

## Resistência e envelhecimento acelerado de betões contendo resíduos cerâmicos

Fernando Pacheco Torgal <sup>1, †</sup>

*Universidade do Minho, Unidade de Investigação C-TAC  
4800 Guimarães, Portugal*

Said Jalali <sup>2</sup>

*Universidade do Minho, Departamento de Engenharia Civil  
4800 Guimarães, Portugal*

### RESUMO

O presente artigo debruça-se sobre o comportamento mecânico de betões contendo resíduos da indústria cerâmica. Os resultados obtidos mostram que a substituição de 20% de cimento por resíduos cerâmicos com dimensão abaixo de 70µm está associada a perdas de resistência residuais. Já a substituição de agregados correntes por agregados cerâmicos faz-se sem perda de resistência.

Relativamente à resistência antes e após o envelhecimento acelerado constata-se que a substituição de cimento por resíduo cerâmico aumenta o desempenho dos betões, sucedendo efeito inverso para a substituição dos agregados.

### 1. INTRODUÇÃO

Na Europa os resíduos gerados pela indústria cerâmica ascendem a valores entre 3-7% da sua produção global, isto corresponde grosso modo a vários milhões de toneladas de argilas calcinadas que anualmente são levadas a depósitos em escombreiras (Fernandes et al., 2004).

Se levarmos em linha de conta as crescentes restrições ambientais impostas no seio da UE á deposição de resíduos, as quais se traduzem em taxas de deposição cada vez mais significativas, isso implica que a industria cerâmica terá que investigar formas de reaproveitamento dos seus resíduos.

Apesar de haver já neste momento algum nível de reaproveitamento destes resíduos, na verdade trata-se apenas de volumes residuais que não conseguem afirmar-se como uma solução para este problema, pelo que se torna urgente procurar equacionar se a solução não poderá passar pela sua utilização noutras industrias.

---

<sup>1, †</sup> Doutor em Engenharia Civil (torgal@civil.uminho.pt)

<sup>2</sup> Professor Catedrático

A indústria da construção como consumidor final da maior parte dos produtos da indústria cerâmica, encontra-se bem posicionada para poder resolver este problema, o qual é também em parte seu. A natureza desta indústria, em especial o segmento da produção de betão, parece poder contribuir para a resolução deste problema sem que sejam necessárias grandes alterações ao seu processo produtivo.

Importa ter em conta que de acordo com alguns investigadores, a melhor forma da indústria da construção se tornar mais sustentável passa pela incorporação de resíduos de outras indústrias, como materiais de construção (Metha, 2001; Meyers, 2009).

Desta forma poderão obter-se poupanças em termos dos custos de deposição destes resíduos assim como também se poderão obter vantagens ambientais inerentes à extracção de matérias primas não renováveis para a produção de cimento e agregados.

A produção de cimento implica um gasto energético considerável (850 kcal por kg de clínquer) a que se somam os custos ambientais da extracção das argilas e dos calcários (1,7 tonelada de rocha por tonelada de clínquer).

Por outro lado a produção de 1 tonelada de cimento está associada á emissão de 0,55 toneladas dióxido de carbono de origem química a que se tem que somar 0,39 toneladas de CO<sub>2</sub> devido ás emissões provocadas pela queima de gasóleo em centrais termoeléctricas para a produção de energia necessária, o que leva a um total de 0,94 toneladas de CO<sub>2</sub> (Gartner, 2004). Assim sendo, a substituição parcial de cimento por resíduos cerâmicos representa poupanças substanciais de energia além de outros benefícios ambientais já referidos. Além disso e tendo em conta que o custo do cimento representa aproximadamente 70% do custo do betão esta opção permite ainda poupanças económicas relevantes.

A reactividade pozolânica dos residuos cerâmicos foi já confirmada por alguns investigadores (Puertas et al., 2008; Naceri & Hamina, 2009; Lavat et al., 2009; Torgal & Jalali, 2009), outros avaliaram recentemente o desempenho mecânico de betões com agregados cerâmicos (Binici, 2007; Cachim, 2009), apesar disso as investigações sobre o reaproveitamento de resíduos em betões são ainda escassas. Consequentemente, pretende-se no presente artigo apresentar resultados relativos ao comportamento mecânico de betões com resíduos cerâmicos antes e após ciclo acelerado de envelhecimento.

