

RECICLAGEM DE ASIC E RCD NA CONSTRUÇÃO DA CAMADA DE DRENAGEM E RECOLHA DOS LIXIVIADOS DOS ÁTERROS DE RESÍDUOS

RECYCLING OF ASIC AND RCD IN THE CONSTRUCTION OF THE LEACHATE COLLECTION AND REMOVAL LAYER OF LANDFILLS

Rodrigues, Gonçalo Manuel; *LNEC e FCT-UNL, Lisboa, Portugal, grodrigues@lnec.pt*

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

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

RESUMO

A reciclagem de resíduos representa uma importante vantagem ambiental e económica. Neste contexto, pretende-se avaliar a viabilidade técnica da aplicação das escórias de aciaria de forno de arco elétrico, produzidas e processadas nas instalações da Siderurgia Nacional, designadas por agregado siderúrgico inerte para a construção (ASIC) e dos resíduos de construção e demolição (RCD), na construção da camada de drenagem e recolha dos lixiviados do sistema de confinamento basal dos aterros de resíduos. Na comunicação apresentam-se e analisam-se os resultados do estudo da suscetibilidade à degradação dos dois agregados reciclados em contacto com um lixiviado recolhido num aterro de resíduos sólidos urbanos, acidificado em laboratório com ácido clorídrico até se atingir um valor de pH igual a 5,50 (valor do pH no momento da recolha igual a 7,60). Conclui-se com a avaliação preliminar da viabilidade técnica da utilização dos dois materiais na construção da camada de drenagem e recolha dos lixiviados.

ABSTRACT

Waste recycling is an important environmental and economic advantage. In this context, one intends to evaluate the technical feasibility of applying electrical arc furnace steel slag produced in Portugal by the Iron and Steel Company, known as inert steel aggregates for construction (ASIC), and of construction and demolition waste, in the construction of the leachate collection and removal layer of the bottom landfill containment system. This paper presents and discusses the results of the study of durability of both materials in contact with a leachate collected in a landfill of municipal solid waste, acidified in laboratory with hydrochloric acid from an initial pH of 7.60 to a final pH of 5.50. The paper concludes with a preliminary evaluation of the technical feasibility of the usage of both materials in the construction of the leachate collection and removal layer.

1 - INTRODUÇÃO

O grande volume de resíduos produzidos nas mais diversas atividades domésticas, agrícolas, comerciais e industriais e a falta de medidas para promover a sua valorização, contribuem, em certa medida, para o atual estado de degradação do meio ambiente, panorama que a sociedade atual pretende inverter no âmbito da prossecução de um desenvolvimento sustentado.

A Diretiva nº 75/442/CEE, de 15 de julho, foi um marco na aproximação das diferentes legislações nacionais dos vários Estados Membros que à data integravam a União Europeia, ao ter como objetivos a proteção do homem e do meio ambiente e favorecer a recuperação dos resíduos e a utilização dos materiais reciclados (Freire, 2011).

Em Portugal, o quadro jurídico da gestão dos resíduos foi pela primeira vez estabelecido em 1985, com a publicação do Decreto-Lei (DL) nº 488/85, de 25 de novembro (Fortunato et al., 2009). O enquadramento legal mais recente em matéria de gestão de resíduos foi publicado no DL nº 73/2011, de 17 de junho, que transpõe a Diretiva nº 2008/98/EC, do Parlamento Europeu e do Conselho, de 19 de novembro, relativa aos resíduos. De entre as alterações introduzidas por este diploma ao regime geral da gestão dos resíduos, importa mencionar a prioridade ao fomento da reutilização e da reciclagem dos resíduos com vista a prolongar o seu uso na economia. Em conformidade com este objetivo, prevê-se a utilização de pelo menos 5% de materiais reciclados em empreitadas de obras públicas e estabelecem-se quer requisitos para que substâncias ou objetos resultantes de um processo produtivo possam ser considerados subprodutos e não resíduos, quer critérios para que determinados resíduos deixem de ter o estatuto de resíduo.

No caso dos resíduos de construção e demolição (RCD), um dos materiais estudados pelos autores, cuja produção anual é muito significativa a nível nacional, estimada em cerca de 7,5 milhões de toneladas por ano, foi igualmente publicado um diploma, o DL nº 46/2008, de 12 de março, que passou a regulamentar este material. No âmbito deste diploma foram publicadas quatro especificações LNEC tendo em vista a

reciclagem dos RCD em betões de ligantes hidráulicos (LNEC E 471 – 2009), de misturas betuminosas a quente em central (LNEC E 472 – 2009), dos RCD em camadas não ligadas de pavimentos (LNEC E 473 – 2009) e em aterro e camada de leito de infraestruturas de transporte (LNEC E 474 – 2009).

Na ausência de legislação específica para a classificação da perigosidade ambiental dos resíduos em obras de engenharia civil, a sua reciclagem vem sendo permitida desde que pertencentes à categoria dos resíduos admissíveis em aterros para resíduos inertes, em acordo com os requisitos mínimos previstos no DL nº 183/2009, de 10 de agosto, por se admitir que verificadas estas condições não existe risco para o meio ambiente e para a saúde pública. As especificações LNEC para os RCD preveem um controlo ambiental destes materiais, segundo os requisitos do diploma aqui indicado, com a frequência mínima de duas vezes por ano. No que se refere ao agregado siderúrgico inerte para a construção (ASIC), que resulta do processamento das escórias de aciaria de forno de arco elétrico produzidas pela Siderurgia Nacional (SN) e é o segundo agregado reciclado abordado nesta comunicação, os estudos já realizados por Roque et al. (2010) mostraram tratar-se de um resíduo admissível em aterros para resíduos inertes. Tal como os RCD, o ASIC também deve ser controlado ambientalmente, no mínimo com a mesma periodicidade especificada para os RCD. No âmbito do estudo que avaliou a perigosidade ambiental do ASIC também foi evidenciada a sua adequabilidade mecânica para a construção de camadas não ligadas de pavimentos e de aterros estruturais de infraestruturas de transporte (Gomes Correia et al., 2012).

A durabilidade dos resíduos é fundamental para garantir o adequado funcionamento das obras ao longo do seu tempo de vida útil, à semelhança do já observado com a utilização dos materiais naturais. Contudo, na bibliografia consultada pelos autores não foram referenciados estudos sobre a durabilidade dos resíduos em geral, e do ASIC e dos RCD em particular, explicável pelo facto da utilização dos agregados reciclados em obra ainda ser uma aplicação relativamente recente, contrariamente ao verificado com os materiais naturais. Entendeu-se, por isso, do maior interesse iniciar o estudo da durabilidade dos agregados reciclados, para os quais se perspetiva uma crescente utilização em engenharia civil.

O elevado volume de material que pode ser reciclado na construção da camada de drenagem e recolha de lixiviados do sistema de confinamento basal dos aterros de resíduos, e o número de aterros de resíduos que vão continuar a ser construídos ou ampliados, justificam o estudo da durabilidade do ASIC e dos RCD aos lixiviados. O lixiviado utilizado neste estudo foi recolhido no aterro de resíduos sólidos urbanos da Amarsul, S.A., no Seixal, e posteriormente acidificado em laboratório com ácido clorídrico até se atingir um valor de pH igual a 5,50 (valor do pH no momento da recolha igual a 7,60). Com a acidificação pretendeu-se criar condições químicas mais agressivas do que as habitualmente encontradas nos aterros de resíduos. Para além desta solução aquosa, foi igualmente utilizada água, com estes dois objetivos: a) servir de referência aos resultados obtidos com o lixiviado e aos valores apresentados na bibliografia para os materiais naturais; e b) avaliar a durabilidade dos dois agregados reciclados 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.

O estudo da durabilidade do ASIC e de um betão britado processado a partir de RCD (AB_{RCD}) pela empresa Demotri, S.A., às duas soluções aquosas acima indicadas, 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). Em complemento aos ensaios de DMA, procedeu-se à análise petrográfica (macro- e microscópica) e à caracterização física (massa volúmica, adsorção à água e porosidade) dos dois resíduos, antes e após a realização daqueles ensaios. Dada a já mencionada falta de estudos sobre a durabilidade dos resíduos, os resultados obtidos são comparados com valores publicados na bibliografia para os materiais naturais. Esta comparação tem, porém, a grande vantagem de se conhecer o comportamento dos materiais naturais em obra classificados com base no ensaio de DMA. Finalmente, são apresentadas as principais conclusões sobre a adequabilidade dos materiais ensaiados para a construção de obras geotécnicas e infraestruturas de transporte, em particular da camada de drenagem e recolha dos lixiviados.

