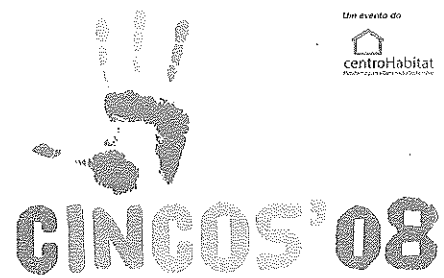
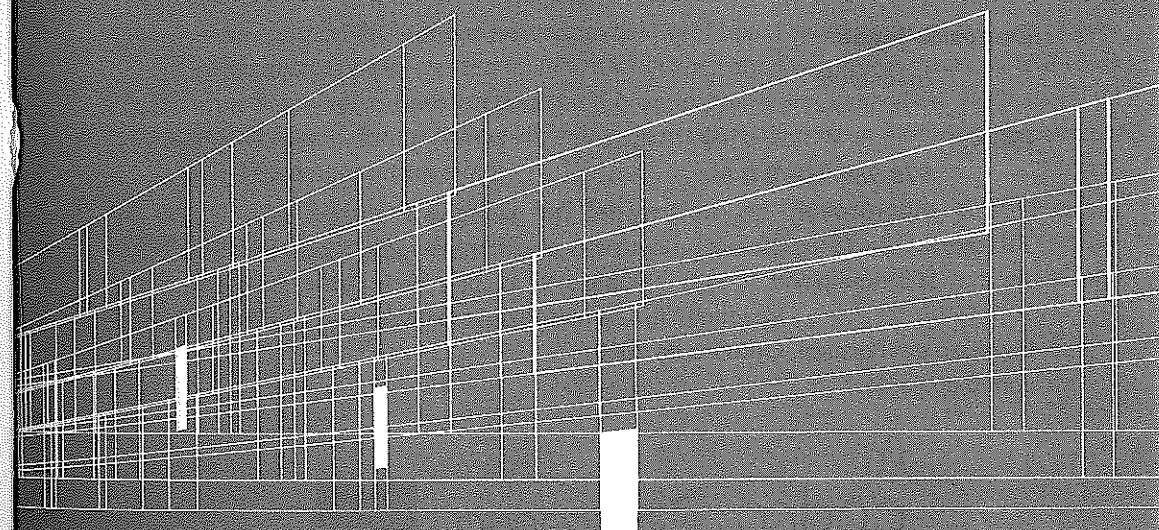


Um evento do



Congresso de Inovação na  
Construção Sustentável  
Congress of Innovation on Sustainable Construction

Inovação na Construção Sustentável  
*Innovation on Sustainable Construction*



Victor M. Ferreira, Luís Bragança, A. Bajo Dias, A. Silva Afonso, Jorge de Brito

## Ficha Técnica:

### Título:

Inovação na Construção Sustentável  
Innovation on Sustainable Construction

### Propriedade e Edição:

Plataforma para a Construção Sustentável  
Curia Tecnoparque, 3780-544 Tamengos  
[www.centrohabitat.net](http://www.centrohabitat.net)  
[centrohabitat@centrohabitat.net](mailto:centrohabitat@centrohabitat.net)

### Coordenação Editorial:

Victor M. Ferreira  
Luis Bragança  
António Baio Dias  
Armando Silva Afonso  
Jorge de Brito

### Capa

José Luis Fernandes

### Maquetização, Montagem e Impressão

DallDesign, lda  
[dalldesign.net@gmail.com](mailto:dalldesign.net@gmail.com)

### Depósito legal:

283866/08

### ISBN:

978-989-95978-0-8

### Tiragem:

500 exemplares

Impresso em Portugal, Outubro de 2008  
com o apoio de:



A **Plataforma para a Construção Sustentável** ([www.centrohabitat.net](http://www.centrohabitat.net)) é hoje uma rede que congrega empresas, centros de I&D, autarquias e outros agentes comprometidos com este tema da sustentabilidade e em usá-lo como mote para a inovação. O seu interesse abrange toda a fileira do Habitat e tem como objectivo principal concentrar recursos para valorizar empresarial e socialmente o conhecimento sobre a sustentabilidade do ambiente construído.

