

ESTUDO DA DURABILIDADE DE RCD E DO ASIC PARA APLICAÇÃO NA CAMADA DE DRENAGEM E RECOLHA DOS LIXIVIADOS EM ATERROS DE RESÍDUOS

Durability study of C&DW and ISAC for application in the leachate collection and drainage layer of waste landfills

Gonçalo Manuel Rodrigues*

António José Roque**

A. Paula F. da Silva***

RESUMO – A valorização de resíduos em obras de engenharia civil representa uma importante vantagem ambiental e económica. Neste contexto, contribui-se com a avaliação da viabilidade técnica da aplicação de um agregado reciclado de betão britado – AB_{RCD} , resultante do processamento de resíduos de construção e demolição – RCD, e de um agregado siderúrgico inerte para a construção – ASIC, processado a partir de escórias de aciaria de forno de arco elétrico – FAE, na construção da camada de drenagem e recolha dos lixiviados existente nos aterros de resíduos. No artigo apresentam-se e analisam-se os resultados do estudo da durabilidade dos dois agregados reciclados em contacto com água e com um lixiviado recolhido num aterro de resíduos sólidos urbanos. Nesta avaliação foi relevante o comportamento observado com dois agregados naturais, o basalto – BAS e o calcário – CAL. Conclui-se que, nas condições de ensaio adotadas e numa perspetiva de durabilidade, os dois materiais apresentam comportamento que perspetiva a sua reciclagem na construção da referida camada, bem como em obras geotécnicas e infraestruturas de transporte em geral.

SYNOPSIS – The valorisation of waste as civil engineering works represents an important environmental and economic advantage. In this context, it is intended to evaluate the technical feasibility of applying a crushed concrete recycled aggregate – CC_{CDW} , processed from construction and demolition waste – C&DW, and an inert steel aggregate for construction – ISAC, processed from electric arc furnace – EAF steel slag, in the construction of the landfill leachate collection and removal system. This paper presents and discusses the results of the durability study of both recycled aggregates in contact with water and a leachate collected in a municipal solid waste landfill. The behaviour observed with two natural aggregates, basalt – BAS and limestone – CAL was relevant in this evaluation. The paper concludes that, under the test conditions adopted and in a perspective of durability, the behaviour of the two materials is adequate for their recycling in the leachate collection and removal system, as well in geotechnical works and transport infrastructures in general.

PALAVRAS CHAVE – Escórias de aciaria, resíduos de construção e demolição, durabilidade.

NOTA DO EDITOR – Este artigo foi submetido à Revista Geotecnia em face da atribuição do Prémio Jovens Geotécnicos em Língua Portuguesa de 2013 - Menção Honrosa ao seu primeiro autor, tendo por base a dissertação de mestrado apresentada à Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa e desenvolvida no Laboratório Nacional de Engenharia Civil, ao abrigo do protocolo existente entre estas duas entidades.

* Engenheiro Geólogo, Mestre em Engenharia Geológica (Geotecnia).

E-mail: gms_rodrigues@hotmail.com

** Investigador Principal, Departamento de Geotecnia, Laboratório Nacional de Engenharia Civil.

E-mail: aroque@lnec.pt

*** Professora Auxiliar, Departamento Ciências da Terra – Centro de Investigação em Ciência e Engenharia Geológica, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade NOVA de Lisboa. E-mail: apfs@fct.unl.pt

1 – INTRODUÇÃO

O grande volume de resíduos produzidos nas diversas atividades domésticas, agrícolas, comerciais e industriais, aliado à falta de medidas direcionadas para a sua valorização, contribuíram, em certa medida, para o atual estado de degradação do ambiente. No sentido de inverter este panorama, um número crescente de países tem vindo a contemplar nas suas disposições legais políticas direcionadas para promover um desenvolvimento sustentável e incentivar a reciclagem de resíduos, designadamente através dos agregados reciclados, quando estes apresentam comportamento adequado para as obras de engenharia civil, pelo menos equivalente ao assegurado pelos agregados naturais que substituíam.

A Diretiva 75/442/CEE do Conselho, de 15 de julho de 1975 (Diretiva 75/442/CEE, 1975), foi um marco em matéria de gestão integrada de resíduos, numa perspetiva da sua reciclagem futura, ao aproximar as diferentes legislações nacionais dos vários estados-membros que à data integravam a União Europeia e ao ter, como objetivos, a proteção do ambiente e da saúde pública, a promoção da recuperação dos resíduos e a utilização dos materiais reciclados (Freire, 2011).

Em Portugal, o quadro jurídico da gestão de resíduos foi pela primeira vez estabelecido em 1985, por meio da publicação do decreto-lei – DL, nº 488/85, de 25 de novembro (DL 488/85, 1985), que lançou as bases para um sistema de registo obrigatório de resíduos e para a definição de competências e responsabilidades no domínio da gestão dos mesmos. Por esta via, pretendia-se implementar uma estratégia que promovesse a redução do volume de resíduos produzidos, acompanhada do desenvolvimento de processos tecnológicos que permitissem, em primeira instância, a sua reciclagem (Rodrigues, 2012).

O enquadramento legal mais recente no país em matéria de gestão integrada de resíduos, o DL nº 178/2006, de 5 de setembro (DL 178/2006, 2006), alterado e republicado pelo DL nº 73/2011, de 17 de junho (DL 73/2011, 2011), passou a estabelecer o regime geral aplicável à prevenção, produção e gestão de resíduos – RGPPGR. De entre as alterações introduzidas ao regime geral da gestão de resíduos – RGGR, previsto no diploma inicial, salienta-se a prioridade do reforço da prevenção da produção de resíduos e do fomento da sua reutilização e reciclagem com vista a prolongar o seu uso na economia antes de os devolver, em condições adequadas, ao meio natural, e a importância de promover o pleno aproveitamento do novo mercado organizado de resíduos como forma de consolidar a sua valorização e de estimular o aproveitamento de resíduos específicos com elevado potencial de valorização. Para a concretização destes objetivos foram, entre outros, estabelecidos requisitos para que substâncias ou objetos resultantes de um processo produtivo possam ser considerados subprodutos e não resíduos, e critérios para que determinados resíduos deixem de ter o estatuto de resíduo; foi prevista a utilização de pelo menos 5% de materiais reciclados em empreitadas de obras públicas; e o âmbito do mercado organizado de resíduos foi alargado aos subprodutos, aos materiais reciclados e aos resíduos perigosos, conferindo-lhe uma maior versatilidade e facilitando e potenciando a valorização de outros tipos de resíduos.

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 daquelas obras ao longo do seu tempo de vida útil, é de privilegiar a utilização daqueles materiais alternativos em detrimento dos materiais naturais, num quadro de uma política de construção e de gestão de recursos sustentável.

A durabilidade dos agregados reciclados, à semelhança dos agregados naturais, é fundamental ao adequado funcionamento das obras de engenharia civil que os incorporem. Verificou-se, porém, que na bibliografia consultada não foram referenciados estudos sobre esta temática, facto que se justifica por a utilização dos agregados reciclados ainda ser uma aplicação relativamente recente, contrariamente à dos 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 dos agregados reciclados, para os quais se perspectiva uma crescente utilização futura nas obras de engenharia civil, designadamente por necessidade de cumprimento das metas de reutilização, reciclagem e outras formas de valorização material de resíduos, até 2020 (DL 73/2011, 2011).

Neste artigo apresenta-se o estudo da durabilidade de um agregado reciclado de betão britado – AB_{RCD} , resultante do processamento de resíduos de construção e demolição – RCD, 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 processada, com vista à utilização de ambos na construção da camada de drenagem e recolha dos lixiviados existente no sistema de proteção basal ativo dos aterros de resíduos, bem como em obras geotécnicas e em infraestruturas de transporte. No país produzem-se, anualmente, cerca de $7,5 \times 10^6$ toneladas – ton, de RCD (Roque, 2010) e 250×10^3 ton de ASIC (Roque *et al.*, 2010).

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 (ISRM, 1977), tendo-se utilizado dois meios aquosos: água, da rede de abastecimento público, e um lixiviado, recolhido num aterro de resíduos sólidos urbanos – RSU. A utilização da água, o meio aquoso habitualmente utilizado nos ensaios de DMA, teve como propósito: a) servir de referência aos resultados obtidos com o lixiviado e aos valores existentes na bibliografia sobre agregados naturais; e b) avaliar a durabilidade do AB_{RCD} e do ASIC neste meio, por ser o fluido mais corrente nas obras geotécnicas, designadamente na camada de drenagem do sistema de selagem final dos aterros de resíduos, e nas infraestruturas de transporte. A utilização do lixiviado justifica-se, por um lado, pelo elevado volume de material que pode ser utilizado na construção da camada de drenagem e recolha dos lixiviados e, por outro, por os aterros de resíduos continuarem a ser construídos ou ampliados no país.

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 real – M_{VR} , massa volúmica aparente – M_{VA} , porosidade efetiva – P_e , e teor máximo em água de absorção – w_{max}) 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 dos resultados obtidos servirem de referência aos obtidos com os agregados reciclados. A relevância desta comparação assenta na já referida inexistência de estudos 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 DL n° 183/2009 (2009), de 10 de agosto, o material a aplicar na construção da camada de drenagem e recolha dos lixiviados deve ser isento de material calcário face à possível dissolução do carbonato de cálcio ($CaCO_3$). Deste modo, complementarmente ao objetivo principal acima descrito, também se avaliou a durabilidade do CAL em presença do lixiviado.

Após se descreverem os quatro materiais selecionados para a realização do estudo e os métodos utilizados na sua amostragem e na realização dos ensaios, apresentam-se os resultados obtidos e respetivas análises. Por último, expõem-se as principais conclusões resultantes do estudo desenvolvido.

