

CATÁLOGO DE PAVIMENTOS COM RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO PARA ESTRADAS E ARRUAMENTOS DE BAIXO TRÁFEGO

José Neves¹, Ana Martins² e Ana Cristina Freire³

¹ Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, CESUR, CERIS, Departamento de Engenharia Civil, Arquitetura e Georecursos, Avenida Rovisco Pais, 1049-001 Lisboa, Portugal

email: jose.manuel.neves@tecnico.ulisboa.pt <https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/homepage/ist12932>

² Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Avenida Rovisco Pais, 1049-001 Lisboa, Portugal

³ Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Departamento de Transportes, Avenida do Brasil, 101, 1700-066 Lisboa, Portugal

Sumário

O objetivo do artigo é apresentar estruturas tipo de pavimentos constituídos, nas camadas não ligadas de base e de sub-base, por: (1) agregado reciclado constituído por resíduos mistos provenientes da britagem de alvenaria e de betão; (2) agregado reciclado resultante da mistura de resíduos provenientes de misturas betuminosas, recuperadas por fresagem, com agregado natural britado de granulometria extensa. Estas soluções de pavimentação são apresentadas na forma de catálogo, em função do volume de tráfego pesado e da qualidade da fundação. O catálogo destina-se à conceção de pavimentos novos com Resíduos de Construção e Demolição de estradas e arruamentos de baixo tráfego.

Palavras-chave: Estrada; pavimento; catálogo; dimensionamento; RCD.

1 INTRODUÇÃO

Este artigo tem como objetivo apresentar um catálogo de estruturas tipo de pavimentos com aplicação de agregados reciclados, provenientes de Resíduos de Construção e Demolição (RCD), nas camadas não ligadas de base e de sub-base. Consequentemente, pretende-se que este catálogo sirva de apoio e incentivo à conceção de soluções que valorizem os RCD e possam ser adotadas em obras novas, de alargamento ou de reconstrução de pavimentos existentes de estradas e arruamentos de baixo tráfego. O catálogo não é aplicável no reforço de pavimentos existentes e na pavimentação de obras de arte.

As atividades associadas à construção, conservação e reabilitação de pavimentos apresentam um grande potencial de geração e utilização de resíduos. A reciclagem destes materiais é um contributo de grande importância à sustentabilidade ambiental das infraestruturas de transporte, tal como de toda a atividade de construção em geral. Os RCD são um tipo de resíduos que existe em grande abundância e que tem vindo a ser utilizado em aterros, camadas não ligadas de fundação, sub-base e base dos pavimentos, e até em camadas ligadas, como é o caso das misturas betuminosas.

Através da transposição de diretivas europeias, Portugal tem procurado promover a valorização técnica, económica e ambiental dos resíduos em geral e estimular o aproveitamento de resíduos específicos com elevado potencial de valorização. Como exemplo, refere-se o caso recente do Decreto-Lei nº 73/2011 que transpôs a Diretiva nº 2008/98/CE e alterou o regime geral da gestão de resíduos de vários diplomas legais, nomeadamente, o Decreto-Lei nº 46/2008. No que diz respeito aos RCD e apesar das diretivas publicadas, a União Europeia não emanou legislação específica. Estas diretivas estabelecem orientações aos estados membros, contudo permitem que cada país defina diferentes critérios na caracterização e aplicação dos materiais. Neste sentido, o LNEC desenvolveu um conjunto de especificações que estabelecem as condições de utilização de materiais reciclados provenientes de RCD em obras de engenharia civil.

Em Portugal, a utilização de RCD em pavimentos tem estado até à data apenas enquadrada pela especificação LNEC E 473 [1]. Esta especificação define o campo de aplicação dos agregados reciclados em camadas não ligadas de pavimentos (camadas de base e de sub-base) através da classificação e categorização do agregado reciclado e tendo em conta, também, o tráfego médio diário de pesados por via. Contudo, as orientações aí expressas necessitam de ser completadas de modo a apoiar ainda mais a conceção de soluções de pavimentação por parte dos intervenientes no processo (donos de obra, projetistas, construtores). Ao contrário da realidade de outros países, como é o caso de Espanha onde já existe um guia de aplicação de RCD em pavimentos [2], em Portugal não existe ainda qualquer catálogo destinado à conceção de pavimentos com RCD.

O Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) e o Instituto Superior Técnico (IST) desenvolveram de 2010 a 2014 o projeto SUPREMA: Aplicação Sustentável de Resíduos de Construção e Demolição (RCD) em Infra-estruturas Rodoviárias [3]. Este projeto permitiu investigar o comportamento de trechos experimentais, com RCD nas camadas não ligadas de pavimento, através de ensaios e leitura da instrumentação realizada no terreno. Com base nos resultados do projeto e no Manual de Conceção de Pavimentos para a Rede Rodoviária Nacional (MACOPAV) [4], foi possível estabelecer um catálogo de pavimentos destinado a estradas e arruamentos de baixo tráfego. As estruturas tipo do catálogo são caracterizadas por camadas não ligadas de base e de sub-base constituídas por: (1) agregado reciclado constituído por resíduos mistos provenientes da britagem de alvenaria e de betão; (2) agregado reciclado resultante da mistura de resíduos, provenientes de misturas betuminosas, recuperadas por fresagem, com agregado natural britado de granulometria extensa.

2 ENQUADRAMENTO

O projeto SUPREMA – Aplicação Sustentável de Resíduos de Construção e Demolição (RCD) em Infra-estruturas Rodoviárias – foi financiado pelo programa de investigação e desenvolvimento nacional (PTDC/ECM/100931/2008) da Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT), do Ministério da Educação e Ciência. Neste projeto foi estudada a aplicação sustentável de materiais reciclados provenientes de RCD em infraestruturas rodoviárias, através da viabilização da sua utilização em camadas granulares não ligadas de base e de sub-base e de leito do pavimento, com os seguintes objetivos [3]:

- Avaliação das características geomecânicas e geoambientais de diferentes tipos de RCD, função da origem, metodologia de triagem e composição final.
- Análise do comportamento de RCD enquanto materiais granulares não ligados e sua comparação com os materiais naturais.
- Determinação dos parâmetros a utilizar no dimensionamento de pavimentos, com a aplicação de RCD.
- Estudo dos aspetos construtivos a desenvolver e aplicar, função do tipo de RCD, para a utilização destes materiais em camadas não ligadas de base e de sub-base e de leito do pavimento.

No projeto SUPREMA foram selecionados três tipos de RCD, descritos no Quadro 1. Por sua vez, o Quadro 2 apresenta as proporções dos principais componentes destes materiais, determinadas segundo a norma EN 933-11.

Os materiais reciclados provenientes dos RCD foram caracterizados em laboratório quanto à sua constituição e propriedades geométricas, químicas e de comportamento mecânico [3]. Para a caracterização do desempenho dos materiais reciclados em obra, foram construídos quatro trechos experimentais num parque industrial do Seixal, distrito de Setúbal. O pavimento destes trechos experimentais foi construído com uma camada superior de mistura betuminosa em macadame betuminoso do tipo AC 20 bin 50/70, com 7 cm de espessura, e com uma camada inferior de material granular, com 30 cm de espessura. de constituição variável em cada trecho: foi utilizado material natural no trecho de referência e cada um dos RCD em estudo nos restantes três trechos. A aplicação da mistura betuminosa fresada foi viabilizada através da sua combinação com agregado natural. Durante a construção dos trechos experimentais, procedeu-se à instrumentação com extensómetros e células de carga [5,6].

Durante e após a construção dos trechos experimentais, foram efetuadas campanhas de avaliação da capacidade de carga com o defletómetro de impacto (FWD). Os ensaios, a par da leitura da instrumentação, permitiram avaliar o comportamento mecânico das diferentes camadas do pavimento e da fundação [7], nomeadamente das camadas constituídas pelos materiais reciclados. Os módulos de deformabilidade, daí resultantes, foram utilizados no dimensionamento das camadas de pavimento propostas no catálogo.