2 - PROGRAMA EXPERIMENTAL

Os ensaios de DMA foram realizados colocando o ASIC e o AB_{RCD} em contacto com o lixiviado e com água da rede de abastecimento público.

Num primeiro conjunto de ensaios de DMA seguiu-se o procedimento recomendado pelo *Suggested method for determination of the slake-durability index* (ISRM, 1977). No segundo conjunto, os provetes foram previamente imersos nas duas soluções aquosas oportunamente mencionadas, por um período de 15 dias. Em ambos os conjuntos, para além dos dois ciclos de desgaste de 10 min, com velocidade constante de 20 rotações por minuto (rpm), conforme recomendado pelo método, efetuou-se um terceiro ciclo de desgaste com 600 rotações, com o principal objetivo de submeter o material a um período de desgaste mecânico mais prolongado.

O Quadro 1 resume os ensaios de DMA efetuados e mostra a identificação adotada para os provetes nos dois conjuntos ensaiados, em ambas as soluções aquosas.

Quadro 1 – Resumo dos ensaios de desgaste em meio aquoso (DMA)

Ensaio		Proвете
Sem imersão (I) antes do DMA	Água (A)	ASIC_DMA_A AB _{RCD} _DMA_A
	Lixiviado (L)	ASIC_DMA_L AB _{RCD} _DMA_L
Com imersão (I) de 15 dias antes do DMA	Água (A)	ASIC_DMA _T _A AB _{RCD} _DMA _T _A
	Lixiviado (L)	ASIC_DMA _T _L AB _{RCD} _DMA _T _L

Em complemento aos ensaios de DMA, procedeu-se à análise macro- e micropetrográfica e à caracterização física (massa volúmica, porosidade e absorção de água) dos provetes, antes e após a realização dos respetivos ensaios de DMA.

3 - MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 - Materiais

3.1.1 - Agregado siderúrgico inerte para a construção (ASIC)

A amostra de ASIC utilizada no presente estudo tem origem, como já foi referido, no processamento das escórias de aciaria de forno de arco elétrico produzidas na SN do Seixal. Os procedimentos adotados pela SN para processar o ASIC são apresentados em Roque et al. (2006).

A Figura 1a) ilustra uma das pilhas de ASIC existente no parque de armazenamento da SN e a Figura 1b) uma fase do processo de amostragem manual do agregado.

O processo de amostragem do ASIC nas instalações da SN decorreu de forma empírica, por se ter considerado que a qualidade e a representatividade da amostra não era prejudicada por não se seguir a totalidade das recomendações propostas em documentos técnicos, em particular, os relatórios técnicos CEN/TR 15310 (2006). Os principais parâmetros que contribuíram para seguir a metodologia adotada 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.

Em complemento ao processo de amostragem, foi elaborada uma folha de registo adaptada de ASTM D4687 (1995), que se apresenta no Quadro 2.



Figura 1 – Amostragem do ASIC: a) pilha existente no parque de armazenamento da SN do Seixal; b) recolha da amostra

Quadro 2 – Registo do processo de amostragem do ASIC

Nome da empresa	Siderurgia Nacional, S.A.	Data da amostragem	30/03/2011
Localização da empresa	Freguesia da Aldeia de Paio Pires (concelho do Seixal)	Hora da amostragem	16h30
Tipo de procedimento para a produção do material	O processo de produção do material é descrito em Roque et al. (2006)	Tipo de material	Agregado reciclado
Descrição visual do material	Material muito denso, de tonalidade escura (negra), textura vesicular e superfície áspera. Em algumas amostras de ASIC é visível a olho nu a inclusão de pequenas partículas de ferro.		
Descrição do depósito de armazenamento do material	O material encontrava-se depositado em várias pilhas de material, a céu aberto, sem proteção contra os agentes de alteração, nomeadamente os atmosféricos. A pilha do material amostrado tinha entre 3 m a 5 m de altura e uma extensão superior a 10 m (Figura 1a).		
Composição do material	NA		
Número de blocos amostrados	200, de dimensões inferiores a 100 mm	Peso total	NA
Recipiente	Sacos grandes em plástico (num total de 2)		
Finalidade da amostragem	Avaliação da suscetibilidade à degradação através da realização de ensaios de DMA, tendo em vista a sua valorização na construção da camada de drenagem e recolha dos lixiviados existente no sistema de confinamento basal dos aterros de resíduos.		
Método de amostragem	Manual, sem recurso a qualquer tipo de equipamento de amostragem (Figura 1b). Os critérios para a seleção das amostras foram estabelecidos em função das restrições impostas para a realização dos ensaios de DMA. Como tal, os blocos selecionados são de dimensão inferiores a 100 mm e de formato preferencialmente quadrangular, para facilitar a execução de provetes necessários à realização dos ensaios de DMA.		
Tipo de preservação	A amostra foi transportada nos sacos de plástico para o Laboratório Nacional de Engenharia Civil, I.P. (LNEC), mantendo-se nos mesmos, à temperatura ambiente, até se iniciarem os ensaios.		
Parâmetros avaliados <i>in situ</i>	NA		
Observações suplementares	NA		

NA -Nada a assinalar.

3.1.2 - Betão britado de resíduos de construção e demolição (AB_{RCD})

A amostra de AB_{RCD} utilizada no estudo provém do processamento dos RCD numa central móvel da empresa Demotri, S.A., a operar no Seixal. Esta empresa é a responsável no Grupo Ambigroup pela área das demolições.

O material recolhido provém de diversas obras de demolição, num volume estimado de cerca de 2.000 m³.

A metodologia adotada para o processamento dos RCD envolveu, numa primeira fase, a limpeza, desmantelamento e gestão dos resíduos dispersos em edifícios, estruturas e áreas envolventes, seguida da demolição das estrutura/edifícios e conseqüente britagem. Na fase final, procedeu-se às operações de carga, transporte e encaminhamento dos resíduos gerados do processamento dos RCD para o destino final adequado (Almeida, 2011).

A fase de desmantelamento ocorreu antes do início dos trabalhos de demolição, tendo por objetivo a remoção de todos os elementos edificados não estruturais tais como o alumínio, metais, cabos elétricos, madeiras, vidros, plásticos e materiais classificados como perigosos, sendo todos eles passíveis de serem reutilizados e reciclados. Os trabalhos decorreram mediante processos manuais ou semimecânicos, com os materiais removidos a serem acondicionados em recipientes apropriados de forma a preservar as características exigidas pelo destino final ou consoante as suas características de perigosidade.

A fase de demolição decorreu pela via mecânica, tendo os trabalhos sido realizados de forma faseada, das cotas mais altas para as mais baixas de modo a que a estrutura a demolir se encontrasse sempre numa situação de auto suporte, com recurso a máquinas especializadas capazes de provocarem a destabilização das estruturas e conseqüente desmoronamento. Desta fase, os materiais inertes são os que resultam em maior quantidade, destacando-se o betão armado. Com o intuito de segregar a fração metálica do betão procedeu-se à sua pulverização com recurso a demolidor. A fração inerte foi em seguida transportada para britadeira de maxilas (processa a separação magnética do aço existente na

armadura do betão mediante um eletroímã e à separação granulométrica do material a partir de uma tremonha de abertura regulável), produzindo agregado com granulometria 0/56 mm.

Terminado o processo de britagem, procedeu-se ao armazenamento ao ar livre do agregado resultante em áreas diferenciadas a fim de obviar à mistura de materiais de características díspares.

A Figura 2a) ilustra uma das pilhas de AB_{RCD} produzida na central móvel da Demotri, S.A. e a Figura 2b) uma fase do processo de amostragem manual do agregado.

A amostragem do AB_{RCD} decorreu, no essencial, conforme descrito para o ASIC. No Quadro 3 apresenta-se a folha de registo adaptada da ASTM D4687-95 preenchida com base no procedimento de amostragem do AB_{RCD}.



