

RESISTÊNCIA À ABRASÃO DE BETÕES PRODUZIDOS COM AGREGADOS GROSSOS CERÂMICOS RECICLADOS

Brito*, J. de; Pereira**, A. S.; Correia***, J. R.

*Professor Associado. DECivil, Instituto Superior Técnico, Lisboa - Portugal

**Arquitecta, Mestranda em Construção (IST)

***Assistente Estagiário. DECivil, Instituto Superior Técnico, Lisboa - Portugal



RESUMO

Os resíduos cerâmicos provenientes da indústria de fabrico de tijolos e telhas de barro vermelho e das operações de transporte para estaleiro e instalação em obra desses materiais são susceptíveis de ser aproveitados para diversos usos. Destes, o mais comum mas também o que menos os valoriza é a utilização como material de enchimento em pavimentos térreos, onde aliás não são o material mais indicado. No âmbito de uma investigação experimental mais vasta em curso no Instituto Superior Técnico, em que foram utilizados restos de tijolos de barro vermelho como agregados grossos para fabrico de placas de pavimento de betão, apresentam-se neste artigo os resultados relativos à resistência à abrasão desse betão, de acordo com a norma DIN 52108:

1. INTRODUÇÃO

Os resíduos cerâmicos associados à indústria cerâmica e da construção são uma das componentes mais importantes dos chamados resíduos da construção e demolição (RCD), os quais constituem um grave problema ambiental e técnico-económico da sociedade actual.

As três fontes principais destes resíduos são: a indústria cerâmica (existem perdas associadas ao processo de fabrico dos elementos cerâmicos, parte das quais acaba por não ter consequências duradouras por serem reincorporadas no processo de fabrico); a construção de edifícios (no transporte para o estaleiro e dentro deste, na execução de paredes, telhados, lajes

aligeiradas e outros elementos da construção e ainda em trabalhos posteriores como a abertura de roços, produzem-se resíduos que são posteriormente transportados para vazadouro, sem qualquer triagem ou reaproveitamento); a demolição de edifícios (na generalidade dos casos, a demolição das construções no fim da sua vida útil não é selectiva, o que inviabiliza um reaproveitamento economicamente viável dos resíduos cerâmicos resultantes sobretudo de coberturas, paredes divisórias, louças sanitárias e pavimentos aligeirados; sismos, cheias e conflitos armados são outras das principais causas da demolição de edifícios).

Em termos de valorização deste tipo de resíduos em particular, existe um conjunto

alargado de hipóteses [1], ainda que nem todas correspondam a casos de sucesso: cobertura de aterros; recuperação paisagística; pavimentação; construção de estradas; reutilização em novas construções; reciclagem propriamente dita; produção de betão; argamassas de assentamento; argamassas de revestimento. Destas hipóteses, realça-se a produção de betão por ser porventura aquela em que os resíduos são mais valorizados, pelo que se torna particularmente aliciante ao nível da investigação.

Em Portugal e dentre os resíduos cerâmicos, os provenientes do cozimento de barro vermelho representam a grande maioria, tanto em termos de volume como de peso. Foram por isso seleccionados para um programa experimental de reutilização no fabrico de peças de betão sem grandes exigências de resistência mecânica (placas de pavimento) levado a cabo no Instituto Superior Técnico e integrado na elaboração de uma dissertação de Mestrado em Construção intitulada "Utilização de Agregados Grossos Cerâmicos Reciclados na Produção de Betão" [1], que se passa a descrever de uma forma muito sumária.

2. CAMPANHA EXPERIMENTAL

Conforme referido acima, a campanha experimental implementada no Laboratório de Construção do Instituto Superior Técnico consistiu na produção e ensaio de placas de pavimento de betão simples nas quais a parcela dos agregados grossos naturais (pétreos) foi substituída por fracções sucessivamente crescentes (1/3, 2/3 e 3/3, correspondendo respectivamente aos betões B1, B2 e B3) de agregados cerâmicos grossos obtidos a partir da trituração de tijolos de barro vermelho (Fig. 1). Os resultados foram comparados com os correspondentes a placas idênticas com um betão de referência (BR) sem quaisquer agregados cerâmicos reciclados (Fig. 2), com a particularidade de se ter mantido exactamente a mesma composição do betão (recorrendo à curva de referência de Faury)

