

# **ESTUDO DA DURABILIDADE DE DOIS AGREGADOS RECICLADOS PARA APLICAÇÃO NA CAMADA DE DRENAGEM DE ATERROS DE RESÍDUOS**

## **DURABILITY STUDY OF TWO RECYCLED AGGREGATES FOR APPLICATION IN DRAINAGE LAYER OF LANDFILL**

Rodrigues, Gonçalo Manuel, *gms\_rodrigues@hotmail.com*

Roque, António José, *LNEC, Lisboa, Portugal, aroque@lnec.pt*

Silva, A. Paula F. da, *DCT-CICEGE/FCT-UNL, Caparica, Portugal, apfs@fct.unl.pt*

### **RESUMO**

A valorização de resíduos como materiais de construção em obras de engenharia representa uma importante vantagem ambiental e económica. Neste contexto, contribui-se para avaliar a viabilidade técnica da aplicação de um agregado de betão britado resultante do processamento de resíduos de construção e demolição de betão e de um agregado siderúrgico inerte para a construção processado a partir de escórias de aciaria de forno de arco elétrico na construção da camada de drenagem dos lixiviados dos aterros de resíduos. Na comunicação apresentam-se e analisam-se os resultados do estudo da durabilidade destes dois agregados reciclados em contato com um lixiviado ácido (pH = 5,5), recolhido num aterro de resíduos sólidos urbanos. Conclui-se que, nas condições de ensaio adotadas e numa perspetiva de durabilidade, existe viabilidade técnica para a utilização daqueles materiais na construção da camada de drenagem dos lixiviados.

### **ABSTRACT**

Waste valorization as construction materials in infrastructure works represents an important environmental and economic advantage. In this context, one intends to evaluate the technical feasibility of applying a crushed concrete aggregate, processed from construction and demolition waste, and an inert steel aggregates, processed from electric arc furnace steel slag, in construction of the leachate drainage layer of landfills. This paper presents and discusses the results of the durability study of both recycled aggregates in contact with an acid leachate (pH = 5.5) collected in a landfill of municipal solid waste. The paper concludes that, under the test conditions adopted and a perspective of durability, there is technical feasibility of the use of both materials in the construction of the leachate drainage layer.

### **1. INTRODUÇÃO**

A durabilidade dos resíduos é fundamental para assegurar o adequado funcionamento das obras de engenharia civil que potencialmente os utilizem como materiais reciclados de construção, em conformidade com o já observado em relação aos materiais naturais. Na bibliografia consultada não foram, contudo, referenciados estudos sobre a durabilidade dos resíduos, explicável pela utilização destes como agregados reciclados em obra ser ainda uma aplicação relativamente recente, contrariamente ao verificado com os agregados naturais, cuja utilização e comportamento em obras de engenharia civil se encontram extensamente estudados e documentados. Entendeu-se, por isso, que seria do maior interesse proceder ao estudo da durabilidade de agregados reciclados para os quais se perspetiva uma crescente utilização em obras de engenharia civil.

Nesta comunicação apresenta-se o estudo da durabilidade de um agregado de betão britado ( $AB_{RCD}$ ) resultante do processamento de resíduos de construção e demolição (RCD) de betão, e de um agregado siderúrgico inerte para a construção (ASIC, designação comercial do produto em Portugal) resultante do processamento de escórias de aciaria de forno de arco elétrico (FAE), com vista à utilização de ambos em obras geotécnicas e infraestruturas de transporte, no geral, e na construção da camada de drenagem e recolha dos lixiviados do sistema de proteção basal ativo dos aterros de resíduos, em particular. No país produzem-se, anualmente, cerca de  $11,5 \times 10^6$  ton de RCD e  $250 \times 10^3$  ton de ASIC (Rodrigues, 2012).

