Comparação das resistências entre o betão de referência e os betões pigmentados aos 7 e 28 dias.	55
Figura 27. Resistência à compressão aos 28 e aos 57 dias dos betões produzidos para a betonagem da parede protótipo.	55
Figura 28. Alteração do ‘valor’ da cor no betão amarelo entre o estado fresco e os 7 e 28 dias.	56
Figura 29. Betões produzidos com a adição de pigmento amarelo, em estado fresco: a) Primeira composição efectuada com 10% de pigmento, b) Segunda composição efectuada com 25% de pigmento.	56
Figura 30. Aumento da saturação da cor devido ao incremento de pigmento na mistura de betão.	57
Figura 31. Protótipo a betonar.	61
Figura 32. Problemas na execução da betonagem: a) Dano superficial, b) Falta de aderência na ‘interface’, c) Escoamento indevido do betão.	63
Figura 33. Protótipo betonado.	63

Figura 34. Comparação das resistências em cubos e carotes dos betões após 57 dias.	64
Figura 35. Carotes: a) Protótipo com 2 carotes executadas, b) Carote retirada do protótipo antes de ser preparada para o ensaio de compressão.	65
Figura 36. Processo de obtenção e preparação de carotes: a) Obtenção das carotes, b) Corte, c) Rectificação dos provetes.	65
Figura 37. Desintegração do provete retirado na zona de interface entre o betão de referência e o betão laranja: a) Carote no estado inicial, b) Carote desagregada.	66
Figura 38. Comparação da resistência à compressão entre a ‘interface’ entre o betão de referência, laranja e preto e as resistências individuais dos mesmos betões.	66
Figura 39. Comparação da resistência à compressão da ‘interface’ entre o betão laranja e de referência e as resistências individuais dos mesmos betões.	67
Figura 40. Comparação da resistência à compressão da ‘interface’ entre o betão preto, amarelo, referência e vermelho e as resistências individuais dos mesmos betões.	67

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 1. Sequência de adição de pigmentos em pó (fonte: [1]).	13
Quadro 2. Sequência de adição de pigmentos líquidos (fonte: [1]).	14
Quadro 3. Caracterização dos agregados finos.	21
Quadro 4. Caracterização dos agregados grossos.	21
Quadro 5. Características gerais dos pigmentos utilizados ao longo do estudo.	22
Quadro 6. Composições e resultados das pastas efectuadas com CEM II/A-L 42.5 R (sem adição de pigmento).	29
Quadro 7. Composições e resultados das pastas efectuadas com CEM II/A-L 42.5 R (pigmento amarelo).....	30
Quadro 8. Composições e resultados das pastas efectuadas com CEM II/A-L 42.5 R (pigmento laranja).....	30
Quadro 9. Composições e resultados das pastas efectuadas com CEM II/A-L 42.5 R (pigmento castanho).	30
Quadro 10. Composições e resultados das pastas efectuadas com CEM II/A-L 42.5 R (pigmento vermelho).	31
Quadro 11. Composições e resultados das pastas efectuadas com CEM II/A-L 42.5 R (pigmento preto).	31
Quadro 12. Composições e resultados das pastas efectuadas com CEM II/A-L 42.5 R (pigmento verde).....	31
Quadro 13. Composições e resultados das pastas efectuadas com CEM II/B-L 32.5 N.	32
Quadro 14. Composições e resultados das pastas efectuadas com CEM II/B-L 32.5 R (br).	32
Quadro 15. Registo fotográfico das pastas produzidas com CEM II/A-L 42.5 R em estado fresco e endurecido (sem adição de pigmentos).	33

Quadro 16. Registo fotográfico das pastas produzidas com 0% de cinzas volantes e 10% de pigmento amarelo.	37
Quadro 17. Composições e resultados das argamassas efectuadas as quais dão seguimento às composições de betão obtidas.....	44
Quadro 18. Correspondência entre percentagens de pigmentos adicionados em massa e a respectiva percentagem em volume.	45
Quadro 19. Ajuste da quantidade de super-plastificante quando se introduz pigmentos ($V_{\text{pigmento}}/V_{\text{powder}}=10\%$).	46
Quadro 20. Parâmetros e quantidades por m^3 das amassaduras dos primeiros betões produzidos.....	52
Quadro 21. Propriedades do estado fresco das composições de teste.	52
Quadro 22. Parâmetros e quantidades das amassaduras dos betões produzidos para a betonagem da parede.	53
Quadro 23. Propriedades do estado fresco dos betões produzidos para o protótipo.	54
Quadro 24. Catálogo dos betões produzidos através das duas composições elaboradas (estado fresco e estado endurecido após 28 dias).	58
Quadro 25. Resistência à compressão das carotes retiradas do protótipo.	68

NOTAÇÃO E SIMBOLOGIA

Notação/Simbologia	Unidade	Significado
br		Branco
d	[mm]	Diâmetro de espalhamento
fa	[g,%,kg/m ³]	Cinzas volantes
S _p	[g,kg,%, kg/m ³]	Super-plastificante
w	[g]	Água
<hr/>		
V _{fa}	[m ³]	Volume de cinzas volantes
V _{powder}	[m ³]	Volume de finos
V _w	[l, m ³]	Volume de água
<hr/>		
H ₂ /H ₁	[-]	Rácio entre a profundidade média do betão na secção horizontal da caixa L e a profundidade média do betão na secção vertical, denominado de índice de capacidade de passagem na caixa L
M _{pigmento} /M _{cimento}	[%]	Rácio entre pigmento e cimento (massa)
M _{pigmento} /M _{powder}	[-]	Rácio entre pigmento e finos (massa)
S _p /powder	[-]	Rácio entre super-plastificante e finos (massa)
V _{fa} /V _{powder}	[%]	Rácio entre cinzas volantes e finos (volume)
V _g /V _{g,lim}	[-]	Rácio entre o volume de agregados grossos incorporado e o volume limite de agregados grossos (baridade não compactada)
V _{g1} /V _g	[%]	Rácio entre o volume de ‘brita 4/10’ e o volume total de brita
V _{g2} /V _g	[%]	Rácio entre o volume de ‘brita 8/16’ e o volume total de brita
V _{pigmento} /V _{powder}	[-]	Rácio entre pigmento e finos (volume)
V _{s1} /V _s	[%]	Rácio entre o volume de ‘areia 0/2’ e o volume total de areia
V _{s2} /V _s	[%]	Rácio entre o volume de ‘areia 0/4’ e o volume total de areia
V _{sp} /V _m	[%]	Rácio entre o volume de super-plastificante e o volume de argamassa
V _{sp} /V _{powder}	[%]	Rácio entre o volume de super-plastificante e o volume de finos
V _w /V _{powder}	[-]	Rácio entre água e finos (volume)

Al ₂ O ₃		Óxido de Alumínio
SiO ₂		Óxido de Silício
BAC		Betão Autocompactável
EN		Norma Europeia
HEX	[00-FF,00- FF,00-FF]	Hexadecimal
HSB	[°,%,%]	Hue, Saturation, Brightness
HSL	[°,%, -]	Hue Saturation Lightness
HSV	[°,%,%]	Hue Saturation Value
HTML	[00-FF,00- FF,00-FF]	Hyper Text Markup Language
NP		Norma Portuguesa
RGB	[-, -, -]	Red Green Blue

APEB		Associação Portuguesa das Empresas de Betão Pronto
BASF		Badische Anilin und Soda-Fabrik
Betomadeira		Betões e Britas da Madeira, S.A.
Brimade		Sociedade de Britas da Madeira, Lda.
ESO		European Southern Observatory
LCM		Laboratório Cimentos Madeira
RAM		Região Autónoma da Madeira
RILEM		Réunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux, systèmes de construction et ouvrages
UMa		Universidade da Madeira

AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer a preciosa ajuda do Professor Doutor Lino Maia, que para além de me orientar tecnicamente ao longo da preparação da dissertação, ofereceu sempre a sua compreensão e apoio nos momentos mais complicados. Agradeço não só o seu profissionalismo e capacidade de transmissão clara de conhecimentos como também a sua amizade e componente humana sempre muito presente. Gostaria de agradecer também ao meu co-orientador Dr. Miguel Guimarães e a toda a empresa Cimentos Madeira que proporcionou todo o desenvolvimento laboratorial e prático deste trabalho, nomeadamente com a prestação de apoio e esclarecimentos técnicos e cedência de materiais. Agradeço especialmente o contributo do Sr. Miguel Dinis, Sr. Nélio Vieira, Sr. José António, Sr. Júlio, Sr. Norberto, Sr. Venâncio e Sr. Luís. Também agradeço à empresa BASF pelo fornecimento do super-plastificante e pigmentos utilizados ao longo do trabalho, bem como à Brimade pelo fornecimento dos agregados.

Deixo igualmente um grande obrigado a todos os meus colegas e amigos de mestrado, nomeadamente Sílvia Sousa, Jéssica Fernandez, Cátia Caetano, Armando Ramos, Cláudio Silva, Luís Luciano, João Drumond, Roberto Aguiar, Vitor Macedo e Celestino Gomes, pelo seu apoio, camaradagem e amizade. Obrigada pelas manhãs, pelas tardes e pelas noites em claro que passámos a estudar e trabalhar, mas onde nunca faltou a boa disposição, a amizade, a entreaajuda e a gargalhada de sempre. Um grande obrigado a todos os restantes amigos que me apoiaram igualmente e demonstraram sempre uma grande amizade. Obrigada Alexandra Teixeira, Anita Abreu, Daniel Félix e Teresa Costa. Por fim, mas nunca menos importante, queria expressar o mais profundo agradecimento à minha família, os quais sempre me deram um apoio incondicional, sempre me deram ânimo nos momentos mais difíceis, força e incentivo aquando do cansaço. Obrigada mãe, pai, Hércules, Márcio, Paulo, Martim, Cátia, Dina e avó. Dedico especialmente este trabalho ao meu avô, que infelizmente não teve a oportunidade de presenciar a defesa, tendo falecido pouco tempo antes da mesma.

E como não poderia deixar de ser referido, agradeço a Deus por tudo, pelas horas boas e pelas menos boas, pela força de vontade, pela inspiração, por todos os minutos cruciais de aprendizagem, pela beleza de criar e descobrir, pela vida.

Funchal, Setembro 2012

Joana Silva

1

CONSIDERAÇÕES INICIAIS

1.1. INTRODUÇÃO

Correntemente assiste-se a uma grande evolução nas soluções arquitectónicas, o que implica um progresso simultâneo dos materiais utilizados na construção civil. O ‘betão aparente’ é um conceito que tem vindo a ser cada vez mais utilizado, sendo que se pretende tirar o máximo partido das características estéticas da estrutura e dos materiais que a constituem [1]. Para além da tendência minimalista nas edificações, assiste-se também a uma grande e variada introdução de cor nas mesmas. Tratando-se de um betão aparente, o betão colorido surge assim como uma alternativa interessante aos acabamentos superficiais, nomeadamente tintas e ladrilhos. 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 exhibir o betão e todas as suas potencialidades [2]. Note-se que, entre os diversos tipos de pigmentos, os pigmentos sintéticos em pó são os mais correntemente utilizados. Contudo, recentemente surgiram no mercado uma nova gama de pigmentos líquidos.

Sendo o betão colorido um betão produzido para ficar à vista, exige-se que a superfície seja o mais perfeita possível. Refira-se que, pelo facto de não necessitar de compactação, o betão autocompactável (BAC) conduz a superfícies mais homogéneas e regulares do que o betão ‘convencional’.

Nota: Importa referir que o BAC foi utilizado tendo em conta a obtenção de superfícies regulares, no entanto o uso de ‘betão convencional’ também poderia ser considerado se o efeito estético pretendido fosse outro.

Para além desta tecnologia exigir um bom acabamento superficial é igualmente essencial que se produzam betões cuja pasta inicial (antes da introdução do pigmento) seja clara de forma a obter cores

nítidas. Vulgarmente recorre-se a cimento branco e a agregados claros (*e.g.* calcários) para a obtenção de cores mais nítidas e brilhantes [3]. Contudo, actualmente, na Região Autónoma da Madeira (RAM): (i) o cimento branco e o filler calcário não estão correntemente disponíveis no mercado, (ii) todos os agregados (grossos e finos) usualmente disponíveis no mercado são de origem vulcânica (ou seja, de cor escura) e britados. Assim, facilmente se compreende que, até ao início deste trabalho, fossem desconhecidas aplicações com BAC e escassas as aplicações com betões coloridos na RAM.

Visto que o betão colorido se obtém através da introdução de pigmentos no betão, então pode-se produzir betão em tons térreos, amarelo, vermelho, azul e verde (para além dos mais usuais: cinza, preto e branco). Pode-se observar, correntemente, o uso de betão colorido em diversas estruturas (nomeadamente: pavimentos, painéis, peças pré-fabricadas), contudo por serem peças isoladas ou sem esforços significativos a problemática da interacção entre os vários betões coloridos, a resistência e durabilidade nas ‘interfaces’ tem sido ignorada.

1.2. MOTIVAÇÃO

O edifício sede da Vodafone no Porto (considerado um dos 20 edifícios de escritório mais “surpreendentes e criativos” do mundo, pelo site de arquitectura e design “Cool Hunter” [4]), cuja autoria do projecto é dos arquitectos José António Barbosa e Pedro Guimarães (Figura 1a)) foi a grande motivação deste estudo). Este edifício foi construído em betão autocompactável branco e cobre-se de saliências e reentrâncias, apresentando soluções muito inovadoras em Portugal. Foi inspirado no ‘slogan’ da empresa (“Vodafone life, life in motion”) [5].

Assim, a grande motivação deste trabalho foi responder à seguinte questão: utilizando somente os materiais correntemente disponíveis no mercado da RAM, será possível a construção de um edifício semelhante mas com painéis com cores diferentes?

Note-se que as Figura 1 b), c) e d) estão alteradas relativamente à saturação e contraste dos tons originais. Este facto deve-se à tentativa de visualizar melhor os diversos painéis que constituem a fachada e os seus contornos individuais para mais facilmente se efectuar e perceber as propostas de coloração representadas nas Figura 1 c) e d). Na projecção das sugestões efectuadas na Figura 1 c) e d), teve-se em atenção o seguimento dos painéis realmente existentes na estrutura, seguindo os seus contornos e declives. Para melhor percepção do que foi dito, foram representados alguns contornos desses mesmos painéis na referida figura. A coloração proposta foi baseada nas cores do vitral de entrada do edifício e no ‘slogan’ que inspirou o projecto do mesmo “Vodafone life, life in motion”. De forma a representar uma das problemáticas presentes neste estudo, em alguns painéis propôs-se uma

coloração com 2 betões diferentes (havendo uma ‘interface’ entre eles). Estas propostas são apenas sugestões (mas que estiveram na base da motivação deste trabalho), sendo que quando se utiliza betão colorido, as soluções possíveis são imensas.

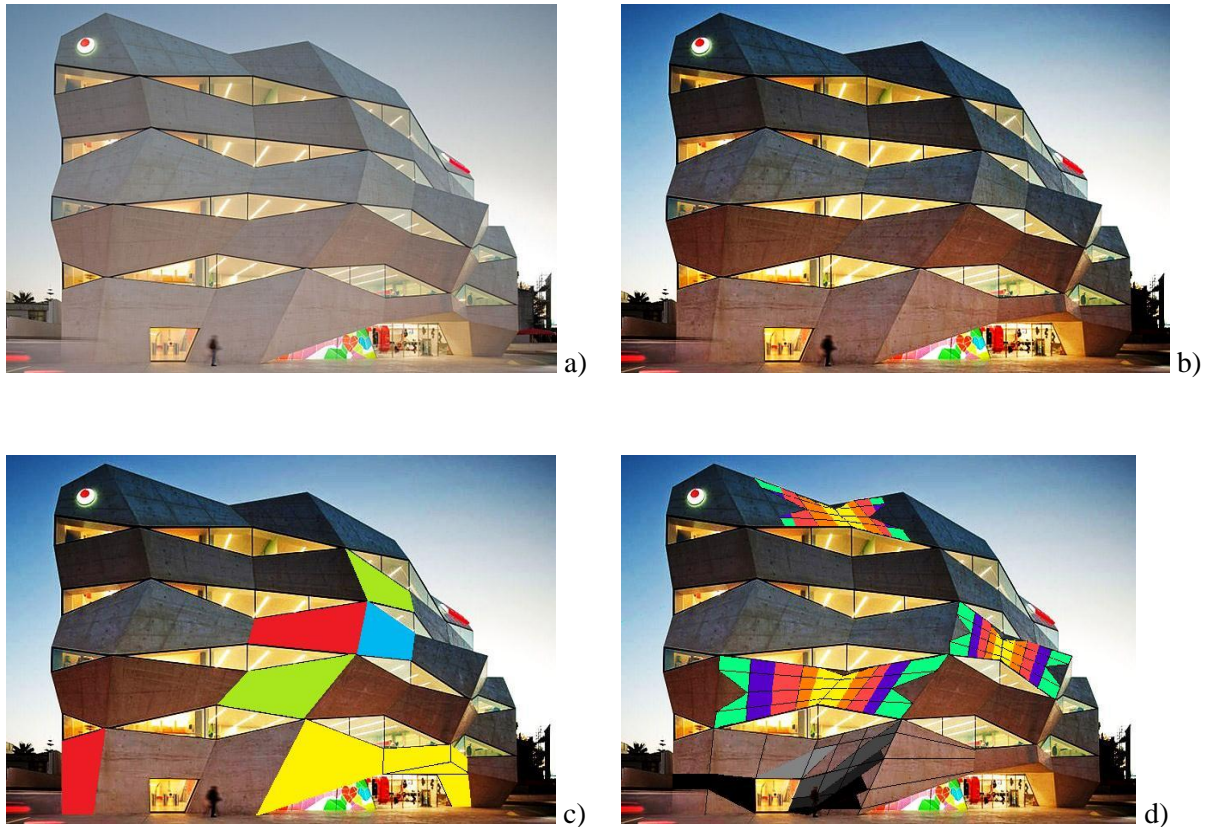


Figura 1. Sede da Vodafone no Porto (fonte: [5]): a) Fotografia original [4], b) Fotografia alterada com contrastes e saturação da cor modificados, c) e d) Sugestões de construção com betão colorido.

1.3. OBJECTIVOS

O objectivo principal deste trabalho foi a produção de betão colorido. Como tal ambiciona-se futuramente construir um muro com 8 metros de altura e 7 metros de comprimento com betão colorido. Esta parede irá situar-se na RAM (Figura 2) e pretende-se que na sua construção sejam utilizados apenas os materiais correntemente disponíveis na RAM.

Sabendo que a coloração de betão cujo ligante utilizado é o cimento Portland convencional e os agregados são escuros (basálticos) constitui por si só um desafio complicado para produzir cores brilhantes e nítidas [3], o primeiro objectivo deste trabalho era: produzir betões coloridos utilizando os materiais que estão correntemente disponíveis no mercado da RAM: cimento Portland cinzento, cinzas volantes (recentemente disponibilizadas no mercado da RAM – o filer calcário não estava disponível

na RAM); agregados (grossos e finos) britados de origem vulcânica e uma nova gama de pigmentos líquidos recentemente introduzida no mercado Português. Visto que o betão colorido é um betão aparente, ou seja, que é um betão que deve ter um acabamento superficial o mais perfeito possível, no estabelecimento dos objectivos deste trabalho foi decidido que os betões produzidos deveriam ser autocompactáveis (Nota: embora os materiais disponíveis não fossem os mais adequados para produzir BACs, considerou-se vital o facto dos BACs conduzirem a um acabamento superficial mais perfeito do que os betões ‘convencionais’).



Figura 2. Localização da parede a construir futuramente (Fundoa, Madeira).

Para além da produção de BACs coloridos, pretendia-se neste trabalho conhecer a influência dos pigmentos líquidos nas propriedades dos BACs, nomeadamente no estado fresco (deformabilidade) e no estado endurecido (resistência).

Para além disso, pretendia-se executar uma pequena parede (protótipo em laboratório) com diversos tipos de BAC coloridos para investigar várias problemáticas relacionadas com a construção de edifícios semelhantes aos apresentados nas Figura 1 c), d), ou seja: questões relacionadas com a ‘interface’ entre composições com cores diferentes (ligação entre os betões, resistência, durabilidade).

Paralelamente, este trabalho tinha também como objectivo desenvolver uma metodologia de catalogação/quantificação da cor nos betões coloridos através de meios informáticos e estudar a evolução das cores com o envelhecimento e exposição ambiental dos betões.

1.4. LIMITAÇÕES E CONTRIBUIÇÕES CIENTÍFICAS

A principal limitação científica deste trabalho resume-se aos materiais utilizados (disponíveis), nomeadamente ao nível dos agregados (britados de origem vulcânica), do material fino (cinzas volantes) e dos pigmentos (líquidos). Nesse sentido, a extrapolação dos resultados encontrados para outro tipo de materiais deve ser cuidadosa, principalmente ao nível das cores obtidas.

Relativamente ao trabalho experimental podem-se apontar restrições do ponto de vista económico. A execução das cofragens estava limitada aos meios disponíveis (quer em termos de materiais, quer em termos de mão-de-obra especializada).

O facto de todo o trabalho experimental ter sido desenvolvido em apenas três meses levou a que só fosse possível estudar a evolução da cor do betão nas idades jovens.

Julga-se que a forma de introdução dos pigmentos (por substituição de igual volume de água) terá condicionado significativamente os resultados obtidos, principalmente na influência no estado fresco e na resistência. Visto tratar-se de uma forma diferente da vulgarmente utilizada, os resultados obtidos neste trabalho carecem de comparação com a literatura.

Em termos de contribuições científicas, importa realçar: (i) a possibilidade de produção de betões coloridos mesmo utilizando agregados basálticos e cinzas volantes; (ii) os resultados devido à introdução de pigmento por substituição de igual volume de água; (iii) a aplicação de uma abordagem mais informatizada para catalogação das cores dos betões.

Finalmente, refira-se que fazia parte dos objectivos deste trabalho a divulgação dos resultados obtidos. Assim, para além da presente tese, foram produzidos dois artigos científicos (a autora desta dissertação foi primeira autora num dos artigos e foi segunda autora no outro artigo). Estes artigos foram 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. Para além disso podem ser consultados no final da presente dissertação (ver Anexo IV - Artigos publicados no livro de 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. **J. Silva**, C. Gomes, M. Guimarães, L. Maia, Betão Autocompactável de elevado efeito estético.
2. C. Gomes, **J. Silva**, M. Guimarães, L. Maia, Dimensionamento de betões autocompactáveis coloridos com agregados artificiais vulcânicos.

1.5. APRESENTAÇÃO DA TESE

A presente tese é constituída pelo presente capítulo onde se apresenta a motivação, estabelecem-se os objectivos e se indicam as principais limitações e contribuições do trabalho. Posteriormente, no capítulo 2, descreve-se o estado da arte, bem como os tipos de pigmentos existentes e a sua influência nas propriedades finais do betão. São descritos também os aspectos que influenciam a cor final do betão. No capítulo 3 apresentam-se os principais materiais, equipamentos e ensaios utilizados ao longo do estudo. O capítulo 4 descreve os ensaios efectuados nas pastas produzidas como primeiro passo no estudo do betão, os seus resultados e conclusões. Da mesma forma, no capítulo 5 descreve-se o estudo efectuado sobre as argamassas e no capítulo 6 o estudo no âmbito dos betões. No capítulo 7 faz-se referência ao protótipo betonado com intuito de pôr em prática os objectivos propostos, averiguar possíveis limitações e complicações e propor soluções para trabalhos futuros. No mesmo capítulo descrevem-se também as propriedades nas ‘interfaces’ entre os vários betões coloridos, possíveis de analisar devido às carotes efectuadas na mesma parede protótipo. Finalmente, no capítulo 8, apresentam-se as considerações finais e principais conclusões do estudo, bem como a sugestão de trabalhos futuros complementares ao presente estudo.

2

ESTADO DA ARTE

2.1. INTRODUÇÃO

Ao longo dos tempos a importância e o papel do betão na estrutura e aspecto final das edificações tem-se alterado e complementado. O que era inicialmente e desde sempre um material estrutural, adquiriu uma forte componente estética no chamado ‘betão aparente’, em que o betão fica à vista em vez de ser revestido. Esta alteração na mentalidade deu-se através de vários trabalhos arquitectónicos no início do século XX, nomeadamente nas obras de Le Corbusier e Frank Lloyd Wright, entre outros arquitectos contemporâneos. O movimento do “Brutalismo”, após a segunda guerra mundial (entre as décadas 50 e 80) foi o impulso crucial para o betão aparente surgindo uma tendência ascendente de expor a estrutura nas edificações e por conseguinte o betão, aproveitando a cor e textura do material. Com o aproveitamento das potencialidades estéticas do betão começou-se a inserir pigmentos na mistura para obter betões coloridos, bem como o uso de cimento branco para a produção de betão branco. Com o intuito de colorir o betão através do uso de pigmentos ou através de agregados expostos, é benéfico partir de um betão branco, principalmente para betões em tons claros. No final do século XX o arquitecto Aron Losonczy cria o betão translúcido. Outras formas de betão foram criadas, nomeadamente o betão fotografado e o betão fotocatalítico, que tem em atenção não só a estética como também a sustentabilidade.

No que respeita ao betão colorido, este é utilizado correntemente em peças pré-fabricadas, painéis (*e.g.* Estádio Soccer City em Johannesburgo – Figura 3) e pavimentos. Em termos de utilização *in situ* e em superfícies verticais, o seu uso é ainda muito escasso. Um bom exemplo dessa utilização é a ‘Ciudad de la Justicia’, em Barcelona (Figura 4). Contudo, em todas estas aplicações pode-se verificar que se tratam de peças da mesma cor, quer na totalidade do edifício (*e.g.* Ciudad de la Justicia), quer em

painéis (superfícies finitas e estanques pré-fabricadas). Apenas em superfícies horizontais (pavimentos) se podem verificar transições e ‘interfaces’ entre vários betões coloridos (Figura 5).



Figura 3. Estádio Soccer City (Arquitetos Boogertman & Partners Populous) (fonte: [6]).



Figura 4. Ciudad de la Justicia (Arquitecto David Chipperfield) (fonte: [7]).



Figura 5. Madison Square Children's Park (Arquitetos George Bloomer City of NY Parks and Recreation) (fonte: [8]).

2.2. ORIGEM DO BETÃO COMO ELEMENTO DECORATIVO

Toda a evolução do ponto de vista arquitectónico, nomeadamente do movimento do “Brutalismo”, preconizado por Frank Lloyd Wright, Le Corbusier e outros arquitectos, que puseram em marcha o conceito de ‘betão aparente’ foi crucial na história e desenvolvimento do betão decorativo. Neste sentido começaram-se a adicionar pela primeira vez (de forma intencional) pigmentos nos betões de modo a conseguir um acabamento específico da estrutura que ficava à vista [1].