De modo a concretizar este objectivo, entendeu a Plataforma promover um evento internacional dirigido às empresas, centros de I&D, autarquias e demais entidades interessadas em divulgar o que fazem nesta área e discutir o papel que a Construção Sustentável pode ter sobre a Inovação, particularmente, no cluster Habitat.

Assim surgiu o **Congresso de Inovação na Construção Sustentável (CINCOS'08)** realizado na Curia (Portugal) de 23 a 25 de Outubro de 2008 e a partir do qual se elaborou este livro, repositório de conhecimentos que se pretende útil para a Inovação e Competitividade do cluster Habitat e sua sustentabilidade.

*The Portuguese **Sustainable Construction Platform** ([www.centrohabitat.net](http://www.centrohabitat.net)) is a network linking companies, research centres, municipalities and other agents concerned with the theme of Sustainability and in using it as a driving force for Innovation. The Platform aims to concentrate resources in order to value technology and knowledge transfer to companies and local governance, namely, about sustainability of the built environment.*

*In order to do so, this Platform has promoted an international event addressed to the above-mentioned organizations interested to inform what they are doing in this area and to discuss the role that Sustainable Construction could have in promoting Innovation, particularly, in the Habitat cluster. A forum, where different agents participating in innovation processes, can meet and promote partnerships.*

*The event was named **Congress of Innovation on Sustainable Construction (CINCOS'08)**, and it was held in Curia (Portugal), from 23 to 25 of October 2008, from which this book was made and, it is expected that it contributes to Innovation and Competitiveness of the Habitat cluster and its sustainability.*

## Betões com agregados reciclados: a problemática das reacções álcalis-silica

M. B. Santos <sup>1</sup>, J. Brito <sup>2</sup>, A. S. Silva <sup>3</sup>

<sup>1</sup> Instituto Politécnico de Leiria, Leiria, Portugal, [mbarreto@estg.ipleiria.pt](mailto:mbarreto@estg.ipleiria.pt)

<sup>2</sup> Instituto Superior Técnico, Departamento de Engenharia Civil e Arquitectura, Lisboa, Portugal, [jb@civil.ist.utl.pt](mailto:jb@civil.ist.utl.pt)

<sup>3</sup> Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Portugal, [ssilva@lnec.pt](mailto:ssilva@lnec.pt)

### Resumo

A presente comunicação tem como objectivo descrever um trabalho experimental a realizar sobre o desenvolvimento das reacções álcalis-silica (RAS) nos betões com agregados reciclados (BAR).

Os processos de deterioração dos betões convencionais (BC), como as RAS, devem igualmente ser analisados nos BAR, aumentando o conhecimento das características e do desempenho destes betões. Será, deste modo, realizada uma campanha de ensaios a diversos BAR com uma crescente reactividade da mistura, utilizando diferentes percentagens de substituição de agregados pétreos (AP) por agregados reciclados (AR) reactivos e não reactivos, comparando os resultados com um betão de referência (BOR) com AP. Serão estudadas, nos diversos BAR, situações de diferentes condições de cura dos AR e a utilização de diferentes classes de cimento.

O trabalho pretende obter mais informação sobre as RAS em BAR, investigando se a incorporação de AR no betão torna ou não mais danosa a problemática em comparação com o que acontece com os BC.

**Palavras-chave:** agregados reciclados, betão, degradação, reacções álcalis-silica

### 1. Introdução

As RAS são reacções expansivas de origem interna que afectam as estruturas de betão e que ocorrem na presença de sílica reactiva, álcalis e humidade em quantidade suficiente, formando um gel expansivo denominado por sílico-alcalino. Sendo as RAS um dos processos de deterioração dos BC, condicionante da sua durabilidade, torna-se relevante analisar o comportamento dos BAR face a esta reacção expansiva, contribuindo para o conhecimento existente nestes betões.