Figura 2 – Amostragem do AB_{RCD}: a) pilha existente na central móvel da Demotri, S.A., no Seixal; b) recolha da amostra

Quadro 3 – Registo do processo de amostragem do AB_{RCD}

Nome da empresa	Demotri, S.A.	Data da amostragem	07/04/2011
Localização da empresa	Freguesia da Arrentela (concelho do Seixal), Parque Seixal/Casal do Marco (instalações da Recielectric)	Hora da amostragem	14h30
Tipo de procedimento para a produção do material	Descrito na presente secção	Tipo de material	Agregado reciclado
Descrição visual do material	Material constituído por pequenas partículas de agregado natural britado (calcário) envolvidas por uma matriz porosa cimentícia. Apresenta um formato irregular em virtude do processo de britagem.		
Descrição do depósito de armazenamento do material	O material encontrava-se depositado numa pilha de material a céu aberto (Figura 2a), sem proteção contra os agentes de alteração, nomeadamente os atmosféricos. A pilha do material recolhido tinha cerca de 2 m de altura.		
Composição do material	N.A		
Número de blocos amostrados	120 blocos de AB _{RCD} , de dimensões inferiores a 56 mm	Peso total	N.A.
Recipiente	Sacos em nylon (num total de 5)		
Finalidade da amostragem	Ver Quadro 2.		
Método de amostragem	Ver Quadro 2.		
Tipo de preservação	Ver Quadro 2.		
Parâmetros avaliados <i>in situ</i>	N.A		
Observações suplementares	N.A		

NA -Nada a assinalar.

3.1.3 - Lixiviado

O lixiviado utilizado como solução aquosa nos ensaios de DMA foi recolhido no aterro de resíduos sólidos urbanos (RSU) da Amarsul, S.A., sito no Seixal. O aterro é constituído por três células: na célula A foram depositadas 650.000 toneladas (t) de RSU; a célula B recebeu cerca de 900.000 t, tendo-se já iniciado o seu processo de selagem; e a célula C, onde foi recolhido o lixiviado, começou a ser explorada em 2001, prevendo-se o seu encerramento apenas em 2020. Em dezembro de 2011, o volume total de resíduos depositados nesta célula era de 1.861.954 m³, variando a uma altura entre 16 e 24 m.

Na amostragem recorreu-se a uma bomba para extrair o lixiviado existente no sistema de drenagem e recolha dos lixiviados do aterro (Figura 3a). O lixiviado foi primeiro recolhido num balde de plástico e em seguida transferido, com o auxílio de um funil, para reservatórios em plástico (Figura 3b). O lixiviado amostrado foi transportado para o LNEC, onde ficou armazenado à temperatura de 4 °C até à sua utilização nos ensaios. Ao longo do processo foram utilizadas luvas de látex para evitar o contacto com o lixiviado.

O pH do lixiviado no momento da recolha era 7,61. Considerando, por um lado, que os lixiviados nos aterros de RSU podem ter valores de pH inferiores, designadamente a 7,0 e, por outro, por se pretender sujeitar os materiais a condições químicas mais agressivas do que as habitualmente observadas neste tipo de obra, procedeu-se à sua acidificação com ácido clorídrico para 5,50.



Figura 3 – Amostragem do lixiviado: a) bombagem do lixiviado a partir do sistema de drenagem e recolha dos lixiviados do aterro; b) transferência do lixiviado para os reservatórios de armazenamento, transportados para o LNEC

3.2 - Métodos

3.2.1 - Análise petrográfica

O estudo macropetrográfico dos materiais foi efetuado de acordo com o procedimento descrito na NP EN 932-3:2010, no caso do ASIC e segundo a ASTM C856-11, no caso do AB_{RCD}. O estudo micropetrográfico, efetuado com recurso a lâminas delgadas, seguiu o procedimento descrito na EN 12407:2010, no caso do ASIC, e na ASTM C856-11, no caso do AB_{RCD}.

3.2.2 - Caracterização física

O ensaio para a determinação das massas volúmicas real e aparente, da porosidade efetiva e do teor máximo em água de absorção do ASIC e do AB_{RCD} seguiu o procedimento de execução previsto em LERO-PE01 (LNEC, 1993). Em cada ensaio efetuado foram utilizados seis provetes.

Antes da realização dos ensaios propriamente ditos, cada um dos provetes foi identificado e, em seguida, colocado no interior de um recipiente (Figura 4a), devidamente identificado.

A execução de cada ensaio contemplou as três etapas seguidamente expostas.

Na primeira etapa, os provetes foram colocados no interior de um exsiccador, onde se aplicou vácuo de forma gradual por intermédio de uma bomba, até se atingir 1 bar (Figura 4b e Figura 4c). O vácuo foi mantido durante um período de tempo na ordem de 24h, de forma a assegurar a eliminação do ar contido nos poros dos provetes. De seguida, introduziu-se água desmineralizada no interior do exsiccador, com um caudal tal que a imersão completa dos provetes só se verificou 15 min após o seu início. O vácuo foi mantido nesta fase e nas 24h seguintes. Terminado este período, a bomba de vácuo foi desligada para se repor a pressão atmosférica no interior do exsiccador, mantendo-se os provetes nestas condições por mais 24h.

Na segunda etapa, os provetes imersos foram inicialmente transferidos do exsicador para um balde em plástico, contendo água desmineralizada até ao nível necessário para a sua imersão. A necessidade deste procedimento resultou da impossibilidade das pesagens se efetuarem no mesmo local onde se realizou a primeira etapa do ensaio. Inicialmente procedeu-se à pesagem da massa submersa de cada provete, sendo que, para tal, cada provete foi colocado num cesto imerso na água e suspenso numa balança de precisão centesimal (Figura 4d). Posteriormente, após enxugar as faces do provete com um pano limpo e seco, pesou-se a sua massa saturada.



Figura 4 - Equipamento utilizado no ensaio: a) recipiente de plástico; b) exsicador aberto; c) exsicador, reservatório de cinco litros com água desmineralizada e bomba de vácuo e d) balança com precisão centesimal, cesto em rede metálica e balde de plástico

Na última etapa do ensaio, os provetes foram secos em estufa a 105 ± 2 °C, durante 24 ± 2 h, e em seguida colocados no exsicador para permitir o seu arrefecimento por um período de tempo nunca inferior a 40 min. Passado este período, a massa seca de cada provete foi medida na balança de precisão centesimal. Conhecidos os valores referentes às massas submersa, saturada e seca, calcularam-se os valores referentes às massas volúmicas real e aparente, à porosidade efetiva e ao teor máximo em água de absorção.

As massas volúmicas real (M_{VR}) e aparente (M_{VA}) foram calculadas a partir das expressões:

$$M_{VR} = \frac{M1}{M1 - M2} \times 100\% \quad [1]$$

$$M_{VA} = \frac{M1}{M3 - M2} \times 100\% \quad [2]$$

a porosidade efetiva (P) a partir da expressão:

$$P = \frac{M3 - M1}{M3 - M2} \times 100\% \quad [3]$$

e o teor máximo em água de absorção (w_{max}) com base na expressão:

$$w_{max} = \frac{M3 - M1}{M1} \times 100\% \quad [4]$$

sendo:

M_1 = massa do provete seco,

M_2 = massa saturada imersa,

M_3 = massa saturada com as faces enxutas.

3.2.3 - Ensaio de desgaste em meio aquoso

O ensaio de DMA é uma técnica laboratorial vulgarmente utilizada para avaliar a suscetibilidade ao desgaste e à desintegração dos materiais naturais quando submetidos simultaneamente a ciclos normalizados de secagem-embebição e ação mecânica (Moon e Beattie, 1995, Gokceoglu, 1997, Koncagul e Santi, 1999, Gokceoglu et al., 2000, e Sadisun et al., 2005, citados por Erguler e Ulusay, 2009).

Para a realização do ensaio utilizou-se um equipamento (Figura 5) idêntico ao preconizado no *Suggested method for determination of the slake-durability index* (ISRM, 1977), excetuando o número de tambores. Neste caso, o equipamento em questão era composto por quatro tambores (Figura 5a), no lugar dos dois indicados.