Quadro 1. Descrição dos RCD estudados no projeto SUPREMA

Identificação	RCD	Descrição
BBM	Betão britado misto	Resíduos provenientes da britagem de alvenaria e de betão
MBB	Mistura betuminosa britada	Resíduos provenientes da britagem de misturas betuminosas, recuperados de pavimentos por fresagem
MBF	Mistura betuminosa fresada	Resíduos provenientes de misturas betuminosas, recuperados por fresagem

Quadro 2. Proporção dos constituintes dos RCD estudados no projeto SUPREMA (adaptado de [3,8])

Constituintes		BBM	MBB	MBF
R _c [%]	Betão, produtos de betão e argamassas	67,6	19	0
R _u [%]	Agregados não ligados, pedra natural, agregados tratados com ligantes hidráulicos	16,5	10	0
R _a [%]	Materiais betuminosos	1,9	69,1	99
R _b [%]	Elementos de alvenaria de materiais argilosos (tijolo, ladrilhos, telhas, etc.), elementos de alvenaria de silicatos de cálcio e betão celular não flutuante	13,2	1,8	0
R _g [%]	Vidro	0,3	0	0
FL [cm ³ /kg]	Material flutuante	0	0,1	0
X [%]	Outros materiais coesivos (p. ex. solos argilosos), plásticos, borrachas, metais (ferrosos e não ferrosos); madeira não flutuante e estuque	0,1	0	1

3 METODOLOGIA

3.1 Materiais

Nas camadas não ligadas de base e de sub-base das estruturas de pavimento consideradas no catálogo são aplicados os seguintes agregados reciclados estudados no Projeto SUPREMA [3]:

- Betão britado misto (BBM) – agregado reciclado constituído exclusivamente por resíduos mistos provenientes da britagem de alvenaria e de betão (Fig. 1a).
- Mistura composta por 30% de MBF e 70% de ABGE (COMP) – agregado reciclado constituído por resíduos provenientes de misturas betuminosas, recuperados por fresagem (MBF), e misturados com agregado britado calcário de granulometria extensa (ABGE) (Fig. 1b).

Estes agregados reciclados devem ser preferencialmente de classe C e de categoria AGER1 segundo a classificação LNEC E 473 [1], conforme analisado por Martins [8].

Nas camadas superiores, o catálogo prevê a aplicação de materiais betuminosos: misturas betuminosas do tipo betão betuminoso (camadas de desgaste e de ligação) ou revestimento superficial duplo. Todos os materiais utilizados em obra, cuja conceção seja baseada nos pavimentos do catálogo apresentado, deverão cumprir com as especificações do Caderno de Encargos Tipo Obra (CETO) da Infraestruturas de Portugal [9].

3.2 Fundação

A fundação do pavimento inclui não só a camada de leito do pavimento mas também os terrenos subjacentes que condicionam o comportamento do pavimento, em aterro ou escavação. Em [4] são estabelecidas quatro classes de fundação do pavimento (F1 a F4) com base no módulo de deformabilidade, obtidas pela conjugação adequada da qualidade dos materiais utilizados no leito do pavimento e nas camadas subjacentes da terraplenagem. Esta qualidade dos materiais é estabelecida através do Índice Californiano de Capacidade de Carga (CBR) [4].



(a) BBM



(b) COMP

Fig. 1. Agregados reciclados [3]

Para a fundação dos pavimentos do presente catálogo considerou-se a possibilidade de existirem duas das classes de fundação previstas em [4]: F2 e F3. Estas classes de fundação são caracterizadas pelo valor de cálculo do módulo de deformabilidade (E) de 60 MPa e 100 MPa, respetivamente [4].

De forma a garantir condições adequadas de homogeneidade e de suporte à plataforma de apoio ao pavimento, entre outros objetivos, recomenda-se a construção de camada de leito do pavimento [10,11]. A avaliação global das características dos materiais, realizada no decorrer do projeto SUPREMA, permitiu comparar o BBM e o COMP a um solo de classe de terreno S4 ($CBR > 20$). Desta forma, considera-se que é viável também a aplicação destes materiais em camada de leito do pavimento, tal como previsto na especificação LNEC E 474 [12].

