

UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO EM PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS

Gil Fernandes¹, Silvino Capitão² e Luís Picado-Santos³

¹ IPC – Instituto Superior de Engenharia de Coimbra, Departamento de Engenharia Civil, Rua Pedro Nunes, 3030-199 Coimbra, Portugal.

email: capitao@isec.pt <http://www.isec.pt>

² IPC – Instituto Superior de Engenharia de Coimbra & IST-CESUR (Lisboa), Departamento de Engenharia Civil, Rua Pedro Nunes, 3030-199 Coimbra, Portugal.

³ DECivil, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Av. Rovisco Pais, 1049-001 Lisboa, Portugal.

Sumário

Neste artigo faz-se uma revisão sobre a utilização de RCD em pavimentos rodoviários, quer em camadas não aglutinadas, quer em camadas ligadas, evidenciando as vantagens e as dificuldades que o processo acarreta, e os desempenhos observados. Apresenta-se ainda um estudo laboratorial de duas misturas AC 20 base 50/70, utilizando agregados naturais calcários numa delas, e substituindo 60% da massa do agregado por RCD de betão britado na outra. Concluiu-se que, apesar dos RCD não cumprirem alguns requisitos exigidos aos agregados, as propriedades volumétricas da mistura são aceitáveis e a resistência mecânica é em geral melhor na mistura com RCD que na mistura só com agregados naturais.

Palavras-chave: Camadas de base; misturas betuminosas; RCD; formulação empírica.

1 INTRODUÇÃO

A utilização de resíduos provenientes da construção e demolição (RCD) tem vindo a adquirir uma importância crescente, uma vez que são produzidos milhares de toneladas de resíduos, surgindo a necessidade de os valorizar através da sua reutilização e, assim, contribuir para uma utilização mais sustentável dos recursos na indústria da construção.

Por um lado, grande parte dos recursos naturais extraídos é utilizada na construção, o que origina também o consumo de uma grande quantidade de energia. Por outro lado, os RCD representam grande parte da totalidade dos resíduos produzidos, os quais ocupam os solos de forma não controlada e indevida em detrimento da sua reutilização adequada.

Em Portugal, os RCD dispõem de um quadro legal específico, publicado no Decreto-Lei n.º 46/2008, a 12 de março, o qual estabelece o regime das operações de gestão de RCD, tais como a prevenção, a reutilização e as operações de recolha, transporte, armazenagem, triagem, tratamento e valorização. É ainda aplicável o Decreto-Lei n.º 178/2006, de 5 de setembro, que institui o regime Geral de Gestão de Resíduos [1].

A reciclagem de RCD permite perseguir vários objetivos, tais como: diminuir as quantidades de materiais novos a usar na obra, substituindo-os por materiais reciclados; diminuir ou reduzir por completo a necessidade de vazadouro; usar resíduos de vários setores da construção, reduzindo os impactos negativos desses mesmos setores; diminuir o consumo de energia [2].

A utilização de RCD em obra é feita em observância das normas técnicas nacionais e comunitárias aplicáveis. Foram publicadas em Portugal especificações que recomendam e estabelecem os requisitos mínimos para a utilização de RCD em pavimentos rodoviários, designadamente: como agregado reciclado em camadas não ligadas de pavimentos; como constituintes de misturas betuminosas a quente produzidas em central [3]. Contudo, as especificações referidas não consideram de forma suficientemente desenvolvida a utilização de RCD na

construção de camadas betuminosas de pavimentos rodoviários, pelo que é útil uma contribuição em relação a essa problemática, como a que se faz no presente artigo.

2 ORIGEM E COMPOSIÇÃO DOS RCD

Os resíduos de demolição são compostos por materiais que resultam da demolição de construções de edifícios, estradas e outras estruturas, ou até mesmo do seu colapso, apresentando na sua constituição grande quantidade de solos e agregados. Para que se possa obter o máximo aproveitamento dos resíduos provenientes de demolições, deve optar-se por demolir seletivamente, ação que tem sido designada por desconstrução.

Habitualmente, são inutilizados milhares de toneladas de RCD [4]. Estima-se que 10 a 20% dos RCD produzidos na Europa tenham origem direta na construção, 30 a 40% na remodelação, reabilitação e renovação, e 40 a 50% em demolições [5].

A desvalorização dos resíduos que se produzem traduz-se num volume crescente de matérias destinadas a aterro. Em termos europeus, alguns autores [6] indicam uma produção de RCD em cada ano, entre 600 e 900 kg/habitante, embora a percentagem média de reutilização dos mesmos seja da ordem de 30% [7], apesar de nalguns países, como a Holanda, a Bélgica e a Dinamarca, a reciclagem ultrapassar 80% [7]. Em Portugal a reutilização de RCD tem sido muito baixa, com um valor inferior a 5% do total de RCD produzidos [8].

A reciclagem da fração inerte de RCD passa por um processo de separação, britagem e crivagem. Para que o custo de produção de agregados reciclados seja reduzido mantendo a qualidade requerida, é necessário que os RCD não incluam materiais considerados contaminantes, tais como amianto, madeira, plástico, papel e metais, os quais devem ser retirados ou separados no processamento dos RCD. De facto, o nível de separação está relacionado com a qualidade final do produto reciclado, pelo que a separação dos constituintes deve ser máxima, dando preferência a materiais mais limpos.

