



INCORPORAÇÃO DE AGREGADOS RECICLADOS NA REABILITAÇÃO DE PAVIMENTOS DE ESTRADAS DE ELEVADO TRÁFEGO.

ESTUDO DE CASO DO ITINERÁRIO IC2/EN1 EM PORTUGAL

Anabela Martins¹, José Neves², Paulo Coelho³, Margarida Gonçalves⁴, José Santos⁵, José Almeida⁶

¹ Infraestruturas de Portugal S.A., Almada, Portugal, anabela.martins@infraestruturasdeportugal.pt

² CERIS, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Lisboa, Portugal, jose.manuel.neves@tecnico.ulisboa.pt

³ CITTA, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade de Coimbra, Coimbra, Portugal, pac@dec.uc.pt

⁴ Infraestruturas de Portugal S.A., Almada, Portugal, margarida.goncalves@infraestruturasdeportugal.pt

⁵ Infraestruturas de Portugal S.A., Almada, Portugal, jose.cmsantos@infraestruturasdeportugal.pt

⁶ Infraestruturas de Portugal S.A., Almada, Portugal, jose.falmeida@infraestruturasdeportugal.pt

Sumário

Com a inevitabilidade de projetar, implementar e conservar infraestruturas cada vez mais sustentáveis e resilientes surge um grande desafio à engenharia de pavimentos que é preconizar soluções de Reabilitação/Beneficiação de pavimentos com a máxima taxa de reutilização dos materiais existentes na estrada e com a mínima taxa de novos recursos. Neste contexto uma das alternativas é a substituição de agregados naturais por agregados reciclados, provenientes da própria estrada ou do setor da construção ou até de outros setores da economia. O uso, destes novos materiais, acarreta grandes desafios uma vez que o conhecimento sobre as suas características, comportamento e desempenho ainda estão numa fase embrionária em particular em infraestruturas de elevadas solicitações. Neste trabalho apresenta-se a reabilitação de um troço do IC2(EN1), via estruturante em Portugal caracterizado por tráfego pesado muito elevado, e constituído por pavimento rígido que foi transformado em pavimento semirrígido de estrutura inversa com incorporação de agregados reciclados provenientes da demolição das lajes de betão.

Palavras-chave: agregados reciclados; pavimento rígido; resíduos de construção e demolição; dimensionamento de pavimento

1 Introdução

A nível mundial a indústria da construção utiliza cerca de 50 % dos materiais extraídos da Crosta Terrestre [1], parte significativa para fornecimento de agregados para a construção de infraestruturas, tanto na fase de execução de novos empreendimentos como na fase de reabilitação e conservação das infraestruturas já existentes, e simultaneamente é responsável por 36,4 % do total de resíduos gerados na UE nas fases de reabilitação/conservação. A consciencialização, cada vez mais presente em todos os agentes do setor da construção, que as atividades da construção são sugadoras de recursos naturais e simultaneamente, geradoras de resíduos, traduz-se em políticas públicas (nacionais e europeias), diretivas, recomendações, regulamentos e normativos, emanados por entidades governamentais, organizações, centros de investigação nacionais e internacionais com o objetivo de desenvolver uma estratégia de sustentabilidade do setor, aliada à circularidade dos materiais, onde o modelo de economia

circular toma a sua primazia e o valor dos produtos é mantido durante o maior tempo possível. Há, assim, o objetivo dos resíduos e da utilização dos recursos serem minimizados e quando um produto atinge a fase final da vida seja reutilizado para criar um valor adicional, ou seja, uma aplicação berço-a-berço (*cradle-to-cradle*¹) [2], contribuindo para a conceção, implementação e exploração de infraestruturas sustentáveis e resilientes.

De encontro com essa estratégia a Organização das Nações Unidas (ONU) estabelece, em 2015, dezassete Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) que constituem a denominada Agenda 2030. Dos 17 ODS destacam-se os objetivos 9 - Indústria, Inovação e Infraestruturas e 12 – Produção e Consumos Sustentáveis, com programas de financiamento e estímulo à construção de infraestruturas rodoviárias resilientes e sustentáveis e campanhas de promoção à melhor gestão dos resíduos, aumentos das taxas de reutilização, reciclagem e valorização dos resíduos.

Em Portugal a rede nacional de infraestruturas rodoviárias encontra-se numa fase de maturação onde os grandes desafios são colocados não nas áreas de novos empreendimentos, mas sim na reabilitação/conservação das infraestruturas existentes. Neste contexto surge como um grande desafio de reabilitação/conservação de estradas a adoção de soluções de pavimentação com o máximo de aproveitamento dos recursos disponíveis, tanto a nível económico como de materiais existentes, onde conceitos como reutilizar, reaproveitar e reciclar estejam bem presentes nas soluções de reabilitação a preconizar.