2 – LEGISLAÇÃO E REGULAMENTAÇÃO TÉCNICA PARA A RECICLAGEM DOS RCD E DAS ESCÓRIAS DE ACIARIA DE FAE

No caso dos RCD, foi publicado em Portugal um diploma, o DL nº 46/2008, de 12 de março (DL 46/2008, 2008), que passou a estabelecer o “(...) regime das operações de gestão de resíduos resultantes de obras, de demolições de edifícios ou de derrocadas (...) compreendendo a sua prevenção e reutilização e as suas operações de recolha, transporte, armazenamento, triagem, tratamento, valorização e eliminação” (Freire, 2011), e com o qual se procurou adotar uma abordagem que garantisse a sustentabilidade ambiental da atividade da construção civil numa lógica de ciclo de vida, definindo-se as metodologias e práticas a adotar nas fases de projeto e de execução da obra segundo princípios subjacentes à hierarquia da gestão de resíduos (Fortunato *et al.*, 2009). Segundo Mimoso (2007, *in* Lourenço, 2007), o interesse em legislar sobre esta matéria devia-se à necessidade de definir uma política pública dirigida para a gestão do fluxo de RCD que permitisse criar instrumentos de acompanhamento dos volumes gerados desde a sua origem até ao seu destino final; incentivasse a triagem e valorização dos resíduos em detrimento do seu abandono ilegal ou da deposição em aterro; e clarificasse a atividade de transporte mediante a definição de regras a cumprir por parte das empresas responsáveis por esta atividade e a distinção entre a sua missão e a de um operador de gestão de resíduos.

No que respeita à escória de aciaria de FAE, não existe qualquer tipo de legislação específica no país, pelo que, neste caso, as operações de gestão deste resíduo são reguladas em concordância com o disposto no DL 73/2011 (2011).

Dada a inexistência de legislação específica em Portugal para a classificação da perigosidade ambiental dos resíduos a aplicar em obras de engenharia civil, a sua reciclagem é aceite pela autoridade reguladora nacional, a Agência Portuguesa do Ambiente – APA, desde que pertençam à categoria de resíduos admissíveis em aterros para resíduos inertes, definida pelo DL nº 183/2009, (DL 183/2009, 2009), por se considerar que em tais condições não existe risco para o ambiente e para a saúde pública. As especificações LNEC E 471 (2009), LNEC E 473 (2009) e LNEC E 474 (2009), contempladas pelo DL 46/2008 (2008), preveem, a par de uma caracterização física e mecânica, um controlo ambiental dos RCD com a frequência mínima de duas vezes por ano. No caso das escórias de aciaria de FAE, não existe legislação específica que defina a caracterização ambiental e de engenharia a realizar. Contudo, estudos já realizados por Roque *et al.* (2010) demonstraram tratar-se de um resíduo inerte, admissível em aterros para resíduos inertes, e Gomes Correia *et al.* (2012) concluíram que as suas características de engenharia são adequadas à sua utilização como material granular não ligado em camadas de pavimentos rodoviários e em aterros estruturais.

3 – PROGRAMA EXPERIMENTAL

A avaliação da durabilidade dos quatro materiais selecionados para estudo foi efetuada mediante a realização de ensaios de DMA conforme previsto pelo método da ISRM já indicado. Porém, com o objetivo de simular condições químicas e mecânicas mais agressivas e prolongadas do que as previstas no método, procedeu-se a algumas alterações.

Para cada material prepararam-se quatro conjuntos de provetes identicamente preparados. Em todos os conjuntos, aos dois ciclos de desgaste do ensaio de DMA recomendados pelo método, de 10 minutos – min cada um, à velocidade constante de 20 rotações por minuto – rpm, efetuou-se um terceiro ciclo de desgaste com a duração de 30 min (600 rotações, no total), pretendendo-se, com este último ciclo, submeter os materiais a ações mecânicas mais prolongadas. Os três ciclos de desgaste totalizaram, assim, 1000 rotações. Dois conjuntos de cada material foram ensaiados em água e os restantes dois em lixiviado.

Dois dos conjuntos ensaiados em cada material foram, antes da realização do ensaio de DMA, imersos por um período de tempo de 15 dias em água e em lixiviado. Com esta imersão prévia pretendeu-se prolongar o tempo de contato dos materiais com o meio aquoso de ensaio.

O potencial hidrogeniônico – pH, do lixiviado, que no momento da recolha no aterro de resíduos era de 7,6, foi acidificado em laboratório até se atingir um pH de 5,5. Com esta acidificação pretendeu-se criar condições químicas mais agressivas que as normalmente observadas nos aterros de RSU.

Paralelamente aos ensaios de DMA, procedeu-se, antes e após a sua realização, à análise macro e micropetrográfica e à caracterização física (M_{VR} e M_{VA} , P_e e w_{max}) dos quatro materiais estudados. Estes ensaios decorreram com o objetivo de avaliar a ocorrência de alterações nos materiais após os ensaios de DMA, e a expressão das mesmas. O quadro 1 resume os ensaios efetuados e identifica os provetes utilizados. Com os provetes virgens (AB_{RCD} , ASIC, BAS e CAL) apenas se procedeu à análise petrográfica e à sua caracterização física, como mostra o quadro.

Quadro 1 – Resumo dos ensaios efetuados.

Ensaio	Meio aquoso	Proвете
<p><i>Antes do ensaio de DMA</i></p> <ul style="list-style-type: none"> – Análise petrográfica – Caracterização física 	–	<p>AB_{RCD}</p> <p>ASIC</p> <p>BAS</p> <p>CAL</p>
<p><i>Após ensaio de DMA, sem imersão prévia</i></p> <ul style="list-style-type: none"> – Análise petrográfica – Caracterização física 	Água (A)	$AB_{RCD_DMA_A}$
		ASIC_DMA_A
		BAS_DMA_A
		CAL_DMA_A
	Lixiviado (L)	$AB_{RCD_DMA_L}$
		ASIC_DMA_L
		BAS_DMA_L
		CAL_DMA_L
<p><i>Após ensaio de DMA, com imersão (I) prévia de 15 dias</i></p> <ul style="list-style-type: none"> – Análise petrográfica – Caracterização física 	Água (A)	$AB_{RCD_DMA_I_A}$
		ASIC_DMA_I_A
		BAS_DMA_I_A
		CAL_DMA_I_A
	Lixiviado (L)	$AB_{RCD_DMA_I_L}$
		ASIC_DMA_I_L
		BAS_DMA_I_L
		CAL_DMA_I_L

4 – MATERIAIS

4.1 – Agregado reciclado de betão britado de RCD (AB_{RCD})

A amostra de AB_{RCD} utilizada no estudo proveio do processamento de RCD de diversas obras de demolição na central de reciclagem da empresa Demotri, S.A., a operar no Seixal (figura 1). Esta empresa é a responsável no Grupo Ambigroup pela área das demolições. O processamento dos RCD com vista à sua valorização como agregado reciclado é descrito em Rodrigues (2012).

O processo de amostragem do AB_{RCD} no parque da Demotri decorreu de forma empírica, por se considerar que a qualidade e a representatividade da amostra não seriam prejudicadas caso não se adotasse a totalidade das recomendações propostas em documentos técnicos, em particular nos relatórios técnicos TR 15310 (2006). As principais razões para adotar a metodologia seguida foram: a natureza do material amostrado; as condições do local da amostragem; o modo como o material se encontrava depositado; e os condicionalismos associados aos ensaios realizados no presente estudo, tais como, a dimensão e a forma dos provetes.

No quadro 2 é apresentada uma folha de registo, adaptada da norma ASTM D 4687 (1995), onde constam os elementos informativos mais relevantes do processo de amostragem do AB_{RCD} . A figura 2 complementa visualmente alguma da informação apresentada no quadro 2.



Fig. 1 – Localização dos materiais.

Quadro 2 – Registo do processo de amostragem do AB_{RCD}.

Nome da empresa	Demotri, S.A. (Grupo Ambigroup).		Data da recolha	07/04/2011
Localização da infraestrutura	Parque Seixal/Casal do Marco – freguesia da Arrentela (Seixal).			
Tipo de procedimento para a produção do material	Descrito na presente secção.		Tipo de material	Agregado reciclado.
Descrição visual do material	Material constituído por agregados naturais de duas dimensões, grossos e finos, envolvidos por uma matriz cimentícia e porosa, com forma irregular induzida pelo processo de britagem.			
Descrição do depósito de armazenamento do material	O material encontrava-se depositado numa pilha a céu aberto (figura 2a). A pilha do material recolhido tinha cerca de 2 m de altura e 5 m de comprimento.			
Composição química do material	Sem informação.			
Número de blocos recolhidos	120 blocos de dimensões inferiores a 100 mm.	Massa total	Sem informação.	
Recipiente de recolha	5 sacos em nylon.			
Finalidade da amostragem	Estudo da durabilidade do material com ensaios de DMA, com vista à avaliação da sua adequabilidade para a construção da camada de drenagem e recolha dos lixiviados dos aterros de resíduos.			
Método de amostragem	Manual, sem recurso a qualquer tipo de equipamento de amostragem (figura 2b). Os critérios para a seleção das amostras foram estabelecidos em função das condições impostas pelos ensaios de DMA. Como tal, os blocos selecionados apresentavam dimensões inferiores a 100 mm e uma forma preferencialmente quadrangular, para facilitar a execução dos provetes necessários à realização daqueles ensaios.			
Tipo de preservação	Os blocos foram transportados nos sacos em nylon para o LNEC, mantendo-se nos mesmos, à temperatura ambiente, até à preparação dos provetes.			
Parâmetros avaliados <i>in situ</i>	Sem informação.			
Observações suplementares	Sem informação.			



Fig. 2 – Amostragem do AB_{RCD}: a) pilha de material; b) recolha de um bloco.