Figura 5 - Equipamento utilizado no ensaio DMA: a) vista geral do equipamento e b) pormenor do tambor em aço inoxidável

A partir das amostras do ASIC e do AB_{RCD} foram preparados 40 provetes, igualmente distribuídos pelos quatro tambores, cilíndricos, em aço inoxidável (Figura 5b). Os provetes do AB_{RCD} foram preparados com um formato subangular, contrariamente ao indicado no método, que preconiza um formato aproximadamente esférico. Com esta alteração pretendeu-se incrementar a exposição dos provetes à ação mecânica provocada pelo ensaio. No caso do ASIC, por impossibilidade de preparar os provetes com formato subangular, devido às características intrínsecas ao próprio material, preparam-se provetes com um formato mais arredondado, ainda que não totalmente esférico. Cada provete apresentava uma massa compreendida entre 40 e 60 g, perfazendo deste modo, cada conjunto de dez provetes, um total de 400 a 600 g.

Os provetes moldados começaram por ser introduzidos nos tambores. Em seguida, o conjunto foi montado em quatro reservatórios previamente preenchidos com água, dois, e com o lixiviado, os restantes dois. Os quatro tambores com os provetes, parcialmente imersos nas duas soluções aquosas, foram sujeitos a três ciclos de desgaste. Os dois primeiros foram executados nas condições recomendadas pelo método, ou seja, com a duração de 10 min, 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 600 rotações, totalizando 1000 rotações. Os provetes ensaiados foram sempre secos em estufa a 105 ± 2 °C, durante 24h, antes do início do ensaio e imediatamente após cada um dos ciclos de desgaste, e determinadas as respetivas massas secas.

De acordo com a recomendação do 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 seguinte expressão:

$$I_{d2} = \frac{C - D}{A} \times 100\% \quad [5]$$

em que,

A = massa seca inicial dos 10 provetes,

C = massa seca dos 10 provetes após o segundo ciclo de desgaste,

D = massa do tambor.

4 - RESULTADOS

4.1 - Análise petrográfica dos materiais amostrados

No Quadro 4 e no Quadro 5 apresentam-se as análises macro- e micropetrográficas do ASIC e do AB_{RCD} , respetivamente. As Figuras 6 e 7 ilustram, respetivamente, as macro- e microfotografias do ASIC e do AB_{RCD} .

Quadro 4 – Análise petrográfica do ASIC

Descrição macroscópica
Material denso, com textura vesicular, coloração escura a acinzentada e superfície áspera. A mineralogia não é observável a olho nu, porém, é visível a presença de alguns pontos de coloração acastanhada, dispersos heterogeneamente pelo corpo da amostra de ASIC, que correspondem a inclusões de pequenas partículas de ferro, aparentemente sem indícios de oxidação.
Descrição microscópica
Material de textura vesicular, afanítica e de granulometria muito fina. A matriz é composta por duas espécies minerais: (1) minerais opacos e (2) uma outra espécie mineral, cuja natureza não se identifica através da simples observação ao microscópio ótico (<i>i.e.</i> , as suas características microscópicas não se enquadram com as dos minerais mais comumente observados ao microscópio ótico). Os minerais opacos apresentam uma cor escura (<i>i.e.</i> , minerais que não transmitem luz), tanto em nicóis cruzados, como em nicóis paralelos. A outra espécie mineral apresenta um formato anédrico a acicular, cor de polarização branca, extinção oblíqua e sem fracturação. O formato acicular é identificado, apenas, em algumas zonas da lâmina delgada, podendo a espécie mineral em causa confundir-se com minerais como a plagioclase. Os minerais opacos parecem sobrepor-se à superfície da espécie mineral de natureza desconhecida. Em nicóis paralelos identificam-se diversos pontos com uma cor castanho-escura, que aparecem associados aos minerais opacos. Tais pontos devem-se à presença de óxidos de ferro no ASIC.

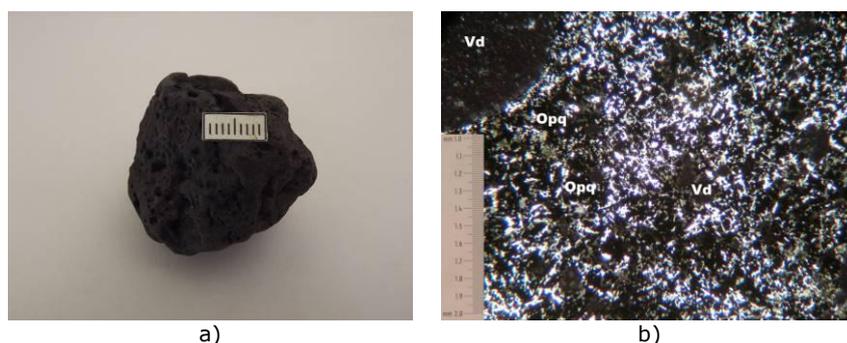


Figura 6 – a) Aspeto macroscópico do ASIC; b) microfotografia da lâmina delgada do ASIC, em nicóis X, com uma ampliação de 5x (Vd - vidro da lâmina delgada e Opq - minerais opacos)

Quadro 5 - Análise petrográfica do AB_{RCD}

Descrição macroscópica

Material multifásico, heterogéneo, não friável, sem fissuração ou indícios de desagregação. A matriz cimentícia de coloração cinzenta clara apresenta-se uniforme e porosa (presença de alguns poros de dimensões inferiores ou iguais a 2 mm, que se encontram dispersos de modo heterogéneo). Alguns poros apresentam-se preenchidos por uma fina camada de um material de coloração branca.

Os agregados naturais britados apresentam duas dimensões, grossa e fina, dispersos pela matriz cimentícia. Os agregados grossos, abundantes, são predominantemente calcários que se distribuem heterogeneamente no seio do cimento. Apresentam-se compactos ou oolíticos, de dimensões até 200 mm, irregulares, com uma coloração branca a amarelada, e sem indícios de alteração. Os agregados finos visíveis em amostra de mão são muito angulosos e de baixa esfericidade. Apresentam uma distribuição heterogénea no corpo do material amostrado.

Na interface da matriz cimentícia com os agregados grossos não se identificam sinais de alteração.

Descrição microscópica

Material de estrutura complexa e composto por três fases: agregado britado grosso, matriz cimentícia e zona de transição. O tipo de agregado britado grosso não é identificado ao microscópio ótico devido à inadequada espessura da lâmina delgada. O agregado britado fino corresponde a areias quartzíticas, informação fundamentada na presença de cristais de quartzo, dispersos pela matriz cimentícia, de formato anédrico e subédrico, e de várias dimensões.

No corpo da matriz são identificados diversos pontos de tonalidade escura, possivelmente associados a vazios capilares ou zonas de ar aprisionado/incorporado. A distribuição dos poros é heterogénea. Os poros de reduzida dimensão (até 0,01 mm) são geralmente circulares, ao passo que os poros de maiores dimensões (até 0,1 mm) apresentam um formato irregular. Os vazios capilares representam um espaço não ocupado, sendo que o seu volume e tamanho dependem da distância inicial entre as partículas de cimento e da relação entre o agregado e o cimento. Os vazios associados ao ar aprisionado são geralmente esféricos.

Não se verifica qualquer relação entre a localização dos poros e as partículas de agregados grossos e finos.

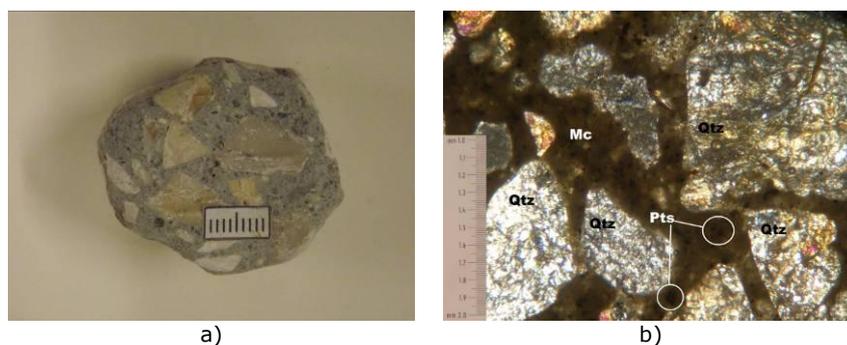


Figura 7 - a) Aspeto macroscópico do AB_{RCD}; b) microfotografia da lâmina delgada do AB_{RCD}, em nicóis X, com uma ampliação de 5x (Qtz - quartzo, Mc - matriz cimentícia e Pts - poros)

4.2 - Características físicas iniciais dos materiais

Os resultados obtidos na determinação das massas volúmicas real e aparente, da porosidade efetiva e do teor máximo em água de absorção do ASIC e do AB_{RCD} encontram-se resumidos no Quadro 6.