## 2. TRABALHO EXPERIMENTAL

### 2.1 Materiais, composição e fabrico do betão

Os resíduos da indústria cerâmica podem simplifadamente ser separados em duas categorias, que são função da sua origem. Na primeira incluem-se os resíduos da indústria que produz peças cerâmicas ditas estruturais, as quais usam pastas vermelhas para produzir tijolos, blocos e telhas. Já na segunda categoria, temos as indústrias que usam pastas brancas no fabrico de mosaicos, azulejos e peças sanitárias.

O presente trabalho de investigação utilizou 500 kg de resíduos cerâmicos os quais foram triturados num moinho de maxilas, sendo que após o processo de peneiração se obtiveram agregados grossos, areia e pó cerâmico.

A fim de se obterem resíduos cerâmicos em pó com dimensão abaixo de 75µm foi levada a cabo uma segunda operação de moagem com recurso a moinhos de bolas. O custo da moagem destes resíduos varia entre 10 a 20% do custo do cimento, o que ainda assim permite poupanças económicas, mesmo sem se considerar a hipótese destes resíduos serem levados a depósito com o conseqente pagamento de taxas de deposição.

Numa fase inicial, designada por fase A, utilizaram-se os resíduos cerâmicos em pó com dimensão abaixo de 75µm para substituição parcial do cimento. Nesta fase foram

utilizados areias e agregados britados de granito para a execução dos betões. Na Tabela 1 são apresentadas as características físicas e geométricas dos agregados. Na execução dos betões da fase A, foi utilizado cimento tipo I-32.5 respeitando o disposto na norma NP EN 197-1:2001.

A composição dos betões foi obtida por recurso ao método de Faury (Faury, 1958; Lourenço & Coutinho, 1986), tendo sido projectado um betão com um valor de resistência característico de  $f_{ck}=25\text{N/mm}^2$  e um valor médio de  $f_m=30\text{ N/mm}^2$ .

Tabela 1- Características dos agregados utilizados na fase A

Dimensões dos peneiros	Porcentagem acumulada de passados		
	Areia fina	Areia grossa	Agregados
12,7 mm	100	100	98,5
9,5mm	100	100	70,1
4,76mm	100	99,8	13,6
2,38mm	98,3	79,4	2,5
1,19mm	89,4	55,7	2,2
590 $\mu\text{m}$	66,9	37,2	2,0
297 $\mu\text{m}$	37,3	20,5	1,8
149 $\mu\text{m}$	13,6	8,3	1,4
74 $\mu\text{m}$	4,5	3,9	0,8
Módulo de finura	1,946	2,991	6,063
Massa volúmica ( $\text{Kg/m}^3$ )	2658	2631	2619
Absorção de água (%)	1,3	1,6	2,0

Foram ensaiadas quatro composições de betão, sendo que uma delas diz respeito ao betão de referência e as outras três se diferenciam entre si pela origem do resíduo cerâmico utilizado. As designações das misturas são as seguintes: RTC (Resíduos de tijolos cerâmicos); RCBQD (Resíduos de cerâmica branca de queima dupla); RCB (Resíduos de cerâmica branca); RCBQS (Resíduos de cerâmica branca de queima simples). As composições dos betões executados durante os ensaios da fase A são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 – Composição dos betões da fase A por  $\text{m}^3$

	Betão de Ref <sup>a</sup>	Betão com resíduos cerâmicos em pó
Cimento portland	350.0 Kg.	280.0 Kg.
Resíduos cerâmicos em pó	-	70.0 Kg.
Agregados grossos		1084.0 Kg
Areia fina		135.4 Kg.
Areia grossa		564.0 Kg.
água		218.5 l
A/L		0.6

Numa fase subsequente designada por fase B, foram ensaiadas três composições de betão, uma correspondendo ao betão de referência B Ref<sup>a</sup> e outras duas em que se procedeu à substituição de agregados correntes por agregados provenientes da britagem dos resíduos cerâmicos, sendo que tudo o resto foi mantido na mesma.

