



DECivil

Departamento de Engenharia Civil e Arquitectura

DESEMPENHO MECÂNICO E DE DURABILIDADE DE BETÕES PRODUZIDOS COM AGREGADOS RECICLADOS DE ELEVADO DESEMPENHO PARA A INDÚSTRIA DA PRÉ-FABRICAÇÃO

**PROJECTO FCT
PTDC / ECM / 118372 / 2010**



Tarefa 5

AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE BETÕES COM AGREGADOS RECICLADOS DE ELEVADO DESEMPENHO PARA A INDÚSTRIA DA PRÉ-FABRICAÇÃO (EXCELLentSUStainableCONCcrete)

ESTUDO PRÉVIO EM ARGAMASSAS E BETÕES: ENSAIOS E APRESENTAÇÃO DE RESULTADOS

RELATÓRIO

Junho de 2015

Financiamento FCT/POCTI



União Europeia

FEDER



Governo da República Portuguesa

FCT Fundação para a Ciência e a Tecnologia

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E DO ENSINO SUPERIOR

Portugal

Índice

1. INTRODUÇÃO	1
2. ENQUADRAMENTO E CONTEXTO	1
3. ESTADO DA ARTE	4
3.1. Introdução	4
3.2. Argamassa auto-compactável (AAC)	4
3.3. Betão auto-compactável (BAC)	5
3.4. Betão de elevado desempenho (BED)	8
3.5. Propriedades dos agregados reciclados de betão (ARB)	9
3.5.1. Método de trituração	9
3.5.2. Absorção de água	10
3.5.3. Massa volúmica	10
4. METODOLOGIA DE CÁLCULO	10
4.1. Formulação das AAC - 1ª fase e 3ª fase	11
4.2. Formulação dos BAC - 2ª fase	15
5. CAMPANHA EXPERIMENTAL	16
5.1. Fase preliminar de produção de AAC (apenas com AN) - 1ª fase	16
5.1.1. Sequência de amassadura	17
5.1.2. Ensaio às AAC no estado fresco	18
5.1.2.1. Ensaio de espalhamento no mini cone	19
5.1.2.2. Ensaio de escoamento no mini funil	20
5.2. Fase de produção de BAC (apenas com AN) - 2ª fase	21
5.2.1. Sequência de amassadura	21
3.1.1. Moldagem de provetes	23
5.2.2. Ensaio ao BAC em estado fresco	24
5.2.2.1. Ensaio de espalhamento	24

5.2.2.2.	Ensaio de escoamento no funil V	26
5.2.2.3.	Ensaio de escoamento na caixa L	27
5.2.3.	Ensaio ao BAC em estado endurecido	28
5.2.3.1.	Ensaio de resistência à compressão	28
5.3.	Fase de produção de AAC (com AR) - 3ª fase	30
5.3.1.	Moldagem de provetes	30
5.3.2.	Ensaio às AAC no estado fresco	30
5.3.3.	Ensaio às AAC no estado endurecido	31
5.3.3.1.	Ensaio de resistência à flexão	31
5.3.3.2.	Ensaio de resistência à compressão	33
6.	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS	33
6.1.	AAC com AN - 1ª fase	34
6.2.	BAC com AN - 2ª fase	36
6.3.	AAC com AR - 3ª fase	40
7.	BIBLIOGRAFIA	45
	ANEXO A.1. MATERIAIS CONSTITUINTES	A1
	ANEXO A.2. ACERTO DOS PARÂMETROS V_w/V_p E $S_p/P\%$ DAS QUATRO AAC DE REFERÊNCIA	A2
	ANEXO A.3. FORMULAÇÃO DAS QUATRO MISTURAS DE BAC DE REFERÊNCIA	A6
	ANEXO A.4. FORMULAÇÃO DAS AAC COM AR	A8
A.4.1.	Composição das argamassas	A8
A.4.2.	Quantidade de agregado reciclado por fracção granulométrica	A10

Índice de figuras

Figura 1 - Esquemática das argamassas experimentais a produzir com AN.	2
Figura 2 - Esquemática dos betões experimentais a produzir com AN.....	2
Figura 3 - Esquemática das argamassas a produzir com AN e AR.....	3
Figura 4 - Fluxograma com as diferentes fases de produção de AAC e BAC	11
Figura 5 - Alterações nos parâmetros de trabalhabilidade com o aumento de V_w/V_p , mantendo $S_p/p\%$ constante (Nepomuceno (2005)).....	13
Figura 6 - Alterações nos parâmetros de trabalhabilidade com o aumento de $S_p/p\%$, mantendo V_w/V_p constante (Nepomuceno (2005)).....	13
Figura 7 - Fluxograma com as diferentes fases de produção de AAC e BAC e respectivos ensaios realizados.....	16
Figura 8 - Representação esquemática da sequência de amassadura de AAC	17
Figura 9 - Misturadora utilizada para as amassaduras de AAC	18
Figura 10 - Mini cone para o ensaio de espalhamento em argamassas	19
Figura 11 - Espalhamento da argamassa e diâmetros a medir.....	20
Figura 12 - Mini funil V para o ensaio de escoamento em argamassas.....	20
Figura 13 - Representação esquemática da sequência de amassadura de BAC	22
Figura 14 - Betoneira utilizada para as amassaduras de BAC.....	23
Figura 15 - Enchimento dos três moldes cúbicos	23
Figura 16 - Cone de Abrams e placa de base (dimensões em mm) (IPQ, 2010).....	25
Figura 17 - Placa de base (dimensões em mm) (IPQ, 2010).....	25
Figura 18 - Montagem do equipamento (cone de Abrams e chapa metálica).....	25
Figura 19 - Introdução do BAC para o interior do molde tronco-cónico	25
Figura 20 - Levantamento do molde tronco-cónico.....	25
Figura 21 - Medição do abaixamento do BAC.....	25
Figura 22 - Funil V. Legenda: 1 - tampa articulada ou deslizante (IPQ, 2010)	26
Figura 23 - Montagem do ensaio (funil V e balde de recolha).....	26
Figura 24 - Introdução do BAC no interior do funil V	26
Figura 25 - Funil V completo de BAC e início da contagem do tempo	26
Figura 26 - Disposição geral típica da caixa L, com as dimensões requeridas (em mm) (IPQ, 2010).....	27
Figura 27 - Caixa L.....	28
Figura 28 - Introdução do BAC no interior da caixa L.....	28

Figura 29 - Abertura da comporta da caixa L.....	28
Figura 30 - Medição de ΔH_2	28
Figura 31 - Prensa hidráulica.....	29
Figura 32 – Ensaio de resistência à compressão em cubos.	29
Figura 33 - Roturas satisfatórias de provetes cúbicos (IPQ, 2011)	29
Figura 34 - Roturas não satisfatórias de provetes cúbicos (IPQ, 2011).....	29
Figura 35 - Molde para produção de 3 provetes prismáticos de argamassa.....	31
Figura 36 - Argamassas produzidas na câmara de cura húmida.....	31
Figura 37 - Prensa hidráulica para ensaio de flexão (à esquerda) e compressão (à direita) .	32
Figura 38 - Rotura do provete prismático à flexão (à esquerda) e à compressão (à direita)	32
Figura 39 - Representação gráfica dos resultados no estado fresco das AAC seleccionadas (cada ponto no gráfico representa um par de valores: V_w/V_p e $S_p/p\%$)	35
Figura 40 - Aspecto final do BAC no ensaio de espalhamento.....	37
Figura 41 - Escoamento do BAC através do funil V	37
Figura 42 - Representação gráfica dos resultados do ensaio de resistência à compressão em cubos aos 7 e 28 dias	38
Figura 43 - Rotura apresentada pelo BAC com 10% SF e 400 kg/m ³ de cimento	41
Figura 44 - Rotura apresentada pelo BAC com 10% SF e 450 kg/m ³ de cimento	41
Figura 45 - Rotura apresentada pelo BAC com 15% SF e 400 kg/m ³ de cimento	41
Figura 46 - Rotura apresentada pelo BAC com 15% SF e 450 kg/m ³ de cimento	41
Figura 47 - Representação gráfica dos valores de G_m e R_m ($V_w/V_p=0.92$; $S_p/p\%=1.24$), para as AAC (10% de SF e 450 kg/m ³ de CIM).....	42
Figura 48 - Representação gráfica dos resultados do ensaio de flexão em AAC	43
Figura 49 - Representação gráfica dos resultados do ensaio de compressão em AAC ..	44

Índice de tabelas

Tabela 1 - Propriedades requeridas ao BAC e respectivos ensaios (NP EN 206-9, 2010). ...	6
Tabela 2 - Especificação do BAC em estado fresco (APEB, 2007; NP EN 206-9, 2010).....	7
Tabela 3 - Especificação do BAC em estado fresco (APFAC,2007; NP EN 206-9, 2010) (continuação).	8
Tabela 4 - Resultados dos ensaios no estado fresco de AAC (10% de SF e 400 kg/m ³)	34
Tabela 5 - Resultados dos ensaios em estado fresco (AAC seleccionadas).....	35
Tabela 6 - Resultados dos ensaios realizados ao BAC no estado fresco	36
Tabela 7 - Resultados elementares do ensaio de resistência à compressão aos 7 e 28 dias .	38
Tabela 8 - Resultados dos ensaios ao estado fresco das AAC (10% de SF e 450 kg/m ³ de CIM)	41
Tabela 9 - Resultados do ensaio de resistência à flexão e compressão em AAC (10% de SF e 450 kg/m ³ de CIM).....	43

Siglas

AAC - argamassa auto-compactável

AN - agregado natural

AFN - agregado fino natural

AGN - agregado grosso natural

AR - agregado reciclado

AFR - agregado fino reciclado

AGR - agregado grosso reciclado

BAC - betão auto-compactável

BC - betão convencional

BACED - betão auto-compactável de elevado desempenho

BED - betão de elevado desempenho

CEM - cimento

CV - cinzas volantes

FC - fíler calcário

SF - sílica de fumo

Sp - superplastificante

SF - Sílica de fumo

TP - Trituração primária

TP+TS - Trituração primária + trituração secundária

1. Introdução

O presente documento dá cumprimento ao estabelecido com a FCT, no âmbito de projectos de investigação científica e de desenvolvimento tecnológico, que requer a apresentação de relatórios periódicos.

Neste relatório, é apresentado o estudo preliminar realizado em argamassas e betões autocompactáveis com o objectivo final de produzir betão autocompactável de elevado desempenho (BACED) com agregados reciclados (AR). Este estudo permitirá a execução da tarefa 5 no âmbito do Projecto FCT PTDC/ECM/118372/2010 - “*Betão com agregados reciclados de elevado desempenho para a indústria da pré-fabricação (EXCELlentSUStainableCONcrete)*”.

Com esta sub-tarefa, pretende-se determinar as quantidades de sílica de fumo e de cimento a usar na produção de BACED. Conhecida a quantidade de sílica de fumo e de cimento a usar para a produção de BACED, pretende-se determinar o comportamento no estado fresco e endurecido de argamassas autocompactáveis produzidas com agregados reciclados (AR). Estes serão avaliados através da sua comparação com argamassas de referência produzidas na sua totalidade com agregados naturais (AN).

Neste relatório são apresentados o cálculo das quantidades de amassadura, os procedimentos experimentais, os resultados dos ensaios e respectiva discussão.

2. Enquadramento e contexto

De acordo com a bibliografia consultada, a quantidade de ligante a empregar no fabrico de betão de elevado desempenho (BED) oscila entre 400 e 500 kg/m³ (Camões, 2002). Em relação à quantidade de sílica de fumo, é de 10 a 15% da massa de cimento (Hassan et al., 2000; Parande, 2013), existindo no entanto algumas referências a valores entre 20 e 25% (Larrard, 1992; Seleem et al., 2010) mas sem resultados que comprovem uma melhoria significativa do desempenho dessas misturas.

Por conseguinte, numa fase inicial, foi realizado um estudo, em argamassas autocompactáveis (AAC), para determinar a quantidade de sílica de fumo (10% ou 15% do volume de finos) e de cimento a usar (400 kg/m³ ou 450 kg/m³) usando apenas agregados finos naturais (**Figura 1**).

O objectivo desta fase de produção de AAC foi avaliar os parâmetros de trabalhabilidade, quantificados através da área relativa de espalhamento (G_m) e da velocidade relativa

de escoamento (R_m). Estes parâmetros foram calculados através dos diâmetros de espalhamento, obtidos com o auxílio do mini cone, e do tempo de escoamento, obtidos com o auxílio do mini funil V.

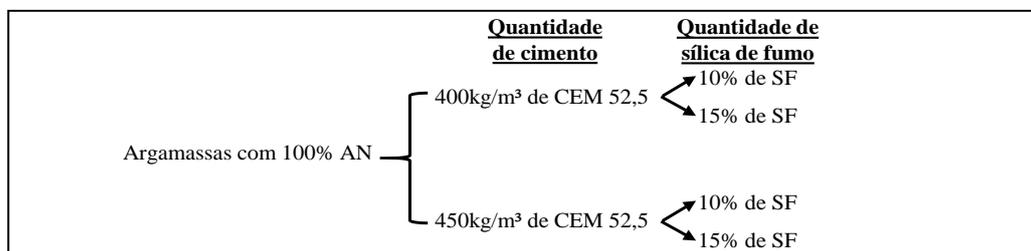


Figura 1 - Esquematização das argamassas experimentais a produzir com AN.

Para cada argamassa foram determinados os parâmetros G_m e R_m que correspondem a um par de valores (V_w/V_p e $S_p/p\%$). Por conseguinte, foi necessário realizar diversas amassaduras experimentais. Para que a argamassa tivesse trabalhabilidade adequada, os valores de G_m tinham de estar compreendidos entre 5,3 e 5,9 e os valores de R_m tinham de estar compreendidos entre 1,14 e 1,3, (equivalente a uma variação do diâmetro médio do espalhamento (D_m) de 251 a 263 mm e uma variação do tempo de escoamento (t) entre 7.69 e 8.77 s, respectivamente).

Uma vez atingido o par de valores V_w/V_p e $S_p/p\%$ para cada uma das quatro argamassas, foram produzidos quatro betões correspondentes, em que foram adicionados à pasta (argamassa) os agregados grossos naturais (britas 1 e 2).

As quatro amassaduras experimentais tinham o volume mínimo permitido pela betoneira de 35 litros. O objectivo desse estudo prévio foi determinar a quantidade de sílica de fumo (10 ou 15% do volume de finos) e de cimento a usar (400 ou 450 kg/m³) na produção dos BACED (**Figura 2**). Adicionalmente, as referidas quatro amassaduras tiveram a finalidade de confirmar a trabalhabilidade através de ensaios no estado fresco. De cada amassadura foram ainda produzidos seis cubos, com o objectivo de determinar a resistência à compressão aos 7 e 28 dias de idade.

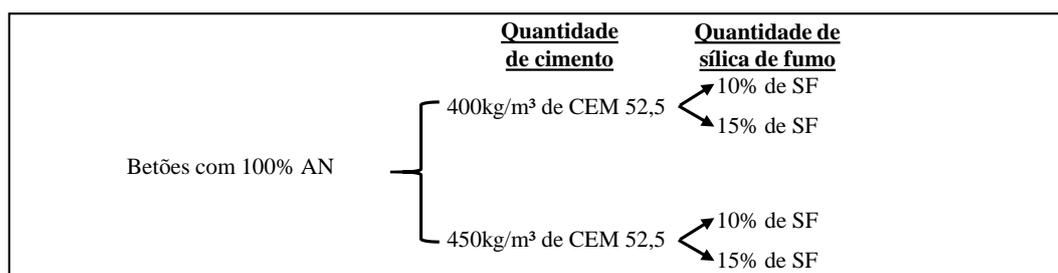


Figura 2 - Esquematização dos betões experimentais a produzir com AN

Aos 7 e 28 dias de idade, foram realizados ensaios de resistência à compressão aos quatro betões (de acordo com a norma NP EN 12390-3 (2011)). O BAC que apresentou maior resistência à compressão foi o betão de referência na fase posterior. Determinou-se assim a quantidade de cimento e sílica de fumo a usar na produção posterior de argamassas e betões.

Uma vez determinada a quantidade de cimento e sílica de fumo a usar nas argamassas, manteve-se todos os parâmetros do método fixos (V_p/V_s , f_{ad} , V_w/V_p e $S_p/p\%$), efectuando-se apenas substituições ao nível do agregado natural. Esta substituição foi feita em massa e por fracção granulométrica, reproduzindo-se a curva de referência de Nepomuceno (2005).

Conhecendo os volumes absolutos de todos os constituintes, as respectivas massas volúmicas e, no caso dos materiais finos, as suas percentagens unitárias, determinou-se a composição das argamassas.

Foram produzidas quatro misturas de AAC, a primeira utilizando apenas agregados finos naturais (100% AN) e as restantes em que se substituiu uma percentagem dos AN por agregados da pré-fabricação na composição das argamassas (25, 50 e 100%).

Uma vez que, nesta fase, a substituição de AN por AR foi feita apenas ao nível dos agregados finos, a argamassa correspondente ao betão 0% AFR/100% AGR, para efeitos de cálculo, é igual à mistura 100% AN, e a argamassa correspondente ao betão 100% AFR/100% AGR, para efeitos de cálculo, é igual à mistura 100% AR. Assim, foram estudadas quatro argamassas, que deram origem a seis betões (AFR/AGR (%): 25/25; 50/50; 100/100; 0/100; 100/0). A esquematização das várias argamassas produzidas é apresentada na **Figura 3**.

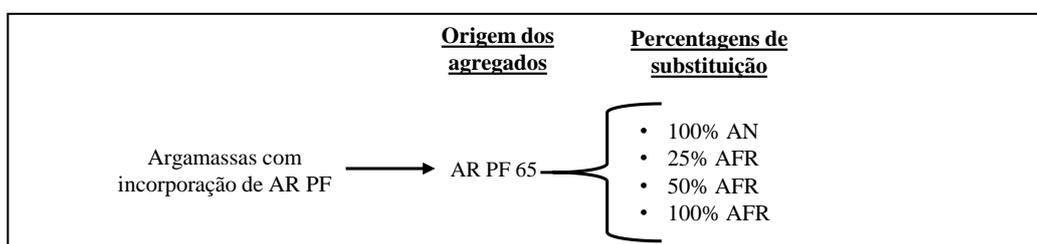


Figura 3 - Esquematização das argamassas a produzir com AN e AR.

Para aferir os parâmetros de trabalhabilidade das misturas, foram realizados dois ensaios em estado fresco: ensaio de espalhamento no mini cone e ensaio de escoamento no mini funil V. Não existindo referências normativas nacionais ou internacionais para os

ensaios em causa, seguiu-se os procedimentos de ensaio utilizados por Silva (2013), adaptados de Nepomuceno (2005) e Liu (2009).

Ainda nesta fase, foram realizados ensaios no estado endurecido às argamassas produzidas (aos 28 dias de idade): ensaio de resistência à compressão e ensaio de resistência à flexão (ambos de acordo com a norma EN 1015-11 (1999)).

3. Estado da Arte

3.1. Introdução

Este capítulo tem por objectivo apresentar, de uma forma sucinta, o levantamento da informação existente relativa às propriedades das AAC, dos BAC, dos BED e dos AR de betão.

3.2. Argamassa autocompactável (AAC)

O betão autocompactável pode ser encarado como sendo constituído por agregados grossos dispersos numa matriz formada pela argamassa. Uma vez definidas as propriedades desta matriz, adequadas à obtenção de BAC, torna-se possível isolar o estudo das argamassas do estudo de betões.

O estudo preliminar em argamassas é realizado dada a sua elevada facilidade de execução e reduzido consumo de materiais, comparativamente com os betões. Esta facilidade resulta, sobretudo, da possibilidade de se ensaiar volumes menores e da maior rapidez na execução das amassaduras e na execução dos ensaios de trabalhabilidade. Consequentemente, todos os parâmetros da composição dos BAC podem ser facilmente determinados através do estudo em argamassas, à excepção dos parâmetros relativos aos agregados grossos e à definição do volume de vazios.

Estes parâmetros quantificados para as argamassas assumem exactamente os mesmos valores no cálculo dos betões, uma vez que apenas representam razões (expressas em massa ou em volume absoluto) entre diferentes componentes que constituem a fase argamassa.

O estudo da composição da pasta é efectuado através dos ensaios do mini cone e do mini funil V, que permitem quantificar as características de trabalhabilidade das argamassas através da área relativa de espalhamento (G_m) e da velocidade relativa de escoamento (R_m). O método utilizado neste trabalho contempla a definição de um intervalo de valores para estes parâmetros, de modo a que se obtenha o comportamento autocompactável desejado. Nos capítulos seguintes, será descrito e explicado todo o método de cálculo, bem

como os ensaios para a determinação dos parâmetros no estado fresco.

Os materiais empregues na produção de AAC são iguais aos finos utilizados em betão convencional (BC), diferindo apenas nas proporções.

Quanto aos agregados, não existem limitações quanto à sua natureza, composição ou origem. No entanto, a utilização de agregados com uma granulometria contínua pode melhorar o comportamento da AAC no estado fresco (maior fluidez), ou até mesmo reduzir a quantidade de cimento, água ou adições na mistura (Silva; 2013).