Os RCD são transportados para uma central de tratamento onde, depois de analisados, são armazenados para posterior seleção e reciclagem. Os elementos de betão armado são reduzidos em frações menores com recurso a um martelo hidráulico, e o aço que nele se encontra é retirado com uma pinça hidráulica. O aço é reencaminhado para uma siderurgia onde será reciclado. Os resíduos considerados limpos, elementos só de um material, ou misturas de betão, pedras e alvenarias, são encaminhados para a britagem.

Não considerando os materiais provenientes de pavimentos rodoviários, verifica-se que geralmente os resíduos de betão e de tijolos, assim como os resíduos de metal, aparecem em maior quantidade em obras de demolição, predominando a madeira em obras de reabilitação, enquanto o papel, o cartão, os plásticos, os isolamentos e os resíduos perigosos são mais abundantes em obras de construção [9].

Nas obras rodoviárias, a reconstrução ou reabilitação pressupõe muitas vezes a remoção de material do pavimento. Quando o desmonte se faz por fresagem produzem-se geralmente materiais ricos em partículas de reduzida dimensão. A demolição com escavadoras, também muito utilizada, pode originar blocos de materiais que são submetidos a um processo de britagem necessário a reutilização dos RCD. O resíduo gerado é diferenciado em função da camada que é demolida, e na sua constituição tem geralmente uma percentagem elevada de agregados.

Como se referiu, os RCD são compostos por uma larga variedade de constituintes, os quais dependem do tipo de obra de onde provêm, bem como das técnicas e dos materiais aí empregados. A Lista Europeia de Resíduos (LER), publica na Portaria nº209/2004, classifica os RCD em três grupos, com base nos materiais que os constituem: inertes, não perigosos e perigosos. São considerados RCD perigosos todos os que tenham nos seus constituintes materiais contaminados e poluentes, tais como alcatrão, amianto, metais pesados, algumas tintas, entre outros.

De facto, os RCD podem ser constituídos por uma mistura de diversos materiais, apresentando-se como um produto heterogéneo. Os materiais agregados, betão, alvenaria e argamassas, são os que representam uma maior parcela na composição dos RCD, seguidos pelo betume asfáltico, a madeira e os metais. Os agregados são a parte mais importante dos RCD, representando mais de 50% do peso total de resíduos [8].

3 RCD COMO CONSTITUINTES DE CAMADAS DE PAVIMENTOS

3.1 Perspetiva Geral

A grande maioria das estradas portuguesas e europeias têm pavimentos constituídos por várias camadas betuminosas, incluindo também outras formadas por materiais granulares ou por materiais tratados com ligantes hidráulicos. A construção e manutenção dessas estradas consomem grandes quantidades de agregados, os quais no caso das misturas betuminosas representam mais de 90% do seu peso. O uso de agregados reciclados, ao invés do uso de agregados novos, reduz o excesso de extração de recursos naturais e a quantidade de resíduos a depositar em aterros.

O receio de que o desempenho dos agregados reciclados aplicados em pavimentos rodoviários seja inadequado, associado ao eventual aumento de custos inerentes ao fabrico daqueles comparativamente ao custo de produção de agregados novos, tem dificultado o seu uso generalizado. Além disso, os materiais provenientes de RCD apresentam propriedades que variam com a sua origem, dificultando a sua valorização. Para ultrapassar este tipo de dificuldades, deve proceder-se, quando necessário, a uma triagem, redução primária, britagem e peneiração dos materiais [10] ou, quando possível e útil, deve efetuar-se a mistura e homogeneização de vários componentes. Os RCD têm sido sobretudo utilizados na produção de agregados reciclados para a construção de camadas granulares ([5]; [11]; [12]). Contudo, no caso de RCD com origem em pavimentos rodoviários são vários os materiais suscetíveis de reciclagem, designadamente os agregados e, no caso de camadas betuminosas, o betume que os envolve [2].

As camadas de pavimentos constituídas por solos selecionados, materiais granulares ou materiais estabilizados com cimento, também são suscetíveis de reciclagem, sendo o tipo de reutilização muito dependente das características que os materiais a reciclar apresentarem.

Assim, dentre os vários tipos de RCD disponíveis, devem ser escolhidos os que permitam obter materiais e camadas construídas com as características desejadas. Todavia, os limiares de aceitação estabelecidos genericamente nos cadernos de encargos podem constituir um obstáculo à aplicação de RCD para fins mais exigentes, porquanto os requisitos estabelecidos podem, nalguns casos, não ser cumpridos pelos RCD para determinado uso específico.

3.2 Materiais Provenientes de Pavimentos Rodoviários

A reciclagem de pavimentos consiste em reutilizar materiais já aplicados, os quais constituem camadas que se encontram no final da sua vida útil. Após a demolição daquelas camadas, os materiais são reintegrados de novo num pavimento rodoviário, quer seja em camadas não ligadas, quer em camadas ligadas. Trata-se duma técnica que utiliza RCD como materiais de construção de pavimentos, em que os materiais considerados são os que se encontram nas diferentes camadas do pavimento a reciclar.

Note-se que os materiais são reutilizados com mais facilidade em camadas cujos requisitos técnicos sejam semelhantes aos da camada de origem. Não será geralmente adequado, por exemplo, aplicar em camadas de desgaste materiais provenientes de uma camada de base, ou de sub-base. Já o oposto pode verificar-se, embora com o inconveniente de não se valorizarem todas as possibilidades que determinado material pode oferecer, uma vez que os requisitos a cumprir são geralmente bastante inferiores aos que o material a reciclar pode satisfazer.