em todas as combinações (incluindo a granulometria da parcela de grossos), à excepção óbvia dos próprios agregados grossos e ainda da quantidade de água. Esta última foi a necessária para atingir a mesma trabalhabilidade (medida através do *slump* no ensaio do cone de Abrams - Fig. 3) em todas as betonagens, sendo os agregados cerâmicos submetidos a um processo de pré-saturação que consistiu na imersão durante cerca de 30 minutos em água e na sua secagem ao ar durante um período idêntico após espalhamento sobre plásticos (Fig. 4). Os resultados desta investigação encontram-se reportados na sua totalidade num relatório do ICIST, Instituto de Engenharia de Estruturas, Território e Construção [2], de divulgação restrita.

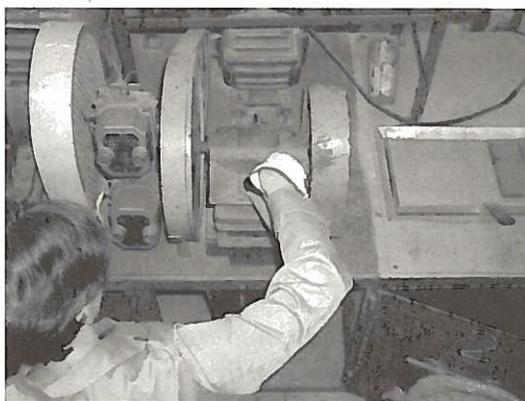


Fig. 1 - Britadeira de maxilas utilizada



Fig. 2 - Moldes das placas já preenchidos com o betão de referência BR

Passa-se agora a uma listagem muito sucinta dos ensaios realizados.



Fig. 3 - Medição do abaixamento (*slump*) do betão B1 (substituição de 1/3 dos agregados pétreos naturais por cerâmicos reciclados)



Fig. 4 - Agregados cerâmicos colocados sobre plásticos para secarem

Em relação aos agregados (areia natural, comum em todos os betões, brita pétreo e agregados grossos cerâmicos), foram realizados os seguintes ensaios: índice volumétrico (de acordo com a especificação E223 do LNEC); baridade seca ao ar e em estufa e saturada (segundo a Norma Portuguesa NP955); massa volúmica (do material impermeável das partículas, das partículas saturadas e das partículas secas) e absorção de água referida à massa de agregado seco (tal como prescrito a Norma Portuguesa NP581); curva granulométrica (Fig. 5). Os resultados destes ensaios encontram-se reportados em [3].

Foram determinadas as seguintes propriedades do betão fresco: trabalhabilidade (que foi medida através do abaixamento no cone de Abrams e mantida constante em todas as betonagens: 80 mm \pm 10 mm); massa volúmica; absorção de água.

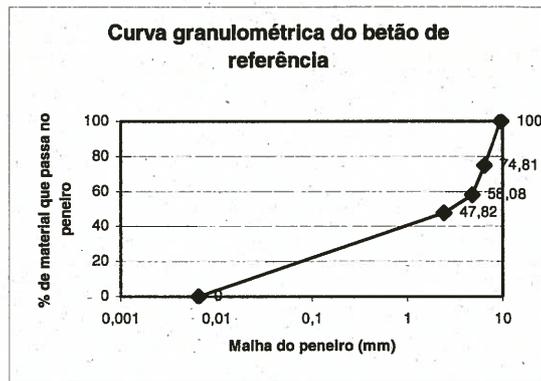


Fig. 5 - Curva granulométrica adoptada para os agregados grossos de todos os betões

Os resultados encontram-se também transcritos em [3].

Finalmente, as diferentes composições de betão endurecido foram sujeitas aos seguintes ensaios: rotura à compressão (de acordo com a especificação E226 do LNEC); rotura à tracção por flexão (segundo a especificação E227 do LNEC); resistência à abrasão (recorrendo à norma DIN 52108); absorção de água por capilaridade (conforme prescrito na especificação E393 do LNEC); absorção de água por imersão (segundo a especificação E394 do LNEC). Os resultados dos dois primeiros ensaios podem ser encontrados em [4] e os do terceiro são agora objecto de uma descrição pormenorizada.