O betão colorido teve a sua origem entre 1890 e 1920, período esse em que fabricantes de elementos de fachadas tiveram a ideia de introduzir pigmentos no betão fresco de modo a colorir as peças produzidas. Durante a passagem do século XIX para o século XX, muitos foram os denominados de ‘artesãos’ do betão que inseriram pigmentos para colorir peças isoladas, no entanto de forma a manter expostas as superfícies ao longo de toda a vida útil da estrutura, era necessário que o produto final

(betão colorido) fosse homogéneo, consistente e durável ao longo dos anos. Em 1915 Lynn Scofield fundou a primeira fábrica de pigmentos para betão, denominada de L.M. Scofield Company. Em 1920 Lynn mudou as instalações da fábrica para Los Angeles onde teve muitos clientes famosos que utilizaram os seus materiais na construção das suas casas, nomeadamente Charlie Chaplin, Groucho Marx e Mary Pickford.

Em termos de manchas químicas, o arquitecto Gilbert Stanley Underwood foi, provavelmente, o primeiro a utilizar essa técnica em pavimentos em 1927 no Yosemite Valley Awhanee Hotel. Mike Miller teve um papel muito importante no lançamento destes produtos químicos dado que incentivou o seu uso na década de 80.

No início de 1900 eram utilizados moldes ‘formliners’ para criar paredes arquitectónicas. Esses moldes eram habitualmente concebidos em gesso e destruídos depois de utilizados. Em 1960 Buck Scott inventou moldes reutilizáveis feitos de uretano, os quais tiveram grande sucesso. Glen Roman adaptou a técnica de ‘estêncis’ de adesivo para aplicação em betão decorativo.

Em 1938 John Crossfield inventou um sistema de recobrimento através da mistura de látex com cimento Portland. Mais tarde, e devido à escassez do látex, após a 2ª Guerra Mundial, passou-se a utilizar para o mesmo efeito resina de polímeros. Hoje em dia esta aplicação tem um potencial artístico bastante elevado, dado que possibilita a introdução de cor, padrões e texturas em superfícies quer horizontais, quer verticais.

Em 1950, Brad Bowman inventou um sistema para produzir padrões no betão. Em 1956 Bill Steigmeier produziu um sistema de látex de criação de texturas para betão fresco. Jon Nasvik, em 1970, foi o primeiro a conseguir os dois efeitos supracitados ao mesmo tempo e com a utilização de ferramentas bem mais leves (uretano) do que Bowman. Nessa altura, a corporação Disney fez uso desses padrões na construção em Orlando.

Em 1978 Gerald Brasseaux inventou um sistema de padronização e incorporação de textura e cor no betão através de papel. Buddy Rhodes criou a primeira empresa a se especializar em bancadas feitas de betão, por volta de 1980. O polimento das superfícies de betão, é uma técnica que também melhora a qualidade das superfícies expostas e tem sido usada com muita frequência desde cerca de 1991 na Europa e 1999 nos Estados Unidos. Esta técnica permite a exposição de cores, padrões e ainda dos agregados [9].

Actualmente existem diversas aplicações interessantes de betão colorido espalhadas pelo globo. Uma delas é o Hotel ESO (Figura 6) projectado pelos arquitectos Auer & Weber Architekten, construído

entre 1998 e 2002. Este foi concebido para servir de casa de hóspedes aos cientistas que trabalham no observatório do deserto chileno de Atacama e constitui-se por betão colorido com pigmento de óxido de ferro em tom vermelho térreo [10].



Figura 6. Hotel ESO (fonte: [10]).

Em Portugal, importa salientar a notável obra “Casa das Histórias Paula Rêgo” (Figura 7) da autoria do Arquitecto Souto Moura, concebida para albergar um museu, o qual é constituído por betão pigmentado vermelho. Esta obra, situada em Cascais, foi projectada em 2005 e construída entre 2008 e 2009 [11], ganhando o prémio Secil em 2010 [12]. Importa referir que se desconhecem edifícios construídos com betão colorido na RAM.



Figura 7. Casa das Histórias (fonte: [13]).

2.3. BETÃO AUTOCOMPACTÁVEL (BAC)

O BAC torna-se uma criação bastante proveitosa do ponto de vista de um acabamento superficial regular, ideal para ser exposto, onde também é possível a adição de pigmentos para a sua coloração [1].

O betão autocompactável surgiu na década de 80, apresentando muitas vantagens relativamente ao betão ‘convencional’. Uma das maiores vantagens deste material é o facto de não necessitar de energia

extra para a compactação, ou seja, compacta-se pelo peso próprio através da acção da gravidade [18]. O facto de não precisar de compactação, permite que seja utilizado em locais onde dificilmente se poderia compactar por falta de meios de fazer lá chegar o equipamento próprio para o efeito. Tudo isto contribui para uma diminuição do ruído em obra, ganho de tempo e energia previstos para a compactação, bem como para a saúde e segurança dos operários em obra. Por outro lado conduz à obtenção de acabamentos com melhor qualidade principalmente em elementos de geometria complexa. O desenvolvimento deste material teve como impulso um estudo efectuado no Japão, mais especificamente na Universidade de Tóquio, através dos investigadores Okamura e Ozawa, seguidos de estudos na América do Norte, Estados Unidos, Canadá e Reino Unido.¹ Os estudos na Europa, relativamente a este material, eram escassos e só na década de 90 começou-se a incidir seriamente neste estudo, com especial contributo de alguns investigadores, nomeadamente de Peter Bartos e da RILEM através da comissão técnica TC 145-WSM, no desenvolvimento do tema “*Workability of Special Concrete Mixes*”.² De acordo com a pesquisa bibliográfica efectuada, os primeiros estudos sobre BAC em Portugal foram realizados por S. Nunes em 2001 [19]. Em termos de aplicações, uma das construções mais interessantes deste material em Portugal é a Sede da Vodafone no Porto construída com betão autocompactável branco.

Actualmente, existe já um elevado número de publicações sobre a tecnologia do BAC, assim como várias normas e directrizes, nomeadamente: pr EN 206-9: 2007, EN 12350 (partes 8 a 12) e “*European Guidelines for Self-Compacting Concrete: Specification, Production and Use*” (Guia para a Especificação, Produção e Utilização de BAC), entre vários relatórios da RILEM (Réunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux, systèmes de construction et ouvrages). Contudo, muito provavelmente devido aos materiais correntemente disponíveis para a produção de betão na RAM, desconheciam-se até ao início deste trabalho aplicações de BAC na Madeira. Note-se que até ao início deste trabalho, na RAM não existiam os equipamentos necessários para aferir a autocompactabilidade de um BAC.

¹ De acordo com Nunes, S., Betão Auto-Compactável: Tecnologia e Propriedades, in Departamento de Engenharia Civil. 2001, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto: Porto. p. 198.

² De acordo com Silva, P. and J. Brito, Betão auto-compactável (BAC) - estado actual do conhecimento, in Revista de Engenharia Civil da Universidade do Minho 2009, Universidade do Minho: Minho. p. 13-32.

2.4. A COR E OS PIGMENTOS

2.4.1. INTRODUÇÃO

A coloração de betão tem sido feita nas últimas décadas através de diferentes técnicas e diferentes tipos de pigmentos. Os pigmentos não são nocivos para o betão uma vez que, sendo inertes, não reagem com o cimento nem com os agregados. Em geral, estes materiais devem possuir resistência à alcalinidade do cimento, bem como à exposição solar e às intempéries [1]. Segundo a empresa “Concrete Colour Systems”, os pigmentos não sofrem alterações com o tempo, nem através dos raios ultra-violetas, providenciando uma cor permanente no betão. São insolúveis na maior parte dos líquidos, incluindo a água. São alcalino-resistentes, inofensivos para o ambiente e não interferem com a hidratação do cimento [20].

Um dos aspectos que mais afecta o comportamento dos pigmentos utilizados e mais influencia na escolha do tipo de pigmento é a tecnologia de medição usada para quantificar os mesmos [21].

Em geral, os pigmentos mais utilizados para tingir o betão são produtos sintéticos (não orgânicos) à base de óxidos de ferro (obtenção da gama de cores entre o amarelo, ocre, vermelho, laranja, castanho e preto), óxido de crómio (obtenção de tonalidades verdes) e cobalto (tons azuis). É de salientar ainda que o betão branco se obtém, não pela adição de qualquer tipo de pigmento mas sim pela utilização de cimento branco. Para além das substâncias supracitadas, enquanto pigmentos, também já foram utilizadas matérias orgânicas (mais económicas), mas estas só conseguem produzir tons térreos, amarelo ou vermelho no betão [22].

Os pigmentos utilizados no fabrico de betão colorido podem ser granulados, pós, líquidos [3] e compactos [21]. A dosagem de pigmento faz-se usualmente em relação à massa de cimento incorporada na mistura e tem uma variação entre 1 a 7%, dependendo do tipo de pigmento e do próprio fabricante. Para a obtenção de tons mais fortes, pode-se utilizar até 10% de pigmento relativamente à massa de cimento, não excedendo este valor dado que pode reduzir a capacidade resistente do betão e não melhora a cor obtida [3].

Os pigmentos escuros absorvem mais a radiação solar, incrementando a possibilidade de alteração da sua tonalidade ao longo do tempo [1].

A adição de pigmentos pode ser efectuada quer em obra, quer em fábrica, no caso de peças pré-fabricadas. O facto de adicionar pigmentos no betão não altera a ordem de trabalho, contudo ao retirar

as cofragens é necessário ter cuidado para não o fazer prematuramente dado que a água de amassadura ao evaporar pode alterar a cor da superfície.

Em alguns casos, torna-se mais económico o uso de betão integralmente colorido do que betão com superfície revestida (com possível coloração), contudo se se considerar apenas o betão convencional sem revestimento e o betão colorido, este último será mais caro. Ao longo do ciclo de vida da estrutura, e por não precisar de reposição ou manutenção cuidada, o betão colorido pode tornar-se muito mais económico do que o uso de revestimentos. No caso de estruturas com vida útil alargada, como é o caso de pontes, este facto pode ser ainda mais notável. Considerando um tempo de vida útil da estrutura de 100 anos, e do revestimento de 25 anos, significaria que seriam necessários 3 novos revestimentos até ao final da vida útil da estrutura, enquanto que o betão integralmente colorido apenas precisaria de alguma limpeza esporádica [2].

2.4.2. PIGMENTOS

2.4.2.1. PIGMENTOS SÓLIDOS

Os pigmentos em pó são a mais antiga técnica de colorir betão. Apesar de ser muito utilizada apresenta problemas de manuseio dado que normalmente a pesagem é feita pela mão do operário. Para resolver esse problema hoje em dia existem embalagens pré-pesadas de pigmento que se pode adicionar directamente à mistura de betão. Por outro lado ainda se verifica a necessidade de protecção dos mesmos da humidade antes da sua utilização [3]. No Quadro 1 apresenta-se a sequência vulgarmente utilizada na mistura das composições que incorporam pigmentos em pó.

Quadro 1. Sequência de adição de pigmentos em pó (fonte: [1]).

Cimento+Pigmento	⇒	Cimento+Pigmento+Agregado	⇒	Cimento+Pigmento+Agregado+Água
Pré-mistura a seco		Pré-mistura a seco		Mistura a húmido

Os pigmentos granulados surgiram no final de 1980 [21] como alternativa aos pigmentos em pó para diminuir o problema da sua pesagem e dosagem. Existem sistemas próprios que doseiam os pigmentos granulados fazendo com que o processo se torne mais automatizado e com menos margem para erro. Desta forma é possível fazer quantidades superiores de betão sem a utilização de saquetas individuais de pigmento. Contudo, o problema de armazenamento longe da humidade mantém-se [3]. Note-se que para além do pigmento, os grânulos contêm um agente dispersante e/ou ligante. Este tipo de pigmento

pode ser combinado com aditivos adicionais para uma melhoria da cor e para evitar possíveis eflorescências [21].

O pigmento compacto foi desenvolvido em 1990 e é um material intermédio entre o pó e o ‘spray-dried’ de grânulos. Este material não tem tantos problemas de transporte e pesagem quanto o pó porque não possui poeiras e é menos dispendioso do que o pigmento granular [21].

2.4.2.2. PIGMENTOS LÍQUIDOS

Os pigmentos líquidos surgiram no início do ano 1980 [21]. Este tipo de pigmento consiste numa mistura de partículas suspensas num líquido que normalmente é água. A sua dosagem é normalmente feita de forma automática, anulando qualquer tipo de erro do operador. Com um tempo de amassadura mínimo, permite uma coloração homogénea do betão, quando correctamente misturado [3]. Para além disto os pigmentos líquidos possuem uma maior capacidade de tingimento, exigindo uma mistura menos intensa (manual ou em camião betoneira).

Ao contrário dos pigmentos em pó, os pigmentos líquidos devem ser introduzidos após misturar previamente o cimento com os agregados e com cerca de 50% da água (Quadro 2).

Tal como referido nos pigmentos granulares, a este material pode-se juntar aditivos que proporcionam uma melhoria da cor e evitam a eflorescência [21].

Quadro 2. Sequência de adição de pigmentos líquidos (fonte: [1]).

Agregados	⇒	Cimento	⇒	50% Água total	⇒	Pigmento+Aditivo	⇒	50% Água total
-----------	---	---------	---	----------------	---	------------------	---	----------------

A presença de água nos pigmentos líquidos pode causar problemas no âmbito da betonagem. Se a água presente nos agregados for suficiente para a produção de betão, a água dos pigmentos estará em excesso. Para além desse problema a existência de água ainda agrava o transporte dos pigmentos [21]. Uma outra forma de pigmentos líquidos que surgiu de modo a diminuir os problemas de transporte supracitados é o tipo de pigmento que se encontra em pó e ao qual é adicionado água após a chegada à obra. Este tipo de pigmento foi muito pouco utilizado, não apresentando as vantagens dos pigmentos líquidos usuais (não apresentam um efeito homogéneo mesmo aquando da mistura com água e não resistem à precipitação) [21].

2.4.2.3. PIGMENTOS SINTÉTICOS E PIGMENTOS ORGÂNICOS

Os pigmentos sintéticos (ou não orgânicos) são os mais utilizados na indústria, sendo que são mais duráveis e eficientes do que os orgânicos (tingem com mais intensidade) [1]. Os pigmentos orgânicos são mais económicos do que os pigmentos inorgânicos, no entanto tingem menos e são menos duráveis [1]. Este tipo de pigmentos é facilmente afectado pelos raios ultra-violeta [23].

2.4.3. EFEITO DOS PIGMENTOS NAS PROPRIEDADES DO BETÃO

Em termos das propriedades resistentes do betão, pode-se verificar em diversos estudos já elaborados que quase não se alteram. Dependendo do pigmento pode haver um decréscimo (pouco significativo) da resistência à compressão e do módulo de elasticidade. No entanto é a partir dos 10% de adição de pigmento que se começa a notar um decréscimo significativo da resistência [3]. Segundo Corinaldesi et al. [24] a adição de pigmentos implica a redução da resistência à compressão do betão até 3 MPa. Foram feitos estudos a nível de pavimentos e o betão colorido com pigmentos de óxido de ferro demonstrou-se com uma boa capacidade de resistência ao gelo/degelo, bem como aos sais de degelo [25].

Num outro estudo, feito com betão autocompactável, onde foram utilizados como pigmentos óxidos de ferro e cobalto, demonstra-se que através da adição ajustada de filler calcário o efeito dos pigmentos nas propriedades reológicas do cimento aquando da amassadura das pastas, pode ser diminuído ou mesmo anulado. Se não se proceder a pequenos ajustes na amassadura, principalmente no que toca aos finos, os pigmentos têm um efeito significativo na fluidez (há um aumento de viscosidade plástica) e coesão do betão. Em geral os pigmentos fazem aumentar a coesão, pelo que se deve diminuir os finos para evitar esse efeito, quando danoso. Em termos de durabilidade e deformação a adição de pigmentos demonstra-se inofensiva [24].

Contudo, contrariamente ao que os outros autores relatam, segundo Ivanauskas et al. [26], a adição de pigmentos compostos de óxido de ferro, para além de diminuir a necessidade de água na mistura (por atenuar a absorção de água até 6%), faz diminuir a resistência à compressão até 20%.

2.4.4. ASPECTOS QUE INFLUENCIAM A COR

Existem muitos aspectos que podem influenciar a cor do betão. Todos os constituintes do betão podem influenciar a sua cor, quer os agregados, o tipo de cimento, a própria água, os aditivos e os pigmentos, quando utilizados, contudo é a pasta que mais contribui para a cor do betão. Assim, estudando as pastas (ligante, água e pigmentos) pode-se ter uma ideia da cor do produto final (betão). Em primeiro lugar é de notar que a percentagem de pigmento adicionada é sem dúvida um dos principais factores que influenciam a cor. Uma dosagem até cerca de 5% de massa de cimento produz uma cor de ‘fraca’ a ‘média’, dependendo dessa percentagem, do tipo de pigmento e da cor do próprio pigmento. De 6 a 10% de pigmento a cor vai-se fazendo mais notória [1].

A cor do cimento é dos aspectos que mais condicionam o efeito dos pigmentos no betão. O cimento cinzento escurece a cor significativamente, obtendo-se tons “sujos” devido essencialmente ao aluminoferrato tetracálcico (ferrite). Contrariamente, o cimento branco é por excelência um cimento fácil de colorir dado que tem na sua constituição muito pouca ferrite. Com este último consegue-se produzir cores mais claras, limpas e brilhantes. Para além do problema do tom do cimento cinzento, ainda se põe o facto deste género de material ter variações de cor de lote para lote, o que dificulta a homogeneização de cor entre amassaduras. Estes aspectos resultam numa necessidade maior de adição de pigmento no cimento cinzento do que no branco para adquirir uma tonalidade parecida [3].

As cinzas volantes constituem um outro elemento que escurece significativamente o betão. Assim, quando se quiser produzir tons claros e brilhantes o ideal é não usar cinzas volantes (ou se se usar que seja em pouca quantidade). Por outro lado, se a intenção for obter tons escuros e acinzentados, então o uso quer de cimento cinzento, quer de cinzas é bastante adequado. Para obter um tom brilhante e nítido, não só é conveniente o uso de cimento branco, como também de filer calcário em vez de cinzas volantes, uma vez que tem um tom mais claro. As areias, essencialmente as mais finas e de cor escura, também contribuem para escurecer o betão.

Para além dos próprios constituintes, existem outros aspectos que podem alterar significativamente a cor do betão, dos quais se podem apontar a relação água/ cimento, os processos de cura, a temperatura e forma dos materiais, entre outros. A própria mistura do betão também influencia a cor, principalmente a sua homogeneidade [1].

Dois outros factores que contribuem para a mudança de cor é o tempo/idade e exposição ambiental do material. De modo a quantificar a influência da passagem do tempo na pigmentação, neste trabalho foi feito um registo fotográfico às pastas, argamassas e betões aos 7 dias e aos 28 (em alguns casos, aos 40) dias de modo a poder efectuar uma comparação em termos de saturação da cor.

2.5. NOTAS FINAIS

Após a Segunda Guerra Mundial observou-se uma tendência cada vez mais acentuada de deixar a estrutura das edificações permanentemente à vista. Foram então desenvolvidas diversas técnicas com o intuito de melhorar as propriedades estéticas do ‘betão aparente’. Uma das técnicas desenvolvidas foi o uso de pigmentos para atribuição de cor ao betão, bem como o uso de betão autocompactável para um melhor acabamento superficial.

Correntemente observam-se obras emblemáticas em Portugal (continental) onde se utiliza o betão pigmentado. Exemplo destas é a Casa das Histórias, em Cascais. De forma a analisar cientificamente as cores obtidas no betão através da adição de pigmentos, e após registo fotográfico, pode-se utilizar um ‘software’ que codifique a cor em diversos parâmetros. Existem vários ‘softwares’ disponíveis no mercado, nomeadamente o ‘software’ Just Color Picker, utilizado neste estudo.

Os pigmentos existentes no mercado apresentam-se em forma líquida ou sólida (pós e grânulos). Dentro destas formas de pigmentos já foram utilizados pigmentos de origem orgânica e não orgânica, sendo os últimos os mais comuns e vantajosos. O presente estudo apenas aborda o uso de pigmentos líquidos não orgânicos.

A cor no betão pode ser afectada por múltiplos parâmetros, nomeadamente pelos seus constituintes, exposição ambiental, passagem do tempo, mistura do betão, temperatura, processo de cura, entre outros. Este trabalho aborda essencialmente a influência dos constituintes e a passagem do tempo.

3

PRINCIPAIS MATERIAIS, EQUIPAMENTOS E ENSAIOS UTILIZADOS NO ESTUDO

3.1. MATERIAIS

3.1.1. CIMENTO

Sendo a deformabilidade um dos principais requisitos de um betão autocompactável, é importante ter em conta os factores que a influenciam. Os principais factores que influenciam a deformabilidade são as características dos finos e a dispersão das partículas de cimento devido ao efeito do adjuvante. A nível químico, os componentes do cimento têm uma grande influência na dispersão do adjuvante. Inicialmente, logo após o contacto com a água, grande parte das moléculas de adjuvante são adsorvidas pelo aluminato tricálcico e aluminoferrato tetracálcico. Desta forma, um cimento com alto teor de aluminatos e alto calor de hidratação prejudica a adsorção do adjuvante e conseqüentemente a sua dispersão. Além deste aspecto, o produto da hidratação dos componentes supracitados do cimento com o gesso (etringite), mistura-se com as partículas do cimento prejudicando a deformabilidade. Desta forma é aconselhado o uso de um cimento com calor de hidratação baixo a moderado para tirar melhor proveito da dispersão do adjuvante. Assim, obtém-se uma viscosidade e valor de tensão de cedência baixas com uma razão água/cimento baixa [19].

Ao longo do trabalho desenvolvido, experimentaram-se dois tipos de cimento correntemente disponíveis na RAM: CEM II/B-L 32,5 N, CEM II/A-L 42,5 R; e um cimento branco (CEM II/B-L 32,5 R (br)) que apesar de não estar correntemente disponível na RAM foi utilizado para estudar a influência do tipo de cimento na cor . O CEM II/B-L 32,5 N e o CEM II/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/m^3 para o CEM II/A-L 42,5 R; 3000 kg/m^3 para o CEM II/B-L 32,5 N; e 2940 kg/m^3 para o CEM II/B-L 32,5 R (br). O mais escuro dos cimentos utilizados é o CEM II/A-L 42,5 R, sendo que o CEM II/B-L 32,5 N apresenta um tom ligeiramente mais claro por conter menos quantidade de ferrite (dado que tem mais teor de filer calcário: o CEM II/A-L 42,5 R tem entre 6 a 20% de calcário enquanto que o CEM II/B-L 32,5 N tem entre 21 a 35% [27]).

3.1.2. CINZAS VOLANTES

As cinzas volantes são um subproduto de carvões pulverizados (normalmente das centrais termoeléctricas). Este material é constituído essencialmente por SiO_2 e Al_2O_3 , o qual se apresenta em forma de pequenas partículas esféricas e vítreas. Embora este material conduza ao escurecimento do betão, recorreu-se ao seu uso pelo facto de ser o único material fino (para além do cimento) disponível na RAM. A particularidade das cinzas serem esféricas, produz um efeito de rolamento que faz com que haja um melhoramento na deformabilidade do betão [19] – propriedade importante nos betões autocompactáveis.

As cinzas volantes utilizadas neste trabalho experimental eram provenientes da central termoeléctrica de Sines. Determinou-se em laboratório a massa volúmica das cinzas utilizadas, a qual apresentou um valor de 2360 kg/m^3 .

3.1.3. AGREGADOS

Os agregados utilizados na produção das argamassas e dos betões comentados ao longo deste trabalho foram agregados regionais britados e de origem basáltica, fornecidos pela empresa ‘Brimade – Sociedade de Britas da Madeira, Lda.’. 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’ (Quadro 3). É importante referir que a areia mais fina (0/2) também era britada.

Para os betões, para além das areias utilizaram-se ainda duas britas: ‘brita 4/10’ e ‘brita 8/16’ (Quadro 4). A empresa que forneceu os agregados comercializa ainda a ‘brita 11/22’, no entanto por ser uma brita de granulometria elevada e para assegurar a autocompactibilidade do betão apenas se utilizaram as ‘britas 4/10 e 8/16’.

Quadro 3. Caracterização dos agregados finos.

Parâmetro	'areia 0/2'	'areia 0/4'
Dimensão nominal [mm]	0/2	0/4
Módulo de finura	1.85	4.43
Massa volúmica dos agregados secos [kg/m ³]	2830	2760
Baridade não compactada [kg/m ³]	1580	1580
Absorção de água [%]	2.7 ± 1	2.8 ± 1

Quadro 4. Caracterização dos agregados grossos.

Parâmetro	'brita 4/10'	'brita 8/16'
Dimensão nominal [mm]	4/10	8/16
Massa volúmica dos agregados secos [kg/m ³]	2820	2810
Baridade não compactada [kg/m ³]	1455	1438
Absorção de água [%]	2.7 ± 1	2.6 ± 1

3.1.4. SUPER-PLASTIFICANTE

O super-plastificante tem a função de aumentar a deformabilidade do betão, sem que isso afecte a viscosidade do mesmo, ou seja, sem produção de segregação como aconteceria por sobredosagem de água. Para a produção de betão autocompactável, é indispensável o uso de super-plastificante uma vez que é necessária grande fluidez para se obter capacidade de enchimento e de compactação com o próprio peso sem que ocorra segregação. Para tal, é essencial determinar qual o ponto de equilíbrio entre a razão de água e finos e a quantidade de super-plastificante, de modo a evitar a segregação, aumentando a fluidez.

O super-plastificante utilizado neste estudo foi o Glenium Sky 548 o qual é considerado um super-plastificante de 3ª ou última geração. Este possuía uma massa volúmica de 1020 kg/m³ (determinada em laboratório). Estes super-plastificantes são baseados nos poli-carboxilatos (ou carboxilatos modificados) os quais desenvolvem mecanismos de dispersão das partículas do cimento através da repulsão estérica. Este tipo de composto traduz-se quimicamente por um polímero de éter carboxílico com grandes cadeias laterais de óxido etileno que retêm facilmente a água formando uma camada de adsorção na superfície das partículas de cimento. O conjunto do polímero principal e as cadeias laterais provocam uma repulsão estérica que estabiliza a dispersão das partículas. Outra das vantagens dos super-plastificantes de 3ª geração é o facto da alcalinidade do cimento possibilitar ao polímero principal a libertação de polímeros adicionais que previnem a floculação e o endurecimento da amassadura, proporcionando um maior período de trabalhabilidade, uma maior redução de água e maiores resistências iniciais do que os super-plastificantes de 1ª e 2ª geração. Desta forma, este tipo de super-plastificante é considerado apropriado para a produção de betão autocompactável.

No que respeita às propriedades do betão endurecido, o super-plastificante afecta principalmente a estrutura porosa do mesmo, fazendo com que os vazios não ligados sejam, em geral, maiores, sendo os poros capilares menores. O facto de haver uma redução de água sem comprometimento da trabalhabilidade faz com que haja uma melhoria nas propriedades mecânicas, na impermeabilidade e durabilidade do betão endurecido [19].

