

BETÃO AUTO-COMPACTÁVEL COM AGREGADOS RECICLADOS PROVENIENTES DA PRÉ-FABRICAÇÃO

A. Rosa¹, J. de Brito^{1*} e P. Silva²

1: DECivil - ICIST
Instituto Superior Técnico
Universidade Técnica de Lisboa
Av. Rovisco Pais, 1049-001 Lisboa
e-mail: alexandra.rosa@ist.utl.pt, jb@civil.ist.utl.pt

2: ADEC - ISEL
Instituto Superior Engenharia de Lisboa
Instituto Politécnico de Lisboa
Rua Conselheiro Emídio Navarro, 1, 1959-007 Lisboa
e-mail: silvapm@dec.isel.pt

Palavras-chave: Betão auto-compactável, agregados reciclados, pré-fabricação

Resumo. *A crescente necessidade de tornar a construção mais sustentável e o intuito de contribuir com soluções de reaproveitamento e de escoamento dos desperdícios produzidos na indústria da construção foram determinantes para o financiamento atribuído a um projecto de investigação, com o objectivo de avaliar a viabilidade da utilização de agregados reciclados de betão provenientes da indústria de pré-fabricação para a produção de betões auto-compactáveis (BAC). Desta forma, não só se pode contribuir positivamente para a melhoria da qualidade final das peças produzidas pela indústria de pré-fabricação, dispensando a utilização de métodos de vibração falíveis, mas também se contribui para a sustentabilidade do meio ambiente, minimizando o consumo de recursos naturais e a deposição de aterros de resíduos.*

O projecto é subdividido em diversas fases de optimização e de análise. Numa fase inicial, serão produzidos e seleccionados os betões de origem (BO), onde se incluem os materiais produzidos em laboratório e os materiais provenientes de estruturas pré-fabricadas, os quais darão origem aos agregados a analisar. Esses agregados reciclados (AR) sofrerão um processo de trituração orientado (trituração primária e trituração primária e secundária) que pode influenciar as características do próprio betão. Dos resultados obtidos, selecciona-se o método de trituração a adoptar para as fases subsequentes. Estas consistirão na produção de betões convencionais e auto-compactáveis, que reproduzam aproximadamente a mesma classe de resistência dos betões de origem, nomeadamente 20, 45, 65 e 80 MPa, variando a sua composição (rácio a/c, adições e superplastificantes) e as taxas de agregados reciclados finos (AFR) e grossos (AGR). As percentagens de substituição AFR/AGR a considerar serão: 0/25, 25/0, 25/25, 0/100, 100/0 e 100/100%. Posteriormente, será efectuada a optimização desses betões para classes de resistência mais elevadas, utilizando, para o efeito, agregados reciclados com resistências mecânicas correspondentes a uma classe inferior. Serão incluídos neste estudo os betões de elevado desempenho auto-compactáveis, cuja resistência se pretende que seja igual ou superior a 80 MPa. Em todas as fases, serão executados ensaios de avaliação às características mecânicas e de durabilidade dos betões, incluindo a análise microestrutural para a observação da evolução da estrutura porosa da pasta e dos agregados reciclados e da interface pasta/agregados. Pretende-se obter como resultado final um betão com agregados reciclados com agregados reciclados, cujas propriedades sejam compatíveis ou superiores às de um betão auto-compactável com agregados naturais.

1. INTRODUÇÃO

O consumo de recursos naturais para a actividade da construção tem vindo a crescer nas últimas décadas, assim como a produção de resíduos de demolição e de trabalhos de reabilitação. Este processo de “construção-demolição” colocou significativa pressão nos recursos naturais, especialmente os agregados naturais, e gerou níveis elevados de resíduos de construção e de demolição (RCD). Ambos os aspectos têm um impacte negativo no ambiente.

Na indústria de pré-fabricação de betão, o rigoroso controlo de qualidade conduz a significativas quantidades de peças rejeitadas e, por consequência, a elevados desperdícios. Contribui também para a existência de um volume significativo de resíduos que se estima em cerca de 2.5% da produção total [1], e que no caso de Portugal é de aproximadamente 4 milhões m³. Para além dos problemas ambientais que tais resíduos acarretam, os custos com o transporte e depósito a vazadouro bem como a logística para armazenamento ou tratamento desses mesmos resíduos não são de todo desprezáveis.

