

Utilização de RCD em estruturas de drenagem de obras geotécnicas

António José Roque

Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Portugal

A. Paula F. da Silva

DCT-CICEGe/FCT-UNL, Caparica, Portugal

Gonçalo Manuel Rodrigues & Rui Pedro Marques Almeida

Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, e FCT-UNL, Caparica, Portugal

RESUMO: O aumento da utilização das matérias-primas secundárias no setor da construção é fortemente incentivado e apoiado pela Comissão Europeia no âmbito de iniciativas como o Horizonte 2020. Este trabalho apresenta o estudo da durabilidade e do comportamento hidráulico de um agregado de betão britado, proveniente de resíduos de construção e demolição. O mesmo estudo foi efetuado com agregados naturais de basalto e de calcário, com o objetivo de servir de referência aos resultados obtidos com o agregado reciclado. Todos os materiais foram ensaiados com água da rede de abastecimento público e com um lixiviado recolhido num aterro de resíduos sólidos urbanos. A viabilidade técnica de aplicar agregado reciclado de resíduos de construção e demolição em estruturas de drenagem de obras geotécnicas e de infraestruturas de transporte, é avaliada.

1 INTRODUÇÃO

A reciclagem de resíduos em obras de engenharia civil deve ser previamente avaliada mediante a realização de um estudo que contemple a determinação das suas propriedades ambientais e de engenharia. Caso o seu potencial poluente não coloque em risco o ambiente e a saúde pública, e as suas propriedades de engenharia garantam um desempenho adequado às obras no seu tempo de vida útil, é de privilegiar a utilização daqueles materiais alternativos, em detrimento dos materiais naturais, designadamente por necessidade de cumprimento das metas de reutilização, de reciclagem e de outras formas de valorização material de resíduos, até 2020 [1].

A condutividade hidráulica dos resíduos de construção e demolição (RCD) é, por exemplo, uma propriedade de engenharia essencial na avaliação da viabilidade da sua utilização na construção de estruturas de drenagem de obras geotécnicas, como são os aterros de resíduos, as barragens de terra ou os muros de suporte, e de infraestruturas de transporte, como são as rodovias e as ferrovias. Os estudos publicados sobre o comportamento hidráulico dos RCD são, porém, escassos, facto que se justifica por a utilização dos agregados reciclados ainda ser relativamente recente, contrariamente à dos agregados naturais, cujo comportamento em várias obras de engenharia civil se encontra extensamente estudado e documentado. Para além da necessidade de um melhor conhecimento do comportamento hidráulico dos RCD, elementos recolhidos nos estudos de [2], [3] e [4], evidenciam que pode haver uma redução da capacidade de drenagem das estruturas ao longo do tempo, devido ao desenvolvimento de fenómenos de auto-cimentação nos RCD.

A durabilidade dos agregados reciclados, à semelhança dos agregados naturais, é fundamental ao adequado funcionamento das obras de engenharia civil que os incorporem. Também neste caso, e pelos mesmos motivos referidos no parágrafo anterior, não foram referenciados na bibliografia consultada, estudos sobre esta temática. Entendeu-se, por isso, que seria do maior interesse proceder ao estudo da durabilidade dos RCD, para os quais se perspectiva uma crescente utilização futura nas obras de engenharia civil.

Importa referir, que estudos geomambientais e geomecânicos com RCD portugueses, aplicados nas camadas não ligadas do pavimento de um trecho experimental rodoviário, mostraram um desempenho aceitável para estes materiais [5].

O estudo da durabilidade de um agregado de betão britado proveniente do processamento de RCD de betão [6], que se passará a designar por AB_{RCD} , foi efetuado com recurso ao ensaio de Desgaste em Meio Aquoso (DMA), previsto no *Suggested method for determination of the slake-durability index* da *International Society for Rock Mechanics* (ISRM) [7].

A avaliação do comportamento hidráulico do material foi efetuada a partir de ensaios de permeabilidade, com permeâmetros de paredes rígidas, a carga constante [8].

Em ambos os ensaios as duas soluções aquosas utilizadas foram: água da rede de abastecimento público e um lixiviado de um aterro de resíduos sólidos urbanos (RSU). Com a utilização da água, pretendeu-se contemplar a utilização do RCD em estruturas de drenagem que contactam com este tipo de fluido, a grande maioria dos casos, e com a utilização do lixiviado pretendeu-se avaliar a aplicabilidade do RCD na camada de drenagem e recolha de lixiviados do sistema de proteção basal dos aterros de RSU.

Em complemento aos ensaios de DMA, procedeu-se à análise petrográfica (macro- e microscópica) e à caracterização física (massa volúmica real – M_{VR} , massa volúmica aparente – M_{VA} , porosidade efetiva – P_e , e teor máximo em água de absorção – w_{max}) do agregado reciclado.

Todo o programa experimental efetuado com o AB_{RCD} foi igualmente aplicado a dois agregados naturais: basalto (BAS) e calcário (CAL), de modo a que a durabilidade e o comportamento hidráulico destes materiais servisse de referência aos resultados obtidos com o AB_{RCD} .

Esta comunicação começa por apresentar os três materiais estudados e os métodos utilizados na realização dos ensaios, seguindo-se a exposição dos resultados obtidos e das respetivas análises. Termina-se com as principais conclusões do estudo.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Materiais

Os materiais considerados para a realização do estudo foram: o agregado reciclado AB_{RCD} , e os dois agregados naturais, BAS e CAL (Fig. 1). Os meios aquosos utilizados nos ensaios de DMA e de permeabilidade foram: água da rede de abastecimento público e lixiviado de aterro de RSU.

O AB_{RCD} foi fornecido pela Demotri, S.A., do Grupo Ambigroup, SGPS, S.A., e resulta do processamento de betão de RCD, proveniente de diversas obras de demolição, numa central de reciclagem a operar no concelho do Seixal. Recolheram-se blocos de dimensões inferiores a cerca de 100mm, que no caso dos ensaios de permeabilidade foi necessário britar para se produzirem as frações granulométricas adequadas à preparação dos provetes.



Figura 1. Materiais estudados: a) AB_{RCD} , b) BAS e c) CAL.