As técnicas de reciclagem de pavimentos são muito variadas, não cabendo a sua discussão no âmbito do presente artigo. A informação relativa a esses aspetos pode consultada, por exemplo, no trabalho de investigação realizado por Martinho [2].

Geralmente, é necessário juntar aos materiais provenientes da reciclagem do pavimento rodoviário alguns materiais corretivos, tais como materiais granulares, misturas betuminosas a quente, betume asfáltico ou cimento. A adição destes materiais tem por objetivo corrigir a granulometria da mistura, a percentagem de ligante utilizada e/ou algumas das propriedades dos RCD utilizados.

Além disso, quando utilizados de forma criteriosa, os RCD provenientes de um pavimento rodoviário não têm, na sua maioria, constituintes que prejudiquem de forma significativa as características do pavimento rodoviário. Aliás, sempre que existir suspeita da existência de materiais perigosos, nomeadamente alcatrão, deverá proceder-se à realização de ensaios que permitam averiguar a sua presença, evitando a sua reaplicação.

3.3 Materiais Não Provenientes de Pavimentos Rodoviários

Existem materiais que não são provenientes de pavimentos rodoviários, os quais podem também ser utilizados na construção de pavimentos. Os RCD provenientes da demolição e reabilitação de edifícios que têm maior potencial para aplicação em pavimentos rodoviários são constituídos por betão, argamassa, rocha e material cerâmico. A demolição de obras de arte em betão dá origem a RCD constituídos basicamente por betão britado e aço, o qual deve ser separado, uma vez que não tem aplicação direta como material de pavimentação.

Quando são utilizados em camadas betuminosas, aqueles RCD aplicáveis em pavimentação substituem apenas uma parte do volume de agregados, não contribuindo para a redução do betume necessário. Outra característica específica dos RCD não provenientes de pavimentos é a sua qualidade. De facto, os materiais provenientes de misturas betuminosas, por exemplo, já foram eventualmente sujeitos a um processo prévio de seleção que possibilitou a sua aplicação em misturas betuminosas. Já em resíduos provenientes de outras origens, por haver maior possibilidade de conterem materiais indesejáveis, existe uma maior necessidade de conhecer e caracterizar todos os seus constituintes, de modo a evitar a utilização de materiais com características físicas, mecânicas e químicas totalmente diferentes e, portanto, com maior potencial de insucesso.

A especificação LNEC E473 [10] estabelece recomendações e define os requisitos mínimos dos agregados reciclados em camadas não ligadas de pavimentos, estabelecendo também limites de aceitação para alguns RCD provenientes de pavimentos rodoviários.

Como se referiu, os agregados são o esqueleto de um pavimento rodoviário, tanto em camadas ligadas com ligantes hidrocarbonados, como em camadas granulares. Por isso, a qualidade dos agregados está diretamente relacionada como o melhor ou pior comportamento que as camadas dos pavimentos possam apresentar, pelo que interessa conhecer bem os materiais provenientes de resíduos de outras origens e o seu contributo para o desempenho do pavimento rodoviário. Não descurando a necessidade de conhecer os pavimentos rodoviários em serviço e os materiais que os integram, é importante caracterizar bem e avaliar o contributo dos resíduos, quando aplicados em pavimentos rodoviários, independentemente da sua origem.

3.4 Aplicação de RCD em Camadas Não Ligadas

3.4.1 Características Indicadas em Especificações Portuguesas

De modo a contribuírem para uma construção mais sustentável, em Portugal foram publicados documentos que pretendem regular e orientar a utilização de agregados reciclados provenientes de RCD em camadas não ligadas de pavimentos. Podem apontar-se como exemplos a especificação LNEC E473 [10] e o CEEP – Caderno de Encargos da EP [13]. São estabelecidos critérios de classificação dos agregados reciclados com base nas proporções da fração grossa de cada um dos seus constituintes. Propõem a utilização de agregados das categorias B e C, as quais correspondem a composições com, respetivamente, pelo menos 90% e 50% de betão, produtos de betão, argamassa, agregados, pedra natural e agregados aglutinados com ligantes hidráulicos, além de outros constituintes de pior qualidade para os quais são estabelecidos proporções máximas.

A Especificação LNEC E 473 fixa um conjunto de requisitos mínimos a cumprir pelos agregados reciclados no que se refere a parâmetros geométricos e da sua natureza, ao comportamento mecânico e às propriedades químicas. Aquele documento estabelece ainda as categorias e as condições de tráfego para que os agregados reciclados possam ser aplicados em camadas de base e de sub-base.

3.4.2 Apreciação das Propriedades Obtidas em Casos de Estudo

Tem sido observado um aumento, com o tempo, do módulo de deformabilidade nalguns casos de camadas não ligadas que incorporam RCD com betão britado ou argamassa. Alguns autores [12] observaram fenómenos de hidratação de algumas partículas de cimento dos RCD que promovem ligações entre os grãos, aumentando o módulo. As camadas com RCD podem apresentar valores de módulo semelhantes, ou mesmo superiores (da ordem de 100 a 500 MPa), aos das camadas granulares de rocha britada, porquanto pode haver uma melhor resistência ao corte do agregado de RCD devida ao elevado atrito interno do material, ajudado pela ação de compactação, particularmente quando esta é intensa. De facto, a compactação leva à fratura das partículas do agregado, aumentando a quantidade de material fino e a percentagem de partículas cúbicas no seu seio [12].