Face à crise económica e ambiental actual, as exigências para um desenvolvimento mais sustentável no sector da construção requerem uma abordagem diferente para a tecnologia do betão.

O uso de agregados reciclados, nomeadamente resíduos da indústria da pré-fabricação, para o fabrico de novos betões parece ser uma solução interessante e de elevado potencial. Permite não só resolver os problemas relacionados com o armazenamento, transporte e depósito a vazadouro das peças pré-fabricadas obsoletas, como pode contribuir para a sustentabilidade do meio ambiente ao valorizar os referidos resíduos e consequentemente diminuir o consumo de agregados naturais.

O estudo realizado pela ANIPB, em 2008, sobre “A indústria da pré-fabricação em betão em Portugal”, revela que a introdução tecnológica de materiais, de componentes e de processos construtivos, nomeadamente associadas à normalização e à pré-fabricação, podem actuar como impulsionadores para a evolução positiva do mercado da construção, ao contribuir para a melhoria da qualidade dos produtos e para o aumento da eficiência da actividade [2].

Por outro lado, sendo a adaptabilidade às necessidades dos clientes e as relações desempenho-qualidade-preço, os principais factores distintivos dos seus produtos (Figura 1), o estudo dos betões auto-compactáveis com agregados reciclados deve ir ao encontro da aproximação entre as actividades de desenvolvimento tecnológico e as necessidades da indústria da pré-fabricação [2].

2. ESTADO DA ARTE

2.1. Propriedades dos betões com agregados reciclados e betões auto-compactáveis

O que diferencia os betões auto-compactáveis, com ou sem agregados reciclados, dos betões convencionais são as suas características de trabalhabilidade que lhes permitem preencher completamente os moldes, atravessando zonas densamente armadas, sem ocorrência de floculação nem segregação, apenas pela acção do peso próprio e sem recurso a métodos de compactação [3].

De modo a satisfazer essas exigências de trabalhabilidade, devem ser observadas num betão auto-compactável as seguintes características: a capacidade de escoamento (preenchimento) e de passagem (fluidez), a viscosidade e a estabilidade (resistência à segregação) [4].



Figura 1. Distribuição das empresas, segundo o principal factor distintivo dos seus produtos.

Para além destas propriedades, o uso de agregados reciclados no betão requer especial atenção ao tipo, à forma e à distribuição granulométrica dos agregados finos e grossos, já que influenciam significativamente o desempenho mecânico e de durabilidade dos betões [5] [6]. Segundo Leite, a distribuição granulométrica é um dos factores que mais influencia as principais características do betão, para além da trabalhabilidade, da resistência mecânica e, no caso específico no betão com agregados reciclados, a absorção de água [5]. Para que a comparação entre um BAR e um betão convencional (BC) seja exequível, a distribuição granulométrica dos agregados deve ser a mesma nos dois betões [7].

A correcção da água de amassadura é um factor extremamente importante a considerar quando se utilizam agregados reciclados. A argamassa aderida aos agregados tem uma elevada porosidade influenciando, deste modo, os valores de absorção de água dos mesmos. Deve-se ter conhecimento da absorção potencial e da absorção com o tempo dos agregados reciclados para que seja possível prever uma evolução do rácio a/c efectivo durante a amassadura e após a mesma. Assim, é possível garantir a mesma trabalhabilidade do que a de um betão convencional e assegurar uma qualidade uniforme no betão. Ferreira et al. concluíram que se obtém piores resultados no desempenho geral do betão realizando a pré-saturação dos agregados ao invés de utilizar métodos de compensação de água [8].

Das principais propriedades mecânicas avaliadas nos betões com agregados reciclados, destacam-se as resistências à compressão e à tracção que são geralmente menores do que as de um betão convencional [9] [10] [11]. No entanto, a utilização de superplastificantes pode compensar essa perda de resistência ao melhorar a compacidade da mistura [12] [13]. Apesar deste factor, Matias observou uma tendência de redução da trabalhabilidade com o aumento da taxa de incorporação de agregados reciclados simultaneamente com a introdução de superplastificantes, sugerindo que estes últimos perdem alguma eficiência para taxas de incorporação mais elevadas [14].