O fíler calcário (FC) é utilizado frequentemente como adição, em substituição do cimento, e pode contribuir para melhorar a trabalhabilidade, compacidade, permeabilidade, capilaridade, exsudação e retracção. As cinzas volantes (CV) permitem aumentar a viscosidade da argamassa no estado fresco, obtendo-se uma boa resistência à segregação, mantendo a fluidez (Silva; 2013). O fíler calcário (FC) permite o aumento da coesão do BAC no estado fresco, podendo também ser utilizada como material de enchimento (STA, 2005). O superplastificante é um dos principais componentes da AAC, aumentando significativamente a sua fluidez sem, no entanto, aumentar a quantidade de água, reduzindo assim a ocorrência de fenómenos de exsudação (Silva; 2013).

3.3. Betão autocompactável (BAC)

As características mais relevantes do BAC no estado fresco estão relacionadas com o facto de este não necessitar de vibração e ter a capacidade de preencher as cofragens, envolvendo as armaduras (mesmo em zonas com grande densidade de armaduras), sem deixar vazios, nem ocorrer fenómenos de segregação tanto durante a colocação como em repouso.

Assim, enquanto num betão convencional é necessária a aplicação de uma energia adicional à fricção interna entre as partículas como modo de permitir que se distribuam e preencham correctamente os moldes, num BAC tal não pode ocorrer porque tem de ser o próprio betão a conseguir esse efeito. Este aspecto reflecte-se nos ensaios no estado fresco e é conseguido através da optimização das quantidades da mistura e da incorporação de adições e adjuvantes.

Os requisitos específicos exigidos aos BAC no estado fresco dependem do tipo de aplicação, destacando-se em particular: (1) condições de confinamento (geometria do elemento a betonar, qualidade, tipo e localização das armaduras, entre outras); (2) equipamento de colocação do betão; (3) métodos de colocação do betão; e (4) métodos de acabamento das superfícies (APEB, 2007).

As propriedades a avaliar no estado fresco podem ser caracterizadas pelas seguintes características: (1) fluidez; (2) velocidade do escoamento quer na ausência, quer na presença de obstruções; (3) capacidade de enchimento; (4) capacidade de escoamento; (5) capacidade de passagem; e (6) resistência à segregação. Na **Tabela 1**, são apresentados os ensaios que permitem determinar de forma quantitativa as referidas características.

Tabela 1 - Propriedades requeridas ao BAC e respectivos ensaios (NP EN 206-9, 2010)

Características	Método de ensaio	Norma	Valor medido	Abreviaturas	Unidades
- Fluidez - Velocidade do escoamento na ausência de obstruções	Ensaio de espalhamento	NP EN 12350-8 (2010)	Tempo que o BAC demora a atingir o círculo de 500 mm	T ₅₀₀	s
			Espalhamento	SF	mm
- Viscosidade - Capacidade de enchimento	Ensaio de escoamento no funil V	NP EN 12350-9 (2010)	Tempo decorrido entre a abertura da tampa e o momento em que aparece o primeiro raio de luz no fundo do funil V	T _v	s
- Capacidade de escoamento através de espaços confinados	Ensaio na caixa L	NP EN 12350-10 (2010)	Índice de capacidade de passagem na caixa L	PL	-
- Resistência à segregação	Ensaio de resistência à segregação	NP EN 12350-11 (2010)	Parcela segregada	SR	%
- Capacidade de passagem através de espaços estreitos - Velocidade do escoamento na presença de obstruções	Ensaio de espalhamento no anel J	NP EN 12350-12 (2010)	Tempo que o BAC demora a atingir o círculo de 500 mm	T500	s
			Espalhamento no anel J	J	mm
			Capacidade de passagem no anel	PJ	mm

Em seguida, são analisadas as propriedades do BAC de forma quantitativa (através de diferentes tipos de ensaios).

As propriedades básicas do BAC em estado fresco devem ser determinadas e quantificadas por ensaios. Em consonância com a percepção generalizada, Silva (2013) considera que não é possível avaliar as propriedades (capacidade de escoamento e de passagem, viscosidade e resistência à segregação) de forma independente. Por conseguinte, considera-se que só a combinação dos diferentes ensaios permite obter garantias de suficiente trabalhabilidade do BAC.

Na norma NP EN 206-9 (2010), estão definidas as classes para as propriedades obtidas nos ensaios realizados aos BAC em estado fresco. No guia da APEB (2007), é apresentado o campo de aplicação do BAC consoante a respectiva classificação. Na **Tabela 2** e

na **Tabela 3**, encontram-se resumidas, para cada propriedade, as diferentes classes, requisitos (quantitativos) e os respectivos campos de aplicação.

Tabela 2 - Especificação do BAC em estado fresco (APEB, 2007; NP EN 206-9, 2010)

Classes	Sigla da classe	Propriedade	Requisito	Unidade	Campo de aplicação
Classes de espalhamento	SF1	Espalhamento (SF)	550 a 650	mm	Estruturas não armadas ou com pouca armadura, que sejam betonadas a partir do topo, com deslocamento livre, desde o ponto de descarga do betão (ex. lajes ou pavimentos); betões colocados por bombagem (ex. revestimentos de tuneis); secções que sejam suficientemente pequenas para prevenir escoamentos horizontais (ex. pilares e fundações profundas).
	SF2		600 a 750		Aplicações correntes (ex. paredes e pilares).
	SF3		760 a 850		Aplicações verticais, em estruturas densamente armadas e estruturas de forma complexa; melhor superfície de acabamento mas mais difícil de controlar a segregação do BAC; usados agregados que tenham um valor pequeno na sua máxima dimensão (menor que 16 mm).
Classes de viscosidade no ensaio de espalhamento	VS1	Tempo de espalhamento (T500)	< 2,0	s	Evidencia uma boa capacidade de preenchimento, mesmo quando há grande densidade de armadura; tem a capacidade de auto-nivelamento e geralmente apresenta o melhor grau de acabamento; ocorre maior risco de ocorrer exsudação e segregação.
	VS2		$\geq 2,0$		Não existe limite superior; com o aumento do tempo de espalhamento existe maior probabilidade de ocorrer efeitos tixotrópicos, que podem ajudar a limitar a pressão na cofragem ou aumentar a resistência à segregação; risco de ocorrência de chochos no acabamento superficial; maior sensibilidade às paragens ou atrasos entre camadas sucessivas.
Classes de viscosidade no ensaio do funil V	VF1	Tempo de escoamento (Tv)	<9,0	s	Boa capacidade de preenchimento, mesmo quando há grande densidade de armadura; tem capacidade de auto-nivelamento; apresenta melhor grau de acabamento; ocorre maior risco de sofrer exsudação e segregação.
	VF2		9,0 a 25,0		Com o crescimento do tempo de espalhamento, apresenta maior probabilidade de ocorrer efeitos tixotrópicos, que podem ajudar a limitar a pressão na cofragem ou a aumentar a resistência à segregação; risco de ocorrência de chochos no acabamento superficial; maior sensibilidade às paragens ou atrasos entre camadas sucessivas

Tabela 3 - Especificação do BAC em estado fresco (APFAC,2007; NP EN 206-9, 2010) (continuação)

Classes	Sigla da classe	Propriedade	Requisito	Unidade	Campo de aplicação
Classes de capacidade de passagem na caixa L	PL1	Índice de capacidade de passagem na caixa L (PL)	$\geq 0,80$ com 2 varões	-	Aplicado em estruturas com intervalos de 80 a 100 mm (ex. edifícios e estruturas verticais).
	PL2		$\geq 0,80$ com 3 varões		Aplicado a estruturas com intervalos de 60 a 80 mm (ex. estruturas correntes de engenharia civil).
Classes de resistência à segregação	SR1	Parcela segregada (PS)	≤ 20	%	Aplicado em lajes esbeltas e para aplicações verticais com uma distância de espalhamento inferior a 5 metros, e um intervalo de escoamento maior que 80mm.
	SR2		≤ 15		Aplicado em elementos verticais, se a distância de espalhamento for superior a 5 m, com um intervalo de escoamento superior a 80 mm, de modo a minimizar a segregação dinâmica; situações em que a resistência e a qualidade da superfície de acabamento superficial sejam importantes.
Classes de viscosidade no anel J	VJ 1	Tempo de espalhamento no anel J (T500)	< 3	s	Mesmos que a classe VS1.
	VJ 2		≥ 3		Mesmos que a classe VS2.
Classes de espalhamento no anel J	SFj 1	Espalhamento no anel J (SF)	480-600	mm	Mesmos que a classe SF1.
	SFj 2		610-720		Mesmos que a classe SF2.
	SFj 3		730-840		Mesmos que a classe SF3.
Classes de capacidade de passagem no anel J	PJ 1	Capacidade de passagem no anel J (PJ)	$\leq 10\text{cm}$ com 12 varões	mm	Mesmos que a classe PL1.
	PJ 2		$\leq 10\text{cm}$ com 16 varões		Mesmos que a classe PL2.

3.4. Betão de elevado desempenho (BED)

Os betões de elevado desempenho (BED) são, actualmente, empregues apenas em situações particulares, sobretudo em edifícios de grande altura ou em estruturas localizadas em ambientes agressivos. Em termos físicos, os BED possuem resistências mecânicas (nomeadamente a resistência à compressão) superiores às dos betões convencionais.

A utilização deste tipo de betão permite que as estruturas possam ter um tempo de vida útil de 100 ou mais anos (Camões, 2002)

Embora não exista uma linha bem definida de separação entre os betões convencionais dos BED, o *American Concrete Institute* (1993) caracteriza como BED os betões que apresentam resistência à compressão superior a 41 MPa.

Os BED são produzidos com uma reduzida relação água-ligante (a/l), que é assegurada pela utilização de superplastificantes. As relações a/l nos BED estão compreendidas entre 0,2 e 0,4 (Camões, 2002; Parande, 2013).

Em geral, são empregues cimentos CEM I, da classe 42.5 ou 52.5, de endurecimento rápido, com baixo calor de hidratação e resistentes aos sulfatos, em quantidades elevadas, compreendidas, em geral, entre 400 e 500 kg/m^3 , podendo, no entanto, ultrapassar este valor (Camões, 2002).

O componente de maior relevância e que permite a produção de BED é a sílica de fumo. Esta permite melhorias nas propriedades mecânicas tais como o módulo de elasticidade, resistência à flexão e resistência à compressão (STA, 2005). Além disso, a sílica contribui para o aumento da durabilidade do BED (Parande, 2013; Ramezani pour et al., 2014).

A sílica de fumo provoca um maior impacto sobre a resistência à compressão nos primeiros 28 dias de idade do betão. Após 28 dias, o betão irá gradualmente continuar a ganhar resistência, embora a taxa de ganho de resistência seja muito mais lenta (STA, 2005).

A quantidade de sílica de fumo a usar nos BED varia de 10 a 15% da massa de cimento (Hassan et al., 2000; Parande, 2013). Caso seja incorporada pouca sílica (menos de 5%) a sua utilização não será eficiente (Neville e Aïtcin, 1998). Pelo contrário, para quantidades superiores a 15%, o espaço entre as partículas de cimento não será suficiente para acomodar toda a sílica, sendo uma parte dela desperdiçada (Roy, 1992).

3.5. Propriedades dos agregados reciclados de betão (ARB)

As propriedades dos agregados reciclados são claramente influenciadas pela qualidade do betão de origem, principalmente a qualidade e quantidade de argamassa aderida à sua superfície. A qualidade da argamassa depende da relação a/l utilizada no betão de origem e a sua qualidade depende da resistência dos betões e do método de trituração utilizado (Hansen e Boegh, 1985).

De seguida, analisa-se em maior detalhe algumas propriedades dos agregados reciclados.

3.5.1. Método de trituração

Os agregados reciclados de betão são obtidos através de trituração, que pode ser apenas primária (TP) ou primária seguida de secundária (TP+TS).

A trituração primária é efectuada com recurso a uma britadeira de maxilas e o material

resultante tem uma forma mais angular. Após esta primeira trituração, pode ser feita uma trituração secundária, na qual o material através de uma britadeira de impacto, regulada de forma a obter-se a dimensão máxima pretendida para o agregado. Após a TS, o material apresenta uma forma mais arredondada.

Matias *et al.* (2013) estudaram a influência do método de trituração dos agregados naturais e reciclados e concluíram que os AR possuem uma forma mais arredondada do que os AN (como evidenciado pelos valores mais elevados do índice de forma), justificada pela adesão da argamassa aos agregados.

3.5.2. Absorção de água

Devido à quantidade de argamassa aderida, os valores de absorção de água obtidos para os agregados reciclados são superiores aos dos agregados naturais, conduzindo, geralmente, a maiores relações a/l .

Para ter este factor em consideração, evitando que a relação a/l do betão com AR seja alterada, pode-se tomar uma das seguintes opções: pré-saturar os AR ou acrescentar uma certa quantidade de água durante a amassadura, compensando assim a que será absorvida pelos agregados.

Ferreira *et al.* (2011) compararam estes dois métodos de consideração da água de absorção dos AR na mistura e concluíram que o método de pré-saturação é ligeiramente prejudicial ao desempenho global do betão, especialmente em termos de durabilidade.

3.5.3. Massa volúmica

Quanto à massa volúmica, quanto maior o seu valor, melhor será o desempenho da argamassa e, conseqüentemente, do betão correspondente (Brito, 2005), concluindo-se que, nesta propriedade, os agregados naturais apresentam vantagem face aos agregados reciclados. Verifica-se que os valores de massa volúmica dos AR são inferiores aos dos agregados naturais, devido à porosidade mais elevada da argamassa aderida (Hansen e Boegh, 1985).

4. Metodologia de cálculo

O BAC pode ser encarado como sendo constituído por agregados grossos dispersos numa matriz formada pela argamassa. A partir do momento em que são definidas as propriedades da matriz argamassa (designada por AAC) adequadas à obtenção de BAC, torna-se

possível isolar o estudo das argamassas do estudo dos betões. Uma primeira justificação para a análise separada das argamassas reside na maior facilidade de execução comparativamente com os betões. Esta facilidade resulta na possibilidade de se ensaiarem volumes menores e da maior rapidez na execução das argamassas e na execução dos ensaios.

Assim, de acordo com o método proposto por Nepomuceno (2005), antes da produção de BAC, é necessário realizar um estudo prévio em AAC.

Em seguida é apresentada a metodologia de cálculo que foi seguida para a formulação das AAC e para a formulação dos respectivos BAC. Na **Figura 4**, é apresentado o fluxograma da metodologia seguida. O presente relatório apenas descreve as três primeiras fases apresentadas no fluxograma, sendo que a última fase será alvo de descrição no próximo relatório.

As características dos materiais usados na produção (AAC e BAC) são apresentadas no **Anexo A.1**.

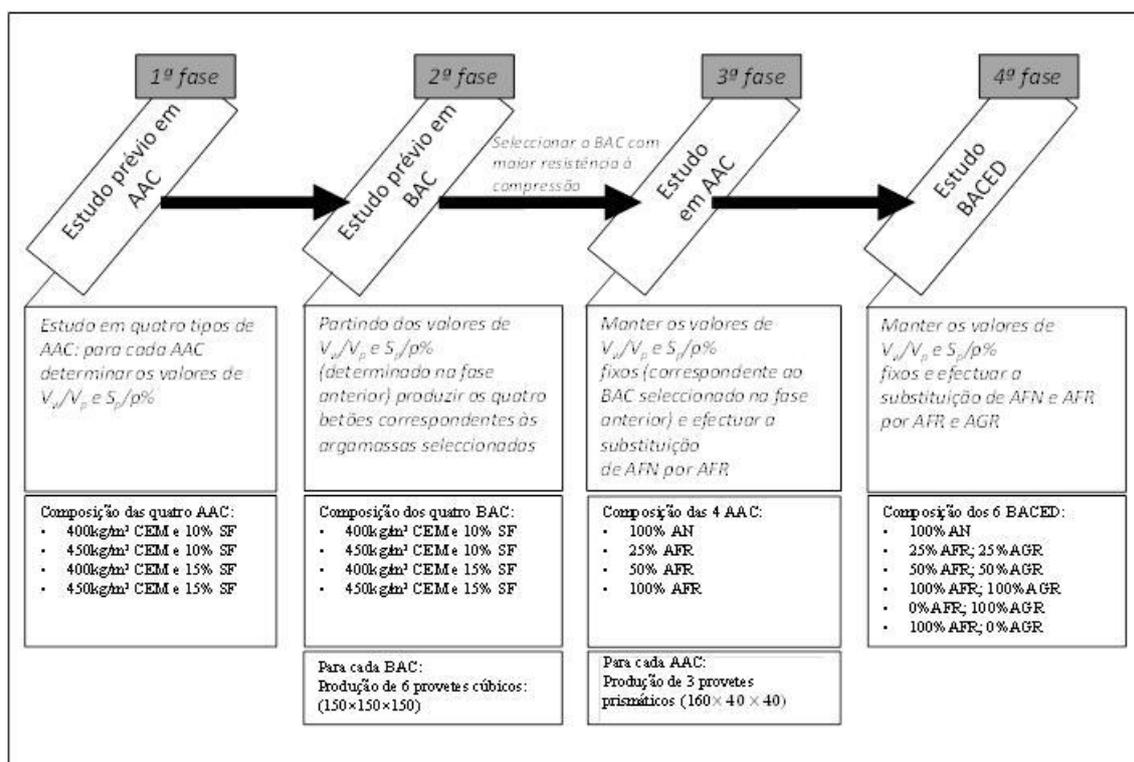


Figura 4 - Fluxograma com as diferentes fases de produção de AAC e BAC

4.1. Formulação das AAC - 1ª fase e 3ª fase

A metodologia de cálculo de amassaduras de AAC aplicada nesta tarefa do projecto foi desenvolvida por Nepomuceno (2005), tendo por base os métodos japoneses (JSCE,

1998; Okamura et al., 2000). Esta nova metodologia introduz algumas alterações aos métodos anteriores, considerando como variáveis alguns parâmetros, até então considerados fixos. Permite também uma maior flexibilidade ao considerar um intervalo de valores para os parâmetros de trabalhabilidade, em oposição aos outros métodos, que apenas trabalham com um par de valores. Este método divide-se nas seguintes etapas:

- ✦ selecção dos materiais;
- ✦ definição das curvas granulométricas de referência para os agregados finos;
- ✦ estudo em argamassas.

Na primeira etapa do método, os materiais finos (cimento e adições) e as suas percentagens na mistura são definidos de acordo com a resistência à compressão pretendida no estado endurecido. A mistura de agregados finos deve ser efectuada para que a sua curva granulométrica se aproxime da curva de referência proposta.

Na segunda etapa, é determinado o volume absoluto de agregados finos e grossos (em percentagem), separadamente.

A terceira e última etapa corresponde à definição dos seguintes parâmetros para o estudo em argamassa:

- ✦ o volume absoluto dos materiais finos (cimento e adições): V_p ;
- ✦ o volume absoluto dos agregados finos: V_s ;
- ✦ a relação, em volume absoluto, entre as quantidades de materiais finos e de agregados finos: V_p/V_s ;
- ✦ a relação, em volume absoluto, entre as quantidades de água e de materiais finos: V_w/V_p ;
- ✦ a relação, em percentagem, entre as quantidades (em massa) de superplastificante e de materiais finos: $S_p/p\%$.

A etapa prévia de estudo em argamassas permitiu aferir as quantidades de amassadura dos vários betões através de ajustes na razão a/l e na dosagem de superplastificante, antes de adicionar o agregado grosso (natural e/ou reciclado). Esta etapa foi sempre executada antes da produção do BAC correspondente.

O objectivo desta fase foi avaliar os parâmetros de trabalhabilidade, quantificados através da área relativa de espalhamento (G_m) e da velocidade relativa de escoamento (R_m). Estes parâmetros de trabalhabilidade foram calculados através dos diâmetros de espalhamento, obtidos com o auxílio do mini cone, e do tempo de escoamento obtidos através do mini funil V.

Os valores de V_w/V_p e $S_p/p\%$, que influenciam as características de trabalhabilidade pre-

tendidas, são estimados através de correlações estabelecidas por Nepomuceno (2005). Dado o vasto leque de superplastificantes disponíveis do mercado, com propriedades que podem variar consoante o fornecedor, os parâmetros V_w/V_p e $S_p/p\%$ têm de ser ajustados experimentalmente até que se obtenha uma argamassa com a trabalhabilidade adequada, quantificada através dos parâmetros G_m e R_m . Caso estes parâmetros se situem fora dos intervalos de referência, faz-se variar os valores de V_w/V_p e $S_p/p\%$, através do ajuste das quantidades de água e de superplastificante, até se atingir o comportamento pretendido (Figura 5 e Figura 5).