O estudo da durabilidade do  $AB_{RCD}$  e do ASIC 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, 1977), tendo-se utilizado dois meios aquosos: água, recolhida na rede de abastecimento público, e lixiviado, recolhido no aterro de resíduos sólidos urbanos (RSU) da Amarsul, S.A., no Seixal. A avaliação da durabilidade dos dois agregados reciclados ao lixiviado justifica-se pelo elevado volume de material que pode ser utilizado na construção da camada de drenagem e recolha dos lixiviados, aliado aos aterros de resíduos que vão continuar a ser construídos ou ampliados no país. No caso da água, a sua utilização como meio aquoso teve como propósito: a) servir de referência aos resultados obtidos com o lixiviado e aos valores apresentados na bibliografia para os agregados naturais; e b) avaliar a durabilidade do  $AB_{RCD}$  e do ASIC neste meio aquoso, por ser o mais corrente em obras de engenharia civil, designadamente na camada de drenagem do sistema de selagem final dos aterros de resíduos.

Em complemento aos ensaios de DMA, procedeu-se, antes e após a sua realização, à análise petrográfica (macro- e microscópica) e à caracterização física (massa volúmica, porosidade efetiva e teor máximo em água de absorção) dos dois agregados reciclados.

O mesmo programa experimental realizado com os agregados reciclados foi aplicado a dois agregados naturais, um de basalto (Bas), e outro de calcário (Cal), com o objetivo de comparar os resultados obtidos. A relevância desta comparação assenta na falta de dados na bibliografia consultada sobre a durabilidade dos agregados reciclados selecionados e de estes existirem para aqueles dois agregados naturais.

Ao exposto, acresce, que de acordo com o decreto-lei (DL) nº 183/2009, de 10 de agosto, o material a integrar na camada drenante dos aterros de resíduos deve ser isento de material calcário face à possível dissolução do carbonato de cálcio ( $CaCO_3$ ). Assim, complementarmente ao objetivo principal acima mencionado, também se pretendeu avaliar a durabilidade do Cal em presença do lixiviado.

Nesta comunicação começa-se por apresentar os quatros materiais selecionados para a realização do estudo e os métodos utilizados para a realização dos ensaios. Em seguida são apresentados os resultados obtidos e respetivas análises. Por último, expõem-se as principais conclusões resultantes do estudo desenvolvido.

## **2. MATERIAIS E MÉTODOS**

### **2.1. Materiais**

Os materiais estudados foram dois agregados reciclados, o  $AB_{RCD}$  e o ASIC, e dois agregados naturais, o Bas e o Cal. Os dois meios aquosos utilizados no ensaio de DMA foram: água da rede de abastecimento público e lixiviado recolhido no aterro de RSU.

A amostragem do AB<sub>RCD</sub> decorreu numa central móvel da empresa Demotri, S.A., a operar no Seixal; a do ASIC foi realizada na unidade industrial da Siderurgia Nacional - Empresa de Produtos Longos, S.A. (SN) do Seixal; a do Bas decorreu na pedreira n° 2029 - Moita da Ladra, da empresa Alves Ribeiro, S.A., em Vialonga; e a do Cal foi realizada na pedreira Vale Grande n° 2, da empresa Agrepor, S.A., em Alenquer. Rodrigues (2012) descreve em pormenor os métodos utilizados no processamento destes materiais e as características das amostras.

O processo de amostragem dos quatro materiais acima referidos decorreu de forma empírica, por se considerar que a qualidade e a representatividade das amostras recolhidas não eram comprometidas por não se seguir a totalidade das recomendações propostas pelos relatórios técnicos CEN/TR 15310 (2006). Os principais motivos que contribuíram para se seguir a metodologia adotada foram os seguintes: (1) a natureza do material amostrado; (2) as condições do local da amostragem; (3) o modo como o material se encontrava armazenado; e (4) os condicionalismos inerentes aos ensaios de DMA realizados, designadamente, a dimensão e a forma dos provetes a preparar a partir da amostra recolhida. As amostras recolhidas foram transportadas em sacos de nylon para as instalações do Departamento de Geotecnia do Laboratório Nacional de Engenharia Civil, I.P. (LNEC).