3. RESISTÊNCIA À ABRASÃO

O objectivo deste ensaio é determinar a resistência à abrasão de provetes prismáticos de betão das diferentes composições em estudo. À partida, seria de prever resistências tanto menores quanto maior fosse a percentagem de agregados cerâmicos na composição.

3.1 Procedimento do ensaio

Uma vez que o equipamento disponível no Laboratório de Construção do IST não estava adaptado à especificação do LNEC E396, mas sim à norma alemã DIN 52108 [5], optou-se por seguir o procedimento aí descrito.

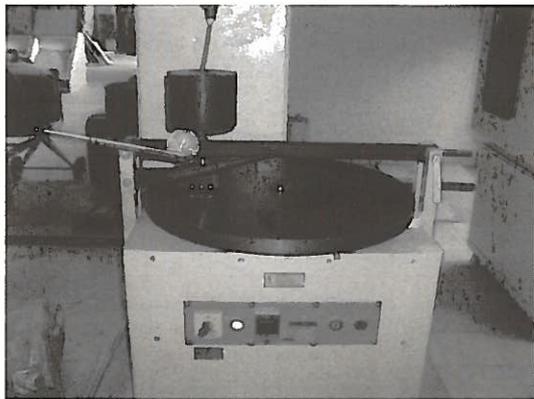


Fig. 6 - Máquina de desgaste

Foi utilizado o seguinte equipamento:

- máquina para ensaio de desgaste (Fig. 6);
- craveira;
- balança;
- areia abrasiva.

A areia abrasiva utilizada foi a especificada para a máquina de desgaste utilizada, cuja referência é FTS SEIDNER N 1002.

Os provetes foram obtidos por corte (Fig. 7), a partir das placas ensaiadas à tracção por flexão, tendo-se procurado obter provetes com as dimensões 7 x 7 x 5 (cm). Os provetes de betão foram ensaiados aos 33 dias, tendo estado no interior da câmara de cura húmida até ao corte que se deu aos 31 e aos 32 dias. Os provetes permaneceram na câmara de secagem até atingirem massa constante (24 h).

Foi determinada a massa de cada um dos provetes ensaiados. Os resultados dessas pesagens são apresentados no Quadro 1.

Depois de pesados os provetes a ensaiar,



Fig. 7 - Serragem dos provetes

Quadro 1 - Resultados das pesagens dos provetes

Composição	Provete	Massa (g)
BR	1	474,63
	2	487,11
	3	509,71
B1	4	516,17
	5	517,58
	6	511,56
B2	7	500,62
	8	486,33
	9	506,20
B3	10	477,42
	11	457,13
	12	472,73

a sua espessura foi medida em quatro pontos (Fig. 8), com o auxílio de uma craveira. Os resultados dessa medição são apresentados no Quadro 2, tal como a média das quatro medições.

Depois da espessura, foram medidos os comprimentos de dois lados consecutivos dos provetes, também com o auxílio de uma craveira, a meia altura desse lado. Os resultados são apresentados no Quadro 3.

Quadro 2 - Espessura dos provetes a ensaiar - medição em quatro pontos e valor médio

Composição	Provete	h_1 (cm)	h_2 (cm)	h_3 (cm)	h_4 (cm)	h_m (cm)
BR	1	4,450	4,425	4,450	4,425	4,438
	2	4,600	4,650	4,620	4,600	4,618
	3	4,900	5,000	4,900	4,950	4,938
B1	4	5,225	5,225	5,250	5,250	5,238
	5	5,150	5,175	5,175	5,175	5,169
	6	5,100	5,100	5,100	5,100	5,100
B2	7	5,200	5,175	5,175	5,200	5,188
	8	5,000	4,975	4,975	5,000	4,988
	9	5,250	5,250	5,250	5,250	5,250
B3	10	5,300	5,250	5,275	5,250	5,269
	11	5,000	5,000	5,025	5,000	5,006
	12	5,200	5,200	5,200	5,200	5,200



Fig. 8 - Medição das dimensões dos provetes com uma craveira

Quadro 3 - Comprimento de dois lados consecutivos dos provetes

Composição	Provete	L ₁ (cm)	L ₂ (cm)
BR	1	7,000	7,050
	2	7,000	7,050
	3	6,950	6,925
B1	4	7,000	6,925
	5	7,025	7,000
	6	6,950	7,050
B2	7	7,050	5,000
	8	7,025	7,050
	9	7,075	6,950
B3	10	6,975	7,025
	11	7,075	6,900
	12	6,975	7,125