4.2 – Agregado Siderúrgico Inerte para a Construção (ASIC)

A amostragem do ASIC decorreu conforme descrito para o AB_{RCD} e foi realizada nas instalações da unidade industrial da Siderurgia Nacional Empresa de Produtos Longos, S.A. – SN, sita no Seixal (figura 1). O processamento das escórias de aciaria de FAE com vista à sua valorização como agregado reciclado é descrito em Roque *et al.* (2006).

No quadro 3 são apresentados os elementos informativos mais relevantes do processo de amostragem do ASIC, com alguma dessa informação a ser complementada com a figura 3.

Quadro 3 – Registo do processo de amostragem do ASIC.

Nome da empresa	SN.		Data da recolha	30/03/2011
Localização da infraestrutura	Avenida Siderurgia Nacional – freguesia de Paio Pires (Seixal).			
Tipo de procedimento para a produção do material	Descrito na presente secção.		Tipo de material	Agregado reciclado.
Descrição visual do material	Material denso, de tonalidade escura (negra), textura vesicular e superfície áspera, irregular e cortante. Em algumas amostras de ASIC era visível, a olho nu, a inclusão de pequenas partículas de ferro.			
Descrição do depósito de armazenamento do material	O material amostrado encontrava-se depositado em várias pilhas, a céu aberto (figura 3a). A pilha de onde o material foi recolhido tinha entre 3 e 5 m de altura e uma extensão superior a 10 m.			
Composição química do material	Sem informação.			
Número de blocos recolhidos	200 blocos de dimensões inferiores a 100 mm.	Massa total	Sem informação.	
Recipiente de recolha	2 sacos em plástico.			
Finalidade da amostragem	Ver quadro 2.			
Método de amostragem	Ver quadro 2.			
Tipo de preservação	Ver quadro 2.			
Parâmetros avaliados <i>in situ</i>	Sem informação.			
Observações suplementares	Sem informação.			



Fig. 3 – Amostragem do ASIC: a) pilha de material; b) recolha da amostra.

4.3 – Basalto (BAS)

A amostragem do BAS foi realizada no parque de armazenamento da central de processamento da pedreira nº 2029 – Moita da Ladra, sita em Vialonga (Vila Franca de Xira, figura 1), da empresa Alves Ribeiro, S.A., tendo decorrido conforme descrito para os dois agregados reciclados. O enquadramento geológico da região onde se insere a pedreira e o método utilizado no processamento do BAS são descritos em Rodrigues (2012).

No quadro 4 são apresentados os elementos informativos mais relevantes do processo de amostragem do BAS, com alguma dessa informação a ser complementada com a figura 4.

Quadro 4 – Registo do processo de amostragem do BAS.

Nome da empresa	Alves Ribeiro, S.A.		Data da recolha	30/03/2011
Localização da infraestrutura	Pedreira nº 2029 – Moita da Ladra – freguesia de Vialonga (Vila Franca de Xira).			
Tipo de procedimento para a produção do material	Descrito em Rodrigues (2012).		Tipo de material	Rocha ígnea basáltica (agregado natural).
Descrição visual do material	Material denso, de tonalidade escura (negra), grão fino e forma irregular na fase da pré-britagem.			
Descrição do depósito de armazenamento do material	O material amostrado encontrava-se depositado numa pilha, a céu aberto (figura 4a). A pilha de onde o material foi recolhido tinha cerca de 10 m de altura e uma extensão superior a 25 m.			
Composição química do material	Sem informação.			
Número de blocos recolhidos	25 blocos de dimensões superiores a 100 mm.	Massa total	125 kg.	
Recipiente de recolha	3 sacos em nylon.			
Finalidade da amostragem	Utilização como material de referência na avaliação da durabilidade dos agregados reciclados.			
Método de amostragem	Ver quadro 2.			
Tipo de preservação	Ver quadro 2.			
Parâmetros avaliados <i>in situ</i>	Sem informação.			
Observações suplementares	Sem informação.			

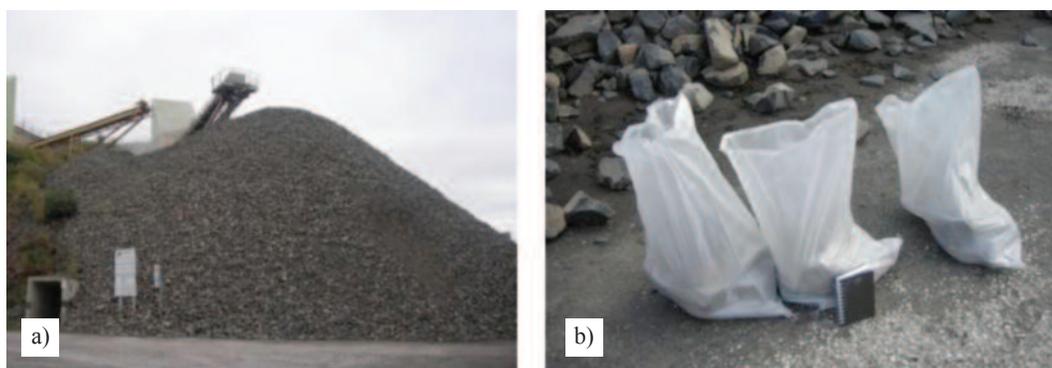


Fig. 4 – Amostragem do BAS: a) pilha de material pré-britado; b) amostra recolhida.

4.4 – Calcário (CAL)

A amostragem do CAL foi realizada no parque de armazenamento da central de processamento da pedra Vale Grande nº 2, sita em Meca (Alenquer, figura 1), pertencente à empresa Agrepor, S.A., tendo decorrido conforme descrito para os dois agregados reciclados. O enquadramento geológico da região onde se insere a pedra e o método utilizado no processamento do CAL são descritos em Rodrigues (2012).

No quadro 5 são apresentados os elementos informativos mais relevantes do processo de amostragem do CAL, com alguma dessa informação a ser complementada com a figura 5.

Quadro 5 – Registo do processo de amostragem do CAL.

Nome da empresa	Agrepor, S.A.		Data da recolha	30/03/2011
Localização da infraestrutura	Pedreira Vale Grande nº 2 – Freguesia de Meca (Alenquer).			
Tipo de procedimento para a produção do material	Descrito em Rodrigues (2012).		Tipo de material	Rocha sedimentar calcária (agregado natural).
Descrição visual do material	Material compacto, de grão fino, cor branca a amarelada, com uma forma irregular em virtude do processo de britagem. Em alguns blocos de mão eram visíveis veios de calcite e algumas zonas de tonalidade castanha-avermelhada e cinzenta.			
Descrição do depósito de armazenamento do material	O material amostrado encontrava-se depositado numa pilha, a céu aberto (figura 5a). A pilha de onde o material foi recolhido tinha cerca de 5 m de altura e uma extensão superior a 15 m.			
Composição química do material	Sem informação.			
Número de blocos recolhidos	20 blocos de dimensões superiores a 100 mm.	Massa total	100 kg.	
Recipiente de recolha	3 sacos em nylon.			
Finalidade da amostragem	Para além do já mencionado no quadro 4, permitir a avaliação da durabilidade do material aos lixiviados, que a legislação atual (DL 183/2009, 2009) exclui para construir a camada de drenagem e recolha dos lixiviados.			

Quadro 5 (cont.) – Registo do processo de amostragem do CAL.

Método de amostragem	Ver quadro 2.
Tipo de preservação	Ver quadro 2.
Parâmetros avaliados <i>in situ</i>	Sem informação.
Observações suplementares	Sem informação.



Fig. 5 – Amostragem do CAL: a) pilha de material pré-britado; b) recolha da amostra.

4.5 – Lixiviado

O lixiviado foi recolhido na célula C do aterro de RSU da Amarsul, S.A., localizado no Seixal (figura 1). O aterro é composto por três células: na célula A foram depositadas 650×10^3 ton de RSU; a célula B recebeu cerca de 900×10^3 ton, tendo-se já iniciado o seu processo de selagem; e a célula C, em exploração desde 2001, prevendo-se o seu encerramento apenas em 2020. Rodrigues (2012) detalha a composição estrutural do aterro e a composição dos resíduos depositados.

Para o processo de amostragem recorreu-se, inicialmente, a uma bomba para permitir extrair o lixiviado existente no sistema de drenagem e recolha dos lixiviados do aterro de RSU (figura 6a) para um balde em plástico. De seguida, o lixiviado foi transferido para garrações em polietileno, com auxílio de um funil (figura 6b), e, posteriormente, transportado para o LNEC, onde ficou armazenado à temperatura de 4°C até à sua utilização nos ensaios.

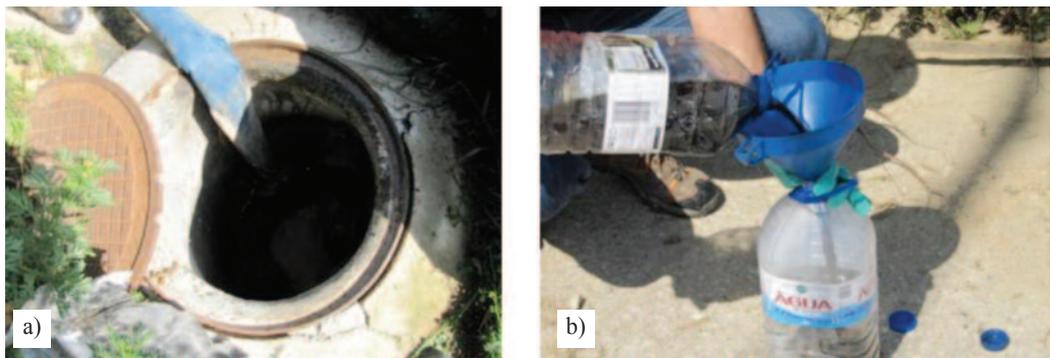


Fig. 6 – Amostragem do lixiviado no aterro de RSU: a) bombagem do lixiviado a partir do sistema de drenagem e recolha; b) transferência do lixiviado recolhido para os recipientes de armazenamento a transportar.