3.1.5. PIGMENTOS

Os pigmentos utilizados neste estudo foram encomendados directamente à empresa ‘BASF, The Chemical Company’, a qual os forneceu sem indicar no entanto a sua composição química. A empresa apenas indicou serem óxidos inorgânicos com baixa concentração de sólidos. No entanto com base na literatura, e atendendo às características dos mesmos especulou-se que: os pigmentos amarelo, laranja, vermelho, castanho e preto, em princípio, fossem compostos de óxido de ferro e o pigmento verde fosse proveniente de óxido de crómio. O modo de aplicação recomendado é adicioná-los ao betão pré-misturado, facto que se seguiu no desenvolvimento deste estudo. Aconselha-se também uma boa compactação/ vibração do betão de modo a obter uma tonalidade homogénea [28]. Embora também se tenha requerido um pigmento azul, a empresa referiu que não fabrica esse pigmento por ser um material mais dispendioso do que os restantes. Apresentam-se no Quadro 5 as massas volúmicas de cada pigmento (medidas no laboratório).

Uma vez que se desconhecia o teor de sólidos dos pigmentos, a sua introdução fez-se através de substituição directa de igual volume de água. Considerou-se o pigmento 100% líquido e ao introduzi-lo retirou-se o mesmo volume de água com o objectivo de manter o volume total de fluidos na amassadura.

Quadro 5. Características gerais dos pigmentos utilizados ao longo do estudo.

Pigmento	Estado	Massa volúmica [kg/m ³]	
		1º fornecimento	2º fornecimento
Amarelo	Líquido	1550	1570
Laranja	Líquido	1580	1500
Vermelho	Líquido	1500	1010
Castanho	Líquido	1600	1506
Verde	Líquido	1270	2556
Preto	Líquido	1640	1500

3.1.6. ÁGUA

Neste programa experimental usou-se água destilada nos estudos efectuados em pastas e argamassas e água da rede de abastecimento do laboratório nos estudos efectuados em betões.

3.2. ENSAIOS E EQUIPAMENTOS

3.2.1. PASTAS

Ao nível das pastas, apenas o estado fresco foi estudado. Na determinação do diâmetro de espalhamento utilizou-se um cone metálico com o diâmetro da abertura superior no valor de 19 mm e da abertura inferior no valor de 38 mm. A sua altura era de 57 mm.

Para a determinação da cor obtida nas pastas, primeiro utilizou-se uma câmara fotográfica com capacidade de 5.0 Mega pixel de resolução e o ‘software’ Just Color Picker na análise das fotografias obtidas. No ponto 3.3 descreve-se com maior detalhe o ‘software’ acima referido.

3.2.2. ARGAMASSAS

Para a avaliação do estado fresco nas argamassas, na determinação do diâmetro de espalhamento utilizou-se um cone metálico (semelhante ao utilizado nas pastas) com o diâmetro do orifício superior no valor de 70 mm, o diâmetro da abertura inferior de 100 mm e 60 mm de altura. Na determinação do tempo de escoamento utilizou-se o funil V [29].

No que concerne à avaliação do estado endurecido, na determinação das resistências mecânicas dos prismas de argamassas efectuados utilizou-se a prensa de ensaios de resistência à flexão e compressão (Walter+Baiag Testing Machines CH-8224). A prensa de ensaios de resistência à flexão possuía uma capacidade de carga até 10 kN, velocidade de (50 ± 10) N/s e precisão de $\pm 1,0\%$ de carga registada nos 4/5 superiores da escala medida. A prensa de ensaios de resistência à compressão tinha uma precisão de $\pm 1,0\%$ de carga registada nos 4/5 superiores da escala medida e velocidade de (2400 ± 200) N/s.

Para a determinação da cor obtida nas argamassas, tal como nas pastas, primeiro utilizou-se uma câmara fotográfica Nokia X2 com uma resolução de 5.0 Mega pixel e posteriormente uma câmara digital Sony Cyber-shot DSC-W230 com resolução de 12.1 Mega pixel e o ‘software’ Just Color Picker na análise das fotografias obtidas.

3.2.3. BETÕES

A avaliação do estado fresco nos betões foi efectuada através da realização dos ensaios de (i) espalhamento (Figura 8), (ii) escoamento no funil V (Figura 9), (iii) capacidade de passagem na caixa L (Figura 10) e (iv) segregação (Figura 11). A descrição detalhada destes ensaios pode ser consultada nas normas EN 12350 (partes 8 - 11) [30].

No estado endurecido dos betões, avaliaram-se as resistências à compressão numa prensa (Walter+Baiag STM 3000) cuja distância entre pratos era de 157.8 mm, de acordo com a norma NP EN 12390 – 4 [31]. Os ensaios foram realizados em cubos cuja aresta era 150 mm e em carotes com 104 mm de diâmetro e 208 mm de altura.

Utilizou-se uma caroteadora Hilti DD-160E (de acordo com a norma NP EN 12504-1) [32], uma máquina de cortar e uma rectificadora na obtenção e método de preparação das carotes.

Para a determinação da cor obtida nos betões, utilizou-se a câmara fotográfica com resolução de 12.1 Mega pixel referida na secção anterior e o ‘software’ Just Color Picker na análise das fotografias obtidas.



Figura 8. Equipamento utilizado no ensaio de espalhamento ('Slump Flow').



Figura 9. Equipamento utilizado no ensaio de escoamento (Funil V).



Figura 10. Equipamento utilizado no ensaio de passagem (Caixa L).



Figura 11. Equipamento utilizado no ensaio de segregação (peneiro).

3.3. CODIFICAÇÃO DAS CORES – ‘SOFTWARE’ JUST COLOR PICKER

Associada ao betão colorido está sempre a definição da cor do betão. A forma tradicional é feita através da comparação com amostras de cores (normalmente impressas em papel). Contudo, um dos objectivos deste trabalho consistiu na apresentação de uma metodologia mais avançada que permitisse a codificação das cores. Assim, após uma investigação sobre esta temática, decidiu-se que neste trabalho a codificação das cores seria realizada recorrendo à ferramenta Just Color Picker.

A ferramenta Just Color Picker (Figura 12) é um programa informático que 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.

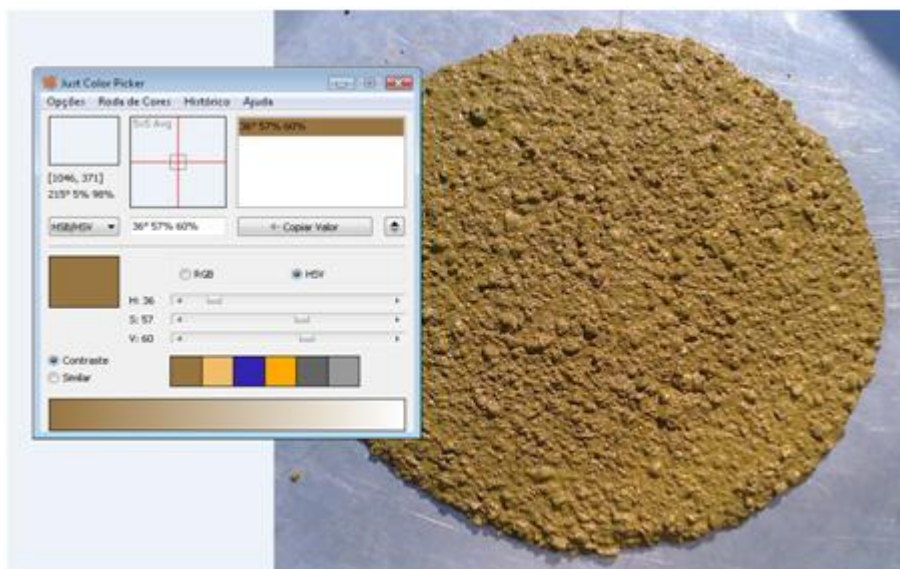


Figura 12. Exemplo de utilização do ‘software’ Just Color Picker.

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 HSB/HSV e HSL identificam uma cor em termos de 3 parâmetros: classificação da cor relativamente à cor vermelha e amarela ou ‘tom’ (‘Hue’), saturação e brilho (ou ‘valor’, ou luminosidade).

Para uma boa definição das cores obtidas, optou-se por analisá-las através da escala HSB/HSV e da escala RGB.

A escala RGB define a cor através de 3 parâmetros: o primeiro, R (‘red’) define a quantidade de vermelho que a cor seleccionada contém, o segundo, G (‘green’) define a quantidade de verde contida

na cor e o terceiro, B ('blue') quantifica o azul presente na cor do pixel seleccionado. Estas quantidades são representadas no intervalo de 0 (ausência de cor) a 255 (cor pura).

Por outro lado a escala HSV define 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 ou tom), 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, mais desbotada 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' ou luminosidade da cor que consiste na sua variação entre escuro e claro (0% é preto e 100% é branco) [14].

Muitas outras ferramentas estão disponíveis para definir uma escala de cor, no entanto esta evidenciou-se como mais adequada sendo que proporciona uma codificação da cor em diversas escalas e parâmetros e é simples de perceber e trabalhar, para além de que o seu 'download' não acarreta qualquer tipo de encargo. A codificação das cores é rápida e o programa não requer instalação. Exemplos de outras ferramentas que poderiam ter sido utilizadas são o: HTML Color Picker and Hex Color Code Finder, Xcess Color Picker, Absolute Color Picker ActiveX Control, entre outras [15].

O programa escolhido é utilizado em diversos países e áreas, nomeadamente na geração de mapas, sendo que facilmente adapta uma escala de cor adequada aos mesmos [16], bem como no 'design' e publicidade pelas suas ferramentas particulares que proporcionam encontrar as cores que entre si são mais harmoniosas, bem como as contrastantes. Esta ferramenta também possibilita reajustar a cor e adequar ao efeito pretendido pelo que é muito usual o seu uso no 'web-design' e na arte digital [17].

Neste trabalho foi adoptado o seguinte processo para codificar as cores: através do registo fotográfico obtido no estado fresco e endurecido, escolheram-se 5 pontos de cada amostra, 1 ao centro e 4 nos extremos da mesma (à superfície). Codificou-se a cor desses pontos escolhidos nas escalas RGB e HSV. Logo após essa operação, efectuou-se uma média de cada parâmetro, tendo em conta os 5 resultados obtidos (dos 5 pontos codificados). Considerou-se essa média como homogénea e representativa da amostra total e efectuaram-se análises gráficas considerando esse mesmo resultado e o desvio padrão. O registo fotográfico foi obtido tendo em conta a mesma localização e exposição de luz. Atente que, pela ausência de tripé (no estudo do estado fresco e endurecido aos 7 dias das pastas, do estado fresco das argamassas e dos betões), o ângulo de captura fotográfica foi semelhante, mas não foi exactamente o mesmo.

Para o registo fotográfico e respectivo estudo das cores moldaram-se amostras de pastas, argamassas e betões em pequenos recipientes transparentes de plástico que foram descofrados aos 7 dias.

É importante referir que como a codificação das cores é realizada através do registo fotográfico, a captação da câmara fotográfica pode influenciar a cor obtida pelo que a catalogação aqui apresentada remete às cores obtidas nas fotografias e não directamente às cores do betão, as quais se pretende que sejam o mais semelhantes possíveis com as cores do registo fotográfico.

3.4. NOTAS FINAIS

Neste trabalho utilizaram-se os materiais disponíveis no mercado da RAM para a produção de betão. Apenas os pigmentos foram especialmente encomendados para este trabalho. Por serem pigmentos líquidos, a sua introdução nas composições foi realizada através da substituição de igual volume de água.

Até ao início deste trabalho não existiam na RAM os equipamentos necessários para caracterizar a autocompactabilidade de uma composição de BAC, pelo que foi necessário adquirir tais equipamentos. Para avaliar a resistência à compressão foram usados equipamentos e procedimentos vulgarmente utilizados na caracterização da resistência à compressão dos betões convencionais.

4

RESULTADOS EXPERIMENTAIS EM PASTAS

4.1. INTRODUÇÃO

Visto que a cor do betão é essencialmente controlada pela cor da pasta, os primeiros estudos com pigmentos foram realizados com pastas. Note-se que, apesar dos resultados/conclusões obtidas em estudos efectuados com pastas não poderem ser directamente extrapolados para os betões, o estudo de pastas é mais fácil e menos oneroso do que de betões. Assim, começou-se por realizar vários testes em pastas (tendo-se experimentado todos os pigmentos utilizados neste trabalho: amarelo, laranja, vermelho, castanho, preto e verde) com o objectivo de obter os primeiros resultados que permitissem compreender os parâmetros que mais influenciam e de que forma influenciam a cor do betão. Os Quadro 6-Quadro 14 clarificam as amassaduras efectuadas em pastas ao longo deste estudo.

Quadro 6. Composições e resultados das pastas efectuadas com CEM II/A-L 42.5 R (sem adição de pigmento).

PASTAS SEM ADIÇÃO DE PIGMENTOS					
Resultados		0% cinza	15% cinza	30% cinza	
Massa na mistura em [g]	Cimento	715.0	632.0	543.0	
	Cinzas	0.0	85.0	177.0	
	Água	369.0	360.0	350.0	
	Pigmento	0.0	0.0	0.0	
Relação entre volumes de água e finos	Vw/Vpowder	1.6	1.5	1.4	
Diâmetros de espalhamento [mm]	d1	78.0	84.0	78.0	
	d2	80.0	82.0	80.0	
	Média d	79.0	83.0	79.0	
Codificação da cor	RGB [-,-,-]	Fresco	90/88/48	84/82/47	83/81/46
		Endurecido	153/154/130	152/155/132	131/132/108
	HSV [°,%,%]	Fresco	56/47/36	57/44/33	56/45/33
		Endurecido	64/16/61	68/15/61	63/17/52

Quadro 7. Composições e resultados das pastas efectuadas com CEM II/A-L 42.5 R (pigmento amarelo).

PASTA COM PIGMENTO AMARELO						
Resultados		0% cinzas		30% cinzas		
		5% pigmento	10% pigmento	5% pigmento	10% pigmento	
Massa na mistura [g]	Cimento	715.0	715.0	543.0	543.0	
	Cinzas	0.0	0.0	177.0	177.0	
	Água	346.0	323.0	327.0	304.0	
	Pigmento	36.0	72.0	36.0	72.0	
Relação entre volumes de água e finos	Vw/Vpowder	1.6	1.6	1.4	1.4	
Diâmetros de espalhamento [mm]	d1	64.0	56.0	65.0	50.0	
	d2	67.0	57.0	66.0	51.0	
	Média d	65.5	56.5	65.5	50.5	
Codificação da cor	RGB [-,-,-]	Fresco	103/96/29	118/106/25	99/92/31	108/98/19
		Endurecido	159/143/67	166/146/57	149/139/67	155/139/56
	HSV [°,%,%]	Fresco	54/72/41	52/79/46	53/68/39	54/82/42
		Endurecido	49/58/62	49/65/65	53/55/59	51/64/61

Quadro 8. Composições e resultados das pastas efectuadas com CEM II/A-L 42.5 R (pigmento laranja).

PASTA COM PIGMENTO LARANJA						
Resultados		0% cinzas		30% cinzas		
		5% pigmento	10% pigmento	5% pigmento	10% pigmento	
Massa na mistura [g]	Cimento	715.0	715.0	543.0	543.0	
	Cinzas	0.0	0.0	177.0	177.0	
	Água	347.0	324.0	327.0	304.0	
	Pigmento	36.0	72.0	36.0	72.0	
Relação entre volumes de água e finos	Vw/Vpowder	1.6	1.6	1.4	1.4	
Diâmetros de espalhamento [mm]	d1	68.0	51.0	56.0	51.0	
	d2	70.0	54.0	56.0	49.0	
	Média d	69.0	52.5	56.0	50.0	
Codificação da cor	RGB [-,-,-]	Fresco	106/84/29	113/80/17	95/78/21	109/79/23
		Endurecido	155/123/72	155/114/55	146/120/69	146/110/51
	HSV [°,%,%]	Fresco	43/73/41	40/85/44	46/78/38	39/79/43
		Endurecido	37/53/61	35/64/61	39/53/57	37/65/57

Quadro 9. Composições e resultados das pastas efectuadas com CEM II/A-L 42.5 R (pigmento castanho).

PASTA COM PIGMENTO CASTANHO						
Resultados		0% cinzas		30% cinzas		
		5% pigmento	10% pigmento	5% pigmento	10% pigmento	
Massa na mistura [g]	Cimento	715.0	715.0	543.0	543.0	
	Cinzas	0.0	0.0	177.0	177.0	
	Água	347.0	325.0	328.0	305.0	
	Pigmento	36.0	72.0	36.0	72.0	
Relação entre volumes de água e finos	Vw/Vpowder	1.6	1.6	1.4	1.4	
Diâmetros de espalhamento [mm]	d1	71.0	55.0	69.0	60.0	
	d2	74.0	56.0	69.0	60.0	
	Média d	72.5	55.5	69.0	60.0	
Codificação da cor	RGB [-,-,-]	Fresco	94/71/22	94/64/9	89/69/19	91/64/13
		Endurecido	133/113/80	122/96/62	126/111/80	128/104/73
	HSV [°,%,%]	Fresco	41/77/37	39/91/37	42/79/35	39/86/36
		Endurecido	37/40/52	34/49/48	40/37/49	35/43/50

Quadro 10. Composições e resultados das pastas efectuadas com CEM II/A-L 42.5 R (pigmento vermelho).

PASTA COM PIGMENTO VERMELHO						
Resultados		0% cinzas		30% cinzas		
		5% pigmento	10% pigmento	5% pigmento	10% pigmento	
Massa na mistura [g]	Cimento	715.0	715.0	543.0	543.0	
	Cinzas	0.0	0.0	177.0	177.0	
	Água	345.0	322.0	326.0	302.0	
	Pigmento	36.0	72.0	36.0	72.0	
Relação entre volumes de água e finos	Vw/Vpowder	1.6	1.6	1.4	1.4	
Diâmetros de espalhamento [mm]	d1	78.0	66.0	74.0	61.0	
	d2	77.0	66.0	74.0	58.0	
	Média d	77.5	66.0	74.0	59.5	
Codificação da cor	RGB [-,-,-]	Fresco	103/58/23	103/50/13	96/54/20	96/47/12
		Endurecido	136/97/75	126/80/61	132/91/72	124/80/62
	HSV [°,%,%]	Fresco	26/78/40	25/87/40	27/79/38	25/87/38
		Endurecido	22/44/53	18/52/49	19/45/52	17/50/49

Quadro 11. Composições e resultados das pastas efectuadas com CEM II/A-L 42.5 R (pigmento preto).

PASTA COM PIGMENTO PRETO						
Resultados		0% cinzas		30% cinzas		
		5% pigmento	10% pigmento	5% pigmento	10% pigmento	
Massa na mistura [g]	Cimento	715.0	715.0	543.0	543.0	
	Cinzas	0.0	0.0	177.0	177.0	
	Água	347.0	326.0	328.0	306.0	
	Pigmento	36.0	72.0	36.0	72.0	
Relação entre volumes de água e finos	Vw/Vpowder	1.6	1.6	1.4	1.4	
Diâmetros de espalhamento [mm]	d1	80.0	66.0	71.0	66.0	
	d2	79.0	65.0	71.0	66.0	
	Média d	79.5	65.5	71.0	66.0	
Codificação da cor	RGB [-,-,-]	Fresco	49/50/26	41/43/24	44/47/28	35/38/20
		Endurecido	99/106/96	81/88/80	95/102/90	72/80/73
	HSV [°,%,%]	Fresco	64/48/20	68/45/17	70/39/18	71/47/15
		Endurecido	101/10/42	117/10/35	95/11/40	130/10/31

Quadro 12. Composições e resultados das pastas efectuadas com CEM II/A-L 42.5 R (pigmento verde).

PASTA COM PIGMENTO VERDE						
Resultados		0% cinzas		30% cinzas		
		5% pigmento	10% pigmento	5% pigmento	10% pigmento	
Massa na mistura [g]	Cimento	715.0	715.0	543.0	543.0	
	Cinzas	0.0	0.0	177.0	177.0	
	Água	341.0	313.0	322.0	293.0	
	Pigmento	36.0	72.0	36.0	72.0	
Relação entre volumes de água e finos	Vw/Vpowder	1.6	1.6	1.4	1.4	
Diâmetros de espalhamento [mm]	d1	77.0	64.0	66.0	63.0	
	d2	75.0	64.0	66.0	61.0	
	Média d	76.0	64.0	66.0	62.0	
Codificação da cor	RGB [-,-,-]	Fresco	83/88/47	86/96/46	84/90/48	79/91/42
		Endurecido	152/163/129	136/150/116	147/157/128	131/143/112
	HSV [°,%,%]	Fresco	68/47/35	72/53/37	69/46/36	74/54/36
		Endurecido	79/21/64	84/22/59	80/19/62	84/22/56

Quadro 13. Composições e resultados das pastas efectuadas com CEM II/B-L 32.5 N.

Resultados		Cores (misturas feitas com 0% de cinzas e 10% de pigmento)							
		Ref.	Amarelo	Laranja	Vermelho	Castanho	Preto	Verde	
Massa na mistura [g]	Cimento	692.0	692.0	692.0	692.0	692.0	692.0	692.0	
	Cinzas	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
	Água	369.0	325.0	325.0	323.0	326.0	327.0	315.0	
	Pigmento	0.0	69.0	69.0	69.0	69.0	69.0	69.0	
Relação entre volumes de água e finos		Vw/Vpowder	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	
Diâmetros de espalhamento [mm]	d1	111.0	66.0	65.0	70.0	83.0	81.0	81.0	
	d2	111.0	67.0	64.0	70.0	88.0	83.0	83.0	
	Média d	111.0	66.5	64.5	70.0	85.5	82.0	82.0	
Codificação da cor	RGB [-,-,-]	Fresco	104/104/71	129/116/22	122/84/12	120/82/48	106/74/25	49/52/36	83/94/49
		Endurecido	185/186/159	187/160/48	174/123/58	146/106/90	129/98/58	92/98/93	146/161/117
			59/32/41	53/83/51	39/90/48	28/60/47	36/76/42	69/31/20	75/48/37
	HSV [°,%,%]	Fresco	63/14/73	48/74/73	34/67/68	17/38/57	33/55/51	135/6/38	81/27/63
		Endurecido							

Quadro 14. Composições e resultados das pastas efectuadas com CEM II/B-L 32.5 R (br).

Resultados		Cores (misturas feitas com 0% de cinzas e 10% de pigmento)						
		Referência	Amarelo	Laranja	Vermelho	Preto	Verde	
Massa na mistura [g]	Cimento	678.0	678.0	678.0	678.0	678.0	678.0	
	Cinzas	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
	Água	369.0	325.0	326.0	324.0	328.0	316.0	
	Pigmento	0.0	68.0	68.0	68.0	68.0	68.0	
Relação entre volumes de água e finos		Vw/Vpowder	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	
Diâmetros de espalhamento [mm]	d1	75.0	62.0	65.0	59.0	68.0	69.0	
	d2	77.0	60.0	65.0	59.0	69.0	67.0	
	Média d	76.0	61.0	65.0	59.0	68.5	68.0	
Codificação da cor	RGB [-,-,-]	Fresco	231/234/210	187/146/1	159/91/10	116/52/26	50/56/48	99/126/71
		Endurecido	240/245/214	196/153/1	171/100/21	120/52/28	59/66/55	122/146/87
			68/10/92	47/99/74	32/93/62	17/77/45	105/16/22	90/44/49
	HSV [°,%,%]	Fresco	69/13/96	47/100/77	31/88/67	16/76/47	102/16/26	85/40/57
		Endurecido						

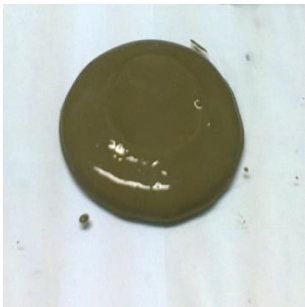








Na execução das pastas, a relação de água/finos foi sempre ajustada à medida que se alterava a quantidade de cinzas volantes adicionadas, de modo a obter um diâmetro de espalhamento aproximadamente igual entre todas as pastas, dentro do intervalo de 70 a 90 mm para a pasta de referência. Este diâmetro de espalhamento foi definido tendo em conta a deformabilidade ideal numa pasta de um BAC. É de notar que no âmbito deste trabalho considerou-se como ‘finos’ o conjunto de cimento+cinzas volantes (aquando da sua adição), excluindo do conjunto os finos contidos nos agregados. Como pasta de referência entende-se a pasta obtida com certa relação água/finos de modo a que o diâmetro de espalhamento esteja dentro do intervalo referido, sem adição de pigmentos. Desta forma produziram-se três pastas de referência: com 0% de cinzas, 15% de cinzas e 30% de cinzas, para o CEM II/A-L 42,5 R (Quadro 15). Para os restantes tipos de cimento obtiveram-se apenas pastas com 0% de cinzas dado que a intenção desse estudo era verificar a melhoria de cor relativamente ao

CEM II/A-L 42,5 R. Para essas experiências utilizou-se a relação água/finos obtida para o CEM II/A-L 42,5 R e registaram-se as alterações no diâmetro de espalhamento. Parte das pastas foi armazenada em recipientes plásticos para uma análise posterior da cor. As pastas foram descofradas aos 7 dias e fotografadas.

4.2. INFLUÊNCIA DA PERCENTAGEM DE CINZAS ADICIONADAS

Para verificar qual a influência da inserção de cinzas volantes nas pastas, introduziram-se percentagens de 15% e 30% desse material nas mesmas, comparando-se em termos de cor, com os resultados obtidos com 0% de cinzas adicionadas. Conforme se pode ver no (Quadro 15), à medida que se introduz maior percentagem de cinzas volantes na amassadura das pastas verifica-se que a cor obtida vai escurecendo, tanto no estado fresco, como no estado endurecido.

Quadro 15. Registo fotográfico das pastas produzidas com CEM II/A-L 42.5 R em estado fresco e endurecido (sem adição de pigmentos).

Pasta	Estado fresco	Estado endurecido 7 dias	Estado endurecido 40 dias
0% cinzas CEM II/A-L 42.5 R			
15% cinzas CEM II/A-L 42.5 R			
30% cinzas CEM II/A-L 42.5 R			

Para melhor confirmação do que foi referido, elaborou-se uma comparação entre as pastas sem pigmentos (obtidas com CEM II/A-L 42,5 R), em estado fresco, onde foram adicionadas 0%, 15% e 30% de cinzas volantes (Figura 13). Esta comparação efectuou-se através da codificação das cores com o ‘software’ Just Color Picker. O parâmetro de comparação foi o ‘valor’, terceiro na escala HSV. Utilizou-se este parâmetro dado que é o mais evidente na visualização da influência das cinzas nas pastas. Quanto mais alto é o ‘valor’, mais clara é a tonalidade. Assim, verifica-se que se obtém gradualmente uma tonalidade mais escura com a adição de cinzas.

Importa ainda referir que foi observado que as pastas que incorporavam maior conteúdo de cinzas volantes necessitavam de menor razão água/finos para se obter o mesmo diâmetro de espalhamento. Assim, foi concluído que as cinzas aumentavam a fluidez da mistura (de acordo com o previamente referido por Nunes, S.[19]).