Descreve-se nos pontos seguintes a técnica que foi seguida para determinar a resistência à abrasão dos provetes:

- limpou-se o disco e preparou-se a máquina de ensaio;
- em cada provete, foi desenhada no sentido dos ponteiros do relógio (Fig. 9) uma seta de orientação, para a rotação do provete, correspondendo cada quatro rotações, a um ciclo de ensaios;
- pesaram-se 20 g de areia abrasiva, que foi colocada no anel central do disco onde foi colocado o provete;
- colocou-se sobre o anel abrasivo o provete, em local apropriado, sobre o qual se aplicou a força de um peso cilíndrico (Fig. 10); posteriormente, foram marcadas na máquina de ensaio 22 rotações, correspondentes a uma volta de desgaste do provete;
- após uma volta de desgaste, limpou-se o

disco e o provete;

- de seguida, rodou-se o provete e repetiram-se os três pontos anteriores até perfazer um ciclo de ensaios, correspondente a 4 x 22 rotações;
- depois de cada ciclo e para quatro ciclos do mesmo provete (16 ciclos ao todo), voltou-se a pesar o provete e a medir a espessura em quatro pontos, tendo-se registado os valores dessas medições;
- este procedimento foi igual para os 12 provetes.

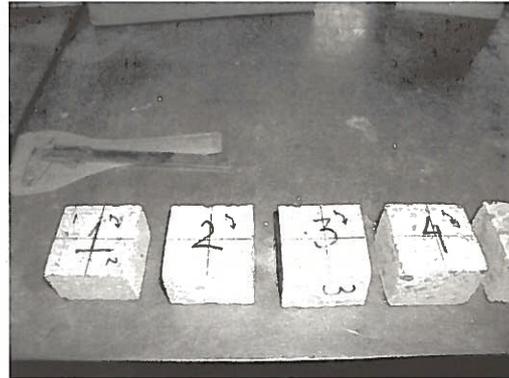


Fig. 9 - Marcação das setas nos provetes



Fig. 10 - Colocação do provete na máquina

3.2 Resultados obtidos

Apresentam-se nos Quadros 4 a 7 os resultados obtidos em cada um dos quatro ciclos do ensaio.

A partir destes valores, calculou-se um valor da perda de espessura por desgaste por abrasão através das expressões:

$$\Delta\lambda = \lambda_{0m} - \lambda_{16m}$$

$$\Delta V = \frac{\Delta m}{\delta R}$$

$$\Delta\lambda = \frac{\Delta m}{\delta R \cdot A}$$

em que:

- Δl - perda média de espessura;
- l_{0m} - espessura inicial;
- l_{16m} - espessura final;
- ΔV - perda em volume;
- Δm - perda em massa;
- δR - densidade da amostra;
- A - área da secção do provete.

Quadro 4 - Resultados do 1º ciclo do ensaio - espessuras em quatro pontos, espessura média e massa do provete

Composição	Provete	h_1 (cm)	h_2 (cm)	h_3 (cm)	h_4 (cm)	h_m (cm)	m (g)
BR	1	4,325	4,325	4,325	4,325	4,325	465,14
	2	4,500	4,500	4,500	4,500	4,500	475,99
	3	4,825	4,825	4,825	4,825	4,825	500,99
B1	4	5,150	5,150	5,150	5,150	5,150	508,84
	5	5,080	5,080	5,080	5,080	5,080	507,92
	6	5,000	5,000	5,020	5,020	5,010	505,74
B2	7	5,100	5,125	5,100	5,100	5,106	495,40
	8	4,925	4,900	4,900	4,920	4,911	480,72
	9	5,185	5,200	5,185	5,185	5,189	502,17
B3	10	5,185	5,185	5,200	5,185	5,189	473,37
	11	4,925	4,925	4,925	4,925	4,925	452,95
	12	5,125	5,125	5,150	5,150	5,138	469,96