### 2. Objectivos

Será efectuada uma campanha experimental, com a metodologia apresentada neste artigo, com o objectivo de obter mais informação sobre as RAS em BAR e investigar se a incorporação de AR no betão torna ou não mais danosa a problemática em comparação com o que acontece com os BC.

O trabalho de investigação iniciou-se com a recolha de dados bibliográficos para conhecimento do estado da arte da problemática a nível nacional e internacional. Após

a recolha de informação, pretende-se agora aprofundar o conhecimento da influência das RAS nas propriedades dos BAR.

Será, para isso, realizada uma campanha de ensaios a diversos BAR com crescente percentagem de reactividade para estudar a evolução da reacção e a sua influência no betão, comparando os resultados com um betão de referência (BOR) com AP reactivos, possibilitando assim a comparação de propriedades entre os betões.

A metodologia a aplicar durante o estudo terá como referência o estipulado pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) relativamente às RAS em BC descrito na especificação LNEC E 461 [1].

A especificação apresenta metodologias para prevenir reacções expansivas internas em betões, onde se inserem as RAS, indicando ensaios preparatórios aos AP para verificação da sua reactividade e ensaios a misturas de betão para avaliação da susceptibilidade de determinadas composições desenvolverem RAS. Os ensaios indicados remetem para metodologias internacionais apresentadas pela *Réunion Internationale des Laboratoires d'Essais et des Recherches sur les Matériaux et les Construction* (RILEM), através dos ensaios designados por AAR-1 (análise petrográfica), AAR-2 (ensaio acelerado em barra de argamassa), AAR-3 (ensaio lento em prisma de betão) e AAR-4 (ensaio acelerado em prisma de betão) indicados pelo comité RILEM TC 106-AAR [2] e RILEM TC 191-ARP [3].

Os ensaios de verificação da reactividade dos agregados e da reactividade das composições de betão por expansão de barras de argamassa ou prismas de betão serão complementados por ensaios de avaliação física e por análises à microestrutura dos betões produzidos, formando assim um conjunto caracterizador da evolução das RAS nos BAR.

Utilizando a metodologia prevista pelo LNEC para avaliação das RAS em BC, poder-se-á também observar, durante a campanha experimental e mediante os resultados obtidos, a aplicabilidade da especificação na utilização de AR para produção de BAR e a variabilidade de resultados face à aplicação nos AP indicados na especificação.

### 3. Metodologia Experimental

Os trabalhos de laboratório consistem numa análise continuada a um conjunto de betão característico, composto por três famílias de betão com AR de origem controlada e com trabalhos repartidos em quatro fases distintas.

Numa 1ª fase, será efectuada uma recolha de diversos AP reactivos por comprovação em obra e por ensaios de reactividade, para introdução no betão a britar posteriormente. Serão igualmente recolhidos AP conhecidos por serem inócuos. Os AP serão separados por nível de reactividade baixa e alta, a que correspondem agregados não reactivos e reactivos, respectivamente.

A reactividade dos AP será comprovada durante a 1ª fase dos trabalhos através dos ensaios previstos na especificação do LNEC E 461 [1] nomeadamente a análise

petrográfica (AAR-1) e o ensaio acelerado da barra de argamassa (AAR-2). Ainda durante esta fase, serão feitos ensaios preparatórios para determinação das características físicas e químicas dos agregados grossos e finos utilizados e dos dois tipos de cimento empregados durante a campanha. Assim, serão efectuadas análises químicas por fluorescência de raios X (FRX), análises granulométricas e determinação das massas volúmicas e absorção de água dos diversos materiais.

Paralelamente aos ensaios descritos, serão realizados dois tipos de betão com agregados de origem controlada mas com diferentes reactividades que, após britagem, produzirão dois conjuntos diferenciados de AR de origem controlada.