O Quadro 3 sintetiza as principais condições de fundação possíveis no enquadramento das considerações feitas anteriormente, à semelhança da abordagem apresentada no MACOPAV. Neste quadro são indicadas as espessuras das camadas de leito do pavimento com os materiais, genericamente designados por RCD (BBM ou COMP), em função da classe do terreno natural existente em aterro ou em escavação (S2, S3 e S4) e da classe de fundação pretendida (F2 e F3). De notar que as condições de fundação estão à partida garantidas em determinadas circunstâncias. Noutros casos, a ausência de informação significa que essas condições de fundação não são admissíveis.

Quadro 3. Condições de fundação (adaptado de [4])

Classe de terreno		Classe de fundação	
		F2	F3
		$50 < E \leq 80$ (MPa)	$80 < E \leq 150$ (MPa)
S2	$5 \leq CBR < 10$	15 cm de RCD	
S3	$10 \leq CBR < 20$	(a)	20 cm de RCD
S4	$CBR \geq 20$		(a)

(a) Em escavação, a fundação deve ser escarificada e recompactada na profundidade necessária à garantia de uma espessura final de 30 cm bem compactada; em aterro as condições de fundação estão garantidas.

3.3 Tráfego

As condições de tráfego consideradas no catálogo foram estabelecidas tendo por base as classes de tráfego do MACOPAV [4]. Estas classes são definidas para intervalos de variação do tráfego médio diário anual de veículos pesados, por sentido, na via mais solicitada e no ano de abertura ($TMDA_p$). Tendo em conta que o âmbito de aplicação do catálogo são as vias de baixo tráfego, consideraram-se as classes de tráfego T6 e T7 [4], sendo que esta última foi subdividida em duas subclasses (T7a e T7b) conforme é apresentado no Quadro 4.

Os valores da taxa média de crescimento anual do tráfego e do fator de agressividade considerados para a classe de tráfego T6 estão de acordo com o MACOPAV: 3% e 2%, respetivamente. Para a classe de tráfego T7, o MACOPAV [4] recomenda a realização de estudo específico. Optou-se por considerar uma taxa média de

crescimento anual do tráfego de 2%, baseada no Guia espanhol (GERD) [2], e um fator de agressividade igual ao da classe T6 ($\alpha = 2$) [4].

O Quadro 4 sintetiza as classes de tráfego a considerar na consulta do catálogo. Estas classes correspondem predominantemente a casos de vias urbanas (arteriais, distribuidoras principais, distribuidoras locais ou de acesso local) e de vias da rede rodoviária municipal. Tendo em conta este enquadramento do tráfego, o âmbito de aplicação do catálogo também pode ser alargado ao caso de caminhos paralelos, vicinais e estradas florestais.

Quadro 4. Classes de tráfego

Classe de tráfego	TMDA _p
T7a	TMDA _p < 25
T7b	25 ≤ TMDA _p < 50
T6	50 ≤ TMDA _p < 150

3.4 Conceção e dimensionamento

As estruturas de pavimento propostas no catálogo foram concebidas tendo por base: (1) o manual português MACOPAV [4], (2) a especificação LNEC E 473 [1], (3) o guia espanhol [2] e, naturalmente, (4) a experiência portuguesa de construção de pavimentos.

O catálogo contempla pavimentos flexíveis com camadas de base e sub-base granulares, onde podem ser aplicados os materiais BBM, COMP e ABGE. As camadas superiores são constituídas por betão betuminoso (do tipo AC 14 surf 35/50 na camada de desgaste e AC 20 bin 35/50 na camada subjacente) ou por revestimento superficial duplo. Para determinadas condições de tráfego e de fundação, o catálogo considera também estradas não revestidas.

