



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 2

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

PLANO DE INVESTIGAÇÃO / PLANEAMENTO DOS ENSAIOS AOS AGREGADOS

RELATÓRIO

Abril de 2013

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. PLANO DE INVESTIGAÇÃO	2
3.1. Tarefa 2 - Optimização do processo de britagem	2
3.2. Tarefa 3 - Auto-reprodutibilidade e optimização de classes de resistência	3
3.3. Tarefa 4 - Optimização do potencial de reciclagem em betões auto-compactáveis	5
3.4. Tarefa 5 - Optimização do potencial de reciclagem em betões de elevado desempenho	6
4. TÉCNICAS E NORMAS EXPERIMENTAIS	7
4.1. Ensaios de identificação dos agregados	7
4.1.1. Análise granulométrica	8
4.1.2. Massa volúmica e absorção de água	9
4.1.3. Evolução da absorção de água dos agregados reciclados	11
4.1.4. Baridade	12
4.1.5. Resistência à fragmentação	14
4.1.6. Teor de humidade	15
4.1.7. Índice de forma	16
5. BIBLIOGRAFIA	17

Índice de figuras

Figura 1. Diagrama da tarefa 2.	3
Figura 2. Diagrama da tarefa 3.	4
Figura 3. Diagrama da tarefa 4.	5
Figura 4. Diagrama da tarefa 5.	6
Figura 5. Betões auto-compactáveis (tarefa 5).	7
Figura 6. Máquina de peneiração com peneiros da série 933-2.	8
Figura 7. Pesagem e avaliação do estado saturado com superfície seca.	10
Figura 8. Submersão do conjunto (amostra, peneiros e suporte).....	12
Figura 9. Ensaio da evolução da absorção de água dos AR a decorrer.	12
Figura 10. Remoção do material excedente.	13
Figura 11. Pesagem do recipiente preenchido com agregado.	13
Figura 12. Máquina de peneirar e peneiros ASTM.	14
Figura 13. Máquina de <i>Los Angeles</i>	14
Figura 14. Agregados separados segundo a NP EN 933-2.	16
Figura 15. Medição de partícula.	16

Índice de tabelas

Tabela 1. Ensaios aos agregados.	7
Tabela 2. Massa mínima dos provetes de ensaio utilizados na análise granulométrica ...	9
Tabela 3. Massa mínima dos provetes de ensaio utilizados na determinação da massa volúmica e da absorção de água	10
Tabela 4. Capacidade mínima dos recipientes utilizados na determinação da baridade e do volume de vazios.....	13
Tabela 5. Massa mínima dos provetes de ensaio utilizados na análise granulométrica .	16

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 descreve o plano de investigação, apresentando a calendarização e gestão do Projecto FCT PTDC/ECM/118372/2010 - “Betão com agregados reciclados de elevado desempenho para a indústria da pré-fabricação (EXCELlentSUStainableCONcrete)”.

Deste modo, são apresentadas as diversas tarefas, devidamente caracterizadas, utilizando indicadores como: data de início; duração e descrição sumária. São ainda descritos os ensaios a realizar nos agregados naturais e reciclados, com o objectivo de analisar as características do produto em estudo.

2. Enquadramento e contexto

O projecto foca-se na produção de Betão de Elevado Desempenho (BED) e Betão Auto-Compactável (BAC) utilizando agregados reciclados (AR) provenientes da indústria de pré-fabricação.

A produção de betão a partir de AR pode contribuir de forma significativa para um aumento da sustentabilidade da indústria da construção. Permite a diminuição do consumo de recursos naturais e da deposição de resíduos em aterro.

O projecto está dividido em diversas fases complementares, envolvendo a análise e optimização dos betões produzidos.

Numa primeira etapa, serão seleccionados betões de origem (BO) provenientes da indústria da pré-fabricação e também BO produzidos sob condições laboratoriais controladas, a partir de agregados naturais (AN). Será dada importância ao processo de trituração dos BO, analisando-se as características dos AR produzidos a partir de trituração primária (habitualmente utilizada para a obtenção de AR) e trituração primária seguida de uma trituração secundária (usualmente realizada para a produção de AN).

Seleccionado o melhor método de trituração, as fases seguintes consistirão na produção de betões convencionais, de alto desempenho e auto-compactáveis. Serão produzidos betões recorrendo a AR com uma classe de resistência aproximada dos BO que lhes deram origem, variando as taxas de substituição de agregados finos reciclados (AFR) e grossos (AGR). Numa fase posterior, serão optimizadas as formulações para a obtenção

de betões com uma classe de resistência superior aos BO de onde provieram os AR utilizados, culminando em betões com resistência final acima de 80 MPa. Recorrer-se-á a superplastificantes, avaliando-se também a taxa de utilização que conduz a melhores características finais. Será analisado não só o desempenho mecânico dos betões produzidos, mas também o desempenho a nível de durabilidade, incluindo a resistência à carbonatação, ao ataque de cloretos e o comportamento na presença de água.

A partir dos dados obtidos, será proposta uma adaptação das leis constitutivas existentes para betões convencionais aos betões produzidos com agregados reciclados, tendo como referência o FIB Model Code 2010.