Cada tipo de betão de origem (BO) estará submetido a diferentes condições de cura. Um grupo será submetido a envelhecimento acelerado (60 °C a 95% HR de acordo com o ensaio RILEM AAR-4) em câmara climática durante 3 meses enquanto que o outro grupo apenas será exposto a cura húmida em câmara de humidade ou ao ar livre, consoante disponibilidade de espaço, promovendo um envelhecimento natural.

Os trabalhos preparatórios, correspondentes à 1ª fase, serão concluídos com a britagem do BO produzido originando duas famílias de AR correspondentes a quatro conjuntos (AR de origem controlada e envelhecidos de baixa e alta reactividade, AR de origem controlada não envelhecidos de baixa e alta reactividade). Os AR serão agrupados e armazenados para posterior fabrico de BAR.

A análise dos conjuntos de AR criados corresponde à 2ª fase dos trabalhos. Nesta etapa, serão realizados ensaios característicos aos AR, incluindo os ensaios de reactividade para verificação, nesta fase, do estado de reactividade dos agregados e comparação com a reactividade inicial.

A 3ª fase do trabalho corresponde à realização de três famílias de betão para estudo. Às famílias de betões serão produzidas em alguns casos com AR de diferentes reactividades (baixa e alta) resultantes dos agregados de origem e com taxas de substituição (0, 20, 50 e 100%) de AP por AR de betão. As diferentes famílias de betão serão ainda divididas em alguns grupos consoante o tipo de cimento utilizado.

Com uma família, pretende-se analisar o desenvolvimento da RAS em BAR utilizando AR produzido a partir de betão envelhecido, simulando o betão de estruturas com alguns anos, onde se utilizou inicialmente AP reactivo e AP não reactivo. A variação do tipo de cimento pretende introduzir alterações físicas e na estrutura porosa do BAR, considerando que se irá acertar a quantidade de álcalis nos dois grupos. Esta família pretende então simular BAR efectuado com dois tipos de cimento e diferentes incorporações de AR de alta e baixa reactividade.

A utilização de agregados de baixa reactividade no complemento dos BAR tem como objectivo não introduzir alterações no desenvolvimento das RAS devido aos AP, promovendo a variação das características dos BAR apenas devido aos AR reactivos.

Considerando que poderão existir diferenças nos BAR se estes forem produzidos com AR envelhecidos ou não envelhecidos, introduziu-se outra família no estudo. Os BAR

com AR de diferentes tipos de cura. Tratando-se de uma análise secundária, apenas serão estudados os BAR com um tipo de cimento e nas percentagens de 50 e 100% porque, se existirem, as variações de resultados surgirão nos BAR com maiores percentagens de substituição. Existirá de qualquer modo um betão de referência nesta família.

Numa outra família de BAR, pretende-se analisar se a introdução de AR nos betões provoca algum efeito de mitigação ou contrário relativamente à RAS. Os BAR serão produzidos com AP, neste caso, de baixa reactividade e diferentes percentagens de AP de alta reactividade, para análise comparativa com uma das famílias.

As diversas famílias de betão irão cumprir a composição estipulada na recomendação RILEM TC-106 [2] pelo ensaio AAR-3 relativamente à quantidade dos seus componentes. Esta composição é a utilizada no estudo da reactividade potencial aos álcalis dos agregados para betão pelo que deve ser considerada no fabrico dos betões da campanha experimental.

Os BAR e BOR produzidos sofrerão uma exposição acelerada em câmara climática, promovendo o seu envelhecimento e o desenvolvimento da RAS.

Na 4ª fase do trabalho, será estudada, através de ensaios correntes, a influência da RAS nas características físicas dos BAR. A evolução da RAS ao longo do tempo e o desenvolvimento do gel sílico-alcálico serão investigados através de ensaios de avaliação de alterações na estrutura porosa, por avaliação do estado de reactividade das diferentes composições e por observação da microestrutura do betão. A produção por grupo de betão de um BOR permitirá a existência de uma referência do desenvolvimento da RAS num BC composto exclusivamente por AP e conhecer qual a evolução da reacção devido à introdução percentual de AR no betão. Por esta razão, serão feitos durante aproximadamente um ano, após o fabrico das famílias de betão, ensaios periódicos às amostras produzidas.