A composição em que se substituiu a areia por areia de resíduos cerâmicos foi designada por BARC, já a composição em que se substituíram os agregados grossos por agregados cerâmicos tem a designação BACG. Como as restantes condições se mantiveram inalteradas, espera-se que os resultados possam explicar a influência dos agregados cerâmicos.

As composições dos betões executados durante os ensaios da fase B são apresentadas na Tabela 3.

Os agregados cerâmicos foram imersos em água durante 24 horas e depois utilizados saturados com a superfície seca. Na execução dos betões da fase B, foi utilizado um cimento do tipo II-42.5 respeitando o disposto na norma NP EN 197-1:2001.

A composição dos betões foi feita de acordo com o método das curvas de referência de Faury e apresenta-se na Tabela 4.

Tabela 3 - Características dos agregados utilizados na fase B

Dimensões dos peneiros	Porcentagem acumulada de passados			
	Areia corrente	Areia de resíduos cerâmicos	Agregados correntes	Agregados de resíduos cerâmicos
19,0	100	100	100	100
12,7	100	100	97,1	99,2
9,5mm	100	100	76,2	72,2
4,76mm	98,6	99,0	13,5	2,8
2,38mm	78,2	71,9	4,9	0,7
1,19mm	58	48,8	4,0	0,6
590µm	38,6	31,5	3,4	0,5
297µm	21,6	19,0	2,7	0,5
149µm	9,6	9,6	2,0	0,4
74µm	4,4	4,1	1,3	0,3
Massa volúmica (Kg/m <sup>3</sup> )	2610	2210	2643	2263
Absorção de água (%)	1,5	6,1	1,4	6,0

Table 4 - Composição dos betões da fase B por m<sup>3</sup>

Materiais	Betão de Ref <sup>a</sup>	BARC	BACG
Cimento tipo II 42,5	350	350	350
Areia	861	-	861
Areia de resíduos cerâmicos	-	729	-
Agregados grossos	958	958	-
Agregados de resíduos cerâmicos	-	-	820
Água	175	175	175
A/C	0,5	0,5	0,5

A mistura dos betões foi levada a cabo numa betoneira de eixo vertical e a trabalhabilidade das misturas de betão foi confirmada através do ensaio de abaixamento, imediatamente após a fase da mistura. Na moldagem dos provetes de betão foram utilizados moldes metálicos em que a vibração foi levada a cabo numa mesa vibratória.

De corrido um dia da betonagem, procedeu-se á descofragem dos provetes os quais ficaram a curar até à data do seu ensaio em água.

## 2.2 Técnicas experimentais

### 2.2.1 Resistência á compressão

O ensaio da resistência á compressão foi realizado em provetes com 100×100×100mm<sup>3</sup> de acordo com a norma NP EN 12390-3:2003. Os provetes foram curados

em água a uma temperatura de  $18 \pm 1$  °C até à data do ensaio. Os resultados da resistência à compressão correspondem à média de 3 provetes, ensaiados aos 7, 14, 28, 56 e 90 dias de cura.

## 2.2.2 Ensaio de envelhecimento acelerado

O ensaio de envelhecimento consiste na sujeição dos provetes de betão a 12 ciclos de um determinado procedimento, que a seguir se descreve. Cada ciclo é composto por uma fase principal constituída por 4 sub-fases que intercalam períodos de calor e de temperaturas negativas e finalmente por uma fase secundária de acondicionamento, como se apresenta na Tabela 5.

Tabela 5 - Fases de um ciclo do ensaio de envelhecimento acelerado

Fase principal			
Ambiente	Temperatura	HR (%)	Duração
Calor seco	$75 \pm 2$ °C	45%	90 min
Frio	$-10 \pm 2$ °C	---	90 min
Calor húmido	$55 \pm 2$ °C	95%	90 min
Frio	$-10 \pm 2$ °C	---	90 min
Fase de acondicionamento			
Estado	$23 \pm 2$ °C	50%	960 min

As diferentes fases do presente ensaio foram definidas com o intuito de se poder simular o envelhecimento do betão em condições reais de elevada agressividade. Após o período de cura húmida, metade dos provetes foram submetidos a 12 ciclos de envelhecimento cada um com 24h de duração.