Como resultado final, será analisada a viabilidade da produção de BED e BAC a partir de AR provenientes da pré-fabricação, permitindo a esta indústria ser mais sustentável, reduzindo os impactes ambientais e económicos.

3. Plano de investigação

O projecto encontra-se dividido em quatro tarefas cujos resultados finais terão influência na determinação das condições das fases subsequentes.

3.1. Tarefa 2 - Optimização do processo de britagem

A tarefa 2 incide sobre a influência que a forma dos agregados reciclados (que depende do seu processo de britagem) tem nas propriedades do betão.

Os agregados reciclados terão origem na trituração de produtos da pré-fabricação (PF), com classes de resistência à compressão de 20, 45 e 65 MPa, e em betões produzidos em laboratório (LC), com as mesmas classes de resistência.

Serão considerados dois processos de britagem: uma trituração primária (TP) e uma trituração primária e secundária (TP+TS).

A trituração primária terá lugar numa britadeira de maxilas, pertencente ao Laboratório de Construção do Instituto Superior Técnico, enquanto a trituração primária e secundária ocorrerá como um processo contínuo numa britadeira de maxilas (trituração primária) passando de seguida por um impactor / moinho de martelos (trituração secundária).

Estes dois processos irão ser efectuados para cada tipo de agregado (natural, de pré-fabricação e de laboratório) e também para cada classe de resistência do BO (20, 45 e 65 MPa).

A análise das características dos agregados, associados aos processos de britagem descritos, será realizada através dos ensaios descritos no Capítulo 4.

As fases seguintes desta tarefa consistirão na obtenção de três famílias de betões, utilizando agregados reciclados, que reproduzam a mesma resistência do betão de origem desses agregados, como definido na Figura 1.

Dos resultados obtidos nesta fase, pretende-se seleccionar o método mais eficaz de produção de agregados reciclados, método esse que será adoptado para restantes fases do projecto.

Esta tarefa foi iniciada em Abril de 2012 e terá uma duração de dezoito meses.

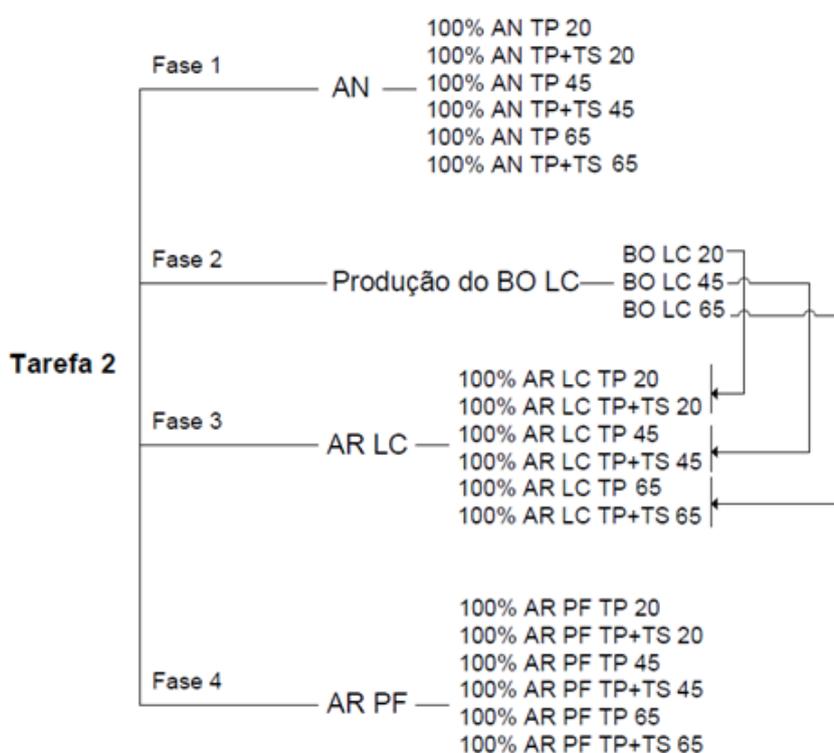


Figura 1. Diagrama da tarefa 2.

3.2. Tarefa 3 - Auto-reprodutibilidade e otimização de classes de resistência

A terceira tarefa do projecto consiste em quatro fases (Figura 2). Na primeira, serão criadas três famílias de betão com os mesmos níveis-alvo de resistência à compressão. Cada família irá compreender um betão de referência e seis BAR com percentagens de substituição de agregados naturais finos por agregados reciclados finos e de agregados naturais grossos por agregados reciclados grossos de 0/25, 25/0, 25/25, 0/100, 100/0, 100/100, respectivamente.

Os agregados reciclados produzidos em laboratório serão utilizados, procurando fazer corresponder a resistência do seu betão de origem à resistência do BAR alvo. Assim, no final desta fase, pretende-se perceber a viabilidade da auto-reprodutibilidade de um BAR feito a partir de um dado betão de referência ou de outro BAR.