### 3.1 Preparação do BO e AR

Segundo a norma Portuguesa NP EN 12620 [4] e NP EN 13139 [5], os agregados são definidos como material granular utilizado na construção e podem ser naturais, artificiais ou reciclados. No presente trabalho, será dada maior relevância aos AR pois o objectivo principal é analisar a RAS em BAR.

Os agregados, de acordo com a especificação do LNEC E 461 [1], são divididos segundo a sua reactividade em:

- classe I - agregado não reactivo;
- classe II - agregado potencialmente reactivo;
- classe III - agregado potencialmente reactivo (maior probabilidade de ocorrerem reacções expansivas relativamente à classe II).

Com o objectivo de quantificar aproximadamente a reactividade de cada agregado, serão utilizados neste trabalho dois "níveis" de reactividade. Assim, os AP e AR em

estudo serão classificados de baixa (classe I) ou alta reactividade (classe II ou III).

Serão produzidas nesta fase algumas amostras de AR de origem controlada proveniente de betão britado, permitindo com isto o conhecimento das propriedades do betão original (Figura 2).

A partir de agregados naturais com diferentes "níveis" de reactividade, será fabricado o BO.

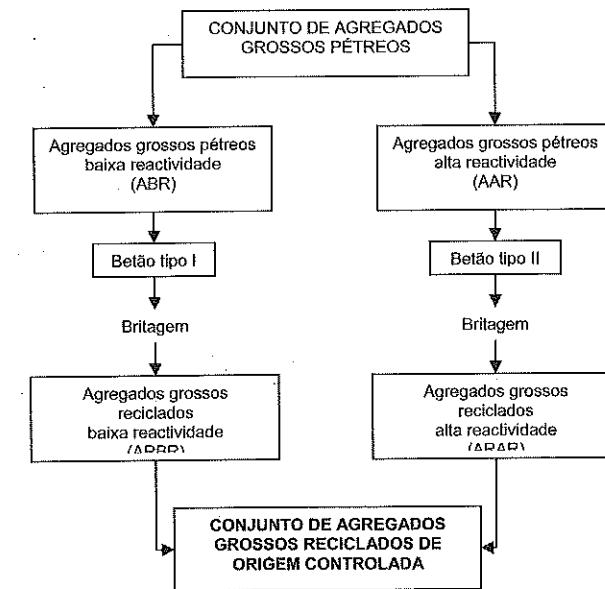


Figura 2 - Esquema da metodologia a utilizar no fabrico de AR de betão

### 3.2 Avaliação da reactividade dos AP de origem

Embora conhecendo o comportamento dos agregados a utilizar na campanha experimental, as rochas de origem são compostas por zonas com diferentes quantidades de sílica potencialmente reactiva, que poderá ou não desencadear RAS. Deste modo, a confirmação do estado da reactividade dos agregados recolhidos torna-se importante, pois deverão existir agregados de alta reactividade confirmada e agregados de baixa reactividade ou inócuos.

A avaliação da reactividade será efectuada, segundo a Especificação do LNEC E 461 [1], de acordo com a Figura 3.

Os ensaios preparatórios que serão efectuados nesta fase pretendem determinar a classe do agregado, classificando-o como não reactivo ou potencialmente reactivo consoante corresponda à classe I ou classe II e III, embora exista maior probabilidade de ocorrerem RAS com agregados da classe III.

Para confirmação da classe do agregado, será efectuada uma análise petrográfica e ensaios acelerados em barra de argamassa aos agregados e à areia, como indicado na metodologia da Especificação LNEC E 461 [1].