Quadro 6 - Síntese das características físicas iniciais do ASIC e do AB_{RCD}

Material	M_{vr} (Mg/m ³)	M_{va} (Mg/m ³)	P (%)	w_{max} (%)
ASIC	3,77	3,28	12,40	3,83
AB _{RCD}	2,58	2,14	16,88	7,89

4.3 - Desgaste em meio aquoso

Os resultados obtidos nos ensaios de DMA com as duas soluções aquosas, água e lixiviado, estão resumidos nos Quadros 7 e 8 para os provetes de ASIC e AB_{RCD}, respectivamente. Os valores apresentados correspondem à percentagem de material de ASIC e de AB_{RCD} retida nos tambores no final de cada ciclo (I_{d1} = 200 rotações, I_{d2} = 400 rotações e I_{d5} = 1000 rotações).

Quadro 7 - Síntese dos resultados dos ensaios de DMA em água e lixiviado com os provetes de ASIC

Provete	Índice de durabilidade (I_d)	Valor (%)
ASIC_DMA_A	I_{d1}	99,7
	I_{d2}	99,5
	I_{d5}	99,1
ASIC_DMA_L	I_{d1}	99,6
	I_{d2}	99,5
	I_{d5}	99,1
ASIC_DMA _I _A	I_{d1}	99,7
	I_{d2}	99,5
	I_{d5}	99,0
ASIC_DMA _I _L	I_{d1}	99,6
	I_{d2}	99,4
	I_{d5}	99,0

Quadro 8 - Síntese dos resultados dos ensaios de DMA em água e lixiviado com os provetes de AB_{RCD}

Provete	Índice de durabilidade (I_d)	Valor (%)
AB _{RCD} _DMA_A	I_{d1}	99,5
	I_{d2}	99,1
	I_{d5}	98,0
AB _{RCD} _DMA_L	I_{d1}	99,6
	I_{d2}	99,3
	I_{d5}	98,3
AB _{RCD} _DMA _I _A	I_{d1}	99,6
	I_{d2}	99,1
	I_{d5}	97,9
AB _{RCD} _DMA _I _L	I_{d1}	99,3
	I_{d2}	98,7
	I_{d5}	96,8

4.4 - Análise petrográfica dos materiais após ensaios de DMA

No Quadro 9 e no Quadro 10 apresentam-se as análises macro- e micropetrográficas dos provetes de ASIC e de AB_{RCD}, respectivamente, no final dos ensaios de DMA. As Figuras 8 e 9 ilustram, respectivamente, as macro- e microfotografias dos provetes de ASIC, e as Figuras 10 e 11, respectivamente, as macro- e microfotografias dos provetes de AB_{RCD}, no final dos ensaios de DMA.

Quadro 9 - Análise petrográfica dos provetes de ASIC no final dos ensaios de DMA

Provete	Descrição macroscópica
ASIC_DMA_A	Presença de diversos pontos de coloração alaranjada, com um brilho metálico, facto que indicia a oxidação das partículas de ferro presentes no corpo do ASIC.
ASIC_DMA_L	A descrição apresentada para o provete ASIC_DMA_A aplica-se também ao provete ASIC_DMA_L.
ASIC_DMA _T _A	Na superfície do corpo do ASIC, em particular nos alvéolos, verifica-se ter ocorrido a deposição de material de coloração branca a acinzentada, cuja natureza não se identifica a olho nu. As partículas de ferro encontram-se oxidadas, com uma coloração castanha escura, rodeada por uma auréola de coloração alaranjada a amarelada.
ASIC_DMA _T _L	Na superfície do corpo do ASIC, em particular nos alvéolos, verifica-se a deposição de matéria orgânica (seca) oriunda do lixiviado. Esta apresenta uma tonalidade verde musgo. A deposição de matéria orgânica é um fenómeno inerente ao próprio processo de execução do ensaio de DMA. Observa-se a presença de diversos pontos de coloração alaranjada com um brilho metálico, o que indicia a oxidação das partículas de ferro presentes no corpo do ASIC.
Provete	Descrição microscópica
ASIC_DMA_A	Apenas se verifica maior concentração de minerais opacos (bem como de óxidos de ferro), ao passo que o formato acicular da espécie mineral que ocorre conjuntamente com os minerais opacos não foi observado.
ASIC_DMA_L	A descrição apresentada para a lâmina do provete ASIC_DMA_A aplica-se também à lâmina delgada do provete ASIC_DMA_L. De realçar, contudo, que em algumas zonas da lâmina delgada em questão, os minerais opacos assumem um aspeto detritico ou arborescente, o que pode indiciar a presença de óxidos de ferro de manganês no corpo da amostra de ASIC.
ASIC_DMA _T _A	A descrição apresentada para a lâmina do provete ASIC_DMA_A aplica-se também à lâmina delgada do provete ASIC_DMA _T _A.
ASIC_DMA _T _L	A descrição apresentada para a lâmina do provete ASIC_DMA_A aplica-se também à lâmina delgada do provete ASIC_DMA _T _L.

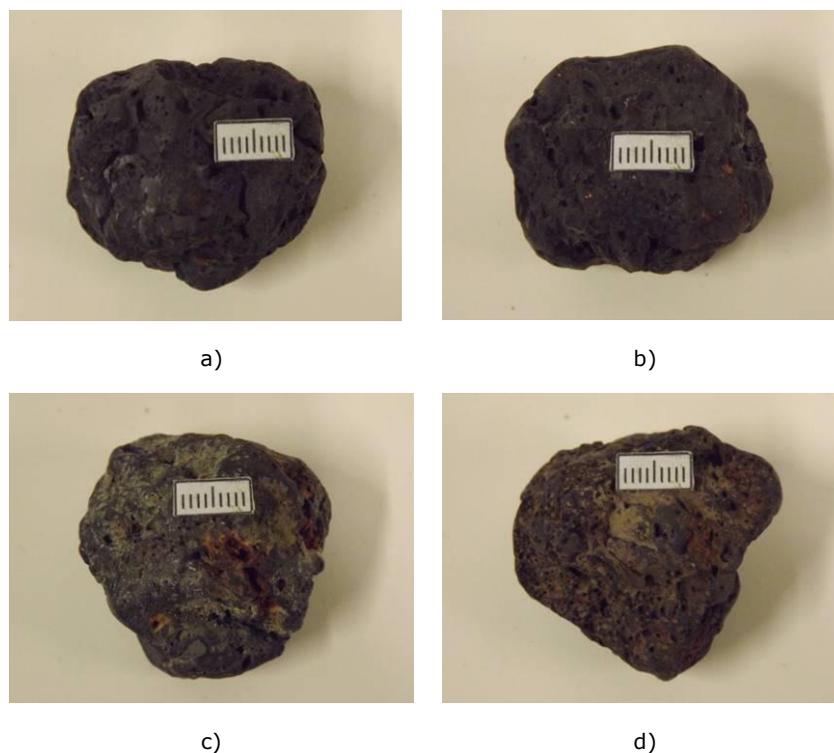


Figura 8 - Aspeto macroscópico dos provetes de ASIC no final dos ensaios de DMA: a) ASIC_DMA_A, b) ASIC_DMA_L, c) ASIC_DMA_T_A e d) ASIC_DMA_T_L