Quadro 5 - Resultados do 2º ciclo do ensaio

Composição	Provete	h_1 (cm)	h_2 (cm)	h_3 (cm)	h_4 (cm)	h_m (cm)	m (g)
BR	1	4,225	4,225	4,225	4,225	4,225	453,04
	2	4,375	4,375	4,375	4,375	4,375	462,68
	3	4,720	4,700	4,740	4,740	4,725	489,53
B1	4	5,025	5,025	5,025	5,025	5,025	497,64
	5	4,950	4,950	4,980	4,980	4,965	496,83
	6	4,875	4,900	4,900	4,875	4,888	505,74
B2	7	5,000	5,025	5,025	5,025	5,019	485,00
	8	4,800	4,800	4,800	4,800	4,800	465,00
	9	5,125	5,125	5,100	5,100	5,113	495,23
B3	10	5,050	5,085	5,100	5,085	5,080	463,01
	11	4,825	4,825	4,850	4,825	4,831	443,83
	12	5,085	5,085	5,085	5,050	5,076	461,74

Quadro 6 - Resultados do 3º ciclo do ensaio

Composição	Provete	h_1 (cm)	h_2 (cm)	h_3 (cm)	h_4 (cm)	h_m (cm)	m (g)
BR	1	4,100	4,100	4,100	4,100	4,100	440,30
	2	4,225	4,225	4,225	4,225	4,225	450,11
	3	4,600	4,600	4,600	4,600	4,600	474,83
B1	4	4,925	4,925	4,925	4,925	4,925	486,75
	5	5,850	5,850	5,850	5,850	5,850	485,68
	6	4,780	4,750	4,780	4,780	4,773	481,53
B2	7	4,900	4,925	4,925	4,900	4,913	474,02
	8	4,700	4,700	4,700	4,725	4,706	456,91
	9	5,025	5,025	5,025	5,025	5,025	485,12
B3	10	4,985	5,000	5,000	4,985	4,993	452,86
	11	4,750	4,750	4,785	4,750	4,759	436,41
	12	5,000	4,985	5,000	5,000	4,996	454,41

Quadro 7 - Resultados do 4º ciclo do ensaio

Composição	Provete	h ₁ (cm)	h ₂ (cm)	h ₃ (cm)	h ₄ (cm)	h _m (cm)	m (g)
BR	1	4,000	4,000	4,000	4,000	4,000	427,84
	2	4,125	4,125	4,125	4,125	4,125	438,40
	3	4,480	4,480	4,480	4,480	4,480	464,05
B1	4	4,825	4,825	4,825	4,825	4,825	475,42
	5	4,750	4,750	4,750	4,700	4,738	473,53
	6	4,680	4,650	4,700	4,680	4,678	471,28
B2	7	4,825	4,800	4,785	4,800	4,803	464,35
	8	4,600	4,600	4,600	4,600	4,600	446,90
	9	4,900	4,900	4,900	4,925	4,906	474,67
B3	10	4,850	4,885	4,885	4,850	4,868	441,92
	11	4,685	4,650	4,700	4,685	4,680	428,07
	12	4,900	4,900	4,900	4,900	4,900	446,98

Os cálculos correspondentes a estas expressões são apresentados no Quadro 8.

Quadro 8 - Resultados do ensaio da resistência à abrasão

Composição	Provete	Δm (g)	δR (g/cm ³)	Δl (cm)
BR	1	46,79	2,167	0,437
	2	48,71	2,138	0,462
	3	45,66	2,145	0,442
B1	4	40,75	2,033	0,413
	5	44,05	2,036	0,440
	6	40,28	2,047	0,402
B2	7	36,27	2,738	0,376
	8	39,43	1,969	0,404
	9	31,53	1,961	0,327
B3	10	35,50	1,849	0,392
	11	29,06	1,870	0,318
	12	25,75	1,829	0,283

Quadro 9 - Valores médios da perda de espessura por abrasão para cada composição

Composição	Δl (cm)
BR	0,447
B1	0,418
B2	0,369
B3	0,331

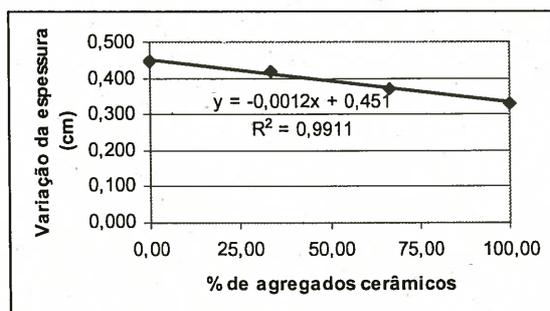


Fig. 11 - Relação entre o desgaste por abrasão e a percentagem de agregados cerâmicos