Em laboratório, o lixiviado, que no momento da sua recolha no aterro de RSU apresentava um valor de pH igual a 7,6, foi acidificado com uma solução a 50% de ácido clorídrico – HCl, até se atingir um pH de 5,5. Esta acidificação, cujo procedimento é detalhado em Rodrigues (2012), deveu-se, por um lado, ao facto 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.

5 – MÉTODOS

5.1 – Análise petrográfica

O estudo macropetrográfico do ASIC, do BAS e do CAL seguiu o procedimento descrito na norma NP EN 932-3 (2010), e no caso do AB_{RCD} , a norma ASTM C 856 (2011) desenvolvida para a análise petrográfica do betão. O estudo micropetrográfico, realizado em lâminas delgadas com recurso a um microscópio petrográfico, seguiu o procedimento descrito na norma EN 12407 (2007) para o ASIC, o BAS e o CAL, e no caso do AB_{RCD} , a norma ASTM C 856 (2011).

5.2 – Caracterização física

O ensaio para a determinação da M_{VR} , da M_{VA} , da P_e e do 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 quatro propriedades físicas correspondem à média dos resultados obtidos em cada um dos seis provetes.

5.3 – Durabilidade

O estudo da durabilidade dos dois agregados reciclados, o AB_{RCD} e o ASIC, e dos dois agregados naturais, o BAS e o CAL, foi efetuado mediante a realização do ensaio de DMA. Trata-se de 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 (figura 7) idêntico ao recomendado pela ISRM, exceto no número de tambores, quatro, no lugar dos dois propostos (figura 7a), o que se revelou particularmente útil, dado ter permitido empregar em cada ensaio realizado os dois meios aquosos.

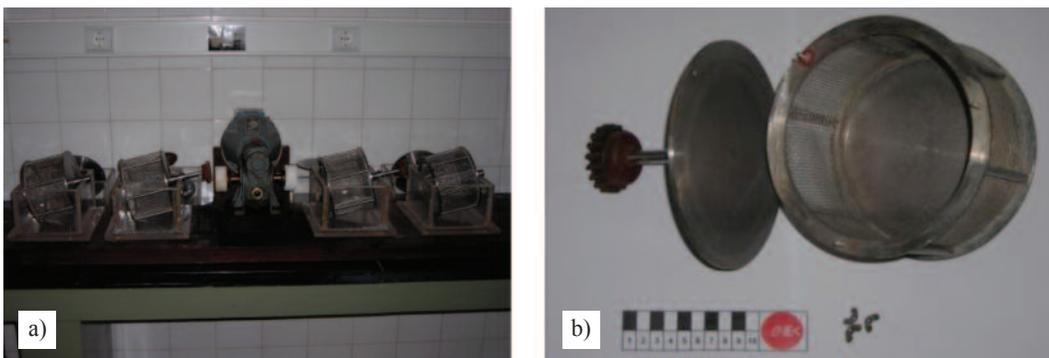


Fig. 7 – Equipamento utilizado no ensaio de DMA: a) vista geral do equipamento; b) pormenor do tambor em aço inoxidável.

A partir de cada amostra de AB_{RCD}, de ASIC, de BAS e de CAL foram preparados 40 provetes, cada um com uma massa compreendida entre 40 e 60 g, perfazendo deste modo, cada conjunto de dez provetes, um total variável entre 400 e 600 g. Os provetes de AB_{RCD}, e dos dois agregados naturais, foram preparados com uma forma subangular, enquanto os provetes de ASIC apresentavam uma forma mais arredondada, ainda que não totalmente esférica, por impossibilidade de os preparar com uma forma subangular, em resultado das características intrínsecas ao próprio material. A preparação dos provetes com formas subangular e arredondada, contrariamente ao indicado no método da ISRM, que preconiza uma forma aproximadamente esférica, teve como propósito incrementar a exposição dos provetes à ação mecânica durante a realização do ensaio de DMA.

Os 40 provetes foram distribuídos de igual forma pelos quatro tambores cilíndricos em aço inoxidável e, em seguida, o conjunto provetes+tambor foi montado em quatro reservatórios, dois deles previamente preenchidos com 2,5 l de água, e os restantes dois com 2,5 l de lixiviado. Os quatro tambores com os provetes foram, posteriormente, sujeitos aos três ciclos de desgaste oportunamente mencionados. Antes do início do ensaio e imediatamente após cada um dos três ciclos de desgaste, os provetes ensaiados foram secos em estufa a 105±2 °C durante 24 horas – h 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:

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

onde:

A – massa seca inicial de 10 provetes;

C – massa seca de 10 provetes após o segundo ciclo de desgaste;

D – massa do tambor.

Os resultados obtidos para I_{d2} correspondem à média dos valores de I_{d2} calculados em dois tambores, dado que no ensaio 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.

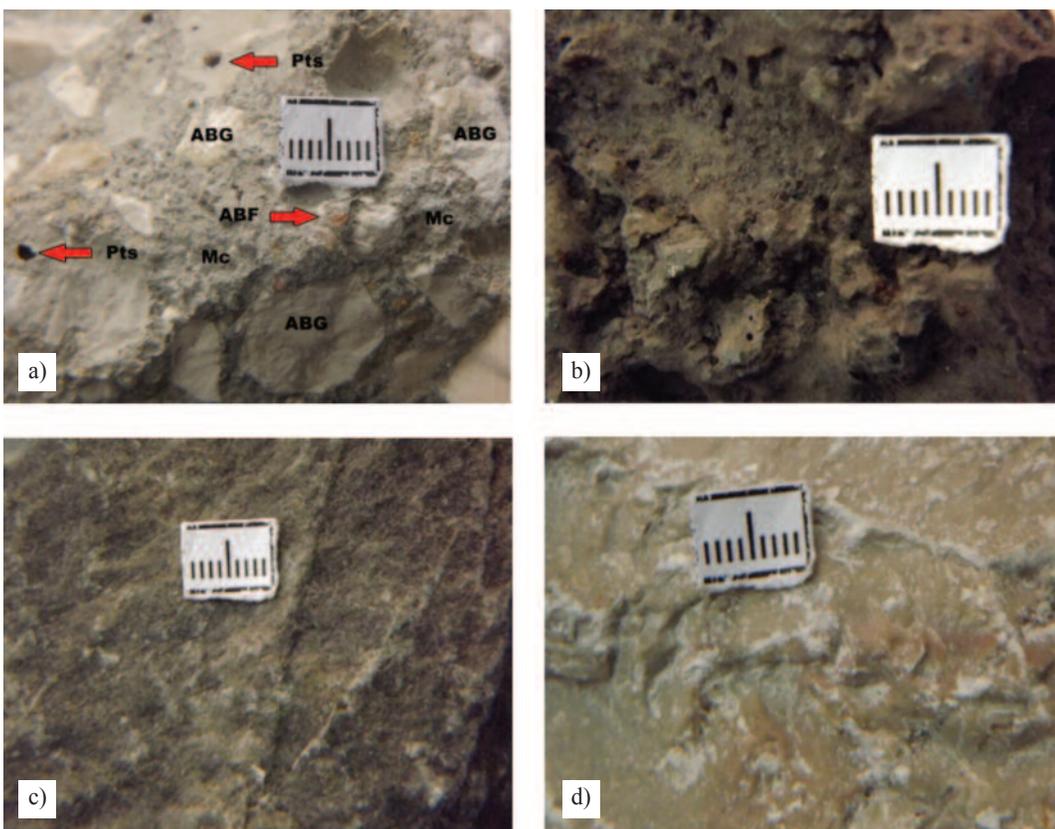
6 – RESULTADOS E ANÁLISE

6.1 – Análise petrográfica

A análise macroscópica realizada a provetes virgens dos quatro materiais permitiu observar que: (a) o AB_{RCD} é um material multifásico e heterogéneo, constituído por agregados naturais de duas dimensões, grossos e finos, envolvidos por uma matriz cimentícia, porosa (presença de alguns poros de dimensão ≤ 3 mm, dispersos de modo heterogéneo) e de cor cinzenta clara (figura 8a); (b) o ASIC é um material denso, de textura vesicular, superfície áspera e irregular, de cor negra, e que contém na sua composição pequenas partículas de ferro (figura 8b); (c) o BAS é uma rocha compacta, melanocrata, de textura afanítica (figura 8c); e (d) o CAL é uma rocha compacta a oolítica, de cor branca a amarelada e na qual são visíveis veios e nódulos esféricos de calcite (figura 8d). Nos provetes dos quatro materiais não se identificaram sinais de alteração.