O lixiviado utilizado como meio aquoso nos ensaios de DMA foi recolhido na célula C do aterro de RSU da Amarsul, S.A., sito no Seixal. Em laboratório, o lixiviado, que no momento da sua recolha apresentava um valor de pH igual a 7,6, foi acidificado com ácido clorídrico até atingir um pH de 5,5. Este procedimento justifica-se, por um lado, em virtude dos lixiviados nos aterros de RSU poderem apresentar valores de pH inferiores ao inicialmente medido 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**

### **2.2.1. Análise petrográfica**

O estudo macropetrográfico decorreu segundo o procedimento descrito na norma NP EN 932-3 (2010), no caso do ASIC, do Bas e do Cal, e pela norma ASTM C856 (2011), no caso do AB<sub>RCD</sub>. O estudo micropetrográfico, realizado com recurso a um microscópio petrográfico sobre lâminas delgadas, seguiu o procedimento descrito na norma EN 12407-3 (2007), no caso do ASIC, do Bas e do Cal, e na norma ASTM C856 (op. cit.), no caso do AB<sub>RCD</sub>.

### **2.2.2. Caracterização física**

O ensaio para a determinação das massas volúmicas, real ( $M_{VR}$ ) e aparente ( $M_{VR}$ ), da porosidade efetiva ( $P_e$ ) e do teor máximo em água de absorção ( $w_{max}$ ) dos quatro materiais estudados decorreu segundo o procedimento descrito em LERO-PE01 (1993). Em cada ensaio utilizou-se um total de seis provetes, pelo que os resultados finais das propriedades físicas estudadas correspondem à média dos resultados obtidos em cada um dos seis provetes.

### **2.2.3. Durabilidade**

O estudo da durabilidade dos quatro materiais selecionados foi efetuado com recurso ao ensaio de DMA. Este ensaio é uma técnica laboratorial desenvolvida com o objetivo de avaliar a resistência do material rochoso, em particular das rochas silto-argilosas (Jeremias, 2000), ao desgaste e à desintegração quando submetido a dois ciclos de desgaste de secagem e embebição (ISRM, 1977).

O ensaio foi realizado com recurso a um equipamento idêntico ao recomendado pelo método da ISRM (1977), exceto no número de tambores, que foram quatro, no lugar dos dois propostos. A utilização de quatro tambores foi particularmente útil, dado que permitiu ensaiar cada amostra nos dois meios aquosos selecionados, em simultâneo.

A partir de cada amostra de AB<sub>RCD</sub>, de ASIC, de Bas e de Cal foram preparados 40 provetes, igualmente distribuídos pelos quatro tambores, cilíndricos, em aço inoxidável. A massa de cada provete preparado estava compreendida entre 40 g e 60 g, perfazendo, cada conjunto de dez provetes, um total de 400 g a 600 g. Os provetes de AB<sub>RCD</sub>, de Bas e de Cal foram preparados com um formato subangular, enquanto nos provetes de ASIC, por impossibilidade de preparar os provetes com aquele formato, devido às características intrínsecas ao próprio material, prepararam-se provetes com um formato mais arredondado, ainda que não totalmente esférico.

Os provetes preparados 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<sub>A</sub>), e os restantes dois com o lixiviado (provetes identificados como DMA<sub>L</sub>). Os provetes que foram previamente imersos em água e no lixiviado durante 15 dias foram identificados como DMA<sub>L</sub>A e DMA<sub>L</sub>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 (ibid.), ou seja, com a duração de 10 min cada ciclo e à velocidade constante de 20 rpm, num total de 200 + 200 rotações. No terceiro ciclo, não previsto no método, os provetes foram submetidos a mais 30 min 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 24 h, 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.