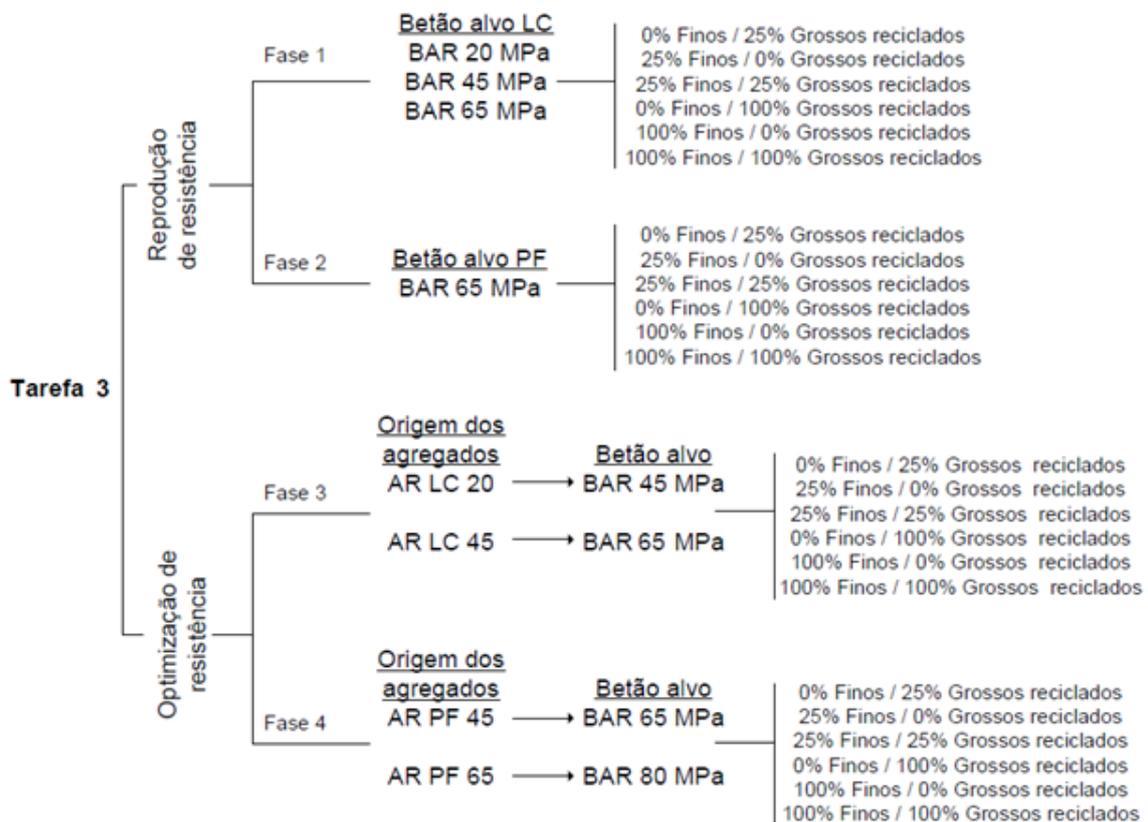


Figura 2. Diagrama da tarefa 3.

Na segunda fase da tarefa 3, pretende-se reproduzir a resistência mecânica do BO da pré-fabricação com classe de resistência de 65 MPa, utilizando as mesmas percentagens de agregados finos e grossos da fase anterior.

Nas fases 3 e 4, pretende-se otimizar os betões procurando atingir classes de resistência mais elevadas, usando agregados com resistências mais baixas. À semelhança das fases 1 e 2, a percentagem de finos e grossos irá variar. Deste modo, na terceira fase, serão produzidas duas famílias, com resistências alvo de 45 e 65 MPa, utilizando agregados produzidos em laboratório de 20 e 45 MPa. Na quarta fase, será seguida a mesma metodologia mas para agregados de 45 e 65 MPa provenientes da indústria da pré-fabricação de modo a atingir resistências alvo de 65 e 80 MPa, respectivamente.

Com a comparação dos resultados obtidos, para as diversas famílias, será possível compreender, para cada classe de resistência alvo, a perda de desempenho resultante da incorporação de diferentes quantidades de AR (finos e grossos). No mesmo panorama, procura-se ainda avaliar o método de caracterização de AR e de BAR, procurando-se provar que este funciona quer quando sejam utilizados betões produzidos em laboratório quer resíduos reais de betão pré-fabricado.

A tarefa 3 tem uma duração prevista de 12 meses, estando o seu início agendado para 1 de Setembro de 2013.

3.3. Tarefa 4 - Optimização do potencial de reciclagem em betões auto-compactáveis

A tarefa 4 aborda a produção de betões auto-compactáveis com base no método de Nepomuceno em várias tarefas (Figura 3). Primeiro, propõe-se reproduzir as classes de resistência de 45 e 65 MPa utilizando apenas agregados naturais (100% AN) e agregados da pré-fabricação, em que se varia a percentagem de finos e grossos na composição do betão (AFR/AGR%: 0/25%; 25/0%; 25/25%; 0/100%, 100/0%; 100/100%).