Os agregados naturais, BAS e CAL, foram fornecidos, respetivamente, pela Alves Ribeiro, S.A. e pela Agrepor S.A., e recolhidos na Pedreira n.º 2029 – Moita da Ladra (Vila Franca de Xira) e na Pedreira Vale Grande n.º 2 (Alenquer). O processamento do material nas pedreiras permitiu a recolha de blocos de dimensões inferiores a cerca de 100mm, utilizados no estudo da durabilidade, e de

frações granulométricas adequadas à preparação dos provetes utilizados nos ensaios de permeabilidade.

As gamas granulométricas recolhidas no caso do BAS foram: 25/50mm (balastro), 12/20mm (brita 3), 10/16mm (brita 2), 4/12mm (brita 1), e 0/4mm (areão); e no caso do CAL foram: 0/32mm (*tout-venant* de 1^a), 20/40mm (brita 3), e 0/4mm (pó de pedra).

Em relação às duas soluções aquosas utilizadas, a água foi recolhida diretamente na rede de abastecimento público existente no laboratório de ensaios, e o lixiviado no aterro de RSU da Amarsul - Valorização e Tratamento de Resíduos Sólidos, S.A., sito no Seixal. O lixiviado no momento da recolha apresentava um pH de cerca de 8, tendo sido acidificado em laboratório, de forma gradual, com uma solução de ácido clorídrico (HCl) a 50%, até se atingir um pH de 5,5. Este procedimento justifica-se, por um lado, em virtude do lixiviado em aterros de RSU poder apresentar valores de pH inferiores ao recolhido e, por outro, por se pretender submeter os materiais a condições químicas mais agressivas que as normalmente observadas na camada de drenagem e recolha dos lixiviados dos aterros de resíduos.

2.2 Métodos

Análise petrográfica

O estudo macropetrográfico decorreu segundo o procedimento descrito na norma ASTM C856 [9], no caso do AB_{RCD}, e na norma NP EN 932-3 [10], no caso do BAS e do CAL. O estudo micropetrográfico, realizado com recurso a um microscópio petrográfico sobre lâminas delgadas, seguiu o procedimento descrito na norma ASTM C856 [9], no caso do AB_{RCD}, e na norma EN 12407-3 [11], no caso do BAS e do CAL. A análise petrográfica foi efetuada antes e após a realização aos ensaios de DMA.

Caracterização física

Os ensaios para a determinação de M_{VR} , M_{VA} , P_e , e w_{max} do agregado reciclado e dos agregados naturais seguiram os procedimentos descritos em LERO-PE01 [12]. Em cada ensaio utilizou-se um total de seis provetes, pelo que os resultados finais das quatro propriedades físicas correspondem à média dos resultados obtidos em cada um dos seis provetes. Também neste caso, os ensaios foram efetuados antes e após a realização dos ensaios de DMA.

Durabilidade

O estudo da durabilidade foi efetuado com recurso ao ensaio de DMA. Este ensaio é uma técnica laboratorial que tem por objetivo avaliar a resistência do material rochoso, em particular das rochas silto-argilosas [13], ao desgaste e à desintegração quando submetido a dois ciclos de desgaste de secagem e embebição [7].

O ensaio foi realizado com recurso a um equipamento idêntico ao recomendado pelo método da ISRM [7], exceto no número de tambores, que foram quatro (Fig. 2), no lugar dos dois propostos. A utilização de quatro tambores foi particularmente útil, dado que permitiu empregar em cada ensaio os dois meios aquosos selecionados.

A partir de cada amostra do AB_{RCD}, do BAS e do CAL foram preparados 40 provetes, igualmente distribuídos pelos quatro tambores, cilíndricos, em aço inoxidável. A massa de cada provete estava compreendida entre 40g e 60g, perfazendo, cada conjunto de dez provetes, um total de 400g a 600g.

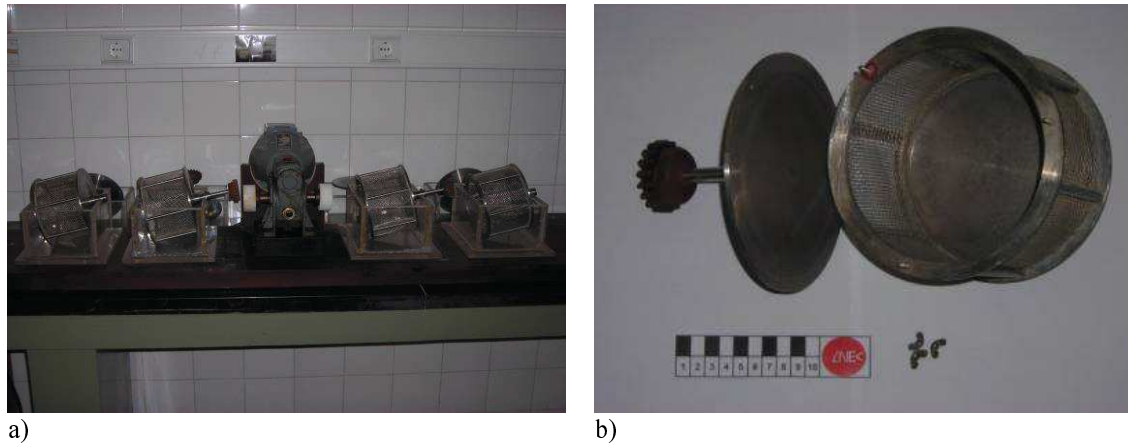


Figura 2. Equipamento utilizado no ensaio de DMA: a) vista geral do equipamento e b) pormenor do tambor em aço inoxidável.

Os provetes foram inicialmente introduzidos nos quatro tambores e, em seguida, o conjunto foi montado em quatro reservatórios, dois previamente preenchidos com água (provetes identificados como DMA_A), e os restantes dois com o lixiviado (provetes identificados como DMA_L). Os provetes que foram previamente imersos em água e no lixiviado durante 15 dias foram identificados como DMA₁_A e DMA₁_L, respetivamente. Os quatro tambores com os provetes foram sujeitos a três ciclos de desgaste. Os dois primeiros ciclos foram executados nas condições recomendadas pelo método da ISRM [7], ou seja, com a duração de 10min cada ciclo e à velocidade constante de 20rpm, num total de 200 + 200 rotações. No terceiro ciclo, não previsto no método, os provetes foram submetidos a mais 30min de ensaio, num total de 600 rotações. Os três ciclos de desgaste totalizaram, assim, 1000 rotações. Os provetes ensaiados foram secos em estufa a 105±5°C, durante 24h, antes do início do ensaio e imediatamente após cada um dos ciclos de desgaste, e determinadas as respetivas massas secas.