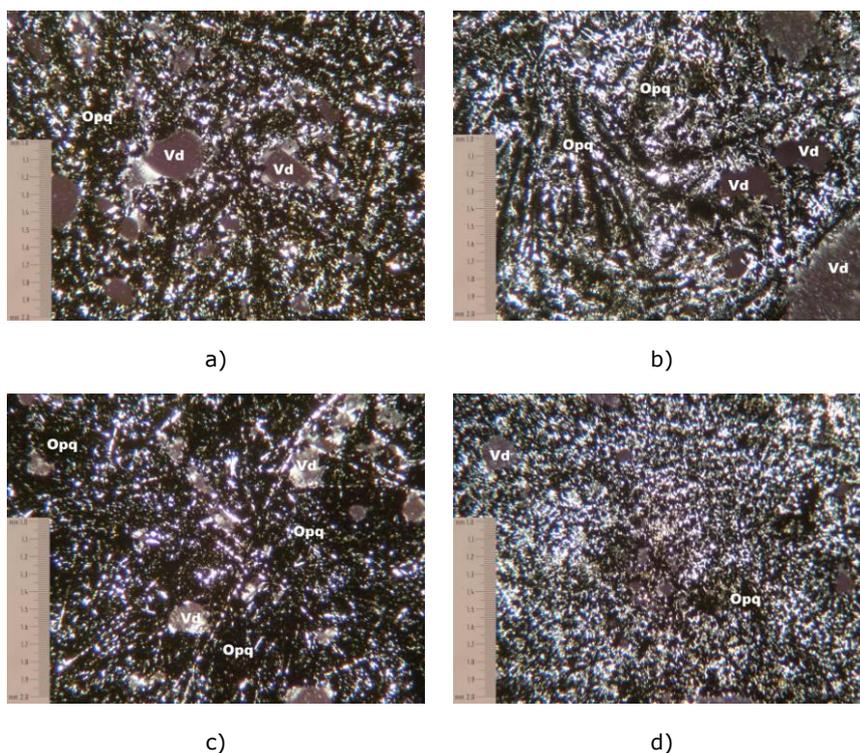


Figura 9 - Microfotografias das lâminas delgadas do ASIC, em nicóis X, com uma ampliação de 5x: a) ASIC_DMA_A, b) ASIC_DMA_L, c) ASIC_DMA_T_A e d) ASIC_DMA_T_L (Vd - vidro da lâmina delgada e Opq - minerais opacos)

Quadro 10 - Análise petrográfica dos provetes de AB_{RCD} no final dos ensaios de DMA

Provete	Descrição macroscópica
AB _{RCD} _DMA_A	Não são visíveis indícios de alteração.
AB _{RCD} _DMA_L	Apenas se verificam alterações na coloração da matriz cimentícia. Esta assume leves traços de verde musgo claro em resultado do contacto do provete em questão com o lixiviado no decorrer do ensaio de DMA.
AB _{RCD} _DMA_T_A	Não são visíveis indícios de alteração.
AB _{RCD} _DMA_T_L	Apenas se verificam alterações na coloração da matriz cimentícia (tanto na matriz como na interface entre a matriz e o agregado grosso), com esta a assumir uma coloração verde musgo, em resultado da deposição de matéria orgânica (seca) oriunda do lixiviado. A deposição de matéria orgânica é um fenómeno inerente ao próprio processo de execução do ensaio de DMA.
Provete	Descrição microscópica
AB _{RCD} _DMA_A	Não são visíveis indícios de alteração.
AB _{RCD} _DMA_L	Não são visíveis indícios de alteração.
AB _{RCD} _DMA_T_A	Não são visíveis indícios de alteração.
AB _{RCD} _DMA_T_L	Não são visíveis indícios de alteração.

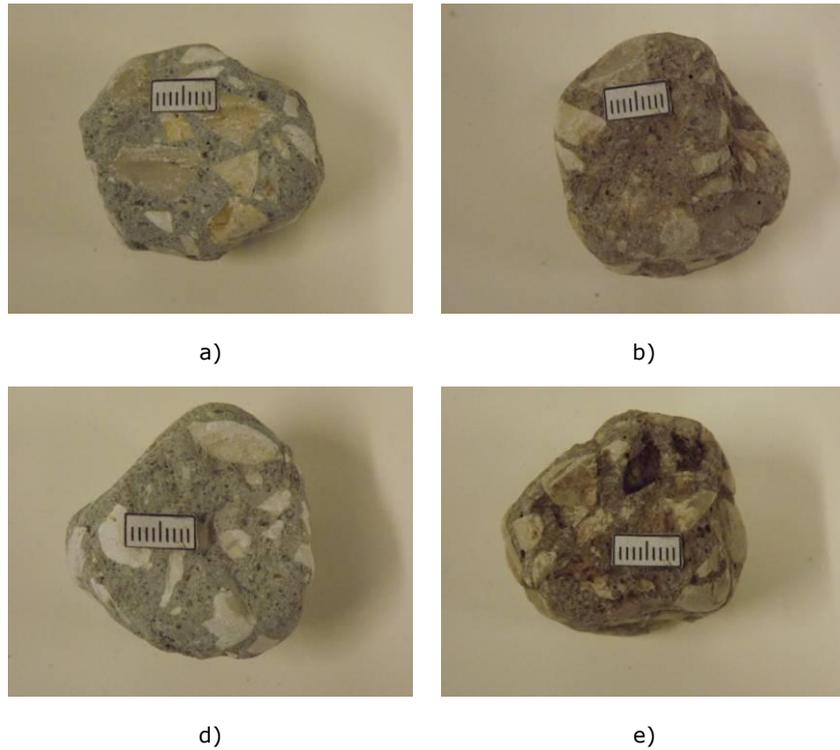


Figura 10 - Aspeto macroscópico dos provetes de AB_{RCD} no final dos ensaios de DMA: a) $AB_{RCD_DMA_A}$, b) $AB_{RCD_DMA_L}$; c) $AB_{RCD_DMA_T_A}$ e d) $AB_{RCD_DMA_T_L}$

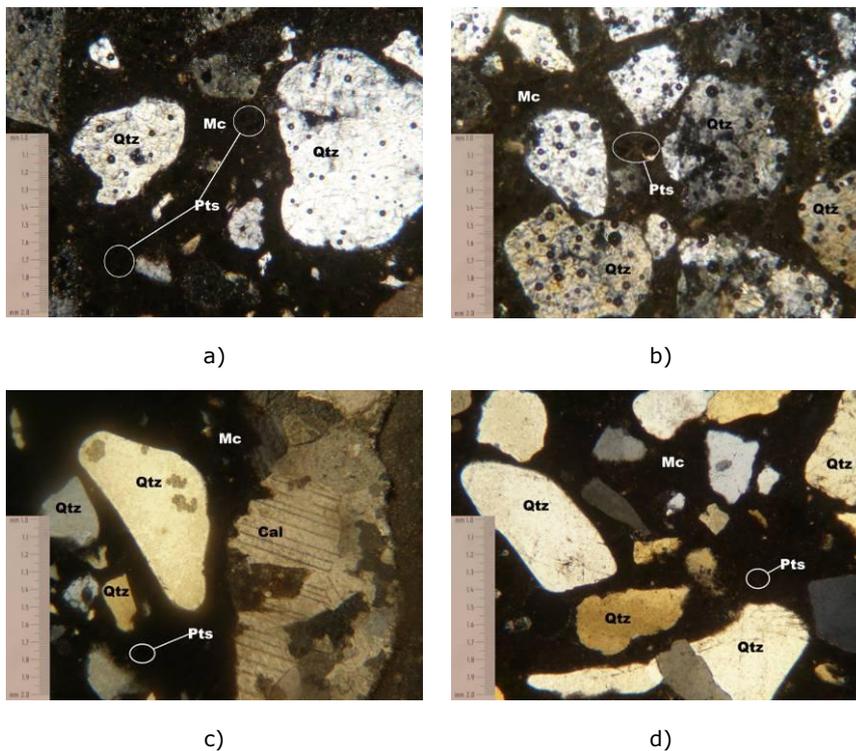


Figura 11 - Microfotografias das lâminas delgadas do AB_{RCD} , em nicóis X, com uma ampliação de 5x: a) $AB_{RCD_DMA_A}$, b) $AB_{RCD_DMA_L}$; d) $AB_{RCD_DMA_T_A}$ e e) $AB_{RCD_DMA_T_L}$ (Qtz - quartzo, Cal - calcite; Mc - matriz cimentícia e Pts - poros)

4.5 - Características físicas dos materiais após os ensaios de DMA

Os resultados obtidos para as massas volúnicas real e aparente, porosidade efetiva e teor máximo em água de absorção do ASIC e do AB_{RCD} , encontram-se resumidos no Quadro 11.