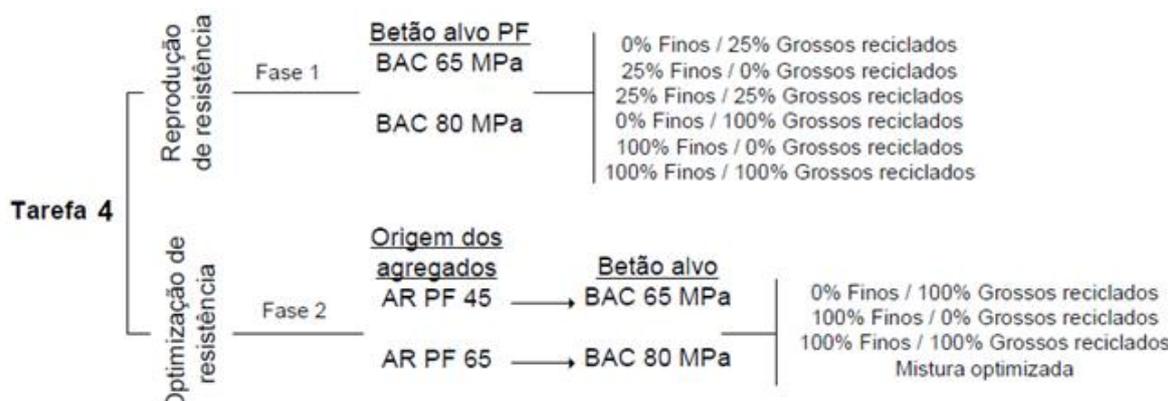


Figura 3. Diagrama da tarefa 4.

Na segunda fase da tarefa, pretende-se otimizar a resistência mecânica dos betões para 65 e 80 MPa, utilizando agregados com 45 e 65 MPa, respectivamente. Nesta fase, irão ser produzidas uma amassadura com 100% de AN, e três amassaduras com variação da percentagem de agregados reciclados finos e grossos (AFR/AGR%: 0/100%; 100/0%; 100/100%). Posteriormente, prevê-se a optimização de duas misturas de betões auto-compactáveis com 65 e 80 MPa de resistência, variando as quantidades dos diversos componentes, procurando encontrar um equilíbrio entre o com-

portamento mecânico, a durabilidade e o custo.

Dos resultados obtidos, será seleccionada uma mistura otimizada de betão auto-compactável. A tarefa 4 terá início em Setembro de 2014, com uma duração prevista de 6 meses.

3.4. Tarefa 5 - Otimização do potencial de reciclagem em betões de elevado desempenho

Na tarefa 5, será realizada a abordagem aos betões de elevado desempenho (Figura 4). Serão realizadas três tipos de amassaduras com agregados de origem: natural, provenientes de laboratório e da pré-fabricação com classes de resistência de 65 MPa. Nas amassaduras de referência, com 100% de agregados naturais, irá fazer-se variar a relação a/c, ajustando a percentagem de superplastificante para cada amassadura com o objectivo final de obter betões com classes de resistência superior a 80 MPa, mas com a mesma trabalhabilidade entre si. Para as amassaduras com agregados reciclados, tem-se o mesmo objectivo, tendo em conta os resultados obtidos na tarefa 3. Para cada tipo de agregado (de laboratório e de pré-fabricação), obter-se-á uma mistura otimizada que definirá qual a percentagem de agregados finos e grossos reciclados a aplicar a cada amassadura.

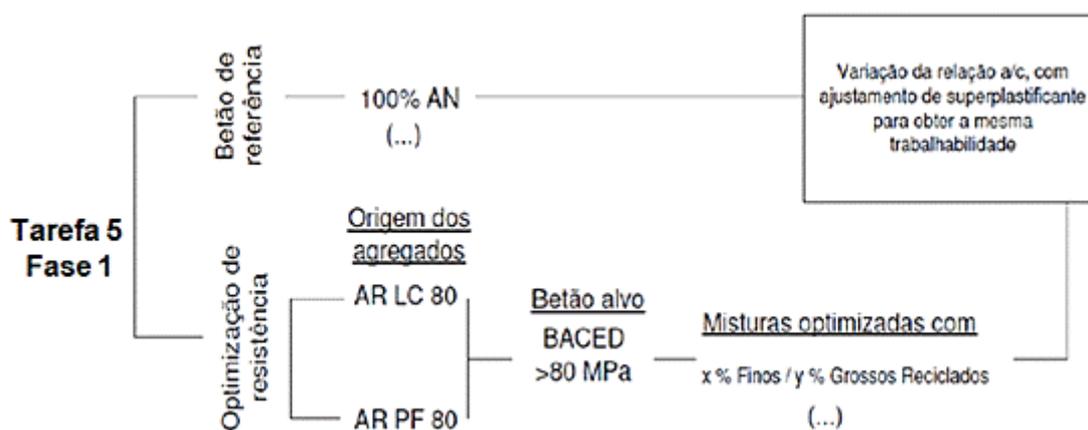


Figura 4. Diagrama da tarefa 5.

Ainda na tarefa 5, pretende-se obter betão auto-compactável de elevado desempenho. Os agregados utilizados serão apenas provenientes da pré-fabricação e com classe de resistência de 65 MPa.

Serão produzidas três tipos de amassaduras, também variando a percentagem de finos e grossos reciclados (AFR/AGR%: 0/100%; 100/0%; 100/100%). Para esta fase, serão

realizadas várias combinações da composição dos betões, quer variando a percentagem e o tipo de superplastificante a adicionar, quer variando as quantidades e/ou tipo de adições (cinzas volantes, fíler calcário, escória de alto forno ou sílica de fumo com misturas binárias e/ou ternárias), com vista a melhorar o desempenho em cada amassadura (Figura 5). A tarefa 5 terá duração de 12 meses com início em Abril de 2014.