O dimensionamento empírico-mecanicista dos pavimentos do catálogo foi realizado segundo duas metodologias: (1) metodologia da Shell, recorrendo ao programa computacional BISAR, de utilização corrente em Portugal [13]; (2) metodologia da AASHTO (*American Association of State Highway and Transportation Officials*), em complemento, com recurso ao *AASHTOWare Pavement ME Design* [14].

Em relação às condições climáticas, as cidades de Beja, Lisboa, Coimbra e Porto foram selecionadas como representativas das diferentes regiões do país. A abordagem dos dados do clima relativos a estas cidades (temperatura, precipitação e velocidade do vento) foi adaptada a cada uma das metodologias utilizada no dimensionamento das estruturas de pavimento (Shell e AASHTO) [8].

No dimensionamento pela metodologia da Shell, a avaliação do comportamento das estruturas de pavimento foi realizada para os estados limites de ruína normalmente considerados em pavimentos flexíveis: fendilhamento por fadiga, relacionado com a extensão de tração na base das camadas betuminosas; e deformação permanente, relacionada com a extensão vertical de compressão no topo do solo de fundação. Os modelos de degradação utilizados na análise destes estados limites de ruína foram os propostos pela Shell [13,15].

As características mecânicas das camadas não ligadas de agregados naturais e reciclados foram estabelecidas com base nos resultados do projeto SUPREMA [3] e nas recomendações preconizadas pelo MACOPAV. Relativamente às misturas betuminosas, o módulo de deformabilidade foi determinado pelo método provisional da Shell, em função da temperatura e das propriedades mais expectáveis para o betume e para a mistura betuminosa [13,15]. Para os critérios de dimensionamento em análise, procedeu-se à estimativa do dano à fadiga e às deformações permanentes para 10 e 20 anos.

Após a confirmação do dimensionamento pela metodologia da Shell, as estruturas de pavimento do catálogo foram analisadas pela metodologia do MEPDG (*Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide*) da AASHTO [14]. A análise do comportamento dos pavimentos foi estabelecida para as seguintes degradações: deformação permanente total, fendilhamento tipo pele de crocodilo e irregularidade longitudinal avaliada através do IRI (*International Roughness Index*).

As soluções de pavimentação do catálogo foram validadas não só em relação ao limite do dano estrutural (método da Shell), mas também em relação a limites de desempenho em termos de deformações e fendilhamento (método da AASHTO) [8].

4 CATÁLOGO DE ESTRUTURAS DE PAVIMENTO

O catálogo de estruturas de pavimento foi organizado em função do tipo de agregado reciclado a utilizar (BBM e COMP) e do período de dimensionamento (10 e 20 anos) [8]:

- Nas Figuras 2 e 3 são apresentadas as estruturas tipo com utilização de BBM e COMP, respetivamente, para o período de dimensionamento de 10 anos.
- Nas Figuras 4 e 5 são apresentadas as estruturas tipo com utilização de BBM e COMP, respetivamente, para o período de dimensionamento de 20 anos.

As estruturas do catálogo, de aplicação nacional, devem ser entendidas como orientadoras para as condições em que estão enquadradas, sabendo que o seu dimensionamento foi realizado para as situações mais condicionantes. Em qualquer caso, a escolha da estrutura de pavimento mais adequada, para determinado tipo de agregado reciclado, é baseada diretamente na classe de tráfego e na classe de fundação, mas também deve ter em consideração todas as condicionantes relevantes da obra. A aplicação das estruturas do catálogo só é viável se forem verificados todos os pressupostos assumidos no seu dimensionamento (características de tráfego, condições de fundação, condições climáticas e características dos materiais de fundação). Entre outras condicionantes igualmente importantes, considera-se que é fundamental garantir sempre adequadas condições de drenagem (superficial e profunda) e de estabilidade geotécnica de aterros e escavações.