De acordo com o descrito no método utilizado, o resultado do ensaio de DMA, expresso como índice de durabilidade (I_d), corresponde ao valor da percentagem da massa seca do material retido nos tambores no final do segundo ciclo, em relação à massa seca do material no início do ensaio (I_{d2}). O valor de I_{d2} referente aos dois ciclos de desgaste foi calculado pela expressão seguinte:

$$I_{d2} = \frac{C-D}{A} \times 100\% \quad (1)$$

em que, A é a massa seca inicial de 10 provetes, C é a massa seca de 10 provetes após o segundo ciclo de desgaste e D é a massa do tambor. Os resultados apresentados para I_{d2} correspondem à média dos valores de I_{d2} obtidos em dois tambores, dado que nos ensaios de DMA utilizaram-se dois conjuntos de 10 provetes em cada meio aquoso. O mesmo se aplica aos resultados apresentados para o I_{d1} e o I_{d5} , que correspondem, respetivamente, ao I_d do material no final do primeiro ciclo, 200 rotações, e do quinto ciclo, 1000 rotações.

Permeabilidade

A referência tida em consideração na preparação dos materiais foram a estrutura e as características granulométricas da camada de drenagem e recolha de lixiviados existente nos aterros de RSU construídos no nosso país, ou seja, uma camada superior de 0,2m de espessura, em areia britada, e uma camada inferior de 0,3m de espessura, em seixo britado (2-35mm), que passam a designar-se, a partir daqui, apenas por areia e brita. As composições granulométricas da areia e da brita são mostradas na Tabela 1 e as respetivas curvas na Figura 3.

Observa-se que o diâmetro da brita foi truncado aos 20mm, de modo a cumprir uma relação “diâmetro da coluna do permeâmetro (90mm) / diâmetro máximo da partícula (20mm)” aproximadamente igual a 5. Devido a esta truncagem, a curva granulométrica da brita foi ajustada em relação à curva granulométrica de referência. Dado não existir curva granulométrica de referência para a areia, definiu-se uma na gama 0,25 a 2mm, com traçado semelhante ao da curva da brita.

Tabela 1. Frações granulométricas da areia e da brita

Areia		Brita	
Dimensão da partícula (mm)	Material retido (%)	Dimensão da partícula (mm)	Material retido (%)
2	0	20	0
1	65	16	16
0,5	90	12,5	34
0,25	100	4	82
		2	100

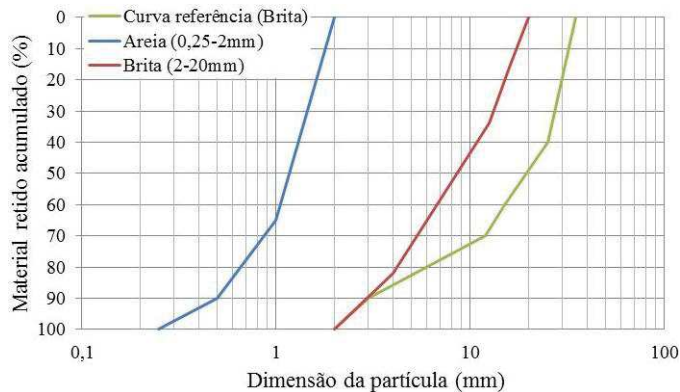
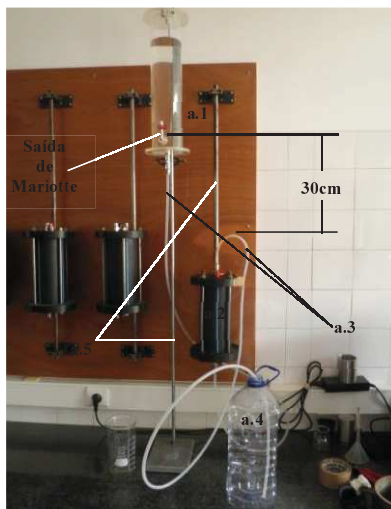


Figura 3. Curvas granulométricas da areia e da brita para cada material e curva de referência da brita.

As frações granulométricas da areia e da brita de cada material foram obtidas a partir dos peneiros da série base, mais os da série 2, da NP EN 933-1 [14]. Cada fração constitutiva da areia e da brita foram misturadas, cuidadosamente, num tabuleiro até formarem misturas homogêneas.

Na preparação dos provetes, o material calibrado, areia ou brita, previamente seco em estufa a 60°C, era vertido na coluna do permeâmetro de 0,25m de altura, com o auxílio de uma colher. De seguida, com o auxílio de um maço em madeira, davam-se pancadas sucessivas na armadura que fixava a coluna para promover o rearranjo entre as partículas do material e o maior adensamento possível ao meio particulado. Este procedimento continuou até o material chegar ao topo da coluna. O conjunto foi pesado e a massa de material adicionada foi calculada. O peso volumico seco nos quatro provetes de cada material variou entre 14,9 e 15,2kN/m³, no AB_{RCD}, entre 17,2 e 19,8kN/m³, no BAS, e entre 17,8 e 18,3kN/m³, no CAL.

Nos ensaios de permeabilidade utilizou-se um reservatório de 2,5l para armazenamento da solução de percolação, que funcionava como garrafa de *Mariotte* para manter a carga hidráulica constante de 0,3m ao longo do ensaio (Fig. 4).



Legenda:

- a.1 – reservatório de 2,5l, para armazenamento da solução de percolação, que funciona como garrafa de *Mariotte* (carga constante de 0,3m)
- a.2 – permeâmetro
- a.3 – tubo em poliamida, rígido, transparente, de diâmetro interior 6,0mm e exterior 8,0mm, para ligação do permeâmetro aos reservatórios
- a.4 – reservatório de recolha do efluente
- a.5 –suporte para o reservatório de alimentação e para o permeâmetro

Figura 4. Dispositivo utilizado nos ensaios de permeabilidade.