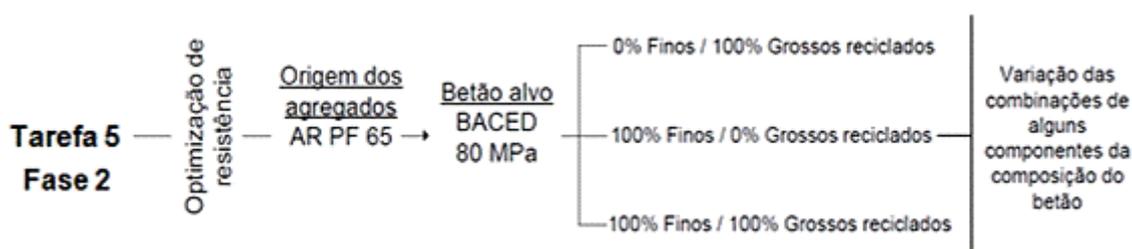


Figura 5. Betões auto-compactáveis (tarefa 5).

4. Técnicas e normas experimentais

Com a realização dos ensaios aos agregados, pretende-se avaliar as suas características, caracterizando-os o mais rigorosamente possível. Assim, são descritos os diferentes ensaios, normas e procedimentos associados.

4.1. Ensaios de identificação dos agregados

As características dos agregados possuem uma relevância evidente nas propriedades dos betões onde são empregues. Assim, na caracterização de um betão, torna-se importante a identificação e quantificação de características de forma, tamanho, resistência e porosidade dos agregados. Na Tabela 1, são apresentados os ensaios a realizar neste domínio.

Tabela 1. Ensaios aos agregados.

Agregados	Análise granulométrica	NP EN 933-1:2000
	Índice volumétrico	NP EN 933-4:2011
	Resistência à fragmentação	NP EN 1097-2:2003
	Baridade	NP EN 1097-3:2002
	Teor em água	NP EN 1097-5:2011
	Massa volúmica	NP EN 1097-6:2003
	Absorção de água	NP EN 1097-6:2003

4.1.1. Análise granulométrica

Este ensaio será realizado de acordo com a metodologia especificada na norma NP EN 933-1 (2000) “*Ensaaios das propriedades geométricas dos agregados - Parte 1: Análise granulométrica. Método de peneiração*”.

A análise granulométrica, além da quantificação estatística das diferentes dimensões e correspondentes fracções das partículas constituintes dos agregados, é fundamental na formulação e maximização da compacidade de um betão.

No entanto, neste trabalho, os diferentes agregados (naturais e reciclados) são peneirados e separados pelas diversas fracções granulométricas, não sendo por isso necessário recorrer às curvas granulométricas dos agregados para a determinação da composição que proporcionaria um betão com a maior compacidade possível. Relativamente aos agregados reciclados de betão, para além do referido, pretende-se avaliar a quantidade de AR, que é necessário peneirar. Para execução do procedimento normativo, é necessário o seguinte equipamento / material: estufa ventilada à temperatura de 110 ± 5 °C; peneiros de ensaio, conforme especificado na norma NP EN 933-2; máquina de peneiração (Figura 6); balança de precisão de $\pm 0,1\%$ da massa a determinar. Relativamente à massa mínima do ensaio, esta é determinada em função da máxima dimensão do agregado em estudo, ou seja, na menor abertura do peneiro através do qual passa, pelo menos, 90% da massa dos agregados (Tabela 2).



Figura 6. Máquina de peneiração com peneiros da série 933-2.

Tabela 2. Massa mínima dos provetes de ensaio utilizados na análise granulométrica

Máxima dimensão $D_{máx}$ (mm)	Massa mínima do provete (kg)
63	40
32	10
16	2,6
8	0,6
≤ 4	0,2

As amostras de cada provete são secas em estufa até atingirem massa constante (variação de massa inferior a 0.1%, em pesagens consecutivas, intervaladas de pelo menos 4 horas). Para a realização do ensaio, o provete é despejado numa coluna de 10 peneiros (0.063-31.5 mm) assente no agitador mecânico. Posteriormente, os peneiros são agitados mecanicamente, até que a massa do material retido em cada peneiro não se altere mais do que 1% durante 1 minuto de peneiração. O material retido no peneiro de maior dimensão é pesado e a sua massa registada. A operação é repetida para os peneiros de malha inferior e também para o material existente no refugo. A curva granulométrica é determinada através do cálculo da percentagem retida em cada peneiro e pela percentagem de finos que passou no peneiro de 0,063 mm. Os resultados são válidos caso a diferença entre a soma das massas retidas e a massa da amostra seja inferior a 1%.