Para cada uma das composições, foi calculado um valor médio do desgaste por abrasão. Apresentam-se no Quadro 9 e na Fig. 11 esses valores médios para cada composição

3.3 Análise dos resultados

Em função dos resultados obtidos, são de salientar os seguintes aspectos:

- seria de esperar, à partida, que o desgaste por abrasão, traduzido pela variação da espessura, aumentasse com a percentagem de agregados cerâmicos, situação que não se verificou neste ensaio;
- este facto pode ser justificado por uma possível actividade pozolânica realizada pelos agregados finos cerâmicos, conferindo-lhes uma resistência ao desgaste superior àquela verificada no betão com agregados primários, à semelhança do sucedido na experiência levada a cabo por Zordan e Paulon [6]; de facto, a resistência à abrasão depende fundamentalmente do desgaste da pasta constituída pelos agregados finos e pelo cimento e da ligação entre esta e os agregados grossos que, no decurso da experiência, acabam por se soltar sem serem totalmente erodidos; por outras palavras, mesmo que os agregados grossos primários possam ser mais resistentes ao desgaste do que os agregados grossos cerâmicos, se a sua

ligação à pasta for menos eficaz, poderão soltar-se com mais facilidade; crê-se portanto que a maior porosidade dos agregados cerâmicos terá contribuído para uma melhor ligação destes à pasta e para uma diminuição da perda de massa no ensaio;

- outra explicação para esta tendência, ainda que menos plausível, poderá ser a forma mais laminar dos agregados cerâmicos que, ao disporem-se com a face maior na horizontal, apresentam à areia uma maior percentagem da área do disco do que com os agregados primários; desta forma, e uma vez que a pasta é mais erodível que os agregados grossos, os provetes com agregados cerâmicos teriam um menor desgaste;
- finalmente, ainda que muito pouco plausível, é possível que a própria resistência intrínseca dos tijolos à abrasão seja superior à do calcário que constitui os agregados primários nestes ensaios;
- é de referir que a tendência registada de diminuição da perda de massa com o aumento da percentagem dos agregados grossos cerâmicos é próxima da linear, o que se traduz por um coeficiente de correlação próximo da unidade.

4. CONCLUSÕES

Apesar do carácter parcial dos ensaios aqui apresentados, pode-se concluir que é viável a substituição, pelo menos parcial, de agregados grossos pétreos naturais por cerâmicos reciclados na produção de placas de pavimento de betão. De facto, neste tipo de elementos não se torna indispensável uma resistência mecânica significativa (à compressão ou à tracção), sendo muito mais

relevante a resistência à abrasão. Ora é precisamente nesta última característica que o betão produzido com os agregados cerâmicos pode revelar um excelente desempenho, até mesmo superior ao do betão convencional.

5. REFERÊNCIAS

- [1] Pereira, A. S. - "Utilização de Agregados Grossos Cerâmicos Reciclados na Produção de Betão", Dissertação de Mestrado em Construção, IST, 2002.
- [2] Correia, J. R.; Pereira, A. S.; Brito, J. de - "Betão com Agregados Cerâmicos. Campanha Experimental Realizada no IST, Relatório ICIST DTC n.º 5/02, IST, Lisboa, 2002.
- [3] Pereira, A. S.; Correia, J. R.; Brito, J. de - "Caracterização dos Agregados Grossos Cerâmicos Reciclados e do Betão Fresco Produzido", *Betão*, Ano IV, n.º 8, APEB, 2002.
- [4] Pereira, A. S.; Correia, J. R.; Brito, J. de; Santos, J. R. - "Desempenho Mecânico de Betões Fabricados com Agregados Grossos Cerâmicos Reciclados", V Seminário sobre "Desenvolvimento Sustentável e a Reciclagem na Construção Civil", São Paulo, 2002.
- [5] DIN 52108 - "Wear test with the Grinding Wheel According to Boehme. Grinding Wheel Method".
- [6] Zordan, S. E.; Paulon, V. A. - "A Utilização do Entulho como Agregado para o Concreto", no site www.reciclagem.pcc.usp.br/a_utilizacao_entulho.htm.