A primeira fase do ensaio só terminava após a recolha de, no mínimo, 250l de efluente, altura em que o permeâmetro era retirado do dispositivo de ensaio e colocado na estufa, por um período mínimo de sete dias, à temperatura de 45°C. Passado este período, o permeâmetro era retirado da estufa e recolocado no dispositivo de ensaio. Na segunda fase do ensaio recolheu-se um volume mínimo de 30l de efluente. Nos provetes de areia percolados com lixiviado, seguiu-se um período mínimo de contacto estático de 46 dias, à temperatura de 20±3°C, antes de se passar à terceira fase de percolação, onde foi recolhido um volume mínimo de 10l.

Dado que nos ensaios com o lixiviado houve necessidade de proceder à sua recirculação, atendendo ao volume disponível, sempre que o valor do pH medido no efluente diferia de 5,5±0,3, procedia-se à sua correção, antes de voltar a encher o reservatório de alimentação. A necessidade de correção foi sempre por o valor de pH do efluente ser superior a 5,5±0,3.

A metodologia seguida na realização dos ensaios de permeabilidade foi definida com base nalguns pressupostos, tendo por objetivo aproximar as condições laboratoriais das existentes nos aterros de RSU, atendendo a que se trata da obra com o fluido mais agressivo, em termos químicos, para os materiais.

Volume de lixiviado - O volume de lixiviado recolhido foi definido levando em consideração que nos aterros de RSU nacionais se estima a produção dos lixiviados em cerca de 1m³/m²/ano. Sendo a área da secção dos provetes a ensaiar 6,4cm², é necessário recolher 6,4l de efluente nos ensaios para simular o volume de lixiviado que igual área de um aterro de RSU produziria anualmente. Como o período de exploração de um aterro de RSU em Portugal é projetado para 12 a 15 anos, o volume de lixiviado produzido será de cerca de 77 a 96l. Atendendo a que depois de concluída a fase de exploração e executada a selagem do aterro, a produção de lixiviado é pouco relevante, a recolha de 250l de efluente na primeira fase de ensaio é cerca de três vezes superior ao volume que percolará através da camada de drenagem e recolha de lixiviado de um aterro de RSU.

Carga hidráulica - A utilização de carga hidráulica constante de 0,3m na realização dos ensaios de permeabilidade justifica-se por ser a altura máxima do lixiviado acima da camada mineral impermeável (barreira de proteção ambiental passiva) habitualmente considerada pelos regulamentos que a definem.

Funcionamento hidráulico - A produção dos lixiviados nos aterros varia principalmente em função da pluviosidade. A fase de percolação nos ensaios de permeabilidade simula os períodos de precipitação atmosférica, e os momentos de paragem, os períodos sem pluviosidade.

Temperatura - O permeâmetro foi colocado na estufa a 45°C para simular a temperatura a que os materiais podem estar sujeitos na camada de drenagem de lixiviados de um aterro de RSU. A permanência por um período mínimo de sete dias foi definida em função da necessidade de compatibilizar o tempo de ensaio com o tempo disponível para a realização do estudo.

pH do lixiviado - De modo a tornar as condições de realização do ensaio de permeabilidade mais agressivas para os materiais ensaiados, por um lado, e pelo facto, do lixiviado nos aterros de RSU poder apresentar valores mínimos de pH de 5,5, o lixiviado utilizado nos ensaios de permeabilidade foi, sempre que necessário, acidificado para valores de 5,5±0,3.

3 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

3.1 *Análise petrográfica*

Da análise macroscópica realizada com os provetes das amostras virgens dos três materiais observou-se que: o AB_{RCD} é um material multifásico constituído por agregados naturais de duas dimensões, grossos e finos, envolvidos por uma matriz cimentícia e porosa (Fig. 5a); o BAS é uma rocha compacta, melanocrata e com textura afanítica; e o CAL é uma rocha compacta a oolítica, de cor branca a amarelada. Nos provetes dos dois agregados naturais não se identificaram sinais de alteração.

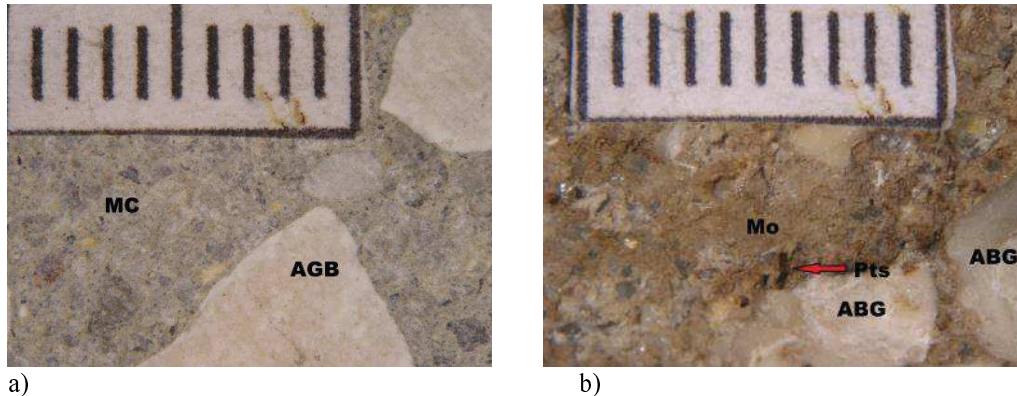
Da análise microscópica realizada com as lâminas delgadas das amostras virgens dos três materiais em estudo observou-se que: o AB_{RCD} é um material de estrutura complexa composto por matriz cimentícia, agregado e zona de transição (Fig. 6a), e que os agregados naturais britados finos correspondem a areais quartzíticas; o BAS é uma rocha hipocristalina, porfirítica e constituída por duas fases de cristalização: matriz afanítica com a presença de fenocristais de olivina; e o CAL é uma rocha que apresenta uma matriz composta por calcite e por elementos cimentados, oólitos e clastos.

Da análise macropetrográfica realizada após os ensaios de DMA observaram-se fenómenos de oxidação dos minerais de olivina no provete BAS_DMA₁A. Nos ensaios de DMA com o lixiviado é

visível a deposição de matéria orgânica na superfície de todos os provetes de AB_{RCD} (Fig. 5b) e nos provetes $BAS_{DMA_I_L}$ e $CAL_{DMA_I_L}$.