4.1.2. Massa volúmica e absorção de água

A medição dos agregados através da pesagem, conveniente por motivos de precisão, requer conversão volumétrica através da massa volúmica. Relativamente à absorção de água, esta pode influenciar de forma significativa a relação água / cimento efectiva dos betões produzidos e, conseqüentemente, a consistência e a trabalhabilidade dos mesmos. Será seguida e adaptada a metodologia descrita pela norma NP EN 1097-6 (2003) “*Ensaio das propriedades mecânicas e físicas dos agregados - Parte 6: Determinação da massa volúmica e da absorção de água*”. Para executar o referido procedimento, é necessário o seguinte equipamento / material: estufa ventilada à temperatura de 110 ± 5 °C; peneiros de ensaio; máquina de peneirar; balança de precisão de $\pm 0,1\%$ da massa a determinar; termómetro graduado; cone troncocónico e pilão para os agregados finos (Figura 7); picnómetro de volume adequado à dimensão da amostra. A massa da amostra para as partículas de dimensão entre 4 e 31.5 mm é obtida através da Tabela 3. Os valores variam consoante o $D_{máx}$ dos agregados. Relativamente às partículas de agregado

de dimensão entre 0,063 e 4 mm, é utilizada uma massa superior a 1 kg.



Figura 7. Pesagem e avaliação do estado saturado com superfície seca.

Tabela 3. Massa mínima dos provetes de ensaio utilizados na determinação da massa volúmica e da absorção de água

Máxima dimensão $D_{\text{máx}}$ (mm)	Capacidade mínima do recipiente (kg)
31,5	5
16	2
8	1

Em ambos os casos o provete deve ser lavado. O procedimento de ensaio é semelhante para os dois casos referidos. Na sua execução, o provete é colocado no picnómetro com água e agitado cuidadosamente, de forma a eliminar o ar ocluído. Após 24 horas, é adicionada água no picnómetro até transbordar e colocada a tampa (deve-se eliminar o ar existente no interior). O picnómetro, seco por fora, é pesado. A temperatura da água é registada. O agregado é removido do picnómetro e seco com um pano até que as películas de água desapareçam. O provete saturado com superfície seca é colocado num tabuleiro e pesado. O picnómetro é cheio novamente com água e com a tampa colocada e o seu exterior seco é pesado. Por fim, o agregado é colocado em estufa ventilada até se obter massa constante. As massas volúmicas dos agregados são calculadas através das seguintes expressões:

$$\rho_a = \frac{M_4}{\frac{M_4 - (M_2 - M_3)}{\rho_w}} \quad [\text{kg/m}^3] \quad (1)$$

$$\rho_{rd} = \frac{M_4}{\frac{M_1 - (M_2 - M_3)}{\rho_w}} \quad [\text{kg/m}^3] \quad (2)$$

$$\rho_{ssd} = \frac{M_1}{\frac{M_4 - (M_2 - M_3)}{\rho_w}} \quad [\text{kg/m}^3] \quad (3)$$

Relativamente à absorção de água (em percentagem da massa seca), após a imersão durante 24 horas, esta obtida através da fórmula:

$$WA_{24} = \frac{M_1 - M_4}{M_4} \times 100 \text{ [%]} \quad (4)$$

Onde:

ρ_a - massa volúmica do material impermeável das partículas (kg/dm^3);

ρ_{rd} - massa volúmica das partículas secas em estufa (kg/dm^3);

ρ_{ssd} - massa volúmica das partículas saturadas com superfície seca (kg/dm^3);

ρ_w - massa volúmica da água (kg/dm^3);

WA_{24} - absorção de água após imersão em água durante 24 h (%);

M_1 - massa do agregado saturado com superfície seca (g);

M_2 - massa do picnómetro contendo o provete imerso na água e saturado (g);

M_3 - massa do picnómetro cheio de água (g);

M_4 - massa do provete de ensaio seco em estufa (g).

4.1.3. Evolução da absorção de água dos agregados reciclados

Dada a possível interferência dos agregados reciclados na quantidade disponível de água de amassadura, é forçosa uma avaliação detalhada da evolução da absorção de água dos mesmos. Não existindo uma norma europeia estabelecida para proceder a esta avaliação, será tido como base o procedimento proposto por Leite (2001) referente aos agregados finos reciclados e incorporação de hexametáfosfato de sódio como desfloculante. Para realizar o ensaio, é necessário o seguinte equipamento / material: estufa ventilada à temperatura de 110 ± 5 °C; balança de precisão de $\pm 0,1$ % da massa a determinar; peneiro de malha e peneiro de fundo, fita aderente e suporte para os peneiros (Figura 8); tanque de água (Figura 9). A dimensão da amostra deve estar compreendida entre 1,0 e 1,5 kg e ser seca em estufa ventilada à temperatura de (110 ± 5) °C até atingir massa constante. Na realização do ensaio, a amostra é colocada dentro do peneiro de fundo (refugo) e tapada com o peneiro de malha de 45 μm . A superfície de encaixe é isolada com fita aderente para evitar a saída de material. Os peneiros são colocados no suporte para peneiros e o conjunto é submerso cuidadosamente no tanque de água. O instante e massa iniciais são registados. A massa do conjunto deve ser registada em intervalos de tempo suficientes para descrever a curva da evolução da absorção de água. Antes de cada leitura, os peneiros são agitados tenuemente para libertar o ar retido. A

última leitura de massa é registada 24 h após a leitura inicial.



Figura 8. Submersão do conjunto (amostra, peneiros e suporte).



Figura 9. Ensaio da evolução da absorção de água dos AR a decorrer.