Em geral, considera-se que as soluções de pavimentação para 10 anos devem ser as privilegiadas, atendendo ao desempenho expectável e às limitações associadas aos processos construtivos e de controlo de qualidade para o tipo de vias rodoviárias em causa. No entanto, constatou-se no processo de dimensionamento que para a classe de fundação F3 pode ser admissível um período de dimensionamento superior (20 anos). Contudo, para além de outros critérios não só de natureza técnica, a decisão sobre a solução de pavimentação mais adequada deve ser sempre baseada na análise do ciclo de vida do pavimento tendo em conta critérios económicos e ambientais.

Nos catálogos estabelecidos para o período de dimensionamento de 10 anos são apresentadas, nalguns casos, duas estruturas de pavimento. A diferenciação destas estruturas reside essencialmente no número de camadas de aplicação dos agregados reciclados. A quantidade disponível do agregado reciclado pode ser um dos critérios na escolha do pavimento a construir. Em qualquer caso, recomenda-se o limite máximo de duas camadas não ligadas de agregado reciclado, contabilizando-se também a camada de leito do pavimento para este efeito.

As soluções de pavimentação apresentadas nas Figuras 4 e 5 para 20 anos são as que correspondem a um maior consumo de agregado reciclado. O catálogo contempla também pavimentos com camada de base, de igual espessura, em agregado natural (ABGE).

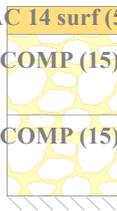
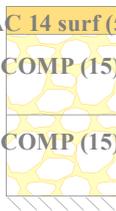
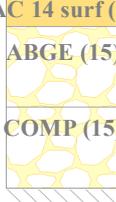
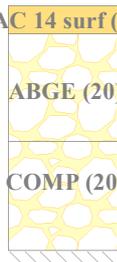
Para certas condições de tráfego e de qualidade da fundação, foi ainda analisada a viabilidade de estruturas de pavimento com camada não revestida (camada de base em agregado natural) ou com revestimento superficial duplo (RSD) (camada de base em agregado reciclado). Estas soluções não são recomendáveis nas seguintes situações: (a) locais onde é previsível a existência de ações tangenciais elevadas, como por exemplo parques de estacionamento; (b) situações de traçado onde a inclinação da rasante seja superior a 4 %; (c) zonas aluvionares sujeitas a inundações e outros locais onde as condições de drenagem sejam deficientes. Nas situações em que a inclinação da rasante é acentuada, recomenda-se a construção de camada de desgaste: em revestimento superficial duplo, para inclinação da rasante no intervalo de 4 % a 10 %; em betão betuminoso AC 14 surf 35/50, com espessura mínima de 4 cm, para inclinação da rasante superior a 10 %.

Como exemplo de aplicação do catálogo, considere-se a construção de uma estrada municipal em Leiria, admitindo que o tráfego de veículos pesados, no ano de abertura, seria enquadrado na classe de tráfego T7a e que a classe de fundação seria F2, numa zona de terrenos locais de natureza arenosa. Para a execução desta estrada seria utilizado agregado reciclado proveniente da britagem de alvenaria e de betão (COMP), de classe C e categoria AGER1 segundo a especificação LNEC E 473 [1]. A consulta da Figura 2 indica, para estas condições, uma estrutura de pavimento com agregado reciclado em camadas de base e de sub-base com 20 cm de espessura. Caso a disponibilidade de COMP não o permitisse, a camada de base poderia ser em ABGE com igual espessura. Em ambas as soluções, o pavimento teria camada de desgaste em AC14 surf 35/50, de 5 cm. De notar que numa situação real, a aplicação do catálogo a este exemplo deveria ser enquadrada por todas as condicionantes da obra que seria necessário obrigatoriamente conhecer em fase de execução, para total validação da solução proposta.