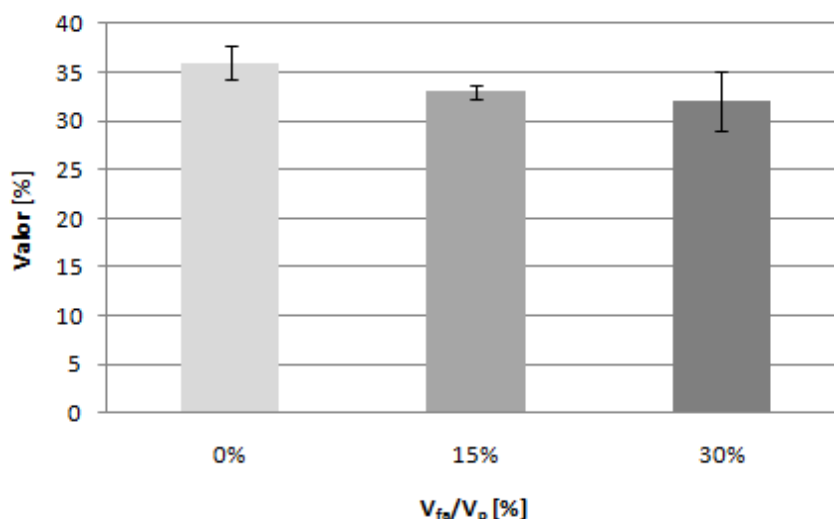


Figura 13. Influência da adição de cinzas na cor das pastas ($V_w/V_{\text{powder}} = 1.6, 1.5$ e 1.4 respectivamente para 0%, 15% e 30% de cinzas).

4.3. INFLUÊNCIA DO PIGMENTO

Conforme as instruções do fabricante relativamente às dosagens ideais de pigmento, estas deveriam corresponder a um mínimo de 2% e a um máximo de 10% de adição do material relativamente à massa de finos contida nas pastas. Assim, e a fim de verificar a sua influência quer a nível de cor, quer a nível do estado fresco das pastas, adicionou-se 5% e 10% de pigmento em diferentes amassaduras, comparando com as pastas de referência. Nos cimentos CEM II/B-L 32,5 N e CEM II/B-L 32,5 R (br), produziram-se apenas pastas com 10% de pigmento. No Anexo I – pastas encontra-se um registo fotográfico de todas as pastas efectuadas, no estado fresco e endurecido. Este registo fotográfico serviu

de base para todos os estudos efectuados posteriormente no ‘software’ Just Color Picker para a codificação e comparação das cores obtidas.

Para o pigmento castanho efectuaram-se análises apenas com o CEM II/A-L 42,5 R e CEM II/B-L 32,5 N dado que a quantidade de pigmento existente era reduzida e o seu comportamento a nível do diâmetro de espalhamento equivalia a um termo intermédio entre o vermelho e preto e o laranja e amarelo (e a nível da composição química estimou-se que tivesse origem, assim como os pigmentos amarelo, laranja, vermelho e preto, no óxido de ferro, tal como referido na Secção 3.1.5).

Como se pode verificar na Figura 14, à medida que se inseriu maior percentagem de pigmento nas misturas, estas adquiriram cores mais nítidas e vivas. Na Figura 14 efectuou-se uma análise através do ‘software’ Just Color Picker em que se analisou o grau de saturação das cores obtidas através dos registos fotográficos das pastas em estado fresco onde foram adicionadas percentagens de 5% e 10% de pigmento e 0% de cinzas volantes.

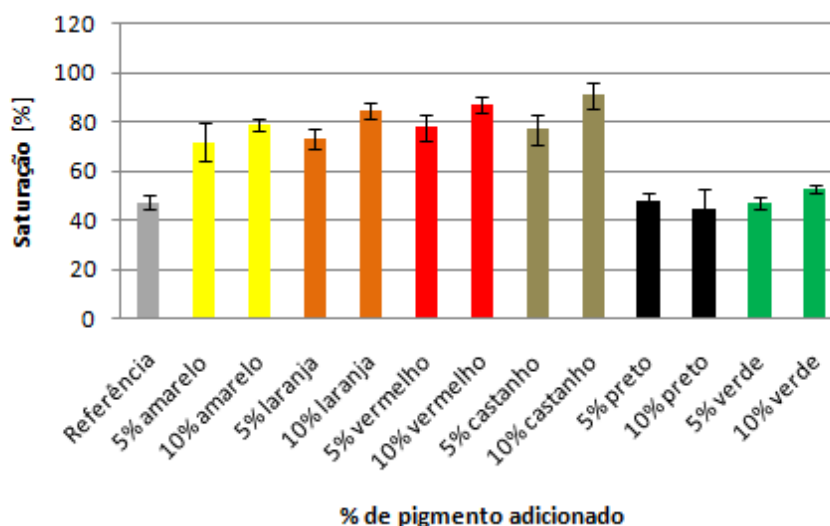


Figura 14. Influência da percentagem de pigmento adicionado na cor das pastas ($V_w/V_{\text{powder}} = 1.6$).

Consideraram-se apenas as pastas efectuadas com o CEM II/A-L 42,5 R. É visível na Figura 14 que, com adição de mais pigmento, a saturação da cor aumenta, ou seja, torna-se mais nítida (ver Anexo I – pastas). No pigmento preto há uma inversão deste conceito. Isto porque “uma cor é tanto mais saturada quanto menor a quantidade de branco ou preto tiver”, isto é, a adição de preto ou branco torna a cor mais esbatida, diminuindo a sua saturação [33].

Relativamente ao estado fresco, observa-se na Figura 15 que o pigmento amarelo conduziu a uma diminuição do diâmetro de espalhamento, ou seja, a uma perda de deformabilidade. Refira-se que foi efectuado um estudo semelhante para os restantes pigmentos, tendo-se obtido uma tendência semelhante à observada para o pigmento amarelo (ver Anexo I – pastas). Quando comparados os

resultados dos diversos pigmentos, notou-se que os pigmentos vermelho e preto eram os que conduziam à menor perda de deformabilidade sendo seguidos pelo verde e pelo castanho, enquanto que os pigmentos amarelo e laranja eram os que conduziam a diâmetros inferiores. Questionou-se a possibilidade da perda de deformabilidade poder estar relacionada com a densidade dos pigmentos, contudo não foi observada qualquer tendência coerente. Sugere-se que a tendência de perda de deformabilidade superior dos pigmentos amarelo e laranja esteja relacionada com a forma das partículas sólidas dispersas contidas nesses mesmos pigmentos, estudo de grande relevância que se tenciona elaborar em trabalhos futuros através de uma análise química detalhada dos pigmentos.

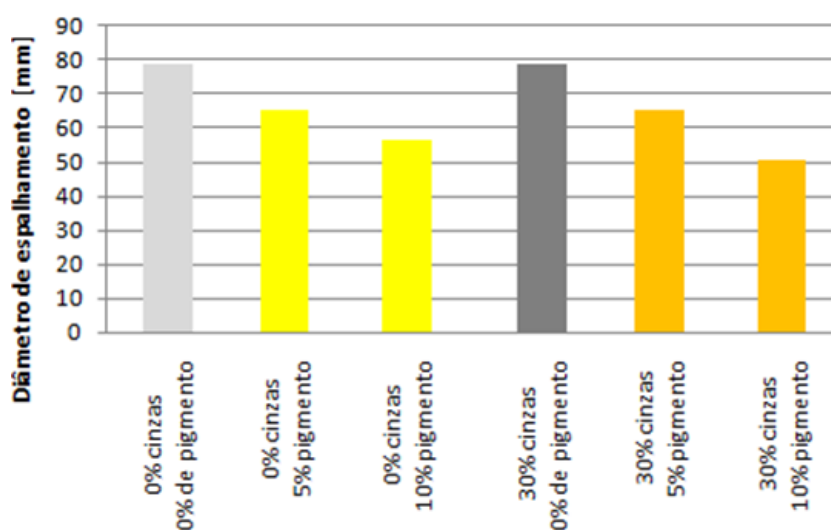











Figura 15. Influência da adição de pigmento amarelo no diâmetro de espalhamento (CEM II/A-L 42.5 R).

4.4. INFLUÊNCIA DO TIPO DE CIMENTO

Para uma caracterização geral do efeito dos vários componentes das pastas na cor utilizou-se o cimento CEM II/A-L 42,5 R. Para efectuar uma comparação entre este e os outros tipos de cimento, utilizou-se o cimento CEM II/B-L 32,5 N e CEM II/B-L 32,5 R (br) em pastas sem adição de pigmento e com 10% de pigmento, sem adição, em qualquer dos dois casos, de cinzas volantes, de forma a haver uma demonstração plena da alteração da cor nas misturas.

Conforme verificado através das experiências e como se pode verificar no Quadro 16, o cimento que proporcionou uma qualidade melhor a nível da cor foi o CEM II/B-L 32,5 R (br), seguido do CEM II/B-L 32,5 N, sendo que o CEM II/A-L 42,5 R apresentou resultados piores. O Quadro 16 retracts o estudo feito nas pastas em que se adicionou pigmento amarelo (o mesmo estudo foi feito para as restantes pastas (ver Anexo I – pastas)).

Quadro 16. Registo fotográfico das pastas produzidas com 0% de cinzas volantes e 10% de pigmento amarelo.

Pasta	Estado fresco	Estado endurecido 7 dias	Estado endurecido 40 dias
0% cinzas 10% pigmento CEM II/ A-L 42.5 R			
0% cinzas 10% pigmento CEM II/ B-L 32.5 N			
0% cinzas 10% pigmento CEM II/ B-L 32.5 R (br)			

A fim de quantificar a alteração da cor entre pastas produzidas com CEM II/B-L 32.5 R (br), CEM II/B-L 32.5 N e CEM II/A-L 42.5 R, efectuou-se um gráfico comparativo entre os três tipos de cimento onde se representou a influência do tipo de cimento na cor das pastas com base na análise do parâmetro ‘valor’ (Figura 16). Para tal, consideraram-se as pastas frescas com 0% de pigmento e cinzas volantes. Foram encontrados resultados com tendências semelhantes em pastas que incorporavam cinzas volantes (ver Anexo I – pastas).

Embora com base nos resultados obtidos se confirmasse que o cimento CEM II/B-L 32,5 R (br) fosse o mais indicado para produzir betões coloridos, optou-se por utilizar CEM II/A-L 42,5 R devido à disponibilidade na RAM.

No que concerne às alterações no estado fresco, verificou-se que a introdução de pigmentos conduziu à perda de deformabilidade em todos os cimentos. Verificaram-se resultados semelhantes para os

cimentos CEM II/A-L 42,5 R e CEM II/B-L 32,5 R (br), contudo nas pastas produzidas com CEM II/B-L 32,5 N a deformabilidade era superior.

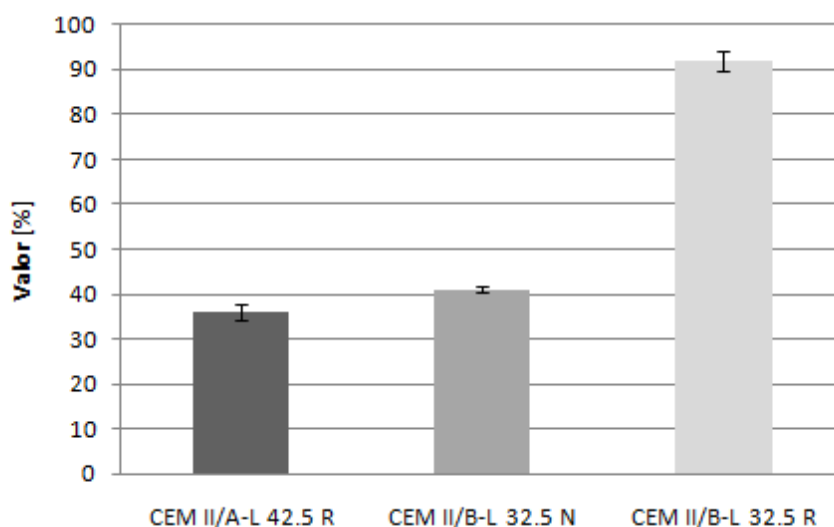


Figura 16. Influência do tipo de cimento na cor das pastas ($V_w/V_{\text{powder}} = 1.6$).

4.5. COMPARAÇÃO DA ‘PERFORMANCE’ ENTRE PIGMENTOS

As cores claras, nomeadamente o amarelo e o laranja, obtiveram melhores resultados a nível de nitidez com o CEM II/B-L 32.5 R (br) e CEM II/B-L 32,5 N e sem cinzas volantes. O preto produziu bons resultados com qualquer tipo de cimento e com adição de cinzas volantes. Os tons intermédios (castanho, vermelho e verde) tiveram bons resultados com qualquer tipo de cimento e com a introdução ou não de cinzas (ver Anexo I – pastas). Através de uma análise comparativa dos valores de saturação das pastas (Figura 17), foi possível verificar que, relativamente aos pigmentos amarelo, laranja, vermelho e castanho, o pigmento verde não teve uma capacidade de tingimento tão elevada quanto os anteriores. Pode-se verificar este facto vendo que a saturação da pasta verde, comparativamente com as restantes foi bastante inferior, adicionando a mesma percentagem de pigmento. Quanto ao pigmento preto, supostamente o parâmetro de saturação verifica-se de forma diferente, conforme já foi referido na secção 4.3. Posto isto, e tendo em conta as composições químicas presumidas, julgou-se que o óxido de ferro tem maior capacidade de tingimento da pasta do que o óxido de crómio. Esta análise foi feita com as pastas em estado fresco pigmentadas com 10% de pigmento e 0% de cinzas volantes com o cimento CEM II/A-L 42,5 R. Foi possível verificar também que a cor obtida através dos pigmentos laranja e castanho é bastante semelhante.

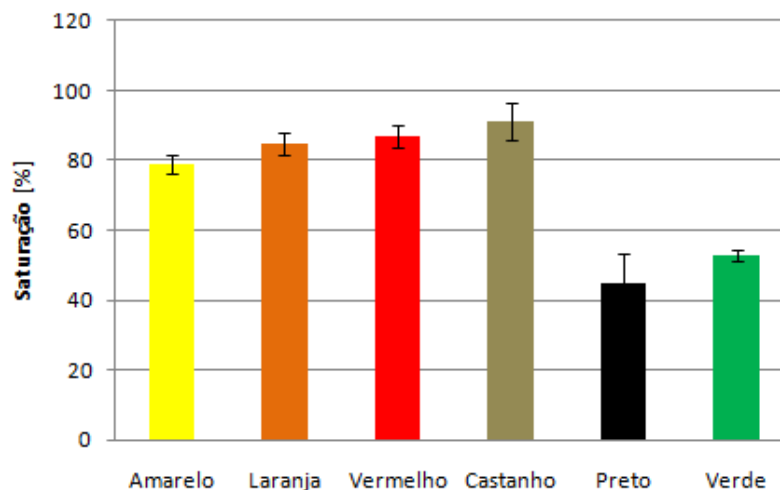


Figura 17. Performance dos pigmentos relativamente ao tingimento das pastas ($V_w/V_{\text{powder}} = 1.6$).

4.6. INFLUÊNCIA DA PASSAGEM DO TEMPO

Após se produzirem as pastas guardou-se parte delas em recipientes plásticos que foram descobrados aos 7 dias. Todas as pastas foram guardadas resguardadas da luz e exposição ambiental a uma temperatura de $23 \pm 2^\circ\text{C}$ numa caixa de papelão. O objectivo era efectuar um estudo sobre a influência da passagem do tempo na cor obtida nas pastas. Após 7 dias fotografou-se as pastas guardadas e descobradas e aos 40 dias voltou-se a fotografar de modo a estabelecer uma comparação entre as cores visíveis à superfície aos 7 e 40 dias. Através do registo fotográfico (ver Anexo I – pastas) efectuou-se uma análise das cores obtidas através dos parâmetros ‘valor’ e ‘saturação’ com o ‘software’ Just Color Picker. Conforme se pode verificar na Figura 18, ocorreu uma perda considerável da cor na passagem do estado fresco a endurecido e ao longo das semanas. Este facto verificou-se em todas as pastas com todos os tipos de cimento (ver Anexo I – pastas). A Figura 18 demonstra um exemplo bastante nítido do que foi referido. Através do ‘software’ Just Color Picker, efectuou-se uma análise em todas as pastas com 0% e 30% de cinzas adicionadas, 10% de pigmento e sem pigmento, efectuadas com o cimento CEM II/A-L 42,5 R. Refira-se que dentro dos limites temporais do trabalho desenvolvido não foi possível uma análise com um intervalo de tempo mais alargado.

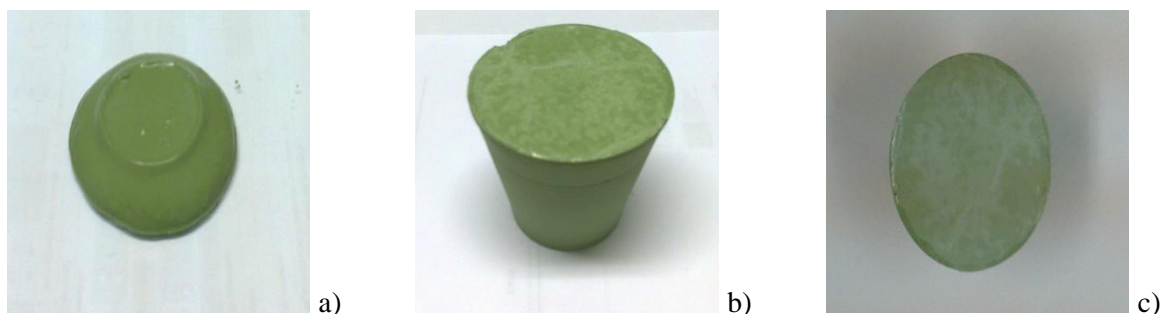


Figura 18. Pasta produzida com 0% de cinzas volantes, 10% de pigmento verde e CEM II/B-L 32.5 R (br): a) Estado fresco, b) Estado endurecido aos 7 dias, c) Estado endurecido aos 40 dias.

Como se pode verificar pela Figura 19, o ‘valor’ da cor no estado endurecido é superior ao ‘valor’ no estado fresco, dado que o tom se torna mais claro após o endurecimento. No pigmento castanho, o ‘valor’ obtido no estado endurecido com adição de 30% de cinzas volantes, foi mais alto que o ‘valor’ obtido com 0% de cinzas (ver Anexo I – pastas). Este facto é uma excepção, que tem como possível origem a eflorescência presente na superfície da pasta após o seu endurecimento. Por sua vez, a saturação (Figura 20) diminuiu com o endurecimento das pastas, dado que a cor se tornou menos viva.

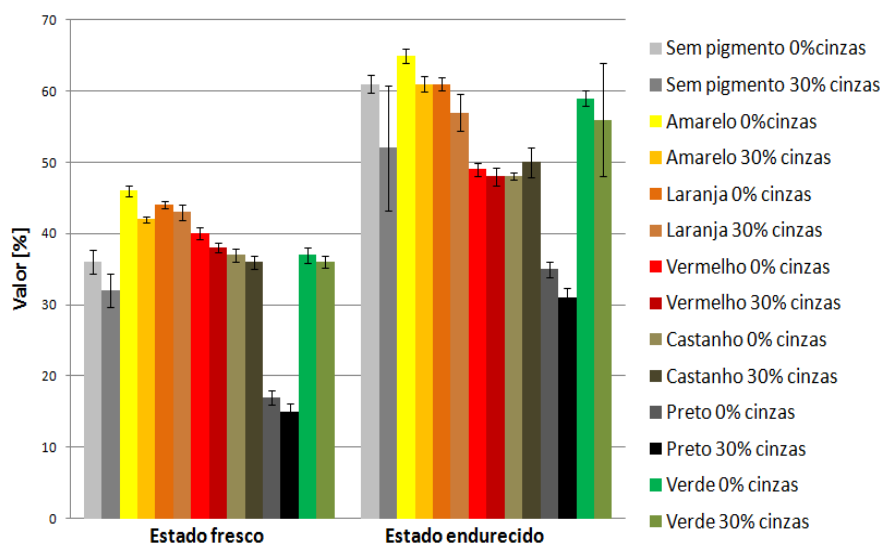


Figura 19. Influência da passagem de estado fresco a endurecido no parâmetro ‘valor’ da cor das pastas: $V_w/V_{\text{powder}} = 1.6$ e 1.4 respectivamente para 0% e 30% de cinzas.

Como é possível verificar na Figura 21, com o passar das semanas a cor perdeu-se parcialmente. Assim, analisaram-se as seguintes pastas: pasta com 0% cinzas, 10% pigmento vermelho e CEM II/B-L 32.5 N, pasta com 0% cinzas, 10% pigmento verde e CEM II/A-L 32.5 R, pasta com 30% cinzas, 5% pigmento laranja e CEM II/A-L 42.5 R e pasta com 0% cinzas, 10% pigmento castanho e CEM II/A-L 42.5 R (pastas onde este efeito era mais notório).

Os resultados representados na Figura 21 confirmam o que se observou na análise à Figura 20. A cor clareia significativamente sendo que a diferença para o estado fresco é dramática. Nesse sentido, logo ao nível das pastas concluiu-se que os pigmentos utilizados teriam problemas sobre a permanência das cores dos betões. Com base nestes resultados, importa referir que foi equacionada a possibilidade de se aplicar um anti-grafite e/ou verniz na superfície dos betões que seriam produzidos, contudo decidiu-se que tal aplicação saía fora do âmbito deste trabalho (e que seria sugerido para trabalho futuro).

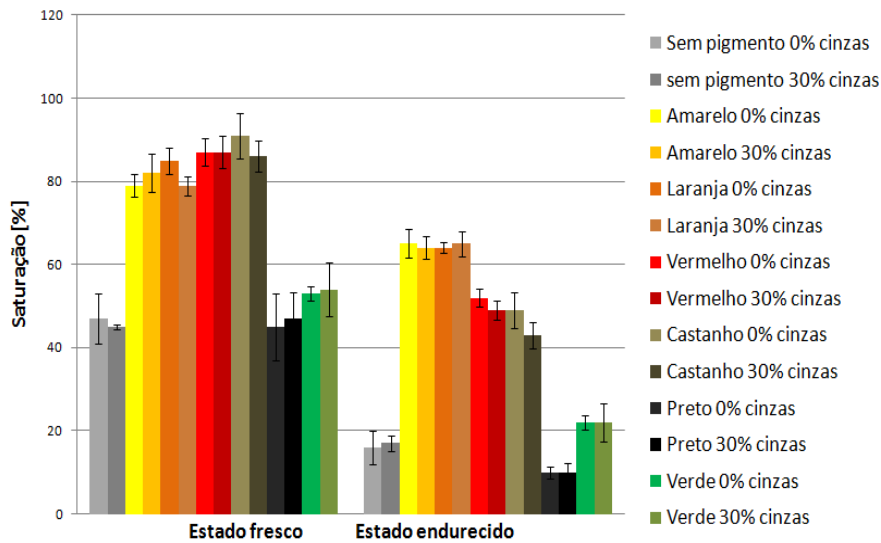


Figura 20. Influência da passagem de estado fresco a endurecido no parâmetro 'saturação' da cor das pastas: $V_w/V_{powder} = 1.6$ e 1.4 respectivamente para 0% e 30% de cinzas.

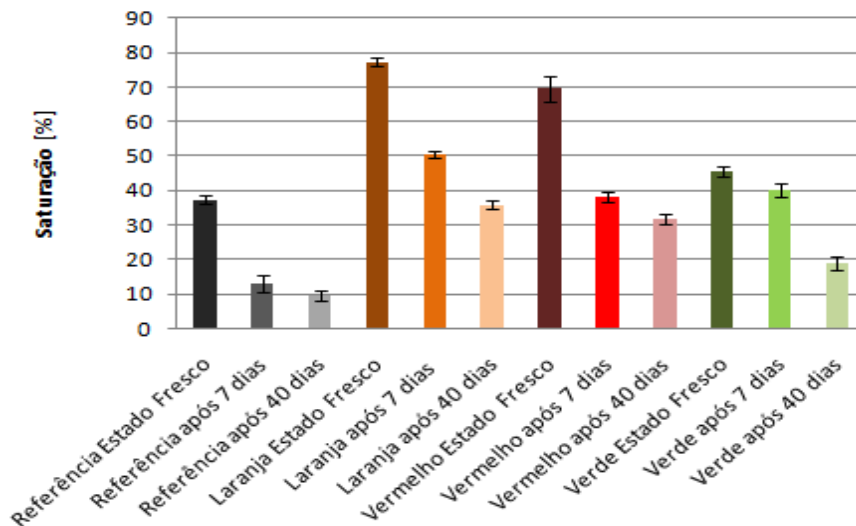


Figura 21. Alteração da cor devido à passagem do tempo.

4.7. NOTAS FINAIS

O primeiro passo dado na constituição dos betões coloridos foi o estudo de pastas. Nesta fase analisou-se intensivamente os principais factores que influenciam a cor. Os elementos em análise foram a percentagem de cinzas volantes adicionadas, a percentagem de pigmento utilizado, bem como a capacidade de tingimento de cada pigmento, o tipo de cimento e a passagem do tempo (passagem de estado fresco a endurecido e envelhecimento). Pode-se concluir que a adição de cinzas escurece a cor

da pasta e a adição de pigmentos reduz significativamente a fluidez da mesma. O tipo de cimento com que se obtém tons mais claros é o CEM II/B-L 32.5 R (br) e os tons mais escuros são obtidos com o cimento CEM II/A-L 42.5 R. Com o passar do tempo a cor obtida perde-se parcialmente.

Em relação à perda de deformabilidade imposta pela adição de pigmentos, é de referir que a mesma se deve à diminuição da água efectiva presente na amassadura, uma vez que a introdução de pigmentos foi feita através da substituição directa do mesmo volume de água

Um dos aspectos mais prejudiciais na captação da verdadeira cor nas pastas foi a presença de eflorescências na superfície das amostras depois de endurecidas. Esse aspecto, relacionado com a hidratação natural do cimento, pode ter interferido na análise efectuada à cor em algumas das amostras descobradas.

5

RESULTADOS EXPERIMENTAIS EM ARGAMASSAS

5.1. INTRODUÇÃO

Antes da constituição completa do betão, é essencial que se façam argamassas para analisar o efeito dos pigmentos a nível das características reológicas das mesmas, da homogeneidade da cor e do acabamento superficial quando são introduzidos agregados na composição [34].

A produção de argamassas antes da composição de betão permitiu fazer um estudo da influência da adição de areias na cor e na fluidez, bem como estudar a influência dos pigmentos na resistência à compressão (e flexão) das argamassas. Nesta fase também foi possível verificar se o efeito dos pigmentos no estado fresco das argamassas era o mesmo efeito observado nas pastas. Nesta etapa estudou-se a introdução do super-plastificante para a obtenção da autocompactibilidade, tanto na argamassa de referência como nas argamassas pigmentadas. Na execução dos testes em argamassas utilizou-se apenas o CEM II/A-L 42,5 R. Analisou-se em primeiro lugar uma amassadura com 0% de cinzas volantes e seguidamente produziu-se outra com 30% cinzas. Esta última foi denominada de “argamassa de referência” à qual, ajustando a quantidade de super-plastificante e água, introduziu-se separadamente os pigmentos vermelho, preto, verde, amarelo e laranja. O pigmento castanho não foi utilizado dado que as suas características a nível de influência no diâmetro de espalhamento eram intermédias aos pigmentos vermelho/preto e amarelo/laranja. Para além disso conduzia a uma cor muito semelhante à do pigmento laranja.