A quantidade total de água absorvida às 24 h (A_t) resulta da diferença das massas no instante inicial e no instante final:

$$A_t = m_{24:00} - m_{00:00} \quad (5)$$

A quantidade de água absorvida no instante i (A_i) é igual a:

$$A_i = m_i - m_{00:00} \quad (6)$$

Daqui resulta a absorção de água no instante i (W_{Ai}), em percentagem relativa à absorção potencial:

$$W_{Ai}(\%) = \frac{A_i}{A_t} \times 100 \quad (7)$$

4.1.4. Baridade

A baridade, ou massa volúmica aparente, refere-se à massa por unidade de volume aparente de um dado agregado, isto é, tem em conta o volume de agregados e o volume de vazios entre os agregados. Este ensaio será realizado de acordo com a norma NP EN 1097-3 (2002) “*Ensaio das propriedades mecânicas e físicas dos agregados - Parte 3: Método para a determinação da massa volúmica e dos vazios*”. Para efectuar o procedimento constante da norma, é necessário o seguinte equipamento / material: estufa ventilada à temperatura de 110 ± 5 °C; balança de precisão de $\pm 0,1$ % da massa a determinar; varão metálico (Figura 10); contentor cilíndrico estanque em aço inoxidável, de volume variável em função da máxima dimensão dos agregados a ensaiar (Figura 11).



Figura 10. Remoção do material excedente.



Figura 11. Pesagem do recipiente preenchido com agregado.

A massa da amostra varia com a máxima dimensão dos agregados, de acordo com a Tabela 4.

Tabela 4. Capacidade mínima dos recipientes utilizados na determinação da baridade e do volume de vazios

Máxima dimensão $D_{\text{máx}}$ (mm)	Capacidade mínima do recipiente (l)
63	20
32	10
16	5
8	1

Para a elaboração do ensaio, três provetes (previamente colocados em estufa ventilada até atingirem massa constante) com 120 e 150% da massa necessária para encher o recipiente são preparados. O recipiente, após limpo e seco, é pesado. Com o auxílio de uma pá e sem compactação, o recipiente é cheio com agregados até transbordar. O material excedente é retirado com uma régua e a superfície é nivelada. O recipiente cheio é pesado e a sua massa registada. O procedimento é repetido para os restantes provetes de ensaio. A baridade é calculada através da seguinte expressão:

$$\rho_i = \frac{M_2 - M_1}{V_r} \times 100 \text{ [%]} \quad (8)$$

Onde:

ρ_i - massa volúmica aparente do provete de ensaio i (kg/dm^3);

M_1 - massa do recipiente de ensaio (kg);

M_2 - massa do recipiente com o provete de ensaio (kg);

V_r - volume do recipiente de ensaio (dm^3).

4.1.5. Resistência à fragmentação

Este ensaio destina-se a determinar a perda de massa de um dado agregado quando sujeito ao desgaste. Permite fazer correlações entre a capacidade resistente dos agregados e as características mecânicas do betão (tensões de rotura à compressão e flexão). Será seguida a norma NP EN 1097-2 (2003) “*Ensaio de desgaste pela máquina de Los Angeles*”. Para a realização do procedimento constante na norma, é necessário o seguinte equipamento / material: estufa ventilada à temperatura de 110 ± 5 °C; peneiros da série ASTM (Figura 13); máquina de peneirar (Figura 12); balança de precisão de ± 1 g; carga abrasiva constituída por esferas de aço (de 6 a 12 mm de diâmetro, dependendo da composição granulométrica do provete de ensaio); máquina de *Los Angeles* (Figura 13).



Figura 12. Máquina de peneirar e peneiros ASTM.



Figura 13. Máquina de *Los Angeles*.

A massa da amostra, composta por diversas fracções, é fixada pela norma NP EN 1097-2 (2003). Para a execução do ensaio, é necessário constituir uma carga abrasiva que varia segundo o especificado na norma. O provete de ensaio e a carga abrasiva são introduzidos na máquina de *Los Angeles* e esta é tapada. A máquina é posta a funcionar até a o cilindro efectuar, à velocidade de 30 a 33 rpm, 500 rotações. O material é retirado do interior da câmara e peneirado utilizando um peneiro com abertura de 1,70 mm. Deve-se colocar um peneiro de maior abertura sobre o primeiro para proteger a sua malha. O material é lavado sobre o peneiro de 1,68 mm e seco em estufa ventilada, até atingir massa constante. Por

fim, o material é pesado e registado o valor da sua massa. A perda por desgaste na máquina de Los Angeles (P_d) é calculada segundo a seguinte equação:

$$P_d = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100 \text{ [%]} \quad (9)$$

Onde:

P_d - índice de forma;

m_1 - massa do provete de ensaio (g);

m_2 - massa do material retido no peneiro de malha 1,7 mm (g).