### 3. RESULTADOS E ANÁLISE

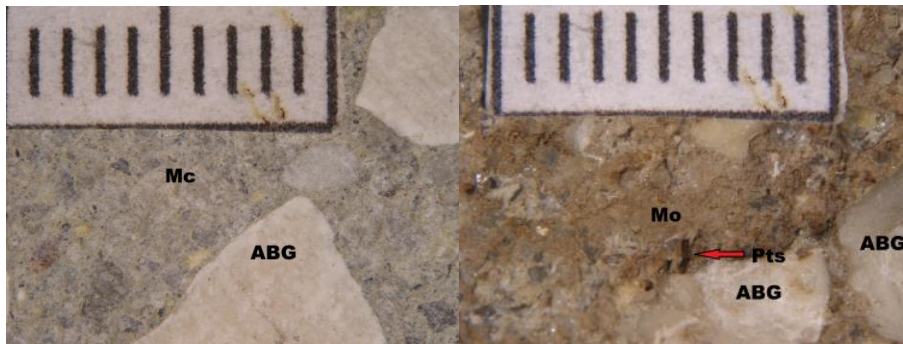
#### 3.2.1. Análise petrográfica

Da análise macroscópica realizada com os provetes das amostras virgens dos quatro materiais em estudo observou-se que: o AB<sub>RCD</sub> é um material multifásico, constituído por agregados naturais de duas dimensões, grossos e finos, envolvidos por uma matriz cimentícia e porosa (figura 1a); o ASIC é um material denso, de textura vesicular, com pequenas partículas de ferro

visíveis; o Bas é uma rocha compacta, melanocrata, com textura afanítica; e o Cal é uma rocha compacta a oolítica, de cor branca a amarelada. Nos provetes dos quatro materiais não se identificaram sinais de alteração.

Da análise microscópica realizada com as lâminas delgadas das amostras virgens dos quatro materiais em estudo observou-se que: o  $AB_{RCD}$  é um material de estrutura complexa composto por matriz cimentícia, agregado e zona de transição, e que os agregados naturais britados finos correspondem a areais quartzíticas; o ASIC é um material composto por duas espécies minerais: minerais opacos e espécie mineral cuja natureza não se identifica ao microscópio petrográfico; o Bas é uma rocha hipocrystalina, porfirítica, constituída por duas fases de cristalização: matriz afanítica e fenocristais de olivina (figura 2a); e o Cal é uma rocha que apresenta uma matriz composta por calcite e por elementos cimentados, óólitos e clastos.

Da análise macropetrográfica realizada após os ensaios de DMA observaram-se fenómenos de oxidação de partículas de ferro em todos os provetes de ASIC, e dos minerais de olivina no provete Bas\_DMA<sub>I</sub>\_A. Nos ensaios de DMA com o lixiviado ocorreu, ainda, a deposição de matéria orgânica na superfície de todos os provetes de  $AB_{RCD}$  (figura 1b) e de ASIC e nos provetes Bas\_DMA<sub>I</sub>\_L e Cal\_DMA<sub>I</sub>\_L.

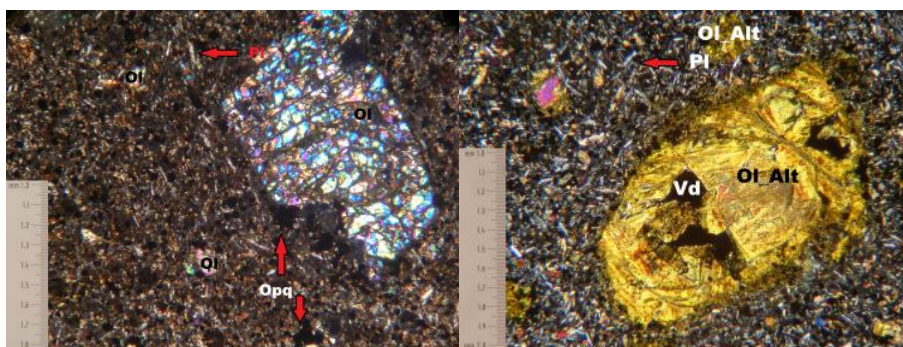


a) provete  $AB_{RCD}$

b) provete  $AB_{RCD\_DMA\_I\_L}$

Legenda: agregado britado grosso - ABG; matriz cimentícia - Mc; matéria orgânica - Mo; poros - Pts  
 Figura 1 - Aspetto macroscópico dos provetes  $AB_{RCD}$