## 3. ANALISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

### 3.1 Resistência á compressão

#### 3.1.1 Utilizando resíduos cerâmicos para substituição parcial de cimento

Os resultados obtidos revelam menores resistências dos betões com resíduos cerâmicos quando comparados com o betão de referência, sendo que as mesmas são elevadas em idades iniciais, mas vão se reduzindo com o tempo de cura o que é típico do comportamento de betões com aditivos pozolânicos (Fig. 1).

Os betões com 20% de substituição de cimento por resíduos do tipo RT apresentam o desempenho mecânico mais elevado, o que significa que aqueles resíduos são os que apresentam uma pozolanicidade mais elevada.

Os betões com resíduos do tipo RCBQS são aqueles que apresentam o pior desempenho mecânico, alcançando somente 78% da resistência do betão de referência ao fim de 7 dias de cura, sendo que ao fim de 28 dias esse valor ronda apenas os 80% da resistência padrão. Contudo, para uma idade de cura de 90 dias a resistência à compressão dos betões com estes resíduos consegue atingir os 90,4%.

É expectável que para longas idades de cura, os betões com 20% de substituição de cimento por resíduos cerâmicos apresentem diferenças de resistência insignificantes. Aliás, a baixa de resistência em idades iniciais pode ser ultrapassada pela utilização de cura com elevação de temperatura. Como é pouco prático a utilização de cura com elevação de temperatura em estruturas betonadas *in situ*, isso significa que a indústria dos betões pré-fabricados é especialmente indicada para o reaproveitamento de resíduos cerâmicos.

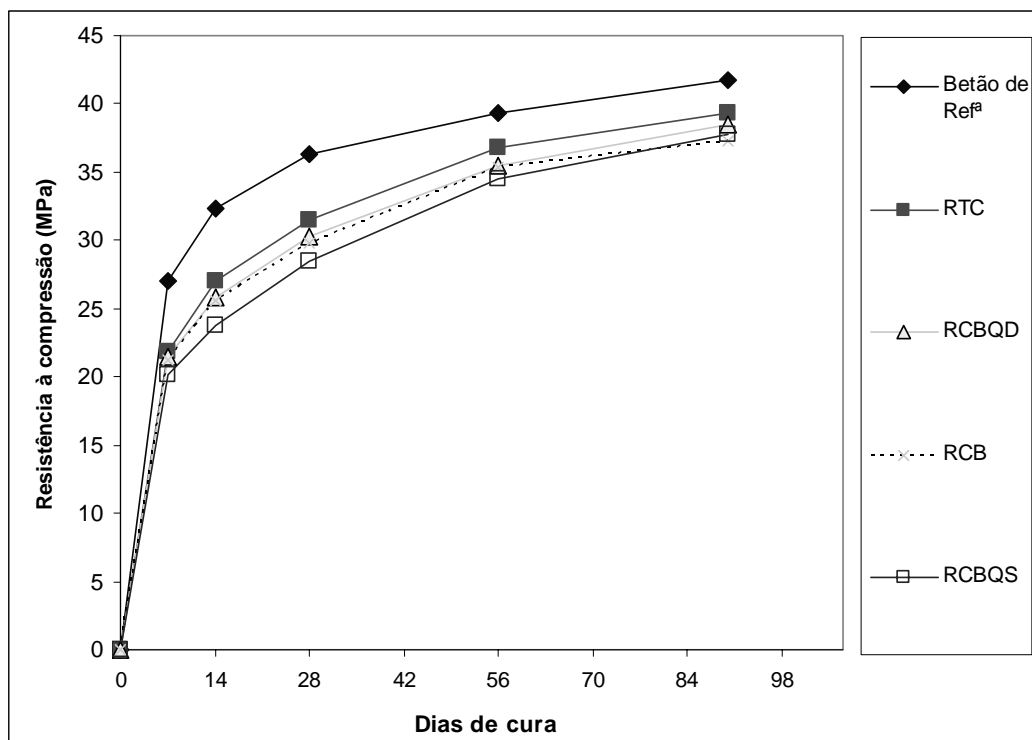


Figura 1 – Resistência á compressão de betões de acordo com a idade de cura

### 3.1.2 Utilizando agregados cerâmicos em substituição de agregados correntes

Os resultados obtidos (Fig. 2) indicam que os betões que contém quer areia de resíduos cerâmicos (BARC), quer mesmo os betões em que se substituíram os agregados grossos correntes por agregados grossos provenientes da britagem de resíduos cerâmicos (BACG) apresentam resistências que nunca são inferiores à resistência do betão de referência.