Tráfego	T7a	T7a	T7b	T6
Fundação	(camada não revestida)			
F2		AC 14 surf (5) AC 20 bin (5) BBM (20) BBM (20)	AC 14 surf (5) AC 20 bin (7) BBM (20) BBM (20)	
		AC 14 surf (5) ABGE (20) BBM (20)	AC 14 surf (5) AC 20 bin (7) ABGE (20) BBM (20)	
F3	RSD BBM (15) BBM (15)	AC 14 surf (5) BBM (15) BBM (15)	AC 14 surf (5) BBM (20) BBM (20)	AC 14 surf (5) AC 20 bin (7) BBM (20) BBM (20)
	ABGE (15) BBM (15)	AC 14 surf (5) ABGE (15) BBM (15)	AC 14 surf (5) ABGE (15) BBM (15)	AC 14 surf (5) AC 20 bin (5) ABGE (20) BBM (20)

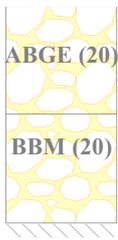
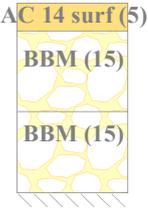
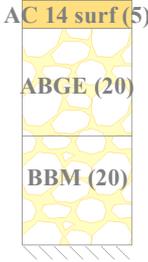
(espessura das camadas em cm)

Fig. 2. Estruturas de pavimento com utilização de BBM, para 10 anos

Tráfego	T7a (camada não revestida)	T7a	T7b	T6
F2				
F3	 	 	 	 

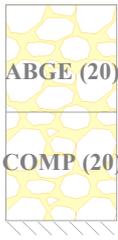
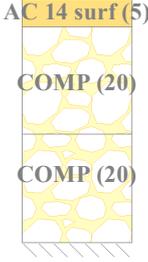
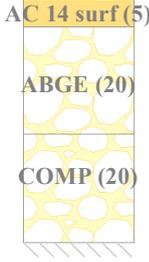
(espessura das camadas em cm)

Fig. 3. Estruturas de pavimento com utilização de COMP, para 10 anos

Tráfego	T7a	T7a	T7b	T6
Fundação	(camada não revestida)			
F3				

(espessura das camadas em cm)

Fig. 4. Estruturas de pavimento com utilização de BBM, para 20 anos

Tráfego	T7a	T7a	T7b	T6
Fundação	(camada não revestida)			
F3				

(espessura das camadas em cm)

Fig. 5. Estruturas de pavimento com utilização de COMP, para 20 anos

5 CONCLUSÕES

Neste artigo foi apresentado um catálogo, de âmbito nacional, de estruturas tipo de pavimentos flexíveis com utilização de RCD nas camadas não ligadas de base e sub-base: agregado reciclado constituído exclusivamente por resíduos mistos provenientes da britagem de alvenaria e de betão, designado por BBM; agregado reciclado constituído por 30% de resíduos provenientes de misturas betuminosas, recuperados por fresagem (MBF), e misturados com 70% de agregado britado calcário de granulometria extensa (ABGE), designado por COMP. Nas camadas superiores é aplicado betão betuminoso ou revestimento superficial duplo. Admite-se ainda a hipótese das camadas serem não revestidas, em condições especiais de fundação e de tráfego.

As estruturas tipo de pavimento propostas no catálogo foram concebidas tendo como base principal o MACOPAV [4] e a experiência portuguesa das últimas décadas de intensa atividade de construção rodoviária, mas também as orientações específicas da especificação LNEC E 473 [1] e do guia espanhol [2] para a aplicação de RCD. Para a validação do comportamento mecânico dos agregados reciclados foi fundamental a experiência e os resultados obtidos no projeto SUPREMA [3,7], através da instrumentação e observação de trechos experimentais onde foram aplicados estes mesmos RCD em camadas não ligadas.

O dimensionamento empírico-mecanicista dos pavimentos do catálogo foi realizado segundo as metodologias da Shell e da AASHTO, com recurso aos programas computacionais BISAR e AASHTOWare, respetivamente, e foi sempre estabelecido para as situações mais condicionantes [8].

O presente catálogo destina-se à conceção de soluções de pavimentação com valorização de RCD, para aplicação em obras novas, de alargamento ou de reconstrução de pavimentos existentes de estradas e arruamentos de baixo tráfego. O catálogo não tem aplicação em obras de reforço de pavimentos existentes ou de pavimentação de obras de arte. Por último, pretende-se que o catálogo seja útil à tomada de decisões no âmbito da sua aplicação e, consequentemente, fomente a utilização sustentável de RCD na construção rodoviária.