Da análise micropetrográfica efetuada após os ensaios de DMA observaram-se alterações em todos os provetes ASIC, correspondentes a um aumento da concentração de minerais opacos e de óxidos de ferro, e nos provetes Bas, correspondentes a diferentes graus de alteração dos minerais de olivina observados. Em particular nos provetes Bas\_DMA<sub>I</sub>\_A e Bas\_DMA<sub>I</sub>\_L, os fenocristais de olivina apresentaram-se parcial ou totalmente alterados, em alguns casos com perda de massa (figura 2b).



a) lâmina delgada Bas

b) lâmina delgada Bas\_DMA<sub>I</sub>\_L

Legenda: olivina - Ol; sinais de alteração - Ol\_Alt; minerais opacos - Opq; plagioclase - Pl; vidro - Vd  
 Figura 2 - Microfotografias das lâminas delgadas Bas

As alterações observadas na análise petrográfica não foram, contudo, suficientemente importantes ao ponto de se refletirem na durabilidade dos materiais estudados.

### 3.2.2. Caracterização física

O quadro 1 mostra os resultados obtidos para  $M_{VR}$ ,  $M_{VA}$ ,  $P_e$  e  $w_{max}$  nos provetes de  $AB_{RCD}$ , de ASIC, de Bas e de Cal, antes e após terem sido submetidos aos ensaios de DMA.

Quadro 1 - Resultados da caracterização física realizada com os quatro materiais em estudo

Material	Provete	$M_{VR}$ (Mg/m <sup>3</sup> )	$M_{VA}$ (Mg/m <sup>3</sup> )	$P_e$ (%)	$w_{max}$ (%)
Agregado 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
	ASIC	3,77	3,28	12,40	3,83
	ASIC_DMA_A	3,98	3,58	10,00	2,88
	ASIC_DMA_L	3,71	3,28	11,65	3,77
	ASIC_DMA_I_A	3,77	3,28	12,32	3,77
	ASIC_DMA_I_L	3,78	3,29	12,61	3,90
Agregado 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

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, o ASIC é o mais denso, 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 com os restantes três materiais estudados. Em termos quantitativos concluiu-se que: a) o  $AB_{RCD}$  é cerca de 1,2 e 1,5 vezes menos denso que o Bas e o ASIC, respetivamente; b) o  $AB_{RCD}$  é aproximadamente 1,3 vezes mais poroso que o ASIC, 3,1 vezes que o Cal e 38 vezes que o Bas; e c) o ASIC é cerca de 1,2 vezes mais denso e 27 vezes mais poroso que o Bas.

Em termos de comparação com outros estudos publicados, 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 227 (2008). Em agregados de betão britado com uma granulometria compreendida entre 31,5 mm e 63,0 mm, é referido para  $M_{VR}$  e  $M_{VA}$ , respetivamente, 2,60 Mg/m<sup>3</sup> e 2,37 Mg/m<sup>3</sup>, e para  $w_{max}$ , 6,70%. Para esta última propriedade, refira-se, ainda, Jose (2002, Katz, 2003 e Rao, 2005, in Rao et al., 2007) e Gómez-Sobero (2002, in Martín-Morales et al., 2011), que apontam para um intervalo de valores compreendidos entre 3,00% e 12,00%, para diferentes frações granulométricas de  $AB_{RCD}$ .

Em relação ao ASIC, refere-se o estudo desenvolvido por Ferreira (2010), que procedeu à caracterização de escórias de aciaria de FAE processadas, igualmente recolhidas na SN do Seixal. Os valores obtidos pelo autor para  $M_{VR}$ ,  $M_{VA}$  e  $w_{max}$ , respetivamente, de 3,31 Mg/m<sup>3</sup>, 2,94 Mg/m<sup>3</sup> e 3,87%, em ensaios realizados segundo a norma NP 581 (1969), são da mesma ordem de grandeza dos obtidos neste estudo. No que respeita à  $P_e$ , o valor obtido, 12,40%, é

cerca de duas vezes superior ao valor (6,00%) apresentado por Wu et al., (2007), e três vezes superior aos apresentados por De Lima (1999), compreendidos entre 3,89% e 4,26%. Contudo, importa salientar, por um lado, que a  $P_e$  das escórias de aciaria de FAE é influenciada pelo tipo de processamento a que a escória é sujeita (Pasetto e Baldo, 2010) e, por outro, que a textura vesicular da escória aliada ao método utilizado para a determinação da  $P_e$  podem influenciar os valores obtidos (Rodrigues, 2012), devendo-se, por isso, analisar os resultados com algumas reservas.