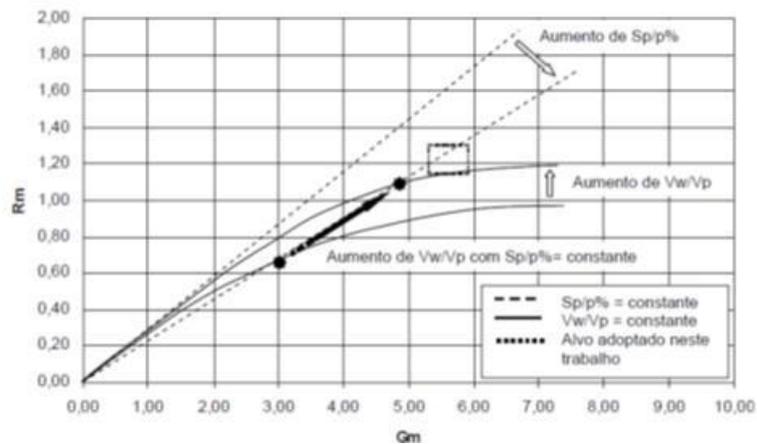


Figura 5 - Alterações nos parâmetros de trabalhabilidade com o aumento de V_w/V_p , mantendo $S_p/p\%$ constante (Nepomuceno (2005))

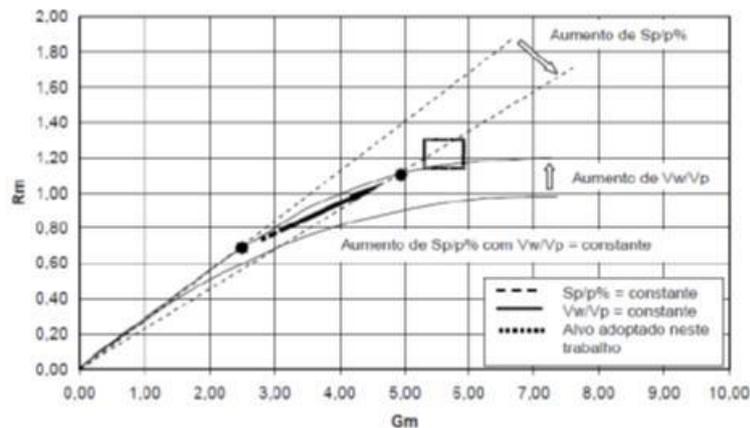


Figura 6 - Alterações nos parâmetros de trabalhabilidade com o aumento de $S_p/p\%$, mantendo V_w/V_p constante (Nepomuceno (2005))

Para as AAC produzidas, foi necessário fazer algumas opções relativamente aos diversos parâmetros de composição:

- ♦ é necessário fixar um valor para a relação, em volume absoluto, entre as quantidades totais de materiais finos (cimento e adições) e de agregados finos na mis-

tura (V_p/V_s), que deverá ser, preferencialmente, entre 0,65 e 0,80, de acordo com Nepomuceno (2005); optou-se por considerar $V_p/V_s=0,80$, de acordo com os resultados obtidos por Silva (2013);

- ♦ todas as argamassas e betões a estudar neste trabalho contemplam a adição de FC e CV em substituição de cimento (misturas ternárias): 30% correspondem a CV e 5% a FC;
- ♦ os valores de V_w/V_p e $S_p/p\%$ variam em função da necessidade de água e S_p de cada mistura; uma vez que o objectivo é manter a trabalhabilidade, mantendo o volume de finos constante, assumiu-se como ponto de partida um par hipotético de valores para V_w/V_p e $S_p/p\%$ e foi-se progressivamente adaptando esse valor aos parâmetros de trabalhabilidade pretendidos, num processo iterativo.

Por conseguinte, para as argamassas com 10% de SF e 400 kg/m³ de cimento, assumiu-se $V_w/V_p=0,88$ e $S_p/p\%=0,65$; para as argamassas com 10% de SF e 450 kg/m³ de cimento $V_w/V_p=0,89$ e $S_p/p\%=1,05$; para as argamassas com 15% de SF e 400 kg/m³ de cimento $V_w/V_p=0,89$ e $S_p/p\%=1,05$ e para as argamassas com 15% de SF e 450 kg/m³ de cimento $V_w/V_p=0,92$ e $S_p/p\%=1,24$.

Estes parâmetros foram escolhidos tendo em conta diversos trabalhos com aplicação de BAC usando o método de Nepomuceno (2005), que apresentaram resultados satisfatórios (Franco (2010), Bogas (2011), Silva (2013)). Após afinação dos parâmetros (através de algumas iterações), fixou-se estes valores em: $V_w/V_p = 0,89$ e $S_p/p\%=1,00$ para as AAC com 10% de SF e 400 kg/m³ de cimento; $V_w/V_p = 0,92$ e $S_p/p\%=1,24$ para as AAC com 10% de SF e 450 kg/m³ de cimento; $V_w/V_p = 0,90$ e $S_p/p\%=1,10$ para as AAC com 15% de SF e 400 kg/m³ de cimento; e $V_w/V_p = 0,90$ e $S_p/p\%=1,20$ para as AAC com 15% de SF e 450 kg/m³ de cimento. Os resultados das diversas iterações realizadas para a determinação dos parâmetros de mistura V_w/V_p e $S_p/p\%$, bem como a representação gráfica dos referidos resultados, encontram-se no **Anexo A.2**.

Após a afinação dos referidos parâmetros e produzidos os respectivos quatro BAC, foi seleccionado o que apresentou maior resistência à compressão aos 7 e 28 dias que corresponde ao de referência da 4ª fase.

Uma vez seleccionado a AAC (correspondente ao BAC de referência) manteve-se todos os parâmetros de cálculo fixos (V_p/V_s , f_{ad} , V_w/V_p e $S_p/p\%$), efectuando-se apenas substituições ao nível do agregado natural por agregado reciclado. Esta substituição foi feita em massa e por fracção granulométrica, reproduzindo-se a curva de referência obtida por Nepomuceno (2005).

Para além da substituição de AN por AR, foram feitos acertos na água de amassadura, de modo a ter em conta o efeito da absorção de água, que é bastante superior nos AR.

Conhecendo os volumes absolutos de todos os constituintes, as respectivas massas volúmicas e, no caso dos materiais finos, as suas percentagens unitárias, determinou-se a composição das argamassas. Estes cálculos são apresentados no **Anexo A4**.

Apesar de se pretender estudar seis misturas de betão, uma dessas misturas corresponde a substituição por agregado reciclado apenas ao nível dos agregados grossos, pelo que essa mistura, para efeitos do estudo em argamassa, é equivalente à mistura 100% AN. Assim, nesta fase, foram estudadas quatro argamassas.

4.2. Formulação dos BAC - 2ª fase

De modo a calcular-se o volume total de cada mistura a betonar, foi necessário definir os ensaios a realizar e a que idades. Assim, foi possível definir a quantidade e tipo de provetes necessários à realização da campanha experimental e os respectivos moldes a utilizar. Nesta fase, apenas foi realizado o ensaio de resistência à compressão aos 7 dias e 28 dias de idade. Por conseguinte, o volume de betão necessário por amassadura foi de 35 dm³, já considerando uma margem de 20% de perdas (realização dos vários ensaios no estado fresco, enchimento de moldes, etc.).

O cálculo da composição dos betões foi em tudo semelhante ao cálculo da composição das argamassas. Salienta-se o facto de se tomar o valor de 0,03 m³ para o volume de vazios (V_v) e o valor de 1,82 para o “número de mistura” do método (MN).

Sabendo que $MN = \frac{V_p}{V_s} \times \frac{V_m}{V_g}$ e tendo em conta que o valor de V_p/V_s é fixado em 0,80 para todas as misturas, obtém-se $V_m/V_g=2,275$.

Definidos estes parâmetros adicionais, o cálculo processa-se de forma análoga ao cálculo da composição das argamassas. Determina-se ainda os seguintes valores:

$$\blacktriangleright V_g, \text{ volume absoluto dos agregados grossos, em m}^3/\text{m}^3, \text{ dado por: } V_g = \frac{1-V_v}{1+\left(\frac{V_m}{V_g}\right)};$$

$$\blacktriangleright V_m = \left(\frac{V_m}{V_g}\right) \times V_g.$$

Conhecendo todas as características dos materiais, foi possível calcular as quantidades por unidade de volume, que são depois multiplicadas pelo volume total de amassadura (35 dm³ para cada betão).

Os cálculos das composições dos betões são apresentados no **Anexo A3** na

Tabela A. 5. As quantidades totais de todos os materiais necessários para a produção dos quatro BAC, são apresentadas no **Anexo A3** na **Tabela A. 6**.

5. Campanha experimental

A campanha experimental a realizar nesta tarefa do projecto teve como objectivo avaliar o desempenho no estado fresco e endurecido de AAC com incorporação de SF e AR e de BAC com incorporação de SF. Para tal, foi necessário realizar os ensaios adequados para melhor compreender a influência das SF e dos AR nessas propriedades.

Pretende-se então, com este capítulo, apresentar e descrever todas as fases da campanha experimental realizada, focando-se a produção de AAC e de BAC e os respectivos ensaios a realizar, tanto no estado fresco como endurecido (**Figura 7**).

A formulação das AAC e BAC foi feita através do método de Nepomuceno (2005), sendo que as quantidades dos diferentes materiais foram majoradas através de um coeficiente de segurança, de modo a salvaguardar a necessidade de repetir amassaduras, desperdícios durante o fabrico ou erros nos ensaios. Estas quantidades são apresentadas no **Anexo A2**, **Anexo A3** e **Anexo A4**.

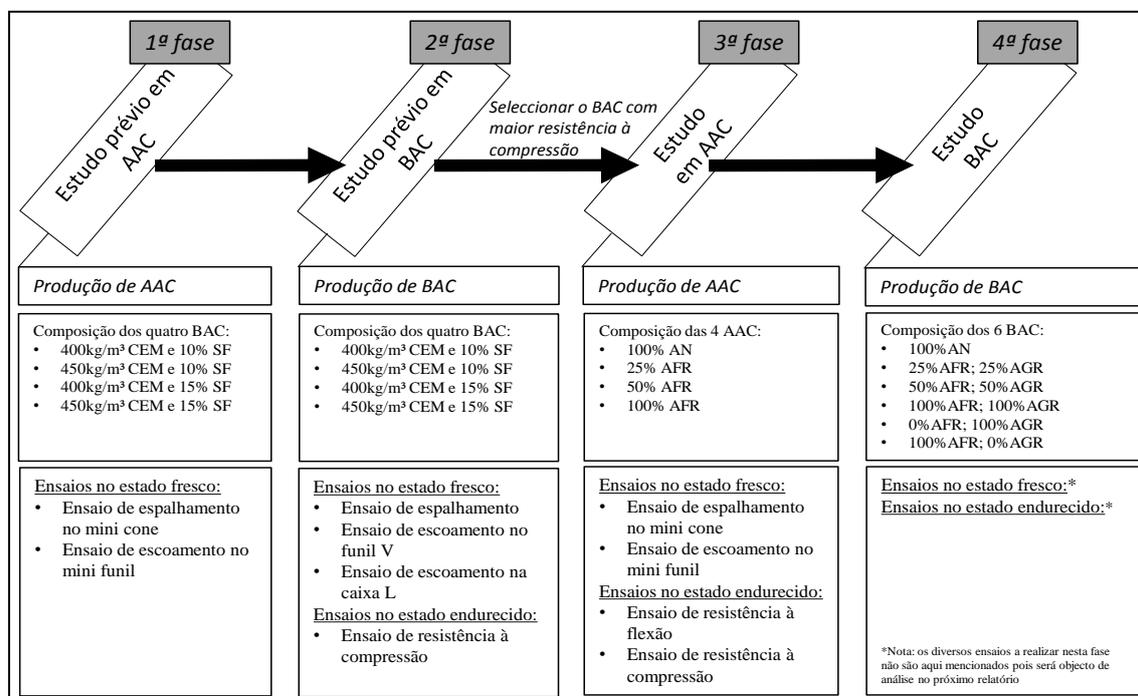


Figura 7 - Fluxograma com as diferentes fases de produção de AAC e BAC e respectivos ensaios realizados

5.1. Fase preliminar de produção de AAC (apenas com AN) - 1ª fase

Na 1ª fase, foram produzidas 18 argamassas com o objectivo de determinar os parâmetros de trabalhabilidade (G_m e R_m). Esses parâmetros foram calculados com base nos ensaios de espalhamento no mini cone e ensaio de escoamento no mini funil. Os cálculos das quantidades das diversas iterações (amassaduras) são apresentados no **Anexo A.2**.

5.1.1. Sequência de amassadura

A produção de AAC foi feita com base nos processos utilizados por Silva (2013) e Car-tuxo (2013) nas suas investigações sobre BAC e BC com agregados reciclados, respec-tivamente, assim como em indicações dadas no manual da sílica de fumo (SFA, 2005) com as devidas adaptações.

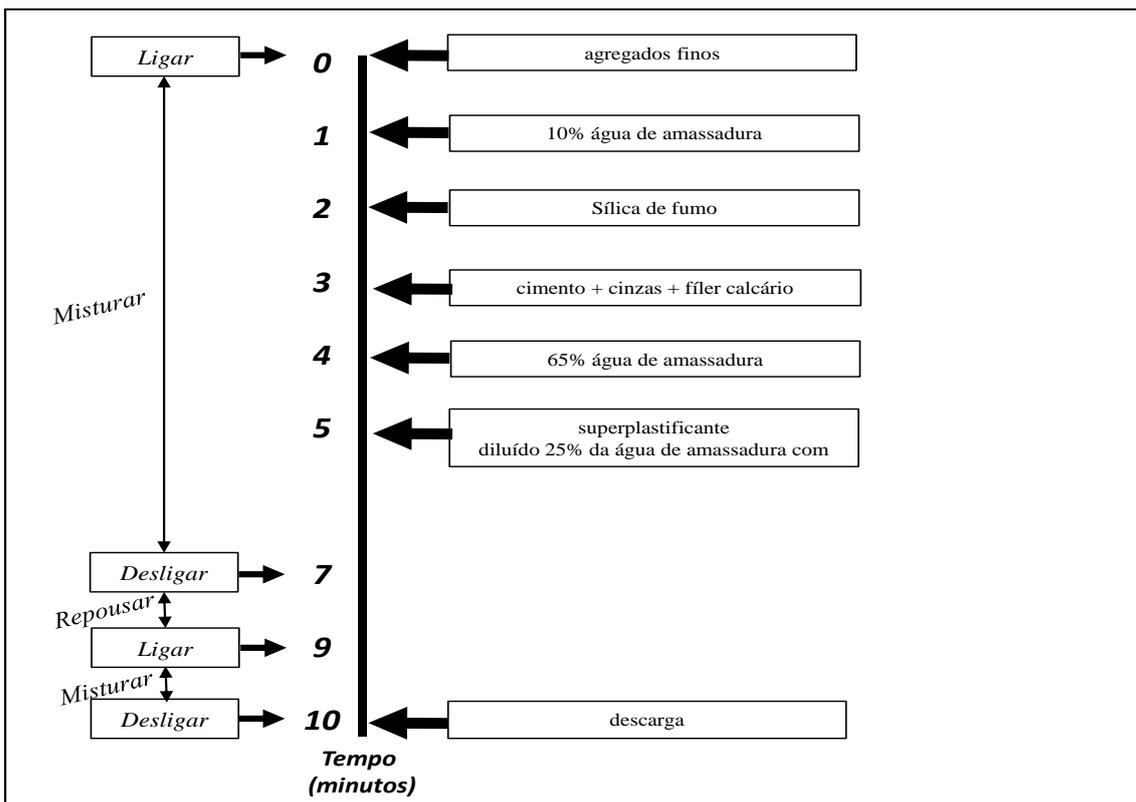


Figura 8 - Representação esquemática da sequência de amassadura de AAC

Na **Figura 8**, apresenta-se, de forma esquemática, a sequência de amassadura para AAC. A sequência de amassadura demorou 10 minutos no total e iniciou-se com a introdução dos agregados finos (areias) que foram misturados durante 1 minuto. Adicionou-se, lentamente, a primeira parcela de água, correspondente a 10% da água de amassadura total,

sem desligar o equipamento, misturou-se por mais 1 minuto. De seguida, adicionou-se a sílica de fumo que foi misturada durante 1 minuto. Adicionou-se os materiais finos (cimento e adições) sendo misturados durante 1 minuto. Adicionou-se lentamente a segunda parcela de água, correspondente 65% da água total, sem desligar o equipamento, misturou-se por mais 1 minuto. A terceira parcela de água, correspondente aos restantes 25%, foi adicionada com o superplastificante bem misturado, também de forma lenta e sem paragem do equipamento. A mistura dos componentes continuou durante 2 minutos, sem parar, em velocidade normal. Decorridos os 2 minutos, desligou-se a misturadora e a argamassa ficou em repouso durante outros 2 minutos, aproveitou-se essa pausa para limpeza da pá de mistura. Decorridos esses 2 minutos, procedeu-se a mais 1 minuto de mistura, também com velocidade normal, antes de iniciar os ensaios no estado fresco.

Foi utilizada a misturadora ilustrada na **Figura 9** e um cronómetro para medição dos diversos intervalos de tempo apresentados.



Figura 9 - Misturadora utilizada para as amassaduras de AAC

5.1.2. Ensaio às AAC no estado fresco

Para se perceber se a argamassa produzida tem as características de auto-compactabilidade requeridas, foram feitos dois ensaios no estado fresco, para aferir diferentes parâmetros:

- ◆ espalhamento no mini cone, de modo a determinar a área de espalhamento relativa (G_m);
- ◆ escoamento no mini funil V, de modo a determinar a velocidade relativa de escoamento (R_m).

Ambos os parâmetros serviram de base para efectuar as várias iterações aos parâmetros V_w/V_p e $S_p/p\%$, de acordo com o apresentado no subcapítulo anterior (§4.1)

5.1.2.1. Ensaio de espalhamento no mini cone

A determinação do diâmetro médio de espalhamento foi efectuada com recurso a um molde troncocónico (**Figura 10**) e uma régua metálica. Não existindo referências normativas nacionais ou internacionais para o ensaio em causa, optou-se por seguir os procedimentos de ensaio utilizados por Nepomuceno (2005) e por Liu (2009).

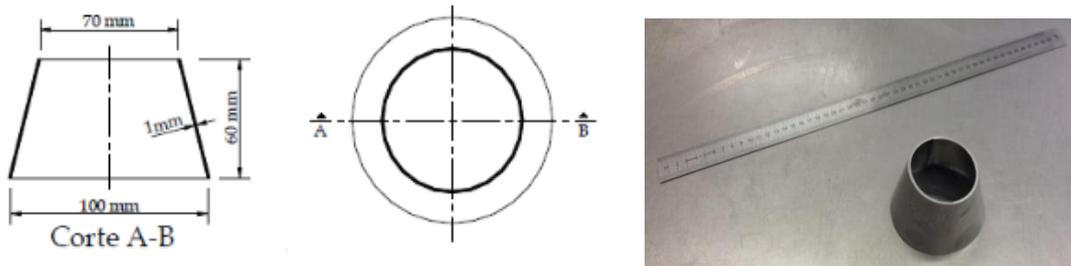


Figura 10 - Mini cone para o ensaio de espalhamento em argamassas

Descreve-se seguidamente, de forma resumida, o procedimento de ensaio utilizado:

- Garantir previamente o correcto nivelamento da mesa de ensaio;
- Humedecer ligeiramente as superfícies interiores do molde e a superfície da mesa, removendo qualquer concentração de água existente;
- Encher o molde de uma única vez, sem compactar, e rasar a sua superfície, removendo o material que se possa ter espalhado à volta deste;
- Retirar o molde, suavemente, na vertical e esperar que a argamassa pare de fluir e atinja o diâmetro máximo de espalhamento;
- Medir o espalhamento em dois diâmetros perpendiculares entre si, d_1 e d_2 , em mm (**Figura 11**);
- O espalhamento é dado pelo diâmetro médio (D_m) das duas medições, também em mm.

O valor obtido é o diâmetro médio de espalhamento (D_m), que é expresso através de uma área de espalhamento relativa (G_m), dada por:

$$G_m = \left(\frac{D_m}{D_0}\right)^2 - 1$$

em que:

- G_m - área de espalhamento relativa;
- D_m - diâmetro médio de espalhamento, em mm;
- D_0 - diâmetro inicial na base do cone, em mm.

O intervalo de variação admissível estabelecido por Nepomuceno para o valor de G_m , considerando que é o que melhor se adequa à obtenção de BAC, situa-se entre 5,3 e 5,9.



Figura 11 - Espalhamento da argamassa e diâmetros a medir

5.1.2.2. Ensaio de escoamento no mini funil

A determinação do tempo de escoamento foi efectuada com recurso ao mini funil V (**Figura 12**) e um cronómetro. Não existindo referências normativas nacionais ou internacionais para o ensaio em causa, optou-se por seguir os procedimentos de ensaio utilizados por Nepomuceno (2005) e por Liu (2009).

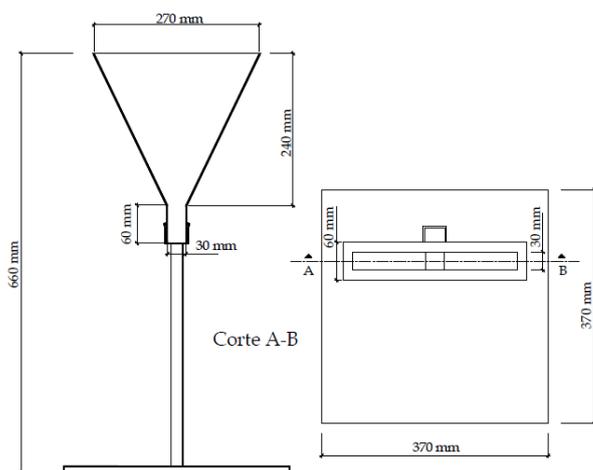


Figura 12 - Mini funil V para o ensaio de escoamento em argamassas

Descreve-se seguidamente, de forma resumida, o procedimento de ensaio utilizado:

- Garantir previamente o correcto nivelamento e fixação do equipamento de ensaio (funil) de modo a não ocorrerem movimentos;

- b) Humedecer as superfícies interiores do funil e remover qualquer concentração de água existente;
- c) Encher o funil sem aplicar qualquer tipo de vibração e rasar a sua superfície superior;
- d) Abrir a comporta inferior do funil e, em simultâneo, iniciar a medição do tempo de escoamento com o auxílio de um cronómetro;
- e) O tempo de escoamento (t) corresponde ao intervalo entre a abertura da comporta e o instante em que, observando o funil de cima para baixo, surja o primeiro raio de luz no fundo do funil.