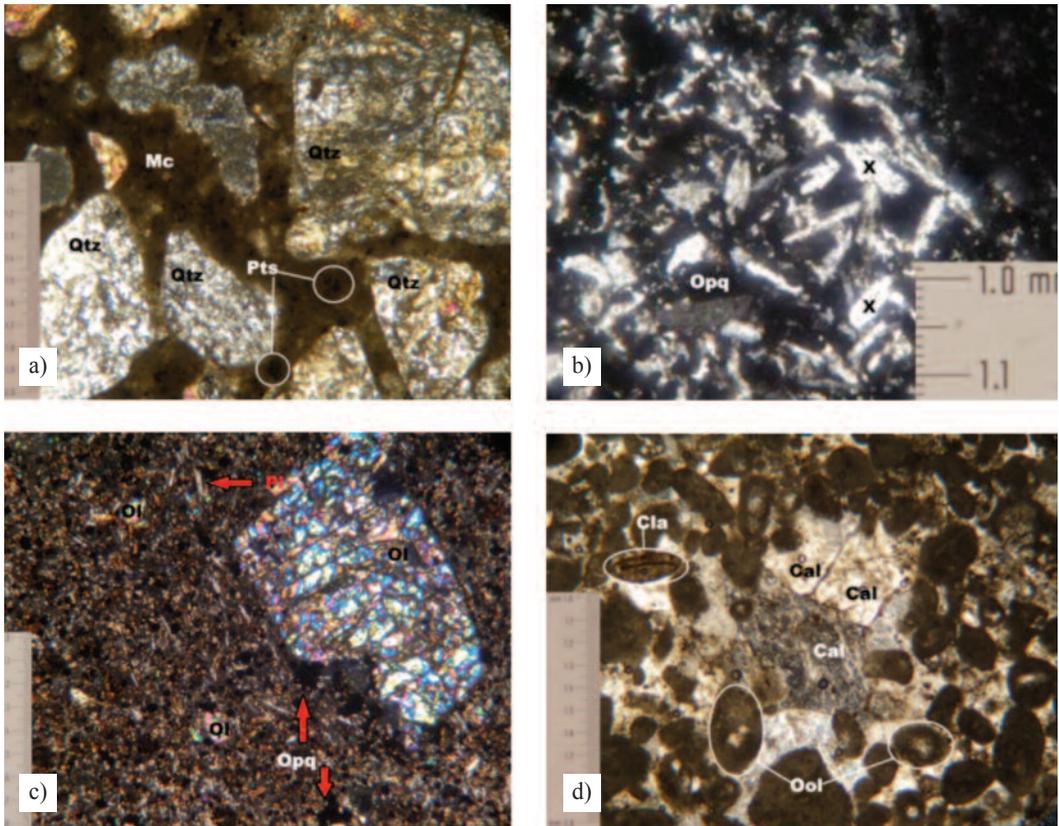
A análise microscópica das lâminas delgadas dos provetes virgens dos quatro materiais mostrou que: (a) o AB_{RCD} (figura 9a) é um material de estrutura complexa, composto: por uma

matriz cimentícia de cor castanha, na qual são identificados diversos pontos de cor preta distribuídos heterogeneamente, possivelmente associados a poros ou a zonas de ar aprisionado/incorporado; por agregados grossos e finos, com estes últimos a corresponderem a areias quartzíticas em resultado da presença de cristais de quartzo dispersos na matriz cimentícia; e por uma zona de transição que corresponde à interface matriz-agregados; (b) o ASIC (figura 9b) é um material de textura afanítica e de granulometria muito fina, composto por duas espécies minerais, minerais opacos e espécie mineral cuja natureza não se identificou ao microscópio petrográfico em virtude das suas características não se enquadrarem com as dos minerais comumente observados neste microscópio; (c) o BAS (figura 9c) é uma rocha hipocristalina, de textura porfírica e granulometria fina, constituída por duas fases de cristalização, uma matriz afanítica composta por plagioclase, piroxenas, olivina e minerais opacos e fenocristais de olivina; e (d) o CAL (figura 9d) é uma rocha que apresenta uma matriz composta por calcite e por elementos cimentados, óólitos e clastos. Nas lâminas delgadas dos quatro materiais não se identificaram sinais de alteração.



Legenda: agregado britado fino – ABF; agregado britado grosso – ABG; matriz cimentícia – Mc; poros – Pts. Escala gráfica: 1 centímetro – cm.

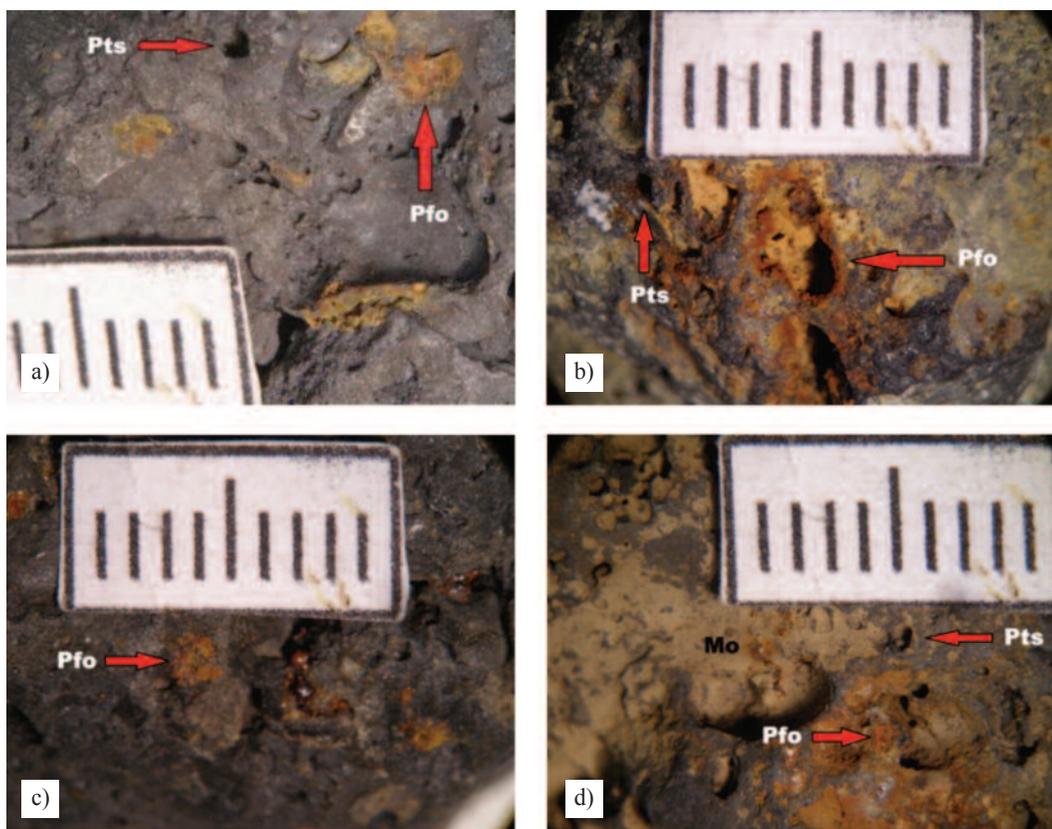
Fig. 8 – Aspeto macroscópico dos provetes: a) AB_{rcb}; b) ASIC; c) BAS; d) CAL.



Legenda: calcite – Cal; clastos – Cla; matriz cimentícia – Mc; olivina – Ol; oolitos – Ool; minerais opacos – Opq; plagioclase – Pl; poros – Pts; quartzo – Qtz; espécie mineral não identificada – X.

Fig. 9 – Microfotografias das lâminas delgadas: a) AB_{RCD} em nicóis cruzados – NX com uma ampliação de 50×; b) ASIC em NX com uma ampliação de 200×; c) BAS em NX com uma ampliação de 50×; d) CAL em NX com uma ampliação de 50×.

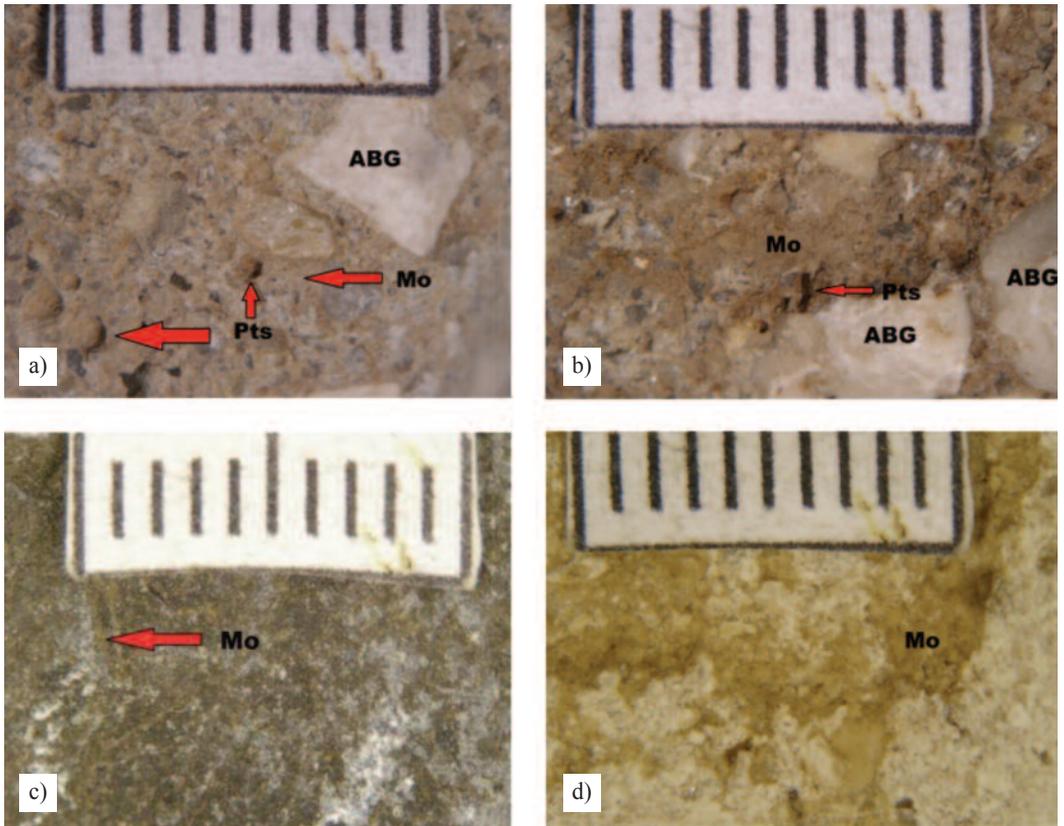
Da análise macropetrográfica realizada após os ensaios de DMA destacam-se os fenómenos de oxidação das partículas de ferro em todos os provetes de ASIC (figura 10) e dos minerais de olivina no provete $BAS_{DMA_1_A}$, bem como a deposição de matéria orgânica na superfície dos provetes dos quatro materiais ensaiados em lixiviado, em particular na matriz cimentícia dos provetes de AB_{RCD} (figura 11a e figura 11b), nos alvéolos dos provetes de ASIC e nos provetes $BAS_{DMA_1_L}$ (figura 11c) e $CAL_{DMA_1_L}$ (figura 11d).