No que respeita aos dois agregados naturais, os valores iniciais da  $M_{VR}$ , da  $M_{VR}$ , da  $P_e$  e do  $w_{max}$ , apresentados no quadro 1, enquadram-se com os obtidos por Gupta e Rao (2000), Moon e Jayawardane (2004) e Tugrul (2004) no caso do Bas, e com os apresentados por Gupta e Ahmed (2007) no caso do Cal.

Da comparação entre os resultados registados na caracterização física do  $AB_{RCD}$ , do ASIC, do Bas e do Cal realizada antes e após a execução dos ensaios de DMA, verifica-se 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 quatro materiais. A exceção está associada à  $P_e$  e ao  $w_{max}$  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 da  $P_e$ , e de 2% no caso do  $w_{max}$ , 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 (figura 1b).

### 3.2.3. 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 no quadro 2. A classificação da durabilidade dos materiais em estudo foi definida com base na classificação proposta por Gamble (1971), mostrada no quadro 3.

Os  $I_{d1}$ ,  $I_{d2}$  e  $I_{d5}$  do  $AB_{RCD}$ , do ASIC, do Bas e do Cal obtidos nos ensaios de DMA foram superiores a 95%, pelo que, considerando a classificação apresentada no quadro 3 para cada  $I_d$ , conclui-se que os quatro materiais estudados enquadram-se na 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 (ibid.).

O concluído não inviabiliza que, comparando os valores obtidos para  $I_{d5}$ , se ordene os quatro materiais estudados pela seguinte ordem crescente de durabilidade:  $AB_{RCD} < ASIC \cong Cal < Bas$ , 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  $Bas\_DMA\_L$ .

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 prevista no DL n.º 183/2009. Contudo, é conhecido o fenómeno de dissolução dos calcários, devendo-se por essa razão efetuar-se estudos complementares ao presente com o objetivo de avaliar a possibilidade da sua ocorrência nos aterros de resíduos.

Quadro 2 - Resultados dos ensaios de DMA realizados com os quatro materiais em estudo

Material	Provete	$I_d$	Resultado	Material	Provete	$I_d$	Resultado
Agregado reciclado	AB <sub>RCD</sub> _DMA_A	$I_{d1}$	99,5%	Agregado natural	Bas_DMA_A	$I_{d1}$	99,8%
		$I_{d2}$	99,1%			$I_{d2}$	99,7%
		$I_{d5}$	98,0%			$I_{d5}$	99,5%
	AB <sub>RCD</sub> _DMA_L	$I_{d1}$	99,6%		Bas_DMA_L	$I_{d1}$	99,9%
		$I_{d2}$	99,3%			$I_{d2}$	99,8%
		$I_{d5}$	98,3%			$I_{d5}$	99,6%
	AB <sub>RCD</sub> _DMA <sub>L</sub> _A	$I_{d1}$	99,5%		Bas_DMA <sub>L</sub> _A	$I_{d1}$	99,9%
		$I_{d2}$	99,1%			$I_{d2}$	99,7%
		$I_{d5}$	97,7%			$I_{d5}$	99,5%
	AB <sub>RCD</sub> _DMA <sub>L</sub> _L	$I_{d1}$	99,3%		Bas_DMA <sub>L</sub> _L	$I_{d1}$	99,9%
		$I_{d2}$	98,7%			$I_{d2}$	99,7%
		$I_{d5}$	96,7%			$I_{d5}$	99,5%
	ASIC_DMA_A	$I_{d1}$	99,7%		Cal_DMA_A	$I_{d1}$	99,7%
		$I_{d2}$	99,5%			$I_{d2}$	99,4%
		$I_{d5}$	99,0%			$I_{d5}$	98,7%
	ASIC_DMA_L	$I_{d1}$	99,6%		Cal_DMA_L	$I_{d1}$	99,7%
		$I_{d2}$	99,4%			$I_{d2}$	99,5%
		$I_{d5}$	99,0%			$I_{d5}$	99,0%
	ASIC_DMA <sub>L</sub> _A	$I_{d1}$	99,7%		Cal_DMA <sub>L</sub> _A	$I_{d1}$	99,7%
		$I_{d2}$	99,4%			$I_{d2}$	99,4%
		$I_{d5}$	98,9%			$I_{d5}$	98,6%
	ASIC_DMA <sub>L</sub> _L	$I_{d1}$	99,6%		Cal_DMA <sub>L</sub> _L	$I_{d1}$	99,8%
		$I_{d2}$	99,4%			$I_{d2}$	99,6%
		$I_{d5}$	98,9%			$I_{d5}$	99,0%