O estabelecimento da composição da argamassa de referência foi efectuado impondo que a mesma deveria ter um diâmetro de espalhamento médio de 260 mm e um tempo de escoamento médio de 10 s – ou seja, que deveria ser uma argamassa com propriedades autocompactáveis. Seguidamente, e para manter a autocompactibilidade, procedeu-se a um ajuste da quantidade de super-plastificante nas

argamassas em que eram introduzidos pigmentos, servindo este estudo de pré-quantificação da necessidade de aumento de super-plastificante em betões coloridos relativamente ao betão de referência. Todas as argamassas às quais se adicionaram pigmentos foram produzidas com 30% de cinzas volantes e com uma relação entre volume de líquido e finos de 1.0. Refira-se que, posteriormente e devido a ajustes na composição dos betões, foi necessário alterar a constituição das argamassas no que concerne à quantidade de areia, super-plastificante e relação entre os volumes de água e finos (Quadro 17). Estas últimas argamassas proporcionam um seguimento lógico deste estudo, sendo que, com adição de agregados grossos se constituíram as composições de betões sugeridas no Capítulo 6. As primeiras argamassas fabricadas serviram apenas de estudo as quais, como já referido, necessitaram de alterações de forma a obter as composições de betões desejadas.

Quadro 17. Composições e resultados das argamassas efectuadas as quais dão seguimento às composições de betão obtidas.

Argamassas efectuadas com CMII/A-L 42.5 R (50% areia com 60% fina) e 30% cinzas						
Resultados		30% cinzas e 0% pigmento	Vermelho	verde	preto	amarelo
Massa na mistura (g)	cimento	857	857	857	857	857
	cinzas	279	279	279	279	279
	água	407.6	367.2	366.6	365.8	359.7
	pigmento	0	39.9	50.2	64.7	62
	'areia 0/2'	1270	1270	1270	1270	1270
	'areia 0/4'	828	828	828	828	828
	Super-plastificante	6.8	7.9	8.5	9.3	15.5
% relativamente aos finos	Super-plastificante	1.7	1.95	2.1	2.1	3.85
Relação entre o volume de água e o volume de finos	Vw/Vpowder	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
Diâmetros de espalhamento [mm]	d1	250	255	245	245	240
	d2	255	255	245	245	240
	Média d	252.5	255	245	245	240
Resistências aos 7 dias	Média resistência à flexão [MPa]	7.8		7.8		
	Média resistência à compressão [MPa]	51.1		55.3		

Refira-se que, a quantidade de pigmento utilizada foi de 10% em relação ao volume de finos (e não em relação à sua massa como efectuado nas pastas), pelo que não poderá haver uma comparação directa a nível da cor entre o estudo das pastas e o estudo das argamassas. Nota: visto que a introdução de pigmento, normalmente é efectuada como sendo uma percentagem relativa à massa do cimento, apresenta-se no Quadro 18 a correspondência entre percentagens de pigmento adicionadas em massa e respectiva quantia em volume.

Quadro 18. Correspondência entre percentagens de pigmentos adicionados em massa e a respectiva percentagem em volume.

Pigmento	% cinzas adicionadas	% em massa de pigmento adicionado ($M_{\text{pigmento}}/M_{\text{powder}}$)	$M_{\text{pigmento}}/M_{\text{cimento}}$ [%]	% em volume de pigmento adicionado ($V_{\text{pigmento}}/V_{\text{powder}}$)
Amarelo	0	5,00	5,03	10,00
		10,00	10,07	20,00
	30	5,00	6,63	9,28
		10,00	13,26	18,57
Laranja	0	5,00	5,03	9,81
		10,00	10,07	19,63
	30	5,00	6,63	9,11
		10,00	13,26	18,21
Vermelho	0	5,00	5,03	10,33
		10,00	10,07	20,66
	30	5,00	6,63	9,60
		10,00	13,26	19,18
Castanho	0	5,00	5,03	9,68
		10,00	10,07	19,37
	30	5,00	6,63	8,99
		10,00	13,26	17,98
Preto	0	5,00	5,03	9,45
		10,00	10,07	18,90
	30	5,00	6,63	8,78
		10,00	13,26	17,55
Verde	0	5,00	5,03	12,20
		10,00	10,07	24,40
	30	5,00	6,63	11,33
		10,00	13,26	22,65

Para estudar a resistência à flexão e compressão das argamassas, produziram-se provetes prismáticos (dimensões: 40x40x160 mm³) (Figura 22) para se ensaiarem aos 7 dias. Os ensaios foram realizados de acordo com as normas NP EN 196-1: 2006 [35] e NP EN 197-1: 2001 [36]. Em recipientes plásticos guardou-se parte das argamassas que foram descofradas aos 7 dias de modo a serem posteriormente fotografadas para análise da cor (ver Anexo II – argamassas).

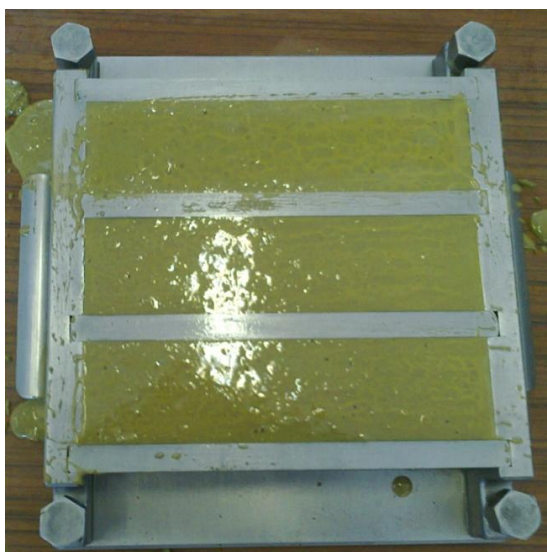


Figura 22. Provetes prismáticos com argamassa amarela a serem ensaiados à flexão e à compressão aos 7 dias.

Nesta etapa do estudo foi necessário um novo fornecimento de materiais, nomeadamente de agregados, cinzas, cimento e pigmentos. Os pigmentos novos revelaram uma diferença relativamente às densidades calculadas aos anteriores pelo que se fizeram ajustes nas quantidades de materiais necessários para a constituição das argamassas e posteriormente de betões. Esta variação é aceitável tendo em conta que se tratavam de amostras dos pigmentos. É provável que o pigmento quando comercializado não possua uma variação considerável de densidades entre lotes.

5.2. AJUSTE DA QUANTIDADE DE SUPER-PLASTIFICANTE

Um dos objectivos do estudo nas argamassas era o de confirmar a conclusão obtida no estudo das pastas: “a adição de pigmentos reduz significativamente a fluidez da mesma”. Como tal, após definida uma argamassa de referência ($V_{sp}/V_m=0.5$; $V_w/V_{powder}=1.0$; $V_{pigmento}/V_{powder}=10\%$; $V_{fa}/V_{powder}=30\%$, $V_{sp}/V_{powder} = 1.6\%$) com propriedades autocompactáveis, efectuou-se um estudo por tentativa erro que consistia em ajustar a quantidade de super-plastificante de modo a manter a argamassa com propriedades autocompactáveis quando eram introduzidos pigmentos. O Quadro 19 resume os resultados obtidos. O Anexo II – argamassas indica detalhadamente as composições das argamassas efectuadas.

Como se observa pelo Quadro 19, foi necessário aumentar a quantidade de super-plastificante em todas as argamassas pigmentadas. Assim, com este estudo, não só se confirma a hipótese que os pigmentos reduzem a fluidez das composições, como também se julga ter obtido uma estimativa para o aumento da quantidade de super-plastificante necessária para compensar a perda de autocompactabilidade para os estudos posteriormente efectuados ao nível dos betões.

Quadro 19. Ajuste da quantidade de super-plastificante quando se introduz pigmentos ($V_{pigmento}/V_{powder}=10\%$).

Pigmento	V_{sp}/V_{powder}	Variação %
Referência	1.6	-
Amarelo	2.7	169
Laranja	3.1	194
Vermelho	2.1	131
Preto	2.1	131
Verde	1.8	113

5.3. INFLUÊNCIA DAS AREIAS NA COR DAS ARGAMASSAS

De forma a determinar a influência das areias na cor da argamassa, efectuou-se um estudo comparativo entre as duas constituições de argamassas produzidas (Figura 23). A primeira delas possuía 45% de areia e uma relação entre volumes de água/finos de 1.0, enquanto que a segunda tinha 50% de areia e apresentava uma relação entre volumes de água/finos de 0.9 (ver Anexo II – argamassas). Uma vez que a relação água/finos também variava, a comparação não foi directa, no entanto julgou-se que o aspecto mais significativo na alteração da cor seria a quantidade de areias. Desta forma codificaram-se os ‘valores’ das cores obtidas numa e noutra constituição de argamassa e compararam-se os mesmos. O estudo recaiu sobre três argamassas: argamassa com pigmento amarelo, argamassa de referência e argamassa com pigmento preto, onde tal efeito demonstrou-se mais significativo (ver Anexo II – argamassas).

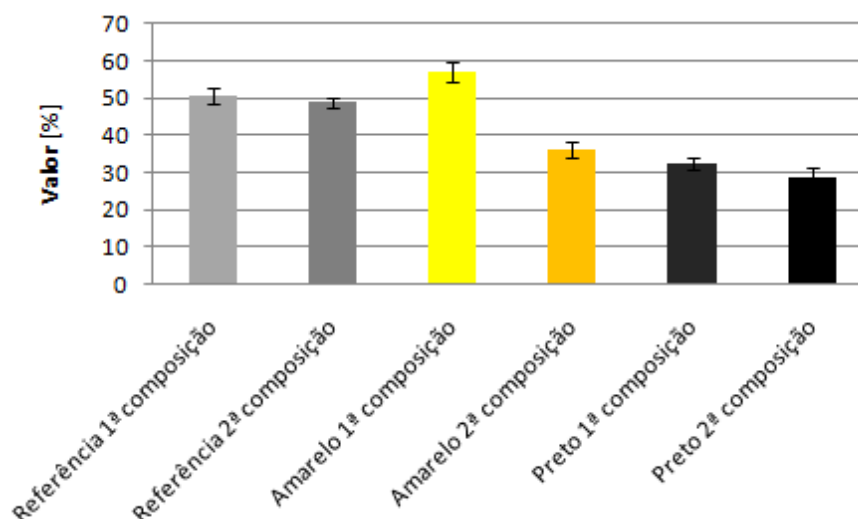


Figura 23. Comparação entre valores das duas constituições de argamassas.

Como se pode verificar na Figura 23, os ‘valores’ das argamassas com 50% de areia diminuíram relativamente aos ‘valores’ das argamassas com 45% do mesmo material. Desta forma julga-se que as areias basálticas provocam um ligeiro escurecimento da cor das argamassas, no entanto esta conclusão necessita ser confirmada (trabalho futuro pois existiam mais variáveis que foram alteradas (quantidade de super-plastificante e rácio de água/finos)).

5.4. RESISTÊNCIA DE ARGAMASSAS COM PIGMENTO

Para avaliar a influência dos pigmentos na resistência produziram-se argamassas que incorporavam pigmentos e comparou-se com a resistência da argamassa de referência. A dosagem de pigmentos

utilizada foi: $V_{\text{pigmento}}/V_{\text{powder}}=10\%$. Apresentam-se na Figura 24 e Figura 25 os resultados obtidos na resistência à compressão e na resistência à flexão, respectivamente.

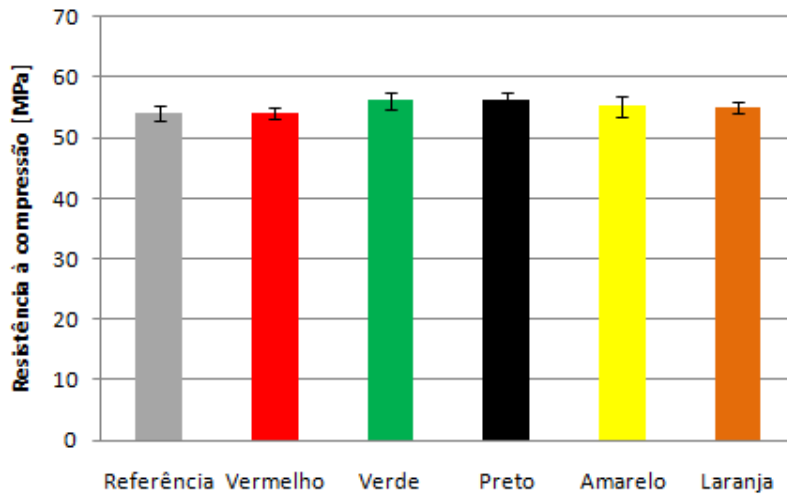


Figura 24. Resistência à compressão aos 7 dias em provetes pigmentados.

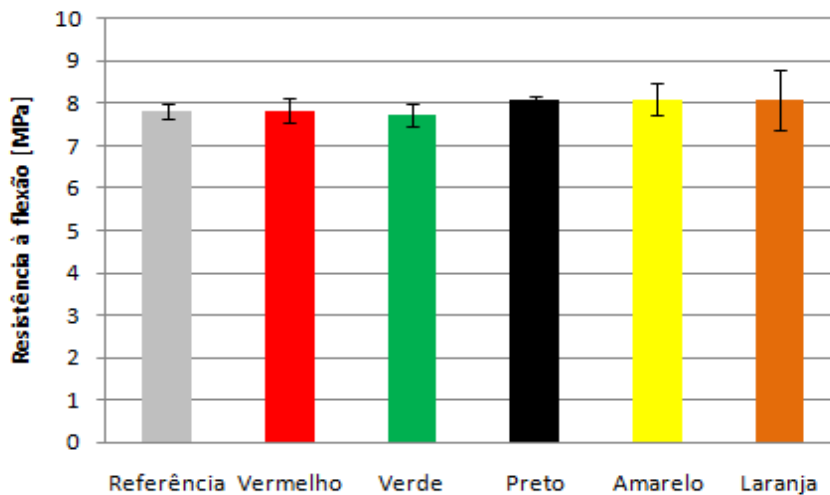


Figura 25. Resistência à flexão aos 7 dias em provetes pigmentados.

Analisando a Figura 24 conclui-se que a resistência à compressão aumentou ligeiramente nas argamassas que incorporavam pigmentos (com excepção da argamassa vermelha em que se verificou um decréscimo de 0.1 MPa). Este aumento de resistência, provavelmente, deveu-se ao facto dos pigmentos terem sido introduzidos na composição das argamassas por substituição de igual volume de água. Note-se que, embora a composição química dos pigmentos seja desconhecida, julgou-se que os pigmentos líquidos continham uma percentagem de materiais sólidos. Assim, a incorporação de pigmentos implicou uma redução da quantidade de água efectiva na amassadura, o que consequentemente originou um aumento de resistência.

Analisando a Figura 25 conclui-se que a incorporação de pigmentos conduziu a ligeiros aumentos dos valores médios da resistência à flexão em algumas argamassas com pigmentos.

5.5. NOTAS FINAIS

Através do estudo feito a duas argamassas de referência diferentes, julga-se que o teor em areia basáltica escurece ligeiramente a cor das argamassas. Por outro lado confirma-se que a introdução de pigmentos conduz a uma perda de fluidez das misturas, sendo que essa perda de fluidez pode ser compensada através do ajuste da quantidade de super-plastificante.

Quanto às resistências mecânicas, a adição de 10% de pigmento (com substituição directa de água) incrementa ligeiramente a resistência à compressão das argamassas pigmentadas relativamente à argamassa de referência.

6

RESULTADOS EXPERIMENTAIS EM BETÕES

6.1. INTRODUÇÃO

Com base nos estudos realizados em pastas e argamassas, com base na literatura e realizando algumas amassaduras por tentativa erro, definiu-se uma composição de betão (sem pigmentos) que foi considerada de ‘referência’. A composição de referência definiu-se pelos seguintes parâmetros: (i) $V_g/V_{g,lim}=0.50$; (ii) o volume de brita: 70% de ‘brita 4/10’ e 30% 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 5.1 (exceptuando a dosagem de super-plastificante que era $S_p/powder = 1.7\%$).

Após a composição de referência, foram produzidas 6 amassaduras de teste incorporando pigmentos: $V_{pigmento}/V_{powder} = 10\%$, ou seja, incorporando 19.0 litros/m³ de pigmentos (que foram introduzidos através da substituição de 19.0 litros de água). Tal como já observado nas pastas e argamassas, a introdução de pigmento levou a uma perda de autocompactibilidade considerável, levando à necessidade de se ajustar a quantidade de super-plastificante introduzido em cada amassadura.

Uma vez que para a produção dos betões necessários à betonagem do protótipo foi necessário utilizar pigmentos de um novo fornecimento, e dado que as densidades dos mesmos eram consideravelmente mais baixas (provavelmente continham um teor de sólidos consideravelmente inferior aos anteriores), decidiu-se aumentar a percentagem de pigmento incorporado na amassadura. Assim a cor obtida seria mais nítida. Desta forma efectuaram-se 5 novas amassaduras, com composições diferentes, de modo a betonar a parede pretendida (protótipo). Estas amassaduras foram obtidas com adição de 15% de pigmento (em volume) no caso do vermelho e preto e 25% de pigmento no caso do amarelo e laranja. A composição de referência foi repetida relativamente à supracitada e não se efectuou composição

verde porque o pigmento não foi fornecido em quantidades suficientes para produzir o volume necessário à betonagem pretendida.

Após a pesagem de todos os constituintes do betão, misturaram-se os mesmos numa misturadora tri-axial, respeitando a sugestão de aplicar o pigmento após o betão estar já suficientemente misturado. Seguiram-se os ensaios no estado fresco. O primeiro ensaio a ser efectuado foi o espalhamento, seguido do Funil V, da Caixa L e da segregação de acordo com as Normas NP EN 12350 – 8-11 [30]. Finalmente moldaram-se cubos com $150 \times 150 \times 150 \text{ mm}^3$ para posterior registo fotográfico e ensaio da resistência à compressão aos 7 e 28 dias. Nos Quadros 20-23 apresenta-se as propriedades e quantidades das amassaduras, os diâmetros de espalhamento e as resistências obtidas aos 7 e 28 (ou 57) dias.

Composições de teste:

Quadro 20. Parâmetros e quantidades por m^3 das amassaduras dos primeiros betões produzidos.

Parâmetros	Designação					
	Referência	Vermelho	Verde	Amarelo	Preto	Laranja
V_w/V_{powder} [-]	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
V_{fa}/V_{powder} [%]	30	30	30	30	30	30
V_s/V_m [%]	50	50	50	50	50	50
V_{s1}/V_s [%]	60	60	60	60	60	60
V_{s2}/V_s [%]	40	40	40	40	40	40
V_{sd}/V_{powder} [%]	2.5	3.5	3.8	4.0	3.5	4
$V_{\text{pigmento}}/V_{\text{powder}}$ [%]	0	10	10	10	10	10
% vazios [%]	4	4	4	4	4	4
Volume [l]	40	40	40	40	40	40
V_{g1}/V_g [%]	70	70	70	70	70	70
V_{g2}/V_g [%]	30	30	30	30	30	30
Cimento	412.0	412.0	412.0	412.0	412.0	412.0
Cinzas	134.0	134.0	134.0	134.0	134.0	134.0
Super-plastificante	4.8	6.8	7.4	7.8	6.8	7.7
Massa (kg/m^3)	‘areia 0/2’	609.0	609.0	609.0	609.0	609.0
	‘areia 0/4’	397.0	397.0	397.0	397.0	397.0
	‘brita 4/10’	475.0	475.0	475.0	475.0	475.0
	‘brita 8/16’	203.0	203.0	203.0	203.0	203.0
	Pigmento	0.0	28.4	45.0	29.5	28.4
Água	212.5	191.6	210.6	188.8	191.6	190.7

Quadro 21. Propriedades do estado fresco das composições de teste.

Parâmetros		Designação					
		Referência	Vermelho	Verde	Amarelo	Preto	Laranja
Diâmetro de espalhamento	[mm]	745	710	560	575	690	505
Funil V	[s]	7.9	11.8	11.9	9.4	7.2	8.7
Caixa L	H2/H1	0.9	0.8	0.8	0.7	0.9	0.7
Segregação	[%]	17	8	14	13	10	13

Segundo a NP EN 12350 -8-11 [30] pode-se verificar que os valores apresentados no Quadro 21 são admissíveis no que concerne aos resultados do estado fresco de composições de BAC's. Refira-se que o estado fresco não foi exactamente igual para todas as composições, visto que a percentagem de super-plastificante utilizada foi ajustada com base nos estudos desenvolvidos em argamassas.

Mais uma vez se confirma a perda de fluidez que a adição de pigmentos impõe, sendo o diâmetro de espalhamento de qualquer um dos betões pigmentados inferior ao diâmetro do betão de referência, apesar do ajuste da quantidade de super-plastificante que corrige maioritariamente este efeito. O aumento de viscosidade devido à adição de pigmentos é também bastante notório no tempo de escoamento no funil V em que apenas no betão preto se obteve um valor mais baixo do que o do betão de referência. Quanto aos valores da capacidade de passagem na caixa L e da segregação no peneiro, segundo a NP EN 12350 – 10 e 11 [30], pode-se concluir que são bastante aceitáveis.

Composições para a betonagem do protótipo:

Quadro 22. Parâmetros e quantidades das amassaduras dos betões produzidos para a betonagem da parede.

Parâmetros	Designação				
	Referência	Vermelho	Amarelo	Preto	Laranja
V_w/V_{powder} [-]	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
V_{fa}/V_{powder} [%]	30	30	30	30	30
V_s/V_m [%]	50	50	50	50	50
V_{s1}/V_s [%]	60	60	60	60	60
V_{s2}/V_s [%]	40	40	40	40	40
V_{sp}/V_{powder} [%]	2.5	3.5	6.7	3.8	8.5
$V_{\text{pigmento}}/V_{\text{powder}}$ [%]	0	15	25	15	25
%vazios [%]	4	4	4	4	4
Volume [l]	45	45	55	55	45
V_{g1}/V_g [%]	70	70	70	70	70
V_{g2}/V_g [%]	30	30	30	30	30
Cimento	412.0	412.0	412.0	412.0	412.0
Cinzas	134.0	134.0	134.0	134.0	134.0
Super-plastificante	4.8	7.4	14.4	7.4	15.0
‘areia 0/2’	609.0	609.0	609.0	609.0	609.0
‘areia 0/4’	397.0	397.0	397.0	397.0	397.0
‘brita 4/10’	475.0	475.0	475.0	475.0	475.0
‘brita 8/16’	203.0	203.0	203.0	203.0	203.0
Pigmento	0.0	55.5	44.1	44.1	55.9
Água	211.8	181.6	172.9	181.1	161.8
Massa (kg/m³)					

Segundo as normas NP EN 12350 – 8-11 [30] os resultados obtidos e representados no Quadro 23 encontram-se dentro do normal para o comportamento fresco de um BAC. Tal como pode ser observado no Quadro 21 e no Quadro 23, os diâmetros de espalhamento inferiores foram obtidos com os pigmentos amarelo e laranja, tal como já fora visto no estudo das pastas e das argamassas. É de notar que a compensação feita pela adição do super-plastificante não anulou por completo o aumento de viscosidade dos pigmentos. Comparando as duas composições de betões efectuadas e tendo e conta

a maior adição de pigmento na segunda, com o devido ajuste de super-plastificante, o diâmetro de espalhamento não sofre uma alteração considerável. Quanto ao tempo do funil, índice de passagem e segregação também não se observam grandes diferenças no comportamento no estado fresco dos dois betões, sendo de grande proveito o estudo feito ao super-plastificante no âmbito das argamassas.

Quadro 23. Propriedades do estado fresco dos betões produzidos para o protótipo.

Parâmetros		Designação				
		Referência	Vermelho	Amarelo	Preto	Laranja
Diâmetro de espalhamento	[mm]	755	655	605	615	565
Funil V	[s]	7.0	10.2	7.3	11.4	11.2
Caixa L	H2/H1	0.9	0.8	0.7	0.8	0.7
Segregação	[%]	7	12	13	12	15

Após 1 a 3 dias da data de fabrico dos cubos, os mesmos foram colocados numa câmara, submersos por água a 20°C. Permaneceram aí até aos 7 dias/28 dias, até serem ensaiados à compressão numa prensa Walter+Baiag STM 3000 de acordo com a norma NP EN 12390-3 [31]. Em cada amassadura um dos cubos constituídos foi retirado da água três dias depois de lá permanecer e sujeito a exposição ambiental de modo a ser fotografado aos 7 e 28 dias (ver Anexo III – betões).

Na primeira produção (amassaduras de teste) foram feitas 6 amassaduras diferentes: pigmentada de vermelho, amarelo, verde, laranja e preto, e ainda a amassadura de referência (sem qualquer adição de pigmento). Produziram-se 5 cubos por cada amassadura (2 para ensaiar à compressão aos 7 dias, 2 para ensaiar à compressão aos 28 dias e 1 para fotografar), exceptuando a do pigmento vermelho em que só se produziram 3 cubos (utilizou-se apenas 1 cubo para cada ensaio à compressão e 1 para fotografar).

Quanto aos betões produzidos para a betonagem da parede, efectuaram-se igualmente cubos os quais se ensaiaram à compressão aos 28 dias e à data do ensaio das carotes (57 dias), e efectuou-se um registo fotográfico semelhante ao procedimento seguido para os betões anteriores (ver Anexo III – betões).

6.2. RESISTÊNCIAS À COMPRESSÃO DE BETÕES PIGMENTADOS

Conforme se pode verificar na Figura 26, os betões produzidos com 10% de pigmento ($V_{\text{pigmento}}/V_{\text{powder}}$) apresentaram uma maior resistência à compressão do que o betão de referência (não pigmentado), tanto aos 7 como aos 28 dias. Note-se que estes resultados estão em concordância com os resultados obtidos nas argamassas. Assim, da mesma forma que para as argamassas, julgou-se que

este facto se devia essencialmente ao teor de sólidos dos pigmentos (redução da água efectiva). Refira-se que o aumento de resistência dos 7 para os 28 dias nos betões pigmentados foi semelhante ao observado na composição de referência (ordem dos 30 a 40%).

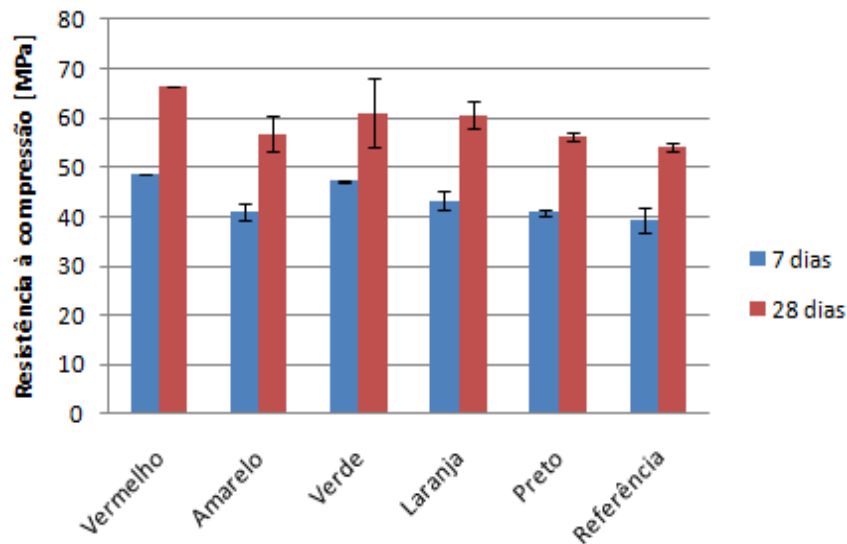


Figura 26. Comparação das resistências entre o betão de referência e os betões pigmentados aos 7 e 28 dias.