O valor obtido é o tempo de escoamento (t), medido em segundos, que é expresso através da velocidade relativa de escoamento (R_m), dada por:

$$R_m = \frac{10}{t},$$

em que:

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

t - tempo de escoamento, em segundos.

O intervalo de variação admissível estabelecido por Nepomuceno para o valor de R_m , considerando que é o que melhor se adequa à obtenção de BAC, situa-se entre 1,14 e 1,30.

5.2. Fase de produção de BAC (apenas com AN) – 2ª fase

Na 2ª fase, foram produzidos quatro tipos de BAC (apenas com AN) em que se variou a quantidade de sílica de fumo e de cimento. Por conseguinte, foram realizados ensaios no estado fresco (ensaio de espalhamento, ensaio de escoamento no funil V e ensaio de escoamento na caixa L) para se aferir se o betão produzido tinha as características de autocompactabilidade requeridas. Ao BAC em estado endurecido foi realizado o ensaio de resistência à compressão em cubos (aos 7 e 28 dias de idade) com o objectivo de se perceber a influência da quantidade de sílica de fumo e de cimento nas propriedades do BAC. Os cálculos das quantidades dos quatro BAC produzidos são apresentados no **Anexo A.3**.

5.2.1. Sequência de amassadura

A produção de BAC foi feita com base no processo utilizado na produção de AAC com as devidas adaptações.

Na **Figura 13**, apresenta-se, de forma esquemática, a sequência de amassadura para a produção BAC.

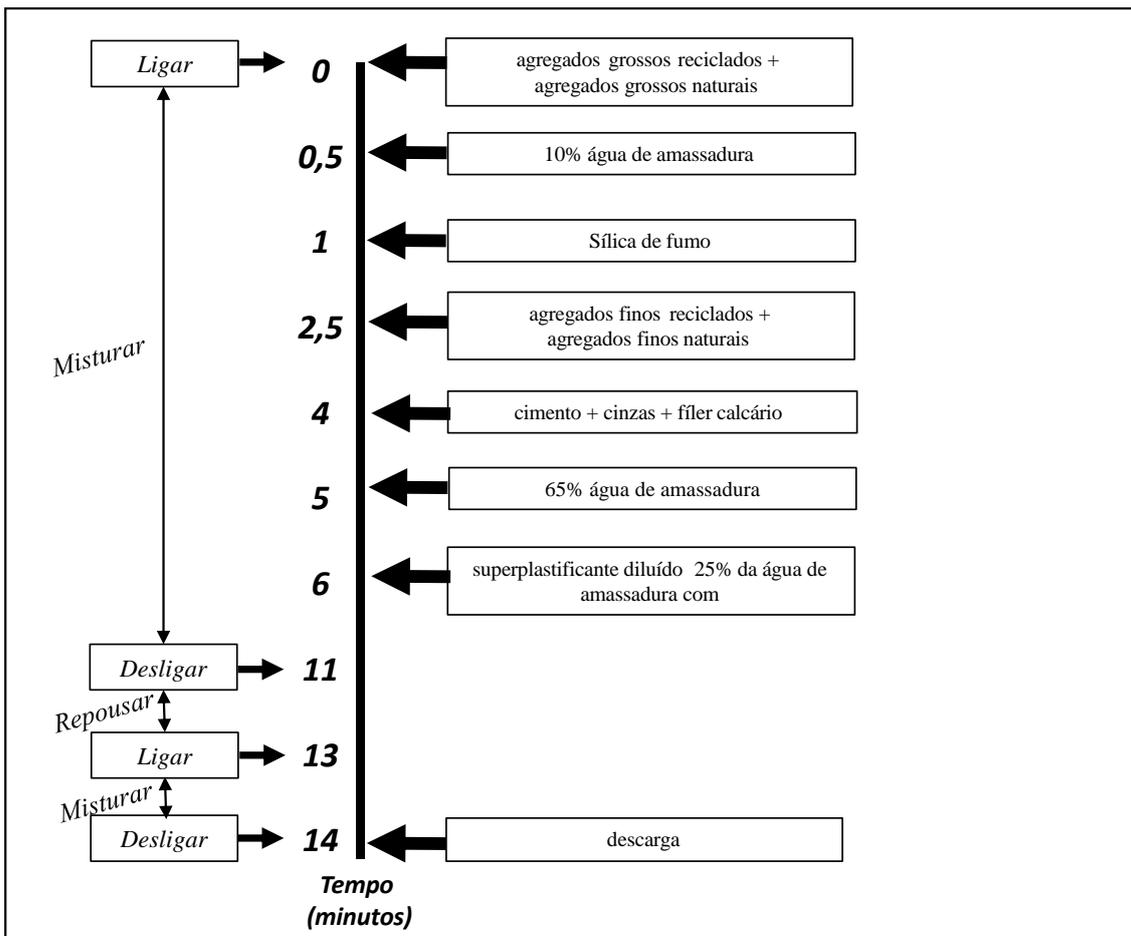


Figura 13 - Representação esquemática da sequência de amassadura de BAC

A sequência de amassadura demorou 14 minutos no total e iniciou-se com a introdução dos agregados grossos naturais (britas) que foram misturados durante 30 s. Adicionou-se, lentamente, a primeira parcela de água, correspondente a 10% da água de amassadura total, sem desligar o equipamento, misturou-se por mais 30 s. De seguida, adicionou-se a sílica de fumo que foi misturada durante 1,5 minutos e depois adicionou-se os agregados finos naturais (areias) que foram misturados durante 1,5 minutos. Adicionou-se os materiais finos (cimento e adições) que foram misturados durante 1 minuto. Adicionou-se lentamente a segunda parcela de água, correspondente 65% da água total, sem desligar o equipamento, misturando por mais 1 minuto. A terceira parcela de água, correspondente aos restantes 25%, foi adicionada com o superplastificante bem misturado, também de forma lenta e sem paragem do equipamento. A mistura dos componentes continuou durante 5 minutos, sempre com velocidade normal. Decorridos os 5 minutos, desligou-se a misturadora e o BAC ficou em repouso durante 2 minutos, aproveitou-se esta pausa para limpeza da pá de mistura. Decorridos os 2 minutos, procedeu-se a mais 1 minuto de mis-

tura, também com velocidade normal, antes de iniciar os ensaios no estado fresco. Foi utilizada a misturadora de eixo inclinado ilustrada na **Figura 14** e um cronómetro para medição dos diversos intervalos de tempo apresentados.



Figura 14 - Betoneira utilizada para as amassaduras de BAC

3.1.1. Moldagem de provetes

Para BAC, foram produzidos três provetes cúbicos de dimensões 150x150x150 mm. O procedimento seguido para a moldagem dos cubos iniciou-se com a aplicação de óleo desmoldante nas superfícies do molde, de modo a evitar a aderência do BAC ao mesmo. Procedeu-se então à colocação do BAC de uma só vez, directamente do recipiente da misturadora e sem qualquer compactação (**Figura 15**). No final, rasou-se e alisou-se a superfície do molde com recurso a uma colher de pedreiro, executando-se pequenos movimentos horizontais ao longo do molde. Os provetes foram desmoldados 24 horas depois, tendo permanecido em cura húmida após a desmoldagem, até à idade de ensaio (7 e 28 dias).



Figura 15 - Enchimento dos três moldes cúbicos

5.2.2. Ensaio ao BAC em estado fresco

A característica que distingue o BAC do BC, no estado fresco, é a capacidade de se mover unicamente sob acção do seu peso próprio, preenchendo completamente os moldes, mesmo em zonas fortemente armadas, sem necessidade de receber qualquer energia de compactação e mantendo sempre a homogeneidade.

Para se aferir se o betão produzido tem as características de auto-compactabilidade requeridas, realiza-se um conjunto específico de ensaios no estado fresco para cada amassadura. Estes ensaios têm como objectivo avaliar: fluidez e a velocidade do escoamento na ausência e na presença de obstruções (avaliado através do ensaio de espalhamento); capacidade de enchimento (avaliado através do ensaio de escoamento no funil V); e capacidade de escoamento (avaliado através do ensaio de escoamento na caixa L).

5.2.2.1. Ensaio de espalhamento

O ensaio de espalhamento permitiu avaliar a fluidez e a velocidade do escoamento na ausência de obstruções, de acordo com a norma NP EN 12350-8.

Os materiais necessários para a realização do ensaio foram: cone de Abrams e chapa metálica (**Figura 16** a **Figura 18**), cronómetro e régua de 1 m.

A execução do ensaio seguiu-se pelo seguinte procedimento:

- 1) Humedecer ligeiramente todas as superfícies metálicas;
- 2) Encher o cone de uma única vez, sem qualquer agitação ou compactação (**Figura 19**);
- 3) De seguida, levantar o cone num único movimento (sem interferir no escoamento), que deverá decorrer durante 1 a 3 s, não deixando passar mais de 30 s para levantar o cone (**Figura 20**);
- 4) Iniciar a cronometragem assim que o cone deixar de estar em contacto com a base e registar o tempo t_{500} , em segundos, que o BAC demora a atingir o círculo de 500 mm;
- 5) Após o BAC estabilizar, medir o maior diâmetro de espalhamento e registar como d_1 (**Figura 21**);
- 6) Medir o diâmetro de espalhamento perpendicular a d_1 e registar como d_2 ;
- 7) Se a diferença entre d_1 e d_2 for superior a 50 mm, o ensaio deverá ser repetido com outra amostra e, se essa diferença se mantiver, o BAC deve ser considerado como não tendo a fluidez adequada.

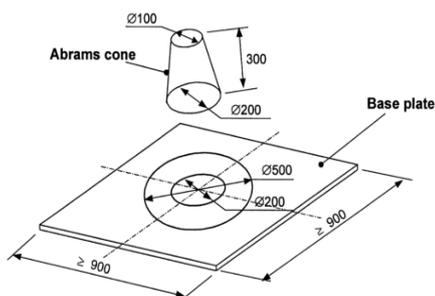


Figura 16 - Cone de Abrams e placa de base (dimensões em mm) (IPQ, 2010)

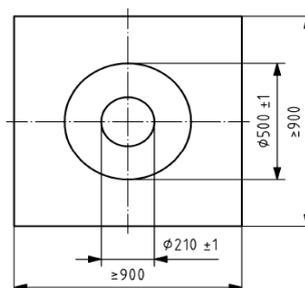


Figura 17 - Placa de base (dimensões em mm) (IPQ, 2010)



Figura 18 - Montagem do equipamento (cone de Abrams e chapa metálica)



Figura 19 - Introdução do BAC para o interior do molde troncocônico



Figura 20 - Levantamento do molde troncocônico



Figura 21 - Medição do abaixamento do BAC

Como resultado do ensaio, obteve-se o tempo de escoamento até se atingir o diâmetro de 500 mm (t_{500}), com aproximação de 0,5 segundos, bem como o diâmetro médio de espalhamento (com aproximação de 10 mm), que corresponde à média de d_1 e d_2 :

$$SF = \frac{d_1 + d_2}{2}$$

O espalhamento deverá ser superior a 660 mm (e inferior a 750 mm), podendo, no entanto, validar-se resultados a partir de 600 mm. Este requisito teve de ser respeitado para que o BAC tenha fluidez e velocidade do escoamento na ausência de obstruções adequado. Adicionalmente, foi verificado se o agregado grosso se encontra distribuído de forma homogênea ao longo da pasta do BAC, até à periferia, sem ocorrência de fenômenos de exsudação.

5.2.2.2. Ensaio de escoamento no funil V

O ensaio de escoamento no funil V permitiu avaliar a viscosidade através da capacidade de escoamento por uma zona confinada, de acordo com a norma NP EN 12350-9.

Os materiais necessários para a realização do ensaio foram: funil V (**Figura 22** e **Figura 23**), cronómetro e balde.

Para a execução do ensaio, foi seguido o seguinte procedimento:

- 1) Humedecer ligeiramente o interior do funil V;
- 2) Encher o funil V de uma única vez sem qualquer tipo de agitação ou compactação (**Figura 24**);
- 3) Sem deixar passar mais de 10 s, abrir a comporta inferior do funil e, em simultâneo, iniciar a medição do tempo de escoamento (t_v) com o auxílio do cronómetro (**Figura 25**);
- 4) Parar a cronometragem quando, observando o interior do funil de cima para baixo, surgir o primeiro raio de luz no fundo do funil;
- 5) O escoamento deve ser contínuo e sem bloqueios. Se estes ocorrerem, o ensaio deverá ser repetido com outra amostra; se o bloqueio persistir, o BAC não tem viscosidade e capacidade de passagem adequadas.

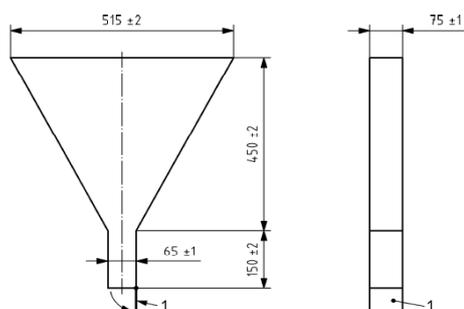


Figura 22 - Funil V. Legenda: 1 - tampa articulada ou deslizante (IPQ, 2010)



Figura 23 - Montagem do ensaio (funil V e balde de recolha)



Figura 24 - Introdução do BAC no interior do funil V



Figura 25 - Funil V completo de BAC e início da contagem do tempo

Como resultado do ensaio, obteve-se o tempo de escoamento que toda a massa de betão leva a escoar pelo funil (t_v), com aproximação de 0,5 s, que deverá ser superior a 9 s, podendo validar-se resultados a partir de 7 s.

5.2.2.3. Ensaio de escoamento na caixa L

Este ensaio permitiu avaliar a capacidade de passagem do BAC através de espaços confinados, incluindo espaços entre armaduras e outras obstruções, sem segregar ou bloquear. Adicionalmente, foi possível uma avaliação visual da capacidade de auto-nivelamento do BAC. Este ensaio foi realizado de acordo com a norma NP EN 12350-10.

Os materiais necessários para a realização do ensaio foram: caixa L (**Figura 26 e Figura 27**), cronómetro e régua.

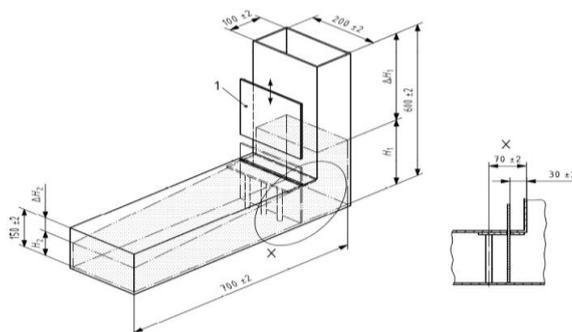


Figura 26 - Disposição geral típica da caixa L, com as dimensões requeridas (em mm) (IPQ, 2010)

A execução do ensaio seguiu o seguinte procedimento:

- 1) Humedecer ligeiramente o interior da caixa L;
- 2) Encher a caixa sem aplicar qualquer agitação ou compactação (**Figura 28**);
- 3) Esperar 60 s e abrir a comporta de separação das secções vertical e horizontal, num movimento contínuo (**Figura 29**);
- 4) Quando o movimento do BAC cessar, medir a altura do betão ΔH_1 (secção vertical da caixa L) e ΔH_2 (secção horizontal da caixa L) (**Figura 30**).

Como resultado, obteve-se o índice de capacidade de passagem na caixa L (com aproximação de 0,01), calculado através da seguinte expressão:

$$PL = \frac{150 - \Delta H_2}{600 - \Delta H_1} = \frac{H_2}{H_1}$$

O valor de PL tem de ser superior a 0,80 para que o BAC tenha capacidade de escoamen-

to adequada, através de espaços confinados.



Figura 27 - Caixa L



Figura 28 - Introdução do BAC no interior da caixa L



Figura 29 - Abertura da comporta da caixa L



Figura 30 - Medição de ΔH_2

5.2.3. Ensaio ao BAC em estado endurecido

Aos BAC produzidos apenas foi feito o ensaio de resistência à compressão em provetes cúbicos aos 7 e 28 dias de idade. Esse ensaio teve como o objectivo avaliar a influência da quantidade de cimento e sílica de fumo nos BAC, com a idade. Os provetes foram submetidos a uma cura húmida até à data de realização do ensaio.

5.2.3.1. Ensaio de resistência à compressão

Com a realização deste ensaio, pretendeu-se determinar a capacidade resistente dos diferentes betões quando comprimidos com tensão uniforme, de acordo com a norma NP EN 12390-3 (2011). Para realizar o procedimento normativo, foi necessário uma prensa hidráulica (**Figura 31**).

O ensaio foi realizado em provetes cúbicos de 150 mm de aresta e em provetes cilíndricos de 150 mm de diâmetro e 300 mm de altura, sujeitos ao processo de cura húmida a 20 ± 2 °C até à idade de ensaio.

Para cada referência de BAC, foram moldados três provetes cúbicos, a ensaiar aos 7 e 28 dias de idade.

Para a execução do ensaio, foi realizado o seguinte procedimento:

- 1) Limpar as superfícies da prensa hidráulica;
- 2) Posicionar o provete na prensa, centrado relativamente ao prato inferior da máquina (para evitar qualquer tipo de excentricidade): colocar o provete com a superfície de enchimento virada lateralmente, ou seja, sem estar em contacto com as placas da prensa;
- 3) Seleccionar a velocidade de aplicação da carga (13,5 kN/s) e dar início ao ensaio. A velocidade referida tem de estar dentro do intervalo $0,6 \pm 0,2$ MPa/s, sendo que a velocidade deve ser aplicada de forma contínua e sem choques até o provete atingir a rotura;
- 4) Inspeccionar a rotura de cada provete (**Figura 32**) e classificá-la como satisfatória (**Figura 33**) ou não satisfatória (**Figura 34**), de acordo com a classificação presente na norma NP EN 12390-3 (2011).



Figura 31 - Prensa hidráulica



Figura 32 - Ensaio de resistência à compressão em cubos.



Figura 33 - Roturas satisfatórias de provetes cúbicos (IPQ, 2011)

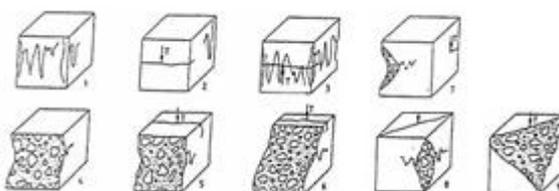


Figura 34 - Roturas não satisfatórias de provetes cúbicos (IPQ, 2011)

A resistência à compressão em cubos e cilindros foi calculada através da seguinte expressão:

$$f_c = \frac{F}{A_c}$$

em que:

f_c - resistência à compressão do provete (MPa ou N/mm²);

F - carga máxima (N);

A_c - área da secção transversal do provete em contacto com os pratos da prensa.

5.3. Fase de produção de AAC (com AR) - 3ª fase

Na 3ª fase, foram produzidas quatro argamassas, uma apenas com AFN e nas restantes substituindo os AFN por AFR: 25%, 50% e 100% de substituição. Por conseguinte, nesta fase pretendeu-se determinar o comportamento no estado fresco e endurecido de AAC produzidas com AR. Estes foram avaliados através da sua comparação com argamassa de referência produzida na sua totalidade com AFN.

Os cálculos das quantidades de amassadura das quatro AAC produzidas são apresentados no **Anexo A.4**.

5.3.1. Moldagem de provetes

Para cada argamassa, foram produzidos três provetes prismáticos de dimensões 40x40x160 mm, como ilustrado na **Figura 35**.

Cada molde permitiu a moldagem de três provetes, pelo que foi utilizado um molde por argamassa, perfazendo um volume total de 768 cm³ de argamassa por molde.

O procedimento seguido para a moldagem dos prismas iniciou-se com a aplicação de óleo desmoldante nas superfícies do molde, para evitar a aderência da argamassa ao mesmo.

Procedeu-se então à colocação da argamassa de uma só vez, directamente do recipiente da misturadora e sem qualquer compactação. No final, rasou-se e alisou-se a superfície do molde com recurso a uma colher de pedreiro, executando-se pequenos movimentos horizontais ao longo da maior dimensão do molde.

Os provetes foram desmoldados 24 horas depois, tendo permanecido em cura húmida antes e após a desmoldagem (**Figura 26**), até à idade de ensaio (28 e 90 dias).

5.3.2. Ensaio às AAC no estado fresco

Nesta fase (3ª fase), tal como na 1ª, foi necessário realizar ensaios às AAC em estado fresco com o objectivo aferir se a argamassa produzida tem as características de auto-compactabilidade requeridas. Assim, foram realizados os seguintes dois ensaios:

- ◆ ensaio de espalhamento no mini cone, de modo a determinar a área de espalhamento relativa (G_m);
- ◆ ensaio de escoamento no mini funil V, de modo a determinar a velocidade relativa de escoamento (R_m).

Os referidos ensaios encontram-se descritos em §5.1.2.