A resistência à deformação permanente das camadas granulares com RCD depende muito do nível de tensão vertical a que estão sujeitas. Este aspeto é particularmente importante, uma vez que em estradas de baixo tráfego,

para as quais se propõe frequentemente a aplicação de RCD em camadas granulares, a espessura dos betuminosos sobrejacentes é geralmente pequena e, por isso, o nível de tensão instalado pode ser elevado, conduzindo a assentamentos importantes à superfície do pavimento [12]. Contudo, a utilização de uma ação de compactação com elevada energia e um adequado controlo do teor em água (geralmente relativamente elevado) no processo construtivo podem contribuir bastante para reduzir a deformação das camadas [12].

Alguns autores referem dificuldades na obtenção de curvas de compactação [12]. Todavia, quando os materiais têm uma granulometria extensa, obtida diretamente ou por adição de outros agregados para a correção da granulometria, e se utiliza o teor em água adequado, consegue-se obter um adequado grau de compactação em obra [14]. Os valores de CBR são geralmente elevados, frequentemente acima de 80%, atingindo facilmente valores bastante superiores a 100% ([11], [12]). Estes valores de CBR representam boas características de resistência do material, consequência da coesão criada pela provável existência de partículas angulosas e de uma quantidade apreciável de finos.

Os RCD apresentam geralmente teores ótimos em água superiores e baridades secas máximas inferiores aos valores verificados para agregados naturais. Isto deve-se às altas porosidades dos RCD e à consequente capacidade de absorção (têm sido obtidas absorções entre 10 e 20% [12]).

Por vezes, os agregados de RCD não conseguem cumprir alguns requisitos físicos estabelecidos para os agregados convencionais [12], sendo necessária uma apreciação mais criteriosa das propriedades que é possível obter nas camadas construídas, de modo a que se promova a valorização dos RCD.

3.5 Aplicação de RCD em Camadas Ligadas com Betume Asfáltico

3.5.1 Características Indicadas em Especificações Portuguesas

A utilização em Portugal de RCD em camadas betuminosas de pavimentos tem estado quase restringida à reciclagem de misturas betuminosas em central a quente, incorporando na mistura final resíduos obtidos por fresagem de camadas betuminosas. A especificação LNEC E 472 [3] estabelece um conjunto de recomendações e de requisitos mínimos, e propõe os campos de aplicação para as misturas betuminosas recuperadas. Em termos gerais, aqueles requisitos traduzem as seguintes linhas para o processo de aplicação das misturas recuperadas: estabelecer limites de presença de matérias estranhas; evitar a aplicação, sem alterações, do ligante se demasiado envelhecido; controlar a granulometria e a dimensão máxima das partículas; avaliar a percentagem média de betume; limitar o teor em água do material fresado. Além disso, aquela especificação estabelece as camadas dos pavimentos e as taxas máxima de incorporação de misturas recuperadas (entre 10 e 50%) a admitir em cada caso.

Para outro tipo de RCD não estão ainda estabelecidas regras específicas, sendo geralmente necessário cumprir os requisitos estabelecidos para as misturas betuminosas convencionais.

3.5.2 Apreciação das Propriedades Obtidas em Casos de Estudo

Na bibliografia ([15], [16], [17]) é descrita habitualmente a utilização de agregados de betão britado, os quais incluem nalguns casos RCD de materiais cerâmicos (tijolos e telhas). Também é referido um caso de investigação no qual estudaram o uso de resíduos de produtos decorativos, à base de quartzo, utilizados na construção para misturas de camada de desgaste [18]. Em geral, dadas as propriedades dos RCD, a mistura de agregados não é constituída apenas por estes, sendo comum a inclusão de uma percentagem de agregados naturais de rocha britada.

Os agregados de betão britado e argamassa, por terem pasta ligante endurecida aderente aos constituintes pétreos do betão, têm geralmente uma absorção de água relativamente elevada, embora variável de caso para caso. Quando aqueles RCD têm uma componente de materiais cerâmicos, a absorção de água tende a ser ainda maior ([15], [19]). Podem apontar-se como exemplos daquela absorção os valores de 6,76% e 16,8% obtidos por Zhu *et al.* [15], respetivamente para partículas maiores que 4,75 mm e grãos até àquela dimensão (para o agregado calcário de controlo obtiveram 0,2% e 8,5% para as mesmas dimensões de partículas), sendo os RCD constituídos por cerca de 70% de betão britado, 29% de materiais cerâmicos e menos de 1% de outros constituintes.

Quando os agregados são porosos a percentagem ótima de betume, determinada pelo método de Marshall, tende a ser muito mais elevada nas misturas com RCD que no caso de misturas semelhantes que incorporam apenas agregado natural. Note-se que, apesar da quantidade de betume ser superior, a percentagem de betume efetivo é

sensivelmente a mesma, dada a considerável absorção de ligante [15]. Para reduzir o problema da excessiva absorção de betume, alguns autores têm estudado em laboratório processos de pré-revestimento da superfície dos agregados grossos com alguns produtos, tais como resina líquida de silicone [15] ou pasta de cimento de escórias [19]. Na prática, é mais habitual fazer-se uso de uma mistura de agregados de RCD e de rocha natural britada para obter misturas com uma absorção de betume aceitável. A utilização de maiores proporções de RCD na mistura betuminosa, mantendo a percentagem de betume, tende a produzir valores de VMA (vazios na mistura de agregados) mais baixos e porosidades ligeiramente mais altas ([16], [20]). Estas tendências podem ser explicadas pela maior absorção de betume quando a proporção de RCD é maior.