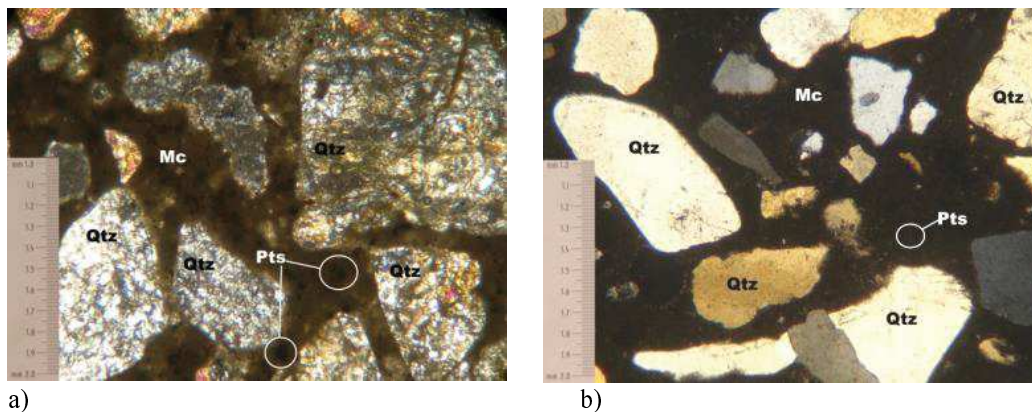
Da análise micropetrográfica efetuada após os ensaios de DMA identificaram-se alterações nos provetes BAS , correspondentes a diferentes graus de alteração dos minerais de olivina observados. Em particular nos provetes $BAS_{DMA_I_A}$ e $BAS_{DMA_I_L}$, os fenocristais de olivina apresentaram-se parcial ou totalmente alterados, em alguns casos com perda de massa. A Figura 6b mostra uma microfotografia do provete $AB_{RCD_{DMA_I_L}}$, onde não são visíveis indícios de alteração.

As alterações observadas na análise petrográfica não foram, contudo, suficientemente importantes ao ponto de se refletirem na durabilidade dos agregados, reciclado e naturais.



a) b)
Legenda: ABG - agregado britado grosso, MC - matriz cimentícia, Mo - matéria orgânica, Pts - poros. Escala gráfica: 1 cm.

Figura 5. Aspeto macroscópico dos provetes: a) AB_{RCD} e b) $AB_{RCD_{DMA_I_L}}$.



a) b)
Legenda: matriz cimentícia – Mc, poros – Pts, quartzo – Qtz, .

Figura 6. Microfotografias das lâminas delgadas em nicóis cruzados – NX com uma ampliação de 50x: a) AB_{RCD} e b) $AB_{RCD_{DMA_I_L}}$.

3.2 Caracterização física

A Tabela 2 mostra os resultados obtidos para M_{VR} , M_{VA} , P_e e w_{max} com os provetes de AB_{RCD} , BAS e CAL , antes e após terem sido submetidos aos ensaios de DMA.

Da comparação dos resultados obtidos antes de realizados os ensaios de DMA, observou-se que o AB_{RCD} é o menos denso, mais poroso, e com maior capacidade de absorção de água, e o BAS é o menos poroso e com menor valor de w_{max} . O CAL , por seu turno, caracteriza-se por apresentar resultados intermédios comparativamente aos restantes. Em termos quantitativos concluiu-se que: a) o AB_{RCD} é cerca de 1,2 vezes menos denso que o BAS ; b) o AB_{RCD} é aproximadamente 3,1 vezes mais poroso que o CAL e 38 vezes que o BAS .

Comparativamente com dados obtidos por outros estudos, os resultados obtidos para M_{VR} , M_{VA} e w_{max} com o provete AB_{RCD} são da mesma ordem de grandeza dos apresentados em LNEC E 227 [15]. Em agregados de betão britado com uma granulometria compreendida entre 31,5mm e 63,0mm, é

referido para M_{VR} e M_{VA} , respetivamente, $2,60\text{Mg/m}^3$ e $2,37\text{Mg/m}^3$, e para w_{\max} , $6,70\%$. Para esta última propriedade, refira-se, ainda, Jose (2002, Katz, 2003 e Rao, 2005 in [16]) e Gómez-Sobero (2002 in [17]), que apontam para um intervalo de valores compreendidos entre $3,00\%$ e $12,00\%$, para diferentes frações granulométricas de agregado de betão britado de RCD.

No que respeita aos dois agregados naturais, os valores iniciais da M_{VR} , da M_{VA} , da P_e e do w_{\max} apresentados na Tabela 2 enquadram-se com os obtidos por [18], [19] e [20] no caso do BAS, e com os apresentados por [21] no caso do CAL.

A comparação dos resultados obtidos na caracterização física do AB_{RCD} , do BAS e do CAL, antes e após a execução dos ensaios de DMA, mostra que a utilização de diferentes meios aquosos, água e lixiviado, e o prolongamento das ações mecânicas (ciclo de desgaste adicional de 600 rotações) e do período de contacto entre os meios aquosos e o material (imersão dos provetes durante 15 dias antes da realização dos ensaios de DMA), não se traduziu em alterações quantitativamente importantes nas propriedades físicas dos três materiais. A exceção está associada a P_e e a w_{\max} nos provetes $AB_{RCD_DMA_L}$ e $AB_{RCD_DMA_I_L}$. Entre estes e o provete AB_{RCD} , a diferença percentual foi de cerca de $3,3\%$ no caso de P_e , e de 2% no caso de w_{\max} , devendo-se tais diferenças ao facto de, em algumas zonas da superfície da matriz cimentícia dos provetes que estiveram em contacto com o lixiviado no ensaio de DMA, se ter verificado o preenchimento dos poros aí existentes com matéria orgânica.