4.1.6. Teor de humidade

É importante para os agregados reciclados a determinação do seu teor de água. A relevância do teor de humidade dos agregados reciclados deve-se à sua elevada capacidade de absorção de água, com influência na relação a/c efectiva da amassadura, contrariamente ao verificado nos agregados primários. O ensaio será realizado de acordo com o especificado pela norma NP EN 1097-5 (2011) “*Ensaaios das propriedades mecânicas e físicas dos agregados - Parte 5: Determinação do teor de humidade por secagem em estufa ventilada*”. Para se efectuar o procedimento normativo, é necessário o seguinte equipamento / material: estufa ventilada a temperatura de 110 ± 5 °C e balança de precisão de $\pm 0,1\%$ da massa a determinar. As amostras laboratoriais devem ser reduzidas de acordo com a EN 932-2. A massa mínima do provete é calculada a partir do valor da abertura da malha do peneiro de maior abertura (D) em milímetros (com $D \geq 1,0$ mm, a massa mínima, em kg, deve ser $0,2 \times D$). Para a realização do ensaio, o provete com o seu teor de humidade intrínseco é pesado e a sua massa registada. O provete é colocado no forno e seco a uma temperatura constante de (110 ± 5) °C, durante pelo menos 24 h, até atingir massa constante (diferença entre as duas pesagens ser menor do que 0,1%). Finalmente, é retirado do forno e pesado, sendo registado o valor da sua massa. A humidade do agregado, W, em percentagem, é obtida através da fórmula:

$$W = \frac{M_h - M_s}{M_h} \times 100 \text{ [%]} \quad (10)$$

Onde:

W - humidade do agregado (%);

M_h - massa do agregado com teor de humidade intrínseco (g);

M_s - massa do agregado seco (g).

4.1.7. Índice de forma

O índice de forma reflecte a geometria dos agregados grossos, ou seja, granulometrias entre 4 e 63 mm, caracterizando-os como partículas cúbicas ou não-cúbicas (Figura 14). Como parâmetro, permite prever o efeito dos agregados em características do betão como no desempenho mecânico, através da compacidade da mistura, ou na trabalhabilidade, afectando a quantidade de água necessária para manter o abaixamento do betão.

O ensaio de índice de forma será realizado de acordo com a norma NP EN 933-4 (2011) “Ensaio das propriedades geométricas dos agregados - Parte 4: Determinação da forma das partículas - Índice de forma”. Para executar o procedimento normativo, é necessário o seguinte equipamento / material: estufa ventilada a temperatura de 110 ± 5 °C; peneiros de ensaio; máquina de peneirar; balança de precisão de $\pm 0,1\%$ da massa a determinar e paquímetro (Figura 15).



Figura 14. Agregados separados segundo a NP EN 933-2.



Figura 15. Medição de partícula.

A massa mínima do provete varia com $D_{\text{máx}}$, sendo que, quando o valor de $D_{\text{máx}}$ não se encontra na Tabela 5, a massa mínima da amostra tem que ser interpolada.

Tabela 5. Massa mínima dos provetes de ensaio utilizados na análise granulométrica

Máxima dimensão $D_{\text{máx}}$ (mm)	Massa mínima do provete (kg)
63	45
32	6
16	1
8	0,1

Na preparação dos provetes de ensaio, estes devem ser secos em estufa ventilada à temperatura de (110 ± 5) °C até ser obtida massa constante. Na realização do ensaio, a amostra é peneirada com o objectivo de ser separada nas diversas fracções granulométricas. A massa de cada fracção granulométrica é registada, sendo determinada a percentagem de cada uma em relação à massa total da amostra. Todas as fracções com percentagem inferior a 10% são desprezadas. Posteriormente, a dimensão máxima e mínima de cada partícula é medida, sendo juntas, para cada fracção granulométrica considerada, todas as partículas não cúbicas (partículas cuja dimensão máxima é superior ao triplo da dimensão mínima). As partículas não cúbicas de cada fracção são pesadas e a sua massa registada. O índice de forma (SI) é calculado segundo a seguinte equação:

$$SI = \frac{\sum M_{2i}}{\sum M_{1i}} \times 100 [\%] \quad (11)$$

Onde:

SI - índice de forma;

$\sum M_{1i}$ - somatório das massas das partículas de cada uma das fracções granulométricas ensaiadas (g);

$\sum M_{2i}$ - somatório das massas das partículas não-cúbicas de cada uma das fracções granulométricas ensaiadas (g).

5. Bibliografia

Leite, M. (2001) - Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de Resíduos de Construção e Demolição, Tese de Doutoramento em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil.

NP EN 1097-2 (2003) - Ensaio das propriedades mecânicas e físicas dos agregados: Determinação da resistência à fragmentação. Los Angeles, IPQ.

NP EN 1097-3 (2003) - Ensaio para a determinação das propriedades mecânicas e físicas dos agregados: Método para a determinação da massa volúmica e dos vazios, IPQ.

NP EN 1097-5 (2011) - Ensaio das propriedades mecânicas e físicas dos agregados: Determinação do teor de humidade por secagem em estufa ventilada, IPQ.

NP EN 1097-6 (2003) - Ensaio das propriedades mecânicas e físicas dos agregados: Determinação da massa volúmica e da absorção de água, IPQ.

NP EN 933-1 (2000) - Ensaio das propriedades geométricas dos agregados: Análise granulométrica. Método de peneiração, IPQ.

NP EN 933-4 (2011) - Ensaio das propriedades geométricas dos agregados: Determinação da forma das partículas. Índice de forma, IPQ.

Lisboa, 1 de Abril de 2013

Autores

Diogo Pedro
Bolsheiro de Investigação

Alexandra Rosa
Bolsheiro de Investigação

Jorge de Brito
Professor Catedrático

Luís Evangelista
Professor Adjunto

Pedro Silva
Professor Adjunto