Relativamente à durabilidade deste tipo de betões, Limbachiya et al. e Amorim et al. verificaram que a carbonatação tende a aumentar com o aumento da taxa de incorporação de agregados reciclados, uma vez que esta depende da qualidade do betão, especialmente do teor de cimento, do rácio a/c , da porosidade e do teor de humidade ([15][16].

Seguindo a mesma linha de raciocínio, a penetração de cloretos também aumenta com a taxa de incorporação de agregados reciclados, uma vez que a migração dos iões depende muito da porosidade das misturas de betão e da permeabilidade da argamassa aderida aos agregados

reciclados [9] [16].

Em 2005, Nepomuceno desenvolveu uma metodologia para a composição de betões auto-compactáveis, baseado no método proposto por Okamura et al., cujo objectivo era o de simplificar e contornar as limitações oferecidas pelos métodos até aí existentes [17] [18]. A análise técnico-económica visando a viabilidade deste método permitiu concluir que os betões auto-compactáveis produzidos segundo este método se revelaram os mais adequados relativamente à característica de auto-compactabilidade [19] [20].

Para que os betões auto-compactáveis se tornem mais competitivos, é essencial reduzir o custo das matérias-primas. Um estudo sobre betões auto-compactáveis de elevado desempenho (BACED) demonstra que, reduzindo a quantidade de superplastificante e substituindo uma percentagem moderada do cimento por adições (cinzas volantes), é possível obter-se betões mais económicos sem comprometer as propriedades do betão [21].

A falta de normalização deixou de ser um obstáculo à utilização generalizada de betões auto-compactáveis. Actualmente estão disponíveis a norma NP EN 206-9:2007 [22], as partes 8 a 12 da série NP EN 12350:2010 [23][24][25][26][27] e um guia europeu publicado pela ERMCO (2005) para a utilização de BAC, também traduzido para português pela APEB em 2007 [28]. A especificação LNEC E471 apresenta um guia para a utilização de agregados reciclados grossos em betões de ligantes hidráulicos [29].

2.2. Os betões auto-compactáveis com agregados reciclados na indústria da pré-fabricação

As vantagens associadas ao uso de betões com agregados reciclados e de betões auto-compactáveis incentivaram a um aumento da investigação e consequentemente publicação destas temáticas nos últimos anos. A conciliação dos dois temas permite aliar as vantagens ambientais e económicas de cada um dos materiais, originando um material inovador com grande interesse para a indústria da construção em geral, com especial relevância na indústria de pré-fabricação.

Apesar da temática dos betões auto-compactáveis com agregados reciclados ser uma área científica relativamente recente, os estudos em torno desses betões têm demonstrado que é viável a sua utilização, não só no fabrico de elementos mais tradicionais e de menor complexidade estrutural, tais como blocos, abobadilhas e vigotas, mas também em elementos estruturais de geometria complexa ou com grande densidade de armadura, que dificulta os processos de vibração do betão com influência na sua qualidade final, como por exemplo vigas I para viadutos e pontes. A sua utilização também permite a redução da mão-de-obra na colocação do betão quando comparado com os betões normais vibrados.

3. PROJECTO DE INVESTIGAÇÃO

3.1 Objectivos

A utilização de agregados reciclados provenientes da indústria da pré-fabricação em betões auto-compactáveis é o alvo de um projecto de investigação a decorrer no Instituto Superior Técnico. O principal objectivo desta investigação consiste na avaliação das propriedades reológicas, mecânicas e de durabilidade dos betões auto-compactáveis com agregados reciclados provenientes da indústria da pré-fabricação.

Os principais objectivos do programa de investigação são os seguintes:

- ♦ produção de um betão auto-compactável com agregados, cujas características, com ênfase na trabalhabilidade, na resistência à compressão e na durabilidade, sejam compatíveis com ou superiores às de um betão auto-compactável com agregados naturais;
- ♦ avaliação da influência do processo de britagem e da forma dos agregados reciclados nas características mecânicas do betão;
- ♦ avaliação da influência dos rácios de incorporação de agregados finos e grossos nas características mecânicas do betão;
- ♦ obtenção de betões de classes de resistência superiores às dos próprios betões reciclados.