Conforme é possível verificar na Figura 27, os betões produzidos para a betonagem da parede protótipo seguiram a mesma tendência que os betões produzidos anteriormente a nível da resistência à compressão. Os betões pigmentados demonstraram mais resistência do que o betão de referência.

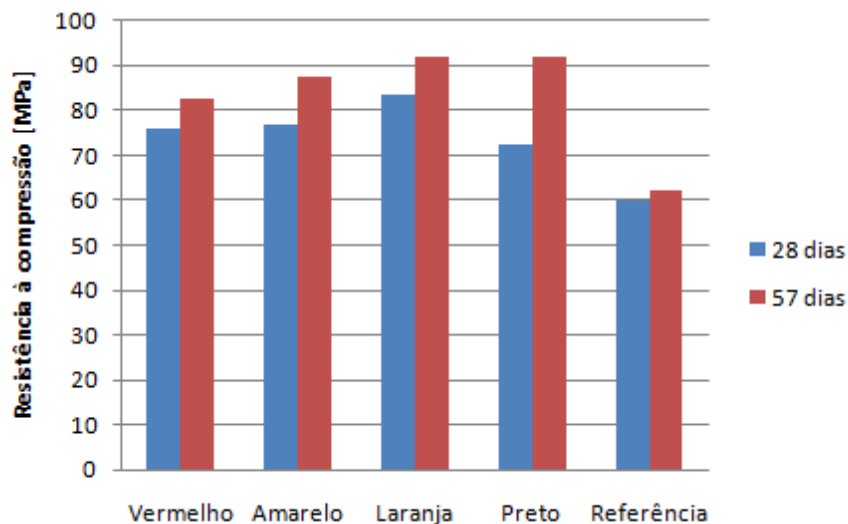


Figura 27. Resistência à compressão aos 28 e aos 57 dias dos betões produzidos para a betonagem da parede protótipo.

6.3. ANÁLISE DA COR DO BETÃO

6.3.1. INFLUÊNCIA DO PASSAR DO TEMPO NA COR

Conforme se pode verificar na Figura 28 e tal como já referido para as pastas, com o passar do tempo a cor obtida perde-se ligeiramente. O betão amarelo foi aquele em que se notou mais esse fenómeno. Este betão também foi o escolhido para a determinação deste aspecto dado que o registo fotográfico do mesmo foi feito à mesma superfície do cubo.

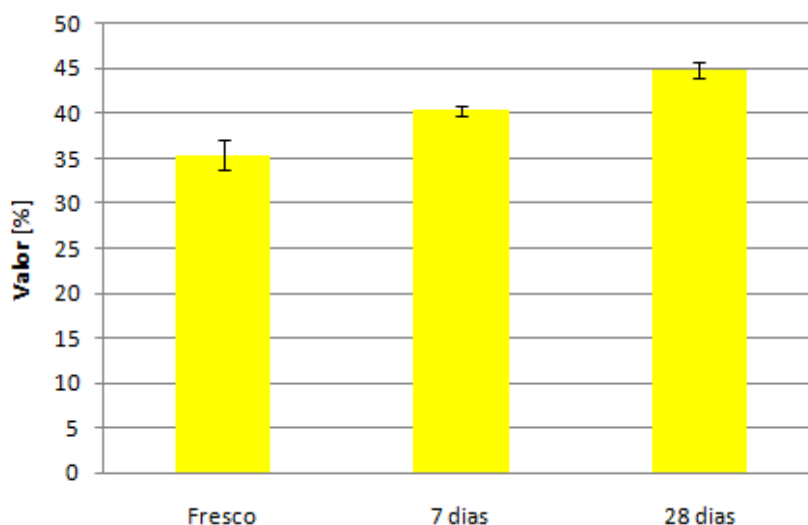


Figura 28. Alteração do 'valor' da cor no betão amarelo entre o estado fresco e os 7 e 28 dias.

6.3.2. INFLUÊNCIA DA PERCENTAGEM DE PIGMENTO ADICIONADO

Uma vez que se efectuaram 2 composições diferentes (com duas percentagens de pigmento diferentes), decidiu-se analisar a alteração que sucedeu na cor (Figura 29 e Figura 30).

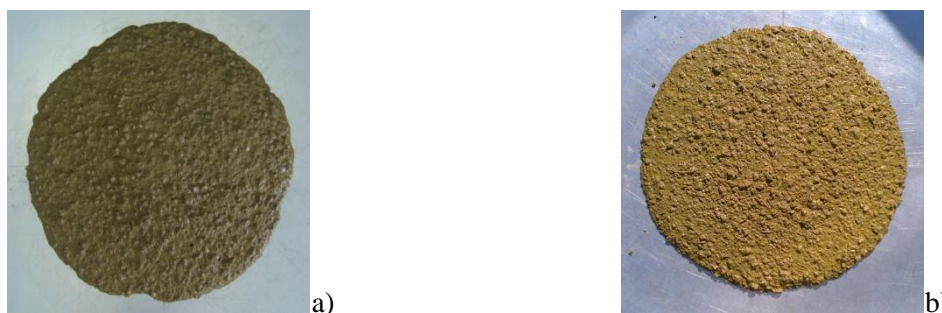


Figura 29. Betões produzidos com a adição de pigmento amarelo, em estado fresco: a) Primeira composição efectuada com 10% de pigmento, b) Segunda composição efectuada com 25% de pigmento.

Para quantificar este aspecto utilizou-se o parâmetro ‘saturação’ da escala HSV nos betões amarelo, laranja e vermelho e o parâmetro ‘valor’ no betão preto (uma vez que conforme já observado, a ‘saturação’ no preto é um parâmetro que se comporta de forma diferente, considerou-se mais adequado o parâmetro ‘valor’ de modo a observar o escurecimento da cor). Assim, concluiu-se que a adição de mais 5% de pigmento no betão vermelho e preto contribuiu para um melhoramento na ordem dos 76% e 15% respectivamente, e, devido à adição de mais 15% de pigmento, no betão amarelo e laranja melhorou-se a cor em 24% e 21%, respectivamente.

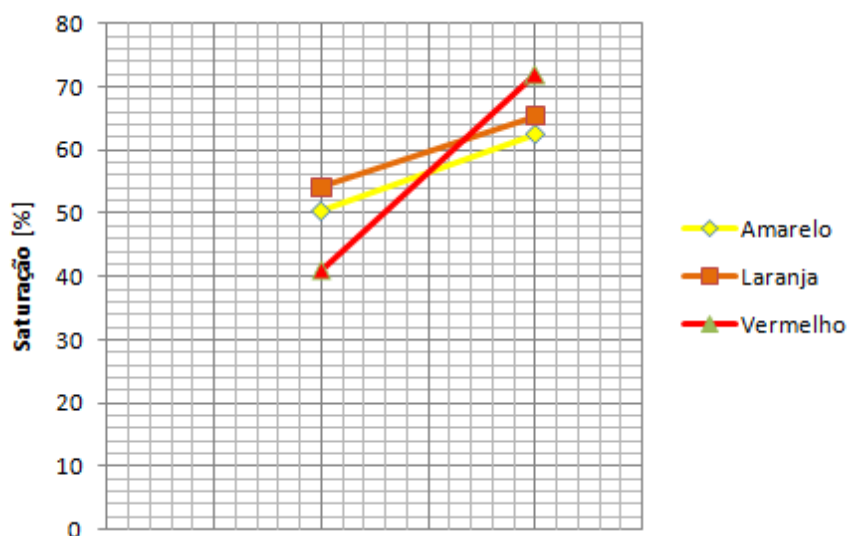






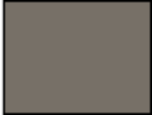

















Figura 30. Aumento da saturação da cor devido ao incremento de pigmento na mistura de betão.

6.3.3. CATÁLOGO COM A DEFINIÇÃO DAS CORES OBTIDAS ATRAVÉS DAS CONSTITUIÇÕES PRODUZIDAS

As cores finais obtidas nos betões encontram-se catalogadas no Quadro 24 através da escala HSV. Conforme se pode verificar no Quadro 24, as cores obtidas são escuras, tanto na primeira composição como na segunda, muito embora com a segunda composição se alcancem resultados melhores (ver Anexo III – betões). Neste quadro também é possível verificar o quanto a cor ‘desbotou’ (perda de cor recuperável aquando do humedecimento da superfície) entre o estado fresco e o estado endurecido (aos 28 dias). Conclui-se desta forma que seria relevante tentar produzir betão com pastas mais claras (nomeadamente com o uso de CEM II/B-L 32.5 N ou CEM II/B-L 32.5 R (br), e menos percentagem de cinzas volantes) e ponderar o uso de um produto de acabamento superficial que melhorasse e mantivesse a cor obtida, nomeadamente um verniz.

Quadro 24. Catálogo dos betões produzidos através das duas composições elaboradas (estado fresco e estado endurecido após 28 dias).

Composição	Referência		Amarelo		Laranja	
	Fresco	28 dias	Fresco	28 dias	Fresco	28 dias
1ª						
	H:34, S:14, V:48	H:138, S:6, V:53	H:49, S:46, V:38	H:55, S:44, V:45	H:21, S:53, V:32	H:41, S:51, V:49
2ª						
	H:34, S:14, V:48	H:138, S:6, V:53	H:36, S:57, V:60	H:54, S:56, V:50	H:22, S:84, V:39	H:36, S:64, V:48
Composição	Vermelho		Preto		Verde	
	Fresco	28 dias	Fresco	28 dias	Fresco	28 dias
1ª						
	H:11, S:81, V:43	H:13, S:40, V:43	H:20, S:30, V:25	H:173, S:25, V:32	H:112, S:32, V:26	H:110, S:22, V:46
2ª						
	H:1, S:83, V:38	H:15, S:82, V:40	H:93, S:25, V:9	H:142, S:24, V:15		

6.4. NOTAS FINAIS

Na análise feita aos betões pode-se concluir que os betões pigmentados possuem uma maior resistência à compressão que o betão de referência, tanto aos 7 como aos 28 dias (quando a incorporação de pigmento é realizada através de substituição de igual volume de água, havendo assim diminuição da água efectiva na amassadura). Entre os 7 e os 28 dias há um aumento de resistência entre 30% a 40%. O betão com que se obteve um valor mais elevado de resistência foi o vermelho (com 48.6 MPa aos 7 dias e 66.4 MPa aos 28 dias).

Comparando as duas composições de betões que se produziram (composições de teste e betonagem do protótipo) verificou-se um incremento da resistência nos betões fabricados para a betonagem da parede. Esse incremento tem o valor de 14.3% no betão vermelho, 35.5% no betão laranja, 37.5% no betão amarelo, 29.4% no betão preto e 10.7% no betão de referência. Estimou-se que este aumento se devesse à substituição directa de uma maior percentagem de pigmento por água. Desta forma, uma vez

que o incremento de percentagem de pigmento foi superior no betão amarelo e laranja relativamente ao preto e vermelho, era de esperar que o aumento de resistência também fosse superior. Quanto ao betão de referência não se pode justificar facilmente o aumento de resistência, podendo dever-se a múltiplos factores, e, sendo a composição a mesma, provavelmente deveu-se a variáveis incontroláveis, nomeadamente a temperatura e a humidade do ar aquando da produção do betão e as suas consequências na presa do mesmo.

Em termos de cor, e devido à constituição basáltica dos agregados, à adição de 30% de cinzas volantes e à cor escura do cimento utilizado (CEM II/A-L 42.5 R), os tons obtidos foram escuros, funcionando razoavelmente bem no betão vermelho, verde e preto, mas não tão convenientes no betão amarelo e laranja. O uso de verniz poderia possibilitar a obtenção de uma cor superficial próxima do seu estado fresco, atenuando o efeito de ‘esbatimento’ da cor entre o estado fresco e endurecido e com o envelhecimento, contudo tal estudo sai do âmbito deste trabalho.

PROTÓTIPO E PROPRIEDADES NA 'INTERFACE'

7.1. INTRODUÇÃO

De forma a entender quais as propriedades das 'interfaces' entre os vários betões coloridos, nomeadamente as suas resistências, betonou-se uma superfície vertical com 1.20 m de comprimento, 0.9 m de altura e 0.30 m de espessura (Figura 31). Este protótipo serviu essencialmente para verificar o aspecto final de uma betonagem com as condições previstas neste estudo e a obtenção de carotes para ensaiar à compressão e verificar a resistência presente nas 'interfaces' entre os vários betões, bem como analisar a aderência entre eles.

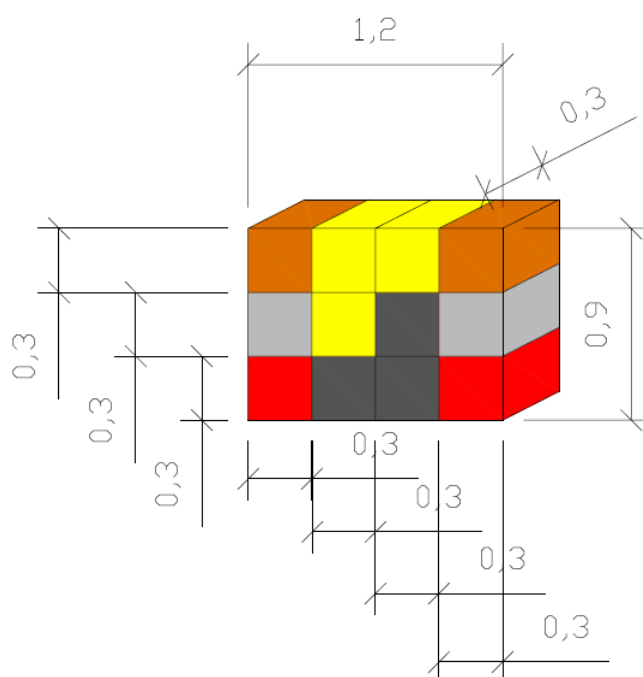


Figura 31. Protótipo a betonar.

Devido à indisponibilidade do pigmento verde (não foi fornecido em quantidades suficientes), e devido à semelhança em termos de cor dos pigmentos laranja e castanho, usaram-se apenas os pigmentos amarelo, laranja, vermelho e preto na betonagem do protótipo a ser betonado. Utilizou-se ainda o betão de referência na constituição do mesmo. De forma a obter tons mais nítidos, utilizou-se uma percentagem de pigmento igual a 15% nos betões vermelho e preto e de 25% nos betões amarelo e laranja.

O primeiro betão a ser betonado foi o vermelho, seguido do preto e do de referência. Seguiu-se o laranja e finalmente o amarelo. No auxílio à sua betonagem foi necessária uma cofragem exterior e 2 pares de tábuas móveis de forma a gerir a betonagem e executá-la com o intuito final de se assemelhar ao protótipo projectado. As tábuas referidas tinham as seguintes dimensões: $0.5 \times 0.3 \text{ m}^2$ e $0.9 \times 0.3 \text{ m}^2$.

Para o previsto encomendou-se uma cofragem. A cofragem cedida constituiu-se por chapas de Viroc [37] e foi confinada por ripas de madeira e cimbres apoiados no chão e nas paredes do local de execução da betonagem. As tábuas móveis utilizadas foram de madeira e com as referidas dimensões.

7.2. BETONAGEM, RESULTADOS E PROBLEMAS

A betonagem foi feita pela ordem prevista, no entanto com diversos percalços. A espessura diferencial entre os dois painéis verticais da cofragem era inferior a 0.3 m, pelo que as tábuas utilizadas no seu interior não puderam ficar exactamente na vertical, mas sim oblíquas. Desta forma, para além de alterar a estética da parede, também comprometeu a estabilidade das tábuas. Sem confinamento lateral, as tábuas deslizaram pelo que os betões não ficaram dispostos conforme previsto. Isto aconteceu na betonagem do betão vermelho (que escorreu por toda a superfície inferior) e no betão laranja (Figura 32 a)).

Outro dos problemas encontrados foi a absorção de óleo descofrante do material da cofragem (Viroc). Antes da betonagem toda a cofragem foi coberta de óleo descofrante mas a cofragem absorveu esse material. Desta forma ao retirar a cofragem a superfície da peça foi parcialmente destruída (Figura 32 b)).

O tempo de presa dos diversos betões não foi estudado o que resultou numa má aderência entre eles (Figura 32 c)), originando um plano de fragilidade na zona da 'interface'.



Figura 32. Problemas na execução da betonagem: a) Dano superficial, b) Falta de aderência na 'interface', c) Escoamento indevido do betão.

A nível de cores obtidas nos betões, verificou-se que, para além de escuras, possuíam manchas ao longo da superfície betonada, sendo pouco homogéneas.

A Figura 33 demonstra o resultado final da betonagem do protótipo três dias após a sua execução.



Figura 33. Protótipo betonado.

7.3. POSSÍVEIS SOLUÇÕES

De forma a que a betonagem tivesse sucesso e a superfície final fosse a pretendida era essencial que as dimensões da cofragem fossem mais correctas e o seu material não absorvesse o óleo desmoldante. Para um acabamento bem liso e nivelado a cofragem poderia ser metálica ou em contraplacado marítimo.

Ao nível da cor, podia-se utilizar CEM II/B-L 32.5 N ou CEM II/B-L 32.5 R (br) na produção de betão e utilizar uma quantidade de cinzas volantes inferior à utilizada para obter tons mais nítidos e claros, ou filer calcário em sua substituição. Para uma maior estabilidade da cor e homogeneidade deveria ser considerado a mistura do betão numa misturadora própria para betão autocompactável e misturar durante mais tempo após a aplicação do pigmento. Finalmente deveria ser considerado um ou

mais produtos de acabamento para melhorar a cor superficial e proporcionar a sua manutenção, nomeadamente um verniz, anti-grafite e um agente de auto limpeza.

É essencial o estudo do tempo de presa dos betões de forma a obter uma boa aderência entre os mesmos. Para betões estruturais esta é uma questão crucial. Se não houver cálculo do tempo de presa e houverem problemas de aderência entre betões, a ‘interface’ torna-se num plano de fragilidade da peça.

7.4. PROPRIEDADES NA INTERFACE

Após 57 dias de exposição ambiental, o protótipo foi caroteado (Figura 35 a) em conformidade com a norma NP EN 12504-1 [32] e os requisitos necessários aos provetes segundo a norma NP EN 12390-1 [31]. Uma vez que os provetes betonados anteriormente na produção de betão eram cúbicos, e seguindo a norma NP EN 12504-1 [32], efectuaram-se carotes (Figura 35 b) cuja relação entre comprimento e diâmetro foi de 1:1 (de modo a haver uma correlação directa com os provetes cúbicos).

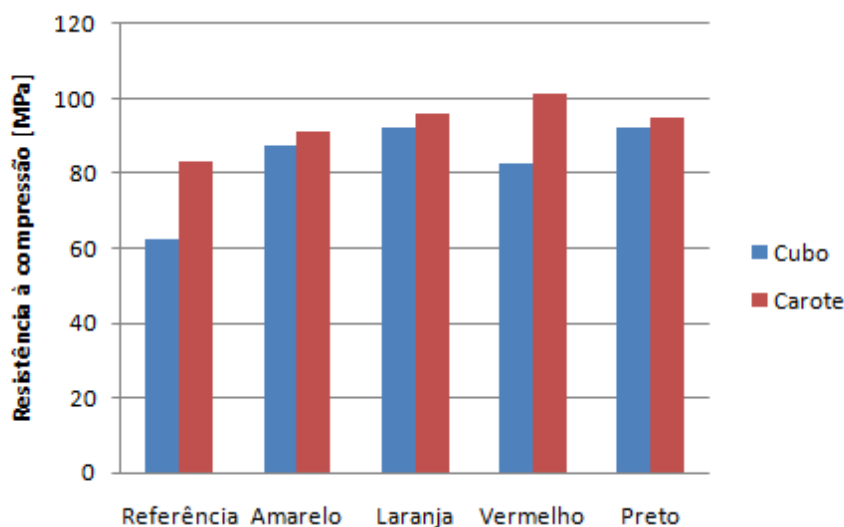


Figura 34. Comparação das resistências em cubos e carotes dos betões após 57 dias.

De forma a verificar a correlação entre os resultados à resistência encontrados nos cubos e nas carotes, efectuou-se um estudo (Figura 34) no qual se comparou a resistência à compressão obtida aos 57 dias nos dois tipos de provetes. Conforme se pode ver na Figura 34, a resistência demonstrada nas carotes é ligeiramente superior à apresentada nos cubos. No betão de referência e no vermelho, essa diferença é considerável. Quanto ao betão de referência este estudo foi inconclusivo porque o cubo de betão permaneceu exposto ambientalmente durante os 57 dias. Quanto ao betão vermelho, e estando

submerso durante o tempo anterior ao ensaio, não se consegue justificar uma diferença tão elevada nas resistências.

É de salientar que o processo necessário à obtenção e preparação das carotes foi extremamente moroso pelo que cumprindo os limites temporais do presente trabalho não se puderam efectuar mais exemplares.

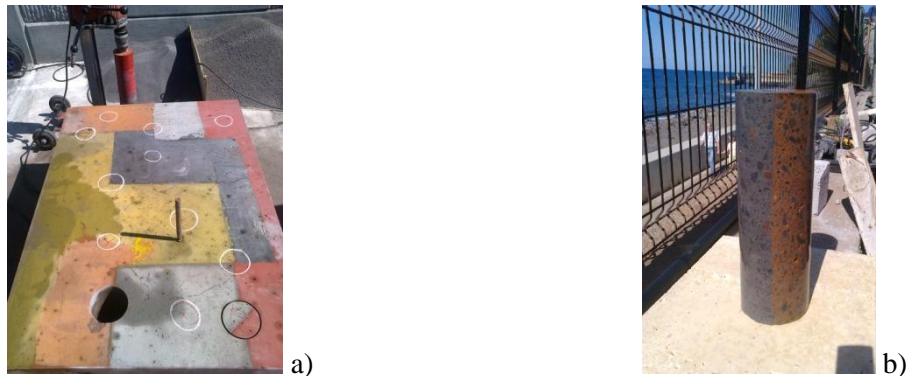


Figura 35. Carotes: a) Protótipo com 2 carotes executadas, b) Carote retirada do protótipo antes de ser preparada para o ensaio de compressão.

Processo seguido na obtenção e preparação das carotes:

1. Colocação da peça na horizontal com auxílio de um empilhador;
2. Fixação da caroteadora na superfície da peça (Figura 36 a));
3. Execução das carotes molhando sempre a peça de forma a não aquecer demasiado a broca;
4. Corte das bases das carotes na máquina de corte para que ficassem do tamanho pretendido (Figura 36 b);
5. Rectificação da planura das duas bases do cilindro (carote ou provete) Figura 36 c);
6. Análise visual da peça segundo a NP EN 12504 -1 [32];
7. Execução das medições necessárias à verificação da planura, perpendicularidade e linearidade conforme as normas NP EN 12504-1 [32] e NP EN 12390-1 [31];
8. Ensaio à compressão na mesma prensa utilizada na análise de resistência dos cubos de betão;



Figura 36. Processo de obtenção e preparação de carotes: a) Obtenção das carotes, b) Corte, c) Rectificação dos provetes.

Uma das carotes retiradas em zonas de ‘interface’ desagregou-se durante o processo de obtenção e preparação, antes do ensaio de compressão (Figura 37). Essa peça desintegrou-se apenas sofrendo exposição solar e uma ligeira pressão manual. Este facto realça ainda mais a importância do estudo do tempo de presa. As restantes ‘interfaces’ demonstraram-se mais estáveis. Contudo é de referir que em todas elas se notou que a aderência entre betões não foi completa. Após o ensaio à compressão todas as carotes de ‘interfaces’ se encontravam susceptíveis a desagregação pelo plano da ‘interface’ apenas com uma ligeira solitação manual.



Figura 37. Desintegração do provete retirado na zona de interface entre o betão de referência e o betão laranja:
a) Carote no estado inicial, b) Carote desagregada.

Conforme se pode ver na Figura 38 e no Quadro 25 as zonas de ‘interface’ demonstraram menos resistência à compressão do que as zonas com uma só coloração. Essa diminuição está na ordem dos 7-15 MPa relativamente ao betão com menor resistência à compressão presente nessa ‘interface’.

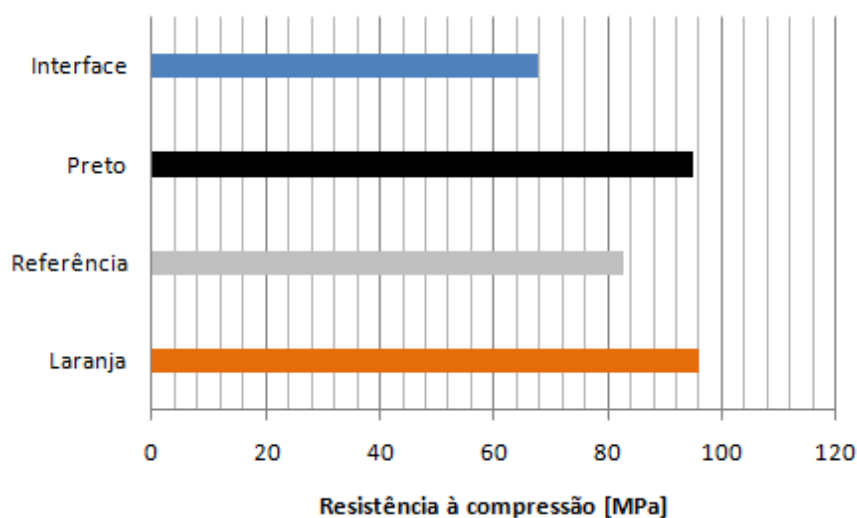


Figura 38. Comparação da resistência à compressão entre a ‘interface’ entre o betão de referência, laranja e preto e as resistências individuais dos mesmos betões.

Em duas das carotes em zonas de ‘interface’ verificou-se um incremento de resistência relativamente ao betão com resistência inferior. Uma delas foi a carote da ‘interface’ entre o betão laranja e o de referência (Figura 39). Este facto pode ser justificado tendo em conta que a quantidade de betão de referência era muito pouco considerável, alterando pouco a área total do provete sujeita ao ensaio. Sendo assim, o provete era maioritariamente constituído por betão laranja e a zona de betão de referência desintegrou-se muito antes da sua rotura, o que resultou numa semelhança à carote de betão laranja (sem interface).

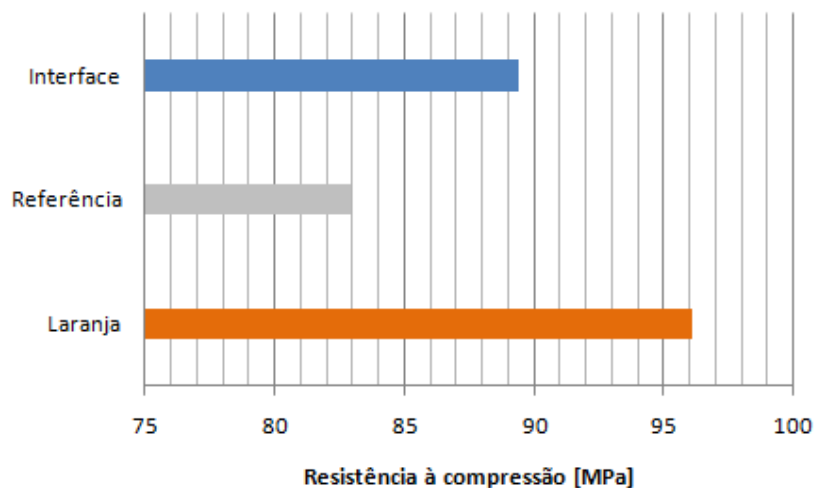


Figura 39. Comparação da resistência à compressão da ‘interface’ entre o betão laranja e de referência e as resistências individuais dos mesmos betões.