6 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT), do Ministério da Economia e do Emprego, o apoio financeiro concedido ao projeto PTDC/ECM/100931/2008 – SUPREMA – *Aplicação Sustentável de Construção e Demolição Materiais Reciclados (RCD) em Infra-Estruturas Rodoviárias*. Também são devidos agradecimentos à empresa Ambigroup, SGPS, SA, pelo fornecimento dos materiais estudados e pela disponibilização do local e dos meios necessários à construção dos trechos experimentais.

7 REFERÊNCIAS

1. LNEC, E 473, *Guia para a utilização de agregados reciclados em camadas não- ligadas de pavimentos*, LNEC, Lisboa, 2009.
2. GERD, *Guía española de áridos reciclados procedentes de residuos de construcción y demolición (RCD)*, Asociación Española de Gestores de Residuos de Construcción y Demolición, 2011.
3. A. C. Freire, J. Neves, A. Roque, I. Martins, M.L. Antunes, G. Faria, *Suprema - Aplicação Sustentável de Resíduos de Construção e Demolição (RCD) em Infra-estruturas Rodoviárias*, Relatório de Progresso do Projeto PTDC/ECM/100931/2008, Relatório 159/2013 - DT/NIRA, LNEC, Lisboa, 2013.
4. JAE, *MACOPAV - Manual de Concepção de Pavimentos para a Rede Rodoviária Nacional*, Junta Autónoma de Estradas, Almada, 1995.
5. A. C. Freire, J. Neves, A. Roque, I. Martins, M.L. Antunes, G. Faria, *Aplicação de Resíduos de Construção e Demolição (RCD) em Pavimentos Rodoviários*, *Proc. 13º Congresso Nacional de Geotecnia*, LNEC, Lisboa, 2012, Sociedade Portuguesa de Geotecnia.
6. A. C. Freire, J. Neves, A. Roque, I. Martins, M.L. Antunes, G. Faria, *Aplicação de resíduos de construção e demolição (RCD) em camadas granulares de pavimentos rodoviários validada em trecho piloto*, *Proc. 7º Congresso Rodoviário Português*, LNEC, Lisboa, 2013, Centro Rodoviário Português.
7. R. Simões, *Estudo do comportamento de Resíduos de Construção e Demolição aplicados em camadas não ligadas de pavimentos*, Dissertação de mestrado, Instituto Superior técnico, Universidade de Lisboa, 2013.
8. A. R. Martins, *Proposta de catálogo de pavimentos com resíduos de construção e demolição para estradas de baixo tráfego*, Dissertação de mestrado, Instituto Superior técnico, Universidade de Lisboa, 2015.
9. IP, *CETO – Caderno de Encargos Tipo Obra, Pavimentação*, Infraestruturas de Portugal, Almada, 2014.
10. M. Prates, *Os estudos geológico-geotécnicos e a sua importância no projecto rodoviário*, *Proc. 6º Congresso Nacional de Geotecnia*, pp. 809-820, Lisboa, 15-18 Setembro 1997, Sociedade Portuguesa de Geotecnia.
11. F. Branco, *A interface entre as terraplenagens e o pavimento nas estradas e aeródromos*, Memória N°750, LNEC, Lisboa, 1990.
12. LNEC, E 474, *Guia para a utilização de agregados reciclados provenientes de resíduos de construção e demolição em aterro e camada de leito de infra-estruturas de transporte*, LNEC, Lisboa, 2009.
13. Shell, *Shell Pavement Design Manual: Asphalt Pavements and Overlays for Road Traffic*, Shell International Petroleum Company, 1978.
14. American Association of State Highway and Transportation Officials, *Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures*, Final Report, NCHRP Project 1-37A. TRB, National Research Council, Washington, D.C., 2004.
15. F. Branco, P Pereira, L Picado-Santos, *Pavimentos Rodoviários*, Almedina, Coimbra, 2005.