Legenda: partícula de ferro oxidada – Pfo; poros – Pts; matéria orgânica – Mo. Escala gráfica: 1 cm.

Fig. 10 – Aspeto macroscópico dos provetes de ASIC: a) ASIC_DMA_A; b) ASIC_DMA₁_A; c) ASIC_DMA_L; d) ASIC_DMA₁_L.

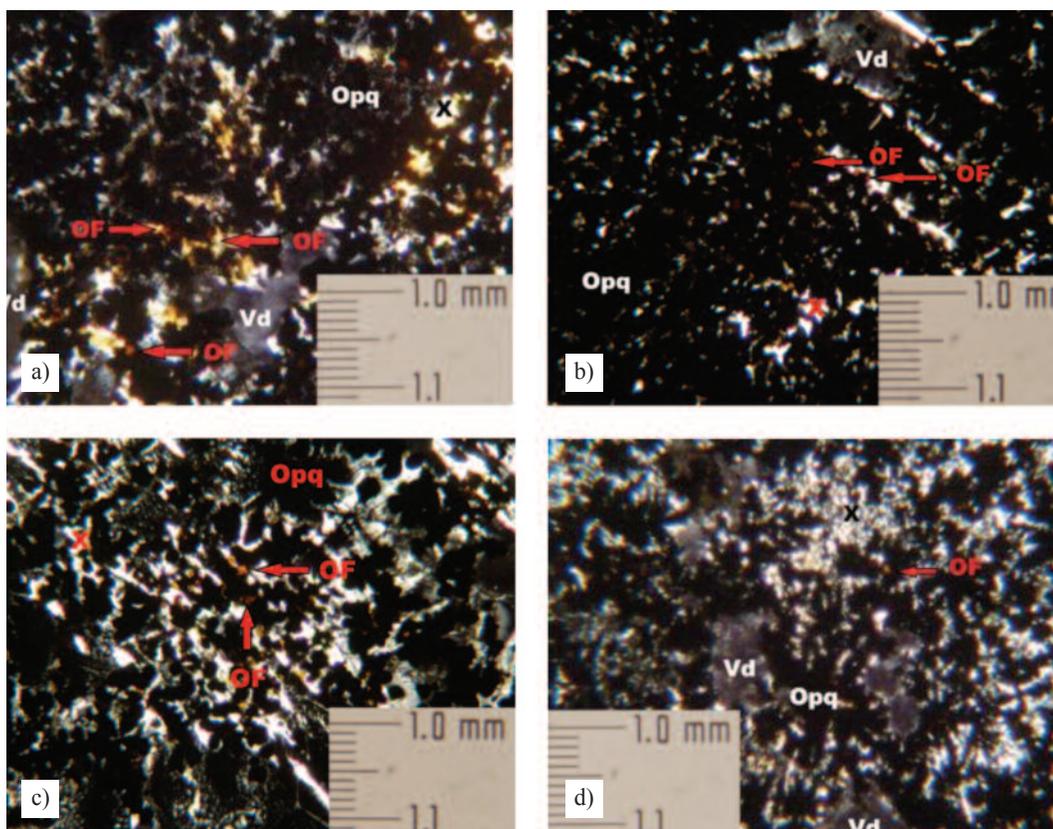
Da análise micropetrográfica efetuada após os ensaios de DMA observaram-se alterações em todos os provetes de ASIC, correspondentes a um aumento da concentração de minerais opacos e de óxidos de ferro (figura 12), e de BAS (figura 13), correspondentes a diferentes graus de alteração dos minerais de olivina. Em particular nos provetes BAS_DMA₁_A e BAS_DMA₁_L, os fenocristais de olivina apresentaram-se parcial ou totalmente alterados, em alguns casos com perda de massa.



Legenda: agregado britado grosso – ABG; poros – Pts; matéria orgânica – Mo. Escala gráfica: 1 cm.

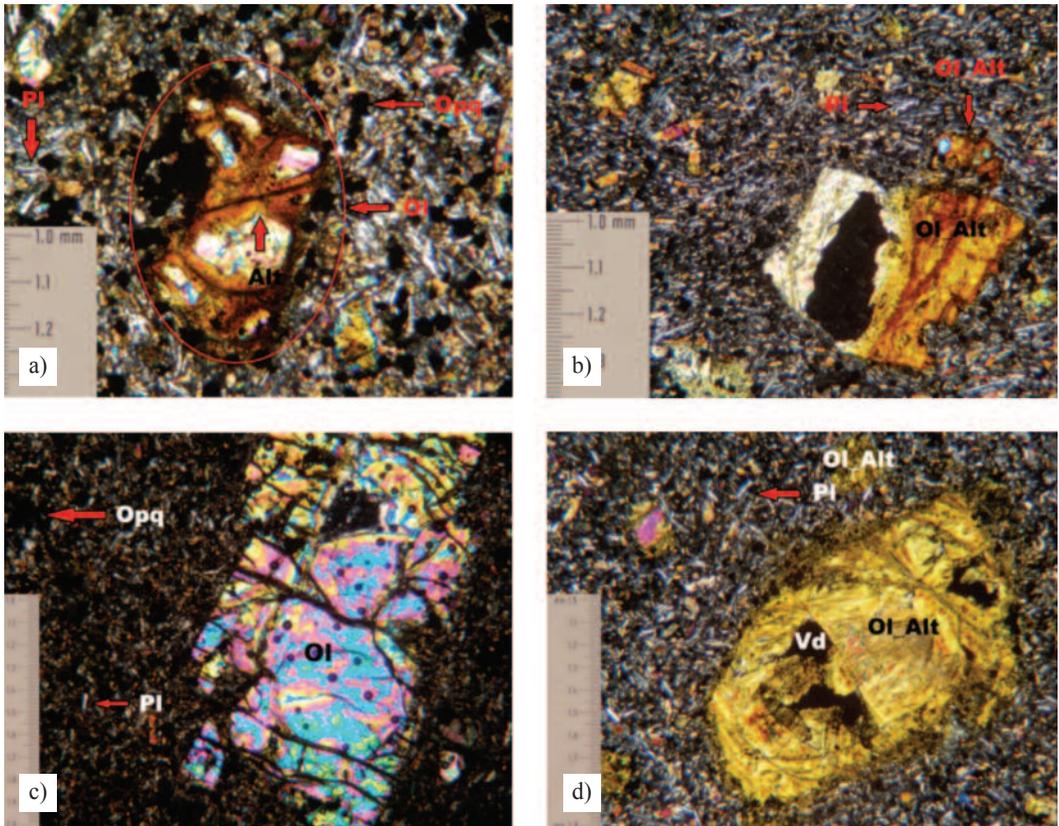
Fig. 11 – Aspeto macroscópico de alguns provetes ensaiados com lixiviado: a) AB_{RCD}_DMA_L; b) AB_{RCD}_DMAI_L; c) BAS_DMAI_L; d) CAL_DMAI_L.

As alterações observadas na análise petrográfica realizada após a execução dos ensaios de DMA não foram, contudo, suficientemente importantes para se refletirem na durabilidade dos quatro materiais estudados.



Legenda: óxidos de ferro – OF; minerais opacos – Opq; vidro da lâmina delgada – Vd; espécie mineral não identificada – X.

Fig. 12 – Microfotografias das lâminas delgadas dos provetes de ASIC: a) ASIC_DMA_A em NX com ampliação de 200×; b) ASIC_DMAI_A em NX com ampliação de 200×; c) ASIC_DMA_L em NX com ampliação de 200×; d) ASIC_DMA₁_L em NX com ampliação de 200×.



Legenda: sinais de alteração – Alt; olivina alterada – Ol_Alt; olivina – Ol; minerais opacos – Opq; plagioclase – Pl; vidro da lâmina delgada – Vd.

Fig. 13 – Microfotografias das lâminas delgadas dos provetes de BAS: a) BAS_DMA_A em NX com ampliação de 100×; b) BAS_DMAI_A em NX com ampliação de 100×; c) BAS_DMA_L em NX com ampliação de 50×; d) BAS_DMA₁_L em NX com ampliação de 50×.

6.2 – Caracterização física

O quadro 6 mostra os resultados obtidos para a M_{VR} , a M_{VA} , a P_e e o w_{max} nos provetes de AB_{RCD} , de ASIC, de BAS e de CAL, antes e após terem sido submetidos aos ensaios de DMA.

Da comparação entre os resultados registados na caracterização física do AB_{RCD} , do ASIC, do BAS e do CAL realizada antes da execução dos ensaios de DMA, ou seja nos materiais virgens, observa-se que o AB_{RCD} é o material 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 conclui-se que: a) o AB_{RCD} é 1,2 e 1,5 vezes menos denso que o BAS e o ASIC, respetivamente; b) o AB_{RCD} é 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 1,2 vezes mais denso e 27 vezes mais poroso que o BAS.

Quadro 6 – Resultados da caracterização física realizada com os quatro materiais em estudo.