Tabela 2. Resultados da caracterização física dos provetes, antes e após os ensaios de DMA

Agregado	Provete	M_{VR} (Mg/m^3)	M_{VA} (Mg/m^3)	P_e (%)	w_{\max} (%)
Reciclado	AB_{RCD}	2,58	2,14	16,88	7,89
	$AB_{RCD_DMA_A}$	2,62	2,22	15,34	6,93
	$AB_{RCD_DMA_L}$	2,63	2,27	13,59	5,99
	$AB_{RCD_DMA_I_A}$	2,65	2,24	15,27	6,82
	$AB_{RCD_DMA_I_L}$	2,62	2,27	13,59	6,00
Natural	BAS	3,02	3,00	0,45	0,14
	BAS_DMA_A	3,01	2,99	0,48	0,16
	BAS_DMA_L	3,01	3,00	0,38	0,13
	$BAS_DMA_I_A$	3,04	3,02	0,45	0,15
	$BAS_DMA_I_L$	3,00	2,99	0,41	0,14
	CAL	2,72	2,58	5,40	2,20
	CAL_DMA_A	2,74	2,57	6,15	2,41
	CAL_DMA_L	2,72	2,57	5,33	2,09
	$CAL_DMA_I_A$	2,72	2,59	4,70	1,82
	$CAL_DMA_I_L$	2,72	2,56	5,99	2,38

3.3 Durabilidade

Os resultados obtidos nos ensaios de DMA realizados nos dois meios aquosos, água e lixiviado, sem e após imersão prévia dos provetes, apresentam-se na Tabela 3. A classificação da durabilidade dos materiais em estudo foi definida com base na classificação proposta por Gamble [22], mostrada na Tabela 4.

Os valores de I_{d1} , I_{d2} e I_{d5} do AB_{RCD} , do BAS e do CAL obtidos nos ensaios de DMA foram superiores a 95% , pelo que, considerando a classificação apresentada na Tabela 4 para cada I_d , conclui-se que os três materiais estudados pertencem à categoria de materiais de durabilidade muito elevada. Os resultados evidenciam que o prolongamento das ações mecânicas e a sujeição dos materiais a condições químicas mais agressivas e mais prolongadas, não contribuíram para alterar a classificação dos materiais ensaiados quanto à sua durabilidade pela classificação de Gamble.

O concluído não inviabiliza que, comparando os valores obtidos para I_{d5} , se ordene os três materiais estudados pela seguinte ordem crescente de durabilidade: $AB_{RCD} < CAL < BAS$, ainda que a maior diferença percentual entre os valores obtidos para aquele índice seja de $2,9\%$ e corresponda aos provetes $AB_{RCD_DMA_I_L}$ e BAS_DMA_L .

Tabela 3. Resultados dos ensaios de DMA

Agregado	Provete	I_d	Valor
Reciclado	AB _{RCD} _DMA_A	I_{d1}	99,5%
		I_{d2}	99,1%
		I_{d5}	98,0%
	AB _{RCD} _DMA_L	I_{d1}	99,6%
		I_{d2}	99,3%
		I_{d5}	98,3%
	AB _{RCD} _DMA _I _A	I_{d1}	99,5%
		I_{d2}	99,1%
		I_{d5}	97,7%
	AB _{RCD} _DMA _I _L	I_{d1}	99,3%
		I_{d2}	98,7%
		I_{d5}	96,7%
Natural	BAS_DMA_A	I_{d1}	99,8%
		I_{d2}	99,7%
		I_{d5}	99,5%
	BAS_DMA_L	I_{d1}	99,9%
		I_{d2}	99,8%
		I_{d5}	99,6%
	BAS_DMA _I _A	I_{d1}	99,9%
		I_{d2}	99,7%
		I_{d5}	99,5%
	BAS_DMA _I _L	I_{d1}	99,9%
		I_{d2}	99,7%
		I_{d5}	99,5%
CAL_DMA_A	I_{d1}	99,7%	
	I_{d2}	99,4%	
	I_{d5}	98,7%	
CAL_DMA_L	I_{d1}	99,7%	
	I_{d2}	99,5%	
	I_{d5}	99,0%	
CAL_DMA _I _A	I_{d1}	99,7%	
	I_{d2}	99,4%	
	I_{d5}	98,6%	
CAL_DMA _I _L	I_{d1}	99,8%	
	I_{d2}	99,6%	
	I_{d5}	99,0%	

Tabela 4. Classificação de Gamble com base no índice de durabilidade (I_d)

Durabilidade	I_{d1} (%)	I_{d2} (%)	I_{d5} (%)
Muito elevada	> 99	> 98	> 95
Elevada	98 - 99	95 - 98	85 - 95
Média a elevada	95 - 98	85 - 95	60 - 85
Média	85 - 95	60 - 85	30 - 60
Baixa	60 - 85	30 - 60	20 - 30
Muito baixa	< 60	< 30	< 20

Considerando apenas o desempenho observado para o CAL nos ensaios de DMA realizados não se justificaria a interdição de utilização de brita de origem calcária na camada de drenagem e recolha de lixiviados dos aterros de resíduos, conforme prevê o DL n° 183/2009 [23]. Contudo, é conhecido o fenómeno de dissolução dos calcários, devendo por essa razão efetuar-se estudos complementares ao presente com o objetivo de avaliar a possibilidade da sua ocorrência nos aterros de resíduos.

A análise comparativa dos resultados obtidos para o agregado reciclado AB_{RCD} com outros não foi possível em virtude de, na bibliografia nacional e internacional consultada, não terem sido referenciados quaisquer dados para os agregados reciclados, em geral, e para os RCD, em particular. Referem-se, por isso, resultados de ensaios de DMA realizados por outros autores, com materiais de idêntica litologia à dos agregados naturais utilizados neste estudo. Delgado Rodrigues (1986) [24] e Jeremias (2000) [13] realizaram ensaios com calcários, e Sharma e Singh (2008) [25] com basaltos. Delgado Rodrigues (1986) [24] submeteu calcários do Mondego a seis ciclos de desgaste ($I_{d6} = 1200$ rotações), com e sem a presença de água, e Jeremias (2000) [13], calcários oolíticos a cinco ciclos de desgaste (I_{d5}). Sharma e Singh (2008) [25], por seu turno, avaliaram a durabilidade de basaltos alterados, sem contudo referirem o estado de meteorização dos mesmos, a dois ciclos de desgaste (I_{d2}).

Considerando os resultados obtidos por estes autores, os I_d calculados para os calcários do Mondego e para os basaltos são da mesma ordem de grandeza dos obtidos com AB_{RCD} . Já o calcário oolítico apresentou valores de I_d menores que os calculados para o BAS e o CAL.