Estes resultados são opostos aos resultados obtidos por outros autores contendo baixas percentagens de agregados provenientes da britagem de tijolos cerâmicos (Brito et al., 2005; Khatib, 2005).

Uma explicação para esse comportamento, pode dever-se ao facto de os agregados utilizados no presente projecto apresentarem uma baixo nível de absorção de água e terem sido utilizados saturados, fornecendo água necessária para a hidratação do cimento. Já os agregados cerâmicos utilizados por aqueles autores apresentam níveis de absorção de água entre 16 e 19%, o que se traduz num excesso de água e consequentemente numa elevada porosidade e redução da resistência.

Em termos globais a resistência é mais elevada para os betões com areia de resíduos cerâmicos, sendo que essa subida tem início logo a partir dos 14 dias e continuando a crescer mesmo aos 90 dias. Já os betões com agregados grossos de resíduos cerâmicos, atingem uma estabilização da sua resistência a partir logo dos 28 dias.

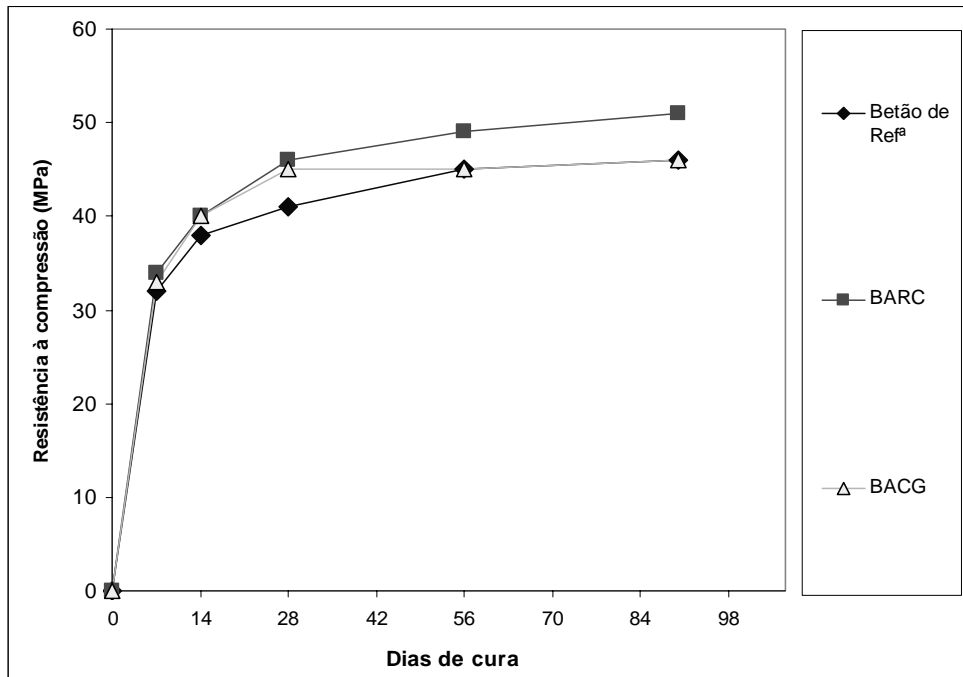


Figura 2 – Resistência á compressão de betões de acordo com a idade de cura

### 3.2 Envelhecimento acelerado

#### 3.2.1 Utilizando resíduos cerâmicos para substituição parcial de cimento

Relativamente ao comportamento mecânico dos betões com substituição de cimento por resíduos, após o ensaio de envelhecimento (Fig.3), observa-se que todos os betões com resíduos cerâmicos em substituição parcial do cimento, apresentam perdas de resistência que são menores do que as perdas de resistência médias do betão de referência. O que significa que a substituição de 20% de resíduos cerâmicos tem um impacto positivo pela transformação de estruturas de hidróxido de cálcio em estruturas do tipo CSH.