Uma das melhores soluções para uma boa gestão técnica, económica e ambientalmente sustentável dos recursos materiais e inserida numa perspetiva de economia circular, é a utilização de agregados reciclados em substituição dos agregados naturais, agregados provenientes do próprio setor ou de outros setores industriais. Essa substituição torna-se mais desafiante nas situações de maior solicitação para a infraestrutura, isto é, quando a infraestrutura é sujeita a volumes de tráfego pesado exigentes, caracterizada com um TMDp > 300 veículos pesados/sentido que se considera volume de tráfego moderado e elevado².

Nesta comunicação apresenta-se o Estudo de Caso do IC2 (EN1), em Portugal, composta por duas partes: fase de projeto e fase de obra; esta divisão deve-se, essencialmente, às alterações do estado do pavimento entre o término do projeto e o início dos trabalhos da empreitada, um intervalo com mais de 5 anos. O IC2 (EN1) caracteriza-se por um troço de estrada, com elevado tráfego pesado, de pavimento rígido, constituído por lajes de betão, que passou de moderada degradação a uma degradação severa com elevado fendilhamento e com indícios de instabilidade das lajes em relação à camada subjacente; simultaneamente, as avaliações dos parâmetros funcionais, nomeadamente de regularidades, foram classificadas de Mau em ambas as fases. Assim, a solução preconizada em projeto, que consistia essencialmente numa reabilitação funcional, sofreu diversas adaptações, em fase de obra, e tornando-se numa reabilitação estrutural, convertendo o pavimento rígido num pavimento semirrígido, de estrutura indireta, com o aproveitamento de 2 das 3 camadas existentes e executar uma camada de interface, entre a base existente, em agregado britado de granulometria extensa com cimento (AGEC), e as misturas betuminosas novas, em agregado britado de granulometria extensa (ABGE) incorporando resíduos de construção e demolição (RCD) proveniente da demolição das lajes de betão. A incorporação de RCD numa estrada de elevado tráfego pesado, tendo em atenção as recomendações da utilização destes materiais que estão restringidas a baixo tráfego pesado, explanadas em especificações técnicas nacionais, tornou-se o grande desafio. Por isso, foram desenvolvidas 3 misturas de ABGE com a incorporação de 0 %, 30 % e 50 % de RCD proveniente da demolição das lajes e pretende-se avaliar e aferir as características dos materiais, métodos construtivos e comportamento mecânico das misturas, contribuindo para a confiança da utilização de agregados reciclados no setor da construção.

¹ Em oposição à aplicação da economia linear *cradle-to-grave* (berço-sepultura)

² Nos EUA, Hoppe, 2015 designa tráfego médio com um TMAp de 100 a 1000 veículos pesado/sentido e tráfego alto com um TMDp > 1000 veículos pesados/sentido.

2 Enquadramento

Os RCD são uma potencial fonte de agregados reciclados (AR) de qualidade, desde que devidamente processados, e incorporados em projetos de infraestruturas. Para além disso, a sua eliminação, depositando em aterro, tem um custo ambiental e económico muito elevado, as taxas de gestão de resíduos, desde 2007 até agora, teve um aumento de cerca de 400 %³; medida associada ao estímulo de maximizar a reutilização de resíduos, numa perspetiva do modelo de economia circular, de substituir parcial ou totalmente os agregados naturais (AN).

A substituição de agregados naturais por agregados reciclados tem de garantir os requisitos técnicos e ambientais das obras onde vão ser utilizados [3]. Atendendo à recente aplicação destes agregados há pouca informação relativa ao desempenho a longo prazo das infraestruturas [3], o que leva a que a sua utilização seja balizada em normalizações e regulamentações desenvolvidas para agregados naturais; as suas diferentes propriedades físicas, geométricas, mecânicas e ambientais [4] exigem a necessidade de desenvolver metodologias de avaliação, e identificação, assim como normativos de controle de qualidade em fase de projeto, execução de obra (fase preliminar com estudos de formulação, fase de execução e pós-obra) e avaliação de desempenho em fase de exploração da infraestrutura.

As especificações técnicas existentes, em Portugal, sobre esta temática, referem-se a Resíduos de Construção e Demolição (RCD) catalogados no capítulo 17 da Lista Europeia de Resíduos (LER)⁴, para as aplicações nas camadas não ligadas (leito de pavimento⁵, sub-base e base) e encontram-se explanadas nas Especificações LNEC, nomeadamente nos Guias E-471 a 474, 2009 e a E-483-2016, tendo a transposição das quatro primeiras especificações (E-471 a 474, 2006) sido contempladas no Caderno de Encargos Tipo de Obra (CETO) da IP,SA [5].

As especificações LNEC, em particular as especificações E-473, 2009- *Guia para a utilização de agregados reciclados em camadas não ligadas de pavimentos*, fornecem recomendações e requisitos para a utilização dos AR, nomeadamente, recomendações de processamento e armazenamento dos RCD, aspetos ambientais a ter em consideração, classificação e identificação dos RCD, propriedades e requisitos mínimos de utilização e controlo de qualidade. Contudo, as especificações LNEC restringem o campo de aplicação destes agregados a determinados valores de Tráfego Médio Diário de pesados (TMDp), por sentido, a valores de Classes de Tráfego consideradas de Baixo. Para os agregados reciclados com melhor desempenho, classificados de AGER3 com natureza de constituintes B, a aplicação de camadas não ligadas de pavimento está recomendada para TMDp igual ou inferior a 300.

A consciência de inevitabilidade da utilização de agregados reciclados, assim como da necessidade de conhecer melhor o seu comportamento nomeadamente, em infraestruturas rodoviárias tornou-se bem evidente nos finais do século XX com o desenvolvimento de projetos de investigação financiados pela comissão europeia [1], a título exemplificativos tivemos os programas: COST 337⁶-“*Unbound granular materials for road pavements*”, COURAGE (Construction with Unbound Road Aggregate in Europe) e ALT-MAT-ALternative MATerials in road construction. Em Portugal, o Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) e o Instituto Superior Técnico (IST) iniciaram em finais de 2010, com a duração de 3 anos, o desenvolvimento de um projeto de investigação, apoiado pela Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT), intitulado SUPREMA – *Aplicação Sustentável de Resíduos de Construção e*

³ Em 2007 a taxa de gestão de resíduo era de 5€/t, atualmente o Decreto-Lei 102-D/2020, transpondo as Diretivas UE 2018/850 e UE 2018/851, atualiza o valor desta taxa para 22 € por tonelada (em 2022) e indica os valores de 25, 30 e 35 € por tonelada para os anos de 2023, 2024 e 2025, respetivamente.

⁴ Portaria nº209/2004

⁵ Camada não ligada de terraplenagem

⁶ O programa COST 337 surgiu como proposta de um grupo de investigadores do FEHRL, tendo como antecedente o estudo de materiais britados não tratados: SP01-GRAN-MAT-“*Unbound granular materials*”, e entidades interessadas em materiais granulares britados ao Comité Técnico para os Transportes.

Demolição (RCD) em Infraestruturas Rodoviárias, que pretendeu contribuir para a generalização da aplicação sustentável de RCD em pavimentos rodoviários, através da melhoria do conhecimento relativo ao desempenho do comportamento mecânico e ambiental destes materiais, quando colocados como agregados em camadas não ligadas de pavimentos [6].

Todos estes programas de investigação pretendiam desenvolver especificações para os novos materiais já que as especificações técnicas existentes, na sua maioria empírica, baseiam-se em requisitos e propriedades associados aos materiais naturais; contudo, na prática é dado a observar que os ensaios empíricos e correlações desenvolvidos para os materiais naturais não preveem corretamente o comportamento destes materiais quando aplicados em obra.

A aplicação de agregados reciclados em camadas, não ligadas, de pavimentos encontra-se na generalidade dos países na mesma trajetória, mas a velocidades muito diferentes, países com especificações técnicas e normativos bem consolidados, outros a iniciar os estudos e os primeiros normativos [1], [3], [4], [6]. Uma das conclusões retiradas das inúmeras investigações é a premência de executar trechos experimentais com vista à avaliação de desempenho das misturas com agregados reciclados, isto porque a generalidade dos autores aponta dificuldades, em laboratório de reproduzir as condições reais, correlacionar todas as variáveis envolvidas e simultaneamente aferir com as propriedades dos materiais. Outro aspeto relevante é a aferição dos métodos construtivos aplicados aos novos materiais.

3 Estudo de caso

3.1. Fase de Projeto

3.1.1. Características da obra

Neste artigo apresenta-se o Caso de Estudo do IC2 (EN1), em Portugal, entre as localidades de Asseiceira (concelho de Rio Maior e distrito de Santarém) e de Freires (concelho de Alcobaça e distrito de Leiria), troço que segundo o Plano Rodoviário Nacional 2000 (PRN2000) integra a concessão da Infraestruturas de Portugal (IP) e faz parte de Rede Complementar (Itinerários complementares) da Rede Rodoviária Nacional, numa extensão total de 20,3km.

O perfil transversal tipo (1x2) caracteriza-se por uma plataforma pavimentada de 12,00 m de largura, com uma faixa de rodagem de 7,00 m de largura e bermas de 2,50 m de largura (cada), pontualmente há uma terceira via com 3,00 m de largura, totalizando 3 vias de lentos ao longo do troço.

O volume de tráfego é moderado, com a particularidade de ter tráfego pesado muito elevado, tanto em percentagem (acima dos 15 %) como em valores de veículos pesados a circular. O valor de tráfego pesado para o ano de entrada em serviço (2016) e para o ano horizonte (2026) e tendo em consideração as classes de tráfego definidas no Manual de Conceção de Pavimentos para a Rede Rodoviária Nacional (MACOPAV) [7] apresenta os seguintes valores de TMDA (por sentido) e a respetiva classe (Quadro 1).

Quadro 1. Valores de TMDA (pesados) por sentido e respetiva classe de tráfego

Trecho	Zona	2016	
		TMDAp/ sentido	Classe Tráfego
Km 65+200 - km 77+215	1-pavimento rígido	1786	T1
Km 77+215 – km 85+500	2-pavimento flexível	2292	T0

O Estudo de Caso incide na Zona 1, onde a tipologia do pavimento é rígida (construído em 1987), constituído por uma laje de betão, com 0,23 m de espessura, com varões de transmissão de carga e passadores, assente numa camada de base em agregado britado com cimento, com

0,15 m de espessura, e uma camada de leito de pavimento com 0,10 m de agregado britado de granulometria extensa.

3.1.2. Caracterização da Situação Existente

A Caracterização da Situação Existente (CSE), parte significativa foi elaborada pela firma projetista *Cenor, Consulting Engineers*, no âmbito do projeto de reabilitação “IC2 (EN1) – Beneficiação entre Asseiceira (km 65+200) e Freires (km 85+500)” [8], com o objetivo de caracterizar os parâmetros estruturais e funcionais do pavimento existente, baseando-se nos seguintes elementos:

1. Inspeção visual e catalogação das patologias feita com base no Catálogo de Degradações dos Pavimentos Rodoviários da EP [9];
2. Trabalhos de campo: medição da irregularidade longitudinal (IRI); ensaios de carga (FWD); sondagens à rotação e poços no pavimento; Determinação da Eficácia da Transferência de Cargas entre as Lajes;
3. Nas sondagens à rotação foram recolhidos tarolos e posteriormente executados ensaios de compressão diametral;
4. Nos poços foram realizados ensaios de laboratório sobre amostras remexidas (materiais granulares e solo de fundação): análise granulométrica, limites de consistência Atterberg (liquidez e plasticidade), equivalente de areia, compactação pesada (Proctor modificado) e determinação do CBR (para as condições ótimas e “in situ” de fundação).

Na inspeção visual realizada concluiu-se que o pavimento existente é do tipo rígido, constituído por lajes de betão com varões de transmissão de carga e passadores e apresenta uma degradação moderada a severa, as patologias observadas ao longo do troço foram identificadas segundo o catálogo de degradações da IP e apresentavam em quase 70 % da sua área qualquer tipo de patologia, destacando-se as diversas tipologias de fendilhamento (de fadiga e de retração) e diferentes severidades (de grau I ao grau III), desagregação da laje e das juntas e pontualmente escalonamento das lajes.

Relativamente à medição da irregularidade longitudinal (IRI), International Roughness Index confrontando com os valores admissíveis estipulados no Caderno de Encargos Tipo Obra (CETO) da IP para pavimentos rígidos, obtiveram-se os resultados apresentados no Quadro 2.

Quadro 2. Valores admissíveis de IRI (m/km), calculados por troços de 100m em pavimentos rígidos

IRI exigido		Percentagem da extensão da obra		
		50 %	75 %	90 %
		≤ 2,0	≤ 2,5	≤ 3,0
Camada de desgaste em Betão	Sentido Crescente: via da direita	12,4 %	39,7 %	71,9 %
	Sentido Crescente: via de lentos	6,67 %	10,0 %	40,0 %
	Sentido Decrescente: via da direita	10,8 %	30,3 %	63,9 %
	Sentido Decrescente: via de lentos	0,0 %	12,5 %	25,0 %

Constata-se que de acordo com as frequências dos valores de IRI obtidos, em ambos os sentidos e nas vias da direita e lentos, a classificação, segundo o CETO, o troço em questão, tem

a classificação de “Mau”. Se efetuarmos uma análise estatística do IRI, por extensões de 500m e por sentido, conclui-se que próximo de 75 % da extensão é classificado de “Mau”.

Relativamente à capacidade de carga instalada no pavimento, identificaram-se, com base nos resultados nos ensaios com defletómetro de impacto, no centro das lajes, 11 zonas de comportamento estrutural homogéneas, nas vias direitas e de lentos em ambos os sentidos, que foram determinantes para a seleção dos trabalhos de campo (sondagens e poços ao pavimento); tendo a avaliação da capacidade de carga revelado um bom desempenho e garantindo uma vida útil, para acerca de 90 % da área, de mais de 10 anos.

Com base nos resultados dos ensaios com defletómetro foi também medida a eficácia da transferência de carga entre lajes, de uma forma geral podemos considerar que é de razoável a excelente com alguma ineficácia pontual (nas vias direitas dos dois sentidos).

Os trabalhos de campo consistiram na execução de 10 sondagens, com extração de tarolo, e na execução de 5 poços de prospeção. As espessuras da laje de cimento obtidas nas sondagens à rotação são muito homogéneas, com valores de 0,22 m e de 0,24 m, há um valor 0,27 m e dois valores que ultrapassam a espessura de 0,40 m, eventualmente com a camada de base, em agregado britado com cimento, associada. Os poços foram executados nas bermas e revelaram uma estrutura de pavimento flexível com misturas betuminosas, com espessuras de 0,08 m a 0,13 m, e material granular, com espessuras de 0,40 m a 0,60 m, assente em solos de fundação.

Finalmente, os ensaios de compressão diametral efetuados em provetes obtidos nos trechos em pavimento rígido, revelam os valores de tensão de rotura à compressão diametral de 0,7 MPa a 1,2 MPa, valores expectáveis para as estruturas em causa.

Com base em toda a informação recolhida, desde inspeção visual até resultados de ensaios de campo, elaborou-se uma síntese da caracterização da situação existente; espelhando os dados em gráfico de barras (Figura 1), podemos verificar que 100 % da extensão apresenta má regularidade e quase 70 % da extensão apresenta qualquer tipo de fendilhamento com severidades I, II e III. Não há indícios de falta de capacidade carga, mas quase 10 % da área das lajes de betão requer a sua reconstrução.

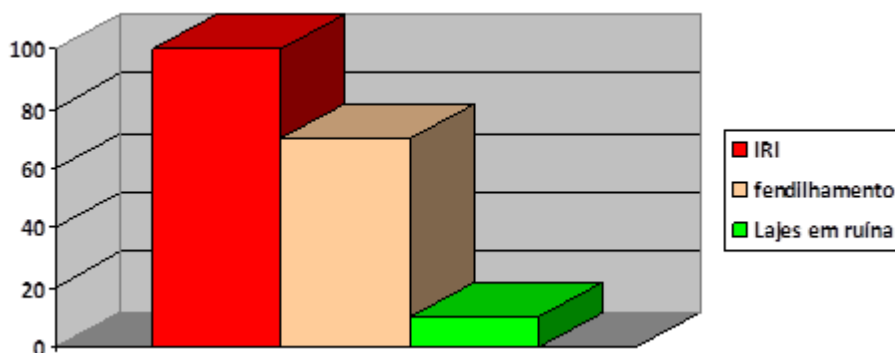


Figura 1. Síntese da Caracterização do Pavimento, fase de projeto (em percentagem)

Com base neste diagnóstico a solução de projeto pretendeu resolver as não conformidades funcionais existentes (regularidades e fendilhamento) e reparação em perto de 10 % das lajes de cimento.

3.1.3. Soluções de pavimentação preconizadas

Feito o diagnóstico da situação existente, as propostas de intervenção no troço podem ser divididas em dois grupos: 1 - soluções para zonas de manutenção das lajes de betão que necessitem ou não de tratamento, com não conformidades funcionais, desde severidade do tipo I até severidade do tipo III; 2 - solução para zonas de remoção das lajes de betão.

No Quadro 3 descreve-se sumariamente as principais soluções propostas, omitindo por questões de relevância, as soluções em pequenos trechos da plena via e trechos fora da seção corrente.

Quadro 3. Síntese das Soluções preconizadas em fase de projeto

Propostas de Intervenção- reabilitação do pavimento rígido			
Situação	Solução	Estrutura de pavimentação proposta	
Zonas de manutenção das lajes de cimento com más características funcionais	Reforçar o pavimento com duas camadas de misturas betuminosas (100% da extensão) + Tratamento de fendas (30%-40% da extensão) + Eventual tratamento da camada subjacente à laje	0,06m	SMA 16 surf PMB 45/80+75 AF
		0,07m	AC20 reg/ 35/50 (MBD)
		0,23m	Laje de betão
		0,15m 0,10m	AGEC ABGE
Zonas com lajes de betão degradadas	Reforçar o pavimento com duas camadas de misturas betuminosas (100% da extensão) + Demolição/reconstrução das lajes de betão (10% da extensão) + Eventual tratamento da camada subjacente à laje	0,06m	SMA 16 surf PMB 45/80+75 AF
		0,07m	AC20 reg/ 35/50 (MBD)
		0,23m	Laje de betão
		0,15m 0,10m	AGEC ABGE

3.2. Fase de Obra

3.2.1. Caracterização do estado do pavimento e solução de pavimentação preconizada

No âmbito da execução da empreitada e nos trabalhos preparatórios, após mais de 5 anos da caracterização da situação existente do projeto, foi feita uma nova inspeção com auxílio de meios aéreos, drones, onde se verificou um incremento de 400 % da área das lajes a necessitar de demolição e reconstrução. Para além disso, foram feitos poços de investigação, em plena via, nas zonas com lajes danificadas e em zonas sem patologias visíveis à superfície, e verificou-se a existência de vazios (ocos) entre a laje de betão e a camada subjacente num terço dos poços realizados; espelhando os dados em gráfico de barras (Figura 2) podemos verificar que 100 % da extensão apresenta má regularidade e quase 70 % da extensão apresenta qualquer tipo de fendilhamento com severidades I, II e III, quase 50 % da área tem lajes de betão em ruína e indícios que um terço das lajes, mesmo quando não apresentam patologias à superfície, não estejam assentes, em toda a sua área, na camada de AGECE.

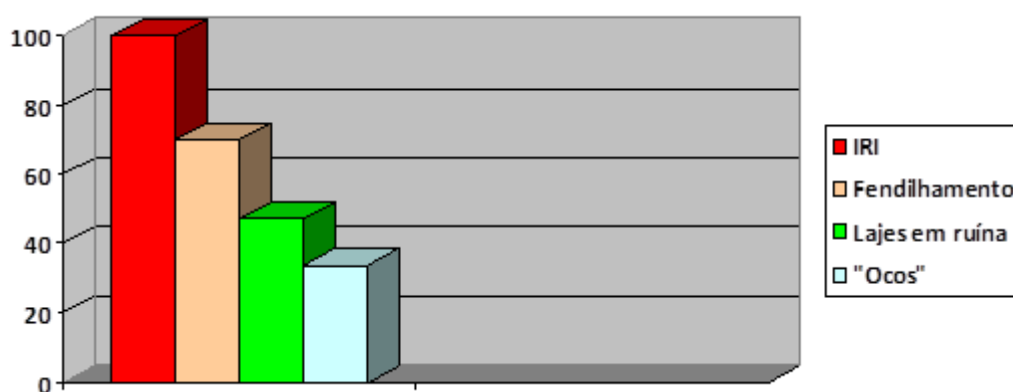


Figura 2. Síntese da Caracterização do Pavimento, fase de obra (em percentagem)

Face à evolução do estado de degradação considerou-se que a solução de projeto, embora exequível, não apresentava a melhor resposta já que necessitava de algumas adaptações, nomeadamente, à existência de vazios entre a laje e a camada subjacente, não detetada em nenhuma prospeção executada em fase de projeto. As necessárias adaptações e o incremento muito significativo das quantidades de trabalho, que o atual estado do pavimento impunha, e tendo em atenção um potencial comportamento heterógeno do pavimento, foi considerado o desenvolvimento de uma alteração significativa à solução inicial: o pavimento rígido passou a um pavimento semirrígido de estrutura indireta, constituindo uma única solução ao longo de todo o troço e tentando reutilizar ao máximo as camadas existentes.

Assim, a estrutura considerada manteve a camada de agregado britado de granulometria extensa (ABGE) com 0,10m de espessura e a camada em agregado britado de granulometria extensa com incorporação de cimento (AGEC) com 0,15m de espessura. Após estas camadas foi considerada uma camada em ABGE com incorporação de 30 % de resíduos da laje removida da estrutura de pavimento existente, com 0,15m de espessura, de forma a realizar um aproveitamento do material existente e contribuir para um modelo de economia circular.

No que respeita as misturas betuminosas optou-se por manter as inicialmente previstas em projeto, com o acrescento de uma camada de base betuminosa de forma à estrutura garantir um melhor comportamento ao fendilhamento à fadiga.

No Quadro 4 é apresentado o modelo de dimensionamento considerado para a solução proposta de reabilitação do pavimento rígido. O dimensionamento teve por base o método racional que recorre ao cálculo dos estados de deformação e de tensão induzidos na estrutura do pavimento, e respetiva fundação, quando a mesma é solicitada pelos eixos dos veículos pesados. No presente estudo foram adotados os critérios: de fadiga controlado pela extensão radial de tração na base das camadas betuminosas, de fadiga controlado pela tensão máxima de tração no topo e base da camada de AGEC e de deformação permanente controlado pela extensão vertical de compressão no topo do solo de fundação, conforme Quadro 4. Os valores assumidos no cálculo de dimensionamento da estrutura foram estimados de forma a executar um modelo estrutural conservativo, existindo já evidências que garantem módulos de deformabilidade mais elevados.

Quadro 4. Modelo de dimensionamento e capacidade estrutural da solução proposta

Modelo de dimensionamento – reabilitação do pavimento rígido			
	Espessura (m)	E (MPa)	v
SMA16 surf PMB 45/80-65	0,06	2600	0,35
AC20 reg 35/50 (MBD)	0,07	4200	0,35
AC20 base 35/50 (MB)	0,08	4600	0,35
Mistura de ABGE + RCD	0,15	150	0,35
AGEC	0,15	3000	0,25
ABGE	0,10	90	0,35
Leito do Pavimento		60	0,35

Capacidade estrutural da solução proposta	
Dano Fadiga Tração	77 %
Dano Fadiga Tensão	0 %
Dano Deformação Permanente	32 %

No cenário admitido de condições de tráfego expectáveis para os 10 anos de período de dimensionamento, de condições de fundação e de características mecânicas dos materiais, conclui-se que a solução de pavimentação projetada tem a necessária capacidade estrutural.

Desta forma, sintetiza-se no Quadro 5 a solução preconizada tendo como base os pressupostos e considerações mencionadas anteriormente.

Quadro 5. Solução preconizada segundo o modelo “economia circular”

Propostas de Intervenção- reabilitação do pavimento rígido		
Situação	Solução	Estrutura de pavimentação proposta
Em todas as zonas do troço	Pavimento semirrígido de estrutura indireta 1 – Manter as misturas betuminosas preconizadas 2- Substituição da laje por duas camadas: AC20 base 35/50 (MB)+ 15cm de ABGE (70%) +RCD (30%) 3- Manter as camadas de agregado britado com cimento- AGECE e ABGE	0,06m SMA 16 surf PMB 45/80+75 AF
		0,07m AC20 reg/ 35/50 (MBD)
		0,08m AC20 base 35/50 (MB)
		0,15m Mistura de ABGE+ RCD
		0,15m 0,10m AGECE ABGE

4 Camadas de Misturas não ligadas com agregados reciclados de betão

A implementação da solução de pavimentação com a incorporação de agregados reciclados, neste caso RCD, teve como primeiro passo a demolição das lajes de betão garantido que o procedimento, a adotar, não afetaria a camada subjacente; procedeu-se a um trabalho prévio de picagem da laje com um espaçamento que foi ajustado “in situ” face à degradação das lajes (Figura3). De seguida procedeu-se à demolição das lajes e posterior transporte dos resíduos para a central de britagem.

4.1.1. Formulação das Misturas de Agregados Naturais com incorporação de RCD

Os resíduos resultantes da demolição das lajes de betão foram processados (Figura 3), tendo sido taqueados e britados, acerca de 70 mil toneladas, e posteriormente procedeu-se aos ensaios requeridos para a marcação CE, com certificado, declaração de conformidade e ficha técnica, caracterizados tendo em atenção as propriedades preconizadas na NP EN 13242:2001+A1:2010 e consideradas aplicáveis ao material em causa e à aplicação prevista, e que contemplam as seguintes propriedades: granulometria, forma das partículas, plasticidade dos finos, resistência à fragmentação, resistência ao desgaste, durabilidade, dureza e limpeza do material.



Figura 3. Processo de demolição das lajes de betão e agregados reciclados de betão

Com a caracterização dos constituintes da mistura o passo seguinte foi a elaboração do estudo laboratorial da própria mistura, onde é obrigatório as seguintes informações [5]:

- Designação da mistura e a sua origem;
- Requisitos relativos à mistura de agregados;

- Curva granulométrica de referência (fórmula da mistura) e conteúdo máximo, mínimo e percentagem de material que passa no peneiro superior D, em conformidade com as especificações técnicas;
- Valores de baridade seca e do teor de água ótimo, determinados pelo método de ensaio de compactação Proctor de acordo com a EN 13286-2;

Uma vez que se trata de agregados reciclados foram determinadas as propriedades químicas nomeadamente a determinação do teor de sulfatos solúveis em água de acordo com a EN 1744-1 e a determinação de substâncias perigosas de acordo com a EN 12457-4.

Os resultados dos ensaios aos RCD quando confrontados com os resultados do agregado natural, de origem calcária, revelam diferenças significativas, como se pode observar no Quadro 6.

Quadro 6. Avaliação das duas soluções ponderadas em fase de projeto

Avaliação das Soluções			Misturas	
Ensaio Laboratorial	ABGE	RCD	1	2
Equivalente de Areia (NP EN 933-8)	54 %	40 %	55 %	
Azul Metileno (NP EN 933-9)	0,50	0,50	0,50	
Índice de achatamento (NP EN 933-5)	10 %	26 %	29 %	33 %
Absorção entre 0.063 mm e 4mm Absorção entre 4mm e 31,5mm Absorção entre 31,5mm e 63mm (NP EN 1097-6)	0,50	4,70	4,02 3,54 2,82	
Resistência à fragmentação- Coeficiente de Los Angeles (NP EN 1097-2)	22 %	49 %	33 %	39 %
Resistência ao desgaste- Coeficiente Micro-deval (NP EN 1097-1)	10	25	19	23
Baridade máxima corrigida (EN 13286-2)			2,27 gr/cm ³	2,25 gr/cm ³
Teor de água ótimo corrigido (EN 13286-2)			6,8 %	7,3 %

Mistura 1: 70 % ABGE + 30 % RCD;

Mistura 2: 50 % ABGE + 50 % RCD

4.1.2. Execução do trecho experimental

Foi executado um trecho experimental com 600m, dividido em 3 seções: 1- 200 m de aplicação de agregado britado de granulometria extensa; 2- 200 m de aplicação da mistura de 70 % ABGE + 30 % RCD e 3- 200 m de aplicação da mistura de 50 % ABGE + 50 % RCD.

O transporte, espalhamento e a compactação, previstas 3 passagens com cilindro de rasto liso e 5 passagens com cilindro de pneus, seguiram o procedimento previamente aprovado, assim como o controle de qualidade preconizado que consistiu na realização de ensaios de análise granulométrica e baridade “in situ”, com a determinação do grau de compactação e do teor de humidade (Figura 4).



Figura 4. Processo de compactação e controle de qualidade do trecho experimental

O controlo de qualidade, referente ao grau de compactação, aponta para dificuldades em atingir os 98% exigidos no caderno de encargos, dado os diferentes valores de baridade máxima e teor em água ótimo em cada seção, tendo o seu controle sido feito por dois métodos: método da garrafa da areia e pelo gamadensímetro.

Para a avaliação da evolução granulométrica do material aplicado e consequentemente realização de novos ensaios para definição dos novos valores da baridade máxima e do teor ótimo corrigido foram recolhidas duas amostras representativas: 1- amostra da mistura após espalhamento e 2 – amostra da mistura após espalhamento e compactação. Na primeira amostra a curva é igual ao do estudo de formulação (em laboratório) e no caso da amostra 2 há uma ligeira diferença, a mistura ficou mais fina, mas em conformidade com os limites do caderno de encargos.

Foram efetuados ensaios carga com defletómetro de impacto, FWD, antes e depois da execução da camada de interface, numa extensão de 600 m (as 3 seções que compõem o trecho experimental), com o objetivo de calcular o módulo resiliente das camadas, nomeadamente da camada em AGECE (camada da estrutura original do pavimento) e na camada de base com as 3 misturas estudadas (taxas de incorporação de 0 %, 30 % e 50 % de RCD), e proceder a uma avaliação de desempenho da camada de base com incorporação de RCD.

5 Considerações finais

Foram apresentados os principais aspetos tidos em consideração na tomada de decisão, em fase de projeto, da solução de reabilitação mais sustentável, com diversas vantagens ambientais, onde se destacam o aproveitamento dos materiais provenientes da demolição das lajes pavimento, eliminação e redução de produtos sobranes a levar a vazadouro. Para além disso, pretende-se deixar as particularidades do uso dos agregados reciclados, onde não há grande histórico da sua utilização, em particular em estradas de elevada solicitação, e requer maior número de estudos laboratórios desde a sua caracterização, formulação de misturas e aplicação em obra devido às suas diferenças relativamente aos agregados naturais.

Atualmente está a proceder-se à avaliação de desempenho destes materiais, através da análise dos resultados de defletometria e que se pretende continuar na fase de exploração da infraestrutura.

6 Agradecimentos

Os autores desejam expressar o seu agradecimento aos colaboradores das entidades IP, JJR & Filhos, bem como às suas administrações pela oportunidade concedida em participar em projetos inovadores, e por ter colocado à disposição todos os recursos, sem exceção, para garantia da boa execução, e que muito contribuíram para a prossecução do trabalho.

7 Referências

- [1] Fortunato, E., Lopes M., Curto, P. & Fonseca, A. (2009). *Valorização dos resíduos de construção e demolião em obras geotécnicas*. Lisboa, Portugal: LNEC.
- [2] Antunes, V. (2019). *Long-Term Behaviour of Recycled Bituminous Mixtures by Evaluation of Multi-Recycling Capacity*. Lisboa, Portugal: IST.
- [3] Fortunato, E., Roque, A. J., A. Gomes Correia & A. (2016). *Comportamento estrutural de um trecho rodoviário construído com agregado siderúrgico para construção (ASIC)*. Lisboa, Portugal: LNEC.
- [4] Ferreira, J. F. (2009). *Aplicação de Resíduos de Construção e Demolição (RCD) em Camadas de Sub-base Não Ligadas de Estradas de Baixo Tráfego*. Lisboa, Portugal: IST.
- [5] Estradas de Portugal, SA, (2014) *Caderno de Encargos Tipo Obra*, Lisboa, Portugal.
- [6] Freire, A., Neves, J., Roque, A., Martins, I. (2011). *SUPREMA-Aplicação sustentável de resíduos de construção e demolição (RCD) em infraestruturas rodoviárias-Ano 1*. Lisboa, Portugal: LNEC.
- [7] JAE (1995). *Manual de Conceção de Pavimentos Para a Rede Rodoviária Nacional*, Lisboa, Portugal, JAE-Junta Autónoma das Estradas
- [8] Infraestruturas de Portugal (2014)., *Projeto de reabilitação “IC2 (EN1) – Beneficiação entre Asseiceira (km 65+200) e Freires (km 85+500”*, Cenor, Consulting Engineers, Lisboa, Portugal.
- [9] Estradas de Portugal, S.A. (2008), *Catálogo de Degradações dos Pavimentos Rodoviários*, Lisboa, Portugal.