3.4 Permeabilidade

Os resultados obtidos para a condutividade hidráulica da areia e da brita do AB_{RCD} , do BAS e do CAL, percolados com água da rede de abastecimento público e com o lixiviado acidificado do aterro de RSU, são resumidos na Tabela 5.

No que se refere ao AB_{RCD} , o comportamento hidráulico dos provetes de areia foi semelhante nos ensaios efetuados com água e lixiviado, exceto nos primeiros 20l de efluente recolhidos, em que o valor da condutividade hidráulica, k , ao lixiviado foi inferior ao valor de k à água. Nos ensaios com o AB_{RCD} /brita à água e ao lixiviado, verifica-se que o valor de k se mantém praticamente constante ao longo do tempo, mas com valores de k ao lixiviado ligeiramente inferiores. Tal como esperado, o valor de k da brita foi superior ao da areia, sendo maiores as diferenças nos ensaios com água do que com lixiviado. O aquecimento dos provetes na estufa a 45°C, por um período de sete dias, não alterou o valor de k em nenhum dos provetes ensaiados e no prolongamento do ensaio do AB_{RCD} /areia com o lixiviado houve uma pequena diminuição. Em todos os provetes preparados a partir do AB_{RCD} , o valor de k foi sempre superior ao requerido na legislação portuguesa para os aterros de RSU.

No agregado natural BAS, o comportamento hidráulico do BAS/areia à água foi diferente do seu comportamento ao lixiviado, registando-se um aumento de k à água quase até final do ensaio e valores de k aproximadamente constantes com o lixiviado até aos ensaios efetuados após a paragem prolongada (48 dias), onde se registou uma diminuição significativa do valor. O comportamento hidráulico do BAS/brita à água e ao lixiviado foi semelhante, com valores de k praticamente constantes e aproximados durante a realização dos ensaios, respetivamente, $2 \times 10^{-3} \text{m/s}$ e $3 \times 10^{-3} \text{m/s}$. O valor de k da brita foi superior ao da areia, exceto na parte final do ensaio da areia com água, onde passou a ser de ordem de grandeza semelhante ao valor de k do BAS/brita ensaiado com lixiviado. A temperatura não terá tido influência nos valores determinados em nenhum dos ensaios realizados, considerando que não se verificaram alterações significativas ao seu valor nos ensaios realizados imediatamente após o período de estufa, mas apenas nos ensaios realizados na areia com o lixiviado após 48 dias de paragem. O valor de k do BAS foi superior ao requisito mínimo previsto no DL n.º 183/2009 [23] para aquele parâmetro na camada de drenagem dos lixiviados.

Tabela 5. Condutividade hidráulica do AB_{RCD} , BAS e CAL

Material	Solução de percolação	Tempo de ensaio (dias)	Volume de efluente (l)	Condutividade hidráulica ($k \times 10^{-4} \text{m/s}$)			
				1ª Fase (antes da estufa)	2ª Fase (após a estufa)	3ª Fase (após contacto prolongado)	
AB_{RCD}	Areia	Água	42	310	4	3	-
		Lixiviado	73	298	4	3	2
	Brita	Água	28	300	25	25	-
		Lixiviado	31	290	13	10	-
BAS	Areia	Água	48	315	9	18	-
		Lixiviado	75	305	6	2	2
	Brita	Água	28	310	28	28	-
		Lixiviado	31	290	19	17	-
CAL	Areia	Água	46	213	0,5	0,2	-
		Lixiviado	75	308	6	5	3,5
	Brita	Água	28	307	17	17	-
		Lixiviado	31	290	11	9	-

Os ensaios de permeabilidade com o CAL, mostraram que o comportamento hidráulico do CAL/areia à água e ao lixiviado é distinto. No ensaio com o lixiviado, os valores de k mantiveram-se praticamente constantes durante quase todo o ensaio, enquanto no ensaio realizado com água aqueles valores diminuíram significativamente a partir de cerca de 130l. O comportamento hidráulico do CAL/brita manteve-se aproximadamente constante durante a realização de ambos os ensaios salientando-se que, no ensaio com água, os valores obtidos foram superiores aos dos ensaios com lixiviado, respetivamente, cerca de $2 \times 10^{-3} \text{m/s}$ e $1 \times 10^{-3} \text{m/s}$. A condutividade hidráulica foi maior na brita que na areia. O único ensaio em que o período de permanência dos permeâmetros na estufa poderá ter influenciado o comportamento hidráulico do material foi no provete CAL/areia percolado com água.

4 CONCLUSÕES

O trabalho apresentado neste artigo teve por principal objetivo avaliar a viabilidade técnica da aplicação de um agregado reciclado da britagem de betão de RCD, o AB_{RCD} , na construção da camada de drenagem e recolha de lixiviados do sistema de proteção basal ativo dos aterros de resíduos, e ainda nas estruturas de drenagem existentes noutras obras geotécnicas (por exemplo, barragens de terra, muros de suporte e drenos verticais) e nas infraestruturas de transporte rodó e ferroviárias.

Os resultados obtidos indicam que o agregado reciclado, AB_{RCD} , e os dois agregados naturais, o BAS e o CAL, utilizados como materiais de referência, pertencem à categoria de materiais de durabilidade muito elevada, considerando a classificação de Gamble [22], mesmo após serem submetidos a condições químicas e mecânicas mais agressivas do que as previstas no ensaio de DMA proposto pela ISRM [7]. Também demonstram que a imersão prévia dos materiais em água e no lixiviado acidificado durante 15 dias, e a posterior realização de três ciclos de desgaste, não tiveram influência relevante na durabilidade dos mesmos.

Os resultados do estudo petrográfico (macro- e microscópico) e da caracterização física são, por sua vez, coerentes com a classificação de durabilidade obtida para os três materiais, dado não se terem verificado alterações significativas nas propriedades petrográficas e físicas iniciais.

No que se refere aos resultados obtidos nos ensaios de permeabilidade verificou-se que em todos os ensaios, o valor de k foi superior ao requisito mínimo ($k \geq 1 \times 10^{-4} \text{m/s}$) previsto na legislação nacional [23] para a camada de drenagem dos lixiviados, exceto no caso da percolação do CAL/areia com água, antes e após estufa. Portanto, em nenhum dos ensaios de permeabilidade ao lixiviado do aterro de RSU, acidificado para pH 5,5, o valor de k foi inferior a $1 \times 10^{-4} \text{m/s}$.