No que se refere à estabilidade e deformação de Marshall, têm sido obtidos valores semelhantes ou ligeiramente superiores para misturas que incorporam agregados de RCD em comparação com os medidos em misturas só com agregados naturais, embora nalguns casos de utilização de RCD tenha sido necessário utilizar percentagens de betume mais elevadas [15, 20]. Os resultados obtidos podem ser explicados pelo efeito da maior rugosidade e angulosidade dos RCD grossos, o que tende a aumentar a coesão da mistura à temperatura elevada (60°C) a que são efetuados os ensaios. Além disso, verifica-se que a utilização de agregados finos de RCD (por exemplo, pó de tijolo), em geral com menor massa volúmica que os agregados naturais, faz enrijecer a mistura, uma vez que existe um maior número de grãos da fração fina no mástique e, portanto, a área de contacto com o betume é superior [21].

No que se refere à sensibilidade à água, considerando varias metodologias de avaliação, têm-se observado a tendência para as misturas betuminosas híbridas com RCD e agregados naturais resistirem menos à ação da água que as misturas de controlo que incorporam apenas agregados naturais [15, 16, 19]. O aumento da taxa de incorporação de RCD faz geralmente aumentar a sensibilidade à água. Contudo, a tendência observada foi a oposta no trabalho realizado por Chen *et al* [21], no qual se substituiu filer calcário por pó de tijolo.

Em relação à resistência à deformação permanente, tem-se verificado que a forma angulosa e áspera das partículas grossas de RCD e o poder rigidificante das suas partículas finas propiciam geralmente uma boa resistência das misturas betuminosas [15, 16, 19]. Este efeito é mais notório nos ensaios realizados a temperaturas elevadas, como acontece geralmente nos vários tipos de ensaios de avaliação da resistência à deformação permanente [20].

O módulo de deformabilidade das misturas betuminosas varia em grande medida com as condições de solitação, particularmente com a temperatura. Todavia, verifica-se uma tendência para a diminuição do módulo com a incorporação na mistura betuminosa de agregados reciclados, mesmo quando integralmente de betão britado [16]. A variação referida tem sido a mesma para temperaturas baixas (da ordem de 5°C) e elevadas (cerca de 40°C), e para uma larga gama de frequências de carregamento, de 0,1 a 25 Hz [16]

Nalguns casos, como o atrás referido relativo ao uso de pó de tijolo no lugar do filer, verificou-se que a resistência à fadiga, melhorou, embora de forma não muito significativa [21].

4 ESTUDO EXPERIMENTAL DE MISTURAS AC 20 BASE COM AGREGADOS NATURAIS E RCD DE BETÃO BRITADO

4.1 Constituintes e Composições das Misturas Estudadas

Realizou-se um estudo experimental sobre duas misturas betuminosas a quente, típicas de camada de base, utilizando apenas agregados naturais calcários numa delas e uma percentagem de 60% de agregados de betão britado provenientes de RCD na outra. Os ensaios foram realizados paralelamente em ambas as composições, visando a comparação das suas características, de modo a avaliar a possibilidade da aplicação dos agregados de betão britado em misturas betuminosas do tipo AC 20 base. As misturas de agregados, com as curvas granulométricas que se ilustram na Figura 1, foram obtidas utilizando a combinação das frações disponíveis, da seguinte forma: 32% de brita calcária 10/20, 20% de brita calcária 4/12, 46,5% de pó 0/4 e 1,5 de filer comercial, para a mistura de referência; 60% de RCD de betão britado 0/20, 10% de brita calcária 10/20, 9,5% de brita calcária 4/12, 19% de pó 0/4 e 1,5 de filer comercial, para a mistura com RCD.

As propriedades determinadas para os agregados utilizados e o seu cotejo com os limites definido no CEEP são apresentados no Quadro 1. Dos parâmetros determinados, e tal como seria de esperar, destacam-se o valor

elevado de absorção de água (WA_{24}) e as massas volúmicas reduzidas dos RCD. Utilizou-se também um betume 50/70 de destilação direta no fabrico das misturas.

Aplicou-se o método de Marshall para a formulação das misturas, tendo-se obtido as percentagens ótimas de betume de 4,6% e de 4,7%, respetivamente, para a mistura betuminosa de referência (apenas com agregados naturais), e para a mistura híbrida com agregados reciclados e naturais.