A outra situação foi a carote de ‘interface’ entre quatro betões (amarelo, vermelho, referência e preto) (Figura 40). Julgou-se assim que uma vez que a carote era maioritariamente constituída por betões mais resistentes do que o de referência esse aspecto melhorou significativamente a perda de resistência dos planos de ‘interface’.

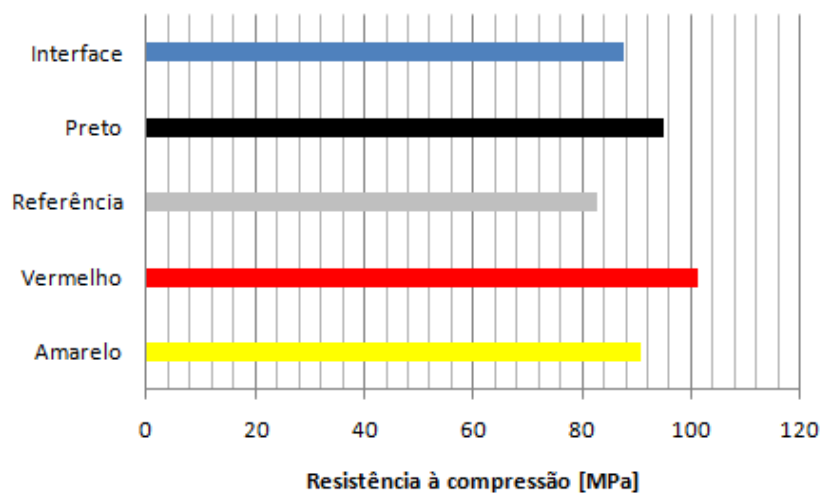


Figura 40. Comparação da resistência à compressão da ‘interface’ entre o betão preto, amarelo, referência e vermelho e as resistências individuais dos mesmos betões.

Quadro 25. Resistência à compressão das carotes retiradas do protótipo.

Betão/ Interface	Altura da carote [mm]	Diâmetro da carote [mm]	Resistência à compressão [MPa]
Preto	108	105	95.1
Referência	104	105	82.9
Amarelo	104	104	90.9
Laranja	104	104	96.1
Vermelho	105	105	101.2
Vermelho/Referência	105	104	68.9
Vermelho/Referência	106	104	70.3
Amarelo/Preto	104	105	93.6
Amarelo/Preto	106	104	80.7
Amarelo/Preto	106	105	77.1
Laranja/Referência/Preto	106	104	67.7
Laranja/Referência	104	104	89.4
Laranja/Referência			Desintegrou-se
Amarelo/Vermelho/Referência/Preto	105	104	87.5

7.5. NOTAS FINAIS

Do ponto de vista estético, a execução do protótipo foi um fracasso. As dimensões da cofragem não foram respeitadas, havia instabilidade da cofragem e deu-se a absorção do óleo descofrante. Contudo, a execução do protótipo foi muito positiva porque veio realçar a importância da boa escolha do material de cofragem, da sua correcta execução, da escolha do óleo descofrante, do método de betonagem, do tempo de descofragem e o tempo de espera entre betonagens.

Para além disso, em termos de aderência, foi possível verificar que em algumas ‘interfaces’ não se ligaram na totalidade, sendo que seria aconselhável calcular o tempo de presa dos diversos betões e analisar qual o tempo óptimo entre cada betonagem de modo a haver uma maior ligação entre eles.

Ao nível das resistências à compressão dos betões em estudo concluiu-se que as mesmas continuaram a aumentar até à última data em que se efectuaram ensaios (57 dias). Nesses mesmos ensaios confirmou-se novamente a superior resistência dos betões pigmentados relativamente ao betão de referência. A resistência nas ‘interfaces’ foi maioritariamente inferior à resistência individual dos betões fronteiriços, contudo julga-se que uma melhor aderência entre betões deverá melhorar a resistência nas zonas de interface.

8

CONSIDERAÇÕES FINAIS

8.1. INTRODUÇÃO

O estudo aqui descrito é parte integrante de um projecto mais ambicioso que visa a concretização de mais alguns objectivos, nomeadamente a execução de um muro com 8 metros de comprimento e 7 metros de altura com o uso de betão colorido.

O betão autocompactável não fora ainda produzido na RAM antes deste trabalho devido à falta de materiais indicados na sua produção. O facto dos betões produzidos e descritos neste estudo terem sido constituídos pelos mesmos materiais que se utilizam na produção de betão convencional na RAM acarretou só por si vários problemas, nomeadamente a dificuldade de alcançar a autocompactibilidade requerida e a cor, no caso do betão pigmentado. Estes aspectos tiveram naturalmente de ser analisados, caracterizados e controlados de forma a obter um resultado final razoável. Para isso o estudo teve de ser iniciado muito antes da produção de betão, nas pastas e posteriormente nas argamassas.

8.2. CONCLUSÕES

O estudo das pastas foi de extrema importância no que respeita aos aspectos que influenciam a cor final do betão. Nesta fase foi possível quantificar o escurecimento da cor aquando da incorporação de cinzas volantes e uso do CEM II/A-L 42.5 R, bem como a influência dos pigmentos, tipo de cimento e cinzas volantes na alteração do estado fresco das pastas. A produção de pastas é muito menos morosa e dispendiosa do que a produção de betão, pelo que o conhecimento destes efeitos nas pastas possibilitou uma maior facilidade de obtenção da autocompactibilidade no betão, bem como o conhecimento das cores possíveis de obter com os materiais disponíveis.

Nas argamassas foi possível verificar a influência dos pigmentos na resistência à compressão, facto de grande relevância no estudo posterior dos betões. Verificou-se que a adição de pigmento em substituição directa da água incrementou a resistência à flexão e à compressão, relativamente à argamassa de referência. Estima-se que este facto se deva essencialmente a: i) teor de sólidos presente nos pigmentos, ainda que os mesmos se encontrem em estado líquido, ii) diminuição da água efectiva na amassadura. É de salientar que estes resultados contradizem a literatura pesquisada [3, 24], facto que se julga acontecer devido à metodologia de introdução dos pigmentos no betão. Julga-se que nos estudos abordados nesses documentos, os autores inseriam o pigmento como uma quantia a mais na amassadura e não com substituição do mesmo volume em água. O estudo dos pigmentos serviu também para qualificar a sua influência no estado fresco da argamassa. Neste aspecto a introdução de pigmento causou uma elevada perda de fluidez sendo necessário adicionar super-plastificante para repor os mesmos níveis de fluidez encontrados na argamassa de referência. Desta forma fez-se um estudo intensivo sobre a adição de super-plastificante nas argamassas que foi de grande valor no controlo das propriedades do estado fresco dos betões produzidos posteriormente. A análise ao betão veio a corroborar o que se concluiu nas argamassas relativamente à resistência à compressão. Os betões coloridos apresentaram uma resistência superior ao betão de referência.

O passar do tempo ‘desbotou’ ligeiramente a cor obtida no betão, e é relevante mencionar a diferença de vivacidade da cor obtida em estado fresco e a sua perda no estado endurecido. Julga-se que o uso de verniz ou outro material equivalente, poderia ajudar a solucionar esse problema bem como iria proporcionar uma protecção superficial do betão. As cores obtidas em betões produzidos com materiais correntemente utilizados na produção de betão na RAM são geralmente escuras. Isso deve-se essencialmente aos agregados basálticos e ao tipo de cimento (CEM II/A-L 42.5 R).

O uso do ‘software’ Just Color Picker possibilitou uma codificação completa das cores obtidas quer em pastas, quer em argamassas e betões. Esta técnica tem algumas vantagens relativamente à técnica normal (comparação com catálogos) nomeadamente no que concerne: i) menor erro de análise por ter menos influência do operador; ii) análise mais estável pelo uso do mesmo procedimento; iii) possibilidade de distinção de cores muito idênticas; iv) quantificação dos parâmetros que definem cada cor; v) reprodução das cores obtidas.

Na betonagem de vários tipos de betões incorporados na mesma peça é necessário ter certos cuidados no que concerne à cofragem utilizada e tempo diferencial entre amassaduras, de forma a haver perfeita aderência entre betões e alcançar o efeito estético e resistente desejado. A resistência na ‘interface’ entre vários betões coloridos é normalmente inferior à sua resistência individual.

8.3. TRABALHO FUTURO

De forma a concluir o estudo aqui descrito, pretende-se desenvolver mais alguns trabalhos que não foram concluídos até ao momento devido aos prazos estabelecidos.

Está prevista a aplicação de verniz numa das superfícies do protótipo betonado de modo a analisar a melhoria de cor. É importante salientar que a aplicação de qualquer produto de melhoria da cor não é de forma nenhuma um aspecto que esteja no âmbito deste trabalho visto que o que aqui se visava era a obtenção de um aspecto superficial estético sem qualquer tipo de revestimento ou produto de acabamento. Este é um aspecto a ser estudado futuramente se o seu uso for economicamente viável e se as cores obtidas em futuros betões não sejam satisfatórias, ou seja, apenas em última instância.

Os próprios pigmentos devem de ser estudados com maior detalhe (quimicamente) de forma a otimizar a sua capacidade de tingimento e homogeneização da cor, bem como entender os motivos dos seus comportamentos díspares no que respeita à influência na deformabilidade do betão.

Repetir parcialmente os estudos desenvolvidos em argamassas e betões com CEM II/B-L 32.5 N de modo a alcançar uma cor mais nítida, dado que este tipo de cimento não é tão escuro (possui menos teor de ferrite do que o CEM II/A-L 42.5 R) e que a resistência dos betões autocompactáveis é suficientemente elevada para que a perda de resistência não seja problemática. Da mesma forma era importante estudar o comportamento do betão com menos adição de cinzas volantes. Seria importante considerar a importação de filler calcário para a RAM para a produção de betões coloridos.

Seria proveitoso fazer um estudo mais detalhado sobre as 'interfaces' produzidas entre vários betões coloridos, de forma a detectar outros parâmetros, nomeadamente de durabilidade (permeabilidade, carbonatação, penetração de cloretos, etc). Da mesma forma seria importante estudar com detalhe o tempo de presa de cada betão a fim de melhorar a aderência entre os vários betões.

Por fim, julga-se que estudos sobre o tipo de cofragens, o óleo descofrante, a descofragem, o processo de betonagem e a aplicação de produtos de protecção de superfície é fundamental para a produção de betão colorido.

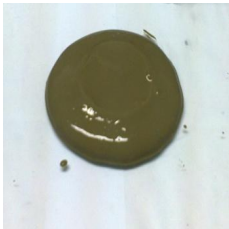


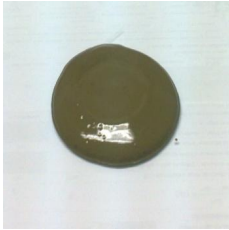





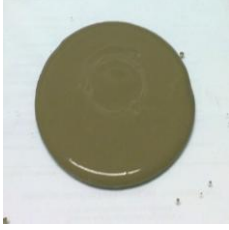





REFERÊNCIAS

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. Chusid, M., E. Strockbine, and N. Paris. *Colored Concrete Bridges: Construction and life-cycle cost*. Special Products & Practice Spotlight, s.d., 1-6.
3. Resheidat, M. and A.-. Kharabsheh. *Development of colored concrete in Jordan*. in *International Conference on Construction and Building Technology*. 2008. Jordan: International Conference on Construction and Building Technology.
4. Amado, M., *Exaltação da arquitetura portuguesa*, in *Myguide*, M. Amado, Editor 2011, Myguide.
5. CoolHunter *Vodafone Head Office - Portugal*. The Cool Hunter, 2010.
6. Lanxess. *Soccer City: The global capital of soccer in 2010*. 2012 [cited 2012 28 de Junho de 2012]; Available from: http://www.colored-concrete-works.com/front_content.php?idcatart=1754&client=4&lang=11
7. Ribas, C. *El juez decano prevé un caos general si la Ciudad Judicial no se reforma*. El País, 2008.
8. ScofieldSystems. *Chromix Admixtures for Color-Conditioned Concrete*. Concrete Coloring, Texturing and Performance 2008 [cited 2012 23 de Agosto]; Available from: http://www.scofield.com/coloredconcrete_samples.html
9. Nasvik, J. *History of decorative concrete*. Concrete Construction, 2006. 1-3.
10. Auer, P. *Colored Concrete Works. Projeto: Hotel ESO*. Lanxess Energizing Chemistry, 2007. 1-4.
11. CasaDasHistóriasPaulaRego. *Casa das histórias*. 2009 [cited 2012 4 de Junho de 2012]; Available from: <http://www.casdashistoriaspaularego.com/pt/edif%C3%ADcio/casa-das-hist%C3%B3rias.aspx>
12. Carvalho, C. *Eduardo Souto de Moura vence Prémio Secil de Arquitectura com Casa das Histórias Público*, 2011. 1-3.
13. PortodosMuseus. *Casa das Histórias Paula Rego*. 2012 [cited 2012 14 de Maio de 2012]; Available from: <http://www.pportodosmuseus.pt/?p=44467>
14. AnnyStudio, *Just Color Picker*, AnnyStudio, Editor 2003, AnnyStudio: Sydney. p. 1-3.
15. FileBuzz. *Cielab Color Test*. 2004 [cited 2012 2 de Junho de 2012]; Available from: http://www.filebuzz.com/findsoftware/Cielab_Color_Test/2.html
16. Medeiros, A. *Descubra o Código das Cores para o seu mapa com o JC Picker*. 2012 [cited 2012 20 de Junho de 2012]; Available from: <http://andersonmedeiros.com/2012/02/01/codigo-das-cores-do-mapa-jcpicker/>
17. AnnyStudio. *Just Color Picker*. 2003 [cited 2012 15 de Junho de 2012]; Available from: <http://annystudio.com/software/colorpicker/>



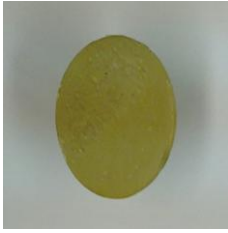











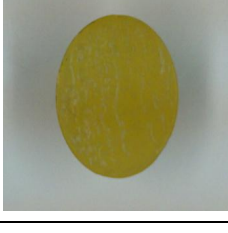



18. EFNARC, et al., *The European Guidelines for Self-Compacting Concrete*, T.E.F.o.S.C.C.a.C. Systems, Editor 2005. p. 1-63.
19. Nunes, S., *Betão Auto-Compactável: Tecnologia e Propriedades*, in *Departamento de Engenharia Civil* 2001, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto: Porto. p. 198 (Tese de Doutoramento).
20. ConcreteColourSystems, *More about concrete oxides*, C.C. Systems, Editor 2007, Concrete Colour Systems.
21. Lanxess, E.C. *Pigments of coloring concrete*. 2006 [cited 2012 31 de Agosto de 2012]; Available from: http://www.colored-concrete-works.com/front_content.php?idart=585&changelang=11
22. 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.
23. Civil, P., *Concreto Colorido*, in *Pet Civil UFJF*, UFJF, Editor 2010, UFJF.
24. Corinaldesi, V., S. Monosi, and M.L. Ruello, *Influence of inorganic pigments' addition on the performance of coloured SCC*. *Construction and Building Materials*, 2012. **30**(0): p. 289-293.
25. Lee, H.-S., J.-Y. Lee, and M.-Y. Yu, *Influence of iron oxide pigments on the properties of concrete interlocking blocks*. *Cement and Concrete Research*, 2003. **33**(11): p. 1889-1896.
26. Ivanauskas, E. and D. Grigonis, *Impact of pigments on self-compacting concrete*. *Science - future of Lithuania*, 2009. **1**: p. 10-14.
27. Secil. *Catálogo*. 2004 [cited 2012 23 de Junho de 2012]; Available from: <http://www.secil.pt/default.asp?pag=catalog>
28. BASF, *Rheocolor sistema para coloração em massa de betão*, in *Adding value to concrete*, BASF, Editor 2009, BASF: Porto. p. 1-2.
29. 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.
30. IPQ, *NP EN 12350*, 2010.
31. IPQ, *NP EN 12390*. 2010.
32. ATIC, *NP EN 12504*. 2009.
33. Botelho, G., *Análise Sensorial*, 2010, Escola Superior Agrária de Coimbra: Coimbra.
34. López, A., et al., *Advantages of mortar-based design for coloured self-compacting concrete*. *Cement and Concrete Composites*, 2009. **31**(10): p. 754-761.
35. IPQ, *NP EN 196-1*. 2006.
36. IPQ, *NP EN 197-1*. 2001.
37. VIROCPORTUGAL, *Viroc Soluções Contemporâneas*, in *Painel Viroc*, V. Portugal, Editor 2009, Viroc Portugal: Lisboa.

ANEXO I – PASTAS (REGISTO FOTOGRÁFICO)



















REFERÊNCIA

Pasta	Estado fresco	Estado endurecido 7 dias	Estado endurecido 40 dias
0% cinzas CEM II/A-L 42.5 R			
15% cinzas CEM II/A-L 42.5 R			
30% cinzas CEM II/A-L 42.5 R			
0%cinzas CEM II/B-L 32.5 N			
0% cinzas CEM II/B-L 32.5 R (br)			



















AMARELO

Pasta	Estado fresco	Estado endurecido 7 dias	Estado endurecido 40 dias
0% cinzas 5% pigmento CEM II/A-L 42.5 R			
0% cinzas 10% pigmento CEM II/A-L 42.5 R			
30% cinzas 5% pigmento CEM II/A-L 42.5 R			
30% cinzas 10% pigmento CEM II/A-L 42.5 R			
0% cinzas 10% pigmento CEM II/B-L 32.5 N			
0% cinzas 10% pigmento CEM II/B-L 32.5 R (br)			
















LARANJA

Pasta	Estado fresco	Estado endurecido 7 dias	Estado endurecido 40 dias
0% cinzas 5% pigmento CEM II/A- L 42.5 R			
0% cinzas 10% pigmento CEM II/A- L 42.5 R			
30% cinzas 5% pigmento CEM II/A- L 42.5 R			
30% cinzas 10% pigmento CEM II/A- L 42.5 R			
0% cinzas 10% pigmento CEM II/B- L 32.5 N			
0% cinzas 10% pigmento CEM II/B- L 32.5 R (br)			



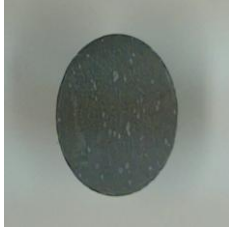















VERMELHO

Pasta	Estado fresco	Estado endurecido 7 dias	Estado endurecido 40 dias
0% cinzas 5% pigmento CEM II/A-L 42.5 R			
0% cinzas 10% pigmento CEM II/A-L 42.5 R			
30% cinzas 5% pigmento CEM II/A-L 42.5 R			
30% cinzas 10% pigmento CEM II/A-L 42.5 R			
0% cinzas 10% pigmento CEM II/B-L 32.5 N			
0% cinzas 10% pigmento CEM II/B-L 32.5 R (br)			



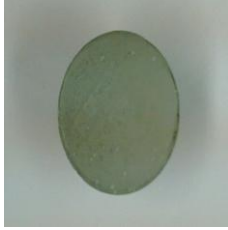















CASTANHO

Pasta	Estado fresco	Estado endurecido 7 dias	Estado endurecido 40 dias
<p>0% cinzas 5% pigmento CEM II/A-L 42.5 R</p>			
<p>0% cinzas 10% pigmento CEM II/A-L 42.5 R</p>			
<p>30% cinzas 5% pigmento CEM II/A-L 42.5 R</p>			
<p>30% cinzas 10% pigmento CEM II/A-L 42.5 R</p>			
<p>0% cinzas 10% pigmento CEM II/B-L 32.5 N</p>			

PRETO

Pasta	Estado fresco	Estado endurecido 7 dias	Estado endurecido 40 dias
0% cinzas 5% pigmento CEM II/A-L 42.5 R			
0% cinzas 10% pigmento CEM II/A-L 42.5 R			
30% cinzas 5% pigmento CEM II/A-L 42.5 R			
30% cinzas 10% pigmento CEM II/A-L 42.5 R			
0% cinzas 10% pigmento CEM II/B-L 32.5 N			
0% cinzas 10% pigmento CEM II/B-L 32.5 R (br)			

VERDE


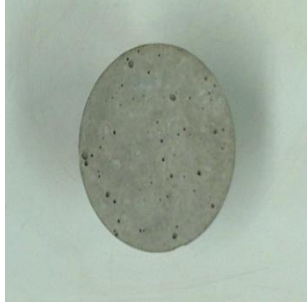



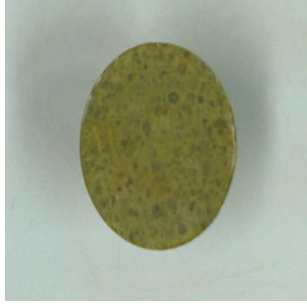




Pasta	Estado fresco	Estado endurecido 7 dias	Estado endurecido 40 dias
0% cinzas 5% pigmento CEM II/A-L 42.5 R			
0% cinzas 10% pigmento CEM II/A-L 42.5 R			
30% cinzas 5% pigmento CEM II/A-L 42.5 R			
30% cinzas 10% pigmento CEM II/A-L 42.5 R			
0% cinzas 10% pigmento CEM II/B-L 32.5 N			
0% cinzas 10% pigmento CEM II/B-L 32.5 R (br)			

ANEXO II – ARGAMASSAS

COMPOSIÇÕES E RESULTADOS DAS ARGAMASSAS EFECTUADAS COM ARGAMASSA DE REFERÊNCIA COM 1.6% SUPERPLASTIFICANTE, 45% AREIA E $V_w/V_{POWDER} = 1.0$ (CEM II/A-L 42.5 R)

Argamassas efectuadas com CMII/A-L 42.5 R (45% areia com 60% fina)								
Resultados	0%cinzas e 0% pigmento	30% cinzas e 0% pigmento	Vermelho	verde	preto	amarelo	laranja	
Massa na mistura (g)	cimento	1279.0	895.0	895.0	895.0	895.0	895.0	895.0
	cinzas	0.0	292.0	292.0	292.0	292.0	292.0	292.0
	água	456.6	459.0	415.8	417.0	415.8	413.3	411.7
	pigmento	0.0	0.0	61.9	52.4	67.7	63.9	65.2
	'areia 0/2'	1143.0	1143.0	1143.0	1143.0	1143.0	1143.0	1143.0
	'areia 0/4'	745.0	745.0	745.0	745.0	745.0	745.0	745.0
	Super-plastificante	9.3	6.7	8.8	7.6	8.8	11.3	12.9
% relativamente aos finos	Super-plastificante	2.2	1.6	2.1	1.8	2.1	2.7	3.1
Relação entre o volume de água e o volume de finos	Vw/Vpowder	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
Diâmetros de espalhamento [mm]	d1	270.0	240.0	265.0	230.0	260.0	250.0	250.0
	d2	280.0	255.0	250.0	235.0	250.0	250.0	250.0
	Média d	275.0	247.5	257.5	232.5	255.0	250.0	250.0
Resistências aos 7 dias	Média resistência à flexão [MPa]		7.8	7.8	7.7	8.1	8.1	8.1
	Média resistência à compressão [MPa]		54.2	54.1	56.1	56.3	55.3	55.1

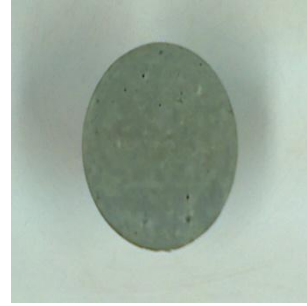
REGISTO FOTOGRÁFICO

Argamassa	Estado fresco	Estado endurecido 28 dias
Sem pigmento e 0% cinzas		
Sem pigmento e 30% cinzas (referência)		
30% cinzas e 10% pigmento amarelo		
30% cinzas e 10% pigmento laranja		
30% cinzas e 10% pigmento vermelho		

30% cinzas e 10% pigmento preto





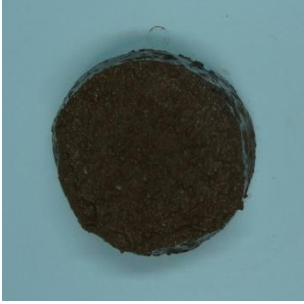






30 % cinzas e 10% pigmento verde







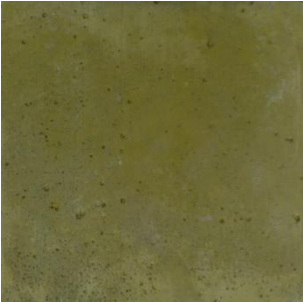



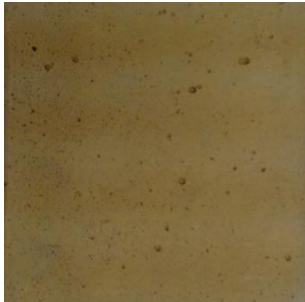



ARGAMASSAS EFECTUADAS COM ARGAMASSA DE REFERÊNCIA COM 1.7% SUPERPLASTIFICANTE, 50% AREIA E $V_w/V_{POWDER} = 0.9$ (CEM II/A-L 42.5 R)