Pretende-se, deste modo, criar bases de apoio, estabelecendo regras para o controlo de qualidade na produção deste tipo de betão, e que irá garantir uma maior fiabilidade no produto final, constituindo uma forma inovadora de escoar e valorizar os desperdícios da pré-fabricação e de incentivar ao consumo do material reciclado, em detrimento dos limitados recursos naturais. Para além da sustentabilidade ambiental, podem ser geradas economias de valor significativo nos custos operacionais, face à alternativa convencional onde se englobam os custos com as diligências necessárias para a compra e transporte dos materiais para o local pretendido.

Pretende-se também com este projecto, contribuir para a divulgação e para a utilização mais generalizada dos betões auto-compactáveis, em face também dos impactes sociais e ambientais positivos da sua aplicação.

3.2 Descrição

Sendo o seu principal objectivo a avaliação das propriedades dos betões auto-compactáveis com agregados reciclados e de elevado desempenho com os mesmos agregados, o projecto proposto encontra-se dividido em diversas fases, permitindo, no final de cada fase, ter conclusões determinantes para as fases seguintes.

Na fase inicial, pretende-se analisar a influência do processo de britagem e da forma dos agregados reciclados no betão.

Os agregados reciclados são provenientes da trituração de peças pré-fabricadas (PF), cujas classes de resistência à compressão são 20, 45, 65 e 80 MPa e de betão produzidos em laboratório (LC), em condições controladas, com classes de resistência à compressão de 20, 45 e 80 MPa.

Cada tipo de agregado (natural (AN), da pré-fabricação e de laboratório) e cada classe de resistência (20, 45, 65 e 80 MPa) sofrerá dois processos de britagem: uma trituração primária (TP) e uma trituração primária e secundária (TP+TS). Para não gerar entropia neste processo inicial, todos os agregados serão britados nos mesmos equipamentos. A trituração primária será efectuada numa britadeira de maxilas, existente no Laboratório de Construção do Instituto Superior Técnico. Já a trituração primária e secundária será realizada recorrendo a uma britadeira de maxilas para a trituração primária e por impactor / moinho de martelos para a trituração secundária.

Para que se possam definir as características inerentes de cada tipo de agregado, associados aos diversos processos de britagem foram definidos os ensaios descritos na Tabela 1.

De seguida, serão produzidas quatro famílias de betão com a mesma classe de resistência alvo correspondente aos betões de origem (Figura 2), ou seja, será avaliada a capacidade de se

reproduzir a mesma resistência do betão de origem mas utilizando agregados reciclados.

Tabela 1. Ensaaios aos agregados.

Agregados	Análise granulométrica	NP EN 933-1:2000
	Índice de achatamento	NP EN 933-3:2000
	Índice volumétrico	NP EN 933-4:2011
	Ensaio do equivalente de areia	NP EN 933-8:2011
	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

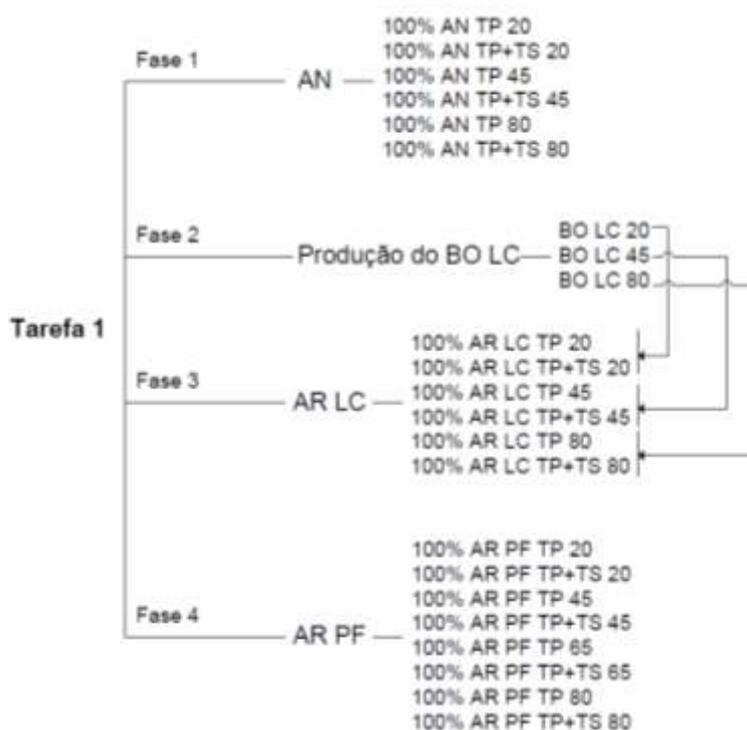


Figura 2. Diagrama da Fase 1.

As propriedades do betão foram avaliadas através de ensaios no estado fresco e endurecido, descritos segundo a Tabela 2. No final desta fase, pretende-se seleccionar o método mais eficaz de produção de agregados reciclados que virá a ser o método a adoptar para todas as fases posteriores.

A segunda fase do projecto engloba quatro tarefas (Figura 3). A primeira é uma etapa de produção de betões nas classes de resistência 20, 45 e 80 MPa utilizando os agregados reciclados produzidos em laboratório, variando, no entanto, a percentagem de agregados reciclados finos e grossos (AFR/AGR%: 0/25%; 25/0%; 25/25%; 0/100%, 100/0%; 100/100%). Na segunda tarefa, pretende-se reproduzir a resistência mecânica do betão de origem da pré-fabricação com classe de resistência de 80 MPa, utilizando as mesmas percentagens de agregados finos e grossos da etapa anterior.

Tabela 2. Ensaio no estado fresco e endurecido.

Estado fresco		Ensaio de abaixamento	NP EN 12350-2:2009
		Massa volúmica	NP EN 12350-6:2009
		Teor de ar	NP EN 12350-7:2009
Estado endurecido	Mecânica	Resistência à compressão	NP EN 12390-3:2011
		Resistência à tracção por compressão diametral	NP EN 12390-6:2011
		Módulo de elasticidade	LNEC E 397:1993
		Retracção	LNEC E 398:1993
		Resistência à abrasão	DIN 52108: 2010
		Ultra-sons	ASTM C597-09:2009
		Diagramas de tensão-deformação	-
		Durabilidade	Profundidade de penetração da água sob pressão
	Resistência à carbonatação		LNEC E 391:1993
	Absorção de água por capilaridade		LNEC E 393:1993
	Absorção de água por imersão		LNEC E 394:1993
	Resistência à penetração por cloretos		LNEC E 463:2004
	Resistividade eléctrica	RILEM TC 154-EMC:2003	

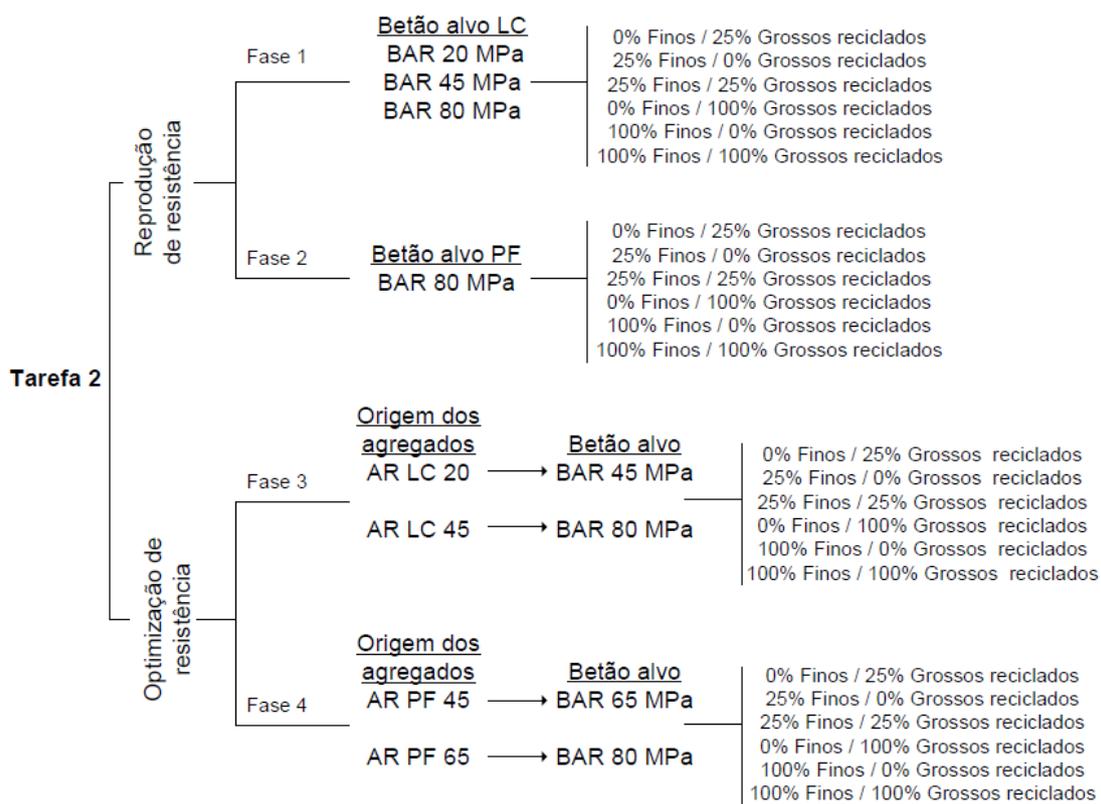


Figura 3. Diagrama da Fase 2.

Nas tarefas 3 e 4, o objectivo é otimizar os betões procurando obter classes de resistência mais

elevadas, usando agregados com resistências mais baixas. De forma semelhante às tarefas 1 e 2, as percentagens de finos e grossos irão variar. Para a tarefa três, seleccionaram-se os agregados de 20 e 45 MPa, produzidos em laboratório, com vista a obter resistências alvo de 45 e 80 MPa, respectivamente. Na tarefa quatro, os agregados da pré-fabricação de 45 e 65 MPa deverão contribuir para a obtenção de betões com resistências de 65 e 80 MPa, respectivamente.

Os ensaios a realizar para as amassaduras desta fase, no estado fresco e endurecido são os mesmos que foram mencionados na fase 1 (Tabela 2). Esta fase permitirá compreender qual a adequabilidade da utilização dos diferentes betões de origem nas várias propriedades do betão e a influência da variação de agregados finos e grossos.

A fase três aborda a produção de betões auto-compactáveis com base no método de Nepomuce-no em várias tarefas (Figura 4). Primeiro, propõe-se reproduzir as classes de resistência de 65 e 80 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%).

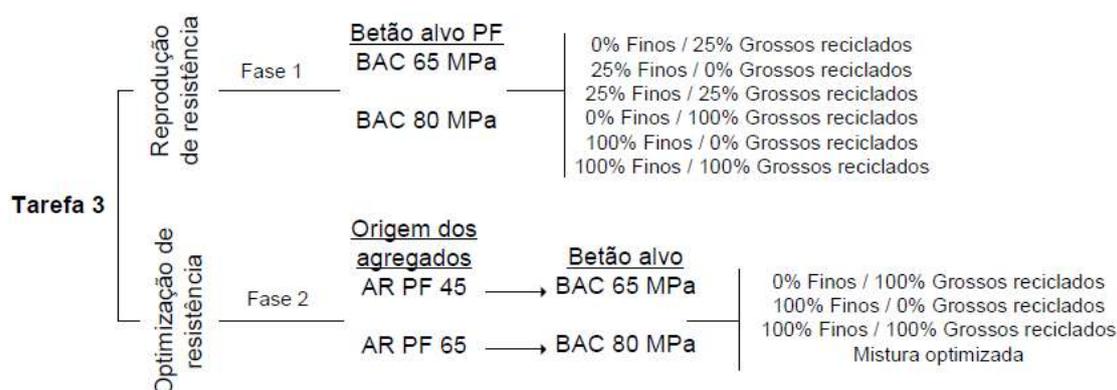


Figura 4. Diagrama da Fase 3.

Na segunda tarefa, pretende-se otimizar a resistência mecânica dos betões para 65 e 80 MPa, utilizando agregados com 45 e 65 MPa, respectivamente. Nesta tarefa, 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 comportamento mecânico, a durabilidade e o custo.

Para além dos ensaios descritos na Tabela 2, serão executados ensaios característicos dos betões auto-compactáveis no estado fresco (Tabela 3). Dos resultados obtidos, será seleccionada uma mistura optimizada de betão auto-compactável que servirá como base para as amassaduras da fase 4.

Tabela 3. Ensaio específicos de betões auto-compactáveis.

Estado fresco	Espalhamento	NP EN 12350-8:2010
	Escoamento no funil V	NP EN 12350-9:2010
	Escoamento na caixa L	NP EN 12350-10:2010

	Segregação no peneiro	NP EN 12350-11:2010
	Espalhamento no anel J	NP EN 12350-12:2010

A última fase, fase 4, consiste na obtenção de betão auto-compactável de elevado desempenho. Os agregados utilizados são 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).



Figura 5. Diagrama da Fase 4.

Os métodos de ensaio adoptados serão os mesmos da fase anterior (Tabelas 2 e 3).

Prevê-se a realização de ensaios à microestrutura de algumas amassaduras, uma vez que essa análise permite observar o resultado das alterações na estrutura interna do betão, principalmente o estudo da estrutura porosa da pasta e dos agregados reciclados, da interface pasta / agregados (que nos betões auto-compactáveis com agregados reciclados, ao contrário dos betões com agregados reciclados, não é claramente definida), e da influência dos agregados finos na pasta. Alguns dos ensaios a realizar encontram-se definidos na Tabela 4.

Tabela 4. Técnicas de caracterização de materiais.

Caracterização microestrutural	MEV (com electrões retrofundidos e com electrões de segunda ordem)
	Microscópio óptico
	Porosimetria com intrusão de mercúrio
	Análise termogravimétrica
	DRX
	FRX, entre outros

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A pré-fabricação posiciona-se competitivamente face a outras tecnologias no sector da construção baseando-se essencialmente nos preços, na qualidade das peças produzidas e ao possibilitar a diminuição do prazo da construção através da instalação repetitiva das peças.

O investimento na inovação e desenvolvimento de novos produtos, como os betões auto-compactáveis com agregados reciclados, representa uma forma de ganhar vantagem competitiva

ao permitir o refinamento de elementos já existentes, com vista a uma maior eficiência no desempenho e na procura de soluções que permitam a simplificação das tarefas de aplicação em obra, melhorando o controlo de qualidade.

REFERÊNCIAS

- [1] CPCI, *Production of Precast Concrete- Precast & Sustainability*, disponível em: <http://www.sustainableprecast.ca> (2012).
- [2] ANIPB, *A indústria da pré-fabricação em betão em Portugal* (2008).
- [3] Silva, P.; de Brito, J., “Betão Auto-Compactável (BAC) - Estado actual do conhecimento”, *Engenharia Civil*, n.º 35, Escola de Engenharia da Universidade do Minho, Guimarães, pp. 13-32 (2009).
- [4] ERMCO, *European Guidelines for Self-Compacting Concrete: Specification, production and use*, disponível em: www.efnarc.org (2005).
- [5] Leite, M., *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, 390 p (2001).
- [6] Grdic, Z. J., Toplicic-Curcic, G. A., Despotovic, I. M., Ristic, N. S., “Properties of self-compacting concrete prepared with coarse recycled concrete aggregate”, *Construction and Building Materials*, Vol. 24, No. 7, pp. 1129-1133 (2010).
- [7] De Brito, J., *Agregados reciclados e sua influência nas propriedades dos betões*. Lição de Síntese, Provas de Agregação em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Lisboa (2005).
- [8] 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, No. 8, pp. 617-627 (2011).
- [9] Evangelista L., de Brito J., “Mechanical behaviour of concrete made with fine recycled concrete aggregates”, *Cement and Concrete Composites*, Vol. 29, No. 5, pp. 397-401 (2007).
- [10] Soberón, J. G., “Porosity of recycled concrete with substitution of recycled concrete aggregate: An experimental study”, *Cement Concrete Research*, Vol. 32, No. 8, pp. 1301-1311 (2002).
- [11] Kou, S. C., Poon, C. S., “Properties of self-compacting concrete prepared with coarse and fine recycled concrete aggregates”, *Cement and Concrete Composites*, Vol. 31, No. 9, pp. 622-627 (2009).
- [12] Pereira, P., Evangelista, L., de Brito, J., “The effect of superplasticizers on the workability and compressive strength of concrete made with fine recycled concrete aggregates”, *Construction and Building Materials*, Vol. 28, No. 1, pp. 722-729 (2011).
- [13] Pereira, P., Evangelista, L., de Brito, J., “The effect of superplasticizers on the mechanical performance of concrete made with fine recycled concrete aggregates”, *Cement and Concrete Composites*, Vol. 34, No. 9, pp. 1044-1052 (2012).
- [14] Matias, D., de Brito, J., Rosa, A., Figueiredo, C., “Mechanical properties of Concrete produced with recycled coarse aggregates - influence of the use of superplasticizers”, *Cement and Concrete Composites* (2012) (submetido para publicação).
- [15] Limbachiya, M., Meddah, M. S., Ouchagour, Y., “Performance of portland-silica fume cement concrete produced with RCA”, *ACI Materials Journal*, Vol. 109, No. 1, pp. 91-100 (2012).
- [16] Amorim, P., de Brito, J., Evangelista, L., “Concrete made with coarse concrete aggregate: influence of curing on durability”, *ACI Materials Journal*, Vol. 109, No. 2, pp.109-M20 (2012).
- [17] Okamura, H., Ozawa K., “Mix-design for self-compacting concrete”, *Concrete Library of JSCE*, No. 25, pp. 107-120 (1995).
- [18] Nepomuceno, M. C. S., *Metodologia para a composição de betões auto-compactáveis*, Tese de Doutoramento em Engenharia Civil pela UBI, Covilhã, 734 p (2005).
- [19] Silva, P., *Métodos de estudo da composição de betão auto-compactável (BAC) - Verificação da sua aplicabilidade técnico-económica*, Dissertação de Mestrado em Construção, IST, Lis-

- boa (2007).
- [20] Silva, P., de Brito, J., Costa, J., “Viability of two new mixture design methodologies for SCC”, *ACI Materials Journal*, Vol. **108**, No. 6, pp. 579-588 (2011).
 - [21] Naik, T. R., Kumar, R., Ramme, B. W., Canpolat, F., “Development of high-strength, economical self-consolidating concrete”, *Construction and Building Materials*, Vol. **30**, pp. 463-469 (2012).
 - [22] NP EN 206 - 1, Betão - Parte 1: Especificação, desempenho, produção e conformidade, IPQ, Lisboa, Portugal (2007).
 - [23] NP EN12350 - 8, Ensaio do Betão fresco - Parte 8: Betão auto-compactável. Ensaio de espalhamento, IPQ, Lisboa, Portugal (2010).
 - [24] NP EN12350 - 9, Ensaio do Betão fresco - Parte 9: Betão auto-compactável. Ensaio de escoamento no funil V, IPQ, Lisboa, Portugal (2010).
 - [25] NP EN12350 - 10, Ensaio do Betão fresco - Parte 10: Betão auto-compactável. Ensaio de escoamento na caixa L, IPQ, Lisboa, Portugal (2010).
 - [26] NP EN12350 - 11, Ensaio do Betão fresco - Parte 11: Betão auto-compactável. Ensaio de segregação no peneiro, IPQ, Lisboa, Portugal (2010).
 - [27] NP EN12350 - 12, Ensaio do Betão fresco - Parte 12: Betão auto-compactável. Ensaio de espalhamento no anel J, IPQ, Lisboa, Portugal (2010).
 - [28] APEB, European Guidelines for Self-Compacting Concrete: Specification, Production and use, traduzido e adaptado para português, 2007.
 - [29] LNEC E471, Guia para a utilização de agregados reciclados grossos em betões de ligantes hidráulicos, LNEC, Lisboa, Portugal (2009).