

# betão

N. 27  
Novembro 2011



Revista da Associação Portuguesa das Empresas de Betão Pronto



Obra: Viaduto do Corgo 04

Ambiente e Segurança: Utilização do Betão em Sistemas de Drenagem 12

Normalização: Regulamento (EU) n.º 305/2011 e o Betão Pronto 18

Obra: O Novo Museu dos Coches 38

Técnica: Betão com Adição de Resíduos Cerâmicos 42

# Desempenho de Betões com Substituição Parcial de 20% de Cimento Portland por Resíduos Cerâmicos Moídos

■ Eng.º F. Pacheco Torgal, Doutor em Materiais de Construção, Grupo de Construção Sustentável, Unidade de Investigação C-TAC, Universidade do Minho  
Eng.º Saïd Jalali, Professor Catedrático Aposentado, Dept.º de Eng.ª Civil da Universidade do Minho

## Sumário

O presente artigo analisa o desempenho de betões contendo resíduos da indústria cerâmica. Concretamente analisa-se a substituição de cimento Portland por resíduos cerâmicos com dimensão inferior a  $70\mu\text{m}$ . Os betões são avaliados em termos da resistência à compressão, permeabilidade ao oxigénio, difusão de cloretos e envelhecimento acelerado. Os resultados obtidos mostram que a substituição de cimento por resíduos cerâmicos moídos está associada a perdas de resistência residuais. Os betões com estes resíduos muito embora não apresentem uma permeabilidade ao oxigénio de relevo, apresentam bons resultados em termos da difusão de cloretos. Relativamente à resistência à compressão antes e após o envelhecimento acelerado, constata-se que a substituição de cimento por resíduos cerâmicos aumenta o desempenho dos betões. Os resultados obtidos mostram que os betões com substituição parcial de cimento por resíduos cerâmicos moídos apresentam desempenho melhorado em termos da sua durabilidade.

## 1. Introdução

Os resíduos da indústria cerâmica podem simplificada-mente 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. 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 [1]. Se se levar em linha de conta, as crescentes restrições ambientais impostas no seio da UE à deposição de resíduos, as quais se traduzem em taxas de deposição cada vez mais significativas, isso implica que a indústria cerâmica terá que

investigar formas de reaproveitamento dos seus resíduos. Apesar de haver já neste momento algum nível de reaproveitamento dos mesmos, 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 indústrias. 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 [2,3]. 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 toneladas de rocha por tonelada de clínquer). Por outro lado a produção de 1 tonelada de cimento está associada à emissão de 0,55 toneladas de dióxido de carbono de origem química, a que se tem que somar 0,39 toneladas de  $\text{CO}_2$  devido às emissões provocadas pela queima de gásóleo em centrais termoeléctricas para a produção de energia necessária ao processo industrial, o que leva a um total de 0,94 toneladas de  $\text{CO}_2$  [4]. Assim sendo, a substituição parcial de cimento por resíduos cerâmicos representa poupanças substanciais de energia além dos 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 de resíduos cerâmicos moídos (Fig. 1) foi já confirmada por alguns investigadores [5-7]. Apesar disso as investigações sobre o reaproveitamento destes resíduos em betões são ainda escasas e as mesmas têm-se debruçado somente sob o seu desempenho mecânico [8,9]. Consequentemente, pretende-se no presente artigo apresentar resultados relativos à resistência e à durabilidade de betões com substituição parcial de cimento por resíduos cerâmicos moídos.



Figura 1. Cerâmica de pasta branca moída.