Figura 35 - Molde para produção de 3 provetes prismáticos de argamassa



Figura 36 - Argamassas produzidas na câmara de cura húmida

5.3.3. Ensaios às AAC no estado endurecido

Os ensaios realizados às argamassas no estado endurecido tiveram como objectivo avaliar a influência da incorporação de agregados reciclados de betão no comportamento mecânico das diferentes AAC produzidas (com AFR e AFN), relativamente à AAC de referência (apenas com AFN).

Aos provetes prismáticos de AAC produzidos foi realizado o ensaio de resistência à flexão, e em seguida o ensaio de resistência à compressão. Os provetes foram previamente submetidos a uma cura húmida até à realização dos ensaios.

5.3.3.1. Ensaio de resistência à flexão

O ensaio de resistência à flexão realizou-se em provetes prismáticos de dimensões 40x40x160 mm e, juntamente com o ensaio de resistência à compressão, permitiu verificar a influência da substituição de AN por AR no desempenho mecânico da argamassa.

O método adoptado foi seguido de acordo com o disposto na norma europeia EN 1015-11 (1999) e consiste em assentar o provete em dois apoios cilíndricos, submetendo-o a uma força gradualmente crescente aplicada a meio vão, até à sua rotura por flexão. No final, determina-se a tensão de rotura, objectivo deste ensaio.

Para a execução do ensaio, foi seguido o seguinte procedimento:

- 1) Posicionar o provete na prensa de flexão (**Figura 37**), com uma das faces laterais de moldagem centrada sobre os roletes, e com o seu eixo longitudinal perpendicular aos apoios;
- 2) Fazer descer o dispositivo de aplicação da carga, muito lentamente, até estabelecer contacto com a face superior do provete;
- 3) Aplicar uma força gradualmente crescente, à taxa de 50 ± 10 N/s (controlado através do manípulo do equipamento), de modo contínuo e sem choques, até à rotura do provete (**Figura 38**);
- 4) Registrar a força de rotura aplicada f_f , em N.



Figura 37 - Prensa hidráulica para ensaio de flexão (à esquerda) e compressão (à direita)



Figura 38 - Rotura do provete prismático à flexão (à esquerda) e à compressão (à direita)

A tensão de rotura à flexão de cada provete, em MPa, é dada pela expressão:

$$f_f = \frac{1,5 \times F_f \times l}{d_1 \times d_2^2}$$

em que:

F_f - carga aplicada no centro do prisma na rotura (N);

l - distância entre apoios (100 mm);

d_1 e d_2 - dimensão das arestas dos topos do provete ($d_1 = d_2 = 40$ mm).

5.3.3.2. Ensaio de resistência à compressão

O ensaio de resistência à compressão realizou-se no seguimento do ensaio de resistência à flexão, com as metades dos prismas daí resultantes, com o objectivo de determinar a resistência à compressão das argamassas.

O método adoptado foi seguido de acordo com o disposto na norma europeia EN 1015-11 (1999) e consiste em aplicar uma carga à compressão, gradualmente crescente, numa determinada área, até à rotura do material. No final, determinou-se a tensão de rotura, objectivo deste ensaio.

Para a execução do ensaio, foi seguido o seguinte procedimento:

- 5) Após o ensaio de flexão, posiciona-se o provete (meio prisma) centrado no prato inferior do equipamento de compressão (**Figura 37**);
- 6) Fazer descer dispositivo de aplicação da carga, muito lentamente, até estabelecer contacto com a face superior do provete;
- 7) Aplicar uma força gradualmente crescente, à taxa de 2400 ± 200 N/s (controlado através do manípulo do equipamento), de modo contínuo e sem choques, até à rotura do provete (**Figura 38**);
- 8) Registar a força de rotura aplicada F , em N.

A tensão de rotura à compressão de cada provete, em MPa, é dada pela expressão:

$$f_c = \frac{F_c}{A} = 0,000625 \times F$$

em que:

F_c - carga aplicada no centro do meio prisma na rotura (N);

A - área da zona comprimida ($40 \times 40 = 1600$ mm²).

6. Apresentação e análise de resultados

Neste capítulo, é feita a apresentação e análise dos resultados obtidos nos ensaios efectuados às AAC e aos BAC, em estado fresco e endurecido. Os resultados são apresenta-

dos de acordo com as diferentes fases do trabalho realizado (descrito resumidamente na **Figura 4, §4 e Figura 7, §5**).

6.1. AAC com AN - 1ª fase

Esta fase teve como objectivo determinar as quantidades de água e de superplastificante a usar para a posterior produção de quatro amassaduras de BAC. Assim, foi feito um estudo prévio em AAC. As AAC diferiram do BAC apenas por não possuírem agregado grosso. As quatro AAC diferiram entre si na quantidade de sílica de fumo e cimento (10% de SF e 400 kg/m³ de cimento; 10% de SF e 450 kg/m³ de cimento; 15% de SF e 400 kg/m³ de cimento; e 15% de SF e 450 kg/m³ de cimento).

Foi necessário fazer diversas iterações, para cada uma das quatro AAC, variando a quantidade de água e de superplastificante para cada AAC. Os resultados das diversas iterações realizadas para a determinação dos parâmetros de mistura V_w/V_p e $S_p/p\%$, bem como a representação gráfica dos referidos resultados, encontram-se no **Anexo A.2**.

Na **Tabela 4**, são apresentados alguns resultados das iterações realizadas para a AAC com 10% de SF e 400 kg/m³ de cimento. Pelas diversas iterações realizadas, à medida que se aumenta a quantidade de superplastificante (através do aumento do parâmetro de cálculo $S_p/p\%$), mantendo a quantidade de água constante (mantendo constante o parâmetro de cálculo V_w/V_p), verifica-se um aumento do espalhamento (consequente aumento do parâmetro G_m), mas o tempo de escoamento mantém-se aproximadamente constante (parâmetro R_m aproximadamente constante). Este facto confirma as correlações estabelecidas por Nepomuceno (2005) no seu método de cálculo para fazer os ajustes de água e de superplastificante (a explicação gráfica dada pelo autor encontra-se na **Figura 5 e Figura 6 em §4.1**).

Tabela 4 - Resultados dos ensaios no estado fresco de AAC (10% de SF e 400 kg/m³)

Amassaduras		100% AN	100% AN	100% AN	100% AN	100% AN
		10% de SF e 400 kg/m ³ de CEM				
Parâmetros reológicos	V_w/V_p	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88
	$S_p/P\%$	0,70	0,80	0,90	1,00	1,20
Ensaio de espalhamento no mini cone	d_1 [mm]	174	185	234	240	284
	d_2 [mm]	171	185	232	240	283
	G_m	2,3	2,8	5,0	5,4	7,9
Ensaio de escoamento no mini funil	t [seg.]	12,5	12,1	9,2	10,1	9,1
	R_m	0,8	0,8	1,1	1,0	1,1

Na **Tabela 5**, apresenta-se as medições obtidas nos dois ensaios realizados às AAC em

estado fresco (mini cone e mini funil) bem como os parâmetros reológicos obtidos (G_m e R_m).

Tabela 5 - Resultados dos ensaios em estado fresco (AAC seleccionadas após diversas iterações)

Amassaduras		100% AN	100% AN	100% AN	100% AN
		10% de SF e 400 kg/m ³ de CIM	10% de SF e 450 kg/m ³ de CIM	15% de SF e 400 kg/m ³ de CIM	15% de SF e 450 kg/m ³ de CIM
Parâmetros reológicos	V_w/V_p	0,89	0,92	0,90	0,92
	$S_p/P\%$	1,05	1,24	1,10	1,24
Ensaio de espalhamento no mini cone	d_1 [mm]	255	255	255	264
	d_2 [mm]	260	250	260	264
	G_m	6,3	6,1	6,3	6,7
Ensaio de escoamento no mini funil	t [seg.]	7,6	7,2	7,5	7,1
	R_m	1,3	1,4	1,3	1,4

Na **Figura 39**, são representados, sob a forma de gráficos, os resultados obtidos no estado fresco semelhantes aos traçados por Nepomuceno (2005) no seu trabalho. No rectângulo de cor vermelha, no representa-se o intervalo admissível de valores segundo este método, para que uma argamassa apresente as características de trabalhabilidade adequadas à obtenção de BAC. Contempla-se uma pequena folga em relação a este intervalo, uma vez que uma ligeira alteração das condições de mistura (como, por exemplo, uma melhor limpeza da misturadora, entre outras) faz variar bastante os parâmetros G_m e R_m .

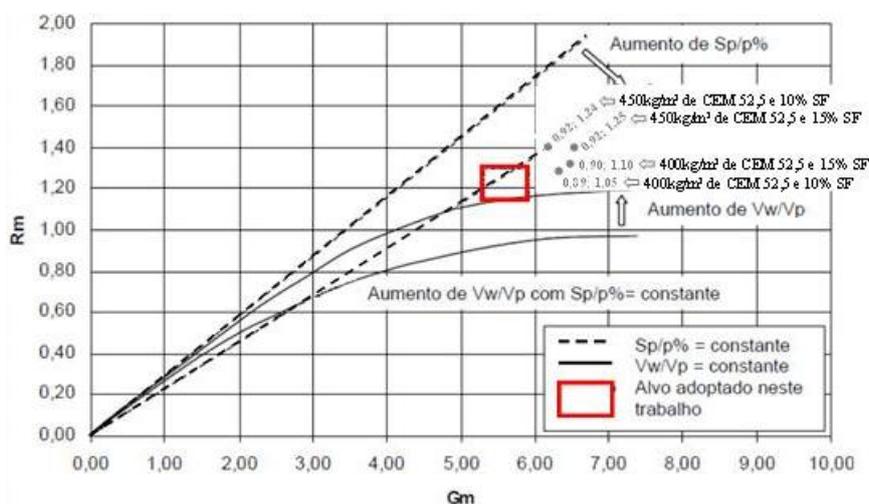


Figura 39 - Representação gráfica dos resultados no estado fresco das AAC seleccionadas (cada ponto no gráfico representa um par de valores: V_w/V_p e $S_p/p\%$)

Analisando a **Figura 39**, verifica-se que os parâmetros de trabalhabilidade obtidos para todas as argamassas se encontram ligeiramente fora do intervalo estabelecido. No entanto, conclui-se, que as argamassas possuem a trabalhabilidade adequada à obtenção de um BAC, uma vez que após a adição de agregado reciclado os parâmetros reológicos

(G_m e R_m) descem ligeiramente (devido ao maior consumo de água de amassadura) de acordo com o verificado em fases anteriores do presente trabalho (Santos et al., 2014). Face a estes resultados, é possível avançar para o estudo em BAC, já com todos os parâmetros estabelecidos (V_w/V_p e $S_p/p\%$).

6.2. BAC com AN - 2ª fase

Após a determinação dos parâmetros reológicos em quatro AAC, foram produzidos os respectivos quatro BAC. Estes, tal como as AAC, diferiram entre si na quantidade de sílica de fumo e de cimento. Na **Tabela 6**, são apresentados os resultados dos ensaios realizados ao BAC em estado fresco.

No que diz respeito aos resultados referentes aos ensaios ao BAC no estado fresco, é de salientar o facto de esses resultados constituírem, só por si, um objectivo a atingir de forma a obter um betão com um determinado comportamento no estado fresco, isto é, a auto-compactabilidade requerida aos BAC.

Tabela 6 - Resultados dos ensaios realizados ao BAC no estado fresco

Composição		10% SF 400 kg/m ³ de cimento	10% SF 450 kg/m ³ de cimento	15% SF 400 kg/m ³ de cimento	15% SF 450 kg/m ³ de cimento
Ensaio	Leituras				
Espalhamento	T ₅₀₀ [s]	2,31	1,28	2,91	2,75
	D ₁ [mm]	715	710	720	720
	D ₂ [mm]	720	710	730	730
	D _m [mm]	718	710	725	725
Escoamento no funil V	T _v [s]	16,56	16,52	21,66	15
Escoamento caixa-L	Δ H ₁ [mm]	506	505	507	505
	Δ H ₂ [mm]	75	74	75	70
	PL [%]	80	80	81	84

É possível observar que, tanto em termos do tempo de espalhamento (t_{500}) como do respectivo diâmetro, os resultados obtidos por todas as misturas podem ser considerados satisfatórios. Em geral, é possível constatar uma boa distribuição do agregado grosso na pasta, e a não ocorrência de exsudação nem de segregação. Pode-se ainda observar a presença de agregado grosso mesmo no limite de espalhamento (**Figura 40**).

De acordo com a classificação dada pela norma EN 206-9 (2010), verifica-se que todas as misturas pertencem à classe de espalhamento SF2. Quanto ao tempo de escoamento, todas as misturas se enquadram na classe VS2.

Relativamente ao tempo de escoamento no funil V, é possível constatar que os valores

médios obtidos por todas as misturas estudadas se enquadram nos valores referidos na NP EN 206-9 (2010), variando, em geral, entre 15 e 22 s, sendo que estes se enquadram na classe VF2.

Da observação visual do ensaio, é possível verificar o não bloqueio de agregado grosso na passagem estreita do funil V (**Figura 41**). Não se observa a ocorrência do fenómeno de exsudação. Após a realização do ensaio, o betão continua a apresentar-se como uma massa uniformemente distribuída.

Fazendo a análise conjunta dos dois ensaios (espalhamento e funil V), pode-se concluir que todas as misturas apresentam coesão, com um aspecto viscoso sem, no entanto, perderem a capacidade de se deformar.

Por fim, relativamente ao ensaio de escoamento na caixa L, é possível observar que os valores médios obtidos por todas as misturas analisadas estão próximos, não se observando, qualquer tipo de ocorrência de exsudação ou segregação. Para este ensaio, o valor de referência, para H2/H1, da NP EN 206-9 (2010) é superior a 80%. Por conseguinte, verifica-se que os resultados obtidos no presente estudo se enquadram na referida norma, variando entre 80% e 84%, pertencendo assim à classe PL2.



Figura 40 - Aspecto final do BAC no ensaio de espalhamento



Figura 41 - Escoamento do BAC através do funil V

A análise dos resultados no estado fresco permitiu constatar que a totalidade das amasaduras executadas cumpriu os parâmetros de trabalhabilidade requeridos pela NP EN 206-9 (2010).

Na **Tabela 7**, apresenta-se as medições obtidas no ensaio de resistência à compressão em cubos. Na tabela, é possível observar, para as diversas idades (7 e 28 dias), os valores individuais ($f_{c,c}$) e o valor médio da resistência à compressão ($f_{cm,c}$), o desvio padrão (S) e o coeficiente de variação (C_{VAR}).

Analisando os dados da **Tabela 7**, é possível verificar que, em geral, os desvios padrão e os coeficientes de variação obtidos são aceitáveis.

A **Figura 42** representa os resultados obtidos no ensaio sob a forma de gráfico, através do traçado de curvas que representam a evolução da resistência à compressão, para as duas idades do ensaio (7 e 28 dias).

Tabela 7 - Resultados elementares do ensaio de resistência à compressão aos 7 e 28 dias

Identificação			Dimensões do provete			Ensaio de compressão em cubos				
Composição	Provete	Idade (dias)	B	H	Área	Carga (kN)	$f_{c,c}$	$f_{cm,c}$	S	C_{VAR} (%)
			(mm)		(mm ²)		(MPa)			
10% SF 400 kg/m ³ de cimento	1	7	149,32	150,59	22486	1188	52,8	52,1	0,68	0,01
	2		149,34	149,31	22298	1148	51,5			
	3		150,12	148,84	22344	1161	52,0			
	4	28	148,32	150,59	22336	1588	71,1	69,8	1,38	0,02
	5		149,34	149,31	22298	1540	69,1			
	6		150,12	148,84	22344	1545	69,1			
10% SF 450 kg/m ³ de cimento	1	7	149,79	149,88	22451	1380	61,5	61,2	0,80	0,01
	2		149,81	149,49	22395	1379	61,6			
	3		149,95	149,40	22403	1354	60,4			
	4	28	149,79	149,88	22451	1656	73,8	73,8	0,08	0,00
	5		149,81	149,49	22395	1654	73,9			
	6		149,95	149,40	22403	1656	73,9			
15% SF 400 kg/m ³ de cimento	1	7	150,12	149,37	22423	1146	51,1	49,9	1,13	0,02
	2		150,14	150,01	22523	1120	49,7			
	3		150,05	149,31	22404	1095	48,9			
	4	28	150,12	149,37	22423	1393	62,1	68,8	1,86	0,03
	5		150,14	150,01	22523	1408	62,5			
	6		150,05	149,31	22404	1468	65,5			
15% SF 450 kg/m ³ de cimento	1	7	149,79	149,08	22331	1265	56,6	57,6	0,96	0,02
	2		149,87	149,15	22353	1309	58,6			
	3		149,74	148,69	22265	1283	57,6			
	4	28	149,79	149,08	22331	1734	77,7	73,2	2,60	0,04
	5		149,87	149,15	22353	1639	73,3			
	6		149,74	148,69	22265	1625	73,0			

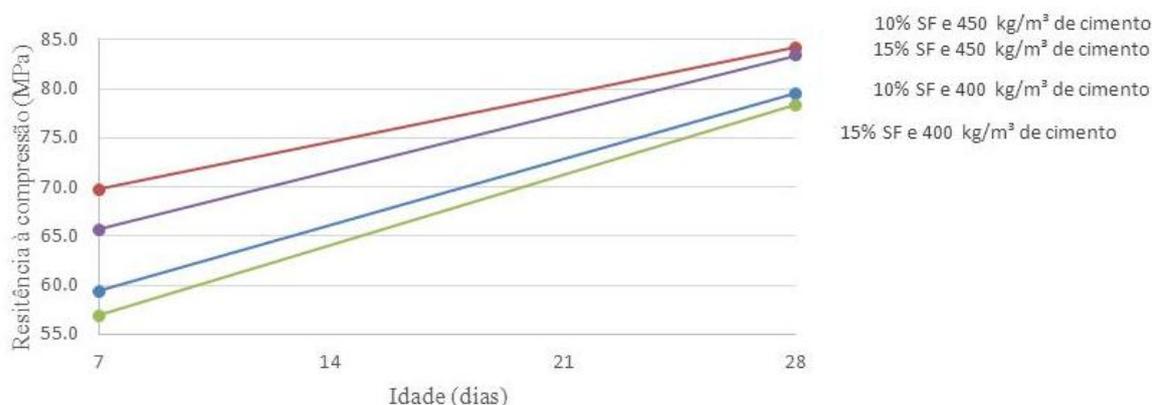


Figura 42 - Resultados do ensaio de resistência à compressão em cubos aos 7 e 28 dias

Observando os resultados obtidos, na **Figura 42**, verifica-se que a resistência à compressão aumenta com a idade, como expectável. A resistência à compressão aumenta com a quantidade de cimento (para a mesma quantidade de sílica de fumo), como esperado.

Os resultados obtidos mostram que o BAC produzido com 10% de sílica de fumo e 450 kg/m³ de cimento apresenta maior resistência à compressão (74 MPa aos 28 dias de idade), apresentando uma relação a/l de 0.4. Por conseguinte, de acordo com ACI (1993) e Camões (2002), os critérios que definem os betões de elevado desempenho foram conseguidos. Por conseguinte, este BAC (produzido com 10% de sílica de fumo e 450 kg/m³ de cimento) corresponde ao BACED de referência (100%AN) da 4ª fase.

Analisando os resultados da resistência à compressão aos 7 dias de idade, verifica-se que o aumento de sílica de fumo de 10% para 15% faz diminuir 5% (em média) a referida propriedade (mantendo a quantidade de cimento constante). Esta tendência é verificada quer para o par de BAC com 450 kg/m³ de cimento, quer para o par de BAC com 400 kg/m³ de cimento.

A referida tendência, verificada aos 7 dias de idade do BAC, é também verificada aos 28 dias de idade, embora de forma menos acentuada, ou seja, o aumento de sílica de fumo de 10% para 15% faz diminuir 1% (em média) a resistência à compressão.

Por conseguinte, através da análise global da resistência à compressão às duas idades do ensaio, conclui-se que a sílica de fumo confere maior resistência ao BAC apenas nas primeiras idades. Este facto é mencionado no manual da sílica de fumo (STA, 2005).

Como referido, verifica-se que o aumento da quantidade de sílica de fumo (de 10% para 15%) provoca uma redução da resistência à compressão. Este facto é justificado pela dimensão da partículas de sílica de fumo, uma vez que o espaço entre as partículas de cimento não é suficiente para acomodar toda a sílica (Roy, 1992).

Analisando as roturas obtidas nos provetes cúbicos, devido à compressão uniaxial, verifica-se que apresentam roturas satisfatórias (**Figura 43** a **Figura 46**), de acordo com a norma NP EN 12390-3 (2011). O tipo de rotura obtido (rotura explosiva) é normal ocorrer nos BED, de acordo com Parande (2013).

6.3. AAC com AR - 3ª fase

Após ser feita a selecção do BAC de referência (10% de SF e 450 kg/m³ de cimento), com base na resistência à compressão, foram produzidas as respectivas AAC efectuando-se apenas substituições de AN por AR.



Figura 43 - Rotura apresentada pelo BAC com 10% SF e 400 kg/m³ de cimento



Figura 44 - Rotura apresentada pelo BAC com 10% SF e 450 kg/m³ de cimento



Figura 45 - Rotura apresentada pelo BAC com 15% SF e 400 kg/m³ de cimento



Figura 46 - Rotura apresentada pelo BAC com 15% SF e 450 kg/m³ de cimento

Na **Tabela 8**, apresenta-se as medições obtidas nos dois ensaios realizados às AAC em estado fresco (mini cone e mini funil V), bem como os parâmetros obtidos (G_m e R_m , respectivamente).