Material	Provete	MVR (Mg/m ³)	MVA (Mg/m ³)	Pe (%)	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} _DMAI_A	2,65	2,24	15,27	6,82
	AB _{RCD} _DMAI_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_DMAI_A	3,77	3,28	12,32	3,77
	ASIC_DMAI_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 ₁ _A	3,04	3,02	0,45	0,15
	BAS_DMA ₁ _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 ₁ _A	2,72	2,59	4,70	1,82
	CAL_DMA ₁ _L	2,72	2,56	5,99	2,38

A comparação dos resultados obtidos para a M_{VR} , a M_{VA} e o w_{max} nos provetes virgens de AB_{RCD} com os apresentados em LNEC E 227 (2008) mostra tratarem-se de valores da mesma ordem de grandeza. De acordo com este estudo, em agregados de betão britado com granulometria compreendida entre 31,5 e 63,0 mm, os valores obtidos para a M_{VR} e a M_{VA} são respetivamente, 2,60 Mg/m³ e 2,37 Mg/m³, e para o w_{max} , 6,7%. Para esta última propriedade, refira-se, igualmente, Katz (2003 e Rao, 2005, *in* Rao *et al.*, 2007) e Gómez-Soberón (2002, *in* Martín-Morales *et al.*, 2011), que apontam para um intervalo de valores compreendidos entre 3,0 e 12,0%, para diferentes frações granulométricas de agregados de betão britado. Os valores obtidos para a P_e enquadram-se também nos dados apresentados pela bibliografia consultada. No caso do estudo de Tam *et al.* (2008), que para avaliar a P_e de 10 amostras de agregados de betão britado de dimensões inferiores a 20 mm recorreu ao método de intrusão de mercúrio, obtiveram-se valores compreendidos entre 13,94 e 20,41%.

Em relação ao ASIC, o estudo desenvolvido por Ferreira (2010), que procedeu à caracterização de escórias de aciaria de FAE processadas recolhidas também na SN do Seixal, refere para valores de M_{VR} , de M_{VA} e de w_{max} , respetivamente, 3,31 Mg/m³, 2,94 Mg/m³ e 3,87%, em ensaios

realizados segundo a norma NP 581 (1969 *in* Ferreira, 2010), ou seja, da mesma ordem de grandeza dos obtidos neste estudo. No que respeita ao valor de P_e obtido nos provetes de ASIC antes da realização dos ensaios de DMA, 12,40%, este é cerca de 2 vezes superior ao valor (6,00%) apresentado por Wu *et al.* (2007), e cerca de 3 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 da escória é influenciada pelo tipo de processamento adotado (Pasetto e Baldo, 2010) e, por outro, que a textura vesicular da escória, materializada pela maior ou menor percentagem de alvéolos presentes na superfície do provete e pela configuração dos mesmos, aliada ao método utilizado para a determinação da P_e , podem influenciar os valores obtidos (Rodrigues, 2012), devendo-se analisar, por isso, os resultados com algumas reservas.

No que respeita aos resultados obtidos com os dois agregados naturais virgens (quadro 6), verifica-se que são comparáveis com os obtidos por Gupta e Rao (2000), Moon e Jayawardane (2004) e Tugrul (2004) para o BAS, e com os obtidos por Gupta e Ahmed (2007) para o CAL.

Comparando agora os resultados registados para as características físicas do AB_{RCD} , do ASIC, do BAS e do CAL, antes e após a execução dos ensaios de DMA, verifica-se que, de um modo geral, a utilização dos dois meios aquosos, água e lixiviado, o prolongamento das ações mecânicas (ciclo de desgaste adicional de 600 rotações em relação ao recomendado pelo método da ISRM) e a sujeição dos materiais a condições químicas mais agressivas (acidificação do lixiviado para pH 5,5) e mais prolongadas (imersão prévia dos provetes durante 15 dias), não se traduziu em alterações quantitativamente importantes. A exceção está associada à P_e e ao w_{max} nos provetes $AB_{RCD_DMA_L}$ e $AB_{RCD_DMA_1_L}$. Entre estes e o provete virgem AB_{RCD} , a diferença percentual foi de 3,3% no caso da P_e , e de 2,0% 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.

O fenómeno de deposição de matéria orgânica verificou-se em todos os provetes dos quatro materiais estudados, mas sobretudo nos que foram imersos antes de submetidos aos ensaios de DMA. Porém, a expressão quantitativa da sua deposição apenas se verificou nos provetes de AB_{RCD} identificados no parágrafo anterior. Em relação aos dois agregados naturais, a diferença de comportamento explica-se pela maior porosidade superficial no AB_{RCD} que no BAS e no CAL, enquanto em relação ao ASIC, deverá estar preferencialmente relacionada com a heterogeneidade textural da superfície dos provetes deste último, que pode mascarar o efeito da deposição da matéria orgânica.

6.3 – Durabilidade

Os resultados obtidos nos ensaios de DMA realizados nos dois meios aquosos, água e lixiviado, sem e após imersão prévia dos provetes, são apresentados no quadro 7. A classificação da durabilidade dos materiais em estudo foi definida com base na classificação proposta por Gamble (Gamble, 1971), mostrada no quadro 8.

Os valores de I_{d1} , de I_{d2} e de I_{d5} do AB_{RCD} , do ASIC, do BAS e do CAL obtidos em todos os ensaios de DMA foram superiores a 95%, pelo que, considerando a classificação apresentada no quadro 8 para cada I_{ds} , se conclui que os quatro materiais estudados enquadram-se na categoria de materiais de durabilidade muito elevada. Os resultados evidenciam, também para esta propriedade, que o prolongamento das ações mecânicas e a sujeição dos materiais a condições químicas mais agressivas e prolongadas, não contribuíram para alterar a classificação dos materiais ensaiados quanto à sua durabilidade pela classificação proposta por Gamble.

Ainda que a durabilidade verificada nos quatro materiais ensaiados tenha sido muito elevada, é viável a sua ordenação. Deste modo, tomando por referência os valores obtidos para I_{d5} , a durabilidade dos quatro materiais assume a seguinte ordem crescente: $AB_{RCD} < ASIC \cong CAL < BAS$. A

maior diferença percentual entre os valores obtidos para I_{d5} foi de 2,9%, e verifica-se entre os provetes AB_{RCD}_DMA₁_L e BAS_DMA_L. Em termos de massa de material perdida, este valor percentual corresponde à perda de 1,4 g.

Quadro 7 – Resultados dos ensaios de DMA realizados com os quatro materiais.

Material	Provete	I_d	Valor	Material	Provete	I_d	Valor
Agregado reciclado	AB _{RCD} _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 _{RCD} _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 _{RCD} _DMA ₁ _A	I_{d1}	99,5%		BAS_DMA ₁ _A	I_{d1}	99,9%
		I_{d2}	99,1%			I_{d2}	99,7%
		I_{d5}	97,7%			I_{d5}	99,5%
	AB _{RCD} _DMA ₁ _L	I_{d1}	99,3%		BAS_DMA ₁ _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 ₁ _A	I_{d1}	99,7%		CAL_DMA ₁ _A	I_{d1}	99,7%
		I_{d2}	99,4%			I_{d2}	99,4%
		I_{d5}	98,9%			I_{d5}	98,6%
	ASIC_DMA ₁ _L	I_{d1}	99,6%		CAL_DMA ₁ _L	I_{d1}	99,8%
		I_{d2}	99,4%			I_{d2}	99,6%
		I_{d5}	98,9%			I_{d5}	99,0%

A análise comparativa dos resultados obtidos para os agregados reciclados ensaiados com outros, não foi possível em virtude de não terem sido referenciados, na bibliografia nacional e internacional consultada, estudos idênticos para os agregados reciclados, em geral, e para o betão britado de RCD e as escórias de aciaria de FAE processadas, em particular. Por esta razão, comparam-se os resultados obtidos com dados publicados na bibliografia para agregados naturais, sumariados no quadro 9, de litologia idêntica à dos utilizados no estudo apresentado.

Quadro 8 – Classificação da durabilidade dos materiais rochosos segundo Gamble.

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

Observa-se que Delgado Rodrigues (1986), Conde *et al.* (2004) e Sharma e Singh (2008) obtiveram valores de I_d da mesma ordem de grandeza dos registados para os dois agregados reciclados, o AB_{RCD} e o ASIC, e para os dois agregados naturais, o BAS e o CAL.

Quadro 9 – Durabilidade de agregados naturais com litologia idêntica aos estudados.

Material	Autor	I_d (%)	Valor
Calcário	Delgado Rodrigues (1986)	I_{d2}	99,3 - 99,7
		I_{d6}	96,7 - 98,8
	Jeremias (2000) ^a	I_{d2}	74,5
		I_{d5}	62,4
	Conde <i>et al.</i> (2004)	I_{d2}	98,3 - 99,4
	Kolay e Kayabali (2006) ^b	I_{d1}	96,6 - 98,7 (AR)
			87,6 - 97,0 (SA)
			85,3 - 98,6 (AN)
		I_{d2}	91,4 - 96,3 (AR)
			84,2 - 92,0 (SA)
			82,2 - 94,8 (AN)
		I_{d3}	86,9 - 95,6 (AR)
			81,7 - 90,9 (SA)
			79,6 - 94,3 (AN)
		I_{d4}	84,4 - 93,9 (AR)
79,6 - 87,1 (SA)			
77,6 - 91,9 (AN)			
Basalto	Sharma e Singh (2008)	I_{d2}	97,0 - 98,9

Legenda: (a) calcário oolítico; (b) calcário argiloso; (AR) forma arredondada; (SA) forma subangular; (AN) forma angular

Considerando apenas o comportamento dos provetes de CAL nos ensaios de DMA realizados, não se justificaria a interdição de utilização de brita de origem calcária na camada de drenagem e recolha dos lixiviados dos aterros de resíduos prevista no DL n° 183/2009 (2009). Esta conclusão deve, contudo, ser fundamentada com estudos complementares ao presente, de modo a despistar sobre a possibilidade de ocorrência de fenómenos de dissolução em material calcário. Importa referir, no entanto, que os fatores naturais intervenientes na sua ocorrência são diferentes dos existentes na camada de drenagem e recolha dos lixiviados, em particular o tempo de duração dos processos de dissolução e carsificação, que na natureza é contabilizado numa escala de tempo geológica.