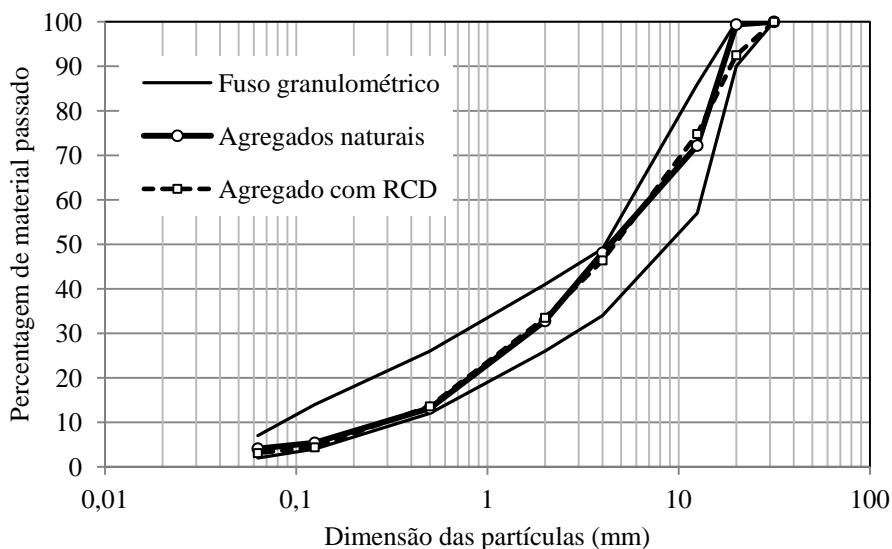


Fig.1. Curvas das misturas estudadas e fuso granulométrico para um AC 20 base

Quadro 1. Propriedades e requisitos dos agregados utilizados no estudo (NP EN 13043)

Propriedade	Massa volúmica (Mg/m^3)			WA_{24} (%)	FI (%)	SI (%)	MB_F (g/kg)
	ρ_a	ρ_{rd}	ρ_{ssd}				
Agregado calcário	2,735	2,686	2,703	0,685	10	14	---
Betão britado	2,430	2,127	2,252	5,943	14	9	0,8
Caderno de encargos da EP [13]							
Limite/ Categoria	$\pm 0,05 Mg/m^3$ do valor declarado			≤ 2	FI_{30}	ND	$MB_F 10$

4.2 Propriedades Volumétricas das Misturas Estudadas

Foram também realizados ensaios de caracterização das propriedades volumétricas das misturas, no âmbito do processo de formulação, tendo-se produzido provetes Marshall para o efeito. O betume e os agregados foram aquecidos a $160^\circ C$ e os provetes foram compactados com 75 pancadas por face, de acordo com a NP EN 12697-30. Os valores médios obtidos para as propriedades volumétricas determinadas resumem-se no Quadro 2.

Quadro 2. Propriedades volumétricas das misturas estudadas e requisitos de um AC 20 base

Propriedade	B. Máx. Teórica (Mg/m^3)	Baridade (Mg/m^3)	Porosidade (%)	VMA (%)
Agregados naturais	2,439	2,408	3,0	13,6
Agregados naturais + betão britado	2,395	2,242	7,2	17,5
Caderno de encargos da EP [13]				
Limite/Categoria	---	A declarar	$V_{min3}-V_{max6}$	VM_{Amin14}

Verifica-se que a mistura de referência apresentou propriedades volumétricas muito próximas dos valores mínimos especificados. No caso da mistura com agregados de betão britado, verificam-se valores da baridade relativamente baixos, porosidade e VMA com valores elevados. Os resultados obtidos seriam previsíveis, dada a

elevada porosidade dos agregados de betão britado. Só por si, as propriedades volumétricas obtidas no caso da mistura com RCD não devem ser impeditivas da sua utilização, devendo a avaliação das características mecânicas dar indicações complementares para apoiar a decisão.

4.3 Propriedades Mecânicas das Misturas Estudadas

Para avaliar as propriedades mecânicas das misturas estudadas realizaram-se ensaios de compressão Marshall (norma EN 12697-34:2004 + A1:2007), ensaios de avaliação da resistência à deformação permanente (*wheel-tracking*: EN 12697-22:2003 + A1:2007) e ensaios de sensibilidade à água – método A (prEN 12697-12:2008).

Na Figura 2 apresentam-se os resultados dos ensaios de compressão Marshall. Verifica-se que o AC 20 base com RCD conduziu a valores de estabilidade superiores e a valores de deformação ligeiramente inferiores aos obtidos para a mistura de referência. Embora, no caso da estabilidade se observe alguma dispersão dos resultados, verifica-se que para as percentagens ótimas de betume de 4,6% e de 4,7% utilizadas, respetivamente, para a mistura de referência e para a mistura com RCD, os valores da deformação cumprem os requisitos do CEEP, F2 e F4, assinalados na figura. Contudo, a estabilidade é um pouco superior ao limiar máximo (S_{max}) de 15 kN para a mistura com RCD. Note-se, no entanto, que o CEEP considera um segundo limite máximo de 21 kN para misturas com agregados siliciosos. Ora, no caso do betão britado, é notória a existência de areia siliciosa, como aliás acontece com frequência, o que permite considerar os resultados obtidos adequados.