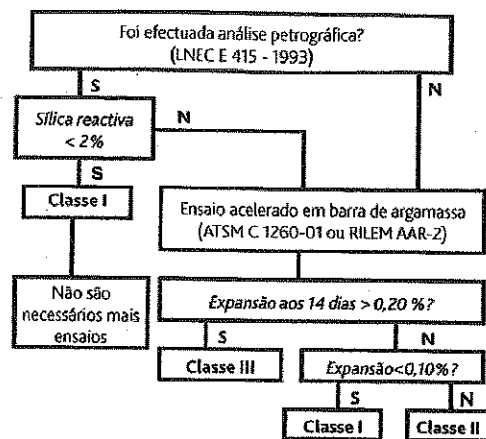


Figura 3 - Metodologia para avaliação da reactividade dos agregados [1]

A análise petrográfica permite determinar a inocuidade do agregado quando este apresenta um teor em sílica reactiva inferior a 2%. É um método rápido embora, segundo SANTOS SILVA [6], deva ser apenas considerado para a pré-selecção de materiais, identificando potencialidades reactivas aos álcalis de agregados para betão.

O método acelerado em barra de argamassa permite, de um forma rápida, determinar a potencialidade de reactividade aos álcalis dos agregados através da expansão de barras de argamassa imersas numa solução de NaOH a uma temperatura elevada.

### 3.3 Britagem do BO

O processo de britagem será realizado através de um britador de maxilas que é, segundo ANGULO [7] citando LEVY [8], especialmente desenvolvido para britar rochas e materiais similares produzindo bons agregados para betões estruturais. A britagem deverá ser efectuada com a abertura de maxilas n.º 6 do britador do Laboratório de Construção do Departamento de Engenharia Civil e Arquitectura do Instituto Superior Técnico uma vez que MATIAS E BRITO [9] determinaram através de ensaios preliminares que é a abertura ideal para maximizar a obtenção de agregados grossos reciclados.

Após a britagem, os agregados serão colocadas em contentores, separados por tipo.

Após a organização dos contentores, considera-se concluída a 1ª fase do trabalho experimental, procedendo-se à determinação das características dos AP e AR a utilizar no fabrico dos BAR.

### 3.4 Ensaios de caracterização dos AR

Tratando-se do constituinte alterado do betão, é necessário, após a britagem da amostra, analisar as suas características, confrontando os resultados com o AP inicial. Assim, será elaborado um conjunto de ensaios a agregados, correspondente à 2ª fase do trabalho experimental, permitindo analisar as características físicas e químicas do material constituinte das diversas famílias de BAR a produzir, de onde se destacam a análise granulométrica, a determinação da massa volúmica e absorção de água, a

baridade, a resistência ao esmagamento, a determinação do teor de água e os ensaios para avaliação da continuidade da reactividade dos AR (análise petrográfica e ensaio acelerado em barra de argamassa).

### Análise da influência da RAS em BAR

Durante a 4ª fase da campanha experimental, serão realizados diversos ensaios caracterizadores da evolução da RAS em BAR. Serão efectuados ensaios correntes ao betão endurecido e, paralelamente, ensaios para analisar o desenvolvimento da RAS em BAR como os ensaios de expansão, a porosimetria de mercúrio, a microscopia electrónica de varrimento (MEV/EDS) e a microscopia óptica (petrografia).

Os ensaios à microestrutura porosa dos BAR permitem caracterizar a sua permeabilidade e a maior ou menor mobilidade iónica dos reagentes provocadores de RAS na estrutura de betão. Para conhecer a estrutura porosa dos BAR em estudo, serão realizados ensaios de absorção de água por imersão e capilaridade, ensaios de permeabilidade ao oxigénio e ensaios de porosimetria de mercúrio.

A avaliação da reactividade da composição de betão será elaborada segundo a metodologia apresentada na Especificação LNEC E 461 [1]. A susceptibilidade de uma composição de BAR, realizada com os agregados utilizados nesta campanha experimental, desenvolver RAS será verificada através de ensaios de expansão seguindo o método AAR-3 (Figura 4).