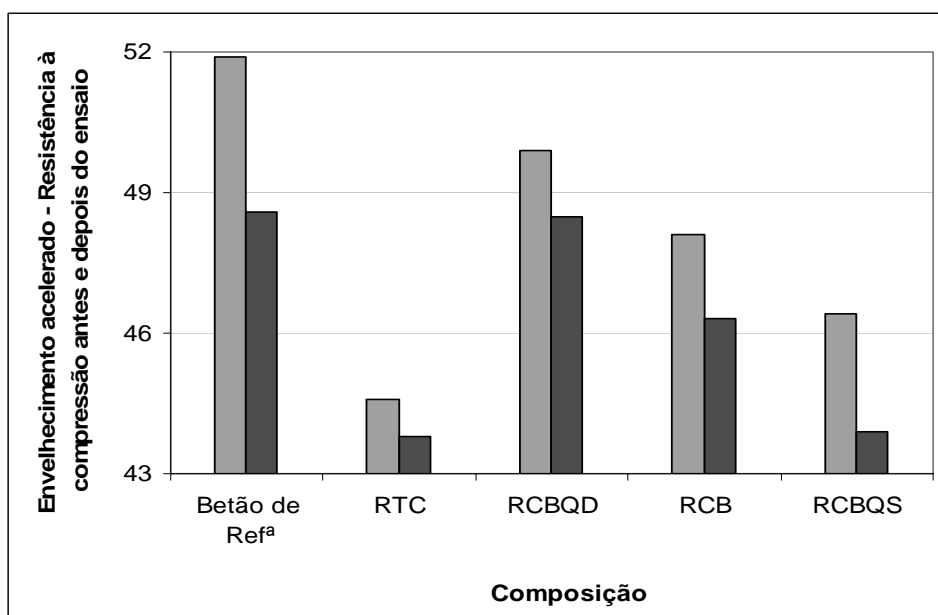


Figura 3 – Resistência á compressão: antes e depois do ensaio de envelhecimento

#### 3.2.2 Utilizando agregados cerâmicos em substituição de agregados correntes

Quanto ao comportamento mecânico dos betões com agregados cerâmicos após o ensaio de envelhecimento (Fig.4), constata-se que aqueles agregados estão associados a maiores perdas de resistência que a perda de resistência do betão de referência.

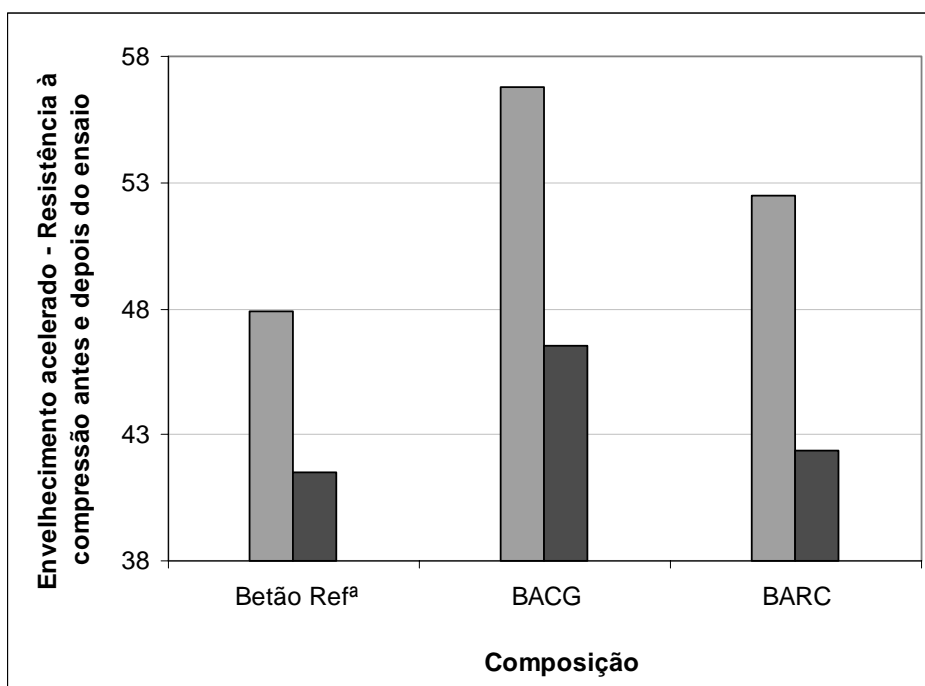


Figura 4 – Resistência á compressão: antes e depois do ensaio de envelhecimento

Apesar desse comportamento, é de realçar que ainda assim os betões com agregados cerâmicos apresentam resistências residuais superiores ao betão padrão, pelo que não obstante as referidas perdas de resistência estes continuam ainda a apresentar um desempenho mecânico superior. Importa aqui ressaltar que as condições associadas ao ensaio de envelhecimento são excepcionalmente agressivas, o que confirma o bom desempenho dos betões com agregados cerâmicos.

#### 4. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos mostram que a substituição de cimento por resíduos cerâmicos está associada a perdas de resistência residuais. Já a substituição de agregados correntes por agregados cerâmicos faz-se sem perda de resistência.

Relativamente à resistência antes e após o envelhecimento acelerado constata-se que a substituição de cimento por resíduo cerâmico aumenta o desempenho dos betões, sucedendo efeito inverso para a substituição dos agregados.

A utilização de resíduos da indústria cerâmica em betões permite assim resolver problemas ambientais relacionados com a deposição de resíduos, com a extração de matérias primas não renováveis e com as emissões de gases responsáveis pelo efeito de estufa, sem que essa utilização comprometa o desempenho mecânico desses betões.



## 5. REFERENCIAS

- Brito, J.; Pereira, A.; Correia, J., Mechanical behaviour of non-structural concrete made with recycled ceramic aggregates. *Cement and Concrete Composites* Vol. 27, 429-433, (2005)
- Binici, H., Effect of crushed ceramic and basaltic pumice as fine aggregates on concrete mortar properties. *Construction and Building Materials* Vol. 21, 1291-1197, (2007)
- Cachim, P., Mechanical properties of brick aggregate concrete. *Construction and Building Materials* Vol. 23, 1292-1297, (2009)
- Faury, J., *Le Béton. Influence de ses constituents inerts. Regles á adopter pour sa meilleure composition. Sa confection et son transport sur les chantier.* 3rd ed. Paris, Dunod, (1958)
- Fernandes, M.; Sousa, A; Dias, A., Environmental impact and emissions trade. Ceramic industry. A case study. Portuguese Association of Ceramic Industry APICER, (2004)
- Gartner, E., Industrially interesting approaches to low-CO<sub>2</sub> cements. *Cement and Concrete Research* Vol. 34, 1489-1498, (2004)
- Khatib, J., Properties of concrete incorporating fine recycled aggregate. *Cement and Concrete Research* Vol. 35, 763- 769, (2005)
- Lavat, A.; Trezza, M.; Poggi, M., Characterization of ceramic roof tile wastes as pozzolanic admixture. *Waste Management* Vol. 29, 1666-1674, (2009)
- Lourenço, J.; Coutinho J., Automatic calculations for concrete mix selection. Faury and Bolomey methods. Technical documents, Coimbra, (1986).
- Mora, E., Life cycle, sustainability and the transcendent quality of building materials. *Building and Environment* Vol. 42, 1329-1334, (2007)
- Metha, P.K., Reducing the environment impact of concrete. Concrete can be durable and environmentally friendly. *Concrete International*, Vol.10, (2001)
- Meyer, C., The greening of the concrete industry. *Construction and Building Materials* (2009) (in press)
- Nacéri, A.; Hamina, M., Use of waste brick as a partial replacement of cement in mortar. *Waste Management* Vol. 29, 2378-2384, (2009)
- Torgal, F.Pacheco; Jalali, S., Reactividade pozolânica de resíduos da indústria cerâmica. *Revista Construção Magazine* (submetido) (2009)