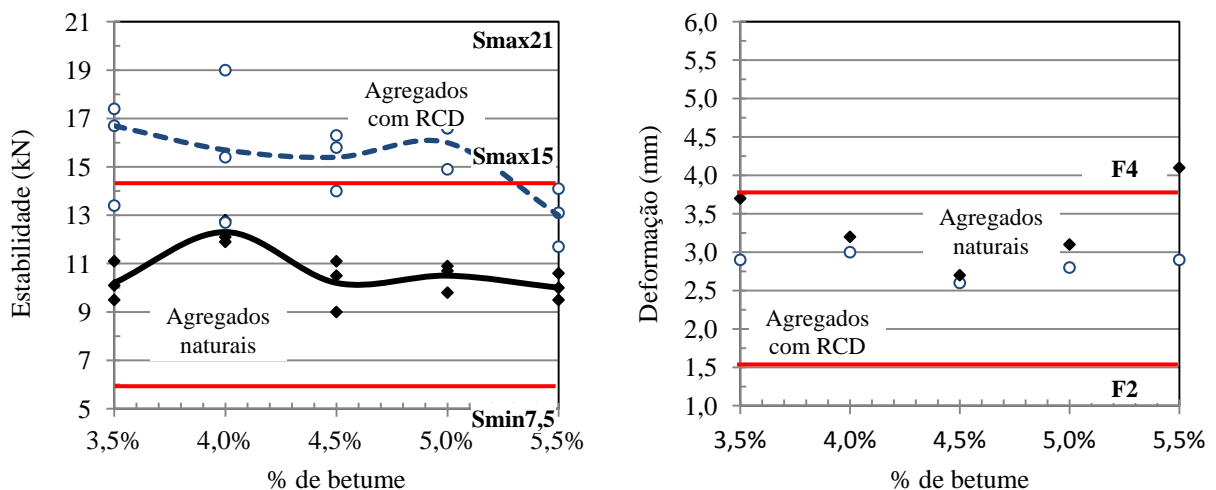
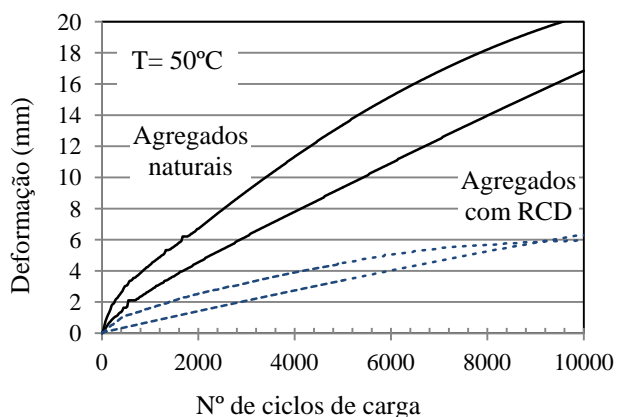


Fig.2. Resultados dos ensaios de compressão Marshall

Como complemento ao estudo das misturas betuminosas foram realizados ensaios de simulação em pista (*wheel tracking*). Produziram-se duas lajetas ($30 \times 30 \times 6 \text{ cm}^3$) para as misturas de referência e duas para a mistura com RCD, incorporando 4,6 e 4,7% de betume, respetivamente. As lajetas foram compactadas com um cilindro vibratório de pequenas dimensões, tendo-se obtido propriedades volumétricas muito semelhantes às anteriormente indicadas no Quadro 2. Tratando-se de materiais para camada de base, onde as temperaturas raramente atingem valores de 60°C , foi adotada uma temperatura de 50°C , considerada mais representativa, para a realização dos ensaios, tomando para condição de paragem 10000 ciclos de passagem da roda do equipamento ou 20 mm de profundidade de rodeira.

Nas lajetas com RCD observou-se uma profundidade de rodeira com cerca de 6 mm enquanto nas lajetas da mistura de referência aquela profundidade atingiu aproximadamente 19 mm de valor médio. Com base nas curvas deformação – número de ciclos registadas durante os ensaios calcularam-se os parâmetros PRD_{AIR} – percentagem de profundidade de rodeira e WTS_{AIR} – taxa de deformação em ensaio de pista ($\text{mm}/10^3$ ciclos de carga). Valores mais elevados destes indicadores traduzem uma menor resistência à deformação permanente (Figura 3).



	Ag. naturais	Ag. com RCD
PRD _{AIR} %	30,9	10,2
WTS _{AIR} mm/10 ³ ciclos de carga	1,82	0,44

Fig.3. Resultados dos ensaios de resistência à deformação permanente

A sensibilidade à água foi avaliada pela resistência à tração indireta (ITS), com os três provetes de controlo acondicionados ao ar a 20 °C e os outros três colocados sob pressão negativa e imersos em água, sendo estes posteriormente acondicionados em água a 40°C, por um período de 68 a 72 horas. Após o acondicionamento, os provetes foram sujeitos à compressão diametral (tração indireta), permitindo o cálculo da resistência conservada em tração indireta, ITSR.

Verificou-se que a resistência à ação da água da mistura com agregados naturais é muito boa (111%), embora mais elevada do que seria de esperar. A dispersão dos resultados, a que amostras pequenas tendem a conduzir, pode estar na origem do inesperado valor médio superior a 100%. Além disso, obtiveram-se valores de ITS superiores para os provetes com RCD “secos” que para os provetes com agregados naturais. No entanto, observou-se uma diminuição mais acentuada do parâmetro ITSR nos provetes com RCD, tendo-se obtido o valor de 81%, o que pode considerar-se um comportamento aceitável em termos de sensibilidade à água.

5 CONCLUSÕES

A informação disponível na bibliografia permite afirmar a incorporação de RCD em pavimentos rodoviários é útil do ponto de vista ambiental e até económico, e afigura-se tecnicamente factível, quer em camadas não ligadas, quer em camadas betuminosas. Para isso é imprescindível a demolição seletiva das construções e pavimentos rodoviários, de modo a dispor de materiais com as características adequadas para cada tipo de utilização. Os RCD com maior potencial para utilização em pavimentos rodoviários são os constituídos por resíduos de betão, argamassa, materiais cerâmicos, misturas betuminosas ou agregados.