Conclui-se, portanto, que, quer em termos de comportamento hidráulico, como de durabilidade, para as condições de realização dos ensaios, o agregado reciclado AB_{RCD} , e os dois agregados naturais, BAS e CAL, são igualmente adequados para a construção de estruturas de drenagem de obras geotécnicas e infraestruturas de transporte. Considerando, no entanto, a necessidade de promover a reciclagem de resíduos e de fomentar a preservação dos recursos naturais não renováveis, deve-se privilegiar a utilização do AB_{RCD} , em detrimento do BAS e do CAL.

REFERÊNCIAS

- [1] DL 73/2011 (2011), Estabelece o regime geral aplicável à prevenção, produção e gestão de resíduos. Diário da República Portuguesa, Imprensa Nacional Casa da Moeda, Lisboa, 1ª Série, nº 116 (2011-06-17): pp. 3251-3300.
- [2] Snyder, M.B. (1995), Use of crushed concrete products in Minnesota pavement foundations. Report MN/RC-96/12, Minnesota Department of Transportation, Springfield, USA: 52p.
- [3] Arm, M. (2001), Self-cementing properties of crushed demolished concrete in unbound layers: results from triaxial tests and field tests. Waste Management, 21 (3): pp. 235-239.
- [4] Poon, C., Qiao, X.C., and Chan, D. (2006), The cause and influence of self-cementing properties of fine recycled concrete aggregates on the properties of unbound sub-base. Waste Management, 26 (10): pp. 1166-1172.
- [5] Freire, A.C., Neves, J.M., Roque, A.J., Martins, I.M., Antunes, M.L., Faria, G. (2013), Aplicação de Resíduos de Construção e Demolição (RCD) em camadas granulares de pavimentos rodoviários validada em trecho piloto. Atas do VII Congresso Rodoviário Português, CRP, LNEC, Lisboa:10p. (in CD-Rom).

- [6] Rodrigues, G.M. (2012), Reciclagem do ASIC e de RCD na camada de drenagem dos aterros de resíduos – Avaliação da suscetibilidade à degradação. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Caparica: 262 p.
- [7] ISRM (1977), Suggested method for determination of the slake-durability index – Part 2. Commission on testing methods. Pergamon Press: pp. 101-102.
- [8] Almeida, R.P.M. de (2014), Avaliação do desempenho hidráulico de dois agregados reciclados (ASIC e AB_{RCD}) à água e ao lixiviado de resíduos sólidos urbanos e sua comparação com agregados naturais (basalto e calcário). Dissertação de Mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Caparica: 255p.
- [9] ASTM C 856 (2011), Standard practice for petrographic examination of hardened concrete. Annual Book of ASTM Standards 2012, ASTM, Philadelphia, USA, vol. 04.02.
- [10] NP EN 932-3 (2010), Ensaio das propriedades gerais dos agregados. Parte 3: Método e terminologia para a descrição petrográfica simplificada. Instituto Português da Qualidade, Caparica.
- [11] EN 12407 (2007). Natural stone test methods – Petrographic examination. CEN, Brussels, Belgium.
- [12] LERO-PE01 (1993), Ensaio de determinação da porosidade acessível à água, das massas volúmicas e do teor máximo em água de absorção. LNEC, Lisboa.
- [13] Jeremias, F. T. (2000), Geological controls on the engineering properties of mudrocks of the north Lisbon area. PhD Thesis, University of Sheffield, Sheffield, UK: 464 p.
- [14] NP EN 933-1 (2000). Ensaio das propriedades geométricas dos agregados. Parte 1: Análise granulométrica - Método da peneiração. Instituto Português de Qualidade, Caparica.
- [15] LNEC E 227 (2008), Caracterização de agregados reciclados de acordo com o Normativo Europeu prEN 933-11. Especificação LNEC, Lisboa.
- [16] Rao, A., Jha, K.N., Misra, S. (2007), Use of aggregates from recycled construction and demolition waste in concrete. Resources, Conservation and Recycling, 50 (1): pp.71-81.
- [17] Martin-Morales, M., Zamorano, M., Ruiz-Moyano, A., Valverde-Espinosa, I. (2011), Characterization of recycled aggregates construction and demolition waste for concrete production following the spanish structural concrete code EHE-08. Construction and Building Materials, 25 (2): pp. 742-748.
- [18] Gupta, A.S., Rao, K.S. (2000), Weathering effects on the strength and deformational behaviour of crystalline rocks under uniaxial compression state. Engineering Geology, 56 (3-4): pp. 257-274.
- [19] Moon, V.; Jayawardane, J. (2004), Geomechanical and geochemical changes during early stages of weathering of Karamu basalt, New Zealand. Engineering Geology, 74 (1-2): pp. 57-72.
- [20] Tugrul, A. (2004), The effect of weathering on pore geometry and compressive strength of selected rock types from Turkey. Engineering Geology, 75 (3-4): pp. 215-227.
- [21] Gupta, V., Ahmed, I. (2007), The effect of pH of water and mineralogical properties on the slake durability (degradability) of different rocks from the Lesser Himalaya, India. Engineering Geology, 95 (3-4): pp. 79-87.
- [22] Gamble, J.C. (1971), Durability-plasticity classification of shales and other argillaceous rock. PhD Thesis, University of Illinois, Chicago, USA: 322 p.
- [23] DL 183/2009 (2009), Estabelece o regime jurídico da deposição de resíduos em aterro e os requisitos gerais a observar na conceção, construção, exploração, encerramento e pós encerramento de aterros, incluindo as características técnicas específicas para cada classe de aterros. Diário da República Portuguesa, Imprensa Nacional Casa da Moeda, Lisboa, 1ª Série, nº 153 (2009-08-10): pp. 5170-5198.
- [24] Delgado Rodrigues, J. (1986), Contribuição para o estudo das rochas carbonatadas e para a sua classificação. Relatório 104/86 – NP, LNEC, Lisboa: 45 p.
- [25] Sharma, P.K., Singh, T.N. (2008), A correlation between P-wave velocity, impact strength index, slake durability index and uniaxial compressive strength. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 67 (1): pp. 17-22.