Quadro 3 - Classificação da durabilidade dos materiais rochosos com base no  $I_d$  (Gamble, 1971)

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

A análise comparativa dos resultados obtidos para os dois agregados reciclados ensaiados com outros não foi possível em virtude de, na bibliografia nacional e internacional consultada pelos autores, não terem sido referenciados quaisquer dados para os agregados reciclados, em geral, e para o AB<sub>RCD</sub> e o ASIC, 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) e Jeremias (2000) realizaram ensaios com calcários, e Sharma e Singh (2008) com basaltos. Delgado Rodrigues (op. cit.) submeteu calcários do Mondego a seis ciclos de desgaste ( $I_{d6} = 1200$  rotações), com e sem a presença de água, e Jeremias (op. cit.), calcários oolíticos a cinco ciclos de desgaste ( $I_{d5} = 1000$  rotações). Sharma e Singh (op. cit.), por seu turno, avaliaram a durabilidade de basaltos alterados, sem contudo referirem o estado de meteorização dos mesmos, a dois ciclos de desgaste ( $I_{d2} = 400$  rotações). 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 para o AB<sub>RCD</sub> e o ASIC. Já o calcário oolítico apresentou valores de  $I_d$  menores que os calculados para o Bas e o Cal.



#### 4. CONCLUSÕES

A investigação apresentada nesta comunicação teve por principal objetivo avaliar a viabilidade técnica da aplicação de dois agregados reciclados, o AB<sub>RCD</sub> e o ASIC, na construção da camada de drenagem e recolha de lixiviados do sistema de proteção basal ativo dos aterros de resíduos.

Os resultados obtidos indicam que os dois agregados reciclados, o AB<sub>RCD</sub> e o ASIC, e os dois agregados naturais, o Bas e o Cal, utilizados no estudo como materiais de referência, pertencem à categoria de materiais de durabilidade muito elevada, considerando a classificação de Gamble (1971), mesmo após serem submetidos a condições químicas e mecânicas mais agressivas do que as previstas no ensaio de DMA proposto pela ISRM (1977). 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.

Apesar dos resultados obtidos para o Cal nos ensaios de DMA, considera-se ser necessário efetuar estudos adicionais ao presentemente realizado, que permitam avaliar da possibilidade de se desenvolverem fenómenos de dissolução naquele material na aplicação investigada.

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 quatro materiais, dado não se terem verificado alterações significativas nas propriedades petrográficas e físicas iniciais.

Conclui-se que, para as condições de ensaio adotadas, os resultados obtidos com os agregados, quer reciclados, quer naturais, evidenciaram a viabilidade técnica da utilização dos primeiros na principal aplicação proposta, bem como em infraestruturas de transporte e obras geotécnicas, numa perspectiva de durabilidade.

#### AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem às empresas Demotri, S.A., do Grupo Ambigroup, SGPS, S.A., Siderurgia Nacional - Empresa de Produtos Longos, S.A., Alves Ribeiro, S.A., Agrepor, S.A., e Amarsul - Valorização e Tratamento de Resíduos Sólidos, S.A., pelo fornecimento dos materiais utilizados no estudo. Agradecem igualmente ao Doutor Prof. Joaquim Simão, do Departamento de Ciências da Terra/CICEGe, da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, pelo apoio dado na análise petrográfica dos materiais estudados.

#### REFERÊNCIAS

- ASTM C856 (2011). *Standard practice for petrographic examination of hardened concrete*. American Society for Testing and Materials, PA, USA.
- CEN/TR 15310 (2006). *Characterization of waste: Sampling of waste materials (Part 1-5)*. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium.
- De Lima, L. A. (1999). *Hormigones con escorias de horno eléctrico como áridos: propiedades, durabilidad y comportamiento ambiental*. Tese de Doutoramento, Departament d'enginyeria de la construcció da Escola Tècnica Superior d'Enginyers de Camins, Canals i Ports da Univeritat Politècnica de Catalunya, Barcelona, Espanha. 243 p.
- Delgado Rodrigues, J. (1986). *Contribuição para o estudo das rochas carbonatadas e para a sua classificação*. Relatório 104/86 - NP, Lisboa: LNEC, 45 p.
- EN 12407 (2007). *Natural stone test methods - Petrographic examination*. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium.

- Ferreira, S. M. R. (2010). *Comportamento mecânico e ambiental de materiais granulares - Aplicação às escórias de aciaria nacionais*. Tese de Doutoramento, Escola de Engenharia da Universidade do Minho, Guimarães, 330 p.
- Gamble, J. C. (1971). *Durability-plasticity classification of shales and other argillaceous rock*. PhD Thesis, University of Illinois, Chicago, USA.
- Gupta, A. S. e Seshagiri Rao, K. (2000). Weathering effects on the strength and deformational behaviour of crystalline rocks under uniaxial. *Engineering Geology*, vol. 56 (3-4), pp. 257-274.
- Gupta, V. e 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*, vol. 95 (3-4), pp. 79-87.
- ISRM (1977). *Suggested method for determination of the slake-durability index*. Commission on testing methods, Pergamon Press, pp. 101-102.
- Jeremias, F. T. (2000). *Geological controls on the engineering properties of mudrocks of the north Lisbon area*, Ph.D Thesis, University of Sheffield, Sheffield, UK, 464 p.
- LERO-PE01 (1993). *Ensaio de determinação da porosidade acessível à água, das massas volúmicas e do teor máximo em água de absorção*. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.
- LNEC E 227 (2008). *Caracterização de agregados reciclados de acordo com o Normativo Europeu prEN 933-11*. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.
- Martin-Morales, M., Zamorano, M., Ruiz-Moyano, A. e 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*, vol. 25 (2), pp. 742-748.
- Moon, V. e Jayawardane, J. (2004). Geomechanical and geochemical changes during early stages of weathering of Karamu basalt, New Zealand. *Engineering Geology*, vol. 74 (1-2), pp. 57-72.
- 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, Almada.
- Pasetto, M. e Baldo, N. (2010). Experimental evaluation of high performance base course and road base asphalt concrete with electric arc furnace steel slags. *Hazardous Materials*, vol. 181 (1-3), pp. 938-948.
- Rao, A., Jha, K. N. e Misra, S. (2007). Use of aggregates from recycled construction and demolition waste in concrete. *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 50 (1), pp.71-81.
- 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.
- Sharma, P. K. e 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*, vol. 67 (1), pp. 17-22.
- Tugrul, A. (2004). The effect of weathering on pore geometry and compressive strength of selected rock types from Turkey. *Engineering Geology*, vol. 75 (3-4), pp. 215-227.
- Wu, S., Xue, Y., Ye, Q. e Chen, Y. (2006). Utilization of steel slag as aggregates for stone mastic asphalt (SMA) mixtures. *Building and Environment*, vol. 42 (7), pp. 2580-2585.