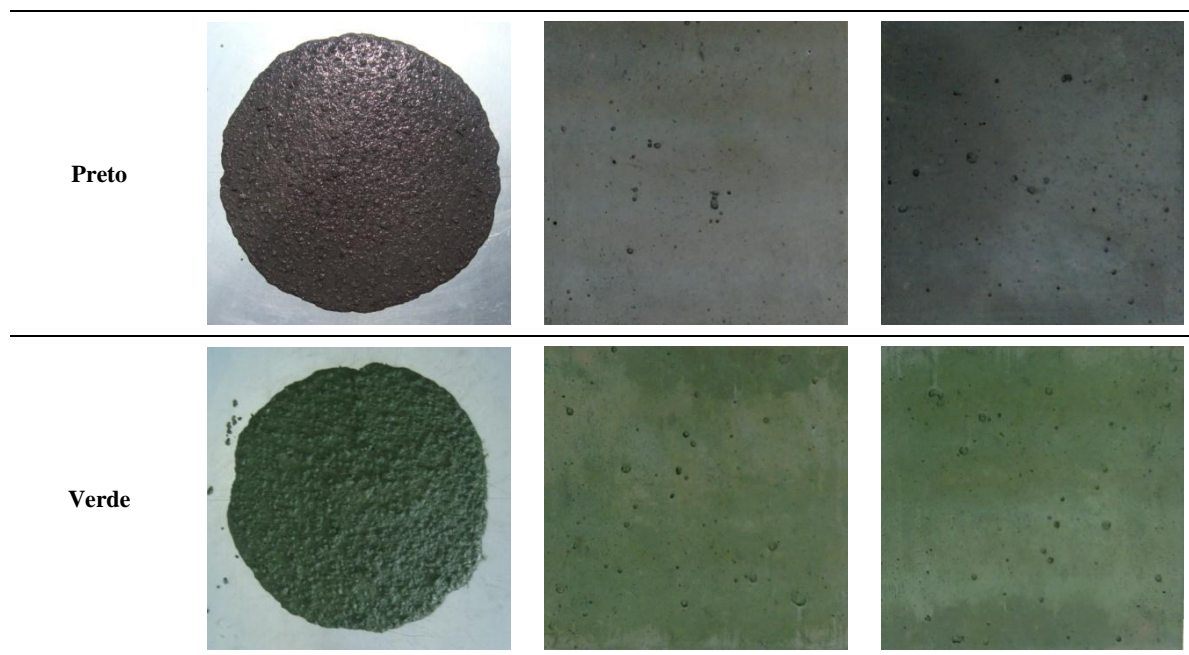
REGISTO FOTOGRÁFICO

Argamassa	Estado fresco	Estado endurecido 7 dias
Sem pigmento e 30% cinzas (referência)		
30% cinzas e 10% pigmento amarelo		
30% cinzas e 10% pigmento laranja OBS: esta argamassa não foi utilizada na continuação do estudo dado que o seu diâmetro de espalhamento foi muito reduzido		
30% cinzas e 10% pigmento vermelho OBS: a argamassa tem pouca coloração. Isto deve-se ao novo pigmento utilizado nesta fase, com uma densidade diferente do anterior.		
30% cinzas e 10% pigmento preto		

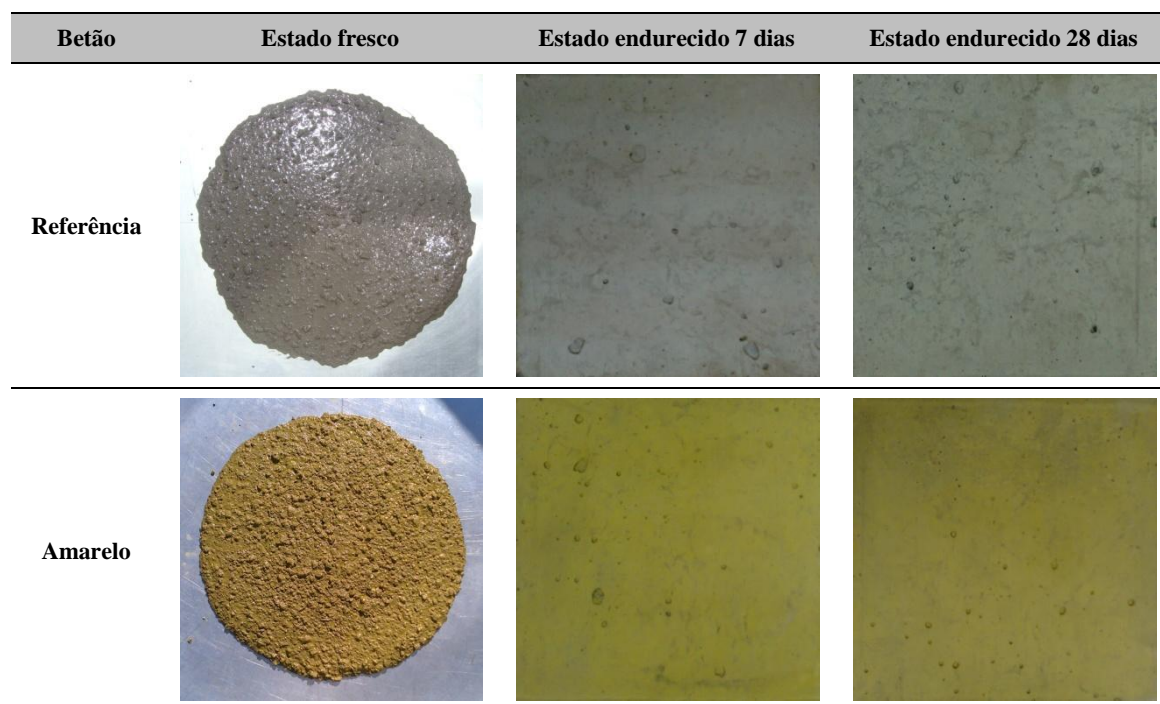
ANEXO III – BETÕES

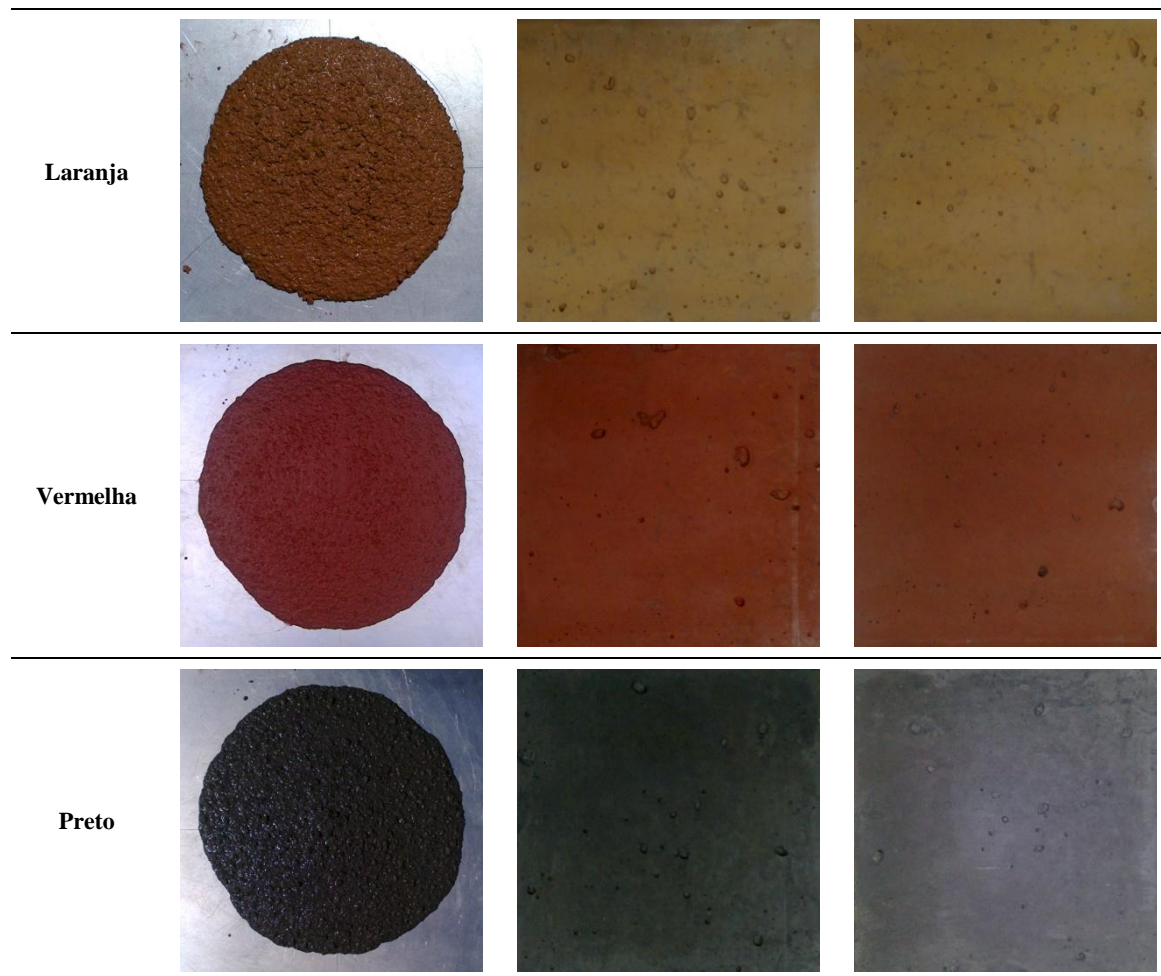
REGISTO FOTOGRÁFICO DAS PRIMEIRAS COMPOSIÇÕES PRODUZIDAS

Betão	Estado fresco	Estado endurecido 7 dias	Estado endurecido 28 dias
Referência			
Amarelo			
Laranja			
Vermelha			



REGISTO FOTOGRÁFICO DAS COMPOSIÇÕES EFECTUADAS PARA A BETONAGEM DA PAREDE
PROTÓTIPO





ANEXO IV - ARTIGOS PUBLICADOS NO LIVRO DE 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. **J. Silva**, C. Gomes, M. Guimarães, L. Maia, Betão Autocompactável de elevado efeito estético.
2. C. Gomes, **J. Silva**, M. Guimarães, L. Maia, Dimensionamento de betões autocompactáveis coloridos com agregados artificiais vulcânicos.

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.

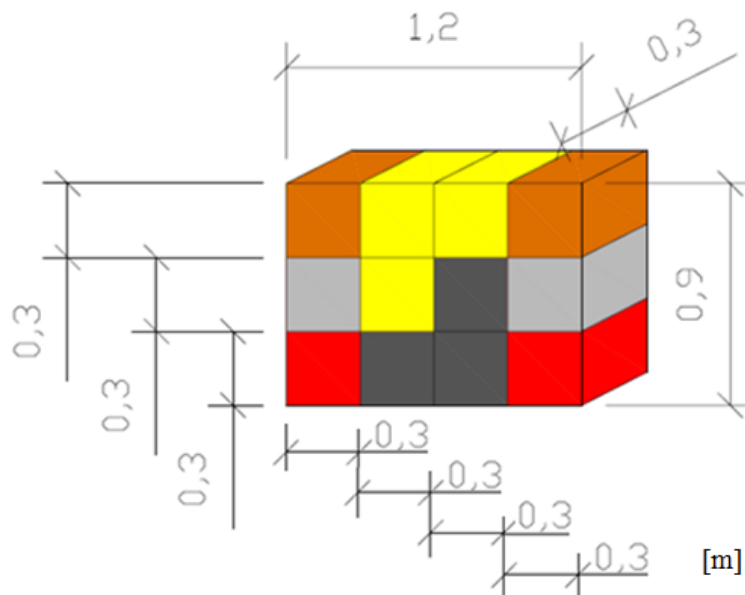


Figura 1. Esquema do protótipo a betonar.

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).

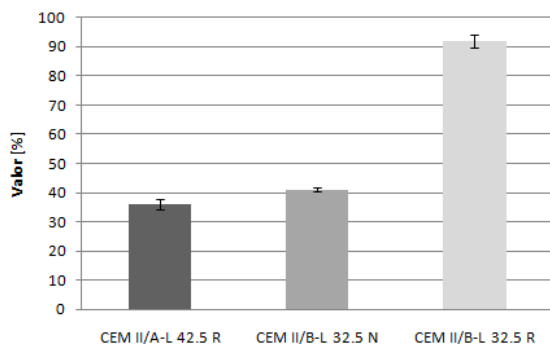


Figura 2. Influência do tipo de cimento na cor das pastas.

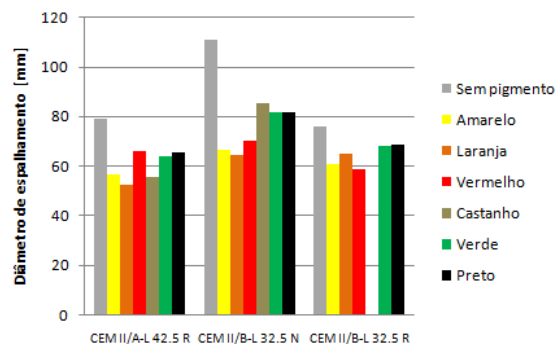


Figura 3. Influência do tipo de cimento no diâmetro de espalhamento ($V_{pigmento}/V_p = 10\%$).

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.

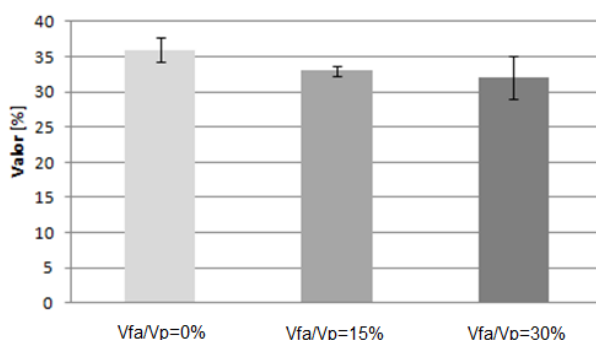


Figura 4. Influência da adição de cinzas volantes na cor das pastas.

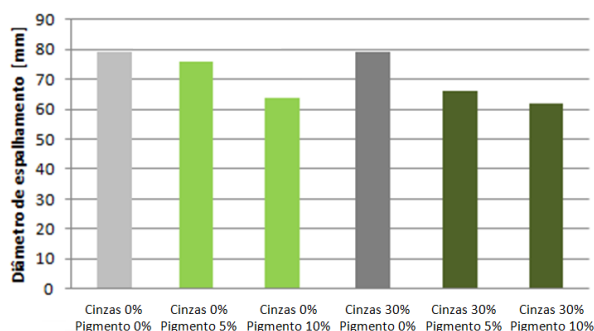


Figura 5. Efeito do pigmento verde no diâmetro de espalhamento da pasta.

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.

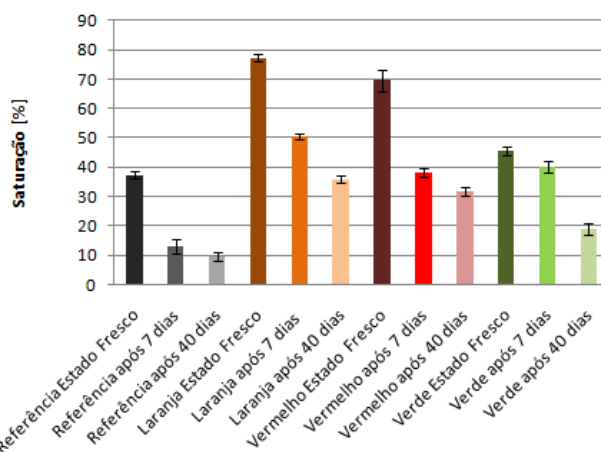


Figura 6. Alteração da cor devido à passagem do tempo nas pastas.

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).

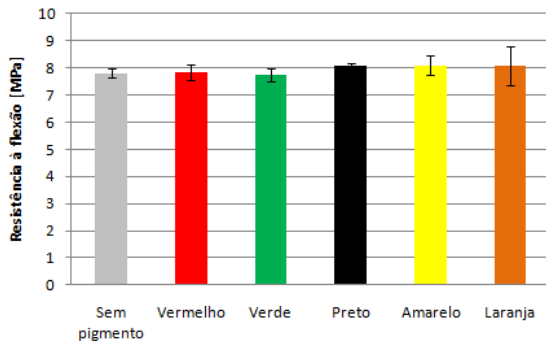


Figura 7. Resistência à flexão aos 7 dias em provetes de argamassa pigmentados e não pigmentados.

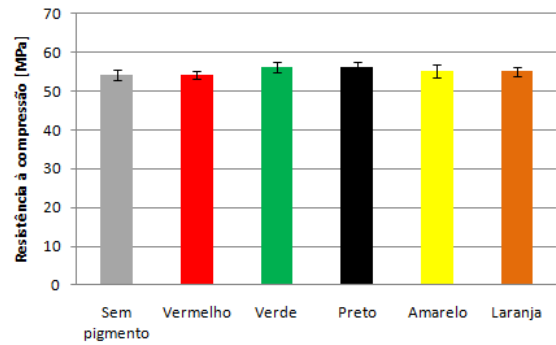


Figura 8. Resistência à compressão aos 7 dias em provetes de argamassa pigmentados e não pigmentados.

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.

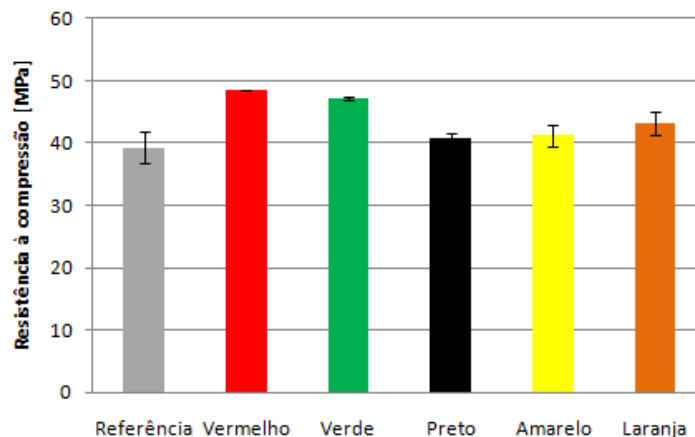


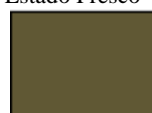

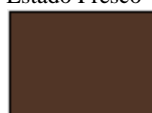





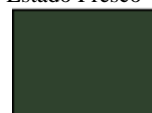



Figura 9. Resistências à compressão dos betões produzidos aos 7 dias.

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.

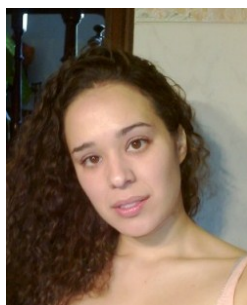
REFERÊNCIAS

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.

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 volúnicas 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.

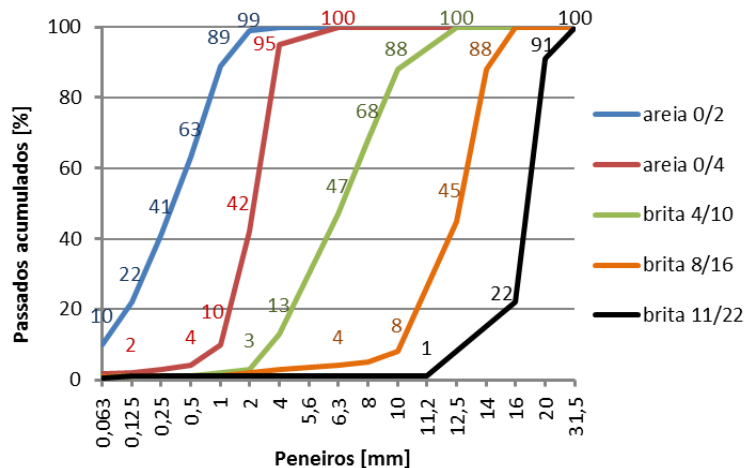


Figura 1. Curva granulométrica de todos os agregados disponíveis

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) Introduce-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 $V_{\text{pigmento}}/V_p=10\%$.

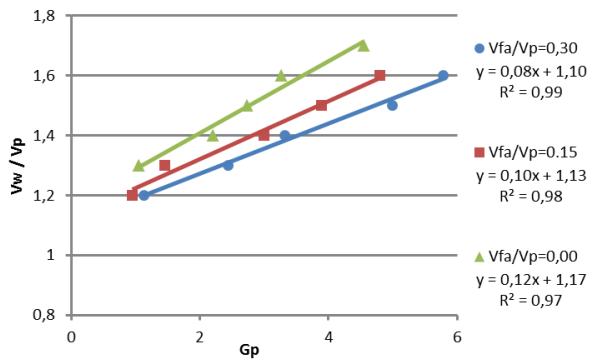


Figura 2. Determinação do β_p em pastas $V_{fa}/V_p = 0; 0,15$ e $0,30$

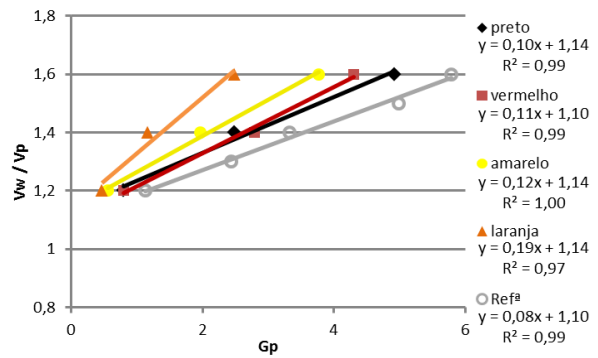


Figura 3. Determinação do β_p para pastas com diferentes pigmentos $V_{fa}/V_p = 0,30$; $V_{pigmento}/V_p = 5\%$.

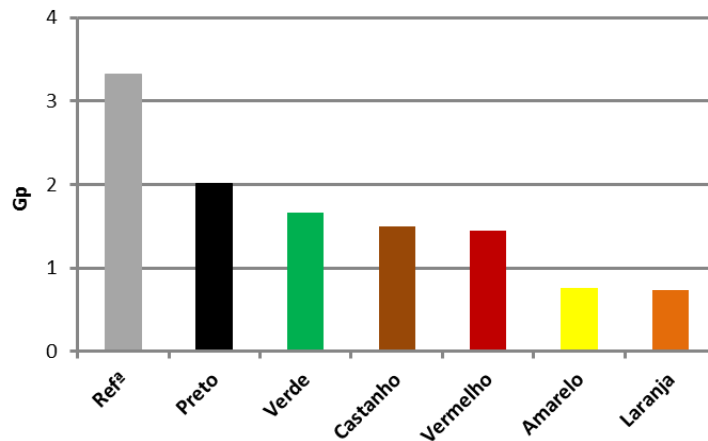


Figura 4. Influência do pigmento no G_p : $V_{pigmento}/V_p=10\%$, $V_w/V_p=1,40$, $V_{fa}/V_p=0,30$

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).

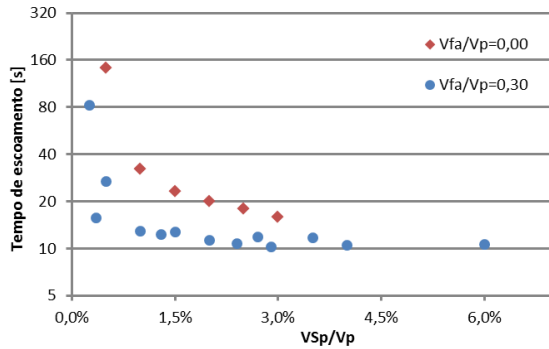


Figura 5. Efeito da dosagem de superplastificante no tempo de escoamento do cone de Marsh

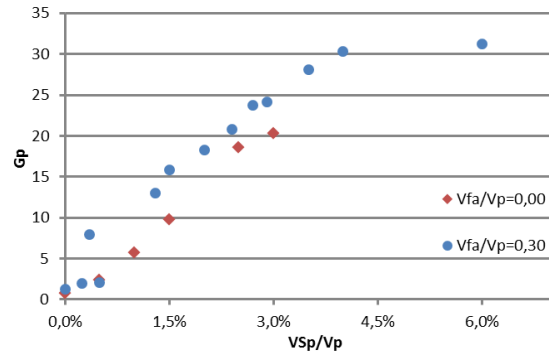


Figura 6. Efeito da dosagem de superplastificante na área de espalhamento relativa

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.,

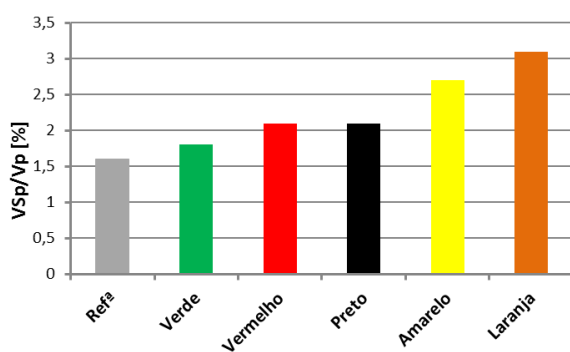


Figura 7. Dosagem de superplastificante para a obtenção de argamassas coloridas com propriedades autocompactáveis

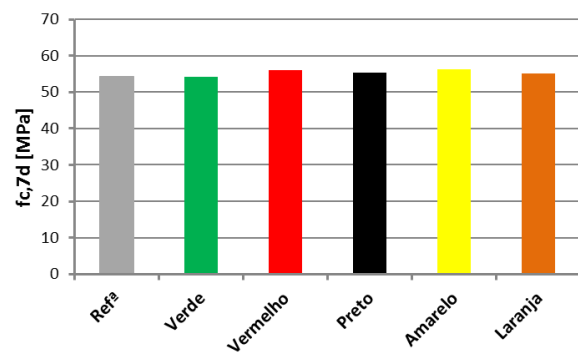


Figura 8. Ensaios de compressão das argamassas coloridas com propriedades autocompactáveis

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 $Vpigmento/Vp=10\%$) 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.

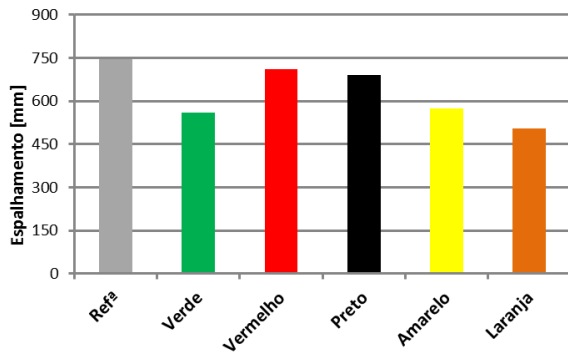


Figura 9. Diâmetros de espalhamento

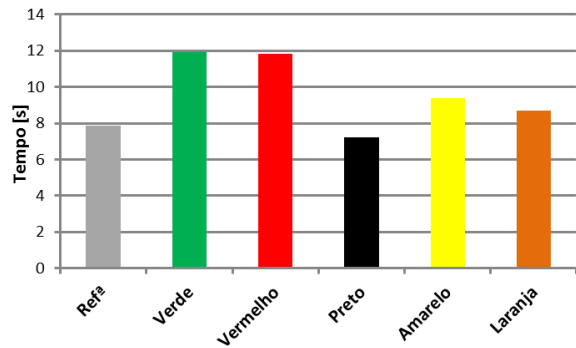


Figura 10. Tempos de escoamento no Funil V

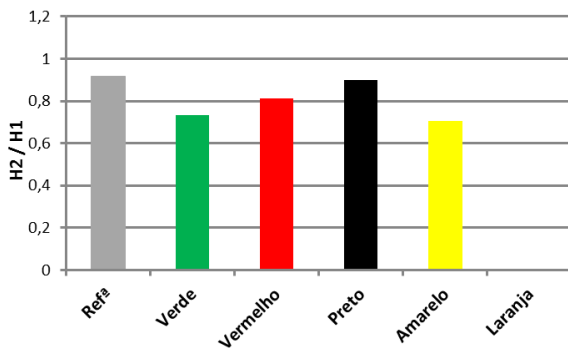


Figura 11. Rácio da Caixa L

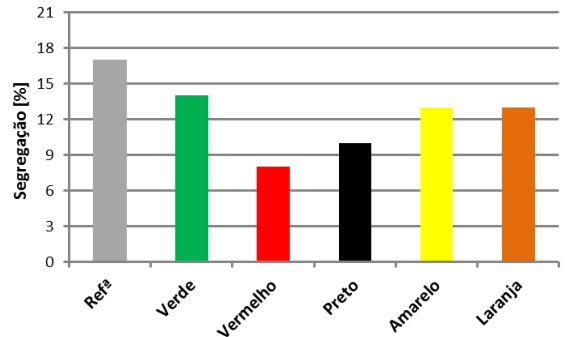


Figura 12. Segregação

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.