O estudo experimental realizado permitiu confirmar a possibilidade de utilização de uma percentagem elevada (60%) de agregados de betão britado na produção de uma mistura betuminosa do tipo AC 20 base. As características volumétricas obtidas, nomeadamente a porosidade e o VMA, foram mais elevadas que os requisitos do CEEP. Tal como se referiu, a elevada porosidade do RCD utilizado, evidenciada por um elevado valor de absorção de água e uma baixa massa volúmica, explicam as propriedades volumétricas obtidas para a mistura. Apesar das propriedades volumétricas aparentemente inadequadas, a avaliação das características mecânicas permitiu verificar que a resistência à deformação permanente, bem como a estabilidade e a deformação Marshall foram melhores na mistura com RCD. Já a sensibilidade à água parece ser o aspeto mais fraco da mistura com RCD, o que sugere a utilização de agentes químicos de adesividade, quando tal se justifique.

Os resultados obtidos permitem concluir que os agregados de betão britado poderão ser utilizados como materiais de construção de pavimento rodoviários, nomeadamente em misturas betuminosas para aplicação em camadas de base, desde que o processo de fabrico e aplicação sejam convenientemente monitorizados.

6 REFERÊNCIAS

1. M. Botelho, *Resíduos de Construção e Demolição*. Verlag Dashöfer, Portugal, 2010.

2. F. Martinho, *Reciclagem de Pavimentos - Estado da Arte, Situação Portuguesa e Seleção do Processo Construtivo*, Tese de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil da F.C.T. da Universidade de Coimbra, Coimbra, 2004.
3. LNEC, *Guia para a Reciclagem de Misturas Betuminosas a Quente em Central*, Especificação LNEC E 472, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, 2009.
4. L. Pereira, S. Jalali, B. Aguiar, *Gestão dos Resíduos de Construção e Demolição*, Workshop “Sistemas Integrados de Gestão de Fluxos Específicos de Resíduos”, Instituto Nacional de Resíduos, Instituto Superior Técnico, Lisboa, 2004.
5. J. Ferreira, *Aplicação de Resíduos de Construção e Demolição (RCD) em Camadas de Sub-base Não ligadas de Estradas de Baixo Tráfego*, Tese de Mestrado em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico da Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2009.
6. G. Vieira, D. Dal Molin, F. Lima, Resistência e Durabilidade de Concretos Produzidos com Agregados Reciclados Provenientes de Resíduos de Construção e Demolição, *Revista Engenharia Civil*, Universidade do Minho, 19, 5-18, 2004.
7. F. Leite, *Comportamento Mecânico de Agregado Reciclado de Resíduo Sólido da Construção Civil em Camadas de Base e Sub-Base de Pavimentos*. Tese de Mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.
8. J. Ruivo, J. Veiga, *Resíduos de Construção e Demolição: Estratégia para um Modelo de Gestão*. Trabalho Final de Curso em Engenharia do Ambiente, Departamento de Engenharia Civil do IST da Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2004.
9. M. Mália, *Indicadores de Resíduos de Construção e Demolição*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico da Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa 2010.
10. LNEC, *Guia para a Utilização de Agregados Reciclados em Camadas Não Ligadas de Pavimentos*, Especificação LNEC E 473, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, 2009.
11. D. Grubba, A. Parreira, *Emprego de Agregado Reciclado de Concreto em Camadas de Base e Sub-base de Pavimentos*, Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, Departamento de Transportes, São Paulo, 2009.
12. F. Leite, R. Motta, K. Vasconcelos, L. Bernucci, Laboratory Evaluation of Recycled Construction and Demolition Waste for Pavements, *Construction and Building Materials*, 25, 2972–2979, 2011.
13. EP, *Caderno de Encargos Tipo Obra: 14.03 – Pavimentação*. Estradas de Portugal, Volume V: 03, Almada, 2011.
14. F. Martinho, A. Martinho, J. Gonçalves, Utilização de Resíduos da Construção e Demolição (RC&D) em Arruamentos Urbanos – O Caso de Troia. *Atas do V Congresso Rodoviário Português – Estrada 2008*, Estoril, 2008.
15. J. Zhu, S. Wu, J. Zhong, D. Wang, Investigation of Asphalt Mixture Containing Demolition Waste Obtained from Earthquake-damaged Buildings, *Construction and Building Materials* 29, 466–475, 2012.
16. J. Mills-Beale, Z. You, The Mechanical Properties of Asphalt Mixtures with Recycled Concrete Aggregates, *Construction and Building Materials*, 24, 230–235, 2010.
17. A. Aljassar, K. Al-Fadala, M. Ali, Recycling Building Demolition Waste in Hot-mix Asphalt Concrete: a case study in Kuwait, *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 7, 112-115, 2005.
18. M. Rubio, F. Moreno, A. Belmonte, A. Menéndez, Reuse of Waste Material from Decorative Quartz Solid Surfacing in the Manufacture of Hot Bituminous Mixes, *Construction and Building Materials*, 24, 610–618, 2010.
19. C-H. Lee, J-C. Dub, D-H. Shen, Evaluation of Pre-coated Recycled Concrete Aggregate for Hot Mix Asphalt, *Construction and Building Materials*, 28, 66–71, 2012.
20. D. Shen, J. Du, Evaluation of Building Materials Recycling on HMA Permanent Deformation, *Construction and Building Materials*, 18, 391–397, 2004.
21. M. Chen, J-t. Lin, S-p. Wua, C-h Liu, Utilization of Recycled Brick Powder as Alternative Filler in Asphalt Mixture, *Construction and Building Materials*, 25, 1532–1536, 2011.