7 – CONCLUSÕES

A investigação apresentada neste artigo teve por principal objetivo avaliar a viabilidade técnica da aplicação de dois agregados reciclados, o AB_{RCD} e o ASIC, na construção da camada de drenagem e recolha de lixiviados do sistema de proteção basal ativo existente nos aterros de resíduos.

Os resultados obtidos indicam que os dois agregados reciclados, o AB_{RCD} e o ASIC, bem como os dois agregados naturais, o BAS e o CAL, utilizados no presente estudo como materiais de referência, pertencem à categoria de materiais de durabilidade muito elevada, considerando a classificação proposta por Gamble, mesmo nos casos em que os quatro materiais foram submetidos a condições químicas e mecânicas mais agressivas do que as previstas no ensaio de DMA recomendado pela ISRM (designadamente, a realização do ensaio de DMA com um lixiviado, acidificado de pH 7,6, aquando da sua recolha no aterro de RSU, para um pH 5,5; e o prolongamento do ensaio por mais 30 min, ou seja, 600 rotações). Demonstram ainda que a imersão dos materiais em água e no lixiviado durante 15 dias, precedendo a realização do ensaio de DMA, não teve 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 quatro materiais, dado não se terem verificado alterações significativas nas suas propriedades petrográficas e físicas iniciais.

Numa perspetiva de durabilidade e para as condições de ensaio adotadas, conclui-se, assim, que os agregados reciclados e naturais estudados podem ser aplicados na construção da camada de drenagem e recolha dos lixiviados dos aterros de resíduos, bem como noutras obras geotécnicas e em infraestruturas de transporte.

Considera-se, no entanto, necessária a continuação dos estudos para avaliar a durabilidade dos materiais a temperaturas mais elevadas (similares às que ocorrem na base dos aterros de resíduos), bem como o seu comportamento hidráulico. Em relação ao CAL, os estudos adicionais devem ter igualmente em consideração a possibilidade de ocorrência dos fenómenos de dissolução do material, na perspetiva de se avaliar a viabilidade técnica da sua utilização na camada de drenagem e recolha dos lixiviados, que não é permitida pela legislação em vigor no país.

8 – 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., Agregpor, S.A., e Amarsul – Valorização e Tratamento de Resíduos Sólidos, S.A., pelo fornecimento dos materiais utilizados no estudo. Agradecem igualmente ao Doutor Joaquim Simão, do Departamento de Ciências da Terra/CICEGe da FCT/UNL, pelo apoio dado na análise petrográfica dos agregados estudados.

9 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASTM C 856 (2011). *Standard practice for petrographic examination of hardened concrete*. Annual Book of ASTM Standards 2012, ASTM, Philadelphia, USA, vol. 04.02.
- ASTM D 4687 (1995). *Standard guide for general planning of waste sampling*. Annual Book of ASTM Standards 2012, ASTM, Philadelphia, USA, vol. 11.04.
- Conde, M.C.; Dinis da Gama, C.; Lopes, M.G. (2004). *Correlação entre o comportamento mecânico de agregados e das rochas originais*. Atas do 9º Congresso Nacional de Geotecnia, Aveiro, Universidade de Aveiro e Sociedade Portuguesa de Geotecnia, Aveiro, vol. 1, pp. 141-150.
- 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 Universitat 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, LNEC, Lisboa, 45 p.
- Diretiva 75/442/CEE (1975). *Relativa aos resíduos*. Jornal Oficial das Comunidades Europeias, Bruxelas. OJ L 194, 1975-07-25, 15/Fasc. 01, pp. 129-131.
- DL 488/85 (1985). *Estabelece normas sobre os resíduos sólidos*. Diário da República Portuguesa, Imprensa Nacional Casa da Moeda, Lisboa. 1ª Série, nº 271 (1985-11-25), pp. 3905-3907.
- DL 178/2006 (2006). *Estabelece o regime geral da gestão de resíduos*. Diário da República Portuguesa, Imprensa Nacional Casa da Moeda, Lisboa. 1ª Série, nº 171 (2006-09-05), pp. 6526-6545.
- DL 46/2008 (2008). Estabelece o regime das operações de gestão de resíduos resultantes de obras ou demolições de edifícios ou de derrocadas, compreendendo a sua prevenção e reutilização e as suas operações de recolhas, transporte, armazenagem, triagem, tratamento, valorização e eliminação. Diário da República Portuguesa, Imprensa Nacional Casa da Moeda, Lisboa. 1ª Série, nº 51 (2008-03-12), pp. 1567-1574.
- 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.
- 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.
- EN 12407 (2007). *Natural stone test methods – Petrographic examination*. CEN, 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.
- Fortunato, E.; Lopes, M.L.; Curto, P.; Fonseca, A. (2009). *Valorização dos resíduos de construção e demolição em obras geotécnicas*. Seminário sobre Valorização de Resíduos em Obras Geotécnicas, Universidade de Aveiro e Sociedade Portuguesa de Geotecnia, Aveiro.

- Freire, A.C. (2011). *Enquadramento dos RCD*. Curso FUNDEC-LNEC: Utilização de agregados reciclados em infraestruturas de transporte, 2ª edição, Instituto Superior Técnico da Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa [em CD-ROM].
- Gamble, J.C. (1971). *Durability-plasticity classification of shales and other argillaceous rock*. PhD Thesis, University of Illinois, Chicago, USA, 322 p.
- Gomes Correia, A.; Roque, A.J.; Ferreira, S.M.R.; Fortunato, E. (2012). *Case study to promote the use of industrial byproducts: the relevance of performance tests*. Journal of ASTM International, vol. 9, nº 2, pp. 1-18.
- Gupta, A.S.; Rao, K.S. (2000). *Weathering effects on the strength and deformational behaviour of crystalline rocks under uniaxial compression state*. Engineering Geology, vol. 56, nº 3-4, pp. 257-274.
- 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, vol. 95, nº 3-4, pp. 79-87.
- ISRM (1977). *Suggested method for determination of the slake-durability index – Part 2*. 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*. PhD Thesis, University of Sheffield, Sheffield, UK, 464 p.
- Kolay, E.; Kayabali, K. (2006). *Investigation of the effect of aggregate shape and surface roughness on the slake durability index using the fractal dimension approach*. Engineering Geology, vol. 86, nº 4, pp. 271-284.
- LERO-PE01 (1993). *Ensaio de determinação da porosidade acessível à água, das massas volumicas e do teor máximo em água de absorção*. LNEC, Lisboa.
- LNEC E 227 (2008). *Caracterização de agregados reciclados de acordo com o Normativo Europeu prEN 933-11*. Especificação LNEC, Lisboa.
- LNEC E 471 (2009). *Guia para a utilização de agregados reciclados grossos em betões de ligantes hidráulicos*. Especificação LNEC, Lisboa.
- LNEC E 473 (2009). *Guia para a utilização de agregados reciclados em camadas não ligadas de pavimentos*. Especificação LNEC, Lisboa.
- LNEC E 474 (2009). *Guia para a utilização de materiais reciclados provenientes de resíduos de construção e demolição em aterro e camada de leito de infraestruturas de transporte*. Especificação LNEC, Lisboa.
- Lourenço, C. (2007). *Otimização de sistemas de demolição – Demolição seletiva*. Dissertação de Mestrado, Instituto Superior Técnico da Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa. 112 p.
- Martín-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, vol. 25, nº 2, pp. 742-748.
- Moon, V.; Jayawardane, J. (2004). *Geomechanical and geochemical changes during early stages of weathering of Karamu basalt, New Zealand*. Engineering Geology, vol. 74, nº 1-2, pp. 57-72.

- NP EN 932-3 (2010). *Ensaaios das propriedades gerais dos agregados. Parte 3: Método e terminologia para a descrição petrográfica simplificada*. Instituto Português da Qualidade, Caparica.
- Pasetto, M.; 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, nº 1-3, pp. 938-948.
- Rao, A.; Jha, K.N.; Misra, S. (2007). *Use of aggregates from recycled construction and demolition waste in concrete*. Resources, Conservation and Recycling, vol. 50, nº 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.
- Roque, A.J.; Gomes Correia, A.; Fortunato, E.; Pardo de Santayana, F.; Castro, F.; Ferreira, S.; Trigo, L. (2006). *A geotecnia na valorização de agregados siderúrgicos inertes reciclados – Um projecto nacional*. Atas do 12º Encontro Nacional de Saneamento Básico, APESB, Cascais, 16 p (CD-ROM).
- Roque, A.J. (2010). *O contributo da CT-VROG/SPG para a valorização de resíduos em obras geotécnicas*. Atas do 12º Congresso Nacional de Geotecnia, Universidade do Minho e SPG, Guimarães, pp. 2089-2098 (CD-ROM).
- Roque, A.J.; Castro, F.; Gomes Correia, A.; Silva, S.; Cavalheiro, A. (2010). *Laboratory and field leaching tests for predicting the environmental impact of Portuguese steel slag*. Proceedings of the 6th International Congress on Environmental Geotechnics, ISSMGE, New Delhi, India, vol. 2, pp. 1166-1171.
- 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, vol. 67, nº 1, pp. 17-22.
- Tam, V.W.Y.; Wang, K.; Tam, C.M. (2008). *Assessing relationships among properties of demolished concrete, recycled aggregate and recycled aggregate concrete using regression analysis*. Journal of Hazardous Materials, vol. 152, nº 2, pp. 703-714.
- TR 15310 (2006). *Characterization of waste: Sampling of waste materials – Part 1-5*. CEN. Brussels, Belgium.
- Tugrul, A. (2004). *The effect of weathering on pore geometry and compressive strength of selected rock types from Turkey*. Engineering Geology, vol. 75, nº 3-4, pp. 215-227.
- Wu, S.; Xue, Y.; Ye, Q.; Chen, Y. (2007). *Utilization of steel slag as aggregates for stone mastic asphalt (SMA) mixtures*. Building and Environment, vol. 42, nº 7, pp. 2580-2585.