Quadro 11 – Síntese das características físicas do ASIC e do AB_{RCD} após os ensaios de DMA

Material	Provete	M_{vr} (Mg/m ³)	M_{va} (Mg/m ³)	P (%)	w_{max} (%)
ASIC	ASIC_DMA_A	3,98	3,58	10,00	2,88
	ASIC_DMA_L	3,71	3,28	11,65	3,77
	ASIC_DMA _T _A	3,77	3,28	12,32	3,77
	ASIC_DMA _T _L	3,78	3,29	12,61	3,90
AB _{RCD}	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 _T _A	2,65	2,24	15,27	6,82
	AB _{RCD} _DMA _T _L	2,62	2,27	13,59	6,00

5 - ANÁLISE DOS RESULTADOS

5.1 - Petrografia

A análise macroscópica mostra que não ocorreram alterações significativas nos provetes de ASIC e de AB_{RCD} submetidos aos ensaios de DMA. Ainda assim, identificam-se sinais de oxidação dos minerais de ferro quando se trata dos provetes de ASIC e uma película de matéria orgânica, de tonalidade verde musgo, na superfície dos provetes de ASIC e de AB_{RCD} ensaiados com o lixiviado.

O estudo micropetrográfico evidencia que os ensaios de DMA só produziram alterações visíveis nos provetes de ASIC, correspondentes a um aumento da concentração de óxidos de ferro. Tais alterações não são, contudo, relevantes para se refletirem numa diminuição da qualidade mecânica do ASIC.

5.2 - Características físicas

A caracterização física do ASIC e do AB_{RCD} permite verificar que o AB_{RCD} é menos denso e mais poroso que o ASIC e, conseqüentemente, com maior capacidade de absorção de água/lixiviado que o ASIC. Os resultados obtidos mostram que o AB_{RCD} é cerca de 1,5 vezes mais leve e 1,3 vezes mais poroso que o ASIC. Estas diferenças devem-se ao tipo de materiais constituintes do AB_{RCD}, designadamente, à matriz cimentícia e aos agregados naturais britados.

Os valores da massa volúmica real, porosidade efetiva e teor máximo em água de absorção do AB_{RCD} enquadram-se nas gamas de valores apresentados por outros autores. Por exemplo, segundo Jadovski (2005), a massa volúmica real do AB_{RCD} pode variar entre 2,12 e 2,43 Mg/m³, nas frações grossas, e entre 1,97 e 2,59 Mg/m³, nas frações finas. Em relação ao teor máximo em água de absorção, Jose (2002), Katz (2003) e Rao (2005, citados por Rao et al., 2007), e Gómez-Sobero (2002, citado por Martín-Morales et al. 2011), apontam para um intervalo de valores entre 3,0% e 12,0%.

Em relação ao ASIC, ao valor mais elevado da massa volúmica (3,77 Mg/m³, valor superior aos valores típicos das rochas magmáticas, como o basalto e o gabro apresentados por González de Vallejo et al., 2002), que resulta da presença de minerais de ferro, contrapõe-se o valor mais elevado da porosidade efetiva (12,40%). Este valor é, no entanto, cerca de duas vezes maior que o valor médio de 6,0% obtido por Wu et al. (2006) para o mesmo tipo de material. Contudo, a determinação desta grandeza deve ser encarada com algumas reservas, visto que a porosidade efetiva é uma das propriedades físicas mais afetadas pelo tipo de processamento a que a escória de aciaria de forno de arco elétrico é sujeita (Pasetto e Baldo, 2010).

Os valores das massas volúmicas real e aparente e do teor máximo em água de absorção do ASIC são de ordem de grandeza semelhante aos obtidos por Ferreira (2010). As escórias de aciaria ensaiadas por este autor foram igualmente processadas nas instalações da SN do Seixal. Nos ensaios, realizados segundo a NP 581-1969, obtiveram para as massas volúmicas real e aparente, respetivamente 3,05 e 2,94 Mg/m³ e para o teor máximo em água de absorção 3,87%.

Da análise comparativa entre os resultados das massas volúmicas real e aparente, da porosidade efetiva e do teor máximo em água de absorção do ASIC e do AB_{RCD}, obtidos antes e após os ensaios de DMA, não ocorreram alterações quantitativas significativas nestas propriedades. Observa-se também que a utilização de diferentes meios aquosos, no presente caso água e lixiviado, não se traduz em alterações quantitativas importantes nas propriedades físicas do ASIC e do AB_{RCD}.

Os valores da porosidade efetiva e do teor máximo em água de absorção determinados nos provetes AB_{RCD}_DMA_L e AB_{RCD}_DMA_T_L merecem contudo uma ressalva. No caso específico da porosidade efetiva, a diferença percentual de cerca de 3,3% entre estes provetes e o provete AB_{RCD}, deve-se muito

provavelmente ao facto de em algumas zonas da superfície da matriz cimentícia dos provetes submetidos a ensaio, se verificar o preenchimento dos poros aí presentes com restos de matéria orgânica seca. O preenchimento desses poros, inicialmente acessíveis à água, justifica a ligeira diminuição registada nos valores da porosidade efetiva e do teor máximo em água de absorção.

5.3 - Desgaste em meio aquoso

A classificação da durabilidade dos agregados ensaiados foi definida com base nas classes apresentadas no Quadro 12, propostas por Gamble (1971).

Quadro 12 - Classificação dos materiais com base no índice de durabilidade I_d

Classificação da durabilidade	I_{d1}	I_{d2}	I_{d5}
	(% de material retido no 1º ciclo - 200 rotações)	(% de material retido no 2º ciclo - 400 rotações)	(% de material retido no 3º ciclo - 1000 rotações)
Muito alta	> 99	> 98	> 95
Alta	98 - 99	95 - 98	85 - 95
Média a alta	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

Os valores médios obtidos para I_{d5} nos ensaios de DMA efetuados em água e em lixiviado são superiores a 95,0%, pelo que, considerando a classificação proposta por Gamble, (1971), conclui-se que o ASIC e o AB_{RCD} pertencem à categoria de materiais de muito alta durabilidade.

A comparação entre os valores de I_{d5} obtidos nos dois materiais mostra que estes são superiores no ASIC, pelo que se conclui que nas condições de ensaio realizadas, a durabilidade do ASIC é superior à durabilidade do AB_{RCD} .

Por outro lado, verifica-se que a prévia imersão dos provetes de ASIC em água e em lixiviado durante 15 dias não contribuiu para uma diminuição da durabilidade do material, visto que os valores de I_{d5} sem e com prévia imersão dos provetes foram praticamente iguais. O mesmo não se pode afirmar em relação ao AB_{RCD} , uma vez que o valor de I_{d5} calculado no ensaio de DMA após imersão prévia de 15 dias no lixiviado, é 1,5 vezes inferior ao calculado no ensaio realizado sem imersão prévia dos provetes no lixiviado.

Pelo facto de não terem sido referenciados na bibliografia internacional consultada estudos idênticos ao apresentado nesta comunicação, inviabiliza qualquer análise comparativa. Alguns autores têm, no entanto, avaliado a resistência do ASIC e do AB_{RCD} através de outros métodos.

Ferreira (2010), por exemplo, obteve com as escórias processadas na SN do Seixal um valor para o coeficiente de Los Angeles igual a 23% (ensaiado segundo a especificação LNEC E 237) e um valor para o coeficiente micro-Deval igual a 11% (ensaiado segundo a EN 1097-1). Com as escórias processadas na SN da Maia, obteve 28% para o coeficiente de Los Angeles e 11% para o coeficiente micro-Deval. Concluiu que se tratava de um material com boa resistência à fragmentação e ao desgaste, com os valores referentes à resistência à fragmentação a pertencerem ao intervalo de valores definido para este agregado reciclado, ou seja, entre 15 e 45%.

Rohde (2002) procedeu à imersão de amostras de escórias de aciaria de forno de arco elétrico numa solução de sulfato de sódio (Na_2SO_4), com o objetivo de avaliar a sua durabilidade. Não observou quaisquer alterações significativas e as perdas de massa foram inferiores a 1%.