A análise da microestrutura do betão tem o objectivo de estudar o desenvolvimento da RAS e a localização e composição do gel sílico-alcálico no BAR. Com esta finalidade, serão elaboradas observações por microscopia electrónica de varrimento (MEV).

Para uma análise mais superficial, será realizada a observação através de microscopia óptica.

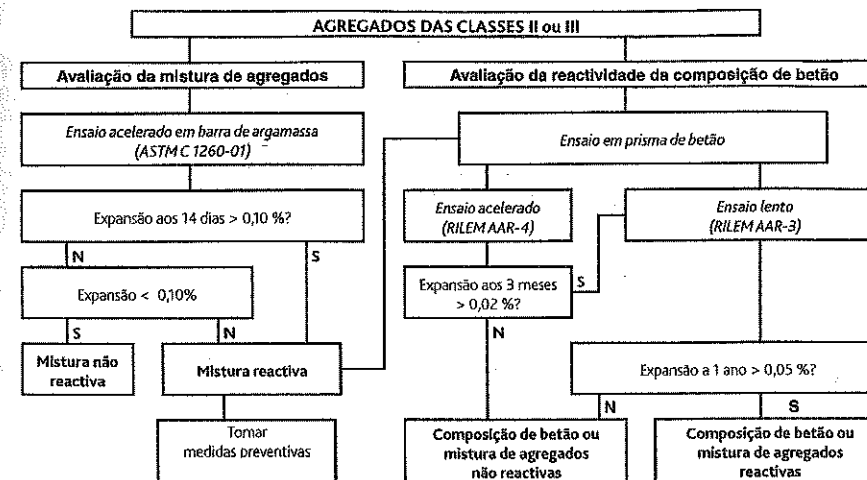


Figura 4 - Metodologia para avaliação da susceptibilidade de uma mistura de agregados ou de uma composição de betão desenvolverem reacções álcali-silica [1]

#### 4. Conclusões

Com este artigo, pretende-se apenas dar a conhecer o trabalho de investigação que se irá realizar sobre a temática das reacções álcalis-sílica em betões com agregados reciclados, não existindo por enquanto conclusões a apresentar.

#### 5. Bibliografia

- [1] LNEC E 461, *Betões: Metodologias para prevenir reacções expansivas internas*, Especificação LNEC, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 6p., 2007
- [2] RILEM TC 106-AAR, *Alkali-aggregate reaction: Recommendations*, Materials and Structures, vol. 33, pp. 283-293, 2000
- [3] RILEM TC 191-ARP, *Alkali-reactivity and prevention - Assessment, specification and diagnosis of alkali-reactivity. RILEM Recommended test method AAR-1: Detection of potential alkali-reactivity of aggregates - petrographic method*, Materials and Structures, vol. 36, pp. 480-496, 2003
- [4] NP EN 12620, *Agregados para betão*, Norma Portuguesa, Instituto Português da Qualidade, 56 p., 2004
- [5] NP EN 13139, *Agregados para argamassas*, Norma Portuguesa, Instituto Português da Qualidade, 45 p., 2005
- [6] SANTOS SILVA, A., "Degradação do betão por reacções álcalis-sílica - utilização de cinzas volantes e metacaulino para a sua prevenção", Tese de Doutoramento em Engenharia Civil pela Escola de Engenharia da Universidade do Minho, Teses e Programas de Investigação, Laboratório de Engenharia Civil, 339 p., Lisboa, 2006
- [7] ANGULO, S. C., "Variabilidade de agregados graúdos de resíduos de construção e demolição reciclados", Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000
- [8] LEVY, S. M., "Reciclagem do entulho de construção civil, para utilização como agregado de argamassas e concretos", Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1997
- [9] MATIAS, D.; BRITO, J. DE, "Influência dos adjuvantes no desempenho de betões com agregados grossos reciclados de betão", Relatório ICIST DTC n.º 3/05, Instituto Superior Técnico, Lisboa, 2005