A **Figura 47** representa os resultados obtidos no estado fresco sob a forma de gráfico, semelhantes aos traçados por Nepomuceno (2005) no seu trabalho.

Analisando a posição relativa dos pontos da **Figura 47**, verifica-se globalmente que o par de valores G_m e R_m das AAC com AR descera(m) (em relação à AAC com 100% AN). Este facto é explicado pela maior absorção de água dos AR.

Tabela 8 - Resultados dos ensaios ao estado fresco das AAC (10% de SF e 450 kg/m³ de CIM)

Amassaduras		100% AN	25% AR	50% AR	100% AR
		10% de SF e 450 kg/m ³ de CIM			
Parâmetros reológicos	V_w/V_p	0,92			
	$S_p/P\%$	1,24			
Ensaio de espalhamento no mini cone	d_1 [mm]	258	255	265	255
	d_2 [mm]	258	255	265	255
	G_m	6,4	6,2	6,8	6,2
Ensaio de escoamento no mini funil	t [seg.]	7,1	9,3	11,3	13,1
	R_m	1,4	1,1	0,9	0,8

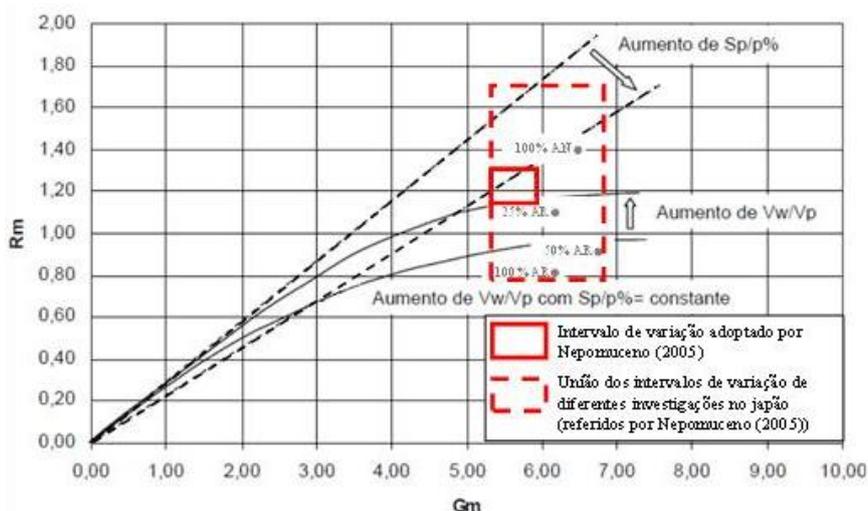


Figura 47 - Representação gráfica dos valores de G_m e R_m ($V_w/V_p=0.92$; $S_p/p\%=1.24$), para as AAC (10% de SF e 450 kg/m³ de CIM)

Na **Figura 47**, encontra-se representado a vermelho (linha contínua) o intervalo admissível de valores segundo o método usado por Nepomuceno (2005), para que uma argamassa apresente as características de trabalhabilidade adequadas à obtenção de BAC. Como se pode observar, nenhum par de valores de G_m e R_m das AAC se localiza no intervalo admissível proposto por Nepomuceno (2005). No entanto, admite-se uma pequena folga em relação a este intervalo, uma vez que uma ligeira alteração das condições de mistura (como, por exemplo, limpeza da misturadora, estado de humidade das superfícies interiores dos equipamentos de ensaio, entre outras) faz variar os parâmetros G_m e R_m . Nepomuceno (2005), no seu trabalho, admite poder ocorrer essa folga, uma vez que em estudos Japoneses similares é admitido um intervalo de valores mais abrangente (na **Figura 47**, encontra-se representado, a vermelho em linha tracejada, o intervalo de variação desses diferentes estudos). Conclui-se, portanto, que as argamassas possuem a trabalhabilidade adequada à obtenção de BAC, após a adição de agregado grosso na mistura. Face a estes resultados, é possível avançar para o estudo em betões, já com todos os parâmetros estabelecidos.

Na **Tabela 9**, apresenta-se as medições obtidas nos ensaios de resistência à flexão e à compressão das AAC.

A **Figura 48** e **Figura 49** representam os resultados obtidos nos ensaios sob a forma de gráficos, através do traçado de curvas que representam a evolução da resistência com a percentagem de substituição de AN por AR.

Através da análise dos gráficos apresentados, verifica-se que se mantém a tendência da evolução da resistência à flexão e à compressão. Como seria de esperar, as resistências (à

flexão e à compressão) tendem a diminuir com a percentagem de substituição de AN por AR. Este facto é explicado pela menor resistência mecânica dos AR em relação aos AN.

Tabela 9 - Resultados do ensaio de resistência à flexão e compressão em AAC (10% de SF e 450 kg/m³ de CIM)

Identificação		Ensaio de flexão					Ensaio de compressão				
Composição	Provete	F _f (N)	f _f	f _{fm}	S	C _{VAR} (%)	F _c (kN)	f _c	f _{cm}	S	C _{VAR} (%)
			(MPa)					(MPa)			
100% AN	1	3619	8,5				118350	74,0			
	2	4262	10,0	9,2	0,75	0,08	119660	74,8			
	3	3948	9,3				115610	72,3	73,4	1,15	0,02
25% AR	1	3539	8,3				116900	73,1			
	2	3343	7,8	8,1	0,24	0,03	115290	72,1			
	3	3494	8,2				119110	74,4			
50% AR	1	3650	8,6				118090	73,8			
	2	3030	7,1	7,6	0,83	0,11	120420	75,3			
	3	3049	7,1				118710	74,2	73,0	2,17	0,03
100% AR	1	3489	8,2				114760	71,7			
	2	3095	7,3	7,5	0,55	0,07	110810	69,3			
	3	3065	7,2				118240	73,9			

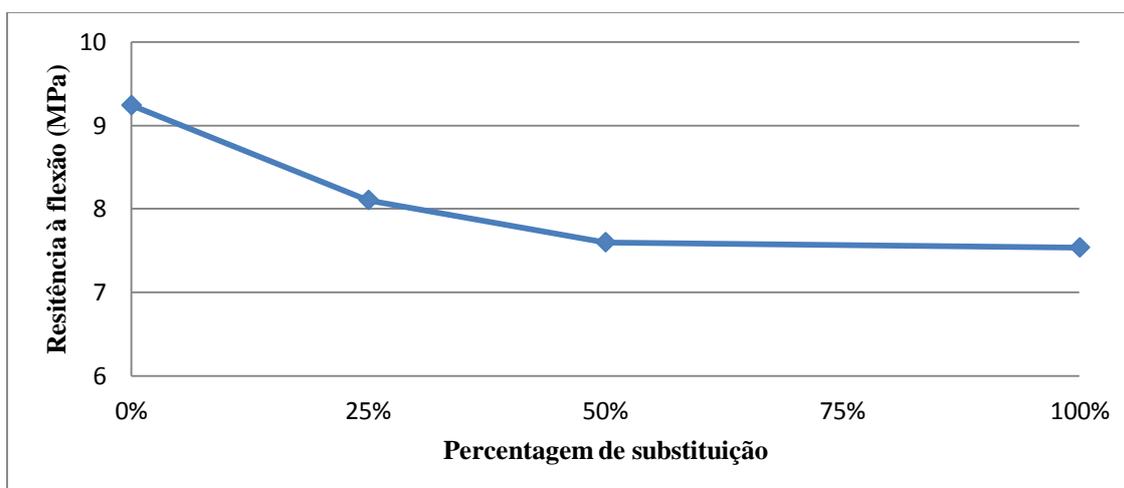


Figura 48 - Resultados do ensaio de flexão em AAC

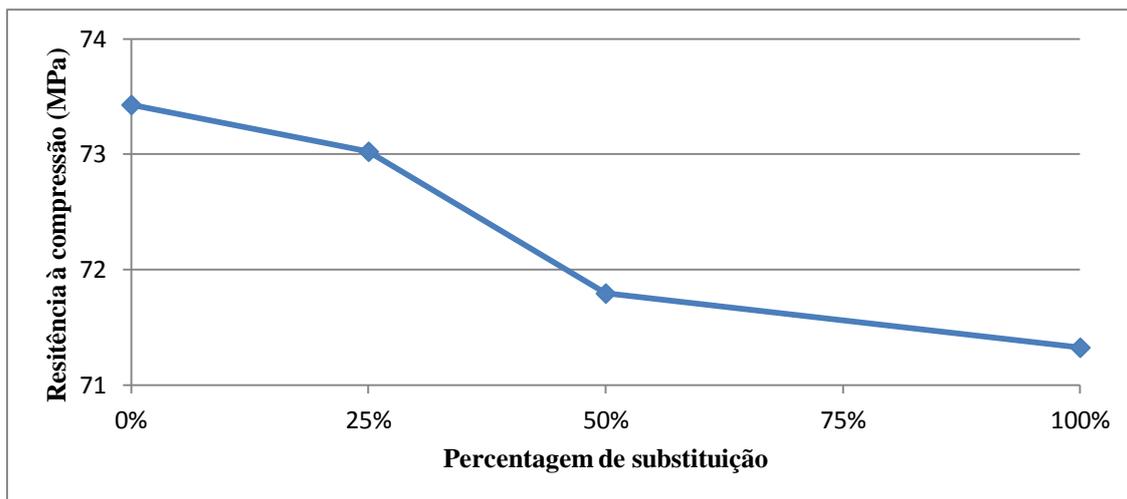


Figura 49 - Resultados do ensaio de compressão em AAC

Tal como referido pelo próprio autor do método, Nepomuceno (2005), os resultados das argamassas no estado endurecido não são relevantes, não sendo apresentados ou comentados no seu trabalho. O importante nesta fase é obter uma argamassa com as características de trabalhabilidade adequadas à obtenção de um BAC, o que foi conseguido na análise no estado fresco.

Por fim, há que salientar a importância do estudo dos BAC com recurso às argamassas de forma isolada, sem o agregado grosso, devido à maior facilidade de execução de misturas experimentais e poupança de material. Esta fase teve como principal objectivo a determinação dos parâmetros de mistura V_w/V_p e $S_p/p\%$, que, com base na metodologia proposta por Nepomuceno (2005), permitem o cálculo de todos os restantes parâmetros necessários à produção de BAC, com excepção dos referentes ao agregado grosso.

Por conseguinte, a fase do trabalho apresentada no presente relatório deverá ser entendida como uma fase preparatória, com vista à realização do estudo pretendido: obtenção de BAC de elevada resistência com AR.

7. Bibliografia

ACI - “Guide for selecting proportions for high-strength concrete with Portland cement and fly ash (ACI 211.4R)”, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, USA, 1993.

Brito, J. - “Agregados reciclados e a sua influência nas propriedades dos betões”, Lição de síntese para provas de agregação em Engenharia Civil, Lisboa, 2005.

Bogas, J. - “Caracterização de betões estruturais com agregados leves de argila expandida”, Tese de Doutoramento em Engenharia Civil, Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal, 2011, Volume I, 1338 p.

Camões, A. - “Betões de elevado desempenho com incorporação de cinzas volantes”, Tese de Doutoramento em Engenharia Civil, Universidade do Minho, Guimarães, Portugal, 2002, 456 p.

EN 1015-11 – “Methods of test for masonry, Part 11: Determination of flexural and compressive strength of hardened mortar”, Lisboa, Portugal, IPQ, 1999, 21 p.

Ferreira, L., de Brito, J., Barra, M. - “Influence of the pre-saturation of recycled coarse concrete aggregates on the fresh and hardened properties of concrete”, Magazine of Concrete Research, Vol. 63, N.º 8, 2011, pp. 617-27.

Franco R. M. C. - “Optimização técnico-económica de betões auto-compactáveis”, Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade da Beira Interior, Covilhã, Portugal, 2010, 138 p.

Hansen, T.C., Boegh, E. - “Elasticity and drying shrinkage of recycled aggregate concrete”, American Concrete Institute Journal, Vol. 82, N.º 5, 1985, pp. 648-652

Hassan K.E., Cabrera J.G., Maliehe R.S. - “The effect of mineral admixtures on the properties of high-performance concrete”, Cement and Concrete Composites, Vol. 22, 2000, pp. 267-271.

JSCE (Japan Society of Civil Engineers) - “Recommendation for construction of self-compacting concrete”, International Workshop on Self-compacting Concrete, Kochi, Japan, 1998, pp. 417-437.

Larrard, F. - “Ultra fine particles for making very high performance concretes, High performance concrete - from material to structure”, E&FN SPON, London, 1992, pp. 34-47.

Liu M. - “Wider application of additions in self-compacting concrete”, PhD Thesis, Department of Civil, Environmental and Geomatic Engineering University College London, 2009, 392 p.

Matias, D., de Brito, J., Rosa, A., Pedro, D. - “Mechanical properties of concrete pro-

duced with recycled coarse aggregates - Influence of the use of superplasticizers”, *Construction and Building Materials*, Vol. 44, 2013, pp. 101-109.

Nepomuceno M. C. S. - “Metodologia para a composição de betões auto-compactáveis”, Tese de Doutoramento em Engenharia Civil, Universidade da Beira Interior, Covilhã, Portugal, 2005, 733 p.

Neville, A.; Aïtcin, P. - “High performance concrete - An overview”, *Materials and Structures*, Vol. 31, 1998, pp. 111-117.

NP EN 12390-3 - “Ensaaios do betão endurecido, Parte 3: Resistência à compressão de provetes”, Lisboa, Portugal, IPQ, 2011, 21 p.

NP EN 206-9 - “Betão, Parte 9: Regras adicionais para betão autocompactável (BAC)”, Lisboa, Portugal, IPQ, 2010, 35 p.

NP EN 12350-8 - “Ensaaios do betão no estado fresco, Parte 8: Betão autocompactável, Ensaio de espalhamento”, Lisboa, Portugal, IPQ, 2010, 12 p.

NP EN 12350-9 - “Ensaaios do betão no estado fresco, Parte 9: Betão autocompactável, Ensaio de escoamento no funil V”, Lisboa, Portugal, IPQ, 2010, 11 p.

NP EN 12350-10 - “Ensaaios do betão no estado fresco, Parte 10: Betão autocompactável, Ensaio de escoamento na caixa L”, Lisboa, Portugal, IPQ, 2010, 12 p.

NP EN 12350-11 - “Ensaaios do betão no estado fresco, Parte 11: Betão autocompactável, Ensaio de segregação no peneiro”, Lisboa, Portugal, IPQ, 2010, 12 p.

NP EN 12350-12 - “Ensaaios do betão no estado fresco, Parte 12: Betão autocompactável, Ensaio de espalhamento no anel J”, Lisboa, Portugal, IPQ, 2010, 14 p.

Okamura H., Ozawa K. and Ouchi M. - “Self-compacting concrete”, *Structural Concrete*, Vol. 1, No. 1, 2000, pp. 3-17.

Parande A. K. - “Role of ingredients for high strength and high performance concrete - A review”, CSIR-Central Electrochemical Research Institute Karaikudi, Tamil Nadu, India, 2013, 12 p.

Parande A.K. - “Role of ingredients for high strength and high performance concrete - A review”, *Advances in concrete construction*, Vol. 1, No. 2, 2013, pp. 151-162.

Ramezani pour A. A., Rezaei H. R., Savoj H. R. - “Influence of silica fume on chloride diffusion and corrosion resistance of concrete - A review”, Department of Civil and Environmental Engineering, AmirKabir University of Technology, Tehran, Iran, 2014, 21 p.

Roy, D. - “Advanced cement systems including CBC, DSP, MDF”, 9th International Congress on the Chemistry of Cement, New Delhi, 1992, pp. 357-380.

Santos S., Barroqueiro T., Brito J. de, Silva P. - “Tarefa 4.2: Planeamento da produ-

ção, ensaios e apresentação de resultados das argamassas autocompactáveis”, integrado no Projecto PTDC / ECM / 118372 / 2010 “Betões com Agregados Reciclados de Elevado Desempenho para a Indústria da Pré-Fabricação”, Relatório ICIST, DTC 2014, Lisboa, Dezembro de 2014, ISSN:0871-7869, 40 p.

Seleem E.H., Rashad A.M., El-Sabbagh B.A. - “Durability and strength evaluation of high-performance concrete in marine structures”, *Construction and Building Materials*, Vol. 24, 2010, pp. 878–884.

Silva, P. - “Avaliação da durabilidade de betões auto-compactáveis (BAC)”, Tese de Doutoramento em Engenharia Civil, Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal, 2013, 579 p.

STA - Silica Fume Association - “Silica fume: User’s manual”, U.S. - Department of Transportation, Federal Highway Administration, Lovettsville, EUA, 2005, 183 p.

Weerdt K., Kjellsen K.O., Sellevold E.J., Justnes H. - “Synergy between fly ash and limestone powder in ternary cements”, *Cement and Concrete Composites*, Vol. 33, Issue 1, 2011, pp. 30-38.

Lisboa, 11 de Junho de 2015

Autores

Tiago Barroqueiro
Bolsheiro de investigação

Jorge de Brito
Professor Catedrático

Pedro Silva
Professor Adjunto

Anexo A.1. Materiais constituintes

São apresentados de seguida os materiais seleccionados na produção dos BACED em estudo e respectivas argamassas auto-compactáveis, com incorporação de FC e CV em misturas ternárias:

- cimento Portland CEM I 52,5 R, certificado segundo a NP EN 197-1, da Secil;
- cinzas volantes (CV), de acordo com a NP EN 450-1, da central termoelétrica de Sines;
- fíler calcário (FC), de acordo com a especificação LNEC E 466, da Parapedra;
- superplastificante de elevado desempenho, forte redutor de água para betão, de acordo com a NP EN 934-2, da Sika;
- sílica de fumo (SF), de acordo com a NP EN 13263-1, da Secil;
- Areia fina (0/2) e areia grossa (0/4), de natureza siliciosa, de acordo com a NP EN 12620, da Soarvamil;
- brita 1 ($D_{máx}=11,2$ mm) e brita 2 ($D_{máx}=16$ mm), de acordo com a NP EN 12620, de José Marques Galo, S.A.;
- água potável da rede de abastecimento pública de Lisboa, de acordo com a NP EN 1008.

Anexo A.2. Acerto dos parâmetros V_w/V_p e $S_p/p\%$ das quatro AAC de referência

Tabela A. 1 - Cálculo das quantidades de amassadura para as argamassas com 10% de SF e 400 kg/m³ de cimento

Identificação da argamassa:		100% AN	100% AN	100% AN	100% AN	100% AN	100% AN	100% AN	100% AN	
Parâmetros da composição	V_w/V_s	= 0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	
	V_w/V_p	= 0,88	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88	0,90	0,89	
	$S_p/P\%$	= 0,65	0,70	0,80	0,90	1,00	1,20	1,10	1,05	
	Tipo e classe de cimento:		I 52,5R	I 52,5R	I 52,5R	I 52,5R	I 52,5R	I 52,5R	I 52,5R	I 52,5R
	Mistura de Silica de Fumo (% V_c):		SF	SF	SF	SF	SF	SF	SF	SF
	Mistura de finos:		f_{ad}	= 0,42	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42
	Mistura de adições:		CV	= 0,37	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37
			FC	= 0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
	Mistura de agregados:		Areia q_2	= 0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
			Areia q_4	= 0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75
			AFR	= 0	0	0	0	0	0	0
	Cálculos auxiliares	$V_{(C+CV+FC)}$ [kg/m ³]	= 2843,00	2843,00	2843,00	2843,00	2843,00	2843,00	2843,00	2843,00
$V_{sp/V_{(C+CV+FC)}}$ [m ³ /m ³]		= 0,017271	0,018599	0,021256	0,023913	0,026570	0,031884	0,029227	0,027899	
$V_{(C+CV+FC)}$ [m ³ /m ³]		= 0,317736	0,317602	0,317334	0,317066	0,316800	0,316267	0,314542	0,315667	
$V_{(C)}$ [m ³ /m ³]		= 0,184287	0,184209	0,184054	0,183899	0,183744	0,183435	0,182434	0,183087	
$V_{(SF)}$ [m ³ /m ³]		= 0,018429	0,018421	0,018405	0,018390	0,018374	0,018343	0,018243	0,018309	
V_p [m ³ /m ³]		= 0,336164	0,336022	0,335739	0,335456	0,335174	0,334611	0,332785	0,333975	
V_w [m ³ /m ³]		= 0,279607	0,279499	0,279254	0,279018	0,278784	0,278315	0,283088	0,280943	
V_{sp} [m ³ /m ³]		= 0,005487	0,005907	0,006745	0,007582	0,008417	0,010084	0,009193	0,008807	
Superplast.		V_s [m ³ /m ³]	= 0,378741	0,378581	0,378262	0,377943	0,377625	0,376990	0,374934	0,376275
Agregado fino										
Quantidades teóricas para 1 m ³	Adições	Cimento [kg]	= 589,7	589,5	589,0	588,5	588,0	587,0	583,8	585,9
		CV [kg]	= 270,4	270,3	270,1	269,8	269,6	269,1	267,7	268,6
		FC [kg]	= 43,2	43,2	43,2	43,1	43,1	43,0	42,8	42,9
		SF [kg]	= 37,0	37,0	37,0	37,0	36,9	36,9	36,7	36,8
		S_p [Litros]	= 5,5	5,9	6,7	7,6	8,4	10,1	9,2	8,8
		S_p [kg]	= 5,9	6,3	7,2	8,1	9,0	10,8	9,8	9,4
		Água [Litros]	= 279,6	279,5	279,3	279,0	278,8	278,3	283,1	280,9
		Areia q_2 [kg]	= 246,2	246,1	245,9	245,7	245,5	245,0	243,7	244,6
		Areia q_4 [kg]	= 735,7	735,4	734,8	734,2	733,5	732,3	728,3	730,9
		AFR [kg]	= 0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	W/C	= 0,474	0,474	0,474	0,474	0,474	0,474	0,485	0,480	
	W/MC	= 0,312	0,312	0,312	0,312	0,312	0,312	0,319	0,315	
	W/F	= 0,297	0,297	0,297	0,297	0,297	0,297	0,304	0,301	
	Massa Total [kg]	= 2207,7	2207,2	2206,3	2205,3	2204,4	2202,5	2195,9	2200,1	
	Correção das quantidades de água e agregado	Humidade [l/m ³]	= 0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
Água de absorção AN [l/m ³]		= 3,9	3,9	3,9	3,9	3,9	3,9	3,9	3,9	
Água de absorção AR [l/m ³]		= 0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
Água total [l/m ³]		= 283,5	283,4	283,2	282,9	282,7	282,2	287,0	284,8	
Água de amassadura [l/m ³]		= 283,2	283,1	282,9	282,6	282,4	281,9	286,7	284,6	
Areia q_2 [kg]		= 245,3	245,2	245,0	244,8	244,6	244,2	242,9	243,7	
Areia q_4 [kg]		= 732,9	732,6	732,0	731,4	730,7	729,5	728,1	729,6	
AFR [kg]	= 0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0		
Quantidades corrigidas para:	1,50 [Litros]	Cimento [g]	= 884,6	884,2	883,5	882,7	882,0	880,5	875,7	878,8
	Adição	CV [g]	= 405,6	405,4	405,1	404,7	404,4	403,7	401,5	402,9
	FC [g]	= 64,8	64,8	64,7	64,7	64,6	64,5	64,2	64,4	
	SF [g]	= 55,6	55,5	55,5	55,4	55,4	55,3	55,0	55,2	
	S_p [g]	= 8,8	9,5	10,8	12,2	13,5	16,2	14,8	14,1	
	Água [g]	= 424,9	424,7	424,3	424,0	423,6	422,9	430,0	426,8	
	10% [g]	= 42,5	42,5	42,4	42,4	42,4	42,3	43,0	42,7	
	65% [g]	= 276,2	276,0	275,8	275,6	275,3	274,9	279,5	277,4	
	25% [g]	= 106,2	106,2	106,1	106,0	105,9	105,7	107,5	106,7	
	Areia q_2 [g]	= 368,0	367,9	367,6	367,2	366,9	366,3	364,3	365,6	
	Areia q_4 [g]	= 1099,4	1098,9	1098,0	1097,0	1096,1	1094,3	1088,3	1092,2	
AFR [g]	= 0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0		
Estudo reológico da argamassa:	Leituras:	d_1 [mm]	= 133	174	185	234	240	284	268	255
		d_2 [mm]	= 135	171	185	232	240	283	268	260
	t [seg.]	= 22,0	12,5	12,1	9,2	10,1	9,1	7,0	7,6	
	Parâmetros reológicos:	G_m $5,3 \pm 5,9$	= 1,0	2,3	2,8	5,0	5,4	7,9	7,0	6,3
R_m $1,14 \pm 1,3$		= 0,5	0,8	0,8	1,1	1,0	1,1	1,4	1,3	

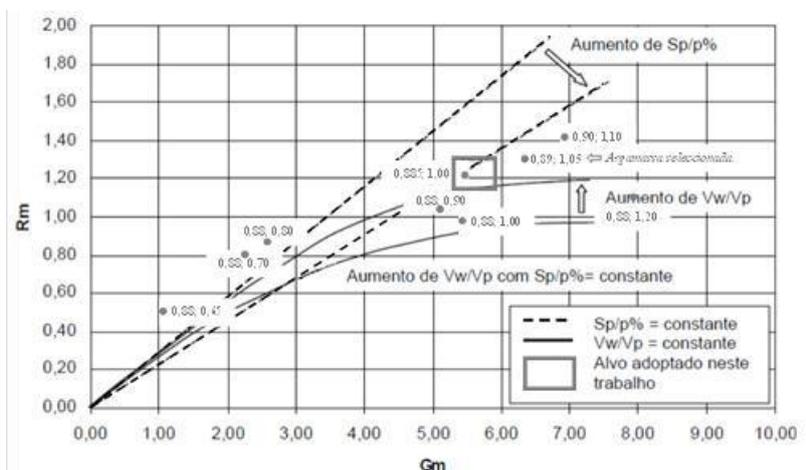


Figura A. 1 - Representação gráfica dos valores de G_m e R_m para cada iteração de valores (V_w/V_p ; $S_p/p\%$), para as argamassas com 10% de SF e 400 kg/m³ de cimento

Tabela A. 2 - Cálculo das quantidades de amassadura para as argamassas com 10% de SF e 450 kg/m³ de cimento

Identificação da argamassa:		100% AN	100% AN	100% AN	100% AN	100% AN		
Parâmetros da composição	V_p/V_s	= 0,80	0,80	0,80	0,80	0,80		
	V_w/V_p	= 0,89	0,90	0,95	0,92	0,92		
	$S_p/P\%$	= 1,05	1,20	1,25	1,22	1,24		
	Tipo e classe de cimento:	= I 52,5R	I 52,5R	I 52,5R	I 52,5R	I 52,5R		
	Mistura de Silica de Fumo (% V_C):	= SF	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	
	Mistura de finos:	f_{ad}	= 0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	
	Mistura de adições:	CV	= 0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	
		FC	= 0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	
	Mistura de agregados:	Areia ϕ_{02}	= 0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	
		Areia ϕ_{04}	= 0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	
	AFR	= 0	0	0	0	0		
Cálculos auxiliares	$V_{(C+CV+FC)}$ [kg/m ³]	= 2906,00	2906,00	2906,00	2906,00	2906,00		
	SIKAPLAST 898	$V_{w/(C+CV+FC)}$ [m ³ /m ³]	= 0,028517	0,032591	0,033949	0,033134	0,033677	
	Material fino (C+CV+FC)	$V_{p/(C+CV+FC)}$ [m ³ /m ³]	= 0,315605	0,314209	0,309220	0,312194	0,312141	
	Material fino (C)	$V_{p(C)}$ [m ³ /m ³]	= 0,205143	0,204236	0,200993	0,202926	0,202892	
	Material fino (SF)	$V_{p(SF)}$ [m ³ /m ³]	= 0,020514	0,020424	0,020099	0,020293	0,020289	
	Material fino (Total)	V_p [m ³ /m ³]	= 0,336119	0,334633	0,329319	0,332487	0,332431	
	Água	V_w [m ³ /m ³]	= 0,280889	0,282788	0,293759	0,287219	0,287170	
	Superplast.	V_{sp} [m ³ /m ³]	= 0,009000	0,010240	0,010498	0,010344	0,010512	
	Agregado fino	V_s [m ³ /m ³]	= 0,373992	0,372338	0,366425	0,369950	0,369887	
	Quantidades teóricas para 1 m ³	Cimento	[kg]	= 656,5	653,6	643,2	649,4	649,3
CV		[kg]	= 217,8	216,8	213,4	215,4	215,4	
FC		[kg]	= 42,9	42,7	42,1	42,5	42,5	
SF		[kg]	= 41,2	41,1	40,4	40,8	40,8	
S_p		[Litros]	= 9,0	10,2	10,5	10,3	10,5	
S_p		[kg]	= 9,6	11,0	11,2	11,1	11,2	
Água		[Litros]	= 280,9	282,8	293,8	287,2	287,2	
Areia ϕ_{02}		[kg]	= 243,1	242,0	238,2	240,5	240,4	
Areia ϕ_{04}		[kg]	= 726,5	723,3	711,8	718,6	718,5	
AFR		[kg]	= 0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
W/C		= 0,428	0,433	0,457	0,442	0,442		
W/MC		= 0,307	0,310	0,328	0,317	0,317		
W/F		= 0,293	0,296	0,313	0,303	0,303		
Massa Total		[kg]	= 2218,5	2213,2	2193,9	2205,4	2205,2	
Correção das quantidades de água e agregado		Humidade	[l/m ³]	= 0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
	Água de absorção AN	[l/m ³]	= 3,9	3,9	3,8	3,8	3,8	
	Água de absorção AR	[l/m ³]	= 0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
	Água total	[l/m ³]	= 284,8	286,6	297,6	291,1	291,0	
	Água de amassadura	[l/m ³]	= 284,5	286,4	297,3	290,8	290,7	
	Areia ϕ_{02}	[kg]	= 242,3	241,2	237,4	239,7	239,6	
	Areia ϕ_{04}	[kg]	= 723,7	720,5	709,1	715,9	715,8	
AFR	[kg]	= 0,0	0,0	0,0	0,0	0,0		
Quantidades corrigidas para: 1,50 [Litros]	Adição	Cimento	[g]	= 984,7	980,3	964,8	974,0	973,9
		CV	[g]	= 326,7	325,2	320,0	323,1	323,1
		FC	[g]	= 64,4	64,1	63,1	63,7	63,7
		SF	[g]	= 61,9	61,6	60,6	61,2	61,2
		S_p	[g]	= 14,4	16,4	16,8	16,6	16,9
		Água	[g]	= 426,7	429,5	445,9	436,2	436,1
		10%	[g]	= 42,7	43,0	44,6	43,6	43,6
		65%	[g]	= 277,4	279,2	289,8	283,5	283,4
		25%	[g]	= 106,7	107,4	111,5	109,0	109,0
		Areia ϕ_{02}	[g]	= 363,4	361,8	356,0	359,5	359,4
		Areia ϕ_{04}	[g]	= 1085,6	1080,8	1063,6	1073,8	1073,7
		AFR	[g]	= 0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Estudo reológico da argamassa:	Leituras:	d_1 [mm]	= 225	225	277	240	255	
		d_2 [mm]	= 225	228	280	240	250	
		t [seg.]	= 11,5	8,6	5,9	7,9	7,2	
	Parâmetros reológicos:	G_m $5,3 \times 5,9$	= 4,6	4,7	7,6	5,4	6,1	
	R_m $1,14 \times 1,3$	= 0,9	1,2	1,7	1,3	1,4		

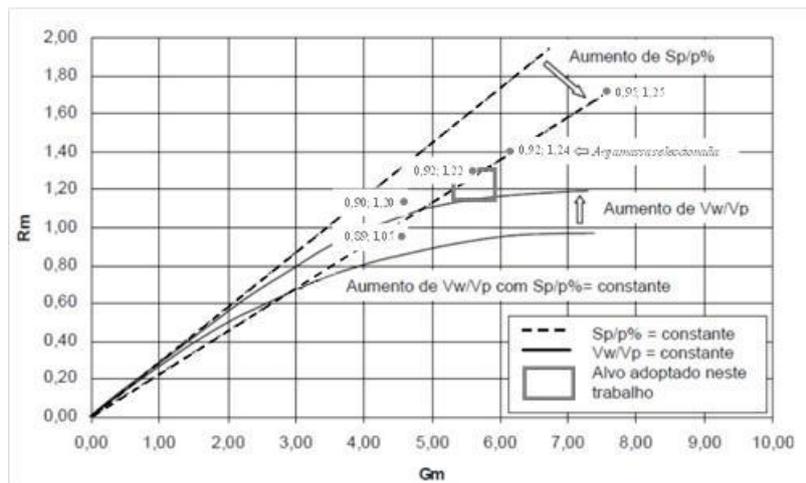


Figura A. 2 - Representação gráfica dos valores de G_m e R_m para cada iteração de valores (V_w/V_p ; $S_p/p\%$), para as argamassas com 10% de SF e 450 kg/m³ de cimento

Tabela A. 3 - Cálculo das quantidades de amassadura para as argamassas com 15% de SF e 400 kg/m³ de cimento

Identificação da argamassa:		100% AN	100% AN
Parâmetros da composição	V_p/V_s	= 0,80	0,80
	V_w/V_p	= 0,91	0,92
	$S_p/P\%$	= 1,23	1,24
	Tipo e classe de cimento:	= I 52,5R	I 52,5R
	Mistura de Silica de Fumo (% V_c):	SF = 0,15	0,15
	Mistura de finos:	f_{ad} = 0,35	0,35
	Mistura de adições:	CV = 0,30	0,30
		FC = 0,05	0,05
	Mistura de agregados:	Areia ₀₂ = 0,25	0,25
		Areia ₀₄ = 0,75	0,75
	AFR = 0	0	
Cálculos auxiliares	$V_{(C+CV+FC)}$ [kg/m ³]	= 2906,00	2906,00
	SIKAPLAST 898 $V_{sp}/V_{(C+CV+FC)}$ [m ³ /m ³]	= 0,033405	0,033677
	Material fino (C+CV+FC) $V_{p(C+CV+FC)}$ [m ³ /m ³]	= 0,313145	0,312141
	Material fino (C) $V_{p(C)}$ [m ³ /m ³]	= 0,203544	0,202892
	Material fino (SF) $V_{p(SF)}$ [m ³ /m ³]	= 0,030532	0,030434
	Material fino (Total) V_p [m ³ /m ³]	= 0,343677	0,342575
	Água V_w [m ³ /m ³]	= 0,284962	0,287170
	Superplast. V_{sp} [m ³ /m ³]	= 0,010461	0,010512
	Agregado fino V_s [m ³ /m ³]	= 0,360900	0,359743
	Quantidades teóricas para 1 m ³	Cimento [kg]	= 651,3
CV [kg]		= 216,1	215,4
FC [kg]		= 42,6	42,5
SF [kg]		= 61,4	61,2
S_p [Litros]		= 10,5	10,5
S_p [kg]		= 11,2	11,2
Água [Litros]		= 285,0	287,2
Areia ₀₂ [kg]		= 234,6	233,8
Areia ₀₄ [kg]		= 701,0	698,8
AFR [kg]		= 0,0	0,0
W/C	= 0,438	0,442	
W/MC	= 0,307	0,310	
W/F	= 0,293	0,297	
Massa Total [kg]	= 2203,2	2199,3	
Correcção das quantidades de água e agregado	Humidade [l/m ³]	= 0,3	0,3
	Água de absorção AN [l/m ³]	= 3,7	3,7
	Água de absorção AR [l/m ³]	= 0,0	0,0
	Água total [l/m ³]	= 288,7	290,9
	Água de amassadura [l/m ³]	= 288,4	290,6
	Areia ₀₂ [kg]	= 233,8	233,0
Areia ₀₄ [kg]	= 698,4	696,1	
AFR [kg]	= 0,0	0,0	
Quantidades corrigidas para: 1,50 [Litros]	Adição Cimento [g]	= 977,0	973,9
	CV [g]	= 324,1	323,1
	FC [g]	= 63,9	63,7
	SF [g]	= 92,1	91,8
	S_p [g]	= 16,8	16,9
	Água [g]	= 432,6	435,9
	10% [g]	= 43,3	43,6
	65% [g]	= 281,2	283,4
	25% [g]	= 108,2	109,0
	Areia ₀₂ [g]	= 350,7	349,6
Areia ₀₄ [g]	= 1047,6	1044,2	
AFR [g]	= 0,0	0,0	
Estudo reológico da argamassa:	Leituras:	d_1 [mm] = 264	235
		d_2 [mm] = 264	240
		t [seg.] = 7,1	11,3
Parâmetros reológicos:	G_m 5,3 a 5,9	= 6,7	5,3
	R_m 1,14 a 1,3	= 1,4	0,9

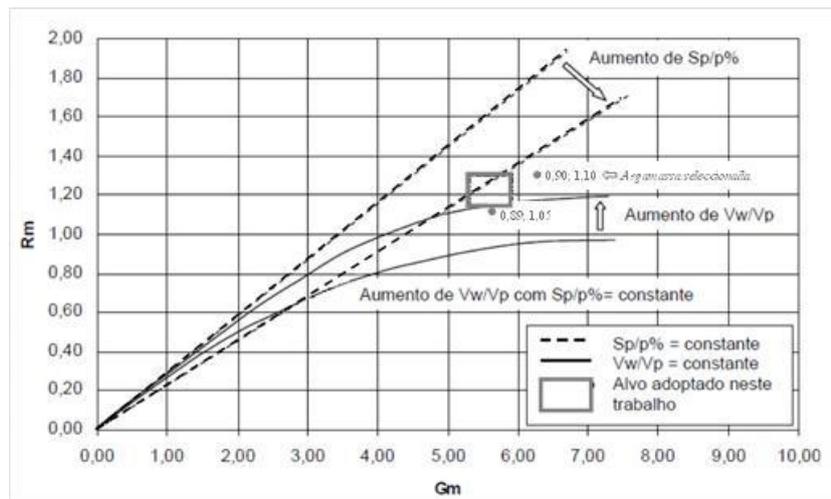


Figura A. 3 - Representação gráfica dos valores de G_m e R_m para cada iteração de valores (V_w/V_p ; $S_p/p\%$), para as argamassas com 15% de SF e 400 kg/m³ de cimento

Tabela A. 4 - Cálculo das quantidades de amassadura para as argamassas com 15% de SF e 450 kg/m³ de cimento

		Identificação da argamassa:		
		100% AN	100% AN	
ESTUDO DE COMPOSIÇÃO DE ARGAMASSAS	Cálculos auxiliares	V_p/V_s	= 0,80	0,80
		V_w/V_p	= 0,91	0,92
		$S_p/p\%$	= 1,23	1,24
		Tipo e classe de cimento:	= I 52,5R	I 52,5R
		Mistura de Silica de Fumo (% V_c):	SF = 0,15	0,15
		Mistura de finos:	f_{ad} = 0,35	0,35
		Mistura de adições:	CV = 0,30	0,30
			FC = 0,05	0,05
		Mistura de agregados:	Areia ₀₂ = 0,25	0,25
			Areia ₀₄ = 0,75	0,75
	AFR = 0	0		
Cálculos auxiliares	Cálculos auxiliares	$V_{(C+CV+FC)}$ [kg/m ³]	= 2906,00	2906,00
		SIKAPLAST 898 $V_{sp}/V_{(C+CV+FC)}$ [m ³ /m ³]	= 0,033405	0,033677
		Material fino (C+CV+FC) $V_{p(C+CV+FC)}$ [m ³ /m ³]	= 0,313145	0,312141
		Material fino (C) $V_{p(C)}$ [m ³ /m ³]	= 0,203544	0,202892
		Material fino (SF) $V_{p(SF)}$ [m ³ /m ³]	= 0,030532	0,030434
		Material fino (Total) V_p [m ³ /m ³]	= 0,343677	0,342575
		Água V_w [m ³ /m ³]	= 0,284962	0,287170
		Superplast. V_{sp} [m ³ /m ³]	= 0,010461	0,010512
		Agregado fino V_s [m ³ /m ³]	= 0,360900	0,359743
		Quantidades teóricas para 1 m ³	Adições	Cimento [kg]
CV [kg]	= 216,1			215,4
FC [kg]	= 42,6			42,5
SF [kg]	= 61,4			61,2
S_p [Litros]	= 10,5			10,5
S_p [kg]	= 11,2			11,2
Água [Litros]	= 285,0			287,2
Areia ₀₂ [kg]	= 234,6			233,8
Areia ₀₄ [kg]	= 701,0			698,8
AFR [kg]	= 0,0			0,0
Correcção das quantidades de água e agregado	Correcção das quantidades de água e agregado	W/C	= 0,438	0,442
		W/MC	= 0,307	0,310
		W/F	= 0,293	0,297
Quantidades corrigidas para: 1,50 [Litros]	Adição	Massa Total [kg]	= 2203,2	2199,3
		Humidade [l/m ³]	= 0,3	0,3
		Água de absorção AN [l/m ³]	= 3,7	3,7
		Água de absorção AR [l/m ³]	= 0,0	0,0
		Água total [l/m ³]	= 288,7	290,9
		Água de amassadura [l/m ³]	= 288,4	290,6
		Areia ₀₂ [kg]	= 233,8	233,0
		Areia ₀₄ [kg]	= 698,4	696,1
		AFR [kg]	= 0,0	0,0
		Cimento [g]	= 977,0	973,9
CV [g]	= 324,1	323,1		
FC [g]	= 63,9	63,7		
SF [g]	= 92,1	91,8		
S_p [g]	= 16,8	16,9		
Água [g]	= 432,6	435,9		
10% [g]	= 43,3	43,6		
65% [g]	= 281,2	283,4		
25% [g]	= 108,2	109,0		
Areia ₀₂ [g]	= 350,7	349,6		
Areia ₀₄ [g]	= 1047,6	1044,2		
AFR [g]	= 0,0	0,0		
Estudo reológico da argamassa:	Leituras:	d_1 [mm]	= 264	235
		d_2 [mm]	= 264	240
		t [seg.]	= 7,1	11,3
Parâmetros reológicos:	Parâmetros reológicos:	G_m 5,3 a 5,9	= 6,7	5,3
		R_m 1,14 a 1,3	= 1,4	0,9

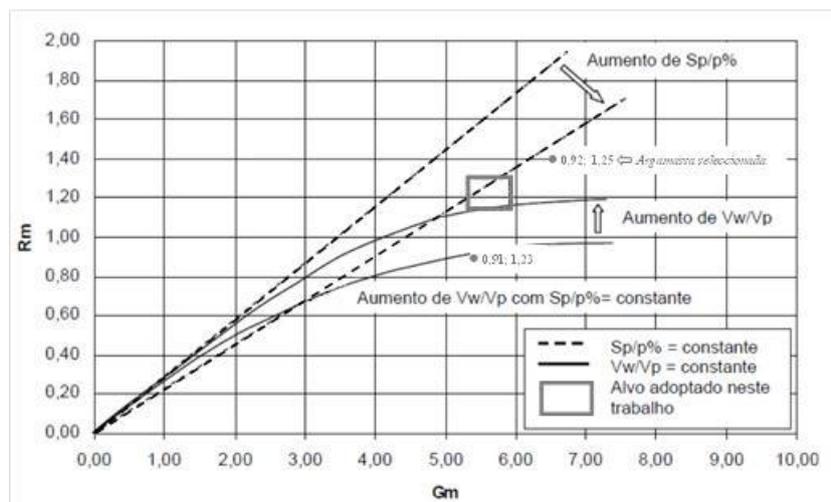


Figura A. 4 - Representação gráfica dos valores de G_m e R_m para cada iteração de valores (V_w/V_p ; $S_p/p\%$), para as argamassas com 15% de SF e 450 kg/m³ de cimento

Anexo A.3. Formulação das quatro misturas de BAC de referência

Tabela A.5 - Cálculo das quantidades de amassadura

Identificação do betão:		100% NA (10% de SF e 400 kg/m³ de cimento)	100% NA (10% de SF e 450 kg/m³ de cimento)	100% NA (15% de SF e 400 kg/m³ de cimento)	100% NA (15% de SF e 450 kg/m³ de cimento)		
ESTUDO DE COMPOSIÇÃO DE BETÕES	Parâmetros da composição	$D_{máx}$ [mm] =	16	16	16	16	
		MN =	1,82	1,82	1,82	1,82	
		V_m/V_g	2,275	2,275	2,275	2,275	
		V_v [m³] =	0,030	0,030	0,030	0,030	
		Mistura de agregados:					
		Brita 1 =	0,50	0,50	0,50	0,50	
		Brita 2 =	0,50	0,50	0,50	0,50	
		AGR =	0	0	0	0	
		Cálculos auxiliares	$V_{(C+CV+FC)}$ [kg/m³] =	2843,00	2906,00	2843,00	2906,00
			SIKAPLAST 898 $V_{sp}/V_{p(C+CV+FC)}$ [m³/m³] =	0,027899	0,033677	0,029227	0,033677
Agregado grosso V_g [m³/m³] =	0,296183		0,296183	0,296183	0,296183		
Argamassa V_m [m³/m³] =	0,673817		0,673817	0,673817	0,673817		
Material fino (C+CV+FC) $V_{p(C+CV+FC)}$ [m³/m³] =	0,212702		0,210326	0,211944	0,210326		
Material fino (C) $V_{p(C)}$ [m³/m³] =	0,123367		0,136712	0,122927	0,136712		
Material fino (SF) $V_{p(SF)}$ [m³/m³] =	0,012337		0,013671	0,018439	0,020507		
Material fino (Total) V_p [m³/m³] =	0,225038		0,223997	0,230383	0,230833		
Água V_w [m³/m³] =	0,189304		0,193500	0,190749	0,193500		
Superplast. V_{sp} [m³/m³] =	0,005934		0,007083	0,006194	0,007083		
Agregado fino V_s [m³/m³] =	0,253540		0,249236	0,246490	0,242401		
V_u/V_m [m³/m³] =	0,376275		0,369887	0,365812	0,359743		
Quantidades teóricas para 1 m³	Adição		Cimento [kg] =	394,77	437,48	393,37	437,48
			CV [kg] =	181,01	145,12	180,36	145,12
			FC [kg] =	28,93	28,60	28,82	28,60
		SF [kg] =	24,80	27,48	37,06	41,22	
		S_p [Litros] =	5,93	7,08	6,19	7,08	
		S_p [kg] =	6,35	7,58	6,63	7,58	
		Água [Litros] =	189,30	193,50	190,75	193,50	
		Areia 0/2 [kg] =	164,80	162,00	160,22	157,56	
		Areia 0/4 [kg] =	492,50	484,14	478,81	470,86	
		AFR [kg] =	0	0	0	0	
	Agregados Finos V_{total} [kg] =	657,30	646,15	639,03	628,42		
	Volume Real	Brita 1 [kg] =	389,48	389,48	389,48	389,48	
		Brita 2 [kg] =	398,37	398,37	398,37	398,37	
		AGR [kg] =	0	0	0	0	
		Cimento [m³] =	0,123	0,137	0,123	0,137	
		CV [m³] =	0,079	0,063	0,078	0,063	
		FC [m³] =	0,011	0,011	0,011	0,011	
		SF [m³] =	0,012	0,014	0,018	0,021	
		S_p [m³] =	0,006	0,007	0,006	0,007	
		Água [m³] =	0,189	0,193	0,191	0,193	
		Areia 0/2 [m³] =	0,063	0,062	0,062	0,061	
	Areia 0/4 [m³] =	0,190	0,187	0,185	0,182		
	AFR [m³] =	0	0	0	0		
	Brita 1 [m³] =	0,148	0,148	0,148	0,148		
	Brita 2 [m³] =	0,148	0,148	0,148	0,148		
AGR [m³] =	0	0	0	0			
Total =	1	1	1	1			
W/C =	0,480	0,442	0,485	0,442			
W/C máx =	0,500	0,462	0,505	0,462			
W/C mín =	0,460	0,422	0,465	0,422			
W/MC =	0,315	0,317	0,312	0,310			
W/F =	0,301	0,303	0,298	0,297			
% de argamassa seca	As% =	62,03%	61,99%	61,88%	61,92%		
Massa Total [kg] =	2245,51	2246,28	2226,81	2228,56			
Correcção das quantidades de água e agregado	Humidade [l/m³] =	0,43	0,43	0,43	0,43		
	Água de absorção naturais [l/m³] =	11,77	11,73	11,70	11,66		
	Água de absorção ARF [l/m³] =	0	0	0	0		
	Água de absorção ARG [l/m³] =	0	0	0	0		
	Água total [l/m³] =	201,08	205,23	202,45	205,16		
	Água de amassadura [l/m³] =	200,64	204,80	202,02	204,73		
	Areia 0/2 [kg] =	164,24	161,45	159,67	157,02		
	Areia 0/4 [kg] =	490,63	482,30	476,99	469,07		
	ARF [kg] =	0	0	0	0		
	Brita 1 [kg] =	383,56	383,56	383,56	383,56		
Brita 2 [kg] =	395,38	395,38	395,38	395,38			
ARG [kg] =	0	0	0	0			
Quantidades para:	35 [Litros]	Adições	Cimento [kg] =	13,8	15,3	13,8	15,3
			CV [kg] =	6,3	5,1	6,3	5,1
			FC [kg] =	1,0	1,0	1,0	1,0
			SF [kg] =	0,9	1,0	1,3	1,4
			S_p [Litros] =	0,2	0,2	0,2	0,2
	S_p [g] =	222,2	265,3	232,0	265,3		
	Água	Total [Litros] =	7,0	7,2	7,1	7,2	
		10% [Litros] =	0,7	0,7	0,7	0,7	
		65% [Litros] =	4,6	4,7	4,6	4,7	
		65% _{cr,mín} [Litros] =	4,3	4,4	4,3	4,4	
		25% [Litros] =	1,8	1,8	1,8	1,8	
	Total Máx [Litros] =	7,3	7,5	7,3	7,5		
	Total Mín [Litros] =	6,7	6,9	6,8	6,9		
	Var (±) [Litros] =	0,3	0,3	0,3	0,3		
				Areia 0/2 [kg] =	5,7	5,7	5,6
Areia 0/4 [kg] =				17,2	16,9	16,7	16,4
ARF [kg] =				0,0	0,0	0,0	0,0
Brita 1 [kg] =				13,4	13,4	13,4	13,4
Brita 2 [kg] =				13,8	13,8	13,8	13,8
ARG [kg] =	0,0	0,0	0,0	0,0			

Tabela A. 6 - Quantidades totais de todos os materiais necessários

Material	Quantidades	Quantidades majoradas (x1,5)
Cimento (g)	58	87
Cinzas volantes (g)	23	34
Fíler calcário (g)	4	6
Sílica de fumo	5	7
Areia 0/2 (g)	22	34
Areia 0/4 (g)	55	83
Superplastificante (g)	985	1477
Água (l)	28	43

Anexo A.4. Formulação das AAC com AR

A.4.1. Composição das argamassas

Para a obtenção de uma estimativa da quantidade de materiais necessários para a realização de toda a campanha experimental, utilizou-se o método de Nepomuceno.

Para além dos parâmetros tomados como hipótese (V_p/V_s , V_w/V_p e $S_p/p\%$), foi necessário, com os elementos já disponíveis, determinar os seguintes valores:

- δ_p é a média da massa volúmica do cimento com as adições, em kg/m^3 ;

- δ_{sp} é a massa volúmica do adjuvante, em kg/m^3 ;

$$- \frac{V_{sp}}{V_p} = \left(\frac{S_p}{p\%} \right) \times \frac{1}{100} \times \frac{\delta_p}{\delta_{sp}};$$

- V_p é o volume absoluto dos materiais finos (cimento e adições), em m^3/m^3 , dado por:

$$V_p = \frac{1}{1 + \left(\frac{V_w}{V_p} \right) + \frac{1}{\left(\frac{V_p}{V_s} \right)} + \left(\frac{V_{sp}}{V_p} \right)};$$

- V_w é o volume de água, em m^3/m^3 , dado por: $V_w = \frac{V_w}{V_p} \times V_p$;

- V_{sp} é o volume de superplastificante, em m^3/m^3 , dado por: $V_{sp} = \frac{V_{sp}}{V_p} \times V_p$;

- V_s é o volume absoluto dos agregados finos, em m^3/m^3 , dado por: $V_s = \frac{V_p}{\left(\frac{V_p}{V_s} \right)}$.

Sabendo as massas volúmicas de todos os constituintes, calculando os seus volumes absolutos e, no caso dos materiais finos, definindo as suas percentagens unitárias, obtém-se então todas as quantidades por unidade de volume. Apresenta-se na **Tabela A. 7** o cálculo das quantidades para as argamassas.

Para a realização dos ensaios das argamassas no estado fresco e para o enchimento de um molde de três provetes prismáticos, as amassaduras deverão ser de 1,60 litros.

Finalmente, somando as quantidades de todos os constituintes para as quatro amassaduras, obtém-se as quantidades totais necessárias para a fase de argamassas. Estas quantidades são afectadas de um coeficiente de majoração, de modo a cobrir possíveis repetições das amassaduras devido a erros ou necessidade de ajustar os parâmetros de cálculo (**Tabela A. 8**).

Tabela A. 7 - Cálculo das quantidades de amassadura para as argamassas com AR

Identificação da argamassa:		100% AN	25% AR	50% AR	100% AR	
Parâmetros da composição	V_p/V_s	= 0,80	0,80	0,80	0,80	
	V_w/V_p	= 0,92	0,92	0,92	0,92	
	$S_p/P\%$	= 1,24	1,24	1,24	1,24	
	Tipo e classe de cimento:	= I 52,5R	I 52,5R	I 52,5R	I 52,5R	
	Mistura de Silica de Fumo (% V_c):	SF = 0,10	0,10	0,10	0,10	
	Mistura de finos:	f_{Ad} = 0,35	0,35	0,35	0,35	
	Mistura de adições:	CV = 0,30	0,30	0,30	0,30	
		FC = 0,05	0,05	0,05	0,05	
	Mistura de agregados:	Areia _{0/2} = 0,25	0,1875	0,125	0	
		Areia _{0/4} = 0,75	0,5625	0,375	0	
	AFR = 0	0,25	0,50	1		
Cálculos auxiliares	$V_{p(C+CV+FC)}$ [kg/m ³]	= 2906,00	2906,00	2906,00	2906,00	
	SIKAPLAST 898 $V_{sp}V_{p(C+CV+FC)}$ [m ³ /m ³]	= 0,033677	0,033677	0,033677	0,033677	
	Material fino (C+CV+FC) $V_{p(C+CV+FC)}$ [m ³ /m ³]	= 0,312141	0,312141	0,312141	0,312141	
	Material fino (C) $V_{p(C)}$ [m ³ /m ³]	= 0,202892	0,202892	0,202892	0,202892	
	Material fino (SF) $V_{p(SF)}$ [m ³ /m ³]	= 0,020289	0,020289	0,020289	0,020289	
	Material fino (Total) V_p [m ³ /m ³]	= 0,332431	0,332431	0,332431	0,332431	
	Água V_w [m ³ /m ³]	= 0,287170	0,287170	0,287170	0,287170	
	Superplast. V_{sp} [m ³ /m ³]	= 0,010512	0,010512	0,010512	0,010512	
	Agregado fino V_s [m ³ /m ³]	= 0,369887	0,369887	0,369887	0,369887	
Quantidades teóricas para 1 m ³	Adições	Cimento [kg]	= 649,3	649,3	649,3	649,3
		CV [kg]	= 215,4	215,4	215,4	215,4
		FC [kg]	= 42,5	42,5	42,5	42,5
		SF [kg]	= 40,8	40,8	40,8	40,8
		S_p [Litros]	= 10,5	10,5	10,5	10,5
		S_p [kg]	= 11,2	11,2	11,2	11,2
		Água [Litros]	= 287,2	287,2	287,2	287,2
		Areia _{0/2} [kg]	= 240,4	180,3	120,2	0,0
		Areia _{0/4} [kg]	= 718,5	538,9	359,3	0,0
		AFR [kg]	= 0,0	215,5	430,9	861,8
	W/C	= 0,442	0,442	0,442	0,442	
	W/MC	= 0,317	0,317	0,317	0,317	
	W/F	= 0,303	0,303	0,303	0,303	
	Massa Total [kg]	= 2205,2	2180,9	2156,7	2108,1	
Correcção das quantidades de água e agregado	Humidade [l/m ³]	= 0,3	4,1	7,8	15,3	
	Água de absorção AN [l/m ³]	= 3,8	2,9	1,9	0,0	
	Água de absorção AR [l/m ³]	= 0,0	16,1	32,3	64,6	
	Água total [l/m ³]	= 291,0	306,2	321,4	351,7	
	Água de amassadura [l/m ³]	= 290,7	302,1	313,5	336,4	
	Areia _{0/2} [kg]	= 239,6	179,7	119,8	0,0	
	Areia _{0/4} [kg]	= 715,8	536,8	357,9	0,0	
	AFR [kg]	= 0,0	203,2	406,3	812,6	
Quantidades corrigidas para:	1,50 [Litros]					
	Adição	Cimento [g]	= 973,9	973,9	973,9	973,9
		CV [g]	= 323,1	323,1	323,1	323,1
		FC [g]	= 63,7	63,7	63,7	63,7
		SF [g]	= 61,2	61,2	61,2	61,2
		S_p [g]	= 16,9	16,9	16,9	16,9
		Água [g]	= 436,1	453,2	470,3	504,6
		10% [g]	= 43,6	45,3	47,0	50,5
		65% [g]	= 283,4	294,6	305,7	328,0
		25% [g]	= 109,0	113,3	117,6	126,1
		Areia _{0/2} [g]	= 359,4	269,6	179,7	0,0
		Areia _{0/4} [g]	= 1073,7	805,2	536,8	0,0
		AFR [g]	= 0,0	304,7	609,5	1218,9

Tabela A. 8 - Quantidades totais de todos os materiais necessários para a 2ª fase (produção de argamassas)

Material	Quantidades	Quantidades majoradas (x1,8)
Cimento (g)	3896	7013
Cinzas volantes (g)	1292	2326
Filer calcário (g)	255	459
Sílica de fumo	245	441
Areia 0/2 (g)	809	1456
Areia 0/4 (g)	2416	4349
Agregado reciclado	1468	2642
Superplastificante (g)	66	120
Água (g)	1796	3233

A.4.2. Quantidade de agregado reciclado por fracção granulométrica

A substituição de agregado natural por agregado reciclado foi feita em massa por fracção granulométrica, sendo que o objectivo é reconstituir a curva granulométrica da mistura de areias. Considera-se que a mistura é sempre feita na mesma proporção, ou seja, 20% de areia fina e 80% de areia grossa (obtendo-se assim um módulo de finura de 3).

É ainda feita uma comparação da curva real da mistura de areias com a curva de referência obtida por Nepomuceno no seu trabalho, com o objectivo de verificar se não existem desvios significativos. O cálculo das curvas granulométricas é apresentado na **Tabela A. 9**, ilustrando-se na **Figura A. 5** a proximidade entre as mesmas.

As quantidades de AR por fracção granulométrica, para cada amassadura, são obtidas efectuando-se para a curva da mistura o processo inverso ao utilizado para a obtenção das curvas granulométricas. Assim, partindo das percentagens de material acumulado passado, fornecidas pela curva de referência de Nepomuceno, calcula-se as percentagens de material retido acumulado e, finalmente, as percentagens de material retido em cada peneiro. Multiplicando estas percentagens pela quantidade total de AR necessário para cada amassadura, obtém-se a quantidade de AR necessário por fracção granulométrica.

À água de amassadura prevista pelo método, foi necessário somar a água de absorção dos agregados reciclados, que é bastante superior à dos agregados naturais. Este valor foi obtido através do ensaio de absorção de água ao longo do tempo, tendo-se considerado para efeitos de cálculo o valor da absorção aos 10 minutos, por ser este o tempo médio de duração de uma amassadura.

Tabela A. 9 - Curva granulométrica da mistura de areias e curva de referência

PENEIROS		AREIA 0/2	AREIA 0/4	MISTURA DE AGREGADO			
SÉRIE	ABERT. [mm]	% Passado acumulado	% Passado acumulado	AREIA 0/2	AREIA 0/4	CURVA REAL	CURVA DE REFERÊNCIA
				0,25	0,75		
Base	63	100,00%	100,00%	25,00%	75,00%	100,00%	100,00%
1	45	100,00%	100,00%	25,00%	75,00%	100,00%	100,00%
Base	31,5	100,00%	100,00%	25,00%	75,00%	100,00%	100,00%
1	22,4	100,00%	100,00%	25,00%	75,00%	100,00%	100,00%
Base	16	100,00%	100,00%	25,00%	75,00%	100,00%	100,00%
1	11,2	100,00%	100,00%	25,00%	75,00%	100,00%	100,00%
Base	8	100,00%	100,00%	25,00%	75,00%	100,00%	100,00%
1	5,6	100,00%	99,49%	25,00%	74,62%	99,62%	100,00%
Base	4	99,96%	98,21%	24,99%	73,65%	98,64%	99,96%
Base	2	99,95%	89,14%	24,99%	66,85%	91,84%	99,12%
Base	1	99,41%	59,37%	24,85%	44,53%	69,38%	90,81%
Base	0,5	80,69%	21,49%	20,17%	16,12%	36,29%	62,30%
Base	0,25	16,05%	3,54%	4,01%	2,65%	6,67%	21,05%
Base	0,125	0,31%	0,34%	0,08%	0,26%	0,33%	4,72%
Base	0,063	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,85%

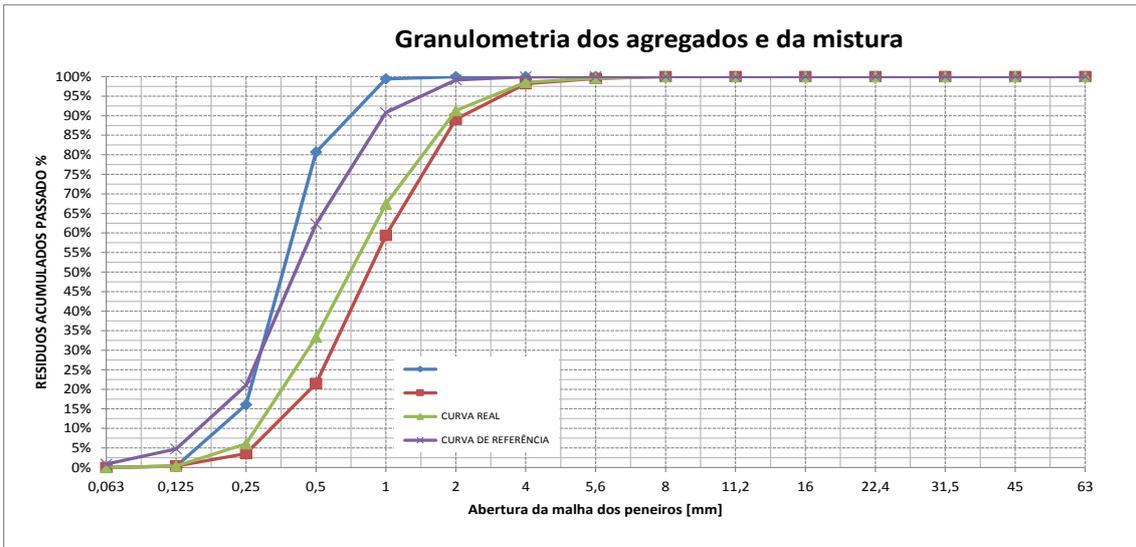


Figura A. 5 - Curva granulométrica da mistura de areias e curva de referência