Pestana (2008) efetuou ensaios com amostras de RCD para a determinação da resistência à fragmentação (segundo a NP EN 1097-2) e ao desgaste (segundo a EN 1097-1), tendo obtido respetivamente um valor de 44% para o coeficiente de Los Angeles e um valor de 48% para o coeficiente micro-Deval. Com base nos mesmos concluiu que se trata de um material pouco resistente. Por outro lado, o valor calculado para o coeficiente de Los Angeles veio confirmar o referido por Alves (2007, citado por Pestana, 2008), ou seja, que a resistência à fragmentação dos RCD é inferior à dos agregados naturais em consequência da menor resistência da argamassa.

Face à ausência de estudos de durabilidade com agregados reciclados, apresentam-se em seguida resultados de ensaios de DMA obtidos por Delgado Rodrigues (1986) e Jeremias (2000) para materiais rochosos naturais, com o método proposto pela ISRM (1977). Delgado Rodrigues (1986) submeteu rochas carbonatadas a 4 ciclos de desgaste (1200 rotações), com e sem presença de água. Os resultados obtidos são apresentados no Quadro 13. Jeremias (2000) submeteu diversas rochas silto-argilosas a três ciclos de desgaste (1000 rotações), tendo utilizado água como meio aquoso. Obteve os valores de I_{d5} que se apresentam no Quadro 14. Dos valores obtidos por estes autores, verifica-se que apenas o calcário do

Mondego (Quadro 13) e o arenito (Quadro 14) apresentam índices de durabilidade semelhantes aos obtidos para o ASIC e o AB_{RCD}.

Quadro 13 - Síntese dos resultados dos ensaios de DMA, sem e com água, realizados por Delgado Rodrigues (1986)

Material	Índice de durabilidade (I_d)	Valor obtido sem água (%)	Valor obtido com água (%)
Calcário	I_{d1}	99,73 – 99,82	99,25 – 99,71
(Mondego)	I_{d6}	99,17 – 99,37	96,71 – 98,80

Quadro 14 – Síntese dos resultados dos ensaios de DMA, em água, realizados por Jeremias (2000)

Material	Índice de durabilidade (I_d)	Valor (%)
Arenito	I_{d2}	96,3
	I_{d5}	91,9
Siltito	I_{d2}	90,6 – 68,7
	I_{d5}	77,6 – 43,7
Argilito	I_{d2}	2,5
	I_{d5}	0,2
Calcário oolítico	I_{d2}	74,5
	I_{d5}	62,4

6 - CONCLUSÕES

Neste trabalho é avaliada a viabilidade técnica da aplicação de dois agregados reciclados, o ASIC e o AB_{RCD}, na camada de drenagem e recolha dos lixiviados existente no sistema de confinamento basal dos aterros de resíduos.

Os resultados do estudo da resistência ao desgaste em meio aquoso são elucidativos da excelência dos dois agregados reciclados em termos de durabilidade, mesmo quando submetidos a condições química e mecanicamente mais agressivas do que as previstas pelo método original proposto pela ISRM (1997). Com efeito, para além da substituição da água por um lixiviado produzido num aterro de resíduos sólidos urbanos, com pH de valor igual a 5,50, procedeu-se à realização de três ciclos de desgaste, num total de 1000 rotações, ou seja, mais 600 rotações do que as previstas no método.

Por sua vez, os resultados do estudo petrográfico (macro- e microscópico) e da caracterização física são coerentes com a classificação da durabilidade do ASIC e do AB_{RCD} tendo por base a classificação propostas por Gamble (1971) para materiais naturais, dado não se verificarem alterações relevantes ao nível das propriedades petrográficas e físicas iniciais dos dois agregados reciclados considerados.

Conclui-se, deste modo, que os resultados apresentados atestam a adequabilidade do ASIC e do AB_{RCD} para a aplicação proposta numa perspetiva de durabilidade.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à empresa Demotri, S.A., do Grupo Ambigroup, SGPS, SA, o fornecimento do betão britado processado a partir de resíduos de construção e demolição, à Siderurgia Nacional o fornecimento do agregado siderúrgico inerte para a construção processado a partir de escórias de aciaria de forno de arco elétrico e à Amarsul - Valorização e Tratamento de Resíduos Sólidos, S.A., o fornecimento do lixiviado produzido no aterro de resíduos sólidos urbanos do Seixal.

Agradecem igualmente ao 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

- Almeida, J.P. (2011). Produção de RCD. *Curso FUNDEC/LNEC - Utilização de agregados reciclados em infraestruturas de transportes*, 2ª ed., Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior Técnico, Lisboa (em CD-ROM).
- ASTM C856 (2011). *Standard practice for petrographic examination of hardened concrete*. American Society for Testing and Materials, PA, USA.

- ASTM D4687 (1995). *Standard guide for general planning of waste sampling*. 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.
- 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 (2010). *Natural stone test methods - Petrographic examination*. European Committee for Standardization, Brussels.
- Erguler, Z.A e Ulusay, R (2009). Assessment of physical disintegration characteristics of clay-bearing rocks: Disintegration index test and a new durability classification chart. *Engineering Geology*, nº 105. pp. 11–19.
- 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. e Fonseca, A. (2009). Valorização dos resíduos de construção e demolição em obras geotécnicas. *Seminário sobre Valorização de Resíduos em Obras Geotécnicas*, Aveiro, Portugal.
- Freire, A.C. (2011). Enquadramento normativo dos RCD. *Curso FUNDEC/LNEC - Utilização de agregados reciclados em infraestruturas de transportes*, 2ª ed., Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior Técnico, Lisboa (em CD-ROM).
- Gamble, J.C. (1971). *Durability-plasticity classification of shales and other argillaceous rock*. PhD Thesis, University of Illinois, Chicago, USA.
- Gomes Correia, A., Roque, A.J., Reis Ferreira, S. M. e Fortunato, E. (2012). *Study to promote the use of industrial byproducts: The relevance of performance tests*. Journal of ASTM International, vol. 9, nº 2.
- González de Vallejo, L.I., Ferrer, M., Ortuno, L. e Oteo, C. (2002). *Ingeniería Geológica*, Pearson Education, Madrid.
- ISRM (1977). *Suggested method for determination of the slake-durability index*. Commission on testing methods, Pergamon Press. pp. 101-102.
- Jadovski, I. (2005). *Diretrizes técnicas e económicas para usinas de reciclagem de resíduos de construção e demolição*. Tese de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Porto Alegre, Brasil. 180 p.
- Jeremias, F. T. (2000). *Geological controls on the engineering properties of mudrocks of the north Lisbon area*. PhD Thesis, University of Sheffield, Sheffield. 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 237 (1970). *Agregados. Ensaio de desgaste pela máquina de Los Angeles*. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.
- LNEC E 471 (2009). *Guia para a utilização de agregados reciclados grossos em betões de ligantes hidráulicos*. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.
- LNEC E 472 (2009). *Guia para a reciclagem de misturas betuminosas a quente em central*. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.
- LNEC E 473 (2009). *Guia para a utilização de agregados reciclados em camadas não ligadas de pavimentos*. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 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*. 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*, nº 25. pp. 742-748.
- NP EN 932-3 (2010). *Ensaio das propriedades gerais dos agregados. Parte 3: Método e terminologia para a descrição petrográfica simplificada*. Instituto Português de 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*, nº 181. pp. 938-948.
- Pestana, R.M.M. (2008). *Contribuição para o estudo do comportamento mecânico de resíduos de construção e demolição aplicados em estradas de baixo tráfego*. Tese de Mestrado, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa. 153 p.

- Rao, A., Jha, K.N. e Misra, S. (2007). Use of aggregates from recycled construction and demolition waste in concrete. *Resources, Conservation and Recycling*, nº 50. pp. 71-81.
- Rohde, L. (2002). *Escória de aciaria elétrica em camadas granulares de pavimentos: Estudo laboratorial*. Tese de Mestrado, Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Rio Grande do Sul, Brasil. 118 p.
- Roque, A.J., Gomes Correia, A., Fortunato, E., Pardo de Santayana, F., Castro, F., Ferreira, S.M. e Trigo, L. (2006). A geotecnia na valorização de agregados siderúrgicos inertes reciclados – Um projeto nacional. *Atas (CD-ROM) do 12º Encontro Nacional de Saneamento Básico*, APESB, Cascais. 16 p.
- Roque, A.J., Castro, F., Gomes Correia, A., Silva, S. e 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, 8-12 November, vol. 2. pp. 1166-1171.
- 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*, nº 42. pp. 2580-2585.