## 2. Investigação experimental

### 2.1. Materiais, composição e fabrico de betões

O presente trabalho de investigação utilizou 500 kg de resíduos cerâmicos os quais foram triturados num moinho de maxilas. Após o processo de peneiração obtiveram-se agregados grossos, areia e pó cerâmico. A fim de se obterem resíduos cerâmicos em pó com dimensão abaixo de 75  $\mu\text{m}$  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 conseqüente pagamento de taxas de deposição. Numa fase inicial, designada por fase A, utilizaram-se os resíduos cerâmicos em pó com dimensão abaixo de 75  $\mu\text{m}$  para substituição parcial do cimento. Nesta fase foram utilizados areias e agregados britados de granito para a execução dos betões. Na execução dos betões 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 [10,11], tendo sido projectado um betão com um valor de resistência característico de  $f_{ck}=25\text{N/mm}^2$  e um valor médio de  $f_m=30\text{N/mm}^2$ . Foram ensaiadas cinco composições de betão, uma delas diz respeito ao betão de referência e as outras quatro diferenciam-se entre si pela origem do resíduo cerâmico utilizado. As designações das mistu-

ras 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 1.

Tabela 1. Composição dos betões por  $\text{m}^3$

	Betão de Ref <sup>a</sup>	Betão com resíduos cerâmicos moídos
Cimento Portland	350,0 kg	280,0 kg.
Resíduos cerâmicos moídos	-	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	

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 cuja vibração foi levada a cabo numa mesa vibratória. Decorrido um dia após a betonagem, procedeu-se à desconfregem dos provetes os quais ficaram a curar em água até à data do seu ensaio.

### 2.2. Técnicas experimentais

O ensaio da resistência à compressão foi realizado em provetes com  $100 \times 100 \times 100\text{ mm}^3$  de acordo com a norma NP EN 12390-3:2003. Os provetes foram curados em água a uma temperatura de  $18 \pm 1\text{ }^\circ\text{C}$  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.

No ensaio de permeabilidade ao oxigénio utilizaram-se 4 provetes de betão com 5 cm de diâmetro e 4 cm de altura, os quais foram submetidos a uma determinada pressão. A permeabilidade intrínseca ao oxigénio é determinada com a expressão:

$$K = \frac{4.04 \times R \times L \times 10^{-16}}{A \times (P_2^2 - 1)}$$

na qual:

$R$  – fluxo de oxigénio que atravessa o provete ( $\text{cm}^3/\text{s}$ ),  $L$  – Espessura do provete (m),  $A$  – Área da secção do provete ( $\text{m}^2$ ),  $P_2$  – Pressão do oxigénio à entrada (bar), pressão à saída de 1 bar;  $K$  – permeabilidade intrínseca ao oxigénio ( $\text{m}^2$ ).

O ensaio de difusão de cloretos consistiu na determinação da profundidade de penetração de iões cloreto em 4 provetes de betão com 11 cm de diâmetro e 5 cm de altura. Aplica-se uma diferença de potencial de  $30 \pm 0,2V$  no provete que irá provocar a difusão dos iões. Uma das faces do provete é colocada em contacto com uma solução de cloreto de sódio e hidróxido de sódio, enquanto a outra fica em contacto com uma solução de hidróxido de sódio. A profundidade de penetração é medida após sujeição dos provetes a um procedimento de compressão diametral. A superfície fracturada do provete é aspergida com uma solução de nitrato de prata ( $NO_3Ag$ ), após o que é feita a medição do comprimento da área que mudou de cor. O coeficiente de difusão é calculado com a seguinte equação:

$$D = (RTL/zFU) \cdot [X_d - (\alpha\sqrt{X_d})/t]$$

na qual:

$$\alpha = 2\sqrt{(RTL/zFU)} \cdot \text{erf}^{-1}(1-2c_d/c_o)$$

D: Coeficiente de difusão,  $m^2/s$ ;  
z: Valência absoluta do ião cloreto,  $z = 1$ ;  
F: Constante de Faraday,  $F = 9.648 \times 10^4 J/(V.mol)$ ;  
U: Diferença de potencial, V;  
R: Constante de gás perfeito,  $R = 8.314 J/(K.mol)$ ;  
T: Temperatura da solução, K;  
L: Espessura do provete, m;  
 $X_d$ : Profundidade de penetração, m;  
t: Duração do ensaio em segundos;  
 $\text{erf}^{-1}$ : Função de erro inversa;  
 $c_o$ : Concentração de cloretos que provoca a mudança de cor;  
 $c_d$ : Concentração de cloretos na solução de cloreto de sódio

O ensaio de envelhecimento acelerado consiste na sujeição dos provetes de betão a 12 ciclos descritos na Tabela 2.

Tabela 2. 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 24 h de duração.

### 3. Análise e discussão dos resultados

#### 3.1. Resistência à compressão

Os resultados obtidos revelam menores resistências dos betões com resíduos cerâmicos quando comparados com o betão de referência, 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. 2). Os betões com 20% de substituição de cimento por resíduos do tipo RTC apresentam o desempenho mecânico mais elevado, o que significa que aqueles resíduos são os que apresentam uma actividade pozolânica mais elevada.

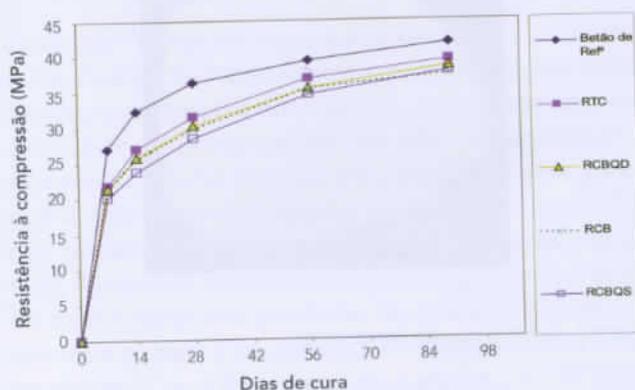


Figura 2. Resistência à compressão de betões de acordo com a idade de cura.

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. 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 idades de cura mais avançadas, os betões com 20% de substituição de cimento por resíduos cerâmicos apresentem diferenças de resistência insignificantes. Aliás, a redução na resistência em idades iniciais pode ser ultrapassada pela utilização de cura com elevação de temperatura. Como é pouco prática 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. Relativamente à permeabilidade ao oxigénio (Fig. 3) pode constatar-se que os betões (RTC e RCB) apresentam valores superiores aos valores de permeabilidade média do betão de referência, enquanto os betões (RCBQD e RCBQS) apresentam permeabilidades inferiores.

As diferenças assinaladas oscilam entre 6 a 12%, pelo que pode afirmar-se que não são significativas. O coeficiente de difusão de cloretos é apresentado na Fig. 4.

Apesar dos betões com resíduos do tipo RCB apresentarem a mesma difusão do betão de referência, todos os outros apresentam valores de difusão bastante inferiores. As diferenças relativamente a estes são muito substanciais e parecem indicar um óptimo comportamento destes betões em termos da sua durabilidade. A explicação para este comportamento poderá estar na actividade pozolânica dos resíduos utilizados [8] e na formação de compostos CSH (menos porosos), os quais podem ser responsáveis por alguma segmentação da rede de poros capilares e também por algum efeito filler [13,14]. Como a permeabilidade ao oxigénio e o ingresso de cloretos (e outros agentes agressivos) constituem as causas mais importantes na deterioração física e química do betão [15], os resultados obtidos parecem indicar que a utilização deste tipo de resíduos poderá permitir um bom desempenho do betão em termos da sua durabilidade, o que por sua vez tem também vantagens ambientais associadas [16].

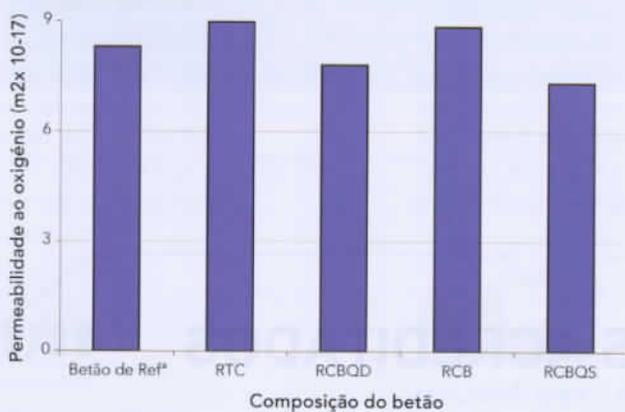


Figura 3. Permeabilidade ao oxigénio.

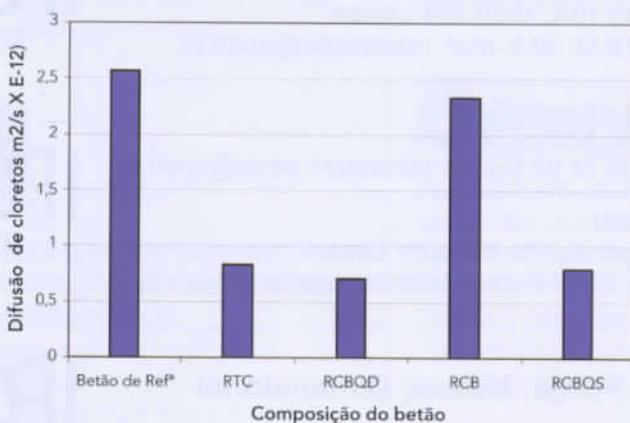


Figura 4. Coeficiente de difusão de cloretos.

### 3.2. Envelhecimento acelerado

Relativamente ao comportamento mecânico dos betões após o ensaio de envelhecimento (Fig. 5), observa-se que todos os betões contendo 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.

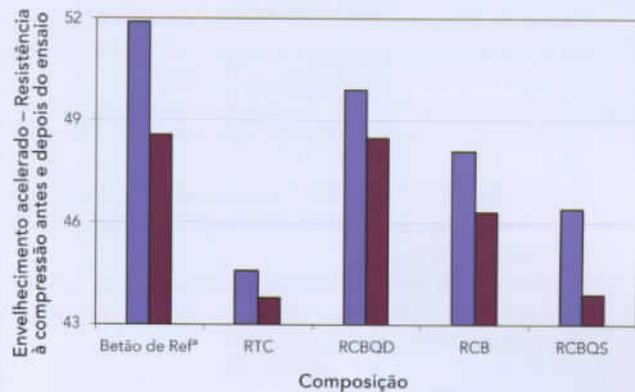


Figura 5. Resistência à compressão: antes e depois do ensaio de envelhecimento.

### 4. Conclusões

A substituição de cimento Portland por resíduos cerâmicos moídos provoca perdas de resistência mínimas em idades iniciais. A permeabilidade ao oxigénio destes betões é similar à do betão de referência. Relativamente à difusão de cloretos e com excepção dos betões com resíduos cerâmicos de pasta branca, os restantes apresentam valores do coeficiente de difusão que são menos de metade do valor do betão de referência. Já quanto ao ensaio de envelhecimento acelerado constata-se que as perdas de resistência (em termos percentuais) antes e depois dos ciclos de aquecimento e arrefecimento são maiores no betão de referência o que significa que a substituição parcial de cimento por resíduos cerâmicos moídos contribui para o aumento da durabilidade do betão.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] Fernandes, M.; Sousa, A.; Dias, A. – Impactes Ambientais e Comércio de Emissões. Indústria cerâmica: Um caso de estudo. Associação Portuguesa da Indústria Cerâmica APICER, Dezembro de 2004.
- [2] Metha, P.K. – Reducing the environment impact of concrete. Concrete can be durable and environmentally friendly. *Concrete International*, Vol.10, 2001.
- [3] Meyer, C. – The greening of the concrete industry. *Construction and Building Materials* Vol.31, 2009, pp.601-605.
- [4] Gartner, Ellis – Industrially interesting approaches to low-CO<sub>2</sub> cements. *Cement and Concrete Research* Vol.34, 2004, pp.1489-1498.
- [5] Puertas, F.; Garcia-Diaz, I.; Barba, A.; Gazulla, M.; Palacios, M.; Gomez, M.; Martinez-Ramirez, S. – Ceramic wastes as alternative raw materials for Portland cement clinker production. *Cement & Concrete Composites* Vol.30, 2008, pp.798-805.
- [6] Naceri, A.; Hamina, M. – Use of waste brick as a partial replacement of cement in mortar. *Waste Management* Vol.29, 2009, 2378-2384.
- [7] Lavat, A.; Trezza, M.; Poggi, M. – Characterization of ceramic roof tile wastes as pozzolanic admixture. *Waste Management* Vol.29, 2009, pp.1666-1674.
- [8] Binici, H. – Effect of crushed ceramic and basaltic pumice as fine aggregates on concrete mortar properties. *Construction and Building Materials* Vol.21, 2007, pp.1291-1197.
- [9] Cachim, P. – Mechanical properties of brick aggregate concrete. *Construction and Building Materials* Vol.23, 2009, pp.1292-1297.
- [10] Faury, J. – Le Béton. Influence de ses constituents inerts. Regles à adopter pour sa meilleure composition. Sa confection et son transport sur les chantiers. 3<sup>ed</sup> ed. Paris, Dunod, 1958.
- [11] Lourenço, Jorge; Coutinho José – Automatic calculations for concrete mix selection. Faury and Bolomey methods. Technical documents, Coimbra, 1986.
- [12] Homain, H.; Marchand, J.; Duhot, V.; Moranville-Regourd – Diffusion of chloride ions in limestone filler blended cement pastes and mortars. *Cement and Concrete Research* Vol.25, 1995, pp.1667-1678.
- [13] Topçu, I.; Ugurlu, A. – Effect of the use of mineral filler on the properties of concrete. *Cement and Concrete Research* Vol.33, 2003, pp.1071-1075.
- [14] Oh, B.; Cha, S.; Jang, B.; Jang, S. – Development of high-performance concrete having high resistance to chloride penetration. *Nuclear Engineering and Design* Vol.212, 2002, pp.221-231.
- [15] Bijen, J. – Durability of engineering structures. WoodHead Publishing Limited. ISBN 1 85573 695 0, CRC Press, Cornwall, England, 2009.
- [16] Pacheco Torgal, F.; Jalali, S. (2011) – Eco-efficient construction and building materials. ISBN -13: 978-0857298911, 247 p, Springer Verlag, London, UK.



## LABORATÓRIOS ACREDITADOS

### Laboratório de ensaios: Betão; Agregados e Ligantes

- **Unidade Laboratorial de Lisboa**  
Av. Conselheiro Barjona de Freitas 10A, 1500-204 Lisboa  
Tel. 21 774 19 25 / 32 Fax. 21 778 58 39 E-mail: laboratorio@apeb.pt
- **Unidade Laboratorial do Porto**  
Zona Industrial da Carriça, Lote 17, 4745-312 Muro  
Tel. 22 986 74 01 / 02 Fax. 22 986 74 08 E-mail: laboratorioporto@apeb.pt
- **Unidade Laboratorial de Vila Real**  
Estrada de Sabrosa (EN3139 Lugar de Vila Nova de Cima  
Folhadela –Vila Real Tel. 22 986 74 00 E-mail: laboratorioporto@apeb.pt

### Laboratório de Metrologia: Força; Massa; Dimensional e Temperatura

Av. Conselheiro Barjona de Freitas 10A, 1500-204 Lisboa  
Tel. 217 741 925 / 32 Fax. 21 778 58 39 E-mail: metrologia@apeb.pt

**IPAC**  
acreditação

L0040  
Ensaios

**IPAC**  
acreditação

M0064  
Calibração

**IPAC**  
acreditação

L0374  
Ensaios