

## BETÃO DE ELEVADO DESEMPENHO COM AGREGADOS RECICLADOS PROVENIENTES DA PRÉ-FABRICAÇÃO

D. Pedro<sup>1</sup>, A. Rosa<sup>1</sup>, J. de Brito<sup>1\*</sup> e L. Evangelista<sup>2</sup>

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

2: ADEC - ISEL  
Instituto Superior Técnico  
Universidade Técnica de Lisboa  
Av. Rovisco Pais, 1049 - 001 Lisboa  
e-mail: evangelista@dec.isel.ipl.pt

**Palavras-chave:** Betão de elevado desempenho, agregados reciclados, pré-fabricação

**Resumo.** *A produção de betão a partir de agregados reciclados (AR) pode contribuir de forma significativa para um aumento da sustentabilidade da indústria da construção. Permite a diminuição do consumo de recursos naturais e a diminuição da deposição de resíduos em aterro. O presente projecto foca-se na produção de Betão de Elevado Desempenho (BED) utilizando AR provenientes da indústria de pré-fabricação, permitindo o aproveitamento dos resíduos produzidos por esta indústria. 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 e de alto desempenho. 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 donde provieram os AR utilizados, culminando em betões com resistência final acima de 80 MPa. Haverá o recurso a aditivos 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 betões com elevado desempenho mecânico e de durabilidade a partir de AR provenientes da pré-fabricação, permitindo a esta indústria ser mais sustentável, reduzindo os impactes ambientais e económicos.*

## 1. ESTADO DA ARTE

Neste projecto, pretende-se avaliar a viabilidade da introdução de agregados reciclados de betão provenientes da indústria da pré-fabricação no fabrico de betões de elevado desempenho. Desta forma, serão avaliadas as propriedades desses betões e estabelecidas as relações constitutivas que permitam a futura utilização deste tipo de agregados no processo industrial sem reservas quanto ao desempenho esperado.

Este tema surge na sequência do conceito de desenvolvimento sustentável, onde a indústria do betão terá de implementar necessariamente no futuro uma variedade de estratégias em relação ao uso de betão, que passam, por exemplo, pela melhoria da durabilidade e numa melhor e maior utilização de materiais reciclados.

O betão de alto desempenho (BED) é um produto relativamente novo, sendo as suas características diferentes das do betão tradicional. É um betão que apresenta uma relação água / ligante (A/L) entre 0,30 e 0,40, sendo normalmente mais durável, não só porque é menos poroso, mas também porque as suas redes capilares e poros não se encontram ligados [1]. Em geral, os BED são dotados de resistências mecânicas (nomeadamente a resistência à compressão) superiores às dos betões convencionais. No entanto, a resistência não é sempre a principal propriedade requerida para este tipo de betões. O BED pode ser definido como um betão que satisfaz requisitos especiais de desempenho e de regularidade, sendo geralmente obtido usando materiais e processos de cura diferentes dos convencionais [2].

Existe a necessidade de um processo de cura diferente, uma vez que a presença de elevadas quantidades de cimento e a reduzida dosagem de água podem potenciar riscos de fissuração por retracção, nomeadamente por retracção plástica e autogénea. Assim, a principal diferença entre o betão tradicional e o betão de alto desempenho, a este nível, é que o primeiro praticamente não apresenta retracção autogénea (produtos de hidratação do ligante com menor volume do que os seus reagentes), sendo ou não curado com água, enquanto que o segundo pode apresentar valores significativos, se não for submetido a cura saturada durante o processo de hidratação [1].

No que concerne aos materiais usados, a principal diferença entre o BED e o betão tradicional é a utilização de adições minerais (por exemplo, cinzas volantes, escória de alto forno, pó de sílica) e de aditivos químicos (superplastificante) [3, 4]. Estes materiais fazem com que o comportamento mecânico do BED, ao nível da microestrutura, seja diferente quando comparado com o betão convencional [5]. A microestrutura do BED é mais compacta, sendo este fenómeno, em parte, devido à adição mineral. As adições minerais podem também ser incorporadas no betão com o intuito de reduzir o calor de hidratação e melhorar a resistência, a trabalhabilidade e a durabilidade. Além disto, o superplastificante reduz a quantidade de água, o que faz com que o nível de porosidade no interior da massa de cimento hidratado diminua [5, 4]. Deste modo, a resistência à compressão do BED é maior do que a do betão tradicional, pois estes novos materiais fazem diminuir a porosidade da pasta de cimento responsável pelos elos mais fracos na microestrutura do betão. A previsão do comportamento do BED não é fácil. Segundo Chou et al., determinadas propriedades do BED não são completamente compreendidas, uma vez que a relação entre os materiais utilizados e as propriedades do betão é altamente não linear [6].

Relativamente à incorporação de agregados reciclados de betão em BED, existem algumas vantagens: a fonte de abastecimento é abundante, as características mecânicas são ideais para BED, não há necessidade de um pré-rastreio e não há impurezas químicas ou outras substâncias nocivas. Estes diferenciam-se do agregado natural pela argamassa que adere à sua superfície. Desta forma, o

agregado reciclado é um material poroso, apresentando menor massa volúmica aparente e menor massa volúmica saturada com superfície seca (1200-1470 kg/m<sup>3</sup> e 2150-2620 kg/m<sup>3</sup>, respectivamente) [7]. Além disto, exibe valores de absorção de água mais elevados comparativamente ao agregado natural (entre 4% e 9,5%) [8]. Em consequência, haverá maior procura de água e necessidade de maiores doses de superplastificante para manter a trabalhabilidade [9]. A resistência ao desgaste do agregado reciclado é de cerca de 29,3%, 50% acima do exigido, mas ainda assim mais baixa do que o agregado natural (20% ± 2%) [8].

Segundo Hansen, a origem do betão dos agregados reciclados tem enorme influência sobre a resistência dos futuros betões [10]. No estudo de Dillman, chegou-se, de uma forma geral, à mesma conclusão em termos de durabilidade [11]. Segundo Poon et al., betões com agregados grossos provenientes de BED têm um melhor desempenho relativamente a outros que utilizaram agregados provenientes de betões tradicionais [12]. Uma explicação para este facto passa pelas melhores características dos agregados naturais e pela melhor ligação entre agregado reciclado e pasta de cimento existente em BED. Nagatakia et al. avaliaram o desempenho de agregados reciclados obtidos através de diferentes processos de trituração [13]. Conclui-se que a resistência à compressão e à flexão de um betão com agregados reciclados era mais baixa, nas situações em que os agregados tinham sido sujeitos apenas a um ciclo de trituração em vez de dois.

Em relação às propriedades no estado fresco de betões de elevado desempenho com agregados reciclados, verifica-se que as composições apresentam piores trabalhabilidades. Segundo Tu et al., nesta propriedade, os AR durante as fases iniciais apresentam uma influência reduzida, contrariamente ao que se verifica após 1 h, em que, se a quantidade de água presente na matriz cimentícia for insuficiente, tal conduzirá a piores trabalhabilidades [14].

No que respeita às propriedades no estado endurecido, nomeadamente à resistência à compressão, é geralmente reconhecido que, para relações A/L mais baixas (com a quantidade de água fixa), se obtêm maiores resistências à compressão [15, 16]. Mas deve-se ter em conta que os agregados reciclados parecem precisar de maiores quantidades de água para compensar a sua elevada capacidade de absorção, verificando-se uma fraca hidratação para as baixas quantidades de água, o que se traduz numa redução do desenvolvimento da resistência [16]. Quando se compara BED com agregados reciclados com BED tradicional [15-18], existe uma redução de 20-30% nesta propriedade.

Em relação ao ensaio de medição da velocidade de propagação dos ultra-sons (VPUS), verificou-se a seguinte tendência: quanto menor a relação A/L, mais elevada a VPUS [15, 16] e, por isso, para a mesma relação A/L, quanto menor a quantidade de água, maior a VPUS [15-18]. No que respeita ao ensaio de penetração de cloretos, verifica-se a mesma tendência. Segundo Tu et al., tanto a velocidade de propagação de ultra-sons como a penetração de cloretos apresentam valores muito semelhantes quando comparadas ao BED tradicional [14].

## **2. PROJECTO DE INVESTIGAÇÃO**

No sentido de desenvolver o estudo dos betões de elevado desempenho com agregados reciclados encontra-se em curso o desenvolvimento de um projecto de investigação neste âmbito no Instituto Superior Técnico. O projecto encontra-se dividido em três fases cujos resultados finais terão influência na determinação das condições das fases subsequentes.

A fase 1 irá incidir sobre a influência que a forma dos agregados reciclados tem nas propriedades do betão. A forma adquirida pelos agregados irá depender do seu processo de britagem.

Os agregados reciclados terão origem na trituração de produtos da pré-fabricação (PF), com classes de resistência à compressão de 20, 45, 65 e 80 MPa, e em betões produzidos em laboratório (LC),

com classes de resistência à compressão de 20, 45 e 80 MPa.

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 que 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 (20, 45, 65 e 80 MPa).

A análise das características dos agregados, associados aos processos de britagem descritos, será realizada através dos ensaios descritos na Tabela 1.

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	

Tabela 1. Ensaios aos agregados.

A etapa seguinte desta fase consistirá na obtenção de quatro famílias de betões, utilizando agregados reciclados, que reproduzam a mesma resistência do betão de origem desses agregados, como definido na Figura 1.

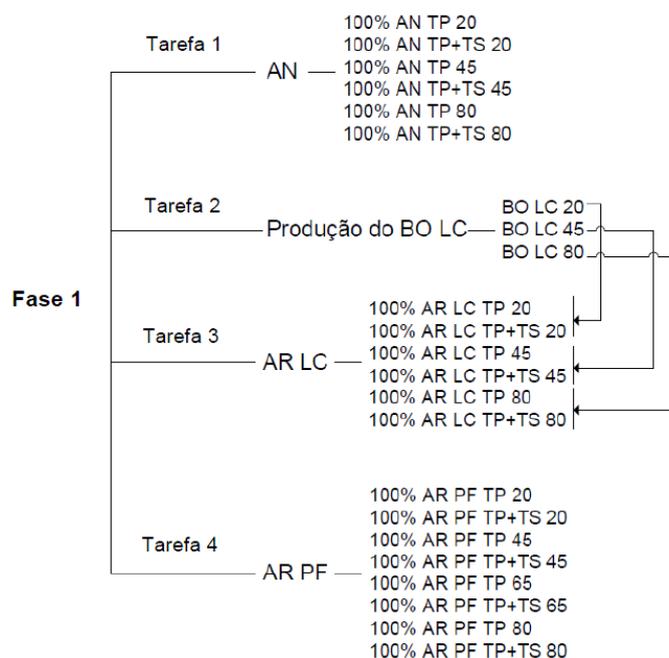


Figura 1. Diagrama da Fase 1.

A avaliação das propriedades no estado fresco e endurecido dos betões produzidos será realizada segundo os ensaios descritos na Tabela 2. 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.

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
	Durabilidade	Diagramas de tensão-deformação	-
		Profundidade de penetração da água sob pressão	NP EN 12390-8:2009
		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		

Tabela 2. Ensaios no estado fresco e endurecido.

A segunda fase do projecto será dividida em quatro tarefas, como definido na Figura 2. À semelhança da fase anterior, nas tarefas 1 e 2, pretende-se reproduzir betões com a mesma classe de resistência dos agregados reciclados a utilizar: de 20, 45 e 80 MPa para os agregados produzidos em laboratório e de 80 MPa para o betão proveniente da pré-fabricação. No entanto, a percentagem de agregados finos e grossos (AFR/AGR%) irá variar de acordo com os seguintes valores: 0/25%; 25/0%; 25/25%; 0/100%, 100/0%; 100/100%.

Nas tarefas 3 e 4, pretende-se obter betões com classes de resistência mais elevadas, utilizando agregados reciclados de resistência inferior. Com a mesma variação de percentagem das tarefas 1 e 2, os betões a produzir serão: de 45 e 80 MPa, utilizando agregados produzidos em laboratório com 20 e 45 MPa, respectivamente; e 65 e 80 MPa, utilizando agregados de pré-fabricação de 45 e 65 MPa, respectivamente.

Os ensaios dos betões no estado fresco e endurecido a realizar para esta fase são os descritos na Tabela 2. Espera-se que os resultados obtidos nesta fase permitam compreender qual o impacte e efeitos da utilização de betões com diferentes origens e resistências e a influência da variação de agregados finos e grossos nas propriedades do betão.

Na última fase deste projecto, será realizada a abordagem aos betões de elevado desempenho (Figura 3). Serão realizadas três tipos de amassaduras com agregados de origem: natural, provenientes de laboratório e da pré-fabricação com classes de resistência de 80 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.

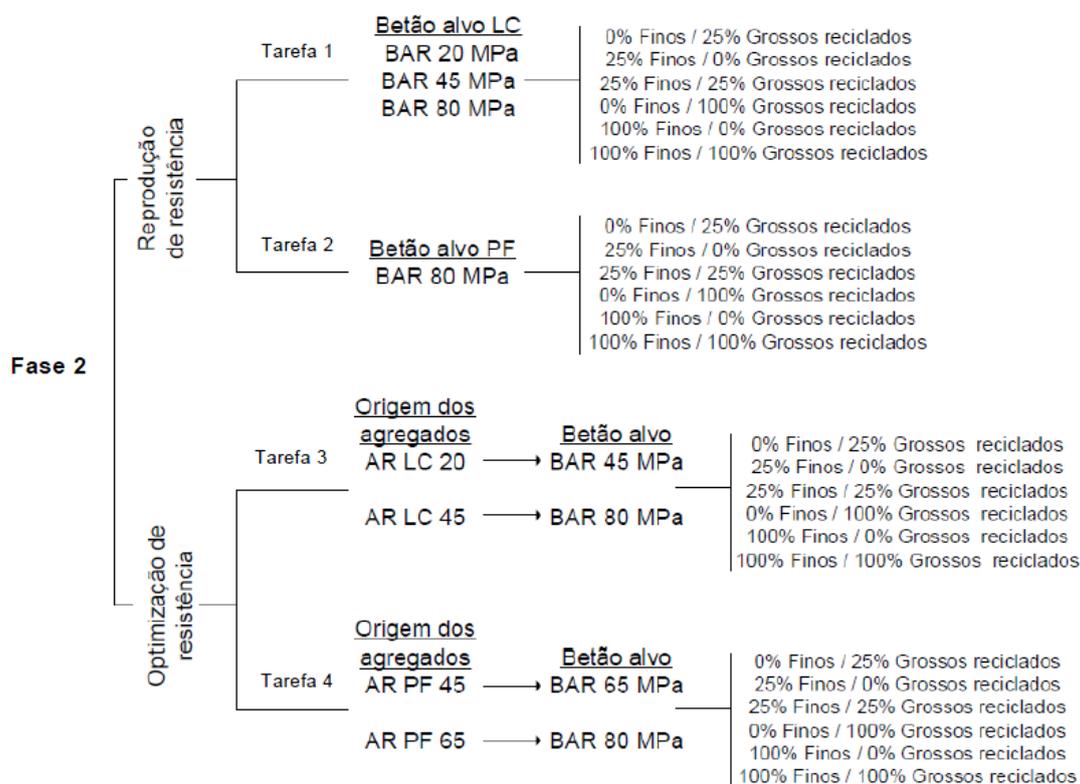


Figura 2. Diagrama da Fase 2.

Para as amassaduras com agregados reciclados traçou-se o mesmo objectivo, tendo em conta os resultados obtidos das tarefas 1 e 3 da fase anterior. Para cada tipo de agregado (de laboratório e de pré-fabricação), obteve-se uma mistura otimizada que definirá qual a percentagem de agregados finos e grossos reciclados a aplicar a cada amassadura.

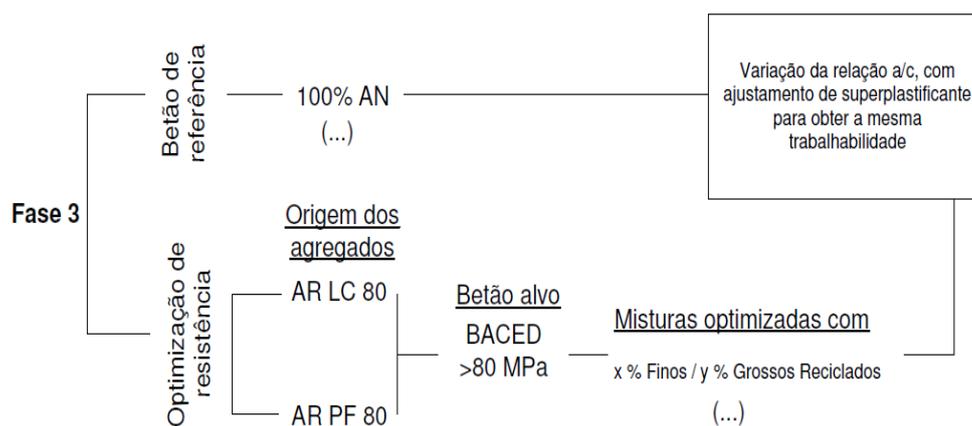


Figura 3. Diagrama da Fase 3.

Para além dos ensaios definidos na Tabela 2, deve-se realizar também ensaios à microestrutura de algumas amassaduras, tais como aqueles descritos na Tabela 3. Estes ensaios permitem compreender a estrutura interna do betão, com ênfase na estrutura porosa da pasta e agregados reciclados, da interface pasta / agregados e também do efeito dos agregados finos na pasta.

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

Tabela 3. Técnicas de caracterização de materiais.

## REFERÊNCIAS

- [1] Aïtcin, P.C., "The durability characteristics of high performance concrete: a review", *Cement and Concrete Composites*, Vol. **25**, No. 4-5, pp. 409-420 (2003).
- [2] Zia, P., Ahmad, S., Leming, M., *High-performance concrete: a state-of-art report*, Strategic Highway Research Program, National Research Council, Washington, D.C., 251 pp., (1991).
- [3] Bharatkumar, B.H., Narayanan, R., Raghuprasad, B.K., Ramachandramurthy, D.S., "Mix proportioning of high performance concrete", *Cement and Concrete Composites*, Vol. **23**, No. 1, pp. 71-80 (2001).
- [4] Lim, C.H., Yoon, Y.S., Kim, J.H., "Genetic algorithm in mix proportioning of high-performance concrete", *Cement and Concrete Research*, Vol. **34**, No. 3, pp. 409-420 (2004).
- [5] Aïtcin, P.C., *High Performance Concrete*, E&FN SPON, New York (1998).
- [6] Chou, J.S., Tsai, C.F., "Concrete compressive strength analysis using a combined classification and regression technique", *Automation in Construction*, Vol. **24**, pp. 52-60 (2012).
- [7] 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).
- [8] Kwan, W.H., Ramli, M., Kam, K.J., Sulieman, M.Z., "Influence of the amount of recycled coarse aggregate in concrete design and durability properties", *Construction and Building Materials*, Vol. **26**, No. 1, pp. 565-573 (2012).
- [9] Su, N., Wang, B.L., "Study on the engineering properties of recycled aggregate concrete and recovered aggregate from demolished concrete", *Journal of the Chinese Institute of Civil and Hydraulic Engineering*, Vol. **12**, No. 3, pp. 435-444 (2000).
- [10] Hansen, T., "Recycling of Demolished Concrete and Masonry", E&FN Spon, Rilem report 6, London, 1992, 305 p.
- [11] Dillman, R. *Concrete with Recycled Concrete Aggregate*, Sustainable Construction: Use of Recycled Concrete Aggregate, Thomas Telford, pp. 239-253 (1998).
- [12] Poon, C. S., Shui, Z. H., Lam, L., "Effect of microstructure of ITZ on compressive strength of concrete prepared with recycled aggregates", *Construction and Building Materials*, Vol. **18**, No. 6, Elsevier, pp. 461-468 (2004).
- [13] Nagatakia, S., Gokceb, A., Saekic, T., Hisada, M., "Assessment of recycling process induced damage sensitivity of recycled concrete aggregates", *Cement and Concrete Research*, Vol. **34**, No. 6, Elsevier, pp. 965-971 (2004).
- [14] Tu, T.Y., Chen, Y.Y., Hwang, C.L., "Properties of HPC with recycled aggregates", *Cement and Concrete Research*, Vol. **36**, No. 5, pp. 943-950 (2006).
- [15] Hwang, C.L., Lin, J.J., Lee, L.S., Lin, F.Y., "Densified mixture design algorithm and early properties of high-performance concrete", *Journal of the Chinese Institute of Civil and Hydraulic Engineering*, Vol. **8**, No. 2, pp. 217-219 (1996).
- [16] Hwang, C.L., *Properties and Behaviors of Concrete*, Chan's Arch Books, Taipei (1999).

- [17] Chern, J.C., Hwang, C.L., Tsai, D.H., "Research and development of high performance concrete in Taiwan", *Concrete International*, Vol. **17**, No. 10, pp. 1-76 (1995).
- [18] Li, L.S., Hwang, C.L., "A quality assurance system of SCC in Taiwan", *The Proceedings of First North American Conference on the Design and Use of Consolidating Concrete*, ACBM, pp. 275–280 (2002).