



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 4

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

PLANEAMENTO DA PRODUÇÃO, ENSAIOS E APRESENTAÇÃO DE RESULTADOS DAS ARGAMASSAS AUTO-COMPACTÁVEIS

RELATÓRIO

Dezembro de 2014

Financiamento FCT/POCTI



União Europeia
FEDER



Governo da República Portuguesa

Índice

1. INTRODUÇÃO	1
2. ENQUADRAMENTO E CONTEXTO	1
3. ESTADO DA ARTE	2
3.1. Introdução	2
3.2. Argamassa auto-compactável (AAC)	2
3.3. Propriedades dos agregados reciclados de betão (ARB)	3
3.3.1. Método de trituração	3
3.3.2. Absorção de água	4
3.3.3. Massa volúmica	4
4. METODOLOGIA DE CÁLCULO	4
5. CAMPANHA EXPERIMENTAL	7
5.1. Formulação das AAC	7
5.2. Produção e preparação de provetes	9
5.2.1. Sequência de amassadura	9
5.2.2. Moldagem de provetes	10
5.3. Ensaio às AAC no estado fresco	11
5.3.1. Ensaio de espalhamento no mini cone	11
5.3.2. Ensaio de escoamento no mini funil	13
5.4. Ensaio às AAC no estado endurecido	14
5.4.1. Ensaio mecânicos ao betão no estado endurecido	15
5.4.1.2. Resistência à flexão	15
5.4.1.2. Resistência à compressão	16
6. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS	17
6.1. Estado fresco	17

6.2.	Estado endurecido	19
6.2.1.	Resistência à flexão	19
6.2.2.	Resistência à compressão	20
6.2.3.	Comentário aos resultados	22
7.	BIBLIOGRAFIA	23
	ANEXO I – ACERTO DOS PARÂMETROS V_w/V_p E $S_p/P\%$ DAS ARGAMASSAS DE REFERÊNCIA	A.1
	ANEXO II - FORMULAÇÃO DAS MISTURAS	A.4
	II.1. Materiais constituintes	A.4
	II.2. Estudo em argamassas	A.4
	II.2.1. Composição das argamassas	A.4
	II.2.2. Quantidade de agregado reciclado por fracção granulométrica	A.7

Índice de figuras

Figura 2.1 - Esquematização das várias argamassas a produzir	1
Figura 4.1 - Alterações nos parâmetros de trabalhabilidade com o aumento de V_w/V_p , mantendo $S_p/p\%$ constante (Nepomuceno [1]).....	6
Figura 4.2 - Alterações nos parâmetros de trabalhabilidade com o aumento de $S_p/p\%$, mantendo V_w/V_p constante (Nepomuceno [1])	6
Figura 5.1 - Representação esquemática da sequência de amassadura de AAC 100% AN	10
Figura 5.2 - Representação esquemática da sequência de amassadura de AAC com AR	10
Figura 5.3 - Molde para produção de 3 provetes prismáticos de argamassa.....	11
Figura 5.4 - Misturadora utilizada para as amassaduras	11
Figura 5.5 - Mini cone para o ensaio de espalhamento em argamassas	12
Figura 5.6 - Espalhamento da argamassa e diâmetros a medir.....	12
Figura 5.7 - Mini funil V para o ensaio de escoamento em argamassas.....	13
Figura 5.8 - Prensa hidráulica para ensaio de flexão (à esquerda) e compressão (à direita)	15
Figura 5.9 - Rotura do provete prismático à flexão (à esquerda) e à compressão (à direita)	16
Figura 6.1 - Representação gráfica dos resultados no estado fresco da família de 45 MPa	18
Figura 6.2 - Representação gráfica dos resultados no estado fresco da família de 65 MPa	18
Figura 6.3 - Representação gráfica dos resultados do ensaio de flexão da família de 45 MPa.....	20
Figura 6.4 - Representação gráfica dos resultados do ensaio de flexão da família de 65 MPa.....	20
Figura 6.5 - Representação gráfica dos resultados do ensaio de compressão da família de 45 MPa	22
Figura 6.6 - Representação gráfica dos resultados do ensaio de compressão da família de 65 MPa	22

Figura I.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 de referência de 45 MPa.....	A.3
Figura I.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 de referência de 65 MPa.....	A.3
Figura II.3 - Curva granulométrica da mistura de areias e curva de referência	A.8

Índice de tabelas

Tabela 5.1 - Ensaios às argamassas no estado endurecido.....	14
Tabela 6.1 - Resultados dos ensaios ao estado fresco da família de 45 MPa.....	17
Tabela 6.2 - Resultados dos ensaios ao estado fresco da família de 65 MPa.....	17
Tabela 6.3 - Resultados do ensaio de flexão da família de 45 MPa	19
Tabela 6.4 - Resultados do ensaio de flexão da família de 65 MPa	19
Tabela 6.5 - Resultados do ensaio de compressão da família de 45 MPa.....	21
Tabela 6.6 - Resultados do ensaio de compressão da família de 65 MPa.....	21
Tabela I.1 - Cálculo das quantidades de amassadura para as amassaduras experimentais das argamassas de 45 MPa	A.1
Tabela I.2 - Cálculo das quantidades de amassadura para as amassaduras experimentais das argamassas de 65 MPa	A.2
Tabela II.3 - Cálculo das quantidades de amassadura para as argamassas de 45 MPa.	A.5
Tabela II.4 - Cálculo das quantidades de amassadura para as argamassas de 65 MPa.	A.6
Tabela II.5 - Quantidades totais de todos os materiais necessários	A.6
Tabela II.6 - Curva granulométrica da mistura de areias e curva de referência	A.7
Tabela II.7 - Quantidades totais de AFR necessárias, por fracção	A.8

Siglas

AAC	- Argamassa auto-compactável
AARB	- Argamassa com agregados reciclados de betão
AFN	- Agregados finos naturais
AFR	- Agregados finos reciclados
AFRB	- Agregados finos reciclados de betão
AN	- Agregados naturais
AR	- Agregados reciclados
AR PF	- Agregados reciclados provenientes da pré-fabricação
ARB	- Agregados reciclados de betão
BAC	- Betão auto-compactável
BC	- Betão convencional
CV	- Cinza volante
FC	- Fíler calcário
LC	- Laboratório de Construção (IST)
Relação a/c	- Relação água / cimento
Sp	- Superplastificante
TP	- Trituração primária
TS	- 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.

Este relatório apresenta o planeamento da produção, os ensaios a realizar às argamassas auto-compactáveis e respectivos resultados obtidos, no âmbito do Projecto FCT PTDC/ECM/118372/2010 - “Betão com agregados reciclados de elevado desempenho para a indústria da pré-fabricação (EXCELlentSUStainableCONcrete)”, descrevendo o cálculo das quantidades de amassadura e os procedimentos experimentais.

Desta forma, com esta sub-tarefa, pretende-se determinar o comportamento no estado fresco e endurecido de argamassas auto-compactáveis produzidas com agregados reciclados (AR). Estes serão avaliados através da sua comparação com argamassas de referência produzidas na sua totalidade com agregados naturais (AN).

2. Enquadramento e contexto

A primeira fase da tarefa 4 aborda a produção de argamassas auto-compactáveis com base no método de Nepomuceno [1] (Figura 2.1). O estudo prévio em argamassas permite aferir as quantidades de amassadura do BAC através de ajustes na razão a/c e na dosagem de Sp, antes de adicionar o agregado grosso (natural e/ou reciclado), de modo a serem avaliados, nesta fase, os parâmetros de trabalhabilidade.

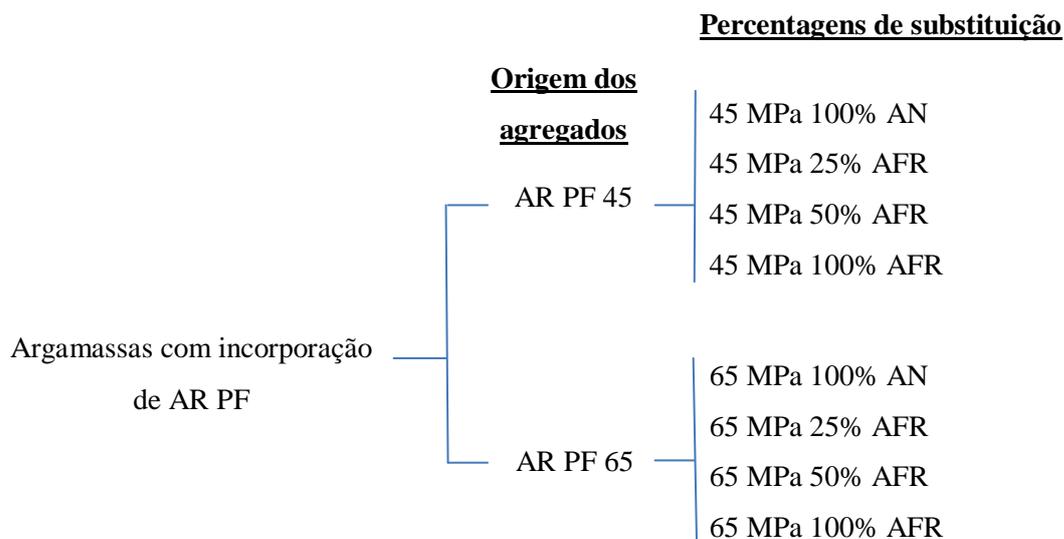


Figura 2.1 - Esquematização das várias argamassas a produzir

Foram estudadas quatro misturas de argamassa para cada tipo de agregado, 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 é 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. Assim, são estudadas quatro argamassas, que darão origem a cinco betões, para cada classe de resistência (AFR/AGR (%): 25/25; 50/50; 0/100; 100/0).

3. Estado da Arte

3.1. Introdução

Este capítulo tem como objectivo apresentar, de uma forma sucinta, o levantamento da informação existente relativa às propriedades das argamassas auto-compactáveis e dos agregados reciclados de betão.

3.2. Argamassa auto-compactável (AAC)

O betão auto-compactável 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 comportamento reológico. 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 auto-compactável 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 [2].

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 [1].

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.

3.3. 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/c utilizada no betão de origem e a sua qualidade depende da resistência dos betões e do método de trituração utilizado [3].

Seguidamente, analisa-se com maior detalhe algumas propriedades dos agregados reciclados.

3.3.1. 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.* [4] 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.

3.3.2. 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/c.

Para ter este factor em consideração na formulação das argamassas, evitando que a relação a/c das argamassas com agregados reciclados de betão (ARB) seja alterada, pode-se tomar uma das seguintes opções: pré-saturar os ARB ou acrescentar uma certa quantidade de água durante a amassadura, compensando assim a que será absorvida pelos agregados.

Ferreira *et al.* [5] compararam estes dois métodos de consideração da água de absorção dos AR na mistura e concluíram que o método de pré-saturação é prejudicial ao desempenho global do betão, especialmente em termos de durabilidade.

3.3.3. Massa volúmica

Em relação à massa volúmica, quanto maior o seu valor, melhor será o desempenho da argamassa e, conseqüentemente, do betão correspondente [6], 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 [3].

Leite [7] verificou que a massa volúmica dos AFRB é cerca de 4% inferior à dos AN.

4. Metodologia de cálculo

A metodologia de cálculo de amassaduras de AAC aplicada nesta tarefa do projecto foi desenvolvida por Nepomuceno [1], tendo por base os métodos japoneses. 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 absolutos 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, $S_p/p\%$.

O valor de V_p/V_s considerado deverá estar entre 0,60 e 0,80 (preferencialmente entre 0,65 e 0,80) e os valores de V_w/V_p e $S_p/p\%$, que influenciam as características de trabalhabilidade pretendidas, são estimados através de correlações estabelecidas por Nepomuceno [1] para dois tipos de cimento (CEM I 42,5R e CEM II/B-L 32,5N). No entanto, 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 reológicos G_m (área de espalhamento relativa) e R_m (velocidade de escoamento relativa). 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 S_p , até se atingir o comportamento pretendido (Figuras 4.1 e 4.2).

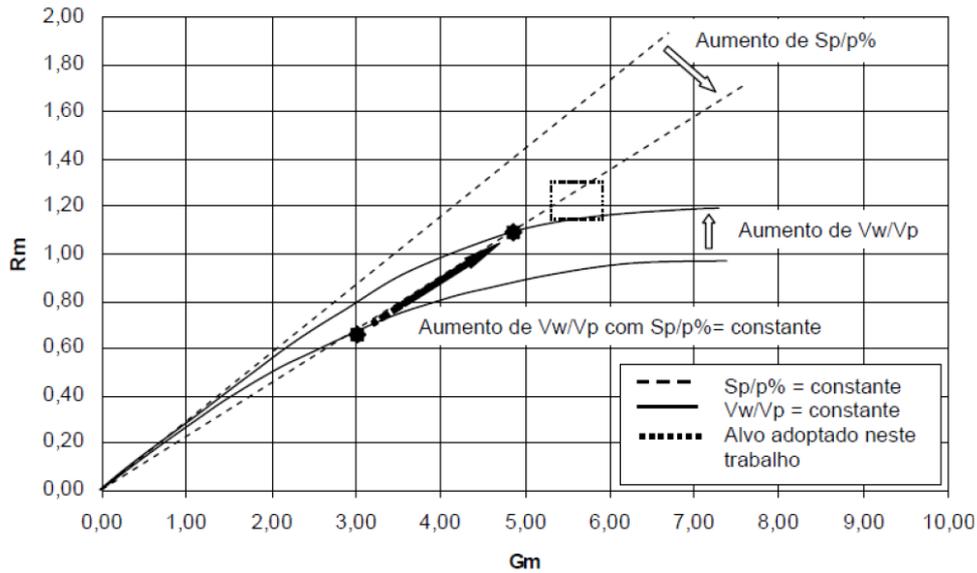


Figura 4.2 - Alterações nos parâmetros de trabalhabilidade com o aumento de V_w/V_p , mantendo $S_p/p\%$ constante (Nepomuceno [1])

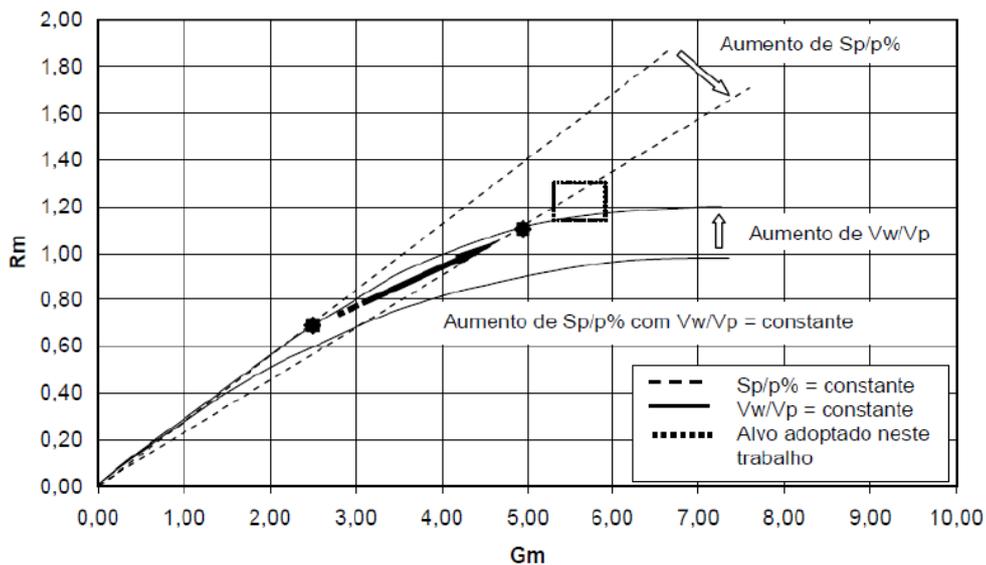


Figura 4.1 - Alterações nos parâmetros de trabalhabilidade com o aumento de $S_p/p\%$, mantendo V_w/V_p constante (Nepomuceno [1])

Estes acertos foram efectuados apenas para as duas argamassas de referência (100% AN). 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 I.

Através do conhecimento das massas volúmicas de todos os materiais, dos seus volumes absolutos e das percentagens unitárias dos agregados, é possível calcular-se as respecti-

vas quantidades por unidade de volume.

Para cada amassadura, são realizados ensaios no estado fresco, sendo que, de acordo com este método, os valores obtidos se deverão situar nos seguintes intervalos:

- ✦ diâmetro de espalhamento (D_m) através do mini cone entre 250 e 265 mm;
- ✦ tempo de escoamento (t) através do mini-funil V entre 7,7 e 8,8 segundos.

5. Campanha experimental

A campanha experimental a realizar nesta tarefa do projecto tem como objectivo avaliar o desempenho no estado fresco e endurecido de argamassas auto-compactáveis com incorporação de AR PF. Para tal, é necessário realizar os ensaios adequados para melhor compreender a influência dos AR PF nessas propriedades.

Pretende-se então, com este capítulo, apresentar e descrever todas as fases da campanha experimental, focando-se a produção de argamassas auto-compactáveis e os respectivos ensaios a realizar, tanto no estado fresco como endurecido.

A formulação das argamassas foi feita através do método de Nepomuceno [1], 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 II.

5.1. Formulação das AAC

A etapa prévia de estudo em argamassas permite aferir as quantidades de amassadura dos vários betões através de ajustes na razão a/c e na dosagem de superplastificante, antes de adicionar o agregado grosso (natural e/ou reciclado).

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

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 mistura (V_p/V_s), que deverá ser, preferencialmente, entre 0,65 e 0,80, de acordo com

Nepomuceno [1]; optou-se por considerar $V_p/V_s=0,80$, de acordo com os resultados obtidos por Silva [2];

- ✦ a percentagem de substituição do cimento pelas adições (f_{ad}) foi fixada tendo em conta a resistência pretendida, ou seja, definiu-se uma percentagem diferente para as argamassas auto-compactáveis de 45 MPa e de 65 MPa; para as argamassas de 65 MPa, o valor de f_{ad} será, necessariamente, superior ao considerado para as argamassas de 45 MPa, pois, uma vez que se pretende uma resistência superior, as misturas terão de contemplar maior percentagem de cimento na sua formulação;
- ✦ todas as argamassas e betões a estudar neste trabalho contemplam a introdução de FC e CV em misturas ternárias; assim, para as argamassas de 45 MPa, foi considerado um valor de f_{ad} de 60%, correspondendo 50% a CV e 10% a FC, e, para as argamassas de 65 MPa, um valor de f_{ad} de 35%, sendo que 30% correspondem a CV e 5% a FC;
- ✦ os valores de V_w/V_p (relação, em volume absoluto, entre as quantidades de água e de materiais finos) e $S_p/p\%$ (relação percentual, em massa, entre as dosagens de superplastificante e de materiais finos) 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 em cada família de argamassas auto-compactáveis (45 e 65 MPa), partiu-se de um par de valores hipotético para V_w/V_p e $S_p/p\%$ e foi-se progressivamente adaptando esse valor aos parâmetros de trabalhabilidade pretendidos, num processo iterativo;
- ✦ assim, para as argamassas de 65 MPa, partiu-se de $V_w/V_p=0,80$ e $S_p/p\%=0,65$ e, para as argamassas de 45 MPa, partiu-se de $V_w/V_p=0,85$ e $S_p/p\%=0,50$.

Estes parâmetros foram escolhidos tendo em conta diversos trabalhos com aplicação de BAC usando o método de Nepomuceno [1], que apresentaram resultados satisfatórios (Silva [2], Franco [8], Bogas [9], Weerdt [10]). Após afinação dos parâmetros (através de algumas iterações), fixou-se estes valores em: $V_w/V_p = 0,87$ e $S_p/p\%=0,50$ para as AAC de 45 MPa e $V_w/V_p = 0,88$ e $S_p/p\%=0,65$ para as AAC de 65 MPa.

Uma vez atingida a trabalhabilidade adequada a uma argamassa auto-compactável, mantêm-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 é feita em massa e por fracção granulométrica, reproduzindo-se a curva de referência obtida por Nepomuceno [1].

Para além da substituição de AN por AR, são ainda 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 II. Apesar de se pretender estudar cinco misturas de betão por família (45 e 65 MPa), 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, são estudadas quatro argamassas por família, num total de oito argamassas auto-compactáveis.

5.2. Produção e preparação de provetes

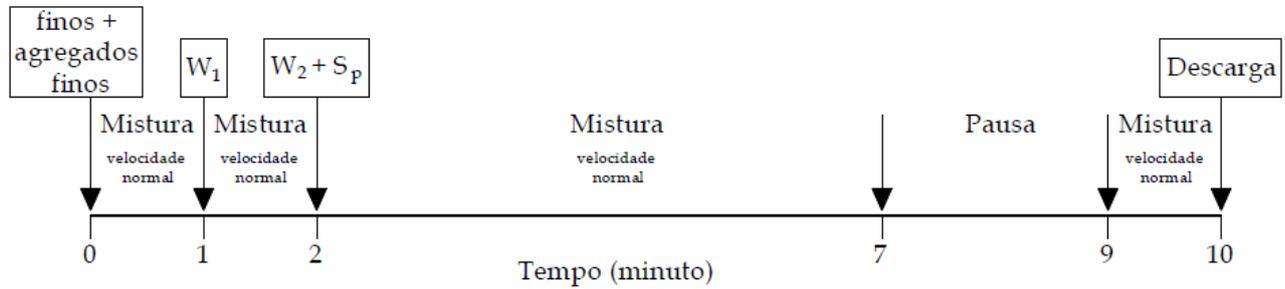
5.2.1. Sequência de amassadura

A produção de AAC será feita com base nos processos utilizados por Silva [2] e Cartuxo [12] nas suas investigações sobre BAC e BC com agregados reciclados, respectivamente, com as devidas adaptações.

Na Figura 5.1, apresenta-se, de forma esquemática, a sequência de amassadura para AAC com 100% AN. A sequência de amassadura demora 10 minutos no total e inicia-se com a introdução dos agregados finos (areias) e dos materiais finos (cimento e adições) que são misturados durante 1 minuto. Adiciona-se, lentamente, a primeira parcela de água, correspondente a 80% da água de amassadura total, sem desligar o equipamento e mistura por mais 1 minuto. A segunda parcela de água, correspondente aos restantes 20%, é adicionada com o superplastificante bem misturado decorrido o segundo minuto de mistura, também de forma lenta e sem paragem do equipamento. A mistura dos componentes continua durante 5 minutos, sempre com velocidade normal. Decorridos 5 minutos, desliga-se a misturadora e a argamassa fica em repouso durante 2 minutos, aproveitando-se esta pausa para limpeza da pá de mistura. Decorridos 2 minutos, procede-se a mais 1 minuto de mistura, também com velocidade normal, antes de iniciar os ensaios no estado fresco.

Na Figura 5.2, apresenta-se a sequência para AAC com incorporação de AR. A diferença para o procedimento anterior consiste em colocar, separadamente, os AR na misturadora no início da sequência. De seguida, adiciona-se a água de absorção dos AR (valor

de absorção aos 10 minutos, por ser esta a duração aproximada de uma amassadura) e mistura-se manualmente durante 1 minuto. A restante sequência mantém-se inalterada.



$W_1 = 80\%$ da água de amassadura

$W_2 + S_p = 20\%$ da água de amassadura + superplastificante

Figura 5.1 - Representação esquemática da sequência de amassadura de AAC 100% AN



$W_1 =$ água de absorção

$W_2 = 80\%$ da água de amassadura

$W_3 + S_p = 20\%$ da água de amassadura + superplastificante

Figura 5.2 - Representação esquemática da sequência de amassadura de AAC com AR

Foi utilizada a misturadora ilustrada na Figura 5.3 e um cronómetro para medição dos diversos intervalos de tempo apresentados.

5.2.2. Moldagem de provetes

Para cada argamassa, foram produzidos três provetes prismáticos de dimensões 40x40x160 mm, como ilustrado na Figura 5.4.

Cada molde permite 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 descofrante nas superfícies do molde, de modo a 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, até à idade de ensaio (28 e 90 dias).



Figura 5.3 - Misturadora utilizada para as amassaduras



Figura 5.4 - Molde para produção de 3 provetes prismáticos de argamassa

5.3. Ensaio às AAC no estado fresco

Para se aferir se a argamassa produzida tem as características de auto-compactabilidade requeridas, são realizados 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 nos subcapítulos anteriores.

5.3.1. Ensaio de espalhamento no mini cone

A determinação do diâmetro médio de espalhamento é efectuada com recurso a um molde troncocónico (Figura 5.5) e uma régua metálica. Não existindo ainda referências normativas nacionais ou internacionais para o ensaio em causa, optou-se por seguir os

procedimentos de ensaio utilizados por Nepomuceno [1] e por Liu [11].

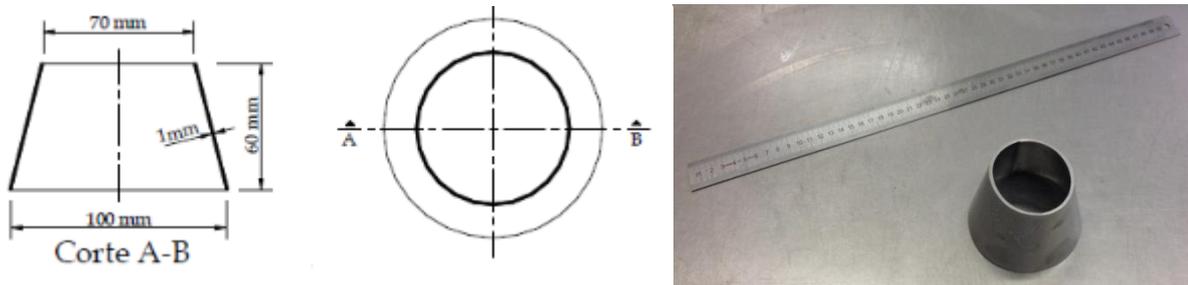


Figura 5.3 - Mini cone para o ensaio de espalhamento em argamassas

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 5.6);
- o espalhamento é dado pelo diâmetro médio (D_m) das duas medições, também em mm.



Figura 5.4 - Espalhamento da argamassa e diâmetros a medir

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:

$$G_m = \frac{D_m^2}{D_0^2} \cdot \lambda^2$$

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. Neste trabalho, é possível admitir valores ligeiramente superiores, pois é expectável que G_m decresça com a incorporação crescente de AR.

5.3.2. Ensaio de escoamento no mini funil

A determinação do tempo de escoamento é efectuada com recurso ao mini funil V (Figura 5.7) e um cronómetro. Não existindo ainda referências normativas nacionais ou internacionais para o ensaio em causa, optou-se por seguir os procedimentos de ensaio utilizados por Nepomuceno [1] e por Liu [11].

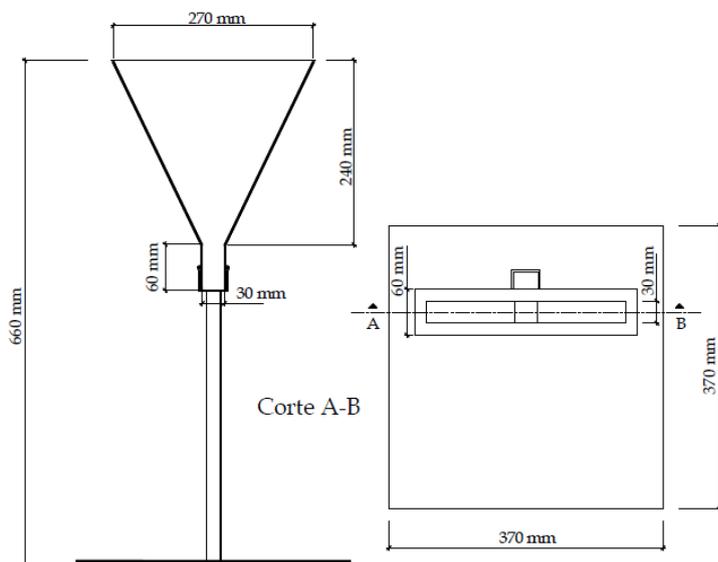


Figura 5.5 - Mini funil V para o ensaio de escoamento em argamassas

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

- a) 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. Neste trabalho, é possível admitir valores ligeiramente superiores, pois é expectável que G_m decresça com a incorporação crescente de AR.

5.4. Ensaios às AAC no estado endurecido

Realizou-se também ensaios no estado endurecido, de modo a aferir a resistência à compressão e à flexão das argamassas. Os provetes foram previamente submetidos a uma cura de 28 e 90 dias até à realização dos ensaios. As normas que regulam estes ensaios estão presentes na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 - Ensaios às argamassas no estado endurecido

Ensaios	Referência normativa
Resistência à flexão	EN 1015-11: 1999
Resistência à compressão	EN 1015-11: 1999

Os ensaios foram realizados no LC do IST, à excepção do ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio, a realizar no Laboratório de Materiais de Construção (LabMAT) da Universidade Nova de Lisboa (UNL).

5.4.1. Ensaio mecânicos ao betão no estado endurecido

Neste subcapítulo, são apresentados os ensaios realizados às argamassas no estado endurecido, com o objectivo de avaliar a influência da incorporação de agregados reciclados de betão no comportamento mecânico dos diferentes BAC produzidos, relativamente a um betão de referência.

5.4.1.2. Resistência à flexão

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

O método adoptado segue 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.

O ensaio segue o seguinte procedimento:

- posicionar o provete na prensa de flexão (Figura 5.8), com uma das faces laterais de moldagem centrada sobre os roletes, e com o seu eixo longitudinal perpendicular aos apoios;
- fazer descer o dispositivo de aplicação da carga, muito lentamente, até estabelecer contacto com a face superior do provete;
- 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 5.9);



Figura 5.6 - Prensa hidráulica para ensaio de flexão (à esquerda) e compressão (à direita)

d) registar a força de rotura aplicada F_f , em N.

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).



Figura 5.7 - Rotura do provete prismático à flexão (à esquerda) e à compressão (à direita)

5.4.1.2. Resistência à compressão

O ensaio de resistência à compressão realiza-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 segue 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, determina-se a tensão de rotura, objectivo deste ensaio.

O ensaio segue o seguinte procedimento:

- a) após o ensaio de flexão, posiciona-se o provete (meio prisma) centrado no prato inferior do equipamento de compressão (Figura 5.8);
- b) fazer descer dispositivo de aplicação da carga, muito lentamente, até estabelecer contacto com a face superior do provete;
- c) 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 5.9);

d) registar a força de rotura aplicada F, em N.

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

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

em que:

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

A - área da zona comprimida ($40 \times 40 = 1600 \text{ mm}^2$).

6. Apresentação e análise de resultados

Neste capítulo, é feita a apresentação e análise dos resultados obtidos nos ensaios efetuados às argamassas, em estado fresco e endurecido.

6.1. Estado fresco

Nas Tabelas 6.1 e 6.2, apresenta-se as medições obtidas nos dois ensaios realizados em estado fresco (mini-cone e mini-funil V), bem como os parâmetros obtidos (G_m e R_m , respectivamente), para ambas as famílias (45 e 65 MPa).

Tabela 6.1 - Resultados dos ensaios ao estado fresco da família de 45 MPa

	Ensaio				
	Mini cone			Mini funil	
Argamassa	d_1 (mm)	d_2 (mm)	G_m	t (s)	R_m
100% AN	265	262	5,94	7,5	1,33
25% AFR	270	272	6,34	7,5	1,33
50% AFR	265	264	6,00	7,5	1,33
100% AFR	274	279	6,65	7,0	1,43

Tabela 6.2 - Resultados dos ensaios ao estado fresco da família de 65 MPa

	Ensaio				
	Mini cone			Mini funil	
Argamassa	d_1 (mm)	d_2 (mm)	G_m	t (s)	R_m
100% AN	261	260	5,79	8,0	1,25
25% AFR	257	260	5,68	8,0	1,25
50% AFR	276	270	6,45	7,5	1,33
100% AFR	270	268	6,24	7,0	1,43

As Figuras 6.1 e 6.2 representam os resultados obtidos no estado fresco sob a forma de gráficos, semelhantes aos traçados por Nepomuceno [1] no seu trabalho. A vermelho 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 .

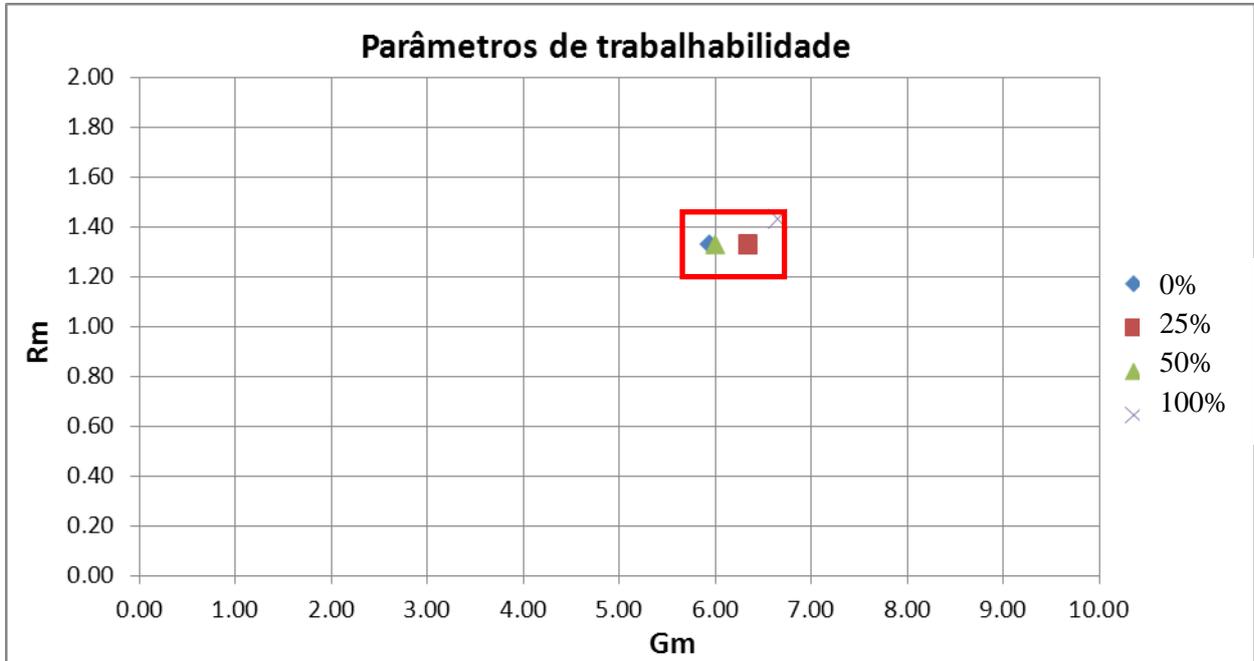


Figura 6.1 - Representação gráfica dos resultados no estado fresco da família de 45 MPa

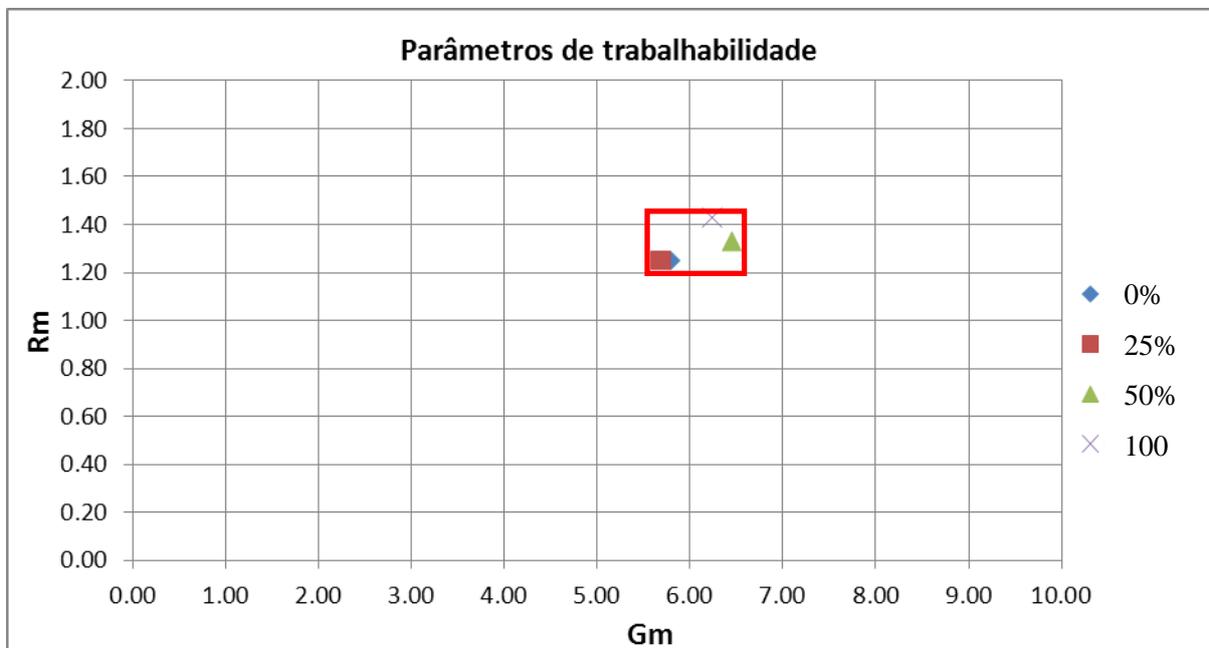


Figura 6.2 - Representação gráfica dos resultados no estado fresco da família de 65 MPa

Verifica-se que os parâmetros de trabalhabilidade obtidos para todas as argamassas, de ambas as famílias, se encontram dentro do intervalo estabelecido. Conclui-se, portanto,

que as argamassas possuem a trabalhabilidade adequada à obtenção de um 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.

6.2. Estado endurecido

6.2.1. Resistência à flexão

Nas Tabelas 6.3 e 6.4, apresenta-se as medições obtidas nos ensaios de resistência à flexão, para ambas as famílias (45 e 65 MPa, respectivamente).

Tabela 6.3 - Resultados do ensaio de flexão da família de 45 MPa

Idade de ensaio	Argamassa	Provete	F _f (N)	f _f (MPa)	Média f _f (MPa)	Desvio-padrão f _f (MPa)
28 dias	100% AN	1	3463	8,1	8,1	0,09
		2	3408	8,0		
	25% AR	1	2825	6,6	6,9	0,36
		2	3042	7,1		
	50% AR	1	2906	6,8	7,2	0,52
		2	3220	7,5		
	100% AR	1	3435	8,1	8,2	0,26
		2	3591	8,4		
90 dias	100% AN	1	3698	8,7	8,7	
	25% AR	1	2722	6,4	6,4	
	50% AR	1	2494	5,8	5,8	
	100% AR	1	2779	6,5	6,5	

Tabela 6.4 - Resultados do ensaio de flexão da família de 65 MPa

Idade de ensaio	Argamassa	Provete	F _f (N)	f _f (MPa)	Média f _f (MPa)	Desvio-padrão f _f (MPa)
28 dias	100% AN	1	4035	9,5	10,2	1,1
		2	4691	11,0		
	25% AR	1	4661	10,9	10,6	0,4
		2	4407	10,3		
	50% AR	1	5195	12,2	11,9	0,4
		2	4978	11,7		
	100% AR	1	3242	7,6	7,9	0,5
		2	3524	8,3		
90 dias	100% AN	1	5222	12,2	12,2	
	25% AR	1	5016	11,8	11,8	
	50% AR	1	5589	13,1	13,1	
	100% AR	1	5375	12,6	12,6	

As Figuras 6.3 e 6.4 representam os resultados obtidos no ensaio sob a forma de gráficos, através do traçado de duas curvas que representam a evolução da resistência à flexão, para as duas idades de ensaio (28 e 90 dias).

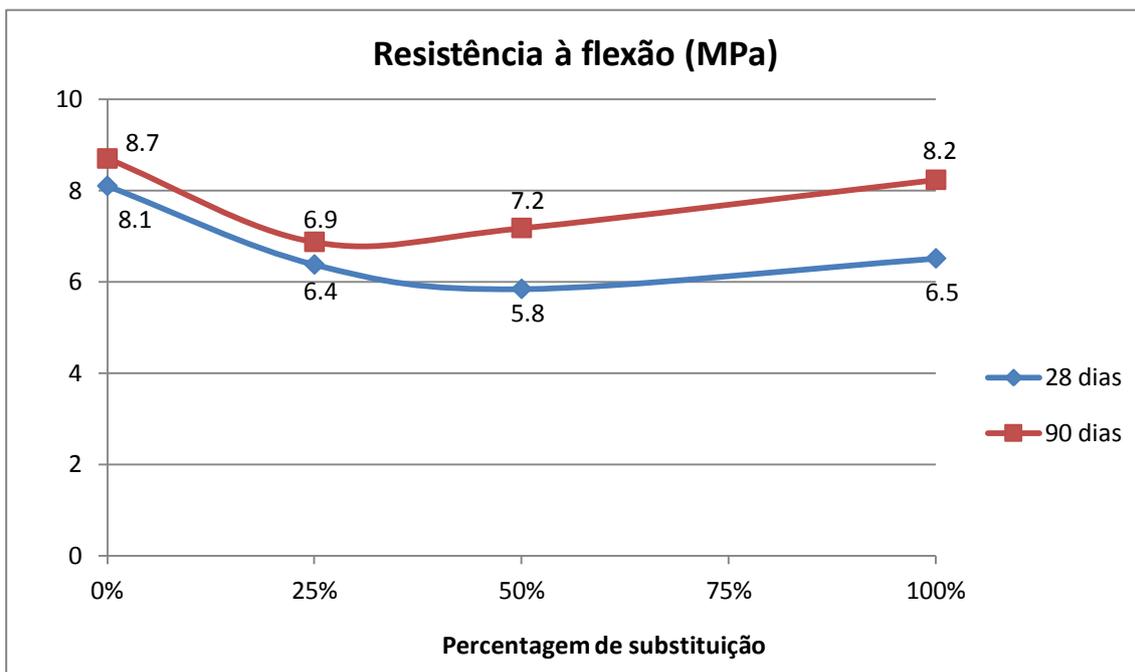


Figura 6.3 - Representação gráfica dos resultados do ensaio de flexão da família de 45 MPa

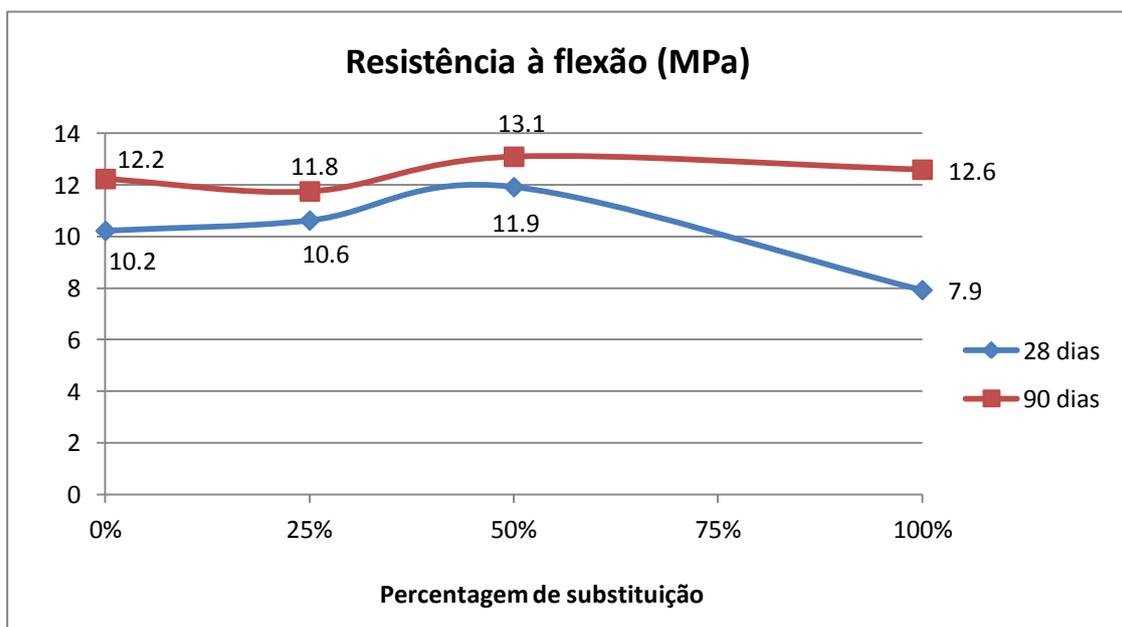


Figura 6.4 - Representação gráfica dos resultados do ensaio de flexão da família de 65 MPa

6.2.2. Resistência à compressão

Nas Tabelas 6.5 e 6.6, apresenta-se as medições obtidas nos ensaios de resistência à compressão, para ambas as famílias (45 e 65 MPa, respectivamente).

Tabela 6.5 - Resultados do ensaio de compressão da família de 45 MPa

Idade de ensaio	Argamassa	Provete	F (N)	fc (MPa)	Média fc (MPa)	Desvio-padrão fc (MPa)
28 dias	100% AN	1	110050	68,8	67,9	1,24
			106100	66,3		
		2	110420	69,0		
			108100	67,6		
	25% AR	1	82290	51,4	55,5	4,52
			83710	52,3		
		2	91310	57,1		
			97890	61,2		
	50% AR	1	89870	56,2	56,4	1,67
			87020	54,4		
		2	90670	56,7		
			93540	58,5		
100% AR	1	108190	67,6	65,9	1,34	
		105420	65,9			
	2	105360	65,9			
		102930	64,3			
90 dias	100% AN	1	127230	79,5	79,5	
	25% AR	1	121940	76,2	76,2	
	50% AR	1	116530	72,8	72,8	
	100% AR	1	124660	77,9	77,9	

Tabela 6.6 - Resultados do ensaio de compressão da família de 65 MPa

Idade de ensaio	Argamassa	Provete	F (kN)	fc (MPa)	Média fc (MPa)	Desvio-padrão fc (MPa)
28 dias	100% AN	1	110930	69,3	68,8	0,6
			110600	69,1		
		2	108620	67,9		
			110160	68,9		
	25% AR	1	110290	68,9	71,3	2,4
			118220	73,9		
		2	111490	69,7		
			116560	72,9		
	50% AR	1	113370	70,9	72,8	3,0
			122990	76,9		
		2	116980	73,1		
			112350	70,2		
100% AR	1	102550	64,1	65,6	1,3	
		104260	65,2			
	2	106460	66,5			
		106830	66,8			
90 dias	100% AN	1	124320	77,7	77,7	
	25% AR	1	133960	83,7	83,7	
	50% AR	1	148340	92,7	92,7	
	100% AR	1	126960	79,4	79,4	

A Figura 6.5 e 6.6 representa os resultados obtidos no ensaio sob a forma de gráficos, através do traçado de duas curvas que representam a evolução da resistência à compressão, para as duas idades de ensaio (28 e 90 dias).

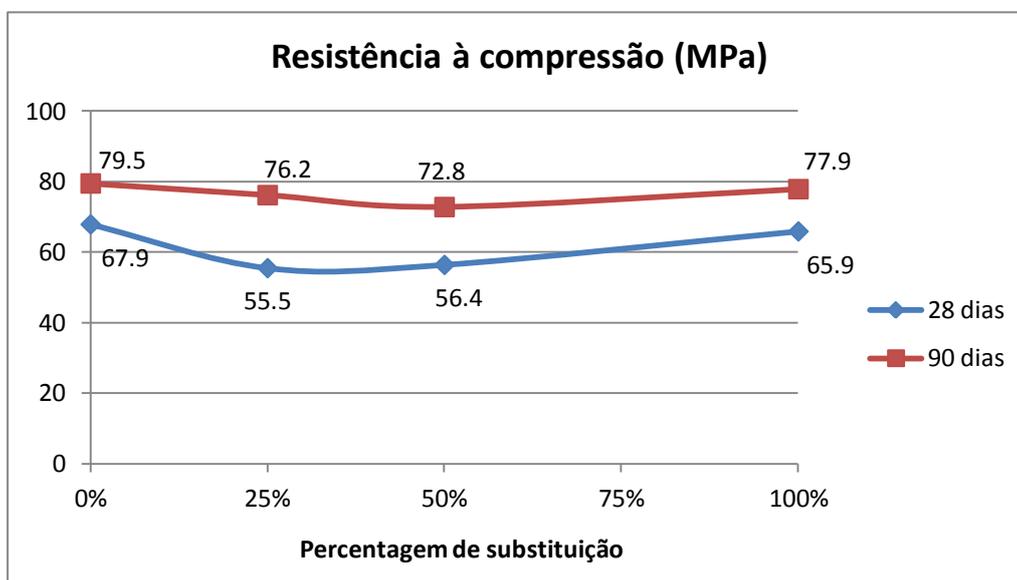


Figura 6.5 - Representação gráfica dos resultados do ensaio de compressão da família de 45 MPa

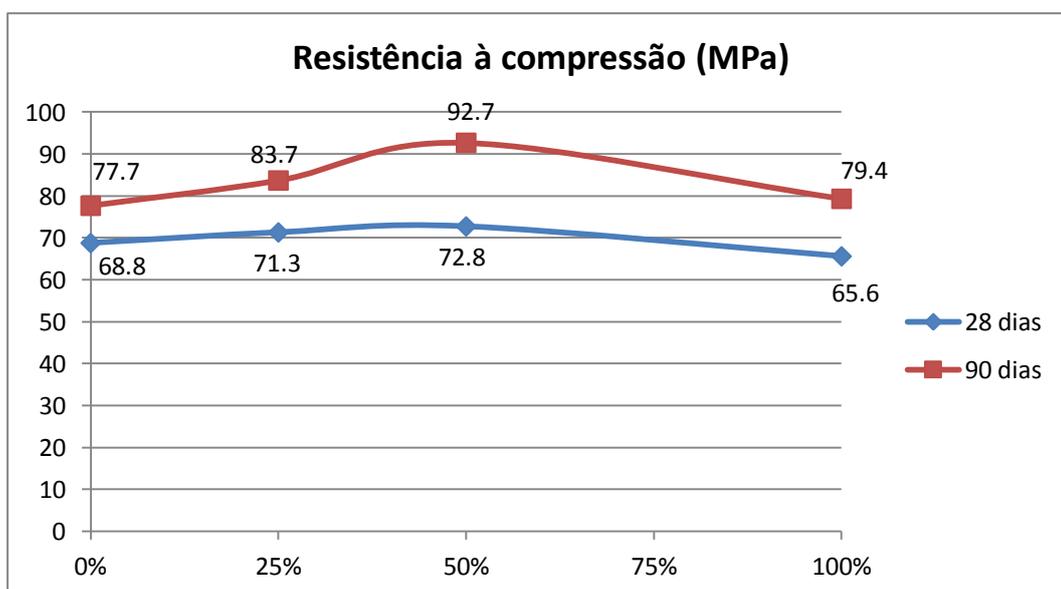


Figura 6.6 - Representação gráfica dos resultados do ensaio de compressão da família de 65 MPa

6.2.3. Comentário aos resultados

Através da análise dos gráficos apresentados, verifica-se que, para cada família de argamassas, se mantém a tendência da evolução da resistência à flexão e à compressão, tanto aos 28 como aos 90 dias. Como seria de esperar, as resistências (à flexão e compressão) aos 90 dias são sempre superiores às verificadas aos 28 dias, para todas as per-

centagens de substituição de AN por AR.

Comparando as diferentes famílias, é possível observar que a evolução das resistências apresenta uma tendência inversa.

Para a família de 45 MPa, as resistências à flexão e à compressão são máximas quando não existe qualquer incorporação de AR, sofrendo depois uma diminuição do seu valor à medida que a incorporação de AR aumenta, até atingir um mínimo entre as percentagens de substituição de 25% e 50%, voltando a aumentar até se atingir os 100% de substituição, embora nunca atingindo a resistência que se obteve para as argamassas 100% AN.

Quanto à família de 65 MPa, verifica-se que a resistência aumenta globalmente até se atingir a percentagem de substituição de 50%, decrescendo a partir daí, até aos 100% de substituição. No caso das argamassas submetidas a cura húmida durante 90 dias, o valor da resistência para as argamassas com 100% de substituição chega a ser ligeiramente superior ao das argamassas de referência (sem AR).

Este fenómeno pode dever-se, essencialmente, à resistência do betão de origem dos agregados reciclados. Os agregados de 45 MPa apresentam pior desempenho, o que pode justificar a perda de resistência com o aumento da sua percentagem de incorporação, até se atingir um ponto em que a granulometria do AR pode sobrepor-se a este efeito, melhorando a compacidade da mistura e aumentando a sua resistência. Por outro lado, os agregados de 65 MPa são de melhor qualidade, o que pode justificar o aumento da resistência com a taxa crescente de substituição por AR, ficando por explicar a sua posterior redução.

Tal como referido pelo próprio autor do método, Nepomuceno [1], os resultados das argamassas no estado endurecido não são relevantes, não sendo sequer 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.

7. Bibliografia

- [1] 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.
- [2] 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.

- [3] 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.
- [4] Matias, D., de Brito, J., Rosa, A., Pedro, D., “Mechanical properties of concrete produced with recycled coarse aggregates - Influence of the use of superplasticizers”, Construction and Building Materials, Vol. 44, 2013, pp. 101-109.
- [5] 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.
- [6] Brito, J., “Agregados reciclados e a sua influência nas propriedades dos betões”, Lição de síntese para provas de agregação em Engenharia Civil, Lisboa, 2005.
- [7] Leite, M., “Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição”, Tese de Doutorado em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil, 390 p, 2001.
- [8] 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.
- [9] Bogas J. A., “Caracterização de betões estruturais com agregados leves de argila expandida”, Lisboa, Portugal, Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal, 2011, 1696 p., Tese de Doutorado.
- [10] 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.
- [11] Liu M., “Wider Application of Additions in Self-compacting Concrete”, London, UK, Department of Civil, Environmental and Geomatic Engineering University College London, 2009, 392 p., Tese de Doutorado.
- [12] Cartuxo, P., “Betões com agregados finos provenientes da trituração do betão: Influência dos plastificantes no desempenho em termos de durabilidade”, Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal, 2013, 232 p.

Anexo I - Acerto dos parâmetros V_w/V_p e $S_p/p\%$ das argamassas de referência

Tabela I.1 - Cálculo das quantidades de amassadura para as amassaduras experimentais das argamassas de 45 MPa

Identificação da argamassa:		100% AN	100% AN	100% AN	100% AN	100% AN	
		ESTUDO DE COMPOSIÇÃO DE ARGAMASSAS					
Parâmetros da composição	$f_{cm, 28}$ [MPa] =	52,73	46,64	46,07	46,07	45,51	
	W/C =	0,597	0,677	0,685	0,685	0,693	
	V_p/V_s =	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	
	V_w/V_p =	0,75	0,85	0,86	0,86	0,87	
	$S_p/P\%$ =	0,50	0,50	0,50	0,55	0,50	
	Tipo e classe de cimento: =	I 42,5R	I 42,5R	I 42,5R	I 42,5R	I 42,5R	
	Mistura de finos: f_{Ad} =	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	
	Mistura de adições: CV =	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	
	FC =	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	
	Mistura de agregados: Areia 0/2 =	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	
	Areia 0/4 =	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	
	AFR =	0	0	0	0	0	
Cálculos auxiliares	ρ [kg/m ³] =	2678,00	2678,00	2678,00	2678,00	2678,00	
	SIKAPLAST 898 V_{sp}/V_p [m ³ /m ³] =	0,012514	0,012514	0,012514	0,013765	0,012514	
	Material fino V_p [m ³ /m ³] =	0,331949	0,321284	0,320255	0,320126	0,319232	
	Água V_w [m ³ /m ³] =	0,248961	0,273091	0,275419	0,275309	0,277732	
	Superplast. V_{sp} [m ³ /m ³] =	0,004154	0,004021	0,004008	0,004407	0,003995	
	Agregado fino V_s [m ³ /m ³] =	0,414936	0,401605	0,400318	0,400158	0,399041	
Quantidades teóricas para 1 m ³	Cimento [kg] =	416,9	403,5	402,2	402,1	401,0	
	Adição CV [kg] =	381,7	369,5	368,3	368,1	367,1	
	FC [kg] =	90,3	87,4	87,1	87,1	86,8	
	S_p [Litros] =	4,2	4,0	4,0	4,4	4,0	
	S_p [kg] =	4,4	4,3	4,3	4,7	4,3	
	Água [Litros] =	249,0	273,1	275,4	275,3	277,7	
	Areia 0/2 [kg] =	539,4	522,1	520,4	520,2	518,8	
	Areia 0/4 [kg] =	537,3	520,1	518,4	518,2	516,8	
	AFR [kg] =	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
	W/C =	0,597	0,677	0,685	0,685	0,693	
	W/MC =	0,312	0,353	0,357	0,357	0,362	
	W/F =	0,280	0,317	0,321	0,321	0,325	
Massa Total [kg] =	2219,1	2180,0	2176,2	2175,7	2172,4		
Correcção das quantidades de água e agregado	Humidade [l/m ³] =	0	0	0	0	0	
	Água de absorção NA [l/m ³] =	4,3	4,2	4,2	4,2	4,1	
	Água de absorção AR [l/m ³] =	0	0	0	0	0	
	Água total [l/m ³] =	253,3	277,3	279,6	279,5	281,9	
	Água de amassadura [l/m ³] =	253,3	277,3	279,6	279,5	281,9	
	Areia 0/2 [kg] =	537,3	520,0	518,3	518,1	516,7	
	Areia 0/4 [kg] =	535,2	518,0	516,3	516,1	514,7	
AFR [kg] =	0	0	0	0	0		
Quantidades corrigidas para:	1,40 [Litros] Cimento [g] =	583,7	564,9	563,1	562,9	561,3	
	Adição CV [g] =	534,4	517,3	515,6	515,4	514,0	
	FC [g] =	126,4	122,3	122,0	121,9	121,6	
	S_p [ml] =	5,8	5,6	5,6	6,2	5,6	
	S_p [g] =	6,2	6,0	6,0	6,6	6,0	
	Água [ml] =	354,6	388,2	391,4	391,2	394,6	
	Areia 0/2 [g] =	752,2	728,0	725,7	725,4	723,3	
	Areia 0/4 [g] =	749,3	725,2	722,9	722,6	720,6	
AFR [g] =	0	0	0	0	0		
Estudo reológico da argamassa:	Leituras:	d_1 [mm] =	140	249	253	290	265
		d_2 [mm] =	137	250	246	295	262
		t [seg.] =	34,0	8,5	8,0	7,0	7,0
	Parâmetros reológicos:	$G_m 5,3$ a $5,9$ =	0,92	5,23	5,23	7,56	5,94
$R_m 1,14$ a $1,3$ =		0,29	1,18	1,25	1,43	1,43	

Tabela I.2 - Cálculo das quantidades de amassadura para as amassaduras experimentais das argamassas de 65 MPa

Identificação da argamassa:		100% AN	100% AN	100% AN	100% AN	100% AN	
Parâmetros da composição	$f_{cm,28}$ [MPa] =	72,34	67,08	69,66	68,62	68,10	
	W/C =	0,392	0,441	0,416	0,426	0,431	
	V_p/V_s =	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	
	V_w/V_p =	0,80	0,90	0,85	0,87	0,88	
	$S_p/P\%$ =	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	
	Tipo e classe de cimento:	I 42,5R	I 42,5R	I 42,5R	I 42,5R	I 42,5R	
	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 0_2 =	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	
	Areia 0_4 =	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	
	AFR =	0	0	0	0	0	
	Cálculos auxiliares	SIKAPLAST 898 ρ [kg/m ³] =	2867,00	2867,00	2867,00	2867,00	2867,00
Material fino V_{sp}/V_p [m ³ /m ³] =		0,017416	0,017416	0,017416	0,017416	0,017416	
Água V_p [m ³ /m ³] =		0,326007	0,315715	0,320778	0,318734	0,317721	
Superplast. V_w [m ³ /m ³] =		0,260806	0,284143	0,272662	0,277298	0,279594	
Agregado fino V_{sp} [m ³ /m ³] =		0,005678	0,005499	0,005587	0,005551	0,005534	
V_s [m ³ /m ³] =		0,407509	0,394643	0,400973	0,398417	0,397151	
Quantidades teóricas para 1 m ³	Cimento [kg] =	665,4	644,4	654,7	650,5	648,5	
	Adição CV [kg] =	224,9	217,8	221,3	219,9	219,2	
	FC [kg] =	44,3	42,9	43,6	43,3	43,2	
	S_p [Litros] =	5,7	5,5	5,6	5,6	5,5	
	S_p [kg] =	6,1	5,9	6,0	5,9	5,9	
	Água [Litros] =	260,8	284,1	272,7	277,3	279,6	
	Areia 0_2 [kg] =	529,8	513,0	521,3	517,9	516,3	
	Areia 0_4 [kg] =	527,7	511,1	519,3	516,0	514,3	
	AFR [kg] =	0	0	0	0	0	
	W/C =	0,392	0,441	0,416	0,426	0,431	
	W/MC =	0,293	0,330	0,311	0,319	0,322	
W/F =	0,279	0,314	0,296	0,303	0,307		
Massa Total [kg] =	2259,0	2219,3	2238,8	2230,9	2227,0		
Correcção das quantidades de água e agregado	Humidade [l/m ³] =	0	0	0	0	0	
	Água de absorção NA [l/m ³] =	4,2	4,1	4,2	4,1	4,1	
	Água de absorção AR [l/m ³] =	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
	Água total [l/m ³] =	265,0	288,2	276,8	281,4	283,7	
	Água de amassadura [l/m ³] =	265,0	288,2	276,8	281,4	283,7	
	Areia 0_2 [kg] =	527,6	511,0	519,2	515,9	514,2	
	Areia 0_4 [kg] =	525,6	509,0	517,2	513,9	512,3	
AFR [kg] =	0	0	0	0	0		
Quantidades corrigidas para:	1,40 [Litros] Cimento [g] =	931,5	902,1	916,6	910,7	907,9	
	Adição CV [g] =	314,9	305,0	309,9	307,9	306,9	
	FC [g] =	62,1	60,1	61,1	60,7	60,5	
	S_p [ml] =	7,9	7,7	7,8	7,8	7,7	
	S_p [g] =	8,5	8,2	8,4	8,3	8,3	
	Água [ml] =	371,1	403,5	387,6	394,0	397,2	
	Areia 0_2 [g] =	738,7	715,4	726,9	722,2	719,9	
	Areia 0_4 [g] =	735,9	712,6	724,1	719,4	717,2	
AFR [g] =	0	0	0	0	0		
Estudo reológico da argamassa:	Leituras:	d_1 [mm] =	155	285	237	261	261
		d_2 [mm] =	160	282	242	260	265
		t [seg.] =	28,0	7,0	10,0	8,0	8,0
	Parâmetros reológicos:	G_m 5,3 a 5,9 =	1,48	7,04	4,74	5,79	5,92
		R_m 1,14 a 1,3 =	0,36	1,43	1,00	1,25	1,25

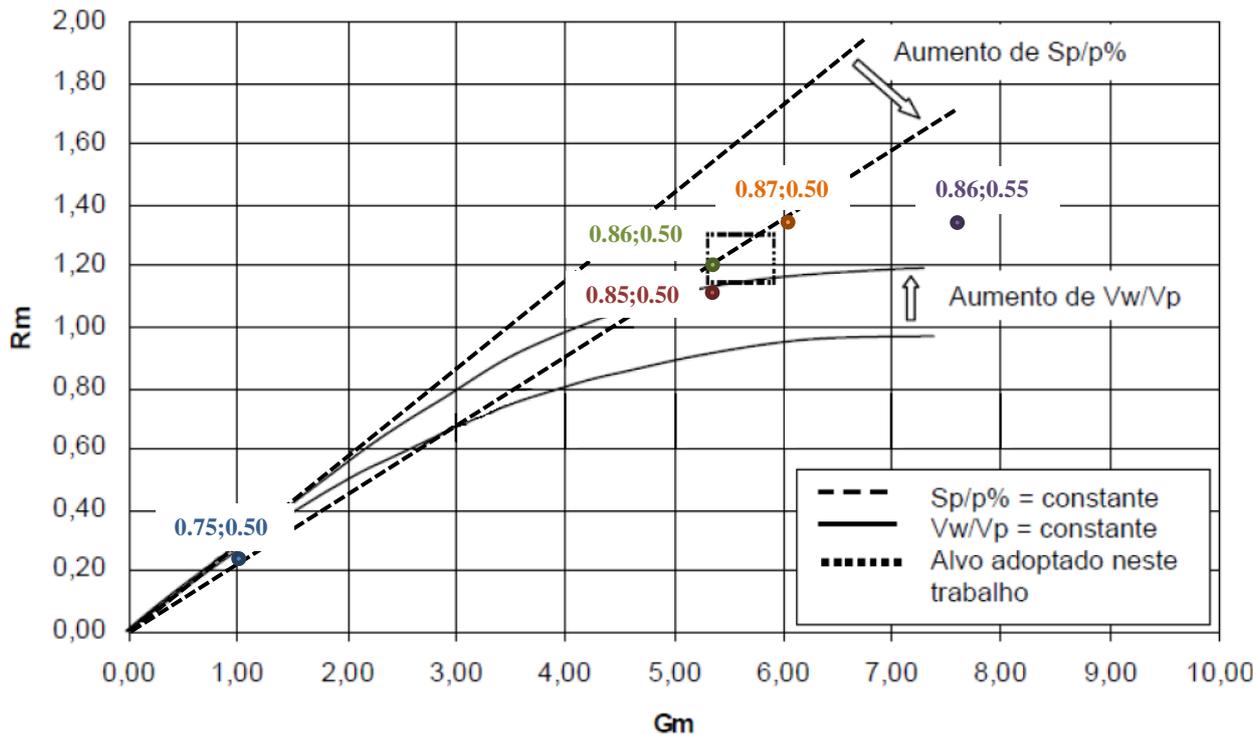


Figura I.1 - Representação gráfica dos valores de G_m e R_m para cada iteração de valores (V_w/V_p ; $S_p/p\%$), para as argamassas de referência de 45 MPa

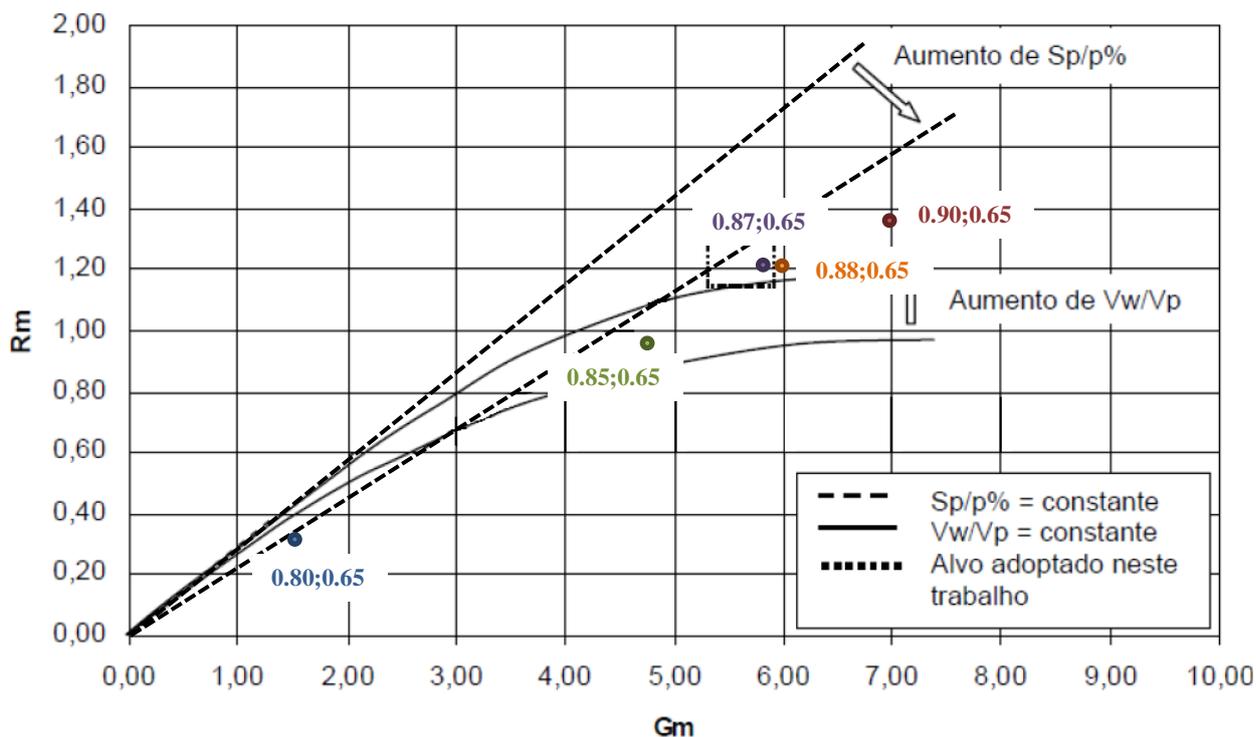


Figura I.2 - Representação gráfica dos valores de G_m e R_m para cada iteração de valores (V_w/V_p ; $S_p/p\%$), para as argamassas de referência de 65 MPa

Os pares de valores considerados como mais adequados estão assinalados a laranja, e encontram-se muito próximos do conjunto de valores proposto por Nepomuceno [1], ligeiramente acima.

Anexo II - Formulação das misturas

II.1. Materiais constituintes

São apresentados de seguida os materiais seleccionados na produção das AAC em estudo, com incorporação de FC e CV em misturas ternárias:

- ◆ cimento Portland CEM I 42,5 R, certificado segundo a NP EN 197-1, da Secil;
- ◆ cinzas volantes (CV), segundo a NP EN 450-1, da central termoeléctrica 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;
- ◆ areia fina (0/2) e areia grossa (0/4), de natureza siliciosa, de acordo com a NP EN 12620, da Soarvamil;
- ◆ água potável da rede de abastecimento pública de Lisboa, segundo a NP EN 1008.

II.2. Estudo em argamassas

II.2.1. 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 [1].

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 o médio 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

II.1 e na Tabela II.2 o cálculo das quantidades para as argamassas que utilizam os agregados 45 MPa e 65 MPa, respectivamente.

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 1,40 litros.

Finalmente, somando as quantidades de todos os constituintes para as oito 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 II.3).

Tabela II.3 - Cálculo das quantidades de amassadura para as argamassas de 45 MPa

		Identificação da argamassa:				
		100% AN	25% AFR + 25% AGR	50% AFR + 50% AGR	100% AFR + 0% AGR	
Parâmetros da composição		$f_{cm,28}$ [MPa] =	45,51	45,51	45,51	45,51
		W/C =	0,693	0,693	0,693	0,693
		V_p/V_s =	0,80	0,80	0,80	0,80
		V_w/V_p =	0,87	0,87	0,87	0,87
		$S_p/P\%$ =	0,50	0,50	0,50	0,50
		Tipo e classe de cimento:	142,5R	142,5R	142,5R	142,5R
		Mistura de finos: f_{Ad} =	0,60	0,60	0,60	0,60
		Mistura de adições: CV =	0,50	0,50	0,50	0,50
		FC =	0,10	0,10	0,10	0,10
		Mistura de agregados: Areia $_{02}$ =	0,50	0,375	0,25	0
		Areia $_{04}$ =	0,50	0,375	0,25	0
		AFR =	0	0,25	0,50	1,00
		Cálculos auxiliares	SIKAPLAST 898	♥ [kg/m ³] =	2678,00	2678,00
V_{sp}/V_p [m ³ /m ³] =	0,012514			0,012514	0,012514	0,012514
Material fino V_p [m ³ /m ³] =	0,319232			0,319232	0,319232	0,319232
Água V_w [m ³ /m ³] =	0,277732			0,277732	0,277732	0,277732
Superplast. V_{sp} [m ³ /m ³] =	0,003995			0,003995	0,003995	0,003995
Agregado fino V_s [m ³ /m ³] =	0,399041			0,399041	0,399041	0,399041
Quantidades teóricas para 1 m ³	Adição			Cimento [kg] =	401,0	401,0
		CV [kg] =	367,1	367,1	367,1	367,1
		FC [kg] =	86,8	86,8	86,8	86,8
		S_p [Litros] =	4,0	4,0	4,0	4,0
		S_p [kg] =	4,3	4,3	4,3	4,3
		Água [Litros] =	277,7	277,7	277,7	277,7
		Areia $_{02}$ [kg] =	518,8	389,1	259,4	0
		Areia $_{04}$ [kg] =	516,8	387,6	258,4	0
		AFR [kg] =	0	247,4	494,8	989,6
		W/C =	0,693	0,693	0,693	0,693
		W/MC =	0,362	0,362	0,362	0,362
		W/F =	0,325	0,325	0,325	0,325
		Correcção das quantidades de água e agregado		Massa Total [kg] =	2172,4	2160,9
Humidade [l/m ³] =	0			0	0	0
Água de absorção NA [l/m ³] =	4,1			3,1	2,1	0
Água de absorção AR [l/m ³] =	0,0			12,4	24,7	49,5
Água total [l/m ³] =	281,9			293,2	304,5	327,2
Água de amassadura [l/m ³] =	281,9			293,2	304,5	327,2
Areia $_{02}$ [kg] =	516,7			387,5	258,3	0
Areia $_{04}$ [kg] =	514,7			386,0	257,3	0
Quantidades corrigidas para:	1,40 [Litros]	Adição Cimento [g] =	561,3	561,3	561,3	561,3
		CV [g] =	514,0	514,0	514,0	514,0
		FC [g] =	121,6	121,6	121,6	121,6
		S_p [ml] =	5,6	5,6	5,6	5,6
		S_p [g] =	6,0	6,0	6,0	6,0
		Água [ml] =	394,6	410,5	426,4	458,1
		Areia $_{02}$ [g] =	723,3	542,5	361,7	0
		Areia $_{04}$ [g] =	720,6	540,4	360,3	0
		AFR [g] =	0	329,0	658,1	1316,2

Tabela II.4 - Cálculo das quantidades de amassadura para as argamassas de 65 MPa

		Identificação da argamassa:		100% AN	25% AFR + 25% AGR	50% AFR + 50% AGR	100% AFR + 0% AGR
		Parâmetros da composição		fc _{m,28} [MPa] =		68,10	68,10
	W/C =			0,431	0,431	0,431	0,431
	V _p /V _s =			0,80	0,80	0,80	0,80
	V _w /V _p =			0,88	0,88	0,88	0,88
	S _p /P% =			0,65	0,65	0,65	0,65
	Tipo e classe de cimento:			I 42,5R	I 42,5R	I 42,5R	I 42,5R
	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 =			0,50	0,375	0,25	0
	Areia 0/4 =			0,50	0,375	0,25	0
	AFR =			0	0,25	0,50	1
Cálculos auxiliares			♥ [kg/m ³] =		2867	2867	2867
	SIKAPLAST 898	V _{sp} /V _p [m ³ /m ³] =		0,017416	0,017416	0,017416	0,017416
	Material fino	V _p [m ³ /m ³] =		0,317721	0,317721	0,317721	0,317721
	Água	V _w [m ³ /m ³] =		0,279594	0,279594	0,279594	0,279594
	Superplast.	V _{sp} [m ³ /m ³] =		0,005534	0,005534	0,005534	0,005534
	Agregado fino	V _s [m ³ /m ³] =		0,397151	0,397151	0,397151	0,397151
Quantidades teóricas para 1 m ³		Cimento [kg] =		648,5	648,5	648,5	648,5
	Adição	CV [kg] =		219,2	219,2	219,2	219,2
		FC [kg] =		43,2	43,2	43,2	43,2
		S _p [Litros] =		5,5	5,5	5,5	5,5
		S _p [kg] =		5,9	5,9	5,9	5,9
		Água [Litros] =		279,6	279,6	279,6	279,6
		Areia 0/2 [kg] =		516,3	387,2	258,1	0
		Areia 0/4 [kg] =		514,3	385,7	257,2	0
		AFR [kg] =		0	231,3	462,7	925,4
		W/C =		0,431	0,431	0,431	0,431
		W/MC =		0,322	0,322	0,322	0,322
		W/F =		0,307	0,307	0,307	0,307
		Massa Total [kg] =		2227,0	2200,7	2174,4	2121,8
Correcção das quantidades de água e agregado		Humidade [l/m ³] =		0	0	0	0
		Água de absorção NA [l/m ³] =		4,1	3,1	2,1	0
		Água de absorção AR [l/m ³] =		0,0	17,3	34,7	69,3
		Água total [l/m ³] =		283,7	300,0	316,3	348,9
		Água de amassadura [l/m ³] =		283,7	300,0	316,3	348,9
		Areia 0/2 [kg] =		514,2	385,7	257,1	0
		Areia 0/4 [kg] =		512,3	384,2	256,1	0
		AFR [kg] =		0	214,0	428,0	856,1
Quantidades corrigidas para:	1,40 [Litros]	Cimento [g] =		907,9	907,9	907,9	907,9
		Adição CV [g] =		306,9	306,9	306,9	306,9
		FC [g] =		60,5	60,5	60,5	60,5
		S _p [ml] =		7,7	7,7	7,7	7,7
		S _p [g] =		8,3	8,3	8,3	8,3
		Água [ml] =		397,2	420,0	442,8	488,5
		Areia 0/2 [g] =		719,9	539,9	360,0	0
		Areia 0/4 [g] =		717,2	537,9	358,6	0
		AFR [g] =		0	299,6	599,2	1198,5

Tabela II.5 - Quantidades totais de todos os materiais necessários

	Quantidades não majoradas	Quantidades majoradas (x1,5)
Cimento (g)	5877	8820
Cinzas volantes (g)	3284	4930
Fíler calcário (g)	728	1100
Areia 0/2 (g)	3247	4870
Areia 0/4 (g)	3235	4850
AFR PF 45 (g)	2303	3460
AFR PF 65 (g)	2097	3150
Superplastificante (ml)	53	80
Água (ml)	3438	5160

II.2.2. Quantidade de agregado reciclado por fracção granulométrica

A substituição de agregado natural por agregado reciclado é feita em massa por fracção granulométrica, com o objectivo de reconstituir a curva granulométrica da mistura de areias. Considera-se que a última fracção considerada como agregado fino é 4-5,6 mm.

Admite-se que a mistura é sempre feita na mesma proporção, ou seja, metade areia fina e metade areia grossa. 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 II.4, ilustrando-se na Figura II.1 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 usado 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 necessária por fracção granulométrica, apresentadas na Tabela II.5.

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 II.6 - 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
				0,50	0,50		
Base	63	100,00%	100,00%	50,00%	50,00%	100,00%	100,00%
1	45	100,00%	100,00%	50,00%	50,00%	100,00%	100,00%
Base	31,5	100,00%	100,00%	50,00%	50,00%	100,00%	100,00%
1	22,4	100,00%	100,00%	50,00%	50,00%	100,00%	100,00%
Base	16	100,00%	100,00%	50,00%	50,00%	100,00%	100,00%
1	11,2	100,00%	100,00%	50,00%	50,00%	100,00%	100,00%
Base	8	100,00%	100,00%	50,00%	50,00%	100,00%	100,00%
1	5,6	100,00%	99,49%	50,00%	49,74%	99,74%	100,00%
Base	4	99,96%	98,21%	49,98%	49,10%	99,08%	99,96%
Base	2	99,95%	89,14%	49,97%	44,57%	94,54%	99,12%
Base	1	99,41%	59,37%	49,70%	29,69%	79,39%	90,81%
Base	0,5	80,69%	21,49%	40,34%	10,74%	51,09%	62,30%
Base	0,25	16,05%	3,54%	8,03%	1,77%	9,79%	21,05%
Base	0,125	0,31%	0,34%	0,16%	0,17%	0,33%	4,72%
Base	0,063	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,85%

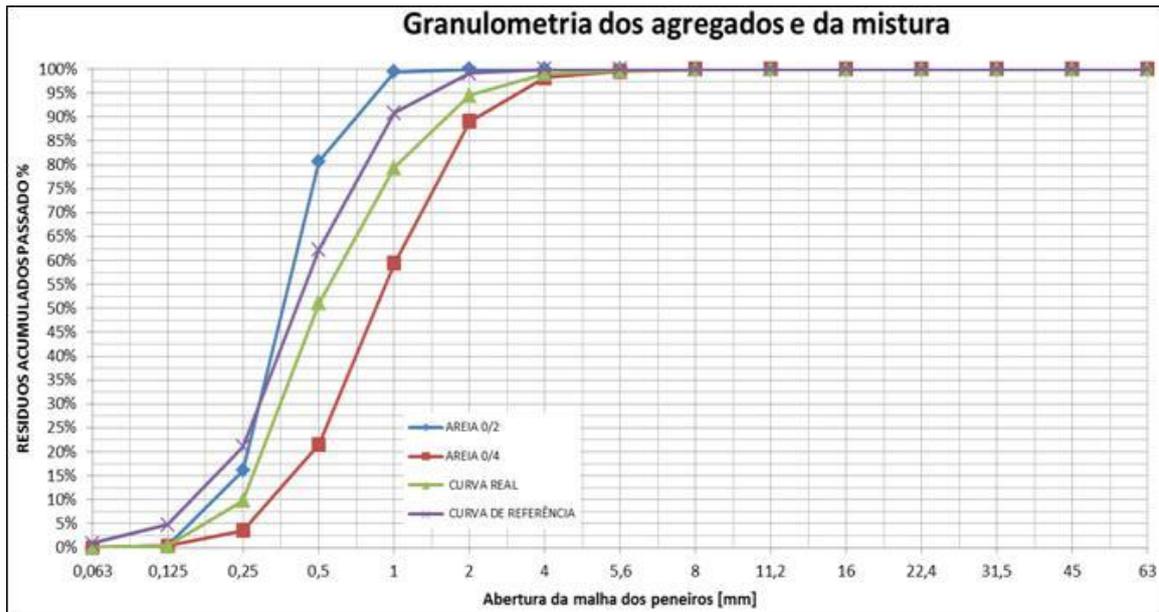


Figura II.3 - Curva granulométrica da mistura de areias e curva de referência

Tabela II.7 - Quantidades totais de AFR necessárias, por fracção

Fracção	Quantidades majoradas (x1,5)	
	PF 45 (kg)	PF 65 (kg)
4 a 5,6	2	2
2 a 4	10	10
1 a 2	34	32
0,500 a 1	64	60
0,250 a 0,500	93	87
0 a 0,250	22	21

Lisboa, 29 de Dezembro de 2014

Autores

Sara Santos
Aluna de Mestrado

Tiago Barroqueiro
Bolsheiro de investigação

Jorge de Brito
Professor Catedrático

Pedro